

HANDBOK I VATTENKEMI FÖR ENERGIANLÄGGNINGAR

RAPPORT 2015:113



MATERIAL- OCH KEMITEKNIK



Handbok i Vattenkemi för energianläggningar

Utgåva 2015

Handbook - Water treatment for energy producing plants

Edition 2015

MATS HELLMAN

ISBN 978-91-7673-113-0 | © 2015 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se |

Förord

Denna *Handbok i vattenkemi för energianläggningar* är en uppdatering av den handbok som gavs ut som Värmeforskrapport nr 729 i mars 2001. Handboken utgör slutrapportering av projekt M12-217 Uppdatering av handbok för energianläggningar (Energimyndighetens projektnummer P 37044-1) och faller under teknikområde Material- och kemiteknik i det som varit Värmeforsks basprogram.

Programmets övergripande mål är att bidra till långsiktig utveckling av effektiva miljövänliga energisystemlösningar. Syftet är att medverka till framtagning av flexibla bränslebaserade anläggningar som kan anpassas till framtida behov och krav.

All forskningsverksamhet som bedrevs inom Värmeforsk ingår sedan den 1 januari 2015 i Energiforsk. Därför ges denna handbok ut som en Energiforskrapport.

Handboken har sammanställts och uppdaterats av Mats Hellman, Hellman Vatten AB, med ovärderlig hjälp av:

Jüri Tavast, Siemens AB, som skrivit om

- Ångkvalitet
- Beläggningar i turbiner
- Invändig besiktning av turbiner
- Skador i turbiner orsakade av felaktig vattenkemi

Ivan Falk, Force AB, som skrivit om:

- Korrosionsmekanismer
- Beläggningsmekanismer
- Invändig besiktning av pannor
- Utvärdering av beläggningar och tubprover

Lars Bäcklund, Bäcklund Consulting, som skrivit om:

- Membranteknik
- Jonbytesteknik
- Avgasning
- Tungmetalljonbytare

Leif Bjurmalm, Tiami Vattenkemi AB, som skrivit om:

- Mikrobiell tillväxt
- Korrosionsinhibitorer
- Kemikalier för flockning och kemisk fällning
- Kemikalier för behandling av vatten-ångcykeln
- Kemikalier för behandling av kylvattensystem

Referensgruppen har bestått av:

Barbara Goldschmidt, Grontmij AB, Linus Fogelberg, Mälarenergi AB,
Anders Kjörk, Pöyry Sweden AB, Jan Lundgren, Fortum Värme AB och
Mikael Norell, E.ON Värme Sverige AB

Sammanfattning

Det finns inte så mycket litteratur inom teknikområdena matarvattenbehandling och kylvattenbehandling utgiven på svenska. Värmeforsks rapporter står för en stor del av det material som utgivits.

Värmeforsk gav bl.a. ut rapporten *Handbok i vattenkemi för energianläggningar*, 2001, vilken används som uppslagsverk vid många svenska energianläggningar. Flera kapitel i handboken har på senare år skrivits om i fristående Värmeforskrapporter, t.ex. provtagning, riktvärden, konservering etc. då materialet i handboken ansetts vara föråldrat.

Det har hänt en hel del inom teknikområdet de senaste 20 åren vilket motiverat en uppdatering av hela handboken. De fristående rapporterna har integrerats i handboken och resterande kapitel uppdaterats.

Ett flertal experter inom det aktuella teknikområdet har nått, eller kommer inom kort att nå, pensionsåldern. De har bidragit med kunskap och erfarenheter från sina speciella teknikområden och den unika kunskap de besitter har dokumenterats och införlivats i handboken.

De värmeforskrapporter som helt eller delvis implementerats i handboken kommer att finnas kvar i Värmeforsks rapportdatabas. Även om de väsentligaste delarna finns med i handboken kan de utgöra en källa till kunskap för den som vill fördjupa sig ytterligare i det aktuella ämnet eller studera referensmaterialet i originalrapporten. Aktuella Värmeforskrapporter anges i inledningen till varje kapitel. Värmeforsks rapport nr 729, *Handbok i vattenkemi för energianläggningar* version 2001, kommer dock utgå.

Summary

There is not much literature available in Swedish in the field of power plant chemistry. Reports published by Värmeforsk reports represent a large proportion of the literature available.

Värmeforsk published the report *Handbook in Cycle Chemistry* in March 2001, which is used as a reference document in many Swedish energy producing plants. Several chapters in this Handbook have in recent years been rewritten as standalone Värmeforsk Reports, e.g. sampling, target values and lay-up as the content was considered being obsolete.

The development in the field of water treatment during the past 20 years justified an update of the entire manual. The standalone reports have been integrated into the Handbook and the remaining chapters have been updated.

A number of experts in the field of cycle chemistry has reached, or will soon reach, the age of retirement. They have contributed with knowledge in their particular areas of expertise and the unique knowledge they possess has been documented and incorporated into the manual.

The standalone Värmeforsk Reports, wholly or partially implemented in the Handbook will remain in Värmeforsk Report database. Although the essential features are included in the Handbook they can be a source of knowledge for those who wish to immerse themselves further in the subject or study the reference materials in the original report.

The relevant Värmeforsk Reports are referred to in the introduction to each chapter. However the Värmeforsk Report No. 729, *Handbook in Cycle Chemistry*, will be deleted.

Innehåll

1	INLEDNING	16
1.1	RESERVATION	16
1.2	FÖRKORTNINGAR	17
2	ALLMÄNT OM VATTEN	19
2.1	VAD ÄR VATTEN?	19
2.2	VATTNETS EGENSKAPER	20
2.2.1	AGGREGATIONSTILLSTÅND	20
2.2.2	KEMISKA OCH FYSIKALISKA EGENSKAPER	20
2.3	FÖREKOMST	23
2.4	VATTNETS KRETSLOPP I NATUREN	24
2.4.1	VATTEN-ÅNGCYKELN	25
2.5	FÖRORENINGAR I VATTEN	25
2.5.1	KONCENTRATION AV FÖRORENINGAR	25
2.5.2	SALTER	27
2.5.3	KONDUKTIVITET	28
2.5.4	SYROR OCH BASER	31
2.5.5	PH-VÄRDE	32
2.5.6	HÅRDHET	34
2.5.7	KISELSYRA	37
2.5.8	GASER	39
2.5.9	ORGANISKT MATERIAL	42
2.5.10	FASTA PARTIKLAR	46
2.5.11	MIKROORGANISMER	49
2.6	PERIODISKA SYSTEMET	50
3	ENERGISYSTEM	51
3.1	INLEDNING	51
3.2	VATTENBEHANDLINGENS PLATS I ENERGISYSTEMEN	51
3.3	KRAFTPRODUKTION	52
3.3.1	FÖLJDER AV DRIFT MED FÖRORENAD ÅNGA	53
3.3.2	GASKOMBIANLÄGGNINGAR	65
3.3.3	INDUSTRIELLA SYSTEM FÖR ÅNGPRODUKTION	66
3.4	RGK	66
3.5	HETVATTEN- OCH FJÄRRVÄRMESYSTEM	67
3.5.1	VATTENKVALITET I FJÄRRVÄRMESYSTEM	69
3.6	KYLPRODUKTION	69
3.6.1	LUFTVÄRMEVÄXLARE	70
3.6.2	GENOMSTRÖMMANDE KYLSYSTEM	70
3.6.3	SLUTNA KYLSYSTEM	70
3.6.4	ÖPPNA KYLSYSTEM	70

4	SKADOR OCH SKADEMEKANISMER I PANNOR.....	71
4.1	BAKGRUND	71
4.2	OXIDER OCH BELÄGGNINGAR	71
4.2.1	OXIDSKIKT	72
4.2.2	BELÄGGNINGAR I TUBER FRÅN KRAFTVERKSPANNOR	74
4.2.3	BELÄGGNINGAR I TUBER FRÅN INDUSTRIPANNOR	75
4.2.4	ÖVERHETTARTUBER	78
4.3	KORROSION OCH KORROSIONSSKADOR	82
4.3.1	INLEDNING	82
4.3.2	KORROSION	82
4.3.3	ALKALISK SPÄNNINGSKORROSION	90
4.4	SKADOR ORSAKADE AV ÖVERHETTNING OCH UTMATTNING	92
4.4.1	VÄRMEÖVERFÖRING - KOKFÖRLOPP	92
4.4.2	HIDE-OUT	93
4.4.3	ÖVERHETTNINGSSKADOR	95
4.4.4	KORROSIONSUTMATTNING	96
4.5	TUBSKADOR ORSAKADE AV KOPPAR	98
4.5.1	KOPPAR I BELÄGGNINGAR	99
4.6	HETVATTENOXIDATION	104
4.6.1	KORTFATTAD BESKRIVNING AV HETVATTENOXIDATION	104
4.6.2	OLÄMPLIG KONSTRUKTION	105
4.6.3	CIRKULATIONSFEL VID ÖVERLAST	106
4.6.4	ÅNGSPALTER UNDER TJOCKA BELÄGGNINGAR	108
5	SKADOR OCH SKADEMEKANISMER I TURBINER.....	112
5.1	SKADOR OCH SKADEMEKANISMER I TURBINER	112
5.2	KORROSIONSUTMATTNING	112
5.2.1	KONSEKVENSER OCH KÄNNETECKEN	113
5.2.2	MEKANISM OCH INVERKANDE FAKTORER	117
5.2.3	BETYDELSEN AV FRÄTGROPAR	120
5.2.4	MEKANISK LAST	122
5.2.5	INVERKAN AV SKOVELMATERIAL	123
5.2.6	REKOMMENDATIONER	123
5.2.7	SLUTSATSER	123
5.3	SPÄNNINGSKORROSION	124
5.3.1	ERFARENHETER AV SPÄNNINGSKORROSIONSPRICKNING I ÅNGTURBINER	124
5.3.2	INVERKANDE FAKTORER	127
5.3.3	SLUTSATSER	130
5.4	EROSIONSKORROSION	131
5.4.1	ERFARENHETER, UTSEENDE OCH LOKALISERING AV ANGREPP	131
5.4.2	ÅTGÄRDER PÅ KEMISIDAN	140
5.5	STILLESTÅNDSKORROSION	141
5.5.1	INVERKANDE FAKTORER	143
5.5.2	MÖJLIGA MOTÅTGÄRDER FÖR ATT UNDVIKA ANGREPP I ÅNGTURBINER	144

6	UTRUSTNING FÖR VATTENRENING	145
6.1	MEKANISKA FILTER	146
6.1.1	FILTER MED YTVERKAN	147
6.1.2	FILTER MED DJUPVERKAN	151
6.1.3	PATRONFILTER	152
6.1.4	ELEKTROMAGNETISKA FILTER	156
6.2	FLOCKNING OCH FÄLLNING	157
6.2.1	FLOCKNINGSPROCESSEN	158
6.2.2	KEMIKALIEDOSERING	159
6.2.3	AVSKILJNING AV FLOCKARNA	162
6.2.4	PROCESSOPTIMERING	164
6.3	JONBYTESTEKNIK	165
6.3.1	AVHÄRDNING GENOM JONBYTE	166
6.3.2	AVSALTNING GENOM JONBYTE	166
6.3.3	JONBYTESMATERIAL	167
6.3.4	REGENERERING	169
6.3.5	UTRUSTNING FÖR JONBYTE	171
6.3.6	KEMISKA FÖRLOPP UNDER AVSALTNING GENOM JONBYTE	174
6.3.7	DRIFTPERIODENS SLUT	176
6.3.8	POLERANDE FILTER	177
6.3.9	UNDERHÅLL OCH ÖVERVAKNING AV AVSALTNINGSANLÄGGNINGAR	178
6.4	MEMBRANTEKNIK, UF – NF – RO	180
6.4.1	PARTIKELFILTREERING OCH MEMBRANFILTREERING	181
6.4.2	MEMBRANTYPER	181
6.4.3	MEMBRANMODULER	182
6.4.4	KRAV PÅ TILLFLÖDET	183
6.4.5	RO-AGGREGATETS UPPBYGGNAD	183
6.4.6	BEGRÄNSNINGAR VID KONSTRUKTION AV ANLÄGGNINGAR	185
6.4.7	FAKTORER SOM PÅVERKAR PERMEATETS KVALITET	187
6.4.8	PERMEATETS SAMMANSÄTTNING	187
6.4.9	KONCENTRATETS SAMMANSÄTTNING	188
6.4.10	POLERING AV PERMEATET	189
6.4.11	UNDERHÅLL AV RO-ANLÄGGNINGAR	190
6.5	EDI	192
6.5.1	ELEKTRODIALYS	192
6.5.2	ELEKTROAVJONISERING	193
6.5.3	UTFÖRANDE AV EDI-AGGREGAT	195
6.5.4	SKÖTSEL OCH UNDERHÅLL	198
7	VATTENBEHANDLING I VATTEN-ÅNGCYKELN	199
7.1	AVGASNING	199
7.1.1	ALLMÄNT	200
7.1.2	KASKADAVGASARE	202
7.1.3	DYSAVGASARE	204
7.1.4	EXPANSIONSAVGASARE.	205
7.1.5	VAKUUMAVGASNING	206
7.1.6	KOLSYREAVDRIVARE	207
7.1.7	MEMBRANAVGASARE	208

7.1.8	KATALYTISK AVGASNING	209
7.1.9	ANNAN KEMISK AVGASNING	210
7.2	AVBLÖDNING, BOTTENBLÅSNING	211
7.2.1	ÅTERVINNING AV BOTTENBLÅSNINGSVATTEN	212
7.3	KEMIKALIEDOSERING TILL VATTEN-ÅNGCYKELN	213
7.3.1	PROBLEMOMRÅDEN	213
7.4	KONDENSATRENING	223
7.4.1	PÅSFILTER OCH SILFILTER	223
7.4.2	ELEKTROMAGNETISKA FILTER	223
7.4.3	PATRONFILTER	224
7.4.4	PRECOATFILTER	224
7.4.5	JONBYTANDE FILTER	226
7.4.6	OLJEHALTIGA KONDENSAT	228
7.4.7	KONDENSAT FÖRORENADE AV LUTAR	228
8	HETVATTEN- OCH FJÄRRVÄRMESYSTEM	229
8.1	HETVATTEN- OCH FJÄRRVÄRMESYSTEM	229
8.1.1	FJÄRRVÄRMESYSTEM	229
8.1.2	MELLANKYLSYSTEM	230
8.2	REKOMMENDERADE RIKTVÄRDEN	231
8.2.1	REKOMMENDERAD SPÄDVATTENKVALITET FÖR STÖRRE SYSTEM	232
8.2.2	REKOMMENDERAD SPÄDVATTENKVALITET FÖR MINDRE SYSTEM	232
8.3	VATTENRENING	234
8.3.1	DELSTRÖMSRENING	234
8.4	EXPANSIONSKÄRL OCH TRYCKHÅLLNING	235
8.5	DOSERING AV KEMIKALIER	237
8.5.1	JUSTERING AV PH-VÄRDET	237
8.5.2	SYREREDUKTIONSMEDEL	238
8.5.3	KORROSIONSINHIBITORER	239
8.5.4	BELÄGGNINGSSINHIBITORER	239
8.5.5	LÄCKSÖKNING	240
9	KONTROLL OCH ÖVERVAKNING	242
9.1	KONTROLL OCH ÖVERVAKNING AV VATTENKVALITETEN	242
9.2	PROVTAGNING	243
9.2.1	FELKÄLLOR	244
9.2.2	KONDENSERING	245
9.2.3	DEPOSITION OCH EROSION	245
9.2.4	ISOKINETISK PROVTAGNING	247
9.2.5	DIMENSIONERING AV PROVTAGNINGSSONDEN	248
9.3	PROVTAGNINGSSYSTEM	250
9.3.1	PROVPUNKTER	250
9.3.2	PROVUTTAG OCH SONDER	253
9.3.3	PROVTAGNINGSLEDNING	255
9.3.4	VENTILER	260
9.3.5	PROVTAGNINGSKYLARE	260
9.3.6	RENSPOLNING	263

9.3.7	VATTENÅTERVINNING	263
9.4	ÖVERVAKNING AV VATTENKEMIN	264
9.4.1	OMFATTNING, KÄRNPARAMETRAR	264
9.4.2	MANUELLA ANALYSER	264
9.4.3	ON-LINEÖVERVAKNING	265
9.4.4	PANNOR MED AVSALTAT SPÄDVATTEN	267
9.4.5	PANNOR MED AVHÄRDAT SPÄDVATTEN	269
9.4.6	DOKUMENTATION	270
9.4.7	UPPFÖLJNING, UTVÄRDERING OCH RAPPORTERING	270
9.4.8	INSTRUKTIONER	271
9.4.9	UTBILDNING	272
9.4.10	REKOMMENDATIONER	272
10	RIKTVÄRDEN.....	274
10.1	BAKGRUND	274
10.2	ALLMÄNT	275
10.2.1	SPÄDVATTENKVALITET	275
10.2.2	PANNVATTENBEHANDLING	277
10.2.3	MATERIAL I SYSTEMEN	279
10.2.4	ÅTGÄRDSNIVÅER	280
10.2.5	KÄRNPARAMETRAR	282
10.2.6	VATTENKVALITETER	289
10.3	RIKTVÄRDEN FÖR VATTEN OCH ÅNGA	290
10.3.1	ÅNGA OCH KONDENSAT	290
10.3.2	PANNOR MED AVSALTAT SPÄDVATTEN	292
10.3.3	PANNOR MED FOSFATKEMI	293
10.3.4	PANNOR MED AVT-KEMI	296
10.3.5	PANNOR MED LUTDOSERING	298
10.3.6	GENOMSTRÖMNINGSPANNOR	299
10.3.7	PANNOR MED AVHÄRDAT SPÄDVATTEN	301
10.3.8	HETVATTENPANNOR	306
10.3.9	HETVATTEN- OCH FJÄRRVÄRMESYSTEM	307
10.4	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	308
11	AVSTÄLLNING OCH KONSERVERING.....	309
11.1	BAKGRUND	309
11.1.1	AVGRÄNSNINGAR	310
11.2	TEORI	310
11.2.1	KORROSION ORSAKAD AV SYRE	311
11.2.2	KORROSION ORSAKAD AV LÅGT PH-VÄRDE	313
11.2.3	INVERKAN AV HÖG SALTHALT	314
11.2.4	LUFTFUKTIGHET	315
11.2.5	LUFTFUKTIGHET OCH AVFUKTNING	317
11.3	METODER FÖR KONSERVERING	319
11.3.1	TORRKONSERVERING	319
11.3.2	UPPFYLLNING	323
11.3.3	VÅTKONSERVERING	323

11.4 VAL AV KONSERVERINGMETOD	327
11.4.1 NY ANLÄGGNING	328
11.4.2 PANNOR	329
11.4.3 ÖVERHETTARE	331
11.4.4 MATARVATTENSYSTEM	332
11.4.5 TURBIN	332
11.4.6 VARMKONDENSORER OCH HETVATTENVÄXLARE	333
11.4.7 KALLKONDENSORER	334
11.4.8 KONDENSATSYSTEM	334
11.4.9 SPÄDVATTENRENING	335
11.4.10 ÖVRIGT	335
11.5 ÖVERVAKNING OCH RIKTVÄRDEN	336
11.5.1 TORRKONSERVERING	336
11.5.2 VÅTKONSERVERING	337
11.5.3 UPPSTART	338
 12 INVÄNDIG INSPEKTION AV PANNOR OCH TURBINER.....	339
12.1 INVÄNDIG INSPEKTION AV PANNOR	339
12.1.1 VISUELL BEDÖMNING	340
12.1.2 TUBPROV	341
12.1.3 UTTAG AV TUBPROV	341
12.1.4 MAKROSKOPISK UNDERSÖKNING	344
12.1.5 METALLOGRAFISK UNDERSÖKNING	345
12.1.6 KEMISK SAMMANSÄTTNING	346
12.1.7 OFÖRSTÖRANDE PROVNING	353
12.2 INVÄNDIG INSPEKTION AV TURBINER	354
12.2.1 FÖRBEREDELSE	355
12.2.2 SKADEMEKANISMER I OLIKA DELAR AV TURBINEN	356
 13 BETNING OCH KEMISK RENGÖRING	358
13.1 BAKGRUND	358
13.2 BETNING AV NYA PANNOR	359
13.2.1 BETNING ELLER BETAS ALKALISK URKOKNING	360
13.3 KEMISK RENGÖRING	360
13.3.1 KONTROLL AV BELÄGGNINGSTILLVÄXT	362
13.4 UTFÖRANDE	364
13.4.1 FÖRBEREDELSE	364
13.4.2 VAL AV KEMISK BEHANDLING	365
13.4.3 CIRKULATION AV KEMIKALIerna	365
13.4.4 FÖRBEHANDLING	367
13.4.5 SYRABEHANDLING	367
13.4.6 NEUTRALISATION OCH PASSIVERING	368
13.4.7 KONTROLL AV RENGÖRINGSPROCESSEN	368
13.4.8 UPPBYGGNAD AV SKYDDSSKIKT	368
13.4.9 AVFALLSKEMIKALIEHANTERING	369
13.5 REKOMMENDATIONER	370

14 RENING AV RÖKGASKONDENSAT.....	371
14.1 BAKGRUND	372
14.2 AVFALLSELDADE ANLÄGGNINGAR	373
14.2.1 RÖKGASKONDENSERING	374
14.2.2 RÖKGASKONDENSATRENING	376
14.3 BIOBRÄNSLEELDADE ANLÄGGNINGAR	384
14.3.1 RÖKGASKONDENSERING	384
14.3.2 RENING AV RÖKGASKONDENSAT	385
14.4 VÄRMEFORSKRAPPORTER OM RÖKGASKONDENSAT	395
 15 KYLVATTEN.....	 396
15.1 KYLVATTENSYSTEM	396
15.1.1 LUFTVÄRMEVÄXLARE	396
15.1.2 DIREKTGENOMSTRÖMMANDE KYLSYSTEM	398
15.1.3 SLUTNA KYLSYSTEM	399
15.1.4 ÖPPNA KYLSYSTEM	401
15.2 SPÄDVATTENKVALITET	405
15.3 FILTRERING	405
15.4 KORROSION I KYLVATTENSYSTEM	406
15.4.1 KORROSIONSSKYDD	407
15.4.2 MÄTTNADSINDEX	409
15.5 MIKROBIELL TILLVÄXT	410
15.6 KEMIKALIEDOSERING	412
15.6.1 PH-JUSTERANDE KEMIKALIER	413
15.6.2 KORROSIONINHIBITORER	413
15.6.3 BELÄGGNINGINHIBITORER	415
15.6.4 BIOCIDER	415
15.7 LEGIONELLA	417
15.7.1 LEGIONÄRSSJUKA OCH PONTIACFEBER	418
15.8 STYRNING OCH ÖVERVAKNING	419
 16 REKOMMENDATIONER FÖR NYA KRAFTVÄRMEVERK	 421
16.1 AVSALTNING AV SPÄDVATTEN	421
16.2 KONDENSATFILTER	421
16.3 PROVTAGNINGSSYSTEM	421
16.4 ONLINE-INSTRUMENTERING	422
16.5 DOSERING	422
16.6 UPPSTART	423
16.7 KONSERVERING	423

BILAGOR

BILAGA A	PERIODISKA SYSTEMET
BILAGA B	MOLLIERDIAGRAMMET

1 Inledning

Syftet med denna *Handbok i vattenkemi för energianläggningar* är att fylla energibranschens och industrins behov av dels en modern introduktion till vattenbehandlingens praxis och till vattenkemin på svenska, dels ett uppslagsverk som ger ett första svar till de frågor som uppstår i dagliga verksamheten.

Handboken riktar sig till driftpersonal, kemister, driftansvariga och alla andra som kommer i kontakt med vattenfrågor. Det är svårt att tillfredsställa alla i en så bred målgrupp varför detaljerade utredningar på expertnivå har undvikits. Förhoppningen är dock att även experter finner några korn.

Handboken har 16 kapitel som behandlar följande områden:

1. Inledning
2. Allmänt om vatten
3. Energisystem
4. Skador och skademekanismer i pannor
5. Skador och skademekanismer i turbiner
6. Utrustning för vattenrening
7. Vattenbehandling i vatten-ångcykeln
8. Hetvattensystem
9. Kontroll och övervakning
10. Riktvärden för vatten och ånga
11. Avställning och konservering
12. Invändig inspektion av pannor och turbiner
13. Betning och kemisk rengöring
14. Rening av rökgaskondensat
15. Kylvatten
16. Rekommendationer för nya kraftvärmeverk

1.1 Reservation

Det finns inga garantier för att ett prov är representativt för processen även om de rekommendationer som anges i rapporten uppfylls, då varje anläggning är unik. Risken för driftstörningar orsakade av felaktiga provuttag bör dock anses vara liten om angivna rekommendationer följs. Värmeforsk och författaren fransäger sig allt ansvar för skador som uppkommer vid eventuella driftstörningar.

1.2 Förkortningar

I handboken förekommer förkortningar som är vedertagna i branschen. Med hänsyn till personer som inte varit så länge i branschen sammanfattas dessa i nedanstående lista.

AFS	Arbetsmiljöverkets författningssamling
ASME	American society of mechanical engineers, en amerikansk branschorganisation
AVT	all volatile treatment, vattenbehandling med enbart alkaliserande aminer
BPR	back preassure relief valve, tryckhållningsventil
BV	bäddpolymer
CACE	conductivity after cation exchanger, sur konduktivitet
CDI	se EDI
CT	caustic treatment, behandlingsmetod med lutdosering till pannvattnet
DENÅ	nordiskt samarbetsorgan
DNA	deoxyribonucleic acid, deoxiribonukleinsyra
DOC	dissolved organic carbon, löst organiskt kol
DOC	dissolved organic carbon, löst organiskt kol
ECDI	se EDI
ED	elektrodialys
EDI	electro deionisation, metod för avsaltning av vatten
ELSAM	tidigare dansk elproducent, uppköpt av DONG Energy
EMF	elektromagnetiska filter
EPRI	Electric Power Research Institute, en amerikansk branschorganisation
FAC	flow accelerated corrosion, en typ av erosionskorrosion
FJV	fjärrvärmevatten
HRSG	heat recovery steam generator, gaskombipanna
IAPWS	International association for the properties of water and steam, en internationell branschorganisation
IAPWS TGD	IAPWS technical guidance document
IDA	iminodiacetat
KRA	kondensatreningsanläggning
LSI	Langeliers saturation index , Langeliers mättnadsindex
LT	lågtryck
LTFV	lågtrycksförvärmare
LUT	se PT
NF	nanofilter
NTU	nephelometric turbidity unit, enhet för grömlighet
OFP	oförstörande provning
OT	oxygen treatment, vattenbehandling med en viss syrehalt i vattnet
PAC	polyaluminiumklorid
PED	tryckkärlsdirektivet
ppb	parts per billion (= µg/l)
ppm	parts per million (= mg/l)

PT	phosphate treatment, behandlingsmetod med fosfatdosering till pannvattnet
RGK	rökgaskondensat
RH	relativ luftfuktighet
RO	reverse osmosis, omvänd osmos
rph	varv per minut
RSI	Ryznar stabilitetsindex
SDI	silt density index, ett mått på mängden partikulära föroreningar i vatten
SEM	svepelektronmikroskopi
SEM-EDS	svepelektronmikroskop med energidispersiv röntgenspektroskopi
SIAPWS	Scandinavian IAPWS Committee, en nordisk branschorganisation
SS	svensk standard
SV	systemvolymet
TAS	totalavsaltat vatten eller totalavsaltningsanläggning
TDS	total dissolved solids, salthalt
TMT	trimercapto-s-triazine trinatriumsalt
TNC	Terminologicentrum
TOC	totalt organiskt kol
TSP	trisodiumphosphate, trinatriumfosfat
UF	ultrafilter
VCI	vapour phase corrosion inhibitors, ångfas-korrosionsinhibitorer
VGB	tysk (europeisk) branschorganisation
VRA	vattenreningsanläggning
VVX, VX	värmesväxlare
ÅN 1-3	åtgärdsnivå 1-3

2 Allmänt om vatten

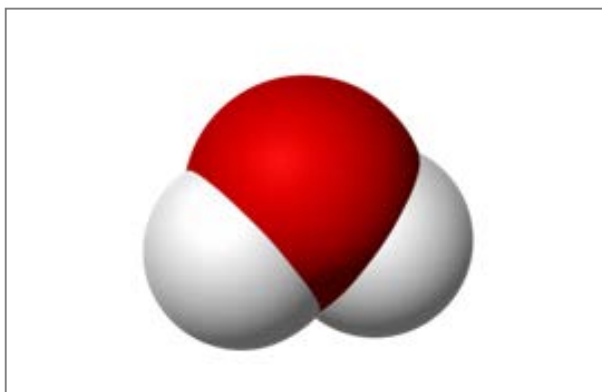
I detta kapitel ges en introduktion till vatten och dess egenskaper samt en beskrivning av de föroreningar vi kan förvänta oss att finna i de vatten som används och i industriella vattensystem.

Kemiska begrepp som förekommer i längre fram i handboken beskrivs också här.

För generell grundläggande kemi hänvisas till generella läroböcker i kemi.

2.1 Vad är vatten?

Vatten är en kemisk förening bestående av en syreatom och två väteatomer. Den kemiska beteckningen är H_2O och det formella namnet är divätemonoxid. Ibland anges istället beteckningen HOH , vätehydroxid. I Figur 1 visas en modell av en vattenmolekyl.



Figur 1. Modell av en vattenmolekyl, H_2O .

Figure 1. Model of a water molecule, H_2O .

Vatten är också:

- en förutsättning för allt liv
- ett effektivt lösningsmedel
- ett effektivt media för transport av energi
- och mycket mer...

Vatten är mycket sällan bara H_2O . Allt vatten innehåller en större eller mindre mängd föroreningar i form av salter, gaser, fasta partiklar etc.

En ”bra vattenkvalitet” är ett luddigt begrepp då olika användningsområden ställer krav på vattnet. Ett bra dricksvatten är t.ex. direkt skadligt att använda som spädvatten i en ånganläggning, samtidigt kan ett ångkondensat av hög kvalitet inte användas som livsmedel.

Det är med andra ord viktigt med rätt vattenkvalitet i varje applikation. Vattnet behöver renas och behandlas utifrån vad det ska användas till.

2.2 Vattnets egenskaper

2.2.1 Aggregationstillstånd

Till vardags menar man med vatten bara dess flytande aggregationstillstånd, men vatten förekommer i tre aggregationstillstånd: flytande, fast eller gas. Aggregationstillstånden betecknas med (g) för gas, (l) liquid d.v.s. flytande respektive (s) för solid d.v.s. fast efter den kemiska formeln. Vatten, H_2O , kan alltså förekomma som flytande vatten eller H_2O (l), is eller H_2O (s) samt vattenånga eller H_2O (g). Vattenånga är inte synligt för blotta ögat, men man kan se den indirekt, exempelvis som bubblorna i kokande vatten. Se Figur 2.



Figur 2. Vatten i dess tre aggregationstillstånd

Figure 2. Water in its three states of aggregation

2.2.2 Kemiska och fysikaliska egenskaper

De viktigaste kemiska och fysikaliska egenskaperna hos vatten är:

- Vatten är en lukt- och smaklös vätska i standardtryck och -temperatur. Is och vattens färg har i sig självt en väldigt ljusblå färgton, även om vattnet verkar färglöst i små mängder. Is verkar också färglöst, och vattenånga är i huvudsak osynlig som gas.
- Vatten är **transparent** och släpper igenom ljus. Det är en förutsättning för att vattenväxter ska kunna leva i vattnet eftersom solljuset då kan nå dem. Bara starka ultraviolette strålar blir obetydligt absorberade.
- Då vattenmolekylen inte är linjär och syreatomen har en högre elektronegativitet än väteatomer har syreatomen något större negativ laddning, medan väteatomerna är något positiva. Som ett resultat av detta är vatten en **polär molekyl** med ett elektriskt dipolmoment. Nätväxelverkan mellan dipolerna på varje molekyl kan orsaka en effektiv skinneffekt på vattnets yta med andra substanser, eller luft vid ytan, den senare har gett upphov till vattnets höga ytspänning. Ytspänningen är temperaturberoende och minskar vid högre temperatur. Varmvatten väter bättre än kallvatten. Vattnets dipolära natur bidrar till vattenmolekylens tendens att forma vätebindningar, vilka bidrar till vattnets speciella egenskaper. Den polära naturen favoriserar även adhesion till andra material.

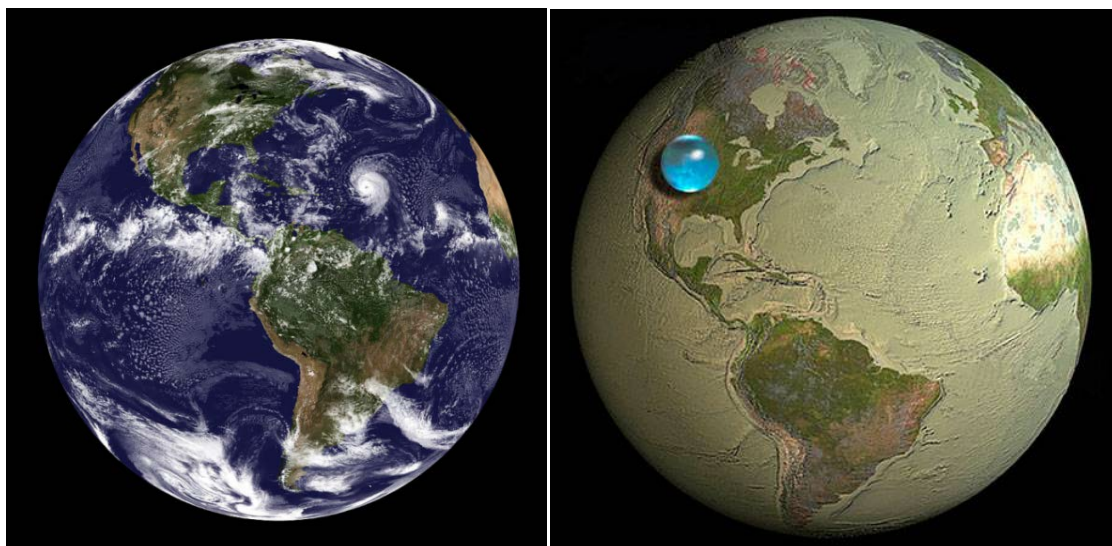
- Varje vätekärna är bunden till den centrala syreatomen genom ett elektronpar som delas mellan dem. Kemister kallar det delade elektronparet för en **kovalent kemisk bindning**. I H_2O används bara två av de sex elektronerna på det yttre skalet av syreatomen till det här syftet, vilket lämnar fyra elektroner organiserade i två obundna par. De fyra elektronparen som omger syret tenderar arrangera sig själva så långt bort från varandra som möjligt för att minimera bortstötningarna mellan dessa negativt laddade skaror. Det leder normalt till en tetraedrisk geometri i vilken vinkeln mellan elektronparen (och därför H-O-H-bindnings-vinkeln) är $109,5^\circ$. Då de två obundna paren orienterar sig närmare syreatomen, har dessa en starkare bortstötning mot de två kovalent bundna paren, som effektivt trycker de två väteatomerna närmare varandra. Det leder till en förvrängd tetraedrisk disposition där H-O-H-vinkeln är $104,5^\circ$.
- Som ett resultat av samspelet mellan dessa egenskaper avser **kapillärkraft** vattnets tendens att röra sig uppför ett smalt rör mot gravitationskraften. Den egenskapen utnyttjar alla kärlväxter, såsom t.ex. träd.
- Vatten är ett bra **lösningsmedel** och kallas ofta "det universella lösningsmedlet". Ämnen som löser sig i vatten, exempelvis salter, sockerarter, syror, alkalimetaller och några gaser, speciellt syre och koldioxid, är kända som hydrofila ämnen, medan de som inte löser upp sig i vatten, exempel som fetter och oljor, är kända som hydrofoba ämnen.
- Alla större komponenter i celler, protein, DNA och polysackarider löser sig också i vatten.
- Rent vatten har en **låg konduktivitet**, vilken dock ökar påtagligt om man löser en liten mängd jonföreningar i vattnet, till exempel natriumklorid.
- Vattnets **kokpunkt** beror (likt alla andra vätskors) på lufttrycket. Exempelvis kokar vatten på Mount Everests topp vid 68°C , jämfört med 100°C vid havsytan. Omvänt kan vatten på stora djup i oceanerna, nära geotermiska ventiler, uppnå temperaturer på flera hundra grader och ändå förbli flytande.
- Vatten har den näst högsta **värmekapacitiviteten** av alla kända ämnen, efter ammoniak, och också hög **ångbildningsvärme** ($40,65\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$). Värmekapacitivitet är en fysikalisk storhet som anger ett ämnes förmåga att magasinera termisk energi, det vill säga ange ett ämnes termiska tröghet. Ångbildningsvärme anger den värmeenergi som måste tillföras för att vid konstant temperatur förångas 1 gram av ett ämne vid dess normala kokpunkt. Ångbildningsvärmen för till exempel vatten är 539 kalorier per gram, eller 2260 kJ/kg . Dessa två ovanliga egenskaper gör att vatten kan moderera jordens klimat genom att buffra stora temperaturskillnader.
- Vattnets **maximala densitet** uppnås vid $3,98^\circ\text{C}$. Vatten blir mindre tätt vid fryspunkten, och har då expanderat med 9 %. Det resulterar i ett ovanligt fenomen,

nämligen att vattnets fasta form, is, flyter ovanpå vatten, vilket gör att varelser kan leva i en delvis fryst vattenkropp då vattnet på botten har en temperatur på runt 4 °C.

- Vatten är **blandbart** med många vätskor, t.ex. etanol, i alla proportioner vilket gör att det är en homogen vätska. Å andra sidan är vatten och de flesta oljor oblandbara, vilket gör att det vanligtvis skapas lager med en ökande densitet mot toppen. Som gas är vattenånga blandbar med luften.
- Vatten bildar en **azeotrop** med många andra ämnen. En azeotropisk blandning är, inom kemin, en vattenlösning av ett ämne ur vilken vattnet inte kan avlägsnas ytterligare genom destillation.
- Vatten kan genom **elektrolys sönderdelas** till väte och syre.
- Som en oxid av väte skapas vatten när väte eller väteinnehållande föreningar bränner eller reagerar med syre eller syreinnehållande föreningar. Vatten är inte ett bränsle, utan en **slutprodukt av förbränningen** av väte.
- Ämnen som är mer elektropositiva än väte såsom litium, natrium, kalcium, kalium och cesium förskjuter väte från vattnet vilket skapar **hydroxider** och vätgas. Vätgas är lättantändlig, så när vatten reagerar med mer elektropositiva ämnen kan reaktionen bli våldsamt explosiv.

2.3 Förekomst

Ungefär 70 procent av jordens yta är täckt av vatten, men vattnets samlade volym är bara 0,13 procent av jordens totala volym. Den lilla droppen i till höger i Figur 3 rymmer allt vatten som finns i jordens hav, floder, sjöar, glaciärer, organismer, luft och mark (källa U.S. Geological Survey).



källa: U.S. Geological Survey

Figur 3. *Den synliga och faktiska mängden vatten på jorden*

Figure 3. *The visual and actual amount of water on Earth*

Det vi kallar sötvatten utgörs av vatten i ytvatten från t.ex. sjöar, floder, dammar samt grundvatten. Sötvattnet utgör endast ca 0,8 % av allt vatten som förekommer på jorden. Detta sötvatten ska förutom att utgöra ett livsmedel även räcka till för vårt industriella bruk.

Fördelningen av det vatten som förekommer på jorden visas i Figur 4. I Sverige är vi lyckligt lottade med god tillgång på sötvatten. Längre söderut i Europa, redan i Danmark och Tyskland, är sötvatten en bristvara på många ställen.

Vattenkälla	Vattenvolym km ³	Procent av sötvattenmängden	Procent av totala mängden
Oceaner & hav	1338000000	-	96,54
Polarisar, glaciärer & permanent snö	24060000	68,6	1,74
Grundvatten	23400000	-	1,69
Sötvatten	10530000	30,1	0,76
Saltvatten	12870000	-	0,93
Markfukt	16500	0,05	0,001
Permafrost	300000	0,86	0,022
Sjöar	176400	-	0,013
Sötvatten	91000	0,26	0,007
Saltvatten	85400	-	0,007
Atmosfären	12900	0,04	0,001
Träskvatten	11470	0,03	0,0008
Floder	2120	0,006	0,0002
Biologiskt vatten	1120	0,003	0,0001

Källa: Igor Shiklomanov's chapter "World fresh water resources" in Peter H. Gleick (editor), 1993, Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources (Oxford University Press, New York).

Figur 4. *Uppskattad fördelning av vattnet på jorden*

Figure 4. *Estimate of global water distribution*

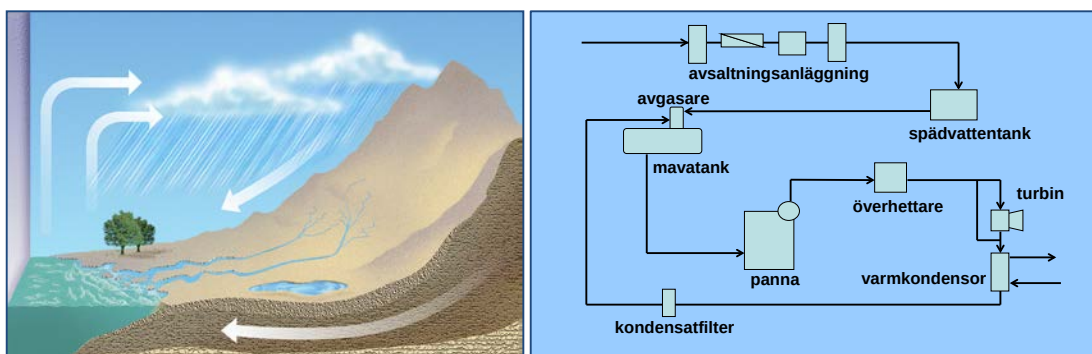
2.4 Vattnets kretslopp i naturen

Vatten cirkulerar i ett ständigt kretslopp som drivs av solens energi. Solen värmer vattnet i våra hav, sjöar, vattendrag och i marken. Det förångade vattnet stiger upp i atmosfären där det kyls ner, kondenserar, och bildar moln. När molnen så småningom blir mättade börjar det regna och vattnet faller tillbaka ner till jordytan. Regnvattnet samlas upp i bäckar, åar och floder och rinner vidare till hav och sjöar. En del vatten tränger ner genom markens jord, sand och berg där det bildar grundvatten. Så småningom, ibland omedelbart, ibland efter flera tusen år, kommer vattnet åter att med solens hjälp förångas, stiga upp i atmosfären och hela processen börjar om igen - kretsloppet är slutet.

Vattnet i havet har en hög salthalt medan det förångade vattnet som stiger upp i atmosfären är ett rent vatten, fritt från salter och andra föroreningar. När vattenånga kondenserar och börja bilda moln löser sig föroreningar såsom små partiklar, stoft och gaser, t.ex. svavel- och kväveoxider, i det utkondenserade vattnet. När sedan vattnet faller åter mot jorden löser sig ytterligare föroreningar i regnvattnet. Vattendropparna i regnet tar även upp gaser ur luften, d.v.s. i huvudsak koldioxid, kvävgas och syrgas. Även kväveoxider, svaveloxider vilka normalt förekommer i små mängder tas upp vilket ger ett surt regn. Det vattnet som träffar jordytan är inte längre helt rent utan innehåller en hel del föroreningar. Ytterligare föroreningar, t.ex. organiskt material från markytan samt salter och mineraler från marklagren, tillförs vattnet på dess väg åter till havet. Det innebär i förlängningen att salthalten i havsvattnet ständigt ökar på grund av anrikningen.

2.4.1 Vatten-ångcykeln

Det finns många likheter mellan vattnets kretslopp i naturen och kretsloppet i vatten-ångcykeln. Se Figur 5.



Figur 5. Jämför likheten mellan vattnets kretslopp i naturen och vatten-ångcykeln

Figure 5. Comparison of the similarity of the nature water cycle and the boiler water cycle

Vatten-ångcykeln är också ett kontinuerligt kretslopp men med en betydligt snabbare omloppshastighet. Mättad ånga ut från domen är i princip fri från salter. När ångan kondenserat löser den upp föroreningar, t.ex. korrosionsprodukter och beläggningar, i kondensatsystemet och för dessa med sig in i pannan via matarvattentanken. De föroreningar och salter som kommer in i pannan ackumuleras i pannvattnet, koncentreras upp och salthalten stiger.

2.5 Föroreningar i vatten

Råvatten, oavsett om det utgörs av ett kommunalt dricksvatten, ytvatten eller grundvatten, innehåller stora mängder oönskade ämnen som måste avskiljas innan vattnet kan användas som spädvatten till en energianläggning.

Föroreningarna kan delas upp i:

- salter (mineraler)
- gaser
- organiskt material
- fasta partiklar
- mikroorganismer

Vissa av föroreningarna kan ge problem i avsaltningsanläggningen medan andra kan medföra ökad risk för korrosion eller beläggningar i vattenångcykeln.

2.5.1 Koncentration av föroreningar

Halten föroreningar i vatten kan anges i ett flertal olika enheter. SI-enheten för substansmängd är Mol. Ett system med substansmängden 1 mol innehåller ett bestämt antal element (atomer, molekyler eller liknande) av denna substans. Antalet är

ungefär $6,022 \times 10^{23}$ stycken. Om man exempelvis säger att ett visst provrör innehåller 2 mol fruktsocker löst i vatten, vet man därmed hur många molekyler fruktsocker det är.

Inom kemin anges substansmängden ofta i enheten ekvivalent, som är en mol laddning. Koncentration av kemiska ämnen mäts oftast i molar (M, mol per liter lösning), eller normal (N, ekvivalenter per liter lösning). En äldre benämning för ekvivalent var valens, vilken man också kan se i äldre litteratur om matarvattenkemi där t.ex. alkaliteten i vatten anges som mval/l.

Inom matarvattenkemin används ekvivalenter främst vid beräkning av jonbytesmassors kapacitet men även vattnets alkalitet anges ofta som ekvivalenter/liter. Där är ofta viktigt att känna till antalet laddningar i ett vatten med olika jonslag. Vid t.ex. avsaltning med jonbytesteknik där vattnet innehåller en mol klorid, Cl^- , och en mol sulfat, SO_4^{2-} erhålls 3 mol H^+ efter jonbytaren.

Halten av ett ämne i vatten, d.v.s. koncentrationen, kan anges på flera olika sätt och i olika enheter, t.ex. mg/l, $\mu\text{g/l}$, ppm (parts per million), ppb (parts per billion). Förhållandet mellan dessa visas i Figur 6.

storheterna i relation	10	1	10^{-3}	10^{-6}
massa/massa	10 g/kg = 1 viktprocent	g/kg	mg/kg (ppm)	$\mu\text{g/kg}$ (ppb)
massa/volym		g/l	mg/l (ppm)	$\mu\text{g/l}$ (ppb)
mol/volym		mol/l (M, molar)	mmol/l	
mol-laddning/volym		ekv/l (N, normal)	mekv/l	

Figur 6. *Enheter för koncentration*

Figure 6. *Units for concentration*

Eftersom vattnet har en densitet som är mycket nära 1000 kg/m^3 , eller 1 kg/l , är det vanligt att i praktiken likställa enheten mg/kg med mg/l, och g/kg med g/l. Det är ett bekvämt förfarande därför att det oftast hanteras volymer snarare än massor. Felet som uppstår när enheterna likställs på detta sätt är inte särskilt stort när det gäller utspädda lösningar vid temperaturer kring rumstemperatur. Det brukar försummas med kunskap om de fel som ändå uppstår i analysen och om den noggrannhet som anses påkallad.

För koncentrerade lösningar, i intervallet några gram per kilogram och uppåt, är det ofta mer brukligt att ange koncentration i procent, vikt- eller volymprocent. Detta gäller t.ex. koncentrerade regenereringslösningar för jonbytare. En saltsyralösning med en koncentration på 37 viktprocent innehåller 370 g saltsyra och 630 g vatten per kg. Observera att för sådana koncentrerade lösningar kan inte längre volymen 1 liter likställas med massan 1 kg. Saltsyralösningen ovan har en densitet på 1190 kg/m^3 vid 20°C .

När koncentrationen eller halten av ett ämne i vatten ska anges är det viktigt att enheten alltid anges. Om t.ex. fosfathalten anges till 3,3 säger det ingenting om inte siffervärdet kompletteras med en enhet. Även när siffervärdet kompletteras med en enhet räcker detta i många fall inte. Figur 7 visar olika sätt att uttrycka fosfathalten i vatten och aktuella omräkningsfaktorer.

	mg/l PO ₄ -P	mg/l PO ₄	mg/l P ₂ O ₅
1 mg/l PO ₄ -P	1,0	3,07	2,29
1 mg/l PO ₄	0,33	1,0	0,75
1 mg/l P ₂ O ₅	0,44	1,33	1,0

Figur 7. Omräkningsfaktorer mellan olika sätt att uttrycka fosfathalten

Figure 7. Conversion factors between different ways to express phosphate levels

En fosfathalt på 10 mg/l säger inget om man inte kompletterar med vilken fosfat (P, PO₄, P₂O₅) som avses.

Enheten PO₄-P utläses som fosfatfosfor och betyder fosfordelen av fosfatmolekylen. Syreatomerna i molekylen räknas då inte med i vikten varför värdet blir lägre. Enheten används vanligtvis vid analys av avloppsvatten eller recipientvatten.

2.5.2 Salter

Inom kemin är salter, eller jonföreningar, kemiska föreningar som består av positivt laddade katjoner och negativt laddade anjoner sammansatta så att nettoladdningen blir neutral, det vill säga noll.

Ett exempel är natriumklorid NaCl (koksalt) som består av katjonen Na⁺ och anjonen Cl⁻



Ett annat är kalciumklorid CaCl₂ som består av katjonen Ca²⁺ och anjonen Cl⁻. I det senare fallet krävs två kloridjoner per kalciumjon för att nettoladdningen skall bli noll.



Joner kan bestå av en enskild atom som t.ex. kloridjonen Cl⁻ eller av flera atomer som t.ex. sulfatjonen SO₄²⁻. En jon kan vara oorganisk som natriumjonen Na⁺ eller organisk som acetatjonen CH₃-COO⁻.

I fast form bygger salterna upp kristaller i ett strikt mönster. I lösningsmedel som t.ex. vatten löses salterna. Det kallas att jonerna dissocierar, och kan röra sig oberoende av varandra.

Således är till exempel kalciumsulfat dissocierat i en kalciumjon (Ca^{2+}) och en sulfatjon (SO_4^{2-}):



En lösning av salt i vatten utgör en elektrolyt, d.v.s. lösningens joner kan leda elektricitet.

Även vattenmolekylen dissocierar till en viss del, men vattnets egen dissociering är mycket liten. Vatten dissocierar till en vätejon, H^+ , och en hydroxidjon, OH^- .



Den dubbelriktade pilen betyder att inte alla vattenmolekyler deltar i reaktionen. Se vattnets protolys kapitel 2.5.5

2.5.3 Konduktivitet

Ett sätt att mäta salthalten i ett vatten är att mäta vattnets konduktivitet (ledningsförmåga).

När ett salt löser sig i vatten bildas joner. Jonerna är elektriskt laddade och leder därmed ström. Genom att skicka en elektrisk ström genom vattnet, och mäta motståndet, kan vattnets konduktivitet bestämmas. Ju högre koncentration av elektrolyter (joner) desto högre salthalt och därmed högre konduktivitet. Ämnen som inte dissocierar i vattenlösning, t.ex. olja, påverkar konduktiviteten i ringa utsträckning.

Konduktivitet är ett mått på hur väl ett material kan transportera elektrisk laddning, d.v.s. dess förmåga att leda ström. Konduktiviteten utgör det inverterade värdet av vattnets specifika motstånd, vilket kan definieras av resistiviteten (ohm eller Ω) i en vätskepelare med längden 1 cm och fältarean 1 cm^2 . SI-enheten för konduktivitet är Siemens per meter, S/m, men för att få mer lätthanterliga värden används vanligtvis mS/m eller $\mu\text{S/cm}$. Det förekommer dock även andra enheter för konduktivitet.

I Figur 8 visas sambandet mellan de olika enheterna. Enheten $1/\Omega$, alltså ohm inverterat, anges ofta som mho.

enhet	mS/m	$\mu\text{S/cm}$	$\mu\text{mho/cm}$	ppm TDS
värde	1	10	10	6,4

Figur 8. *Enheter för konduktivitet*

Figure 8. *Units for conductivity*

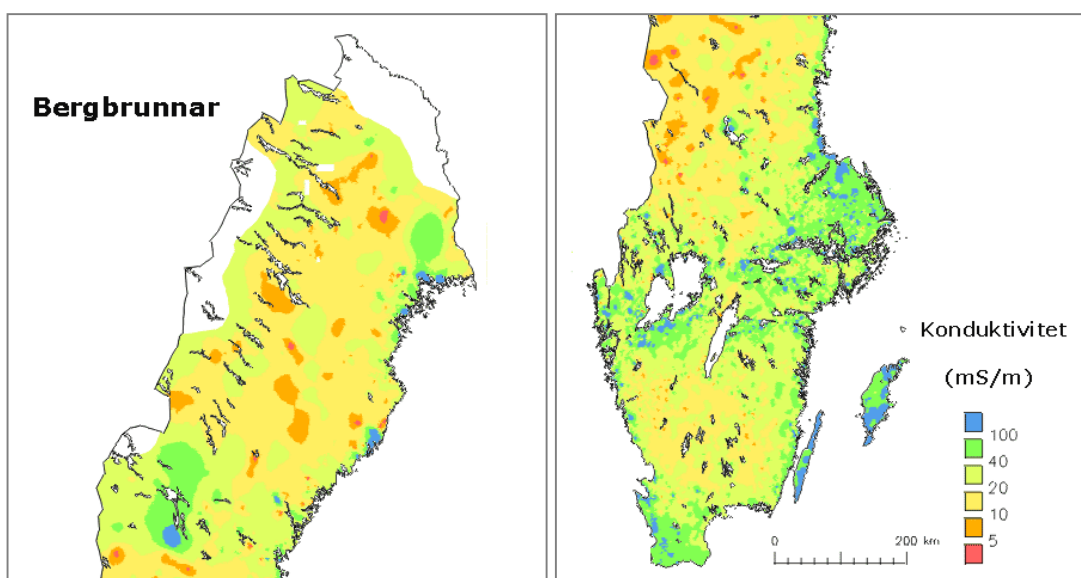
Vattnets konduktivitet är summan av alla de i vattnet förekommande jonerna. Det går därmed inte att avgöra vad vattnet innehåller genom att mäta konduktiviteten men det är ett värdefullt mått på hur mycket salter vattnet innehåller.

Salthalt eller TDS (total dissolved solids) är ett mått på den totala mängden lösta ämnen i en vätska. En tumregel kan användas för att räkna om den elektriska konduktiviteten till en salthalt:

$$\text{salthalt i mg/l} = 0,64 \text{ gånger konduktiviteten i } \mu\text{S/cm}$$

Tumregeln gäller så länge förhållanden (jonslag och deras relativa koncentrationer) inte avviker väsentligt från de i naturliga svenska vatten.

Salthalten och därmed konduktiviteten varierar mellan olika vatten. Grundvatten har vanligtvis en högre konduktivitet än ytvatten. I Figur 9 framgår hur konduktiviteten varierar i grundvatten i olika delar av Sverige. Variationer på sammansättningen i berggrund och marklager har stor betydelse för grundvattenkvaliteten.



Figur 9. Variation på konduktiviteten i svenskt grundvatten

Figure 9. Ground water conductivity in Sweden

Konduktiviteten påverkas av både jonslag och deras relativa koncentrationer. I Figur 10 visas konduktiviteten för de vanligast förekommande jonerna. Inom matarvattentekniken är detta till stor hjälp vid t.ex. kalkylering av kapaciteten på jonbytesmaterial.

	20 °C	25 °C	100 °C
H ⁺	328	350	646
Na ⁺	45	50,1	155
K ⁺	67	73,5	200
NH ₄ ⁺	67	73,5	200
Mg ²⁺	47	53,1	180
Ca ²⁺	53,7	59,5	191
OH ⁻	179	197	446
Cl ⁻	69	76,3	207
HCO ³⁻	36,5	44,5	
NO ³⁻	65,2	71,4	178
H ₂ PO ₄ ⁻	30,1	36	
CO ₃ ²⁻	63	72	
HPO ₄ ²⁻		53,4	
SO ₄ ²⁻	71,8	79,8	234
PO ₄ ³⁻		69	
SiO ₂		0	

Figur 10. *Konduktiviteten av joner uttryckt som $\mu\text{S/cm}$ per meq/l*

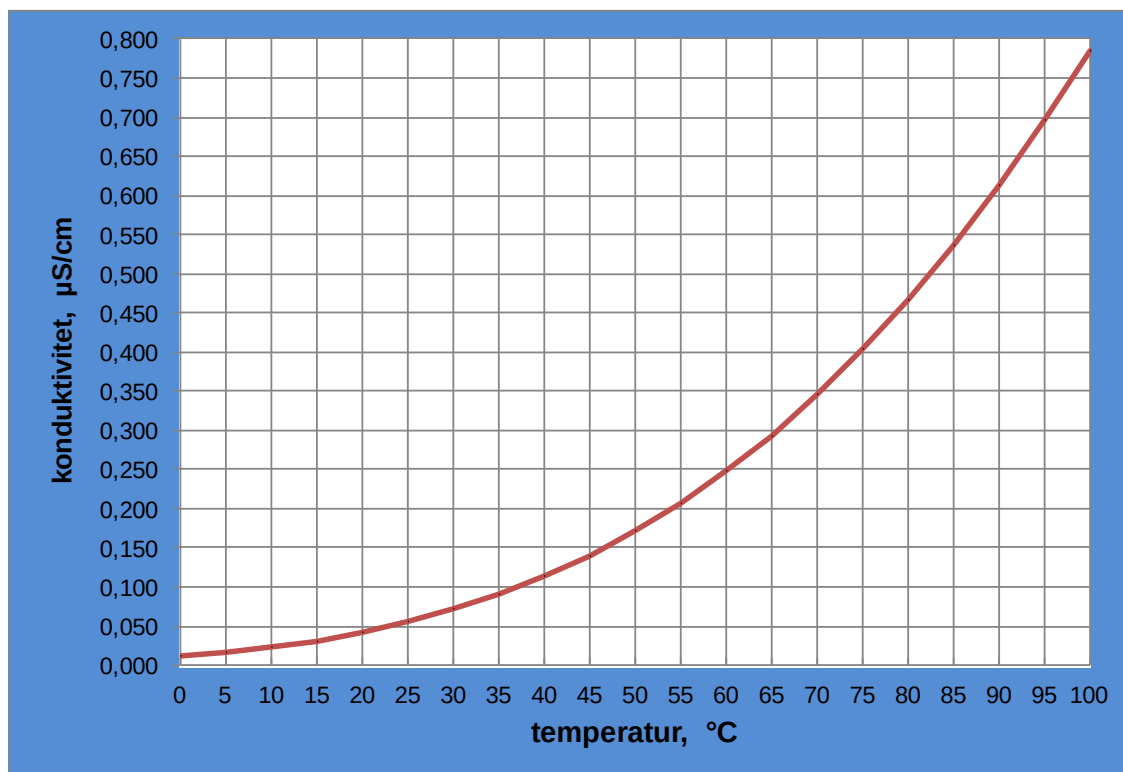
Figure 10. *Conductivity of ions expressed as $\mu\text{S/cm}$ per meq/l*

Värt att notera är konduktiviteten för vätejoner och hydroxidjoner som är betydligt högre än för övriga joner. Detta är något som bland annat utnyttjas vid bestämning av sur konduktivitet. Se kapitel 10.2.5.2 om sur konduktivitet.

Konduktiviteten är beroende av temperaturen och ökar med ökande temperatur. Normalt är ökningen mellan 2,0 och 2,5 % per °C. Det är därför viktigt att ange vid vilken temperatur konduktiviteten har analyserats eller vilken referenstemperatur som använts. Vanligtvis används 25 °C som referenstemperatur, men i vissa fall används även 20 °C. I ultrarena vatten gäller inte den genomsnittliga ökningen på 2-2,5 %/°C.

Ultrarent vatten, utan någon kemisk förorening, kommer fortfarande att ha en konduktivitet på grund av närvaron av H^+ och OH^- -joner som kommer av vattnets självjonisering. Självjonisering av vatten är temperaturberoende. Vid rumstemperatur (15-35 °C) är ökningen 4,5 % per grad. Tillsammans med ökningen av jonrörligheten blir faktorn 6,5 % per grad.

Ultrarent vatten har en konduktivitet av 0,055 $\mu S/cm$ eller en resistivitet av 18,2 megohm (18,2 miljoner ohm-cm) vid 25 °C. Figur 11 visar hur konduktiviteten i ultrarent vatten varierar i temperaturområdet 0-100 °C.



Figur 11. *Temperaturens inverkan på konduktiviteten i ultrarent vatten*

Figure 11. *Conductivity v.s. temperature in ultra pure water*

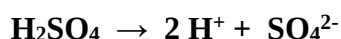
2.5.4 Syror och baser

I vattenkemiska sammanhang är en vanlig definition av syra att det är en kemisk förening som kan avge en vätejon (H^+). Exempel på syror är saltsyra och svavelsyra.

Saltsyra, väteklorid, som dissocierar till en vätejon och en kloridjon enligt formeln:



Svavelsyra som dissocierar till två vätejoner och en sulfatjon enligt formeln:



Ättiksyra är en svag syra eftersom bara en del av ättiksyremolekylerna reagerar med vattenmolekyler.

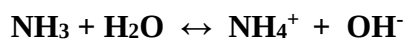


På motsvarande sätt definieras en bas som en kemisk förening som kan avge en hydroxidjon (OH^-). Exempel på baser är natriumhydroxid (lut) och ammoniak.

Natriumhydroxid som dissocierar till en natriumjon och en hydroxidjon enligt formeln:



Ammoniak är en svag bas eftersom bara en del av ammoniakmolekylerna reagerar med vattenmolekyler, tar upp deras vätejoner och lämnar kvar hydroxidjoner.



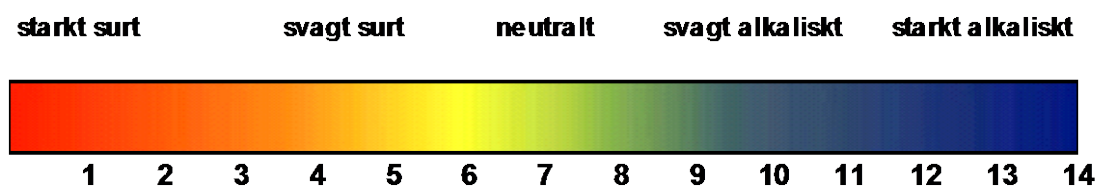
Den dubbelriktade pilen betyder att inte alla ammoniakmolekyler reagerar med vattenmolekyler. Reaktionen gör att det finns fria hydroxidjoner i lösningen, men att det också finns ammoniakmolekyler som inte har reagerat med vattenmolekyler. Faktum är att reaktionen kan gå åt båda håll.

En svag syra eller bas är inte fullständigt dissocierad, i de flesta fall har endast en mindre del (1-2 %) av syra- eller basmolekylerna reagerat. En stark syra eller bas är däremot fullständigt dissocierad.

Detta är inte samma sak som en koncentrerad eller utspädd syra eller bas. En utspädd saltsyralösning kan därmed vara mer frätande än en koncentrerad citronsyralösning.

2.5.5 pH-värde

pH-värdet är ett mått på hur surt eller basiskt ett vatten är. Lösningar med låga pH-värden är sura, och lösningar med höga pH-värden kallas basiska eller alkaliska. Se Figur 12.



Figur 12. *pH-skalan*

Figure 12. *pH scale*

pH-värdet är en viktig parameter i all vattenkemi då det ger information om vattnets karaktär, t.ex;

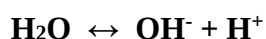
- är vattnet korrosivt eller ej
- föreligger det risk för beläggningsbildning
- vilken miljöpåverkan vattnet har
- ligger det inom riktlinjerna för vattenreningsanläggningen

pH-värdet definieras som den negativa 10-logaritmen av vätejonaktiviteten och är ett mått på koncentrationen av vätejoner, $[H^+]$ i mol/l i en lösning. Klammrarna kring H^+ -jonen anger att det är koncentrationen.

$$pH = -\log [H^+]$$

Som tidigare nämnts innehåller rent vatten i huvudsak vattenmolekyler. Ett fåtal vattenmolekyler dissocierar dock till väte- och hydroxidjoner.

Vattnets autoprotolys:



Jämviktskonstanten K för vattnets autoprotolys:

$$K = \frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]}$$

$[H_2O]$ är i princip konstant och därför kan vi skriva:

$$[H^+][OH^-] = [H_2O] \times K = K_w$$

K_w kallas vattnet jonprodukt. Om vi förenklar uttrycket ovan får vi:

$$K_w = [H^+][OH^-]$$

Vid 25 °C är $K_w = 1,0 \times 10^{-14} M^2$

Om vi till ett rent neutralt vatten, där $[H^+] = [OH^-] = 10^{-7} \text{ mol/kg}$, tillsätter en syra ökar vi $[H^+]$ medan $[OH^-]$ minskar. Lösningen reagerar surt. Analogt finner vi om en bas tillsätts så minskar $[H^+]$ och lösningen reagerar alkaliskt beroende på att $[OH^-]$ ökat.

Om t.ex. $[H^+]$ ökar till 10^{-4} minskar $[OH^-]$ till 10^{-10} och jonprodukten blir $10^{-4} \times 10^{-10} = 10^{-14}$. Vi har hela tiden jämvikt mellan $[H^+]$ och $[OH^-]$ på den ena sidan och K på den andra.

Vi finner att $[H^+] \times [OH^-]$ hela tiden är konstant (under förutsättning att temperaturen är konstant), d.v.s. 10^{-14} vid 25 °C. Se Figur 13.

[H ⁺] mol/l	-log[H ⁺]	[OH ⁻] mol/l	-log[OH ⁻]	tillsatt mängd syra eller lut
1		0,00000000000001	14	36,5 g HCl/l
0,1	1	0,00000000000001	13	3,65 g HCl/l
0,01	2	0,00000000000001	12	0,365 g HCl/l
0,001	3	0,00000000000001	11	36,5 mg HCl/l
0,0001	4	0,00000000000001	10	3,65 mg HCl/l
0,00001	5	0,00000000000001	9	0,365 mg HCl/l
0,000001	6	0,00000000000001	8	36,5 µg HCl/l
0,0000001	7	0,00000001	7	neutral lösning
0,00000001	8	0,0000001	6	40 µg NaOH/l
0,000000001	9	0,000001	5	0,4 mg NaOH/l
0,0000000001	10	0,00001	4	4,0 mg NaOH/l
0,00000000001	11	0,0001	3	40 mg NaOH/l
0,000000000001	12	0,01	2	0,4 g NaOH/l
0,0000000000001	13	0,1	1	4,0 g NaOH/l
0,00000000000001	14	1		40 g NaOH/l

Figur 13. Koncentrationen av väte- och hydroxidjoner vid olika pH-värden

Figure 13. Hydrogen and hydroxide ion concentration at different pH values

Observera att det går mycket små mängder syra eller lut i området kring pH 7 jämfört med ytterområdena. Det betyder att i detta pH-område är känsligheten mot störningar störst.

Ur Figur 13 kan man också dra slutsatsen att för att sänka pH-värdet en pH-enhet måste lösningen spädas 10 gånger. Det måste också påpekas att pH-skalan är inte begränsad till pH 0-14. Starka syror kan ha negativa pH-värden och starka baser ett pH-värde över pH 14.

2.5.6 Hårdhet

I energianläggningar är det viktigt att hårdheten i vattnet är låg. Hårdhet kallas alla salter av de alkaliska jordartsmetallerna kalcium, magnesium, barium och strontium. Såväl barium som strontium förekommer i så små koncentrationer att de saknar praktisk betydelse. Med hårdhetsbildare menas därför i vanligtvis kalcium och magnesium.

Hårdhetsbildarna har låg löslighet vilket innebär att de lätt faller ut och bildar beläggningar. Lösligheten är också negativ, vilket innebär att lösligheten minskar med ökande temperatur det i sin tur medför att hårdhetsbeläggningarna bildas där det är som varmast i systemet, d.v.s. på de värmeöverförande ytorna.

Ett bra exempel på detta är en vanlig kaffebryggare. Efter en tid kalkar bryggaren igen och den behöver rengöras med syra. Var har då kalken (hårdheten) fallit ut och bildat beläggningar? Jo, i den trånga passagen vid värmeelementet, där den gör som störst skada. Hade beläggningarna bildats i vattenmagasinet på baksidan hade det inte gjort så mycket men här är risken för utfällning liten.

I Sverige anger vi vanligtvis hårdheten i tyska hårdhetsgrader, °dH. En tysk hårdhetsgrad motsvarar 10 mg kalciumoxid (CaO) per liter vatten eller 17,9 mg kalciumkarbonat (CaCO₃) per liter vatten. Eftersom även magnesium bidrar till hårdheten skall dess koncentration inkluderas, på molbasis. Detta innebär att 0,178 mmol Mg²⁺/l eller 4,3 mg Mg²⁺/l motsvarar en tysk hårdhetsgrad. Hårdhet kan även anges i andra enheter, se Figur 14.

	mmol/l	ppm, mg/l	dGH, °dH	gpg	°e, °Clark	°fH
mmol/l	1	0,009991	0,1783	0,171	0,1424	0,09991
ppm, mg/l	100,1	1	17,85	17,12	14,25	10
dGH, °dH	5,608	0,05603	1	0,9591	0,7986	0,5603
gpg	5,847	0,05842	1,043	1	0,8327	0,5842
°e, °Clark	7,022	0,07016	1,252	1,201	1	0,7016
°fH	10,01	0,1	1,785	1,712	1,425	1

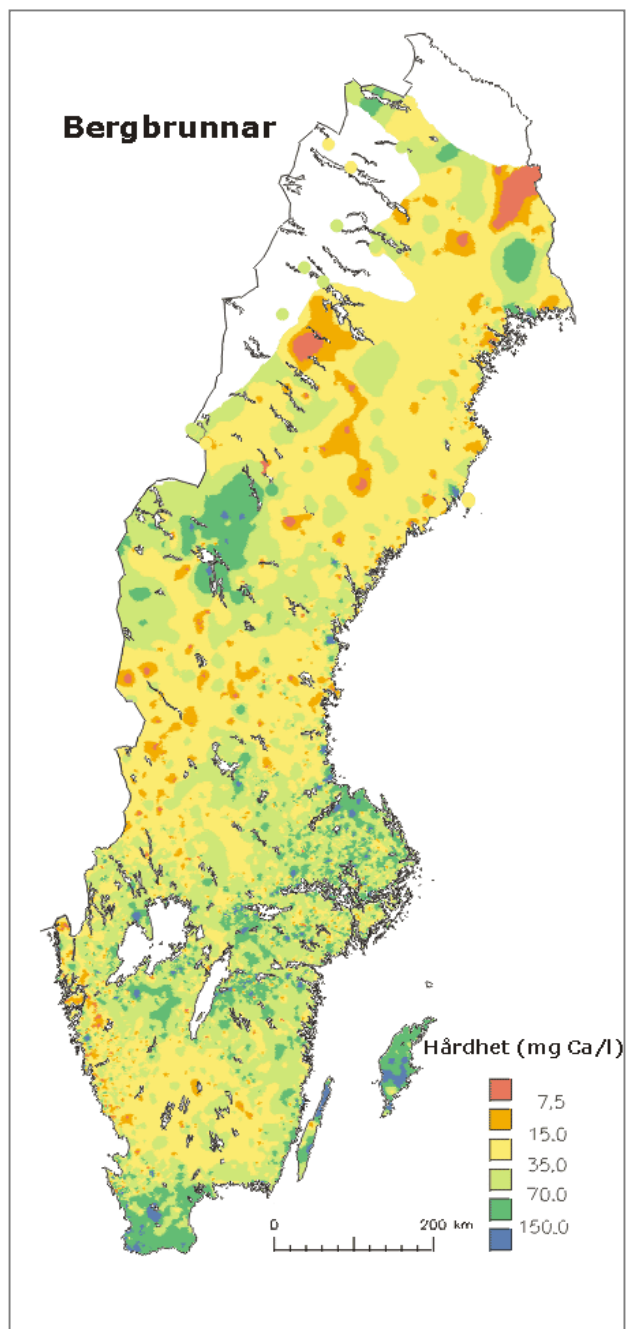
Figur 14. Jämförelse mellan olika enheter för hårdhet i vatten

Figure 14. Comparison of water hardness units

Förklaringar till tabellen:

- Franska hårdhetsgrader, fH eller TH, där 1 fH motsvarar 10 mg CaCO₃/l
- Engelska hårdhetsgrader, eH eller Clarke, där 1 eH motsvarar 14,3 mg CaCO₃/l
- Grain per gallon (gpg), d.v.s. 1 grain (64,8 mg) of CaCO₃/l i 1 US gallon vatten (3,785 l)
- Då hårdheten uttrycks i ppm eller mg/l har den räknats om till CaCO₃/l

Figur 15 visar hur hårdheten i grundvattnet varierar i Sverige.



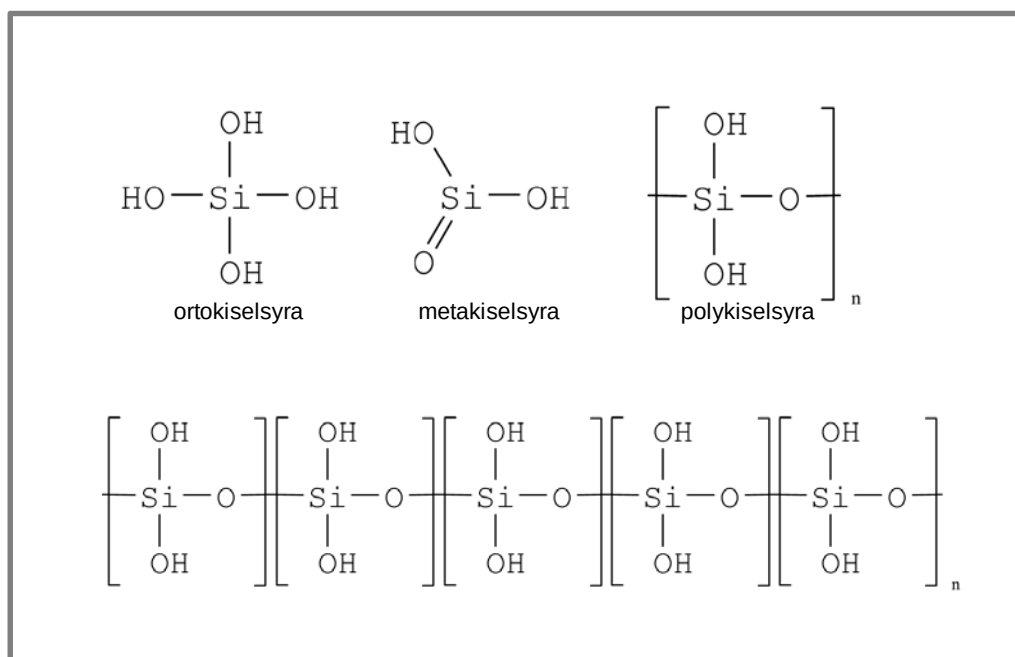
Figur 15. *Variation på hårdheten i svenskt grundvatten*

Figure 15. *Ground water hardness in Sweden*

2.5.7 Kiselsyra

Kiseldioxid (SiO_2) är en förening av kisel och syre. I jordskorpan förekommer kiseldioxid bland annat i form av kvarts. Kiselhalten i råvatten varierar kraftigt mellan olika platser i Sverige, från 0,2-20 mg/l SiO_2 vilket kan ställa till stora problem i avsaltningsanläggningen vid en energianläggning.

I råvatten kan kiseldioxid, SiO_2 , förekomma i löst form eller i kolloidal form och benämns i dagligt tal som kiselsyra. Den vanliga formen för den lösta kiseldioxiden är kiselsyra, H_4SiO_4 , och det är först vid pH-värden över ca pH 10 som syran tappar en vätejon och som silikatjoner uppträder. Denna lösta kiselsyran, H_4SiO_4 , skall inte förväxlas med den fasta kiselsyran, H_2SiO_3 , som förekommer bl.a. i tabeller och handböcker. Se Figur 16.



Figur 16. Exempel på olika former av kiselsyra

Figure 16. Example of simple silica acids (orthosilicic acid, metasilicic acid, pyrosilicic acid)

Löslighetsjämvikten för kiseldioxid och kiselsyra är en komplex fråga. Kiselsyra är kiseldioxid som anlagrat två vattenmolekyler i sin molekylstruktur. När kiselsyran faller ut polymeriserar den, d.v.s. bildar större aggregat, och förlorar en del av vattnet under det att den polymeriserar. Det som bildas är kolloidala partiklar som kan adsorberas på ytor och bilda en beläggning som växer. Först efter en längre tids mognad kan den kolloidala kiseldioxiden omlagras till t.ex. kvarts. Lösligheten för kvarts är ca 4 mg/l vid rumstemperaturen men lösligheten för amorf eller kolloidal kiseldioxid är betydligt högre, ca 120 mg/l.

I vatten/ångsystem har kiselsyra ett högt ångtryck redan vid måttlig temperatur och en förångning blir märkbar redan vid en temperatur som korresponderar mot ett vattenångtryck på ca 50 bar (5,0 MPa).

Kiselsyrans fördelningskoefficient, dvs. förhållandet mellan koncentrationen i ångfas och vattenfas är temperatur- och tryckberoende. Det innebär att kiselsyrans löslighet i ångfasen ökar med stigande tryck och minskar när trycket sjunker. Det betyder i sin tur att riktvärdet för kisel i pannvattnet sjunker med stigande tryck. Se kapitel 10.3.3.2 om riktvärden för kisel i panntryck.

Om råvattnet skall användas som spädvatten till en anläggning med turbindrift måste kisel avlägsnas för att undvika störningar orsakade av kiselbeläggningar.

Kiselsyran är en mycket svag syra som normalt ej är dissocierad i råvattnet, d.v.s. den förekommer huvudsakligen i molekyllär form. Ofta förekommer kisel även i kolloidial form och avlägsnas ur råvattnet genom flockning eller med membranteknik. Observera att den kolloidala kisel inte avskiljs i en jonbytesanläggning. Den molekylära kisel avlägsnas vid spädvattenbehandlingen, antingen i en stark anjonbytare på hydroxidform vid jonbyte eller med membranteknik. I det alkaliska pannvattnet är kisel svagt dissocierad i silikatjoner och vätejoner.

Förångad kisel kan falla ut i de kallare delarna av systemet och bilda beläggningar. Av särskild betydelse är den beläggning som kan bildas i ångturbiner. Kiselhållningen i pannvattnet bör därför inte överstiga angivet riktvärde för rådande panntryck. Höga kiselhalter i pannvattnet kan även ge beläggningar av silikat i pannrör. Om kalcium, magnesium, aluminium och järn förekommer i pannvattnet kan ett mycket stort antal mycket svårlösta silikater bildas.

I en kiselanalys, t.ex. en standardlösning, som står i rumstemperatur en längre kommer en del kisel att polymerisera och bilda stora kiselkomplex. Kiselaggregaten reagerar inte med ammoniummolybdat, det reagens som används för analys av kiselhalten, varför analysvärdet blir för lågt.

Vid analys av kiselhalten i t.ex. ett spädvatten innehållande kolloidalt kisel kommer analysresultatet inte omfatta den kolloidala kisel. När den kolloidala kisel kommer in i pannvattnet kommer det brytas ner och bilda löst kisel, som ger utslag på kiselanalysen av pannvattnet.

Detta innebär att man kan få höga kiselhalter i pannvattnet trots att spädvattenanalyserna visar på mycket låga halter. I dessa fall finns en potentiell risk för turbinproblem.

I avsaltningsanläggningar baserade på membranteknik avskiljs kolloidalt kisel vilket inte är fallet i jonbytesanläggningar. Vid några kraftverk i Sverige där råvattnet innehåller en hög halt kolloidalt kisel har man kompletterat befintlig jonbytesanläggning med ett RO-aggregat som polerande steg.

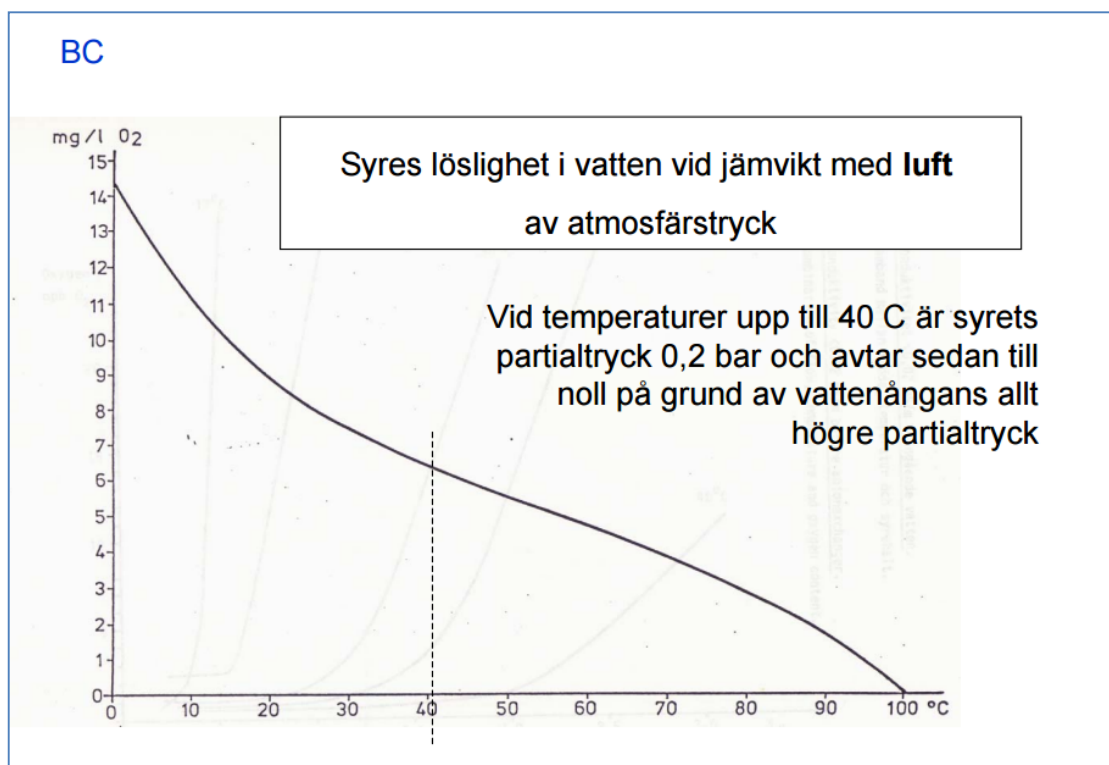
2.5.8 Gaser

Som nämnts tidigare innehåller ett råvatten alltid lösta gaser såsom syrgas, kvävgas, ädelgas och koldioxid. Lösighetsjämvikten mellan luft och vatten upprätthålls genom kontakten mellan luft och ytvatten. Luft som löser sig i vatten består av 78 % kväve, 21 % syre och ca 1 % ädelgas och koldioxid.

2.5.8.1 Syre

Syre löser sig lätt i vatten. Lösligheten är temperaturberoende, där lösligheten sjunker vid ökande temperatur. Figur 17 visar syrets löslighet vid kontakt med luft (20 % syre).

Om vi värmer vattnet med 14 mg/l syre i närvaro av luft, kommer syrehalten i vattnet att minska. Vid 40 °C är halten nere i ca 6 mg/l, osv. Då temperaturen stiger upp emot 100 °C stiger vattenångans partialtryck alltmer och syrets partialtryck sjunker om totaltrycket är konstant. Vid 100 °C består gasfasen av enbart vattenånga. Det är då självklart att syrehalten i vattnet sjunker till noll.

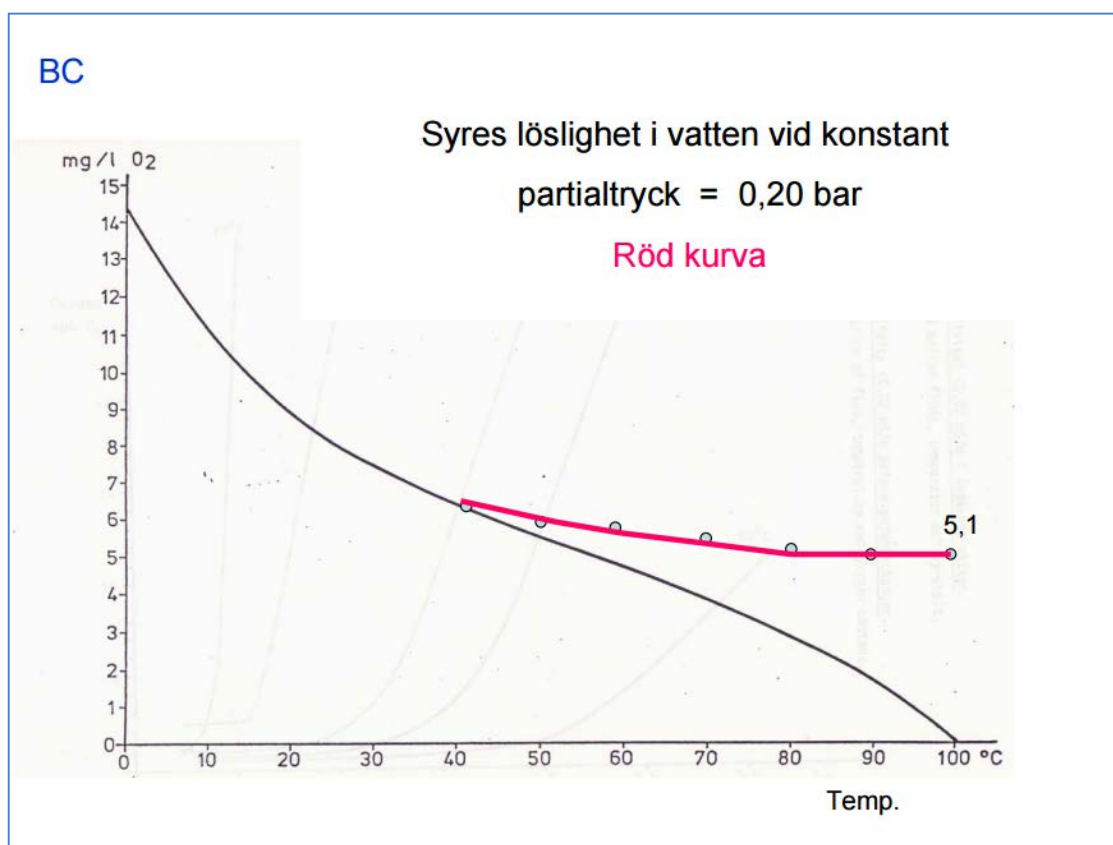


Källa: Bäcklund Consulting

Figur 17. Syrets löslighet i vatten vid jämvikt med luft av atmosfärstryck

Figure 17. Oxygen solubility in water at equilibrium with air of atmospheric pressure

Kurvan för syres löslighet vid konstant partialtryck av 0,2 bar (20 % syre) visas i Figur 18. Att kalla kurvan i Figur 17 för "syres löslighet i vatten vid atmosfärstryck", som förekommer i en del rapporter, är vilseledande då det inte är ren syrgas utan luft. Syrehalten i den gas, som står i jämvikt med vattnet, är inte konstant. Det är säkrare att använda kurvan i Figur 18, och korrigera gasfasens sammansättning för vattenångans eventuella närvaro vid den aktuella temperaturen.



Källa: Bäcklund Consulting

Figur 18. Syrets löslighet i vatten vid jämvikt med luft av atmosfärstryck

Figure 18. Oxygen solubility in water at equilibrium with air of atmospheric pressure

Syre i vattnet är en av de grundläggande orsakerna till korrosion på flertalet metaller. Se kapitel 4.3.2.1 om syrekorrosion.

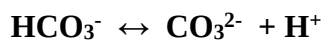
Syret måste avlägsnas ur vattnet för att minimera problem med korrosion. Se kapitel 7.1 om avgasning.

2.5.8.2 Koldioxid

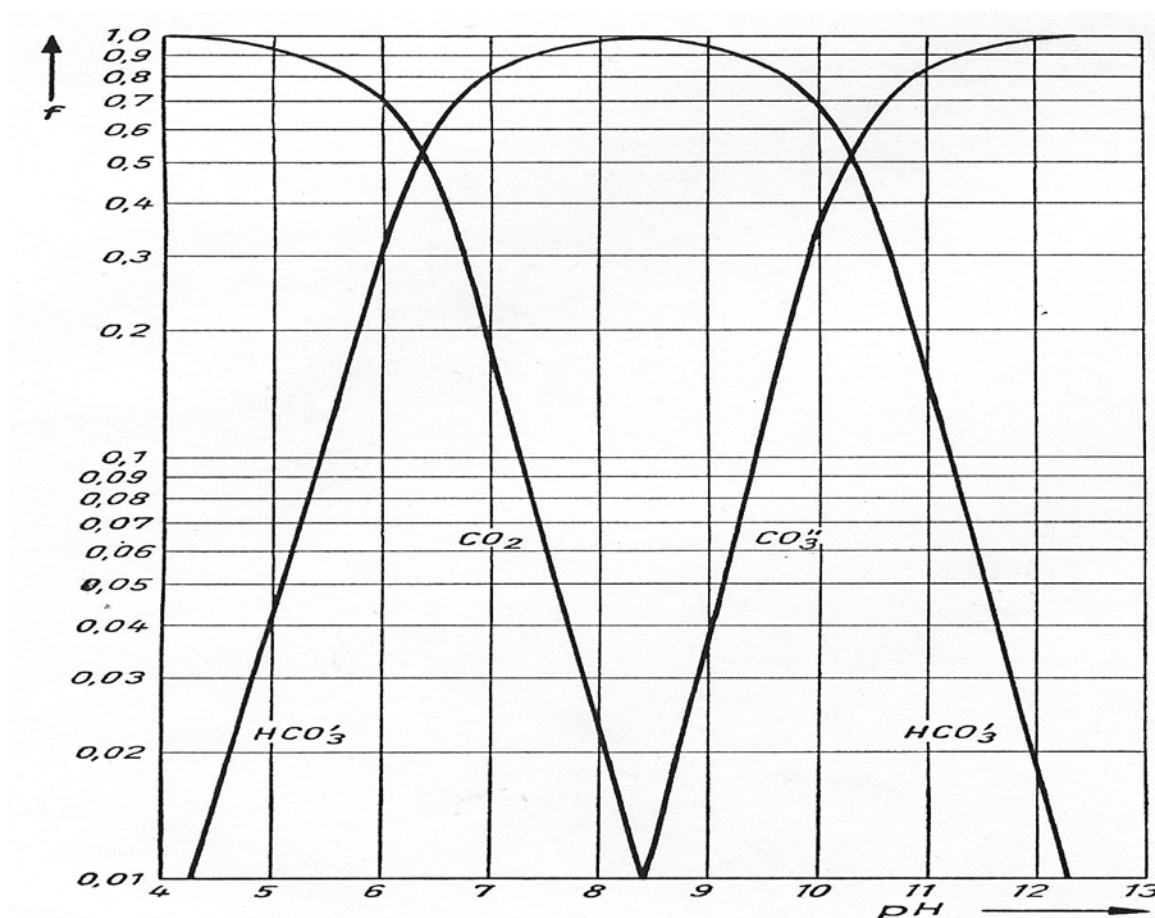
Ett råvatten innehåller alltid fri koldioxid i större eller mindre mängder samt bikarbonat. Karbonathalten är som regel försvinnande liten. Fördelningen mellan koldioxid, bikarbonat och karbonat i vattnet är pH-beroende.

Koldioxiden löser sig delvis i vattnet under bildning av kolsyra som dissocierar i två steg och vi får bikarbonatjoner (HCO_3^-), karbonatjoner (CO_3^{2-}) och fria protoner (H^+).

Då koldioxid löser sig i vatten sker följande reaktioner:



Figur 19 visar jämviktsförhållandet mellan koldioxid, bikarbonat och karbonat i vatten vid olika pH-värden.



Figur 19. Fördelningen mellan löst koldioxid, vätekarbonat och karbonat som funktion av pH

Figure 19. Carbon dioxide, Carbonic acid and Carbonate equilibrium

Det bör påpekas att benämningen kolsyra ofta används som ett slags samlingsnamn för de olika förekommande dissociationsformerna.

Kalciumkarbonat är praktiskt taget olösligt i vatten men kan lösa sig till en viss del om löst koldioxid finns i vattnet. Då bildas ett något lösligare salt, kalciumbikarbonat.



Reaktionen befinner sig i jämvikt om:

- kalciumkarbonatet inte löser sig
- kalciumkarbonatet inte utfälls

Man säger att jämvikten inträder, när kolsyran, bikarbonatjonen och kalciumjonen står i ett visst bestämt förhållande till varandra. Om jämvikt inte råder går antingen kalciumkarbonatet i lösning eller fälls ut, exempelvis vid uppvärmning, och pannstensbildande beläggningar byggs upp. Se även kapitel 15.4.2 om mättnadsindex.

Bikarbonater som kommer in i pannvattnet spjälkas varpå det bildas koldioxid och natriumhydroxid.



Koldioxiden är i gasfas och följer med ångan, löser sig i kondensatet och bildar kolsyra. Kolsyran ger ett lågt pH-värde i kondensatet. Natriumhydroxiden blir kvar i pannvattnet där den ger ett högt pH-värde (hög alkalitet). Detta gäller främst i ånganläggningar som spädmatas med avhärdat vatten då detta vatten har innehållet av de naturliga bikarbonaterna kvar. I en anläggning med avsaltat spädvatten har även bikarbonaterna avskiljts.

2.5.8.3 Kväve och ädelgaser

Kvävgasen och ädelgaserna är inerta och har ingen större påverkan på vattenkemi.

Kvävgas kan ge upphov till gaskuddar i högpunkter i t.ex. ett fjärrvärmesystem som fylls på med ett oavgasat vatten. Syret korroderar snabbt bort och kvar blir kvävgasen. När lösligheten för kväve överstigs bildas en gaskudde.

Kvävgas används ofta för tryckhållning av vattenfyllda system, t.ex. avställda pannor, ackumulatorer, tankar etc., för att undvika att syre tränger in med korrosion som följd.

2.5.9 Organiskt material

Med organiska ämnen avses ämnen där grundämnet kol ingår till väsentlig del, tillsammans med väte, syre, kväve och andra grundämnen i varierande proportioner. Den kemiska bindningen mellan kolatomer eller atomer av andra grundämnen ger organiska ämnen vissa egenskaper. Namnet organiskt syftar på deras förekomst i all livsform. Huvudsakliga beståndsdelar i alla levande organismer (växter, djur, mikrobiologiska livsformer) är organiska ämnen. Det förekommer även syntetiska organiska ämnen som inte förekommer naturligt i någon livsform, t.ex. plaster.

Många ytvatten har en färg som skiftar mellan gult och brunt, som beror på komplexa organiska föreningar som förekommer i naturen. Den organiska substansen omfattar många olika organiska föreningar med en komplex molekylstruktur. De är oftast högmolekylära föreningar av sur karaktär med olika stor vattenlöslighet.

Beteckningarna humus eller humusämnen används dock ofta som samlingsbegrepp för all organisk substans. Humusämnena utgörs av humussyror som ger vattnet en brunaktig färg och fulvosyror som är färglösa. Sammansättningen kan variera kraftigt mellan olika råvattenkällor.

Det finns flera analysmetoder för att ange halten organiskt material i vatten. De vanligast förekommande sätten att ange halten organisk material i vatten beskrivs nedan.

2.5.9.1 Färgtal

Färgtalet anger vattnets färg. Färgen orsakas av lösta salter, organiskt material och andra lösta eller suspenderade ämnen som förekommer i vatten. Traditionellt har färgtalet bestämts genom att vattnets färg jämförs mot en gulbrun färgskala där platinaklorid används som standard och anges i enheten mg Pt/l (mg platina per liter).

Det blir dock allt vanligare att färgtalet bestäms som absorption per längdenhet. Absorbansen mäts då vid 436 nm i en spektrofotometer och enheten anges då som m⁻¹.

2.5.9.2 Permanganatförbrukning

Permanganatförbrukning eller permanganattal är ett mått på halten organisk substans i vatten och definieras som det antal mg kaliumpermanganat som förbrukas av en liter vatten under specificerade analysbetingelser.

Permanganattal är ett bra mått att använda på naturliga ytvatten då det främst är lätt oxiderbara organiska föreningar som omfattas av analysen. Enheten anges som mg/l MnO₄ eller mg/l COD-Mn, där 1 mg/l COD-Mn motsvarar 3,95 mg/l KMnO₄.

Det är en standardmetod avsedd för alla typer av vatten och utspädningar av dessa som innehåller mindre än 300 mg Cl/l. Vid högre kloridhalter störs reaktionen genom partiell oxidation av Cl⁻ till Cl₂. Den sura permanganatmetoden är därför inte användbar i bräckta och marina vatten utan föregående utspädning.

2.5.9.3 TOC

TOC står för totalt organiskt kol. TOC-analys är en kvantitativ metod som används för att bestämma den totala mängden av organisk kontaminering (både biologisk och syntetisk). Figur 20 visar vad som ingår i de olika TOC-begreppen.

Definitioner enligt EN1484:1997

$$TC = TIC + TOC$$

$$TOC = NPOC + POC$$

$$DC = DOC + DIC$$

TC	Totalt kol	VOC	Flyktigt organiskt kol
TOC	Totalt organiskt kol	DC	Löst kol
TIC	Totalt oorganiskt kol	DOC	Löst organiskt kol
NPOC	Ej avdrivbart organiskt kol	DIC	Löst oorganiskt kol
POC	Avdrivbart organiskt kol		

Figur 20. *Beskrivning av begreppet TC, totalt kol*

Figure 20. *Explanation of TC, total carbon*

TOC-analysen utförs med en kombination av UV-bestrålning och ett oxidationsmedel. Med en NDIR-detektor (nondispersive infrared) uppnås låg detektionsgräns med små interferenser och kort analysid. NDIR-detektorn är konstruerad för att vara känslig och selektiv mot koldioxid närvarande i gasflödet.

Första steget i TOC-analysen är att avlägsna det oorganiska kolet (TIC), d.v.s. bikarbonater, karbonater och löst koldioxid. Genom att surgöra provet överförs det oorganiska kolet till koldioxid och kan drivas av med kvävgas.

I andra steget används UV-strålning i kombination med ett oxidationsmedel för att oxidera resterande kolföreningar, d.v.s. det organiska kolet, till koldioxid. Koldioxiden drivs av, halten analyseras och räknas om till TOC.

2.5.9.4 DOC

DOC (Dissolved Organic Carbon) omfattar alla organiska föreningar (kolföreningar) som är lösta i vattnet. DOC kan delas in i ett flertal undergrupper utifrån egenskaper och ursprung.

DOC-LABOR Dr Huber är ett tyskt laboratorium specialiserat på TOC-analys på vatten. Med hjälp av LC-OCD-teknik (Liquid Chromatography-Organic Carbon Detection) kan de specificera en DOC-analys och karakterisera samt kvantifiera icke-flyktiga, hydrofila organiska ämnen i vatten, se Figur 21.

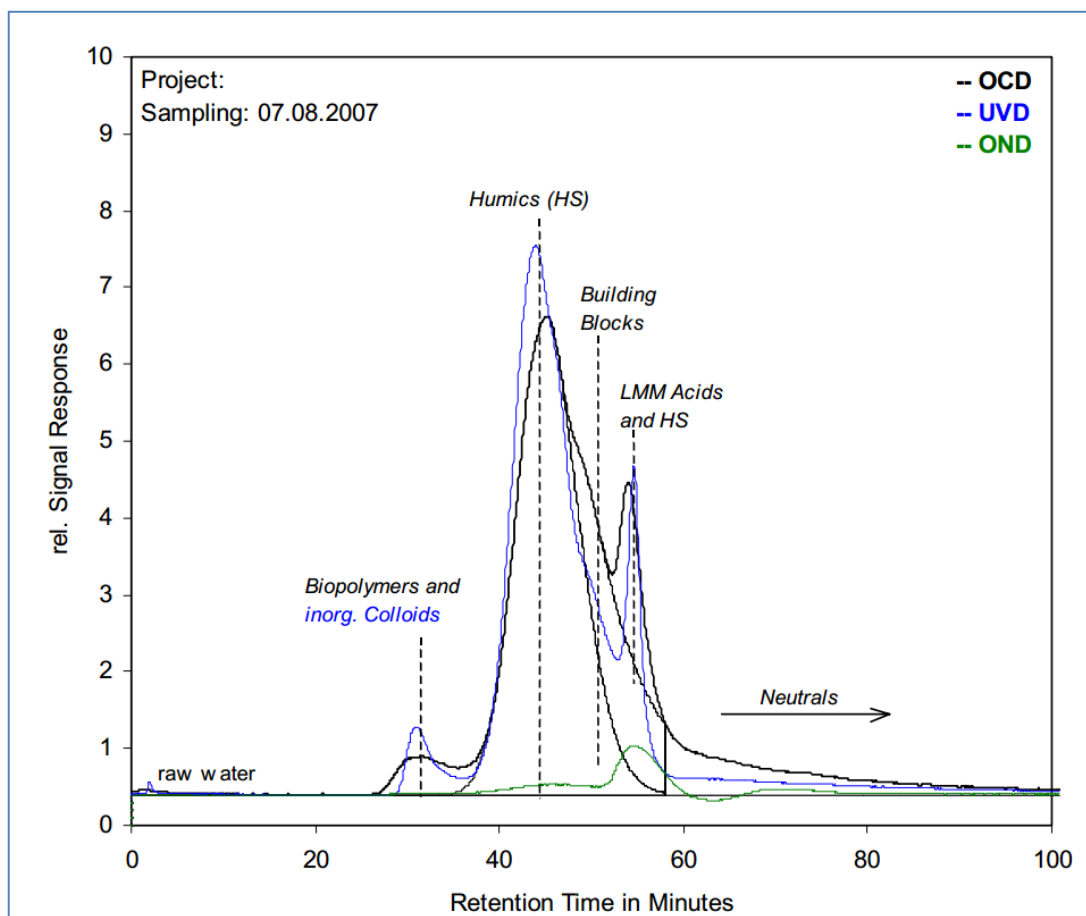
DOC	ppb-C	löst organiskt kol
HOC	ppb-C	hydrofobt organiskt kol
CDOC	ppb-C	hydrofilt organiskt kol
BIO-polymers	ppb-C	bio polymerer = polysackarider, proteiner, aminosocker
DON	ppb-N	löst organiskt kväve
N/C	ppb/ppb	förhållande organiskt kol och organiskt kväve
% proteins	% BIOpol	andelen proteiner i biopolymererna
Humic subst. (HS)	ppb-C	humusämnen
DON	ppb-N	löst organiskt kväve
N/C	ppb/ppb	förhållande organiskt kol och organiskt kväve
Aromaticity	L/mg*m	aromatisitet = SUVA/HS
mol-weight	g/mol	molvikt
Building block	ppb-C	nedbrytningsprodukter från humus
LMW neutrals	ppb-C	neutrala ämnen med låg molekylvikt = mono-oligosackarider, alkoholer, aldehyder, ketoner och aminosocker
LMW acids	ppb-C	sura ämnen med låg molekylvikt = summa monoprotion organiska syror <350 Da
Inorganic colloids	m ⁻¹	oorganiska kolloider SAC
SUVA	L/m*m	SAC/DOC

Figur 21. *Kartering av DOC, löst organiskt kol i vatten*Figure 21. *DOC characterisation of water*

Denna DOC-kartering kan bl.a. vara till stor hjälp vid installation av en vattenreningsanläggning baserad på membranteknik. Det är oftast biopolymerer (polysackarider) som ger problem med beläggningar på UF- och RO-membranen. Dessa beläggningar är svåra att tvätta bort. Halten biopolymerer bör inte överstiga 50 ppb in till en RO-anläggning. (Källa Dr. Huber)

Biopolymerer i råvattnet utgör även näring åt mikroorganismer vilket kan leda till mikrobiell tillväxt i rörsystem och utrustning. I den film biopolymeren bildat fastnar även humus och en brun beläggning bildas. Detta gäller även för UF- och RO-membran. Humusen är inte huvudproblemet utan är en sekundär effekt som ofta får skulden då den ger filmen eller beläggningen en brun färg som syns. "Vanlig" humus tvättas lätt bort från membranen om den inte innehåller biopolymerer. pH-värdet påverkar biopolymererna, vid pH 9 blir de mindre anjoniska och fastnar därför inte lika lätt som vid pH 7.

Figur 22 visare hur resultatet av en TOC-analys kan se ut med ett LC-OCD-instrument.



Källa: DOC-LABOR

Figur 22. Resultatet av en TOC-analys med LC-OCD-teknik

Figure 22. The result of a LC-OCD TOC analysis

2.5.10 Fasta partiklar

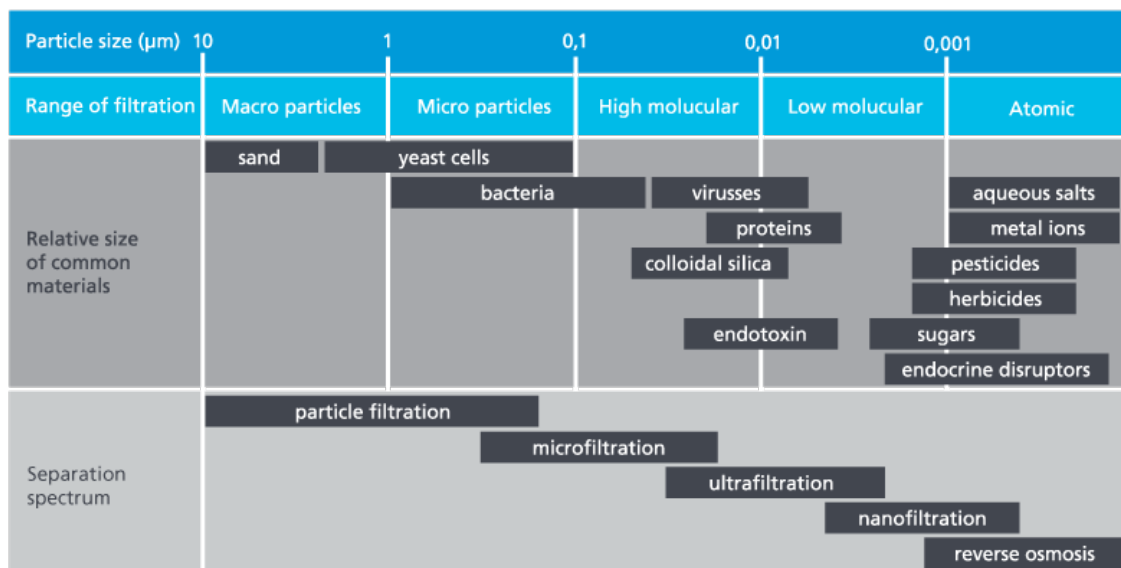
I alla naturliga vatten finns en större eller mindre mängd suspenderat material, d.v.s. fasta partiklar av olika storlek. Större partiklar är som regel lätta att filtrera bort ur vattnet medan små, fina partiklar kan vara betydligt svårare att avskilja. Lera eller silt samt organiskt material i form av humusämnen föreligger ofta i kolloidal form, d.v.s. i gränsskiktet mellan äkta lösning och suspension, d.v.s. mellan lösning och fast partikel.

I alla ledningsnät, såsom t.ex. kommunala dricksvattennät och kondensatsystem, förekommer det alltid en större eller mindre mängd korrosionsprodukter främst bestående av järn- och kopparoxider. Korrosionsprodukterna kan sitta fast på ledningens yta eller ligga som ett slam på botten. Vid flödesvariationer kan korrosionsprodukterna frigöras och transporteras med det strömmande vattnet och orsaka problem nedströms.

2.5.10.1 Kolloider

Kolloiderna är i ett praktiskt tidsperspektiv stabila, d.v.s. de sedimenterar inte. Anledningen till stabiliteten är att ytorna hos dessa partiklar ofta är negativt laddade. För att de skall kunna sedimentera krävs att partiklarna bildar större samlingar av partiklar (aggregat). Det kan inte ske på grund av den elektrostatiska frånstötningen (repulsionen) mellan partiklarna. För att övervinna repulsionen kan man tillsätta positivt laddade molekyler eller polymerer, s.k. flockningsmedel, som tillåter partiklarna att bilda större aggregat, flockar, som lättare kan avskiljas.

Kolloider kan inte avskiljas genom normal filtrering, d.v.s. mikrofiltrering i sandfilter, partikelfilter eller motsvarande. Genom att tillsätta ett flockningsmedel kan kolloiderna klumpas ihop till större partiklar som lättare kan avskiljas ur vattnet. Kolloider kan även avskiljas genom filtrering i UF-membran eller RO-membran. Figur 23 visar avskiljningsgraden för olika filtreringstekniker. Se även Figur 229.



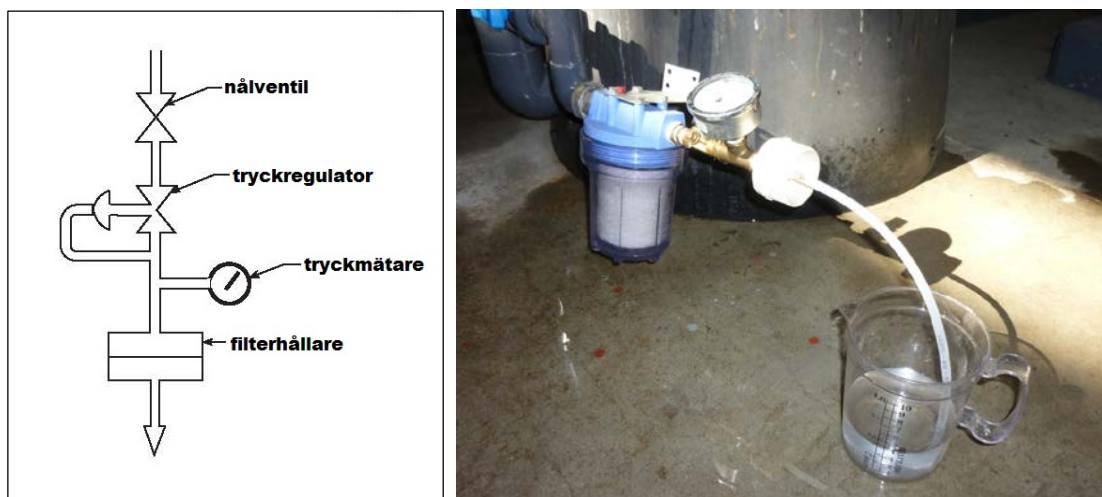
Figur 23. Avskiljningsgrad för olika membran-tekniker

Figure 23. Membrane filtration spectrum

Beläggningar orsakade av suspenderat material och kolloida partiklar är ett av de största problemen i en RO-anläggning. Även då de flesta RO-system har ett 5 μm partikelfilter före RO-membranen är det dessa fina partiklar som ger upphov till beläggningar i membranen.

SDI (Silt Density Index) är ett mått på mängden partikulära föroreningar i vatten. Det är en analysmetod som specifikt tagits fram för att bedöma risken för igensättning, orsakad av kolloider och partiklar, av RO-membran.

Metoden, som beskrivs i standarden ASTM 4189-07, använder ett 0,45 μm, Ø47 mm filterpapper. Vattnet som ska mätas får passera genom filtret med ett konstant tryck på 2,1 bar (30 psi). Figur 24 visar utrustning för SDI-mätning.



Figur 24. Utrustning för mätning av SDI

Figure 24. Equipment for SDI measurement

ASTM-metoden ger ett värde på SDI_{15} och går ut på att man jämför hur lång tid det tar för 500 ml prov att passera genom filtret vid start respektive efter 15 minuter. SDI -värdet beräknas med hjälp av formeln:

$$SDI_T = \frac{\left[1 - \frac{t_0}{t_1}\right]}{T} \times 100$$

T referenstiden, normalt 15 minuter

t₀ tid för de första 500 ml prov att passera filtret

t₁ tiden för 500 ml prov att passera filtret efter 15 minuter

Ett SDI_{15} -värde mindre än 5 i vattnet in till ett RO-aggregat anses acceptabelt. Det innebär att vid SDI_{15} -värden mindre än 5 blir frekvensen av igensättning av RO-membranen låg. Denna accepterade regel fungerar för det mesta men det finns undantag då ett SDI_{15} -värde mindre än 3 är önskvärt p.g.a. den kemiska sammansättningen i det suspenderade materialet.

Val av förbehandling avgörs bl.a. av värdet på SDI_{15} .

SDI_{15}	<5	behövs som regel ingen förbehandling
SDI_{15}	5 - 10	ett mediafilter (sandfilter) är nödvändigt
SDI_{15}	>10	nödvändigt med ett flerstegs mediafilter, eventuellt med tillsats av en koagulant eller fällningskemikalie

På vatten med höga SDI -värden kan det vara av intresse att även mäta SDI_5 och/eller SDI_{10} d.v.s. med referenstiden 5 eller 10 minuter istället för 15 minuter. Dessa mätvärden

kan ge bättre information om hur snabbt man kan förvänta sig att RO- eller UF-membranen sätter igen.

En hel del fasta partiklar bildas också i olika vattensystem. Det kan t.ex. vara korrosionsprodukter, utfällningar av hårdhet eller andra salter, mikrobiellt slam etc. Beroende på hur känsligt systemet är för beläggingsbildning bör lämpligt filter installeras. I t.ex. en kraftverkspanna är risken mycket stor för beläggningar på värmeöverförande ytor varför järnhalten i matarvattnet bör vara så låg som möjligt. Här rekommenderas ofta ett kondensatfilter för att minimera risken.

2.5.11 Mikroorganismer

Mikroorganismer orsakar en rad olägenheter i vattensystem, såsom korrosion, förlust av energi och tillgänglighet, mätfel, hälsoproblem mm. De många former av mikroorganismer som kan förekomma i vatten har olika krav på livsbetingelser och kan förekomma:

- ensamma eller tillsammans
- i symbios, konkurrens eller som parasiter
- som planktoniska (rörliga) eller sessila (fastsittande)

Behovet av livsenergi kan tillgodoses genom oxiderande eller reducerande processer, eller utan nämnvärt energibehov såsom för vissa sporer och virus.

2.5.11.1 Olika mikroorganismer

Virus är de minsta biologiskt aktiva organismerna. De har inget energibehov och saknar mekanismer för ämnesomsättning, förflyttning och förökning. Storleken är vanligen mellan 10 och 300 nm. Virus kan betraktas som död materia, som besitter förmåga att påverka levande celler genom att fästa vid proteiner och förändra värdcellens DNA.

Bakterier är encelliga organismer utan cellkärna och har normalt en storlek mellan 0,5 och 10 µm. Formen är ofta sfärisk (kocker), stavformad (bacill) eller som spiral (helix). De kan förflytta sig med hjälp av slem, trådar eller utskott (flageller), eller leva fastsittande. De kan vara gramnegativa och ha tunt cellmembran eller grampositiva och ha tjockt cellmembran. Metabolismen kan vara aerob (oxiderande) eller anaerob (reducerande). Flera arter kan överleva extrema förhållanden, såsom temperaturer över 100 °C, kyla och vacuum, extremt tryck, i radioaktiv miljö och hög salthalt.

Svamp förökas genom spridning av sporer, som antingen kan bilda encelliga organismer som jäst, eller flercelliga komplex som mögelkolonier. Svamp bildar också myceltrådar som kan nå avsevärd längd. Bakterier kan förökas genom celldelning men kan vid ogynnsamma förhållanden överleva genom sporbildning. Sporer kan överleva flera år under extrema förhållanden, varken vatten eller syre behövs under lång tid. När förhållandena blir gynnsammare börjar sporererna återbilda bakterier.

Protozoer eller urdjur kallas encelliga djur som amöba, toffeldjur, plankton. Storleken är vanligen mellan 10 och 50 µm. De kan förflytta sig med hjälp av flageller, hår eller med kontraktionsrörelser. Näring kan tas upp genom cellmembranet eller genom inneslutning. Förökning sker genom celldelning. Bakterier som tar sig igenom cellmembranet kan leva och föröka sig inne i värdorganismen tills denna dör och ett stort antal parasiter frisläpps.

Alger är växter som lever i vatten eller fuktig miljö, och de som är aktuella i samband med vattenbehandling är normalt de storleksmässigt minsta arterna. Encelliga grönalger eller fytoplankton är fotosyntetiska, binder koldioxid och producerar bl.a. kolhydrater. Blågröna alger (cyanobakterier) fixerar både koldioxid och kväve och bildar näringsämnen för andra mikroorganismer.

2.6 Periodiska systemet

Periodiska systemet är en indelning av alla grundämnen efter deras kemiska och fysikaliska egenskaper. Det är ett sätt att lära sig gemensamma egenskaper hos atomer.

Vid en första anblick kan det periodiska systemet kännas mycket komplicerat, men så är faktisk inte fallet. Det följer några enkla regler och genom att lära sig dessa regler går det att förstå otroliga mängder kemi.

Nu behöver man inte kunna det periodiska systemet för att lära sig vattenbehandling men det kan vara till stor hjälp när man behöver göra olika kemiska beräkningar.

Figur 25 visar det periodiska systemet. Texten i figuren är lite svår att läsa men för den som läser handboken digitalt blir figuren tydligare om den förstöras. En större version finns också i bilaga A.

Atommassor inom parentes är ämnets vanligaste eller stabilaste isotop.

Periodiska Systemet Design och användargränssnitt Copyright © 1997 Michael Dayah Plable.com Senast uppdaterat 20 sep 2014

Figur 25. *Periodiska systemet*

Figure 25. *Periodic table of the elements*

3 Energisystem

Vatten och ånga är den fysiska energibäraren i de flesta energisystem, såväl vid produktion som vid distribution.

I detta kapitel lämnas en kortfattad översikt över de energisystem som omfattas av matarvattentekniken. Syftet är att ange sammanhanget för de vattenfrågor som beskrivs i denna handbok i vattenkemi.

De energisystem som tas upp är:

- Kraftproduktion
- Rök-gaskondensering
- Hetvatten och fjärrvärmesystem
- Kylproduktion och kylvattensystem

I alla dessa energisystem är vattnets kvalitet av avgörande betydelse för en säker och ekonomisk drift. Det gäller framför allt vid kraftproduktion där kraven på vatten- och ångkvalitet är extra hög.

Jüri Tavast har skrivit ett kapitel om hur en förorenad ånga medför risk för utfällning av beläggningar i en ångturbin.

3.1 Inledning

Energi kan inte skapas och inte heller förbrukas. Tekniskt korrekt vore därför att i alla sammanhang ersätta orden energiproduktion och energiförbrukning med ordet ”energiomvandling”. I en anläggning omvandlas energi och görs tillgänglig genom en fysisk energibärare till flera processer eller anläggningar. Dessa kan omvandla den vidare eller bara värmeväxla. Ordet ”energiomvandling” återspeglar dock inte syftet med omvandlingen eller med energisystemet lika intuitivt som orden energiproduktion, energidistribution och energiförbrukning gör. Användningen av dessa ord i detta kapitel innebär inte att avkall gjorts på korrekthet, utan att systemens funktion kan beskrivas på ett enklare sätt.

3.2 Vattenbehandlingens plats i energisystemen

Vatten och ånga är fysiska energibärare de i flesta produktions- och distributionssystem för energi. Samtidigt vet vi att kombinationen vatten och stål skapar förutsättningar för korrosion.

Genom att behandla vattnet på olika sätt kan risken för korrosion minimeras. Det gäller även risken för utfällningar och beläggningar i olika vattensystem.

Olika typer av system ställer olika krav på vattenkvalitet. Kravet på vattenkvalitet skiljer sig mellan en kraftvärmepanna och ett kylvattensystem även om risken för både korrosion och beläggningar finns i båda. Generellt kan sägas att ju högre temperatur och/eller tryck systemet har desto högre krav ställs på vattenkvaliteten.

En förutsättning för att undvika problem är att ha en tillfredsställande vattenkvalitet, med tillhörande övervakning, anpassad till det aktuella systemet.

Det finns därför all anledning att minska risken för utfällning och korrosion. Detta är naturligtvis också anledningen till att man ställer krav på vattnet och ångan och till att man på olika sätt kontrollerar att dessa krav uppfylls. I korthet är syftet följande:

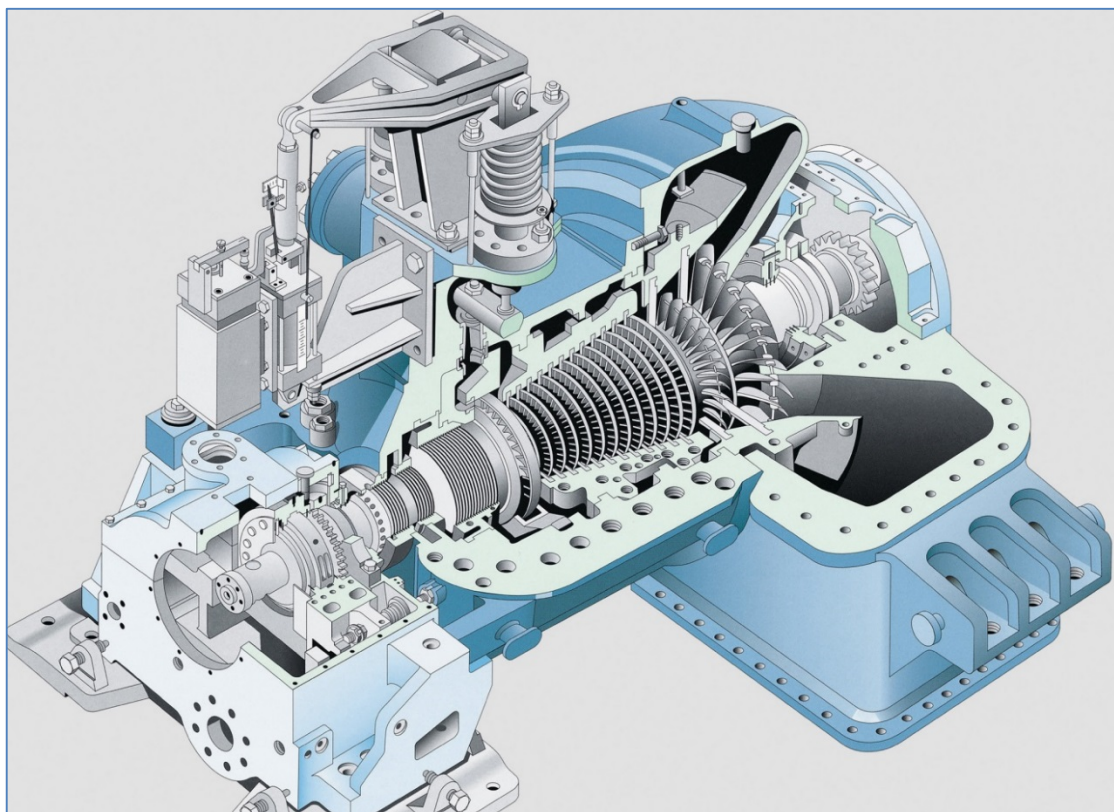
- Minskning av intrång av föroreningar som kan medföra utfällning av beläggningar och/eller korrosionsangrepp
- Minskning av koncentrationen av föroreningar som kan medföra utfällning av beläggningar och/eller korrosionsangrepp
- Minskning av bildning och transport av korrosionsprodukter som kan fällas ut i vatten/ångkretsen

3.3 Kraftproduktion

Med kraftproduktion menas i detta avsnitt såväl kondenskraft som mottryckskraft. I det förra systemet, kondenskraft, produceras endast elektricitet. Det värme som måste kylas ur ångkraftcykeln förs bort till omgivningen. Detta kan vara ett vattendrag eller havet, vilket är vanligt i Sverige som är ett glest befolkat land, eller till luften, vilket är vanligare i Europas mer tätbefolkade områden där tillgången till vattendrag är mindre. I mottrycksanläggningar utnyttjas bränsle till en produktion av både elkraft och värme.

I ångkraftanläggningar går omvandlingen av den kemiskt bundna energin i bränslen till elkraft ”omvägen” över en vatten/ångkrets med turbin. I andra typer av anläggningar, som t.ex. gasturbinanläggningar, driver rökgaserna direkt en (gas)turbin.

I en process där endast mättad ånga produceras kondenserar ångan i turbinen, vilket kan innebära mekaniska skador när vattendropparna kolliderar med turbinens skovlar och ledskenor. För att undvika detta överhettas ånga så att den inte kondenserar i turbinen utan först i kondensorn. Detta har även fördelen att de höga temperaturerna från förbränningen utnyttjas bättre och att mer mekanisk energi kan erhållas.



Figur 26. Ångturbin för industriella anläggningar

Figure 26. Industrial steam turbine

3.3.1 Följder av drift med förorenad ånga

Förorenad ånga medför risk för utfällning av beläggningar i en ångturbin. Om de utfällda beläggningarna är korrosiva är risken för besvärande korrosionsangrepp stor. Kostnaderna för detta kan bli höga, ofta betydligt högre än vad man skulle kunna tro.

Det finns flera orsaker till dessa höga kostnader:

- Minskad tillgänglighet p.g.a. korrosionsskador
- Ökat underhåll
- Ersättning av skadade komponenter
- Minskad verkningsgrad orsakad av beläggningar i turbinen eller på värmeöverförande ytor

3.3.1.1 Utfällning från ånga

Föroreningar kan fällas ut i ångturbiner från överhettad ånga om lösligheten av föroreningarna överskrids. Anrikning av svårflyktiga föroreningar i det första kondensatet i övergångszonen mellan torr och våt ånga (Wilsonlinjen) är ytterligare ett problem. I detta område är upprepad kondensation och avdunstning en viktig anrikningsmekanism för svårflyktiga föroreningar.

Nedan följer några exempel på kritiska föroreningar och miljöparametrar tillsammans med en kortfattad beskrivning av möjliga problem som de kan orsaka:

Natriumhydroxid, NaOH	Kan orsaka lokala korrosionsangrepp och spänningskorrosion i komponenter av kolstål och låglegerat stål i turbinen och pannan
Natriumklorid, NaCl	Kan orsaka lokala korrosionsangrepp och korrosionsutmattnings i turbinen
Natriumsulfat, Na ₂ SO ₄	Medför risk för korrosionsutmattnings i turbinen, speciellt i kombination med klorider
Kisel, SiO ₂	Kan medföra beläggningar i turbinen
Järnoxider, t.ex. Fe ₃ O ₄	Medför beläggningar i panna och turbin. Kraftiga porösa beläggningar i panntuberna medför risk för överhettning och uppkoncentrering av aggressiva föroreningar
Ättiksyra, CH ₃ COOH	Sänker pH-värdet och ökar risken för olika typer av korrosionsangrepp, bl.a. gropfrätning och erosionskorrosion
pH	Inverkar på angreppshastigheten hos stål och kopparlegeringar och skall ligga inom ett visst intervall
Syre, O ₂	I rent vatten är syre av godo. Vid "hög" salthalt medför syre en ökad angreppshastighet

3.3.1.2 Utfällning från överhettad ånga

Föroreningar lösta i ångan fälls ut om deras löslighet överskrider. En stor del av de utfällda föroreningarna följer dock med ångan ut genom turbinen utan att fällas ut på ytorna i turbinen eftersom ångan expanderar så snabbt genom turbinen - bara några tiondels sekunder. En del kommer dock att fällas ut i turbinen. Lösligheten minskar med minskande tryck och temperatur då ångan expanderar genom turbinen. Sannolikheten för utfällning är därför störst strax före Wilsonlinjen i kondensmaskiner och i de sista stegen i mottrycksmaskiner.

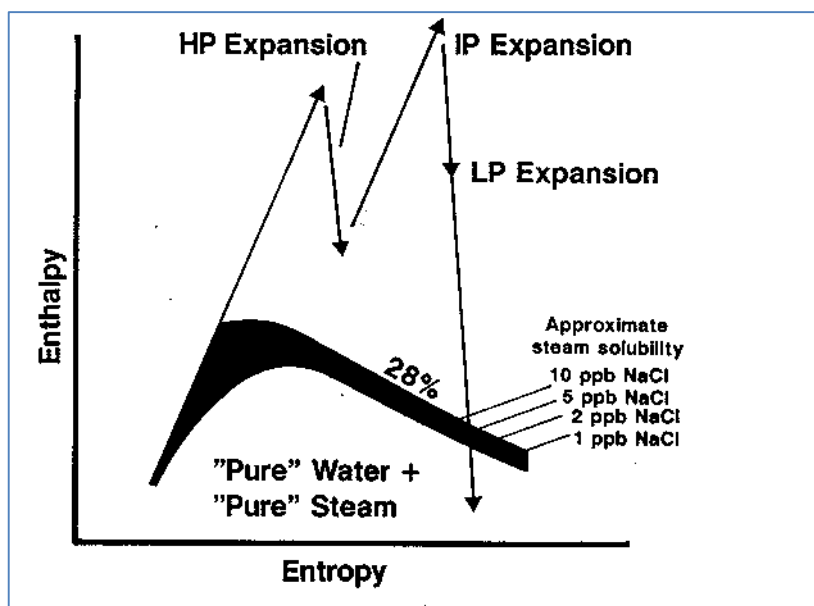
I kondensmaskiner minskar sannolikheten för beläggningar "nedströms" Wilsonlinjen, eftersom fukthalten då är så hög att det mesta av eventuellt utfällda beläggningar tvättas bort. Kraven på ångans renhet baseras alltså i praktiken på uppskattade lösligheter i "lågtrycksånga" eftersom målsättningen är att ångan skall vara så ren att inga föroreningar skall falla ut någonstans i turbinen. Om ångan inte expanderade så snabbt genom turbinen så skulle kraven på ångans renhet vara ännu hårdare eftersom mer av föroreningarna skulle hinna falla ut i turbinen.

I anläggningar med mellanöverhettning, d.v.s. i anläggningar där fuktig ånga med relativt låg temperatur och relativt lågt tryck från utloppet av högtrycks- eller mellantrycksturbinen upphettas i en mellanöverhettare är övergången mellan torr och fuktig ånga förskjuten till lägre tryck och temperatur vilket medför lägre ånglöslighet.

Kraven på ångans renhet är därför egentligen högre i anläggningar med mellanöverhettning än i en anläggning utan mellanöverhettning.

Figur 27 visar lösligheten av natriumklorid i överhettad ånga och hur lösligheten förändras vid expansionen genom turbinen i en anläggning med överhettning [1]. Figur 28 visar samma sak för natriumhydroxid.

Den vertikala axeln i diagrammen i Figur 27 och Figur 28 visar hur ångans entalpi, d.v.s. ångans energiinnehåll, förändras vid upphettningen i pannan respektive vid expansionen genom turbinen. Entropin, d.v.s. den energi som inte kan omvandlas till arbete, på den horisontella axeln kan däremot tas som en indikation på förlusterna i systemet. (Ju närmare lodlinjen som linjerna för upphettning i pannan respektive expansion i turbinen ligger, desto effektivare är pannan respektive turbinen).



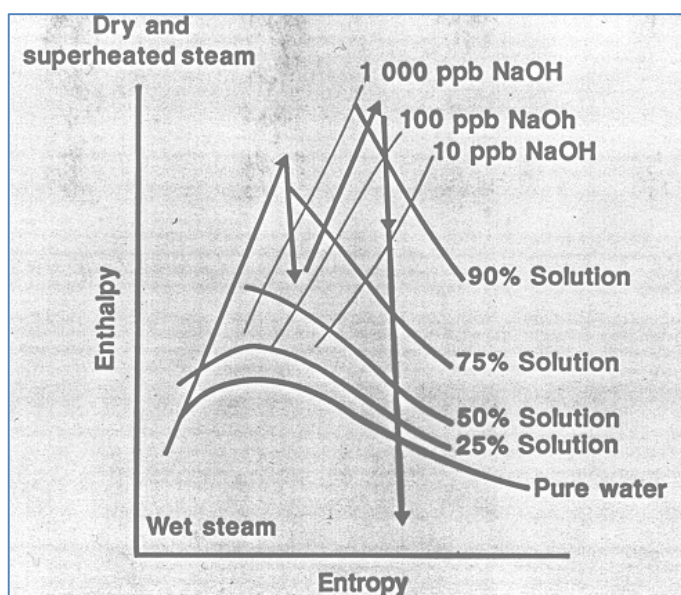
Figur 27. Lösligheten av natriumklorid i överhettad ånga inlagd i expansionslinjen för en anläggning med mellanöverhettning

Figure 27. The solubility of sodium chloride in superheated steam inserted in the steam expansion line for a plant with reheat

Lösligheten för både natriumklorid och natriumhydroxid är relativt hög vid högt tryck och hög temperatur och minskar sedan allteftersom temperatur och framförallt tryck minskar under expansionen. I bägge fallen är ånglösligheten mycket låg i närheten av Wilsonlinjen. Om halten natriumklorid i ångan är högre än lösligheten får man utfällning av saltkristaller i torr överhettad ånga. I närheten av Wilsonlinjen kan man i extrema fall få en koncentrerad saltlösning. Denna koncentrerade lösning motsvarar den "dynamiska" jämvikten mellan salthalten i vattenfasen och ångan vid Wilsonlinjen.

Anrikning av natriumklorid i det första condensatet i anslutning till Wilsonlinjen medför ökad risk för lokal gropfrätning och korrosionsutmattning i både skovlar och rotorerna. Under drift får man inga korrosionsangrepp "uppströms" Wilsonlinjen, eftersom natriumkloriden fälls ut i form av saltkristaller i torr överhettad ånga. Däremot kan sådana beläggningar orsaka angrepp under stillestånd vid kontakt med fuktig luft. Åtgärder för att undvika stilleståndskorrosion är därför speciellt kritiska i anläggningar med förorenad ånga. Den vanligaste stilleståndsåtgärden är inkoppling av ett torkaggregat ("Munterstork") för att undvika utfällning av fukt i turbinen.

Natriumhydroxid skiljer sig från natriumklorid och de flesta andra föroreningar ur den synpunkten att den är så starkt hygroskopisk (tar upp vatten) att vid utfällning av natriumhydroxid bildas koncentrerade lösningar också i torr överhettad ånga. Detta medför att man faktiskt kan få angrepp också i torr överhettad ånga. I närheten av Wilsonlinjen späds natriumhydroxiden däremot ut till försumbara halter. Utfällning av natriumhydroxid före Wilsonlinjen kan medföra allmänna korrosionsangrepp i rotorerna, skovlar och ledskenor samt spänningskorrosion i rotorerna och i andra komponenter av låglegerat stål. Observera risken för koncentrerade natriumhydroxidlösningar i torr överhettad ånga.

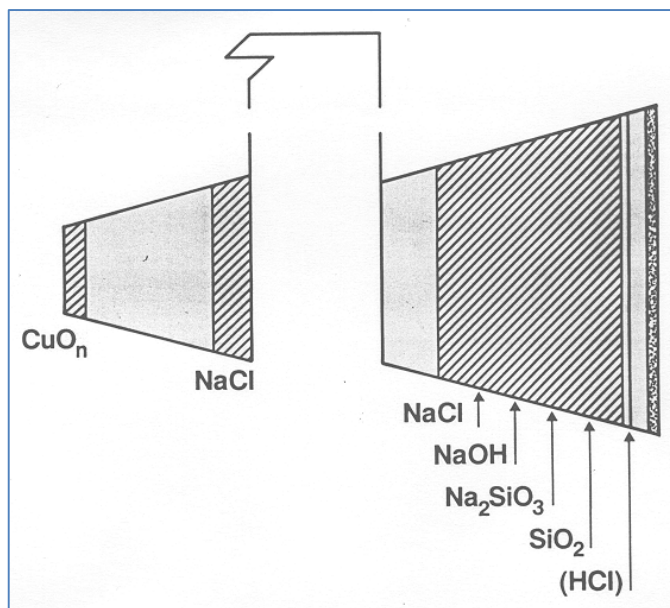


Figur 28. Lösligheten för natriumhydroxid i överhettad ånga inlagd i expansionslinjen för ånga för en anläggning med mellanöverhettning

Figure 28. The solubility of sodium hydroxide in superheated steam inserted in the expansion line for a plant with reheat

Utfällning av fasta beläggningar medför verkningsgradsförluster p.g.a. ett ökat tryckfall i turbinen. Effekten av en och samma absoluta mängd beläggning är större i högtrycksturbinen än i lågtrycksturbinen eftersom ångkanalen är trängre. Beläggningar kan också medföra vibrationsproblem p.g.a. förändrad egenfrekvens hos skovlar med kraftiga beläggningar eller vid en kraftigt störd strömning.

Figur 29 sammanfattar var man kan förvänta sig att hitta olika typer av beläggningar i en anläggning med mellanöverhettning [2].



Figur 29. Exempel på var man kan hitta olika typer av beläggningar i en ångturbin (med mellanöverhettning).

Figure 29. Examples of where to find different types of deposit in a steam turbine (with reheat).

Figur 30 visar ett fall från praktiken med kiselbeläggningar i en ångturbin.



Figur 30. Kiselbeläggningar i en ångturbin (utan mellanöverhettning)

Figure 30. Silica deposit in a steam turbine (without reheater)

2 Svoboda R., Bodmer M., Deposits and Corrosion in Steam Turbine, Internal report TEZ 87-20, ABB Power Generation Ltd, mars 1987

3.3.1.3 Anrikning i övergången mellan torr och fuktig ånga

I torr överhettad ånga är det den lokala "dynamiska" lösligheten av ett visst ämne i förhållande till den aktuella halten som avgör om det finns risk för utfällning. Då ångan börjar kondensera i anslutning till Wilsonlinjen, d.v.s. vid övergången mellan torr överhettad ånga och fuktig mättad ånga, är det i stället fördelningsfaktorn mellan ånga- och vattenfas som avgör den lokala kemiska miljön. Fördelningsfaktorn är ett mått på förhållandet mellan "halten" i ångan och "halten" i vattenfasen (kondensatet). Ett svårflyktigt ämne, d.v.s. ett ämne med en låg fördelningsfaktor, anrikas i det första kondensatet medan ett lättflyktigt ämne anrikas i ångan.

Fördelningsfaktorn för olika ämnen varierar med tryck och temperatur och är i en del fall dessutom koncentrationsberoende. Svårflyktiga korrosiva föroreningar som klorider, sulfater och andra salter liksom organiska och oorganiska syror anrikas i det första kondensatet. De flesta alkaliseringsmedel som skulle kunna minska risken för korrosionsangrepp genom ett ökat pH-värde är däremot relativt lättflyktiga. Till detta kommer att man i detta område också kan få en kraftig anrikning av svårflyktiga föroreningar genom en upprepad kondensation och avdunstning då Wilsonlinjens läge ändras i samband med transienter [3]. Det är alltså föga överraskande att korrosionsangrepp som gropfrätning och korrosionsutmattning vanligtvis återfinns i detta område.

Med ökande fukthalt minskar halten av föroreningar drastiskt. Detta har påvisats vid ett antal undersökningar [4][5][6].

3.3.1.4 Riktlinjer för ångkemi

Av de tidigare avsnitten framgår att den acceptabla halten av olika föroreningar i ångan är beroende av vad som händer i lågtrycksturbinen. På senare tid har uppdaterade riktlinjer för ångkemi vid ångturbindrift getts ut av olika organisationer. Se kapitel 10 riktvärden.

Skillnaderna mellan moderna riktlinjer för ångkemi är ofta relativt små. De flesta större leverantörer av ångturbiner har också egna riktlinjer som i stort sett ansluter till de internationella riktlinjerna.

3 Turbine Steam, Chemistry and Corrosion, EPRI TR-103738, August 1994

4 Corrosion Fatigue of Steam Turbine-blading Alloys in Operational Environment, EPRI-CS 2932, September 1984

5 Svoboda R. et al, Volatility of Anions in Steam-Water Systems of Power Plants, Water Chemistry of Nuclear

Reactor Systems 5, BNES, London, 1989, paper nr. 53

6 Tavast J., Partiell kondensation av ånga, Värmeforskrapport nr. 49, 1977

De viktigaste parametrarna vad det gäller ångkemi vid ångturbindrift är:

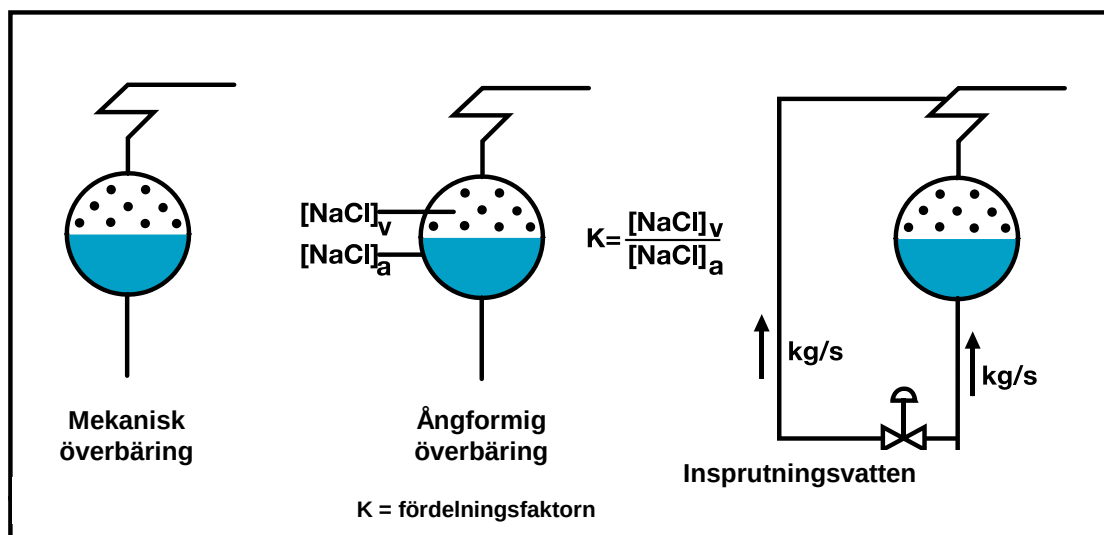
Natrium, Na
Sur konduktivitet eller avgasad sur konduktivitet
pH-värdet
Kisel, SiO₂
Klorid, Cl⁻
Sulfat, SO₄²⁻
Järn, Fe

Ångkemikraven i de flesta riktlinjer är normalt anpassade för kondensatorer. I en mottrycksanläggning är trycket och temperaturen ofta högre i turbinutloppet än vid Wilsonlinjen i en kondensanläggning, vilket medför att man borde kunna acceptera en något högre halt av föroreningar i ångan. Eftersom ångan dessutom ofta är överhettad också i utloppet i mottrycksanläggningar, behöver man inte heller ta hänsyn till risken för anrikning av korrosiva föroreningar i anslutning till Wilsonlinjen, i alla fall inte för turbinen. Problemet är att man fortfarande inte har tillräckliga kunskaper för att kunna kvantifiera hur mycket mer föroreningar som man skulle kunna tolerera som funktion av mottrycket.

Föroreningshalterna i ångan överskrider ofta gränsvärdena i samband med transienter som uppstart och laständringar. Normalt återgår halterna till acceptabla värden inom några få timmar (<12 h). I moderna riktlinjer har s.k. åtgärdsnivåer införts för de mest kritiska parametrarna för att ge vägledning för hur man ska hantera avvikelser i vatten- och ångkemin. Bakom dessa åtgärdsnivåer ligger den enkla men sunda filosofin att en stor avvikelse från riktlinjerna måste åtgärdas snabbare än en liten avvikelse för att minska risken för kemirelaterade problem.

3.3.1.5 Mekanismer för transport av föroreningar till ången

I en genomströmningspanna kommer alla föroreningar i matarvattnet att överföras till ången med undantag för det som fälls ut i panntuberna. I en dompanna kan föroreningar överföras till ången genom tre additiva mekanismer enligt Figur 31.



Figur 31. Möjliga mekanismer för överbäring till ången i en dompanna.

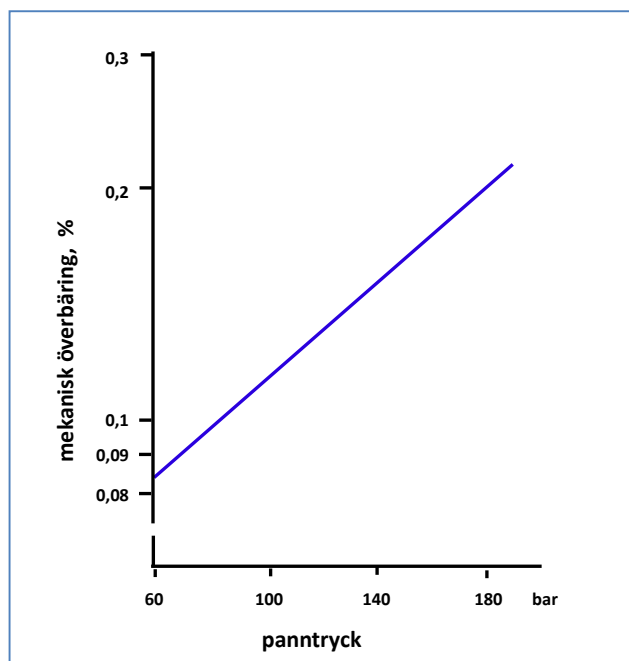
Figure 31. Possible mechanisms for carryover in a drum boiler.

Till vänster - mekanisk överbäring, i mitten - överbäring p.g.a. ånglöslighet, till höger - överbäring med vatten för ångkylning.

3.3.1.5.1 Mekanisk överbäring

En del vattendroppar förs med ången genom vattenavskiljaren i domen för att sedan förångas i överhettaren. Dessa vattendroppar har naturligtvis samma halt av föroreningar som pannvattnet i övrigt. Den mekaniska överbäringen är främst beroende av panntrycket, vattenavskiljarnas effekt, nivån i domen och körsättet. Att panntrycket inverkar är lätt att förstå eftersom vattenseparatorernas effekt är starkt beroende av täthetsskillnaden mellan vatten och ånga. Pannvattenkemin kan i vissa fall också inverka i de fall kemin leder till variationer i vattendropparnas ytspänning.

Figur 32 visar uppskattad “normal” mekanisk överbäring som funktion av panntrycket i dompannor [7].



Figur 32. Uppskattad “normal” mekanisk överbäring i en dompanna som funktion av panntrycket

Figure 32. Estimated of “normal” mechanical carryover in a drum boiler as a function of boiler pressure

3.3.1.5.2 Löslighet i ånga

Lösligheten i “färsången” från pannan bestäms av lösligheten och fördelningsfaktorn som i detta fall definieras som halten i ångan i förhållanden till halten i pannvattnet.

Vid konditionering (dosering) med fasta alkaliseringsmedel som fosfat är det vanligtvis endast kisel samt järn- och kopparoxider som kan räknas som lättflyktigt vid normala panntryck. En relativt sen men viktig upptäckt är att flyktigheten av klorider och sulfater är beroende av vattenbehandlingen. Både natriumklorid och natriumsulfat är svårflyktiga föroreningar vid normala panntryck. Ammoniumklorid och ammoniumsulfat är däremot relativt lättflyktiga. Detta innebär att överbäring av klorider och sulfater p.g.a. ånglöslighet är väsentligt högre vid vattenbehandlingen som enbart baseras på flyktiga alkaliseringsmedel. Se kapitel 7.3.1.2.1 kemikaliedos.

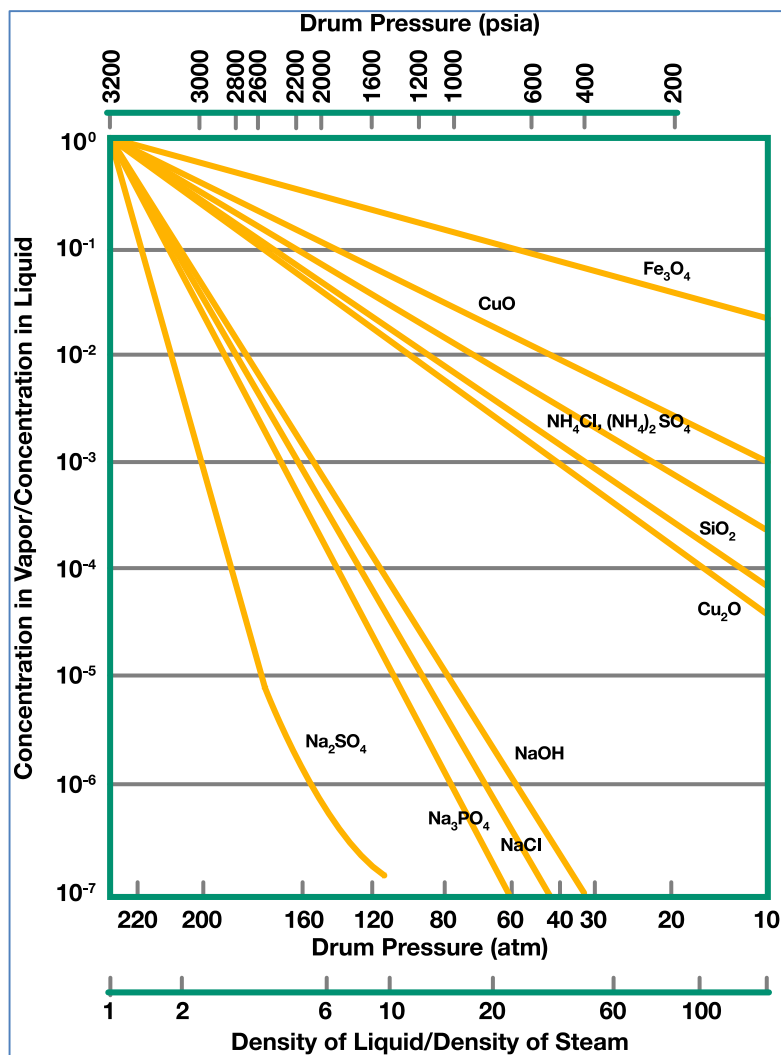
Som tidigare nämnts kan fördelningsfaktorn för en del ämnen även vara koncentrationsberoende. Modernare försök [8] visar att värdena för fördelningsfaktorerna i Figur 33 bör tas med viss försiktighet, i alla fall vid relativt låga tryck.

7 EPRI - Interim Consensus Guidelines on Fossil Plant Cycle Chemistry, CS-4629, June 1986

8 Cycle Chemistry Guidelines for Fossil Plants: All-Volatile Treatment, EPRI TR-10541, April 1996

3.3.1.5.3 Överbäring med vatten för ångkylning

I en del anläggningar kyls ångan efter överhettaren men före högtrycksturbinen genom insprutning av vatten. Vatteninsprutningen kan i vissa fall motsvara upp till 10 % av det totala ångflödet. Alla föroreningar i insprutningsvattnet kommer naturligtvis att transporteras till ångan och det är därför väsentligt att det använda vattnet är tillräckligt rent. I de flesta fall innebär detta att insprutningsvattnet måste vara totalavsaltat. Figur 33 visar fördelningskoefficienten för olika föroreningar som funktion av panntrycket [8].



Figur 33. Fördelningskoefficienten för olika föroreningar som funktion av panntrycket

Figure 33. Distribution coefficient for various contaminants as a function of the boiler pressure

3.3.1.6 Vattenkrav

Ur ångturbinens synpunkt är huvudsyftet med kemikraven för pannvattnet och matarvattnet i en dompanna respektive för matarvattnet i en genomströmningspanna att vattenkemin skall vara sådan att det är möjligt att uppfylla gällande krav för ångkemin. Dessutom skall vattnet naturligtvis vara av en sådan kvalitet att man inte får besvärande korrosionsangrepp eller beläggningar i pannan. En vattenkemi som medför en godtagbar ångkemi är vanligtvis acceptabelt också ur pannsynpunkt under förutsättning att pannvattnets pH-värde är acceptabelt. Syrehalten i matarvattnet bör inte heller vara varken för hög eller för låg.

Vid ångturbindrift bör kraven på pannvattenkemin alltså baseras på kraven på ångkemin. Med utgångspunkt från den uppmätta eller åtminstone uppskattade mekaniska överbäringen tillsammans med den uppskattade överbäringen p.g.a. lösligheten i ångan enligt Figur 33 kan man via kraven på ångkemin uppskatta vilka krav som måste ställas på pannvattnet respektive matarvattnet. Vad det gäller lösligheten i ånga måste man enligt ovan för vissa föreningar ta hänsyn till vilken typ av vattenbehandling som används. Man mäter normalt upp den mekaniska överbäringen genom att jämföra halterna av t.ex. natrium i pannvattnet och i mättad ånga och kan sedan anpassa kraven på pannvattnet efter resultatet av mätningarna. Det är normalt lättare att mäta upp den mekaniska överbäringen än ånglösligheten. Den mekaniska överbäringen i dompannor kan beräknas efter mätning av halten av natrium i pannvattnet respektive i mättad ånga eftersom natriumföreningar är svårflyktiga. En högre mekanisk överbärning än normalt innebär att man måste skärpa kraven på pannvattenkemin. I motsatt fall kan man släppa lite på kraven.

I kondensanläggningar med mellanöverhettning är trycket i anslutning till Wilsonlinjen, d.v.s. i anslutning till övergången mellan torr och fuktig ånga vanligtvis lägre än i anläggningar utan mellanöverhettning. Detta innebär en lägre löslighet av föreningar i anslutning till Wilsonlinjen i anläggningar med mellanöverhettning. I vissa riktlinjer ställs därför hårdare krav på ångkemin och därmed också på pannvattenkemin för anläggningar med mellanöverhettning [8].

I specifikationerna för pannvatten ingår normalt gränser för sur eller total konduktivitet, pH och i förekommande fall fosfat. Andra parametrar som ofta övervakas är natriumhalten, förhållandet natrium/fosfat, kisel, klorid, sulfat, ammoniak, syre och halten organiskt material.

3.3.1.6.1 Möjliga orsaker till en försmutsning av matarvattnet:

I genomströmningspannor är ångans renhet direkt beroende av matarvattnets renhet. I dompannor kan man i viss mån motverka effekten av ett försmutsat matarvatten genom en ökad utblåsning. Detta innebär dock en försämrad ekonomi p.g.a. betydande termiska förluster och dessutom finns det vanligtvis en övre begränsning för hur mycket man kan blåsa ut. Det är därför vanligtvis mer lönsamt att se till att matarvattnet är av tillräckligt god kvalitet. Nedan diskuteras de vanligaste orsakerna till försmutsning av matarvattnet.

Inläckage av kylvatten är en av de vanligaste orsakerna till försmutsning av matarvattnet. Läckan måste lokaliseras och pluggas så snart som möjligt. I annat fall kan

de sekundära skadorna bli omfattande även om man ökar utblåsningen och doserar mer fasta alkaliseringsmedel. En kondensatreningssystemanläggning med jonbytare kan i vissa fall medföra att man kan köra något längre med ett mindre inläckage av kylvatten. Det finns dock inga möjligheter att köra någon längre tid med inläckage av ett salthaltigt kylvatten.

Förorenat returkondensat är ett problem i vissa processindustrier. Mindre mängder föroreningar kan tas om hand genom en ökad utblåsning av pannvatten. I en del anläggningar renas returkondensatet i en kondensatreningssystemanläggning av typ mekaniskt filter och/eller jonbytarfilter.

Förorenat spädvatten. Råvatten med höga halter av organiskt material, vanligtvis humusämnen, orsakar problem eftersom en del av det organiska materialet tar sig igenom konventionella spädvattenutrustningar. I pannan sönderfaller de organiska ämnena till korrosiva föreningar som kolsyra, myrsyra och ättiksyra. Resultatet kan bl.a. bli ett mer korrosivt första kondensat i lågtrycksturbinen.

Mängden organiskt material i spädvattnet kan reduceras med hjälp av RO-filter eller anjonbytare av speciell typ ("scavengerfilter") i spädvattenreningsanläggningen.

Om kisel utgör ett problem är orsaken vanligtvis otillräcklig kapacitet hos spädvattenreningsutrustningen.

I en del äldre lågtrycksanläggningar kör man fortfarande med avhärdat spädvatten i stället för totalavsaltat spädvatten. Hårdhetsbildande positiva joner som kalcium och magnesium byts då ut mot natriumjoner. Spädvattnet är i dessa fall alltså salthaltigt och kan dessutom innehålla en hel del kisel. Man tvingas därför att ha en hög utblåsning i domen men får trots detta ofta beläggningar i form av salter och kisel i turbinen. Trenden idag är att man alltmer går över till totalavsaltning också i lågtrycksanläggningar.

Föroreningar från kondensatreningssystemanläggningen. Kondensatreningssystemanläggningar med jonbytare kan i vissa fall leda till en förorening av matarvattnet. Vid regenerering av djupbäddsfiler med starka syror och baser kan matarvattnet försmutsas av små mängder av joner som natrium och klorid. Regenereringsprocessen i sig själv kan vara ett riskmoment om de starka syror och baser som används för regenereringen av någon anledning skulle läcka in i matarvattenssystemet. Ur denna synpunkt är jonbytare av typ "precoat" mindre riskabla eftersom jonbytarmassan inte regenereras utan byts när den är förbrukad.

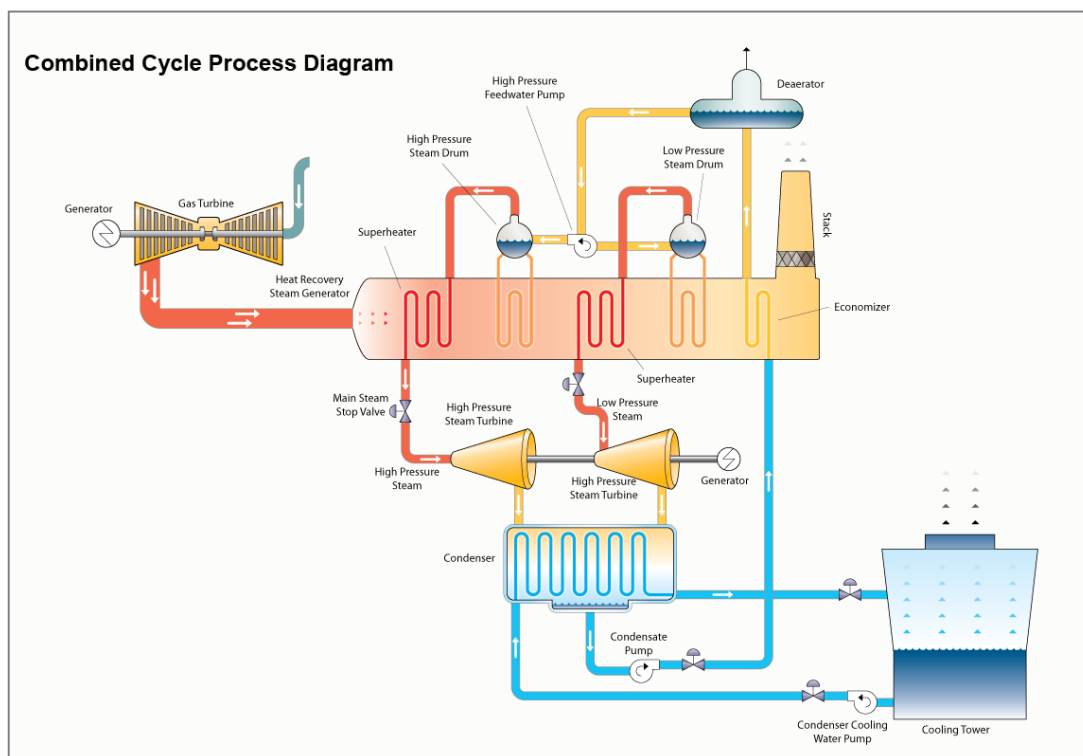
Orena kemikalier. I en del fall har det visat sig att föroreningar som klorider kommit från orena kemikalier som doseringsmedel till kretsen eller syror och baser som används för regenerering av jonbytare i kondensatreningssystemanläggningen.

Föroreningar i gasform. Icke avgasat spädvatten liksom inläckage av luft i kondensatsystemet medför en ökad halt av syre och koldioxid. Koldioxid medför ett sänkt pH-värde och kan därmed medföra en ökad korrosionshastighet. Syre medför också en ökad risk för korrosionsangrepp i salthaltigt vatten. Det är lättare att avlägsna syre än koldioxid via termisk avgasning. Syrehalten kan i vissa fall också reduceras genom tillsats av organiska syrereduktionsmedel. Detta är i sig inte helt problemfritt eftersom de

aktuella organiska föroreningarna sönderfaller vid de höga temperaturerna i pannan vilket bl.a. leder till bildning av sura sönderdelningsprodukter som kan påverka pH-värdet och störa övervakningen av kemin i systemet.

3.3.2 Gaskombianläggningar

I en gaskombianläggning (HRSG, heat recovery steam generator) kan verkningsgraden för omvandling av bränsle till el höjas genom att ta vara på värmten i avgaserna från turbinen i en s.k. avgaspanna. I en sådan s.k. kombicykel används värmten i rökgaserna för att driva en ångkraftprocess vid jämförelsevis låga temperaturer. Se Figur 34.



Figur 34. *Exempel på en gaskombianläggning*

Figure 34. *Examples of a combined cycle plant*

I Sverige finns det i dagsläget endast ett fåtal gaskombianläggningar. Utomlands är de dock vanligt förekommande och det finns all anledning att tro att det kommer byggas fler även i Sverige. I Sverige kylv ångkondensorn med fjärrvärme istället för ett kyltornssystem.

Ett vanligt förekommande problem i dessa anläggningar är FAC, Flow Accelerated Corrosion. Det finns egentligen ingen bra svensk översättning men det som stämmer bäst överens är erosionskorrosion, även om man internationellt sett skiljer på FAC och erosionskorrosion.

Problemet visar sig i att panntuberna korroderar i tubböjar och andra partier med hög flödes hastighet. Det ställs höga krav på vattenkemin i dessa anläggningar för att minimera

risken för FAC. Genom att använda kromlegerade panntuber minskas också förutsättningar för FAC. Se kapitel 4.3.2.3.1 om FAC.

3.3.3 Industriella system för ångproduktion

I en förhållandevis enkel industrianläggning produceras ånga som distribueras till de olika processerna i anläggningen som kräver energi i form av värme. Ångan används huvudsakligen till att värma processmedier. Systemet består av en panna och utrustning av varierande slag (reaktionskärl, värmeväxlare, torkpressar, autoklaver m.m.) som förbundits med ett ledningssystem. En god processekonomi förutsätter att kondensatet återförs till pannan.

I många processer utnyttjas endast kondensationsvärmets, och ju högre drifttryck, desto högre är temperaturen vid vilken värmets avges. Det finns i dessa fall inget värde i att överhätta ångan från pannan, annat än att på så sätt undvika komplikationer genom kondensation i ledningarna. Överhettad ånga kan orsaka svårigheter i en värmeväxlare med låg värmeöverföringskoefficient för nedkylningen till måttat tillstånd och övertemperaturer för processmediet.

Ångackumulatorer kan användas för att jämna ut variationer i belastningen av ångnätet.

Ett energisystem i en industrianläggning kan dock ofta vara en mottrycksanläggning, med produktion av el och värme för behoven i industrins produktionsprocess. Värme behövs då vid relativt höga temperaturer. Ångan som produceras är då överhettad för turbinprocessens skull.

Kravet på ångkvalitet är i dessa anläggningar betydligt lägre än för ånga i en kraftproducerande anläggning. Ofta räcker det att hålla ett tillfredsställande pH-värde i syfte att undvika korrosion i ång- och kondensatsystem. pH-värdet anpassas utifrån materialval i kondensorer etc.

Avspänningsånga (även kallad flash-ånga) i ett system för vattenånga, är den ånga som frigörs när trycket och därmed också kokpunkten sänks. I ett ångsystem med kondensatavledare sker detta t.ex. när kondensat lämnar de trycksatta ångledningarna och via kondensatavledare passerar över till det i princip trycklösa kondensatsystemet. Ett annat exempel är den ånga som frigörs i avspänningskärlet vid bottenblåsning av pannan. Denna ånga kan med fördel återvinnas till systemet.

3.4 RKG

Rökgaser från gas- och bibränsleeldade pannor innehåller vattenånga och värmeutbytet i processen kan ökas om ångan kondenseras till vatten i ett särskilt steg, den s.k. rökgaskondenseringen.

Det finns ett stort intresse vid såväl kraftvärme- och värmeverk som industripannor att rena utgående rökgaskondensat från rökgaskondenseringsanläggningen. En reningsanläggning för rökgaskondensat kan i många fall vara något så ovanligt som en miljöåtgärd med kort pay-off-tid.

Rening av rökgaskondensatet möjliggör:

- bättre NO_x-avskiljning genom att ammoniakdoseringen kan ökas då överskott av ammoniaken i kondensatet avskiljs i reningsanläggningen
- att (billigare) bränslen innehållande tungmetaller kan eldas utan att utsläppsnivåer överskrider
- återvinning av renat kondensat (både vatten och energi) till spädvatten till vattenångcykeln
- ett led i ett alltmer slutet vattenkretslopp

Utsläppskraven varierar mellan olika anläggningar, och därmed också motiven för att installera rökgaskondensering och kondensatrening. Vid kraftvärmeanläggningar körs ibland rökgaskondenseringen kanske i första hand som skrubber, för att effektivt rena rökgaserna, då den värme som fås vid kondenseringen påverkar elproduktionen negativt.

I framtiden kommer incitamenten för att rena rökgaskondensat att öka ytterligare. Till detta bidrar bl.a. implementeringen av EU:s vattendirektiv[9], som i förlängningen kan leda både till strängare utsläppskrav och höjda vattenkostnader. Också anläggningarnas interna miljöarbete, ihop med den tekniska utvecklingen på området, leder till att vattenkretsloppen sluts mer och mer. Nya anläggningar byggs ofta med spädvattenproduktion baserad på återvunnet rökgaskondensat.

3.5 Hetvatten- och fjärrvärmesystem

Ett hetvattensystem är ett slutet system som cirkulerar varmt vatten för bl.a. uppvärmning av lokaler, ventilationsluft och energitillskott till processen inom industrin. Ur vattenkemisynpunkt skiljer det inget mellan ett hetvattensystem och ett fjärrvärmesystem. Det som skrivs om fjärrvärmesystem nedan gäller därför i stort även hetvattensystem.

Fjärrvärme är en ledningsbunden distribution av värme som används huvudsakligen för uppvärmning av fastigheter och lokaler samt beredning av varmvatten. I huvudsak används vatten som energibärare. I praktiken förekommer även ångnät för distribution av värme i industrier och i tillämpningar med behov av hög temperatur. Sådana system används i allmänhet sällan för distributionen av fjärrvärme över längre avstånd. Det finns dock undantag, t.ex. många äldre fjärrvärmenät, i t.ex. USA och Danmark, där ånga används. I de svenska systemen för fjärrvärme används vatten som värmebärare.

Det är inte ovanligt att fjärrvärme också används som energikälla till olika industriprocesser där fjärrvärmetemperaturen är tillräckligt hög och för snösmältning på gator under vintern. Det är emellertid svårt att försörja alla industriella processer med energi via fjärrvärme därför att dels varierar behoven ofta ganska snabbt, dels behövs i allmänhet högre temperaturer än för uppvärmning av fastigheter.

Temperaturen i framledningen, d.v.s. ut från produktionsanläggningen till värmeförbrukarna regleras utifrån utomhustemperaturen. Under den varma delen av året hålls vanligtvis en temperatur på 70 till 80 °C och under den kalla årstiden upp emot 100-120 °C. Fjärrvärmevattnet kyls hos förbrukaren, d.v.s. det avger värmets till en fysisk

9 Europaparlamentets och rådets direktiv 2000/60/EG

energibärare i kundanläggningen, t.ex. vattnet i en fastighets radiatorkrets. Temperaturen i returledningen från värmeförbrukaren till produktionsanläggningen hålls på motsvarande sätt kring 40 °C under den varma tiden på året och tillåts öka till ca 60 °C vid låga temperaturer. Temperaturen i ett hetvattensystem kan inom vissa industrier vara betydligt högre än vad som anges ovan för fjärrvärmesystem.

De första svenska näten byggdes för att distribuera värme från en kraftvärmeprocess i en central produktionsanläggning. Idag är värmeproduktionen mer varierad. Eftersom temperaturerna i fjärrvärmenäten är jämförelsevis låga kan fler värmekällor än ångpannor utnyttjas. Beroende på tillgång och temperatur kan värme som inte utnyttjas i industriella processer, det s.k. spillvärmets från t.ex. raffinaderier och tyngre processindustri utnyttjas för att försörja fjärrvärmenätet med värme. Värmekällor med låg temperatur kan växlas upp till fjärrvärmenätets temperaturer med hjälp av värmepumpar. Solvärme kan även utnyttjas under gynnsamma omständigheter.

Värmebehovet i ett fjärrvärmenät varierar mellan sommar och vinter. Valet av värmeproduktion är en fråga om driftkostnader, investeringskostnader, prestanda vid dellast m.m. Vissa processer bör drivas mer eller mindre kontinuerligt vid konstanta förhållanden under så stor del av året som möjligt, varför de står för den s.k. baslasten. Det är oekonomiskt att bygga dem för en alltför stor kapacitet då dellasttiden skulle bli för stor, och därmed utnyttjandegraden för låg. I stället används hetvattenpannor, vilka är relativt billiga i investering, för att tillfredsställa behovet av s.k. spetslast, d.v.s. den del av värmelasten som överstiger baslasten.

I mindre fjärrvärmesystem kan hetvattenpannor vara den enda värmekällan. Alternativet är pannor hos varje värmeförbrukare, och fjärrvärmesystemet erbjuder i så fall vissa skalfördelar vad gäller ekonomin.

Fjärrvärmesystemen kan ha en stor geografisk utsträckning, med en medelradie på flera mil och innehålla stora volymer vatten, tiotusentals kubikmeter eller mer. De kan också vara små system med något tiotal kubikmeter vatten.

Anslutning till fjärrvärmenätet av anläggningar där värme produceras och av anläggningar där värme förbrukas varierar. Oftast delas kedjan av system (produktion, distribution, förbrukare) i flera kretsar som är separerade av värmeväxlare. Händelser i en krets återverkar då endast i begränsad omfattning på förhållandena i andra kretsar. En annan aspekt är att tryckförhållanden i ett utsträckt nät varierar kraftigt. Närmast pumparna i anläggningen blir trycket högt, vilket värmesystem i fastigheter inte normalt konstrueras för, medan den tillgängliga tryckskillnaden längst ut i nätet kan vara mycket litet. Tryckhöjande pumpar ute i nätet kan förekomma. Beroende på driftstrategi kan även tryckförhållanden variera under året.

Den dominerande systemlösningen i stora nät är värmeväxling i produktionsanläggningen, t.ex. genom en kondensor i en kraftvärmeprocess eller i en värmepump, och en värmeväxling hos värmeförbrukaren. Där brukar effektöverföringen delas upp på två (eller fler) växlare: en för lokaluppvärmning och en för tappvarmvatten.

3.5.1 Vattenkvalitet i fjärrvärmesystem

Kravet på vattenkvaliteten är beroende på om fjärrvärmenätet är direkt eller indirekt kopplat med pannan. I en direktkopplad panna värms fjärrvärmevattnet direkt i pannan och önskad temperatur shuntas ut. Med indirekt koppling menas att pannan och fjärrvärmenätet är skilda åt med värmeväxlare.

Kraven är högre i system med direktkopplade pannor p.g.a. att ytemperaturen är högre i pannan än i en värmeväxlare. Bakgrunden till detta är att kalk (hårdhet) faller ut och bildar beläggningar där det är som varmast i ett system. Varmaste ytorna i ett fjärrvärmesystem är i värmeväxlare eller motsvarande där fjärrvärmevattnet värms upp. Kalkbeläggningar i en undercentral uppträder på motsvarande sätt på sekundärsidan, d.v.s. där abonnentens vatten värms upp.

Till skillnad mot kalkbeläggningar kan beläggningar av korrosionsprodukter blidas på alla ytor i ett fjärrvärmesystem.

Korrosion orsakad av syre är det största problemet i ett fjärrvärmesystem. Det finns flera källor till inläckage av syre (luft) i ett fjärrvärmesystem, t.ex. via:

- påfyllning med oavgasat vatten
- öppna expansionskärl eller ackumulatortankar
- inläckage i undercentraler
- snabbfyllning med brandslang

Korrosionen i ett fjärrvärmesystem kan minimeras genom:

- ett högt pH-värde
- en låg syrehalt
- en låg konduktivitet (låg salthalt)

Den viktigaste parametern, gällande vattenkvaliteten i ett mindre hetvattensystem utan avgasat spädvatten, är mängden tillfört spädvatten. Det är viktigt att spädvattenmängden och eventuellt inläckage är så liten som möjligt. Varje liter spädvatten tillför syre till systemet som ger upphov korrosion och ökar risken för läckage med driftstörningar som följd.

Fasta partiklar i fjärrvärmenätet utgörs dels av korrosionsprodukter och dels av slagg, sand och annat från montaget. Halten ska vara så låg som möjligt för att undvika igensättningar och erosion i värmeväxlare och armaturer. Ett (eller flera) delströmsfilter bör alltid installeras i systemet.

3.6 Kylproduktion

Det finns flera olika typer av kylsystem, både vatten- och luftkylda. Gemensamt för alla typer av kylsystem är syftet att föra bort energi.

Kylvattensystem delas upp i mellan genomströmmande, slutna och öppna kylvattensystem. Ett slutet kylvattensystem kan ofta kylas i sin tur av ett

genomströmmande kylvattensystem. Se kapitel 15 för en mer utförlig beskrivning av olika kylvattensystem.

3.6.1 *Luftvärmewäxlare*

Luftvärmewäxlare inkluderar bl.a. kylmedelskylare, luftkylda kondensorer, fläktluftkylare och fläktförångare. De förekommer i både industriell kylning och frysning samt luftkonditionering.

Luftvärmewäxlare kallas också torra kyltorn och används främst i mindre kylsystem och system där kyleffekten är relativt liten.

3.6.2 *Genomströmmande kylsystem*

I ett genomströmmande kylvattensystem tas vattnet t.ex. från en älv. Efter det att vattnet kylt det aktuella objektet leds vattnet till avlopp eller tillbaka till älven. Inom industrin finns ofta även mindre genomströmmande kylsystem som kyla med stadsvatten. Ett genomströmmande kylsystem innebär en låg investeringskostnad men vattenförbrukningen blir förhållandevis hög.

3.6.3 *Slutna kylsystem*

Slutna kylsystem finns i storlekar med volymer från ett par liter (t.ex. kylsystemet i en bilmotor) upp till flera tusentals m³ i ett fjärrkylasystem. Kylsystem har funnits i industrier, datacentraler, kontors- och bostadsfastigheter i många år.

3.6.3.1 *Fjärrkyla*

Fjärrkylasystem är storskaliga ledningsbundna kylsystem som funnits i Sverige sedan 1992 då det första togs i drift i Västerås. Sedan dessa har installation av fjärrkylasystemen expanderat kraftigt. En vanlig systemlösning för fjärrkyla är att distribuera kallt vatten vid 4 till 12 °C från produktionsanläggningen ut i ledningsnätet. Oftast används en indirekt koppling av kretsarna i fjärrkylasystem, motsvarande den i fjärrvärmesystem, där vattnet skiljs från vattnet i abonnentanläggningen och från primärkretsen genom värmewäxlare.

3.6.4 *Öppna kylsystem*

Ett kylvattensystem med kyltorn kallas öppet recirkulerande kylvattensystem.

Ett kyltorn är en anläggning som kyler ner vatten genom avdunstning till atmosfärens luft. Kyltorn används bland annat för komfortkyla och vid olika industriella processer, kondenskraftverk och oljeraffinaderier etc.

4 Skador och skademekanismer i pannor

I detta kapitel beskriver Ivan Falk skador och skademekanismer i pannor. De vanligast förekommande skadorna diskuteras vad gäller orsak, förekomst och utseende samt hur de kan förebyggas. Teori varvas med exempel från autentiska skadefall för att illustrera det hela.

I kapitlet behandlas:

- Oxider och beläggningar
- Korrosion
- Skador på tuber
- Tubskador orsakade av koppar
- Hetvattenoxidation

En bra vattenkvalitet och en genomtänkt vattenkemi i vatten-ångcykeln är en förutsättning för att undvika de skador som behandlas i kapitlet och erhålla en ekonomisk och säker drift av anläggningen.

4.1 Bakgrund

Matarvattenkvaliteten har en avgörande betydelse för en säker och ekonomisk drift av pannan. Alla föroreningar som kommer i matarvattnet via spädmatningen eller returkondensatet kommer att hamna i pannvattnet.

Ju högre kvalitet matarvattnet håller desto mindre är risken för driftstörningar. Driftstörningar som i värsta fall kan leda till tubbrott och en längre tids stillestånd. Generellt rekommenderas ett minst avsaltat spädvatten för alla ångproducerande energianläggningar.

Korrosionsprodukter, salter och andra föroreningar i matarvattnet bidrar till en ökad risk för beläggningar på värmeöverförande ytor.

4.2 Oxider och beläggningar

Innan en ny panna tas i drift görs en kemisk rengöring (betning) med inhiberad syra. Vid betningen rengörs ytorna från föroreningar och svetsslagg. Samtidigt sker en normalisering av befintliga spänningar i tubytorna. Betningen avslutas med en passiveringsfas som bör göras med så rent vatten som möjligt. Normaliseringen och mycket rent vatten ger förutsättningar för att det ska bildas ett homogent och kompakt magnetitskikt.

Passivskiktet avses utgöra ett skydd mot efterrostning av ytorna under den korta tiden fram till att pannan kan tas i drift. Det egentliga magnetitskiktet bildas under pannans första drifttid vid den pannvattentemperatur som motsvaras vattnets mättnadstryck för aktuellt pantryck. Vid bedömningen av status på tubernas vattensida visar ett magnetitskikt av god kvalitet att inga kemiska angrepp skett i tubmaterialet.

Beläggningar utanpå magnetitskiktet avser främst avlagringar av utfällda föroreningar från matarvattnet och av cirkulerande järnoxidpartiklar i pannvattnet.

4.2.1 Oxidskikt

När ett tubprov ska analyseras med avseende på magnetitskikt eller beläggningstjocklek kapas en mindre bit till och gjuts in i plast. Därefter kan provet studeras i mikroskop, fotograferas och beläggningarna tjockleksbestämmas.

Figur 35 visar ett uttaget tubprov som kapats upp i bitar och därefter gjutits in i plast för vidare analys av magnetitskikt och beläggningstjocklek.

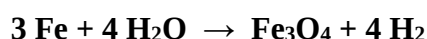


Figur 35. Bitar av ett tubprov som sågats ut och gjutits in i plast.

Figure 35. Cut out tube sample that has been molded into plastic.

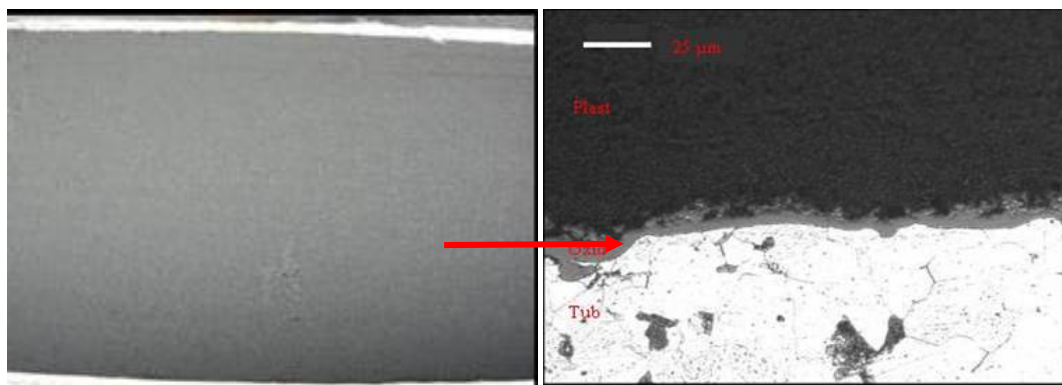
4.2.1.1 Magnetit

I rent och alkaliskt pannvatten reagerar järnet med syret i vattenmolekylen enligt bruttoformeln:



Vid reaktionen bildas magnetit och vätgas. Matarvattnet är avgasat och syrefritt och det är således inte löst syrgas i vattnet som reagerar med järnet då magnetit bildas. Det frigjorda vätet ger vattnet en låg redoxpotential och i magnetit föreligger en av de tre järnatomerna i tvåvärd form och de övriga två i trevärd form.

Magnetitbildningen är optimal i pH-området 9,6-9,8. Vid lägre pH-värde än 9,3 sker en begynnande bildning av hematit. Hematitbildningen ökar med sjunkande pH. Figur 36 visar exempel på en tub med ett magnetitskikt av god kvalitet.

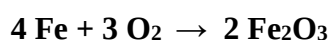


Figur 36. Magnetitskikt av god kvalitet. Bilder på tubytan och tvärsnitt av tubvägg.

Figure 36. Magnetite layer of good quality. Photos of tube surface and cross-section.

4.2.1.2 Hematit

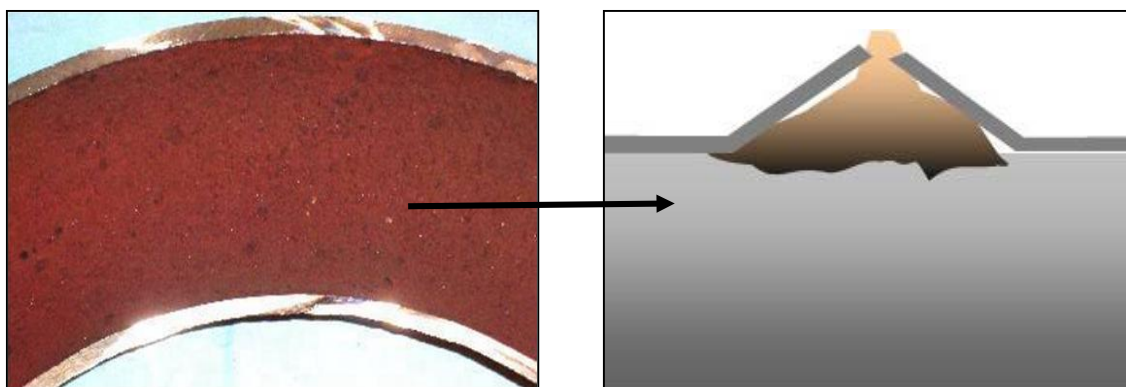
Hematit bildas företrädesvis i kondensat- och matarvattensystemen genom reaktioner mellan järn och i vattnet löst syre enligt följande:



Båda järnatomerna föreligger i trevärd form i oxidfasen. Till skillnad från magnetit som är svart till gråsvart har hematit en brun till brunröd färg. I många fall finns inslag av hematit i magnetitskikten som följd av att pH-värdet inte varit tillräckligt högt. Tillväxtmekanismen och kristallformen är annorlunda än den för magnetit. Båda oxidfaserna passiverar metallytan mot kemiska reaktioner.

4.2.1.3 Andra oxidfaser

Jämna och släta tubytor som är täckta av magnetitskikt bedöms vara passiverade mot kemiska angrepp. Figur 37 visar exempel på en ojämn yta med krutor



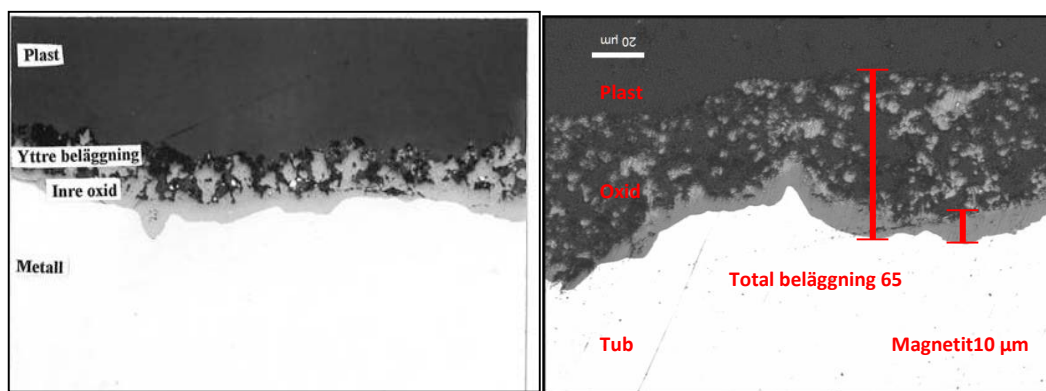
Figur 37. Allmänt utbredd korrosion i form av krutor.

Figure 37. Generally widespread corrosion in the form of crusts.

Om ytorna är ojämna och innehåller inslag av gula fläckar av götit (FeOOH) är ytan inte passiv utan utsatt för pågående korrosion. Allmänt utbredd korrosion i strömmande vatten visar i många fall en ojäm yta med en mångfald av krutor som innehåller en blandning av röd hematit och gul götit (rost).

4.2.2 Beläggningar i tuber från kraftverkspannor

Med vattensidiga beläggningar i panntuber avses egentligen avsättningar av järnoxidpartiklar och föroreningar på befintliga magnetitskikt. På slipade och polerade tvärsnitt av tubväggar och beläggningar framträder ett tunt och kompakt skikt av magnetit i grå färg närmast metallytan och en porösare yttre beläggning som vanligen är tjockare. Figur 38 visar exempel på typiska beläggningar av järnoxidpartiklar ovanpå magnetitskikten.

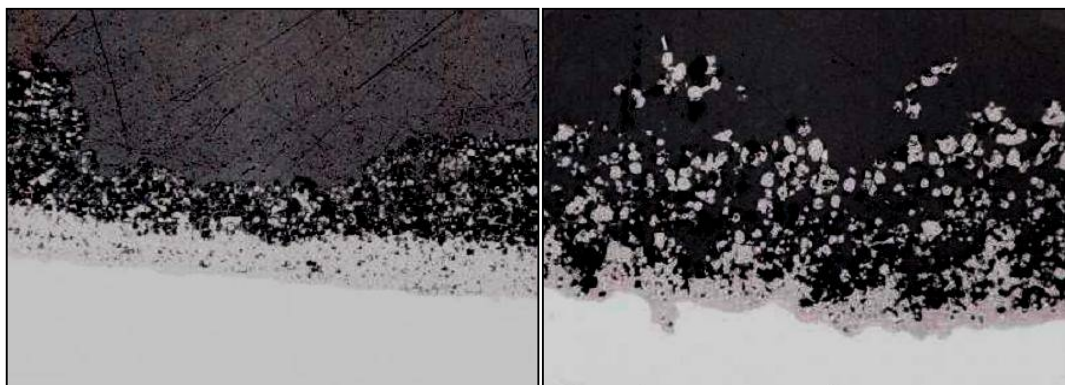


Figur 38. Tvärsnitt av tubvägg, inre magnetitskikt och yttre porös beläggning av järnoxidpartiklar.

Figure 38. Cross section of tube wall, inner magnetite layer and outer porous deposit of iron oxides.

Vid reaktionen mellan vattnet och järnet sker en tillväxt av magnetitskiktet men samtidigt sker också en viss release (frigörande) av partiklar från skiktets yta. De frigjorda partiklarna (releasen) följer med det cirkulerande pannvattnet och avsätter sig (deponeras) företrädesvis på tubbytor där förångningen är mest intensiv. Det är således naturligt att det bildas en yttre och porösare beläggning. Magnetitskiktet har bildats på den plats där det sitter medan det yttre skiktet har bildats på andra ställen och sedan deponerat på det inre skiktet.

Beläggningarna är ofta tunna ($<100\ \mu\text{m}$) och halten av föroreningar är mycket ringa. I vissa fall kan dock beläggningarna vara extremt tjocka. Exempel på extrema beläggningar visas i Figur 39.



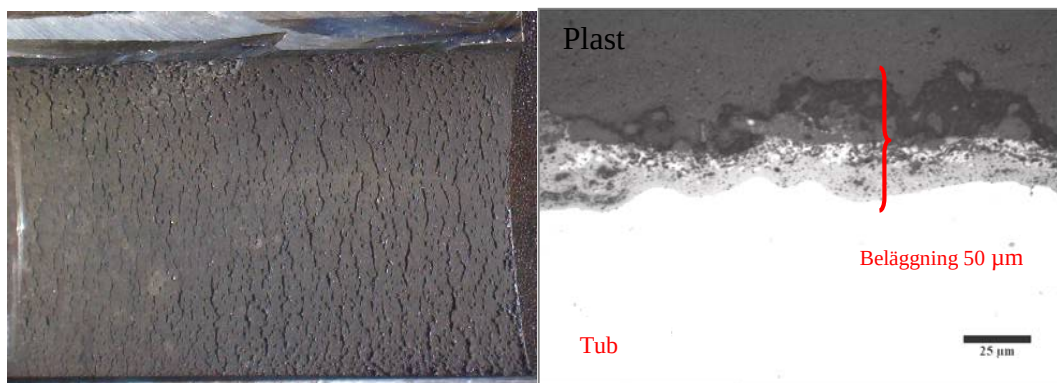
Figur 39. *Extremt tjocka (20-240 μm) och porösa beläggningar av järnoxid, från en kraftverkspanna.*

Figure 39. *Extremely thick (20-240 micron) and porous deposits of iron oxide, from a power plant boiler.*

Förutom en ovanligt porös yttre beläggning har det tätare inre magnetitskiktet också en ovanlig tjocklek. En enkel förklaring till vad som orsakar denna extrema uppbyggnad kan vara individuella egenskaper hos enskilda pannor.

4.2.3 Beläggningar i tuber från industripannor

I kraftverkspannor är det mindre vanligt att föroreningar från returkondensaten och spädvattnet bildar beläggningar i tuberna. I industripannor och speciellt vid massafabriker med stora och komplicerade kondensatsystem är risken större att föroreningar kommer in i pannvattnet och bildar beläggningar. Figur 40 visar exempel på tvärsnitt som innehåller föroreningar.



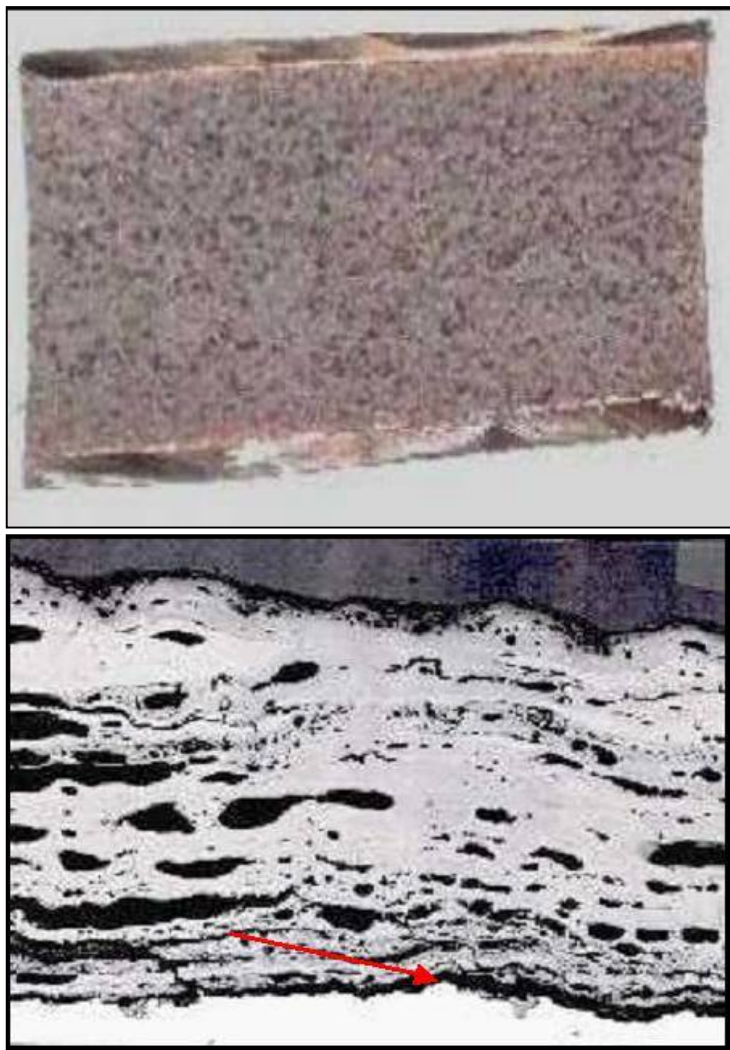
Figur 40. *Exempel på tubyta och tvärsnitt av en beläggning från en industripanna.*

Figure 40. *Example of a tube surface and cross section of a deposit from an industrial boiler.*

Det finns inget tydligt magnetitskikt närmast metallen och i mitten på beläggningen framträder ett ljusare stråk av föroreningar. I de flesta fall är det hårdhet (Ca, Mg) som faller ut med fosfat och bildar dessa stråk. Doseringen av fosfat förhindrar inte utfällningen av hårdhet men motverkar bildningen av kalk (CaCO_3) i beläggningen. En del av fosfatslammet följer med vattnet runt i pannan och en viss del sedimenterar i dom

och lådor. Vid inspektioner under revisionsstopp ger slamförekomsten en indikation om att det funnits föroreningar i vattnet. Med SEM-analyser (svepelektronmikroskopi) går det enkelt att påvisa att Ca, Mg och P ligger tillsammans och bildar stråk i tvärsnittet på förorenade beläggningar.

I extrema fall då alltför mycket föroreningar finns i pannvattnet sker tillväxten snabbt och mycket tjocka beläggningar kan bildas på kort tid. Figur 41 visar ett typexempel på extrema beläggningar.



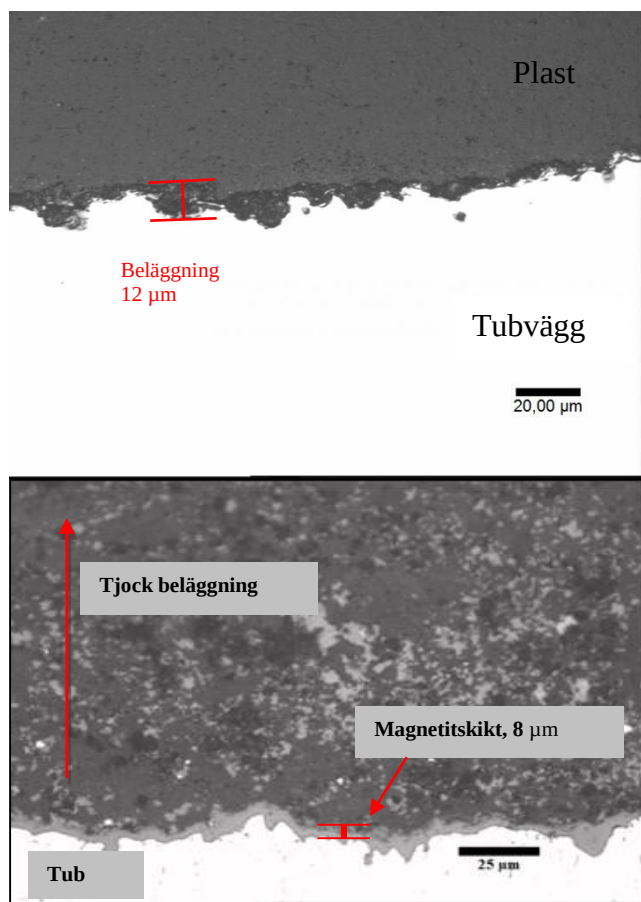
Figur 41. *Typexempel på en yta och tvärsnitt av en mycket tjock (250 μ m) och förorenad beläggning*

Figure 41. *Typical examples of a surface and cross section of a very thick (250 microns) and contaminated deposit*

Beläggningen är så tjock att spalter uppstått mellan metallen och beläggningen som följd av inre spänningar. I spalterna kan stagnanta (varaktiga) ångfilmer uppstå vilket drastiskt försämrar kylningen av tubväggen. Materialtemperaturen kommer då att stiga till

mjukningstemperatur varvid tubväggen brister av det inre trycket och en fläskada uppstår.

Det förekommer stora variationer i förhållandet mellan magnetitskikt och beläggningar i eldstadstuber från industripannor. Se Figur 42.



Figur 42. Tvärsnitt av tubvägg med ovanliga magnetitskikt och beläggning

Figure 42. Cross section of a tube wall with an uncommon magnetite layer and deposit

Den övre bilden visar en tunn beläggning (12 µm) men något magnetitskikt på metallytan är inte synligt. Materialytan är ojämn och ser ut att vara utsatt för begynnande korrosionsangrepp.

Den undre bilden visar en jämn materialyta som är skyddad av ett magnetitskikt av god kvalitet. Utanpå magnetitskiktet finns en mycket tjock beläggning (270 µm). I det aktuella fallet har pannan en drifttid på 20-25 år och förklaringen till att magnetitskiktet bibehållits trots den tjocka beläggningen är troligen att värmebelastningen varit låg.

4.2.4 Överhettartuber

4.2.4.1 Oxidskikt

Ångmiljön i överhettartuber ger mer idealiska förutsättningar för oxidationsreaktionerna mellan vattenmolekylerna och järnet. Vid oxidationen växer magnetitskikten inåt i metallen och utåt från metallen.

Tjockleken på dessa delar är ungefär lika och benämns efter tillväxtmekanismen som topotaktisk del (inåt) och epitaktisk del (utåt) räknat från den ursprungliga metallytan. Magnetitskikten är mycket rena och består till 72 % av järn och till 28 % av syre. Även tätheten (densiteten) ligger nära den för ren magnetit ($5,2 \text{ g/cm}^3$). En bild på tvärsnitt av oxidskikt i en överhettartub visas i Figur 43.



Figur 43. Tvärsnitt av oxidskikt i en överhettartub.

Figure 43. Cross sections of the oxide layer in a super heater tube.

Den ursprungliga metallytan har legat i mitten på skiktet. På bilden finns en del mörka områden som tyder på att den utåtväxande yttre delen av oxiden skulle vara mera porös. Men den epitaktiska delen har en sprödare karaktär och vid slipningen av tvärsnittet lossnar små bitar som på bilden uppträder som mörkare fläckar. Skiktet är homogent och båda delarna av skiktet har samma täthet.

Då oxidskiktet blir för tjockt uppstår sprickor på grund av tilltagande inre spänningar i oxiden. Oxidflagorna följer med ångan och fastnar i ångsilarna vilket kan medföra strypningar i ångflödet. Detta sker främst i samband med uppstart p.g.a. att beläggningarna är lika elastiska som stålet i tuben. Mindre partiklar kan passera ångsilarna och orsaka skador på turbinskovlarna i turbinerna genom erosion.

Figur 44 visar en tubyta där oxiden skalat (vänster) och flagor som tagits ut från ångsilen (höger).



Figur 44. *Avskalade oxidskikt i en överhettartub.*

Figure 44. *Scaling oxide layer on a super heater tube*

Avskalningen kan ske vid metallytan, som på Figur 44, men i vissa fall sker den i den inre topotaktiska delen av oxidskiktet. Oxidationen sker oftast jämnt över hela metallytan och skikten får en jämn tjocklek. På grund av ökande inre spänningar med tilltagande tjocklek uppstår i vissa fall mikrosprickor med oregelbundet mönster i skikten. Sannolik utgör mikrosprickorna diffusionsvägar för vattenmolekyler in till metallytan och följden blir att det bildas fördjupningar i metall under sprickorna. Ytbilder på ränder i metallen visas i Figur 45.

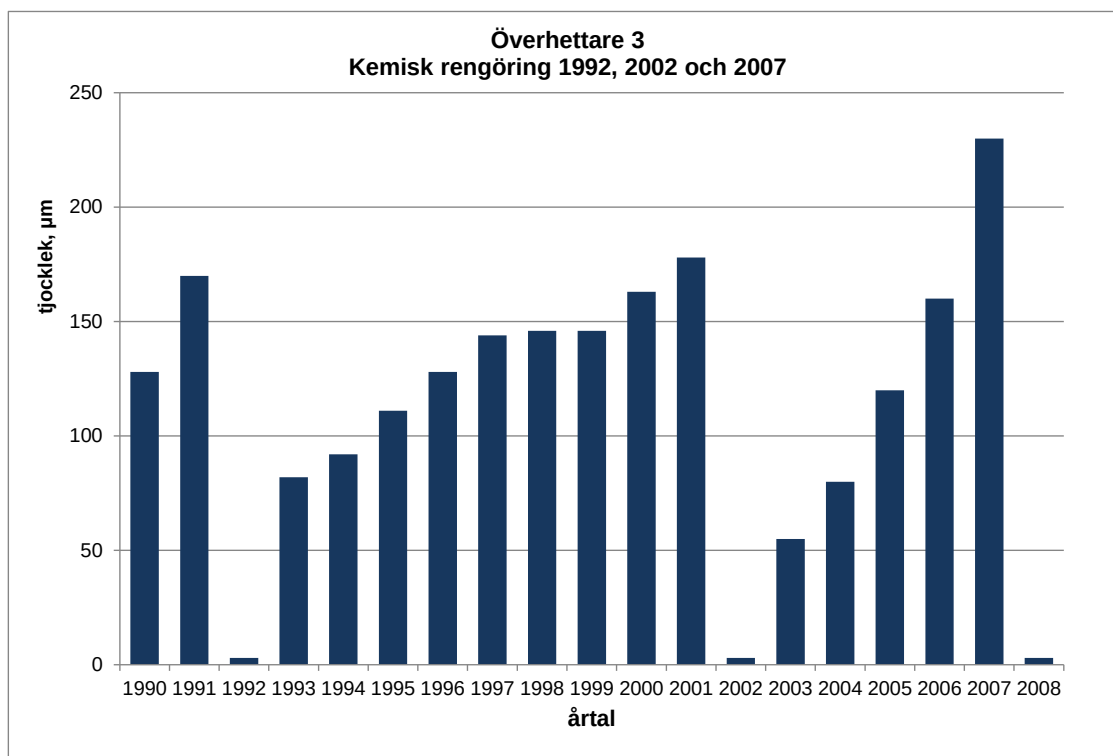


Figur 45. *Exempel på djupa (0,6 mm) oxidationsränder i metallen under tjocka magnetitskikt i ÖH-tuber.*

Figure 45. *Example of deep (0.6 mm) oxidation grooves in the metal under a thick magnetite layer on a super heater tube.*

Fördjupningen av ränderna går långsamt. Ränderna på bilderna har ett djup på 0,6 mm och har bildats under ca 20 år vid en ångtemperatur på 520 °C.

Tillväxten av skikten sker långsamt men ökar markant vid ångtemperaturer i området 520-540 °C. Ett diagram över tillväxten under lång tid i en slutöverhettare (SS 2218) med ångtemperaturen 525 °C visas i Figur 46. Vid temperaturer över 540 °C måste material av bättre kvalitet användas.



Figur 46. Exempel på tillväxten hos oxidskikt i en överhettare med ångtemperaturen 525 °C.

Figure 46. Example of oxide layer growth in a super heater tube, steam temperature 525 degC.

Den snabbare tillväxten per år räknat efter 2002 orsakas sannolikt åtminstone delvis av att mikroytan ökat som följd av att djupa oxidationsränder bildats i materialet.

4.2.4.2 Beläggningar

Oxidskikten i överhettartuber är i de flesta fall helt rena. I domen finns skärmlåtar och demistrar eller cykloner som avskiljer vattendroppar och pannvattensalter från den mättade ångan. Mekaniska fel på dominredningen kan dock uppstå p.g.a. korrosion eller utmattningsfel, vid justeringar eller reparationer under revisionsarbeten m.m. Cykloner eller demistrar som ej är korrekt fastsatta eller pannlaster som är för höga i förhållande till cyklonkapaciteten orsakar överbäring av pannvattensalter i den mättade ångan. Dessa salter faller ut och bildar fasta beläggningar i den första tubraden i den första överhettaren. Exempel på beläggningar i överhettartuber visas i Figur 47.



Figur 47. *Exempel på beläggningar i första tubraden i första överhettaren*

Figure 47. *Example of deposits in the first tube row in the first super heater*

Orsaken till denna beläggningsbildning var i detta fall en överbelastning av cyklonkapaciteten. Beläggningen har en ovanlig rosa nyans vilket troligen beror på en hög fosfathalt.

En annan typ av beläggningsbildning visas i Figur 48.



Figur 48. *Beläggningar i de nedre böjarna på första överhettaren*

Figure 48. *Deposits in the lower bends on the first super heater*

Beläggningarna i detta fall bestod till 95 % av pannvattensalter. Beläggningarna har anrikats i böjen och slutligen har ångflödet stängts av. Följden blev då att kylningen upphörde och materialet kom upp i mjukningstemperatur varefter tuben brast av det inre övertrycket.

Genom att t.ex. mäta natriumhalten on-line på mättad ånga kan fel eller överlast på dominredningen upptäckas i tid innan tubskador inträffar.

På överhettare där ångtemperaturen regleras med insprutningsvatten måste vattnet vara helt fritt från föroreningar och fasta doseringskemikalier (fosfat, lut) för att inte utfällningar och beläggningsbildning skall ske i överhettarna.

4.3 Korrosion och korrosionsskador

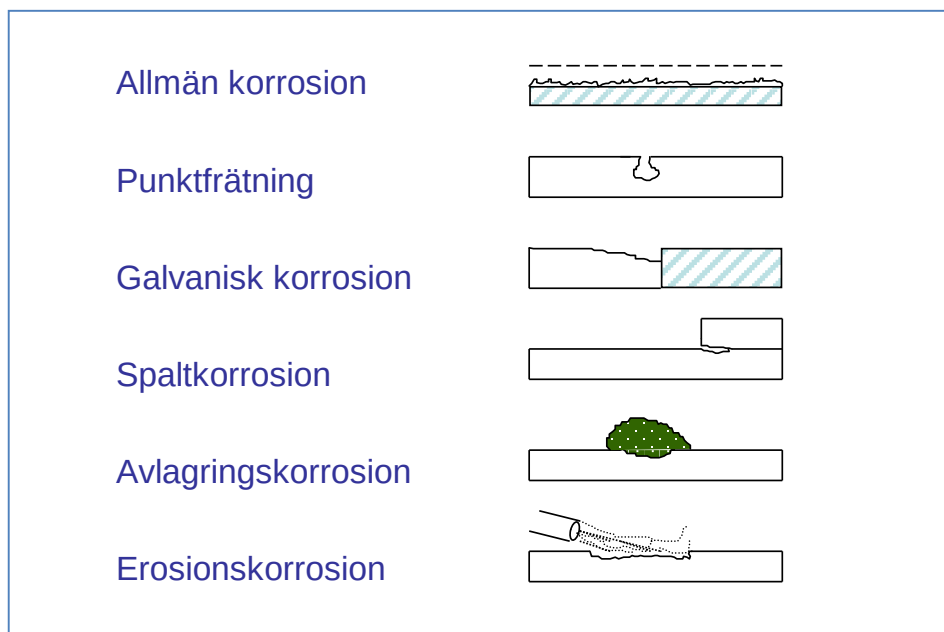
4.3.1 *Inledning*

Med korrosion avses i ursprunglig betydelse frätning på metaller men används vanligen i tekniska rapporter som ett samlingsnamn för olika typer av angrepp. Begreppet har en mycket vid betydelse och används även för oxidation i händelse av att oxidationen är lokal och kraftig.

Förlust av material från en materialkonstruktion genom inverkan av den miljö konstruktionen befinner sig i är således korrosion. Korrosionens art, hastighet och omfattning har väsentlig betydelse vid bedömning av materialförlustens inverkan på konstruktionens livslängd. Allmänkorrosion, som sker över hela ytan, har i detta sammanhang liten betydelse medan lokala angrepp har stor betydelse. Korrosion på insidan av panntuber under drift avser angrepp på materialet av aggressiva ämnen som kommit in i pannvattnet p.g.a. av bristfällig funktion i vattenreningssystemen. Dessa ämnen kan ha sur karaktär eller vara ämnen som termiskt sönderdelas och bildar aggressiva föreningar. Under avlagringar på tubytorna kan det exempelvis uppstå en mikromiljö som är aggressiv för metallytan.

4.3.2 *Korrosion*

I vattenfyllda system är det vanligen syre eller vätejoner (lågt pH-värde) eller en kombination av dessa som deltar i reaktionerna. Förklaringen till angreppen brukar beskrivas med kemiska reaktioner som sker vid anodytan och katodytan. I Figur 49 visas exempel på de typer av angrepp som vanligen förekommer i pannsystem.



Figur 49. Olika typer av korrosionsangrepp på kolstål

Figure 49. Different types of corrosion attack on carbon steel

Allmän korrosion yttrar sig som en relativt jämn avfrätning av ytan. Denna typ av korrosion förekommer på de flesta oskyddade metalliska material som utsätts för väder och vind. Korrosion orsakad av lågt pH-värde, **vätgasutvecklande korrosion**, ger också denna typ av angrepp.

Punktförätning. Denna korrosionsform har många namn, t.ex. kallas den även **gropförätning**, **pitting** och **syrekorrosion**. Punktvis genomförätning på en i övrig intakt yta. Orsakas ofta av syre. Liten yta men stort djup. Punktförätning kan även orsakas av klorider på rostfria material. Skadorna kallas för frätgropar, pits m.m.

Galvanisk korrosion eller **bimetallkorrosion** uppstår där två olika metaller står i elektriskt ledande förbindelse med varandra i korrosiv miljö. Den oädlare metallen angrips, samtidigt skyddas den ädlare metallen. Frätdjupet blir störst i anslutning till kontaktytan. Galvanisk korrosion uppstår normalt inte i syrefria vattensystem. Ett undantag är vid närvaro av t.ex. kopparjoner, se kapitel 4.5.1.2.

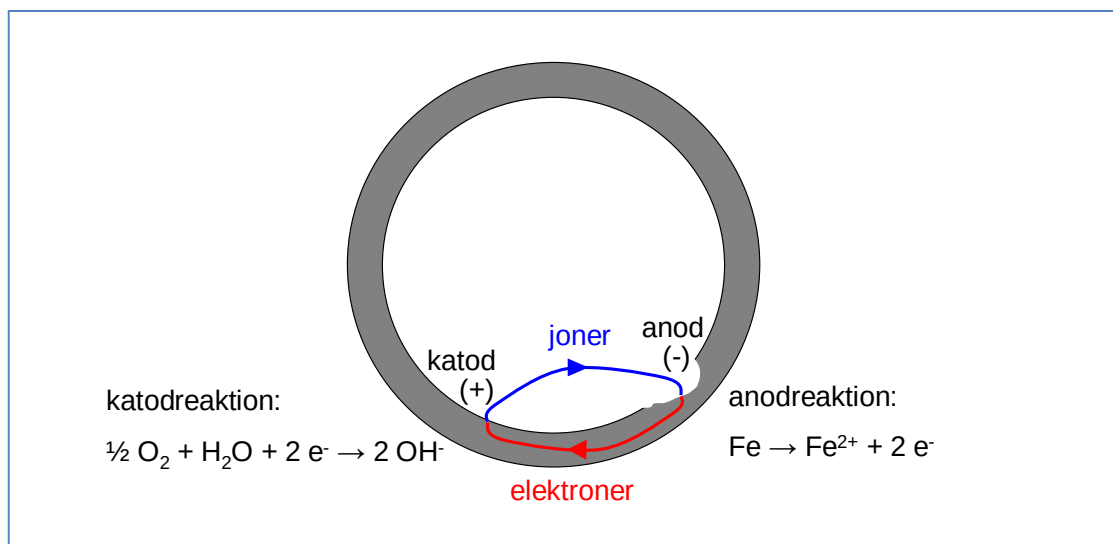
Spaltkorrosion och **avlagringskorrosion**. Under avlagringar (beläggningar) och i spalter kan en lokal korrosiv miljö, med lågt eller högt pH-värde, uppstå vilket leder till korrosion.

Erosionskorrosion, **strömningskorrosion**, eller **FAC** (flow accelerated eller flow assisted corrosion). Korrosion orsakad av höga strömningshastigheter, ofta i kombination med nötning av partiklar eller gasbubblor i vattnet. Det skyddande oxidskiktet eroderar bort och följden blir en pågående upplösning av metallen.

4.3.2.1 Syrekorrosion

Matarvattnet avgasas från syre och koldioxid. I de flesta fall övervakas restsyrehalten med on-line-instrument. Restsyret bidrar till att rödbrun hematit bildas på ytorna i matarvattentanken och ledningen fram till ekonomisern. Reaktionen mellan järn och syre sker ganska snabbt och det är mycket låga restsyrehalter som kommer in i pannan. Någon syrekorrosion under drift sker därför inte i panntuberna. Under stilleståndsperioder när luft kommer in i pannan räcker det med att fuktigheten i luften kondenserar på ytorna för att frätgropar skall uppstå.

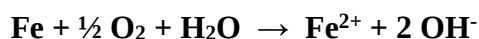
Vid anodytan avges elektroner från järnatomerna som går i lösning som joner. Vid katodytan sker samtidigt en reaktion där syret reduceras av elektronerna och bildar negativt laddade hydroxidjoner. En skiss över reaktionerna vid anodytan och katodytan visas i Figur 50.



Figur 50. Korrosionsreaktioner vid angrepp av syre på kolstål.

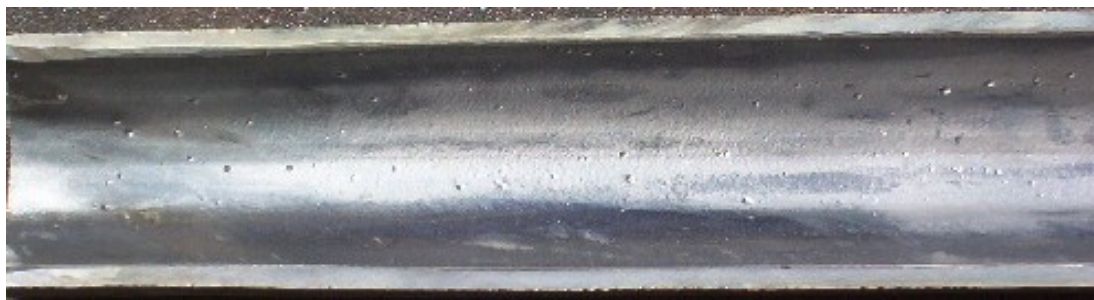
Figure 50. Corrosion attack on carbon steel caused by oxygen.

En sammanslagning av reaktionerna i Figur 50 ger följande bruttoreaktion:



Vid materialavverkningen bildas gropar i materialytan. I botten på groparna blir vattnet surt vilket medför att groparna kan bli förhållandevis djupa om reaktionerna får pågå under lång tid.

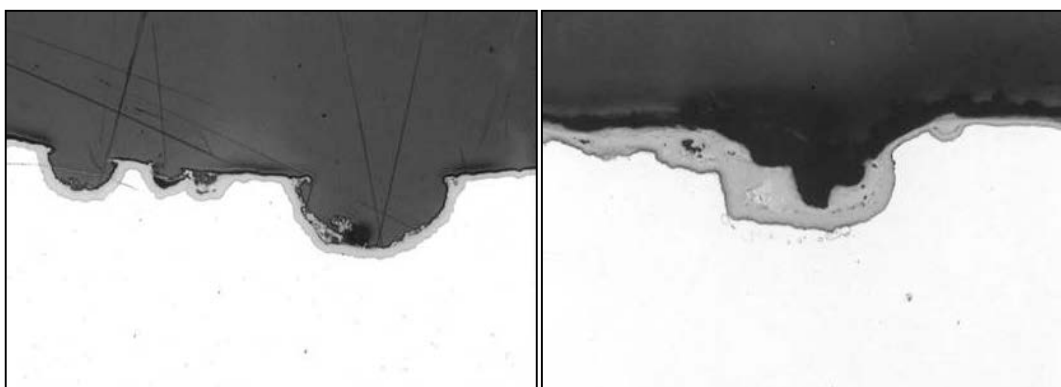
På en rengjord yta på en panntub framträder groparna som små nålstick vilket framgår av bilden i Figur 51.



Figur 51. *Små gropfrätor i ytan på en panntub.*

Figure 51. *Boiler tube with pits.*

Groparna har vanligen ett djup på 0,1-0,2 mm och förekommer i större eller mindre omfattning i alla panntuber. De benämns ofta pits och tillmäts ingen större betydelse för tubens hållfasthet. Under panndriften läks angreppen genom att nya och täta magnetitskikt bildas i groparna. Bilder på tvärsnitt av utläkta gropar och passiverade gropar visas i Figur 52.



Figur 52. *Frätgropar som passiverats av nya magnetitskikt*

Figure 52. *Pits passivated by a new magnetite layer*

Magnetitskikten framträder i ljusgrå färg på den ljusa metallytan och täcker både sidorna och botten på frätgroparna.

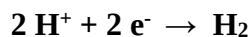
4.3.2.2 Korrosion orsakad av lågt pH-värde

I alkaliskt syrefritt pannvatten bildas svarta och tunna magnetitskikt som skyddar kolstålet mot upplösning och kemiska angrepp. Ett pH-värde över 9,3 är gynnsamt för magnetit medan det vid lägre värden sker en tilltagande bildning av brunröd hematit som också har en skyddande inverkan. Vid lägre värden än neutralpunkten, pH 7, bildas däremot gula och röda järnoxid-hydroxider som inte har någon skyddande effekt. Vätejonkoncentrationen ökar sedan exponentiellt vid lägre pH-värden och järnet korroderar genom upplösning och en allmänt utbredd frätning äger rum.

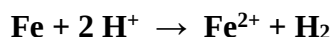
Vid anoden går järnet i lösning genom att avge elektroner:



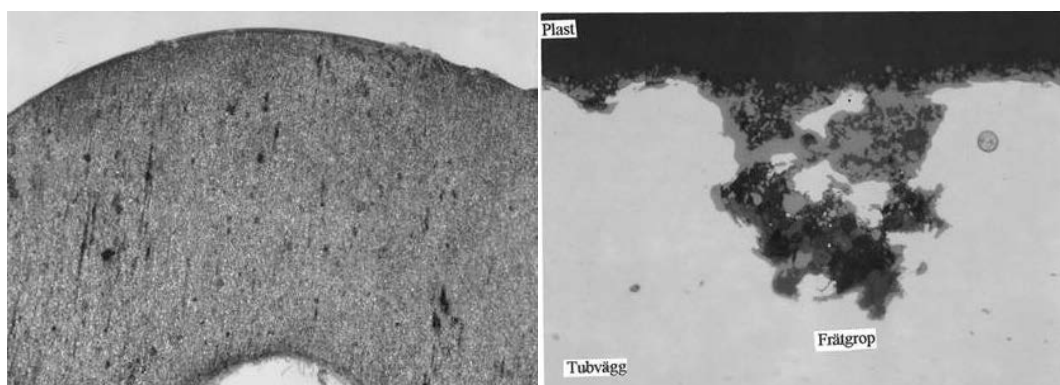
Och vid katoden reduceras vätejonerna till vätgas:



Summareaktionen blir då följande:



Figur 53 visar exempel på skador i panntuber där pannvattnet haft mycket lågt pH-värde.



Figur 53. Yta och tvärsnitt på frätskador i en tub där pannvattnet tillfälligt varit försurat.

Figure 53. Surface and cross section of a corrosion attack in a tube where the boiler water temporarily has been acidified.

Vid det aktuella skadefallet hade syra läckt in i pannvattnet från vattenreningsanläggningen till matarvattnet. Efter inläckaget av syra sjönk pH-värdet i pannvattnet till pH 2,8. Pannlasten minimerades och bottenblåsningen ökades samtidigt som en dosering av lut och fosfat påbörjades. Efter i storleksordningen ett dygn kom omslaget från surt till alkaliskt vatten. Pannan var därefter i drift 6-7 månader innan tubprov togs ut för undersökning och uppföljning av eventuella skador.

Undersökningen visade att tubbytna var sträva och kraftigt anfräta av det sura vattnet vilket kan utläsas av ytbilden till vänster i Figur 53. Tvärsnittsbilden till höger visar en frätgrop som är ganska typisk för angrepp av syra. Kännetecknande för sura angrepp är

att ytan känns sträv och vass vilket är följden av att syra löser upp ferritkornen medan karbiderna i korngränserna delvis blir kvar. Frätgroparna får därför underskurna kanter. På bilden framgår inte detta så tydligt då pannan varit i drift under lång tid efter det att skadan inträffade och magnetit bildats i groparna. Djupet på groparna var 0,2-0,4 mm vilket bedömdes vara mindre än vad som befarades.

4.3.2.3 Erosion och erosionskorrosion

I pannvatten pågår en viss indunstning av ammoniak och fosfat som doserats till matarvattnet. Vattenkemin är därför stabil vilket ger bra förutsättningar för att magnetitskikt av god kvalitet skall bildas och fortvarigt upprätthållas genom en ständigt pågående nybildning. I självcirkulerande pannor är flödeshastigheten låg samtidigt som magnetitskikten har en god vidhäftning vid tubytorna. Det finns därför inga egentliga förutsättningar för att skador orsakade av strömningsinducerad materialavverkning skall uppkomma i panntuber.

I ekonomisar är pH-värdet lägre och oxidskikten på tubytorna består vanligen av en blandning av magnetit och hematit. Oxidernas vidhäftning vid tubytorna är därför något sämre än i panntuberna. Även lösligheten för magnetit i vatten är högst vid ca 150 °C och avtar sedan med stigande temperatur. Efter som vissa delar av ekonomisrarna ofta ligger vid denna temperatur är risken för erosionsskador större här än i panntuber. Flödeshastigheten i ekonomisar är dock beräkningsmässigt mycket låg och skador inträffar sällan.

I ekonomisar där utgående rökgastemperatur kan sänkas genom ökning av flödeshastigheten i tuberna genom recirkulation finns dock en ökad risk för att skador skall uppstå. I Figur 54 visas bilder på typiska erosionsskador som uppstått i böjarna på en cirkulationsekonomiser.



Figur 54. *Vågmönster i tubböjar som skadats av erosion*

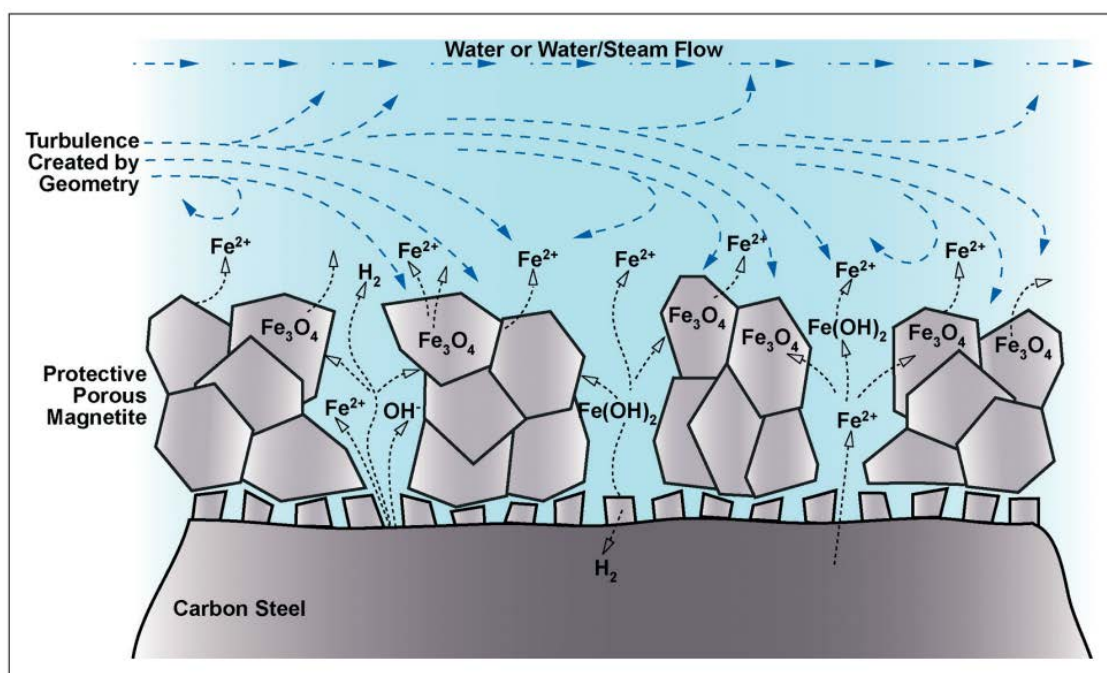
Figure 54. *Wave pattern in tube bends damaged by erosion*

Skadorna i Figur 54 visade sig efter en utredning, som tillsattes efter upprepade läckage i böjarna, bero på att vattenhastigheten varit för hög. Flertalet av böjarna hade kraftig godsfortunning. De raka tuberna hade inte förtunningar och sannolikt hade det höga och turbulenta flödet i böjarna orsakat skadorna.

4.3.2.3.1 FAC

I Sverige brukar vi sätta likhetstecken mellan erosionskorrosion och FAC, men utomlands skiljer man mellan dem.

Flödesaccelererad korrosion eller flödespåverkad korrosion (FAC från engelskans Flow Accelerated Corrosion) är en korrosionsmekanism i vilken ett normalt skyddande oxidskikt på en metallyta löser sig i ett snabbt strömmande vatten. Den underliggande metallen korroderar genom att oxid återbildas, och därmed fortsätter metallförlusten. Se illustrationen i Figur 55.



Källa: Power Plant Chemistry 2008 10(2)

Figur 55. Schematisk bild av vad som sker vid FAC

Figure 55. Schematic of the mechanism of FAC

Per definition beror graden av FAC på flödes hastigheten. FAC drabbar rörsystem i kolstål med ultrarent, syrefritt vatten eller mättad ånga. Rostfria stål drabbas inte av FAC. FAC på kolstål upphör i närvaro av liten mängd syre löst i vatten och hastigheten minskar snabbt med ökande pH-värde i vattnet.

Man skiljer på FAC och erosionskorrosion då de grundläggande mekanismerna för de två korrosionstyperna är olika. FAC innebär inte påverkan av partiklar, bubblor eller kavitation som orsakar det mekaniska, ofta kraterliknande, slitaget på ytan. Till skillnad från mekanisk erosion, så innebär FAC upplösning av normalt svårslöslig oxid genom en kombination av elektrokemiska, vattenkemiska och massöverföringsfenomen. Begreppen FAC och erosion används ibland omväxlande (synonymt) eftersom de faktiska mekanismerna, i vissa fall, kan vara oklara.

Begreppet erosionskorrosion ger ingen egen förklaring till en skada. Begreppet kan enklast förstås som att de skadade ytorna är dåligt passiverade och är täckta av löst sittande oxidskikt. Ytorna kan sägas vara utsatta för en viss korrosion. Flödes hastigheten har därför efterhand eroderat bort oxidskikten och det lilla skydd dessa gett och därigenom påskyndat det korrosionsförlopp som pågått.

Kolstålets hårdighet mot strömningskorrosion (FAC) är således sämre vid lägre pH-värden i vattnet. Detta gäller speciellt i konstruktioner utförda med tvära böjar eller styrplåtar i tankar där flödes hastigheten är hög och flödes bilden turbulent. I sådana positioner är användningen av låglegerat kolstål att rekommendera. Kolstål med 1-2 % krom ger ett betydligt starkare skydd mot erosion genom att oxidfasen kromit bildas närmast metallytan.

Framför allt är ofta gaskombipannor (HRSG, heat recovery steam generator) utsatta för FAC i panntuberna p.g.a. konstruktionen. Problemen med FAC i gaskombipannor går att bygga bort med en bra design och kromlegerade panntuber. Att kombinera LT-domen och avgasaren vilket ofta görs är inte en bra lösning i dessa pannor. Vidare får syrereducerande kemikalier inte doseras och pH-värde i pannvattnet ska vara högt, pH 9,5-9,8. Se även kapitel 5.4.1.3 om FAC i turbiner.

4.3.2.4 Avlagringskorrosion

Under tjocka och porösa beläggningar kan den miljö som materialet utsätts för kraftigt avvika från pannvattnets (bulkfasens) kemi. Speciellt i de tuber som är värmebelastade sker en anrikning av pannvattensalter under beläggningar. Anrikningen av natrium, från natriumfosfat eller andra natriumföreningar, höjer pH-värdet i vattnet under beläggningen. Då pH-värdet blir för högt (pH ca 12,7) sker en upplösning av magnetiten. Följden blir en pågående materialavverkning då nybildning av magnetit uteblir.

Figur 56 visar ett tvärsnitt på ett korrosionsangrepp i materialet under en tjock beläggning.



Figur 56. *Kraftiga angrepp i tubväggen från avlagringskorrosion*

Figure 56. *Severe damage caused by under deposit corrosion*

Metallytan saknar ett skyddande magnetitskikt. En avvikande, aggressiv, miljö under den tjocka beläggningen har orsakat korrosionsangrepp i den underliggande tubväggen.

Figur 57 visar tubbytor med skador av avlagringskorrosion efter rengöring.



Figur 57. *Exempel på angrepp i metallen från avlagringskorrosion.*

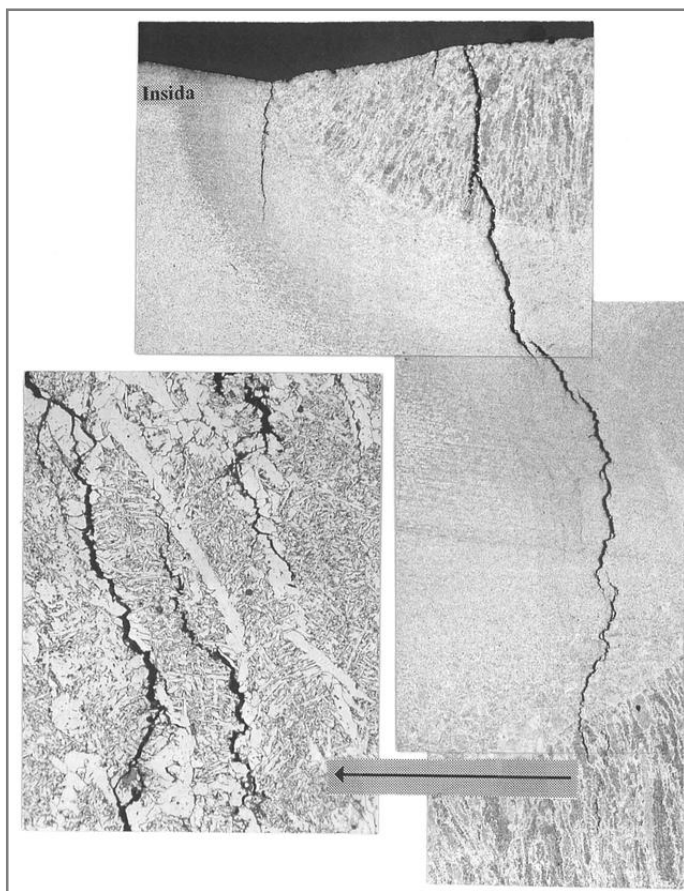
Figure 57. *Example of damage caused by under deposit corrosion.*

Angreppen uppträder oregelbundet och fläckvis på de ställen där magnetitskiktet blivit upplöst och en nybildning av magnetit inte har skett. Ytan i groparna är ojämn men angreppen är förhållandevis grunda.

4.3.3 Alkalisk spänningskorrosion

I pannvatten kan inte alkaliteten komma upp i så hög koncentration att spänningskorrosionssprickning kan uppstå på kolstål. Vid laboratorieförsök har man nödgats tillämpa av storleksordningen ca tio gånger högre koncentration av natriumhydroxid för att initiera denna typ av sprickning. Endast vid indunstning av pannvatten kan så höga halter uppnås att sprickningen startar. Indunstning av vatten kan ske till exempel i ångledningar, reduceringsstationer och i spalter intill tuber invaldade i domar.

I Figur 58 visas bilder på sprickor som bildats i svetsförband i en blandningslåda för returånga från torkmaskiner och mättad ånga.



Figur 58. Sprickor i svetsar på en ånglåda (St 35.8)

Figure 58. Cracks in a steam box welding (St 35.8)

Materialkvaliteten St 35.8 (olegerat kolstål) är inte känslig för spänningskorrosionssprickning. I ångledningar och speciellt i reduceringsstationer eller blandningslådor där ångan ändrar temperatur finns förutsättningar för utfällning och anrikning av alkali. Sprickorna startar på insidan av ledningarna och propagerar utåt tvärs svetsarna. Om anrikning av alkali sker på svets skarvar eller materialområden som är sensibiliserade av inbyggda spänningar kan alkalisk spänningskorrosion initieras. Sprickkaraktären i förening med att sprickorna startat på insidan av ledningarna och propagerat i spänningsinducerat område (svetsar) visar att sprickbildningen är en följd av alkalisk spänningskorrosion.

Karaktären hos sprickorna har tydliga inslag av spänningskorrosionssprickning. Speciellt gäller detta den starkt förgrenade sprickspetsen som visas i förstord form till vänster i Figur 58.

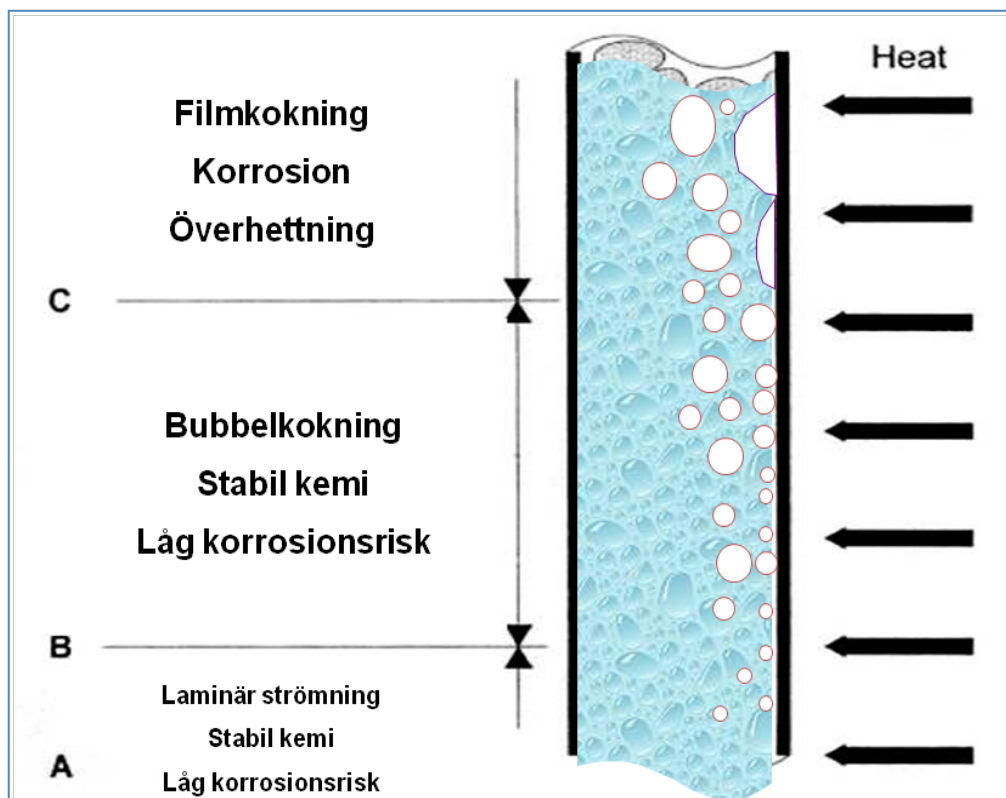
Orsaken till sprickbildningen bedömdes i det aktuella fallet vara indunstning och anrikning av alkaliska salter på materialytorna. Ångan från torkmaskinen innehöll natrium. Vid blandningen i ånglådan höjdes ångtemperaturen då den blandas med den hetare mättade ångan varvid en del av salterna föll ut i fast form.

4.4 Skador orsakade av överhettning och utmattning

De vanligaste skadorna på panntuber som orsakar tubläckage och pannstopp är fläxskador som följd av överhettning av materialet. Orsaken till skadorna är ofta cirkulationsfel av vattenflödet eller för tjocka vattensidiga beläggningar som försämrar kylningen. En annan vanlig orsak är utmattningssprickor som ofta uppstår av termiska rörelser i övergångar från klenare till grövre komponenter som till exempel infästningar av tuber i lådor.

4.4.1 Värmeöverföring - kokförlopp

I panntuber sker värmeupptagning i vattnet genom att en mindre del av det cirkulerande vattnet förångas och kan beskrivas som $1-x$ där x är andel ånga. Förångningen sker genom att ångblåsor ständigt bildas på ytan (bubbelkokning). Ångblåsorna stiger uppåt och utgör drivkraften i självcirkulerande pannor. Vid högre värmebelastning ökar x och kan lokalt närma sig 1. I detta skede övergår bubbelkokningen till filmkokning. En skiss över kokförloppen visas i vertikal Figur 59.



Figur 59. Kokförlopp i en panntub

Figure 59. Boiler tube boiling process

Vid filmkokningen finns inget vatten kvar att förånga vid tubytan och då försämras kylningen drastiskt. Temperaturen stiger snabbt upp till materialets mjukningstemperatur och tuben brister i en fläkning. Statistiskt sett är detta den vanligaste typen av tubskador i ångpannor.

4.4.2 *Hide-out*

I porösa beläggningar kan salter från vattnet uppkoncentreras genom en process som kallas "hide-out". Salterna följer med vattnet in i beläggningen och stannar kvar när vattnet lämnar ytan i form av ånga. De uppkoncentrerade salterna kan sedan orsaka korrosion på tuberna, s.k. avlagringskorrosion.

Fosfat är omvänt lösligt med temperaturen och faller ut på tubytan (hide-out) vid hög temperatur (last) och återupplöser vid temperatursänkning (s.k. hide-out return). Det innebär ett problem då utfällning och återupplösning av fosfaterna vid laständring orsakar stora variationer och pH-svängningar i pannvattnet.

Ett annat problem vid hide-out är avlagringskorrosion orsakad av den utfällda fosfaten. I takt med att panndesignen utvecklades under 1900-talet och arbetstrycken i pannorna blev allt högre, ökade även antalet pannhaverier och tubbrott orsakade av anrikning av alkali under beläggningarna på panntuberna. Anrikningen av alkali i beläggningarna ledde till alkalisk korrosion på metallen under beläggningen. Som en åtgärd utvecklades först den koordinerade fosfatbehandlingen som efterföljdes av den kongruenta fosfatbehandlingen.

Dessa fosfatbehandlingar omfattade dosering av trinatriumfosfat i kombination med dinatriumfosfat och ibland till och med mononatriumfosfat för att upprätthålla ett natrium-fosfatförhållande (Na/PO_4) inom intervallet 2,3-2,8.

Dessa natrium-fosfatförhållanden skulle minska produktionen av kaustik genom att skifta jämvikten till vänster. Forskare var medvetna om att fosfat är omvänt lösligt med temperaturen och skulle fälla ut (hide-out) vid högre panntryck (>140 bar).

Baserat på den kunskap som fanns vid den tidpunkten antogs att kemikalien skulle fällas ut i samma natrium-fosfatförhållande som fanns i lösningen och därmed upprätthålla en kemisk balans.

Det har dock visat sig att en kongruent utfällning inte sker. Det vill säga att fosfatutfällningen inte får samma sammansättning som fosfaten i pannvattnet utan fosfatutfällningarna i beläggningarna på tubytan blir oftast sura. De sura fosfatutfällningarna angriper metallen i panntuberna i en mekanism lämpligt kallad sur fosfatkorrosion.

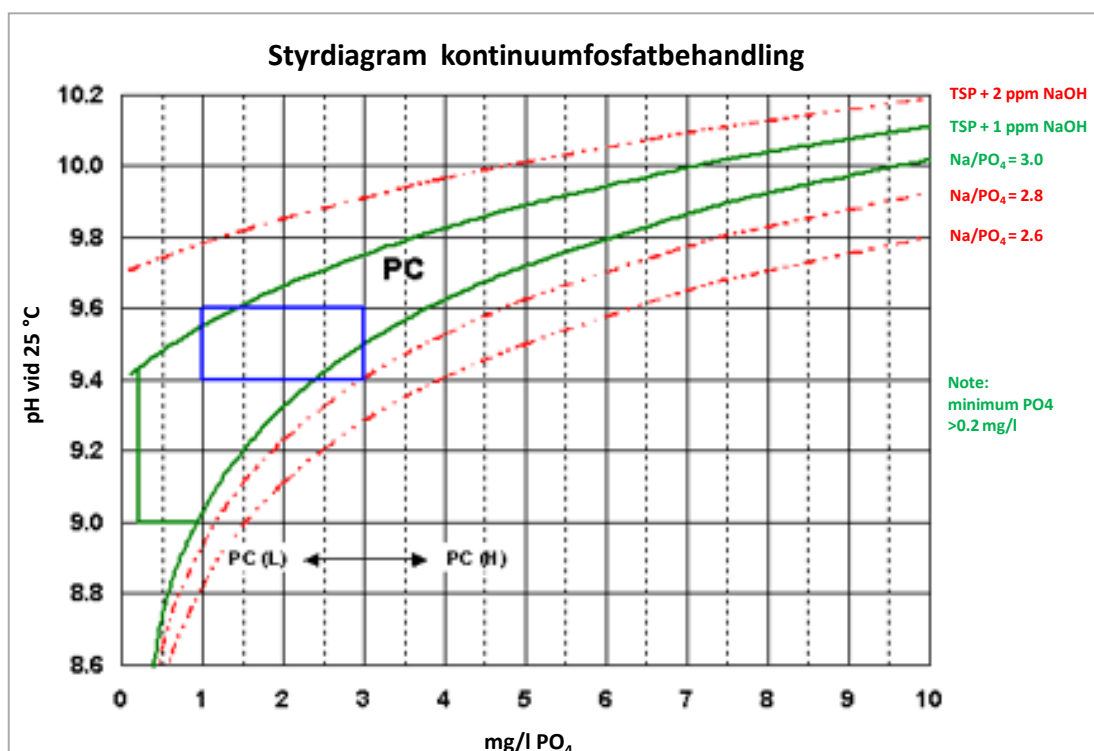
De koordinerade och kongruenta fosfatbehandlingarna har nu ersatts av vad man utomlands kallar kontinuumfosfatbehandling där pannan endast doseras med trinatriumfosfat.

En liten mängd lut kan i vissa fall användas vid uppstart för att höja pH-värdet. Två varianter av programmet är möjliga. En är att bibehålla fosfathalt under 2 ppm för att

minimera hide-out . Den låga fosfatkoncentrationen erbjuder inte mycket skydd vid en kondensorläcka med inläckage av dåligt vatten.

Ett alternativ är att hålla fosfatkoncentrationer i intervallet 2-10 ppm. Även om det medför en risk för hide-out är utfällningarna av alkalisk karaktär och kommer inte att initiera sur fosfatkorrosion.

Kontinuumfosfatbehandling liknar i stort den fristående trinatriumfosfatbehandling som vi i Sverige använt med goda resultat i många år. Figur 60 visar vad pH-värdet i pannvattnet blir vid olika fosfatdoseringar. TSP står för "trisodiumphosphate", alltså trinatriumfosfat.



Figur 60. Styrdiagram för kontinuum fosfatbehandling

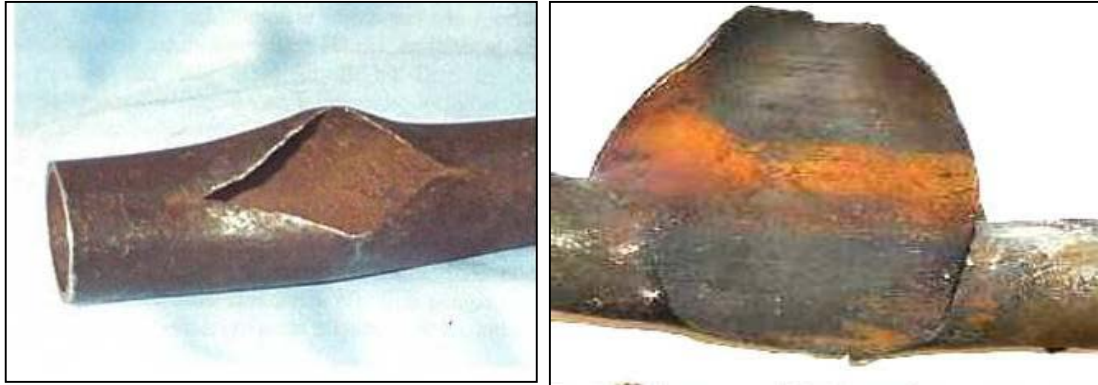
Figure 60. Phosphate continuum control chart

Hide-out är en indikation på att det föreligger risk för korrosion orsakad av sura fosfater. Hide-out är dock inte den grundläggande orsaken till problemet. Enligt litteraturen förekommer denna typ av angrepp endast i anläggningar där man doserat sura fosfater. De förekommer alltså inte i anläggningar där man enbart doserat trinatriumfosfat. Den allmänna rekommendation är att sura fosfater endast bör användas i anläggningar där man har problem med inläckage av alkaliska föroreningar.

Vid panntryck över 160 bar bör inte fosfat användas pga. av påtaglig risk för hide-out och alkalisk avlagringskorrosion på panntuberna.

4.4.3 Överhettningsskador

Vid övergång från bubbelkokning till filmkokning upphör kylningen. Materialet går snabbt upp i mjukningstemperatur och brister i en fläxskada. Eftersom materialet då är mjukt dras det ut under den begynnande deformationen så att brottytan blir tunneggad. Exempel på typiska skador orsakade av överhettning visas i Figur 61.



Figur 61. *Typiskt utseende på en snabbt utvecklad överhettningsskada*

Figure 61. *Typical appearance of a rapidly developed overheating damage*

I de fall då kylningen av tuben inte försvinner helt kan materialet i tubväggen få en förhöjd temperatur utan att brista. Vid denna övertemperatur sker en försprödning av materialet. Så småningom sker en deformation av tuben i form av en ansvällning. En bild på en ansvälld tub visas i Figur 62.



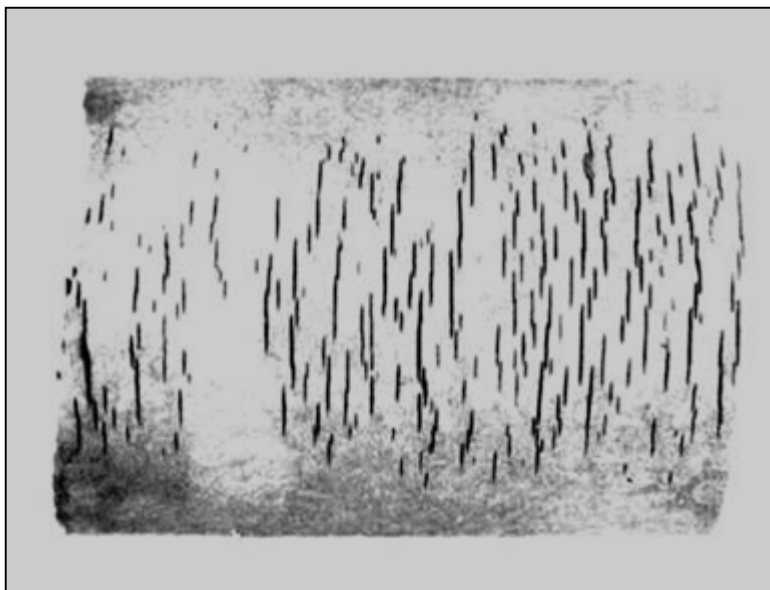
Figur 62. *Ansvälld tub som legat med överhettning under lång tid.*

Figure 62. *Damage caused by long term overheating.*

Vid skadeutredningar brukar man skilja på dessa typer av skador. Den snabbt uppkomna skadan kännetecknas av tunnväggig brottyta och den långsamt uppkomna skadan av tjockväggig brottyta.

4.4.4 Korrosionsutmattning

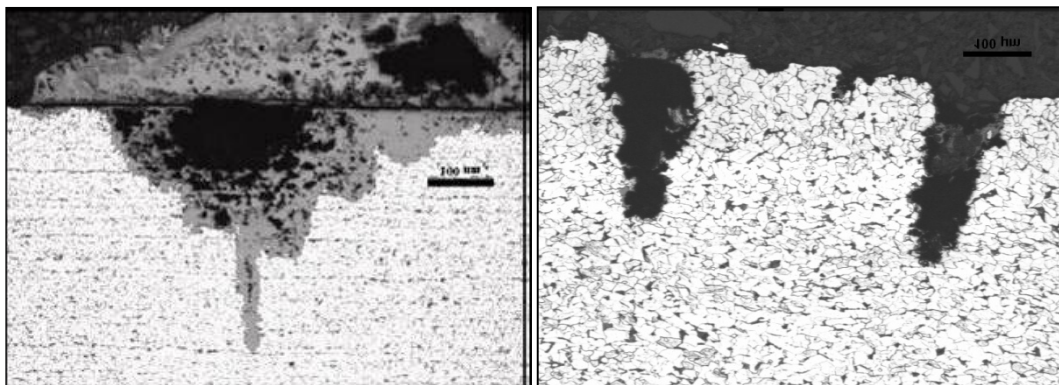
Vid utredningar av skador på tuber från ekonomisar, eldstäder och överhettare är det ovanligt att orsakerna till skadorna kan härledas till korrosionsutmattning. Med begreppet menas att en yta angrips av kemiska reaktioner på områden som är utsatta för cykliska belastningar. Spänningarnas fördelning över dessa ytor orsakar att angreppen skapar ett visst mönster. En bild på en yta där ett sådant mönster bildats visas i Figur 63.



Figur 63. Ett typiskt mönster på en yta som är angripen av korrosionsutmattning

Figure 63. Typical pattern on a surface damaged by corrosion fatigue

Angreppsbilden kännetecknas av att många parallella sprickor med breda öppningar uppstår i ytan. Bilder på tvärsnitt av angreppen visas i Figur 64.



Figur 64. Tvärsnitt på skador från korrosionsutmattning

Figure 64. Cross section of damage caused by corrosion fatigue

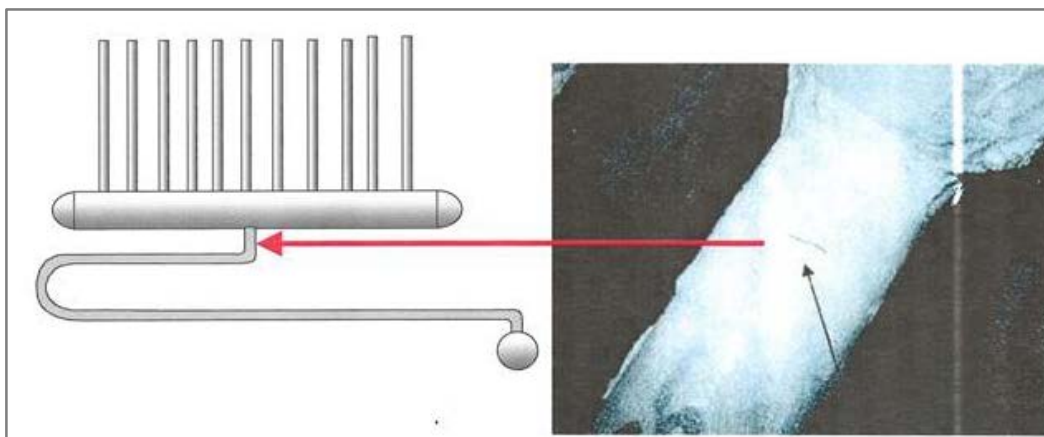
På bilden till vänster har angreppet börjat med kemisk korrosion, t.ex. en gropfräta eller annat korrosionsangrepp, under en beläggning. I gropen har sedan en spricka bildats och hela angreppet har ett djup på ca 0,4 mm. Bilden till höger i Figur 64 visar angrepp som är ca 0,3 mm djupa. Troligen har dessa angrepp startat med små sprickor som efterhand vidgats av kemisk korrosion.

Eftersom vatten- och ångmiljön i de flesta anläggningar är alkalisk och syrefri är bidraget från den korrosiva delen i angreppen av mindre omfattning. I de cykliskt belastade positionerna i vissa systemdelar utvecklas därför oftare rena utmattningssprickor utan inslag av kemiska angrepp.

4.4.4.1 Utmattningssprickor

Sprickorna uppstår som följd av att materialet utsätts för upprepade drag- eller böjpåkänningar. Sprickorna startar vanligen i en anvisning eller en inneslutning i materialets yta. Utvecklingen och tillväxten av sprickor sker i vinkelrät riktning mot påkänningskraften. Olikheter mellan de upprepade krafterna orsakar ofta mycket små förändringar i sprickväggens lutning. Dessa olikheter bildar räfflor (striationer) i brottytan som visar att tillväxten sker stegvis. Då sprickan blir för djup brister materialet och vid en granskning av hela brottytan går det i många fall att avläsa vad som är tillväxtedel och slutbrottsdel i materialet.

Risken för utmattningssprickor är störst där systemdelar är mindre lämpligt utformade för att elastiskt ta emot rörelser i materialet. I Figur 65 visas exempel på en mindre lämplig dragen ledning mellan två lådor.

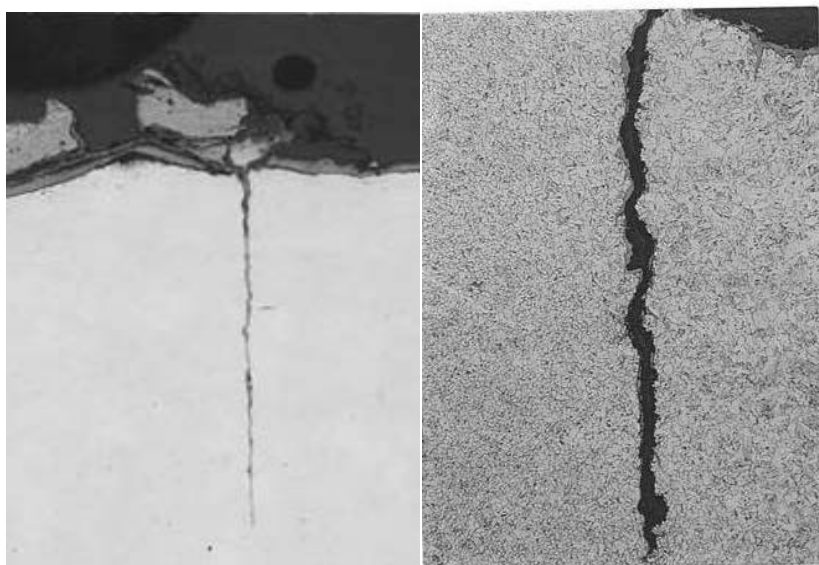


Figur 65. Sprickor i en matarvattenledning till en ekonomiser

Figure 65. Cracks in the inlet of an economizer

Vid temperaturvariationer i ledningen uppstår rörelser som måste tas upp av den vertikala delen som går in i den övre lådan. Eftersom denna del är kort och går in via en stum infästning i en större låda blir böjpåkänningarna höga. Materialet har därför utmattats och en spricka har uppstått på ledningens sida mot den nedre lådan.

Utmattningssprickor kännetecknas av att de är raka och går tvärs den riktning som belastningen har på materialet. En bild på typiska utmattningssprickor visas i Figur 66.



Figur 66. Sprickor i en matarvattenledning till en ekonomiser

Figure 66. Cracks in the inlet of an economizer

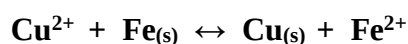
I vissa fall kan sprickorna vara oxiderade på sidorna. Det är dock mera sällan som undersökningar visar en entydig karaktär utan ofta finns det inslag av olika sprickmönster från olika sprickmekanismer.

Utmattningssprickor brukar härledas till lågfrekventa eller högfrekventa belastningar på materialet.

De sprickor som uppstår vid högfrekventa belastningar blir mycket smala och har oftast helt oxidfria brottytor. Denna typ av skador har exempelvis inträffat på nykonstruerade ekonomisar där tuberna har haft för stor längd mellan infästningar i lådor och väggar. Som följd av trycket från rökgaserna har tuberna kommit in i en egensvängning och vibrerat. Den specifika belastningen på materialet blir högst i området närmast de stummare fästpunkterna. Materialet utmattas och sprickorna får en snabb tillväxthastighet. Andra exempel på högfrekvent belastning är vibrationer i horisontella överhettare framkallade av för höga rökgashastigheter vid överlast.

4.5 Tubskador orsakade av koppar

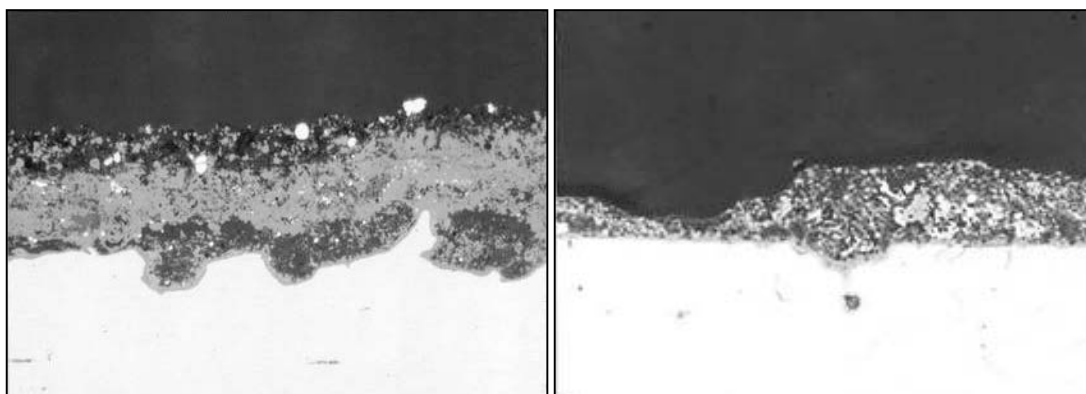
I pannvatten har koppar ett avvikande beteende jämfört med andra föroreningar. Koppar kan komma in i matarvattnet som en- eller tvåvärda katjoner. Källan är korrosionsprodukter från komponenter av mässing och koppar i kondensatsystemet. I den elektrokemiska spänningsserien för metaller är koppar ädlare än järn i relation till vätgaselektroden. Som följd av detta kommer kopparjonerna att ta upp elektroner från järnet samtidigt som kopparen själv reduceras och faller ut i metallisk form.



4.5.1 Koppar i beläggningar

Vid metallografiska undersökningar av uttagna prov från panntuber framträder föroreningar av kopparpartiklar som ljusa punkter i den övrigt gråsvarta beläggningen. Även om kopparhalten inte varit på en påvisbar nivå i matarvattnet kan koppar förekomma i beläggningarna. I många fall är detta svårt att förstå då det inte finns någon enkel förklaring till varifrån kopparen kommer.

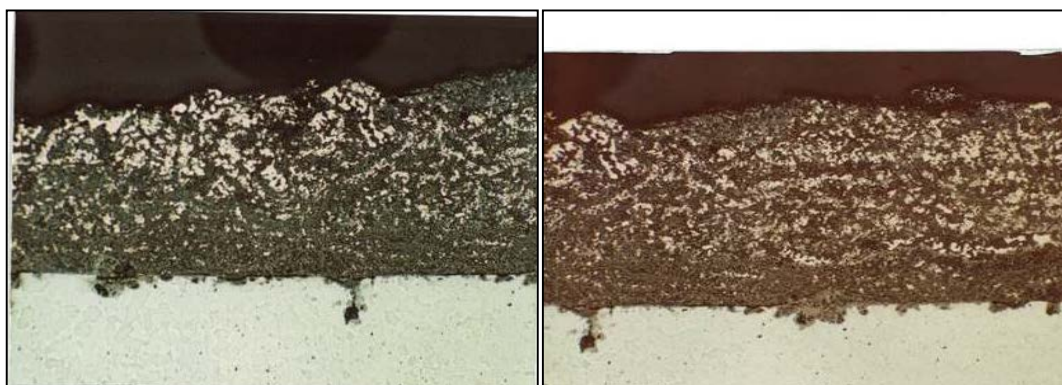
I Figur 67 visas bilder på beläggningstvärsnitt med enstaka respektive många kopparpartiklar.



Figur 67. *Enstaka resp. många kopparpartiklar i beläggningstvärsnittet*

Figure 67. *Single respectively numerous copper particles in a deposit cross cut*

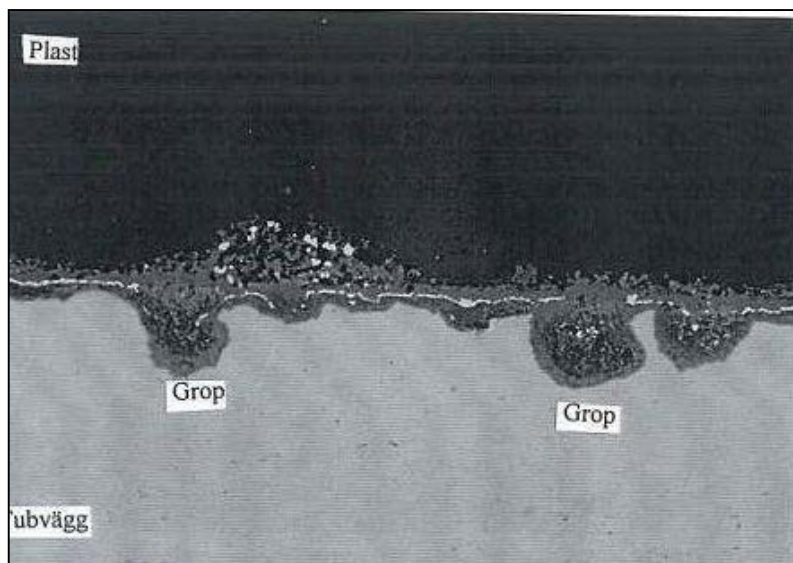
I andra fall kan kopparpartiklar förekomma i riklig mängd och vara utspridda i hela beläggningen. Exempelbilder visas i Figur 68.



Figur 68. *Exempel på tvärsnitt med kopparpartiklar utspridda i hela beläggningen.*

Figure 68. *Example of a cross cut with copper particles scattered throughout the deposit.*

Utspridda kopparpartiklar i beläggningar kan förekomma utan att några skadliga effekter på tuberna uppstår. Om kopparhalten i beläggningarna blir för hög kan i vissa fall kopparfolier bildas. Ett tvärsnitt av en beläggning med en kopparfolie visas i Figur 69.



Figur 69. *Beläggning med en ljus rand av kopparfolie i mitten.*

Figure 69. *Deposit with a bright stripe of copper foil in the middle.*

Dessa folier kan stänga in den ånga som bildas vid tubväggen. Den stagnanta ångspalten under folien kommer då att kraftigt försämma kylningen av tubväggen. Materialtemperaturen kommer att stiga till en nivå mellan vattnets mättnadstryck vid aktuellt panntryck och materialets mjukningstemperatur. Eftersom folien är begränsad till en lokal fläck förhindrar omgivande kylning att mjukningstemperaturen uppnås. Under fläcken sker en förhöjd reaktionshastighet mellan vattenångan och tubmetallen. Detta leder till en lokal förtunning och väteförsprödning av tubväggen.

4.5.1.1 Avsättningar av koppar

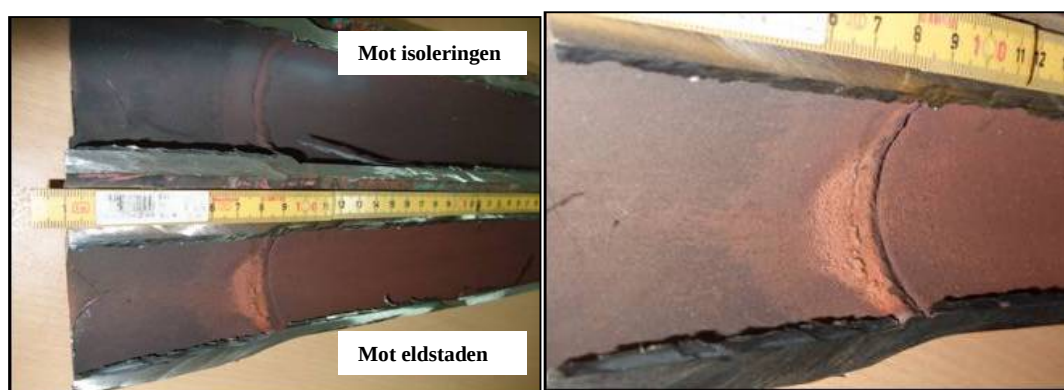
Avsättningar av kopparpartiklar och bildningen av folier följer inget känt mönster utan kan ske på ett till synes slumpmässigt sätt. I Figur 70 visas exempel på hur tubytan kan se ut ovanför fläckar med utbildade kopparfolier.



Figur 70. *Tubytan utanpå fläckar där kopparfolier bildats.*

Figure 70. *The outside of a tube surface where the copper foils have formed.*

Ett annat exempel visas i Figur 71 där kopparpartiklar har deponerats bakom vulsten på en svets. Av bilderna framgår också att det är endast på den tubhalva som varit vänd in mot eldstaden d.v.s. den värmebelastade tubhalvan som avsättningen av koppar skett.



Figur 71. *Kopparpartiklar anrikade bakom en svetsvulst.*

Figure 71. *Copper particles concentrated behind a weld bead.*

4.5.1.2 Tubskador av koppar

Skadorna uppträder ofta som små hål eller sprickor på tubernas utsidor. I vissa fall kan även mindre fläxskador uppstå beroende på skadornas utbredning på insidan tuben. I Figur 72 visas bilder på insidor av renborstade tuber som skadats utan att läckage uppstått.



Figur 72. *Insidor på renborstade tuber som skadats.*

Figure 72. *Insides of brushed damaged tubes.*

Groparna där materialet oxiderats är helt fyllda av hårda och kompakta magnetitklumpar. Skadorna har oregelbunden utbredning. Sannolikt följer skademönstret den utbredning som kopparfolien haft. En bild på gropar som rengjorts från magnetitklumpar visas i Figur 73.



Figur 73. *Rengjorda gropar från skador under kopparbeläggningar.*

Figure 73. *Cleaned pits from damage under copper deposit.*

Groparna förekommer huvudsakligen i mitten på den tubhalva som varit vänd inåt eldstaden och varit värmebelastad medan de inte förekommer på den tubhalva som varit vänd mot isoleringen. Detta visar att kokförloppet och förångningen av vattnet haft en avgörande inverkan vid skadornas uppkomst.

Då groparna bildas växer klumpar av svart och kompakt magnetit (Fe_3O_4) inåt i tubväggen. Metallytan under den tjocka magnetiten är slät men är vågformad. Bilder på tvärsnitt ytan och på ett skadat område visas i Figur 74.



Figur 74. Tvärsnitt och ytan på en tubskada.

Figure 74. Cross-section and surface of a boiler tube damage.

Bilden till vänster visar hur materialavverkningen bildats på mitten av den tubhalva som varit värmebelastad. Tubläckage har inte uppstått i detta fall men den resterande delen av tubväggen till höger är försprödad och om den böjs brister den i en tjock brottyta.

I Figur 75 visas bilder på en tub där hål uppstått i tubväggen.



Figur 75. Insidan och utsidan på tubskada orsakad av att kopparfolie bildats på insidan.

Figure 75. Inside and outside of a tube, the damage was caused by a copper foil on the inside.

På bilden till vänster kan området där kopparfolien haft sin utbredning avläsas. Förtunningen har inte skett ända fram till utsidan. Som följd av väteförsprödningen i materialet har ett runt hål öppnats i väggen av panntrycket. Av bilden till höger framgår att brottytan runt hålet är tjock och att tuben inte deformerats genom ansvällning.

4.5.1.3 Korrosionsmekanism

Koppar förekommer som metalliska partiklar med allmän utbredning i beläggningar. Då kopparhalten blir för hög kan partiklarna fläckvis bilda sammanhängande folier av kopparmetall i magnetitskikten. Kopparfolierna hindrar ångblåsorna att lämna tubytorna vilket orsakar att en ångspalt bildas närmast tubväggen. Lokala ångspalter försämrar kylningen och tubmaterialets temperatur blir kraftigt förhöjd på den begränsade ytan under folien. Följden av den höga temperaturen blir en snabb ökning av oxidationshastigheten mellan järnet och syreatomer i vattenmolekyler. Tidigare kallades detta för ångspaltkorrosion vilket kan felaktigt uppfattas som att ånga spaltas i syre och väte och därefter reagerar syret med järnet. Ångspalten avser i detta fall en fysikalisk term och utgör en orsak medan verkan (effekten) blir en kemisk reaktion mellan vatten (vattenånga) och järn. Det frigjorda vätet från vattenmolekyler skadar också tuben genom att atomärt väte diffunderar in i tubmetallen och orsakar en försprödning varvid materialet förlorar sin hållfasthet.

4.5.1.4 Analys av koppar i beläggningar

Analyser av koppar i beläggningar, med SEM-EDS (svepelektronmikroskop med energidispersiv röntgenspektroskopi), visar ofta mycket varierande resultat. Spridningen av värdena kan variera från några tiondels procent till mycket höga värden. Orsaken till detta är kopparens ojämna spridning i beläggningarna och att SEM-EDS-analyser görs på en mycket liten yta. För att få ett ungefärligt medelvärde för hela beläggningen kan beläggningen skrapas av från en större tubyta. Beläggningen kan vara hårt förankrad vid ytan och för att få med all beläggning kan det vara nödvändigt att tubhalvan som varit värmebelastad bockas ut till en plan ytan. Den frigjorda beläggningen kan sedan lösas upp och analyseras våtkemiskt.

En generell bedömning av kopparhalter i beläggningar är att 1-2 % koppar bör uppfattas som anmärkningsvärt hög nivå och en halt på 3-4 % som en alarmerande nivå vad gäller risk för uppkomst av tubskador.

4.6 Hetvattenoxidation

Tubskador på grund av korrosion är vanligen förknippade med en vattenmiljö som innehåller aggressiva ämnen. Det förekommer dock i vissa fall att det kan uppstå en omfattande materialavverkning trots att vattnet är av utmärkt hög kvalitet. Orsaken till denna form av lokalt uppkomna skador kan vara olämplig konstruktion, överlast eller tjocka beläggningar.

4.6.1 Kortfattad beskrivning av hetvattenoxidation

Hetvattenoxidation startar vid förhöjd materialtemperatur orsakad av lokala stagnanta ångblåsor, vilka förhindrar vattnets kylning av materialet.

Vattenmolekyler sönderdelas i väte och syre samtidigt som syret oxiderar järnatomer till järnoxid.

Reaktionsprodukten järnoxid som bildas utgörs av svart magnetit (Fe_3O_4). Magnetiten bildar stenliknande klumpar, är homogen och har lamellerad struktur.

Materialavverkningen sker fläckvis och bildar några cm vida gropar med jämn vågig kontur. Materialytan i groparna är slät.

Det frigjorda vätet från vattenmolekyler diffunderar in i tubväggen och orsakar mikrosprickor i korngränserna. Materialets hållfasthet försämras genom väteförsprödning.

Slutfasen av processen är mikrosprickor rakt genom tubväggen som bildas av sammanväxta och utvidgade korngränser.

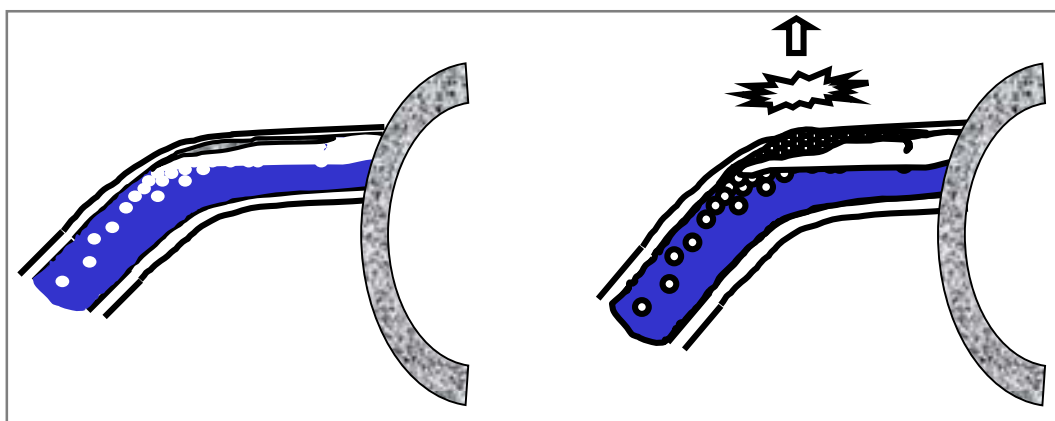
Orsaken till skadorna på panntuberna är för hög värmebelastning i kombination med vattensidiga beläggningar.

Skademekanismen är hetvattenoxidation som initierats av störningar i kokförloppet på insidorna av tuberna.

Skadorna på kolstålet är försprödning orsakad av väte som utvecklas vid hetvattenoxidationen och fläckvis överhettning och nedsmältning av austenitskiktet på utsidan av tuberna.

4.6.2 Olämplig konstruktion

Ett exempel på en skada orsakad av hetvattenoxidation är en kraftverkspanna där det uppstod tubläckage på eldstadtuber intill en samlingslåda. Utredningen av skadorna visade att de uppstått på ovansidan av tubböjar intill lådan. En skiss över skadan visas i Figur 76.



Figur 76. Skiss över skador på eldstadtuber som skadats intill en samlingslåda.

Figure 76. Boiler tube damage next to the header.

De flesta tuberna gick in i lådan nedifrån med 45° lutning. För att få plats med alla tuber på lådans längd hade en del av tuberna lagts omlott ovanför huvudraden. Dessa tuber fick dock av konstruktionsskäl en kort horisontell del strax före inloppet i lådan.

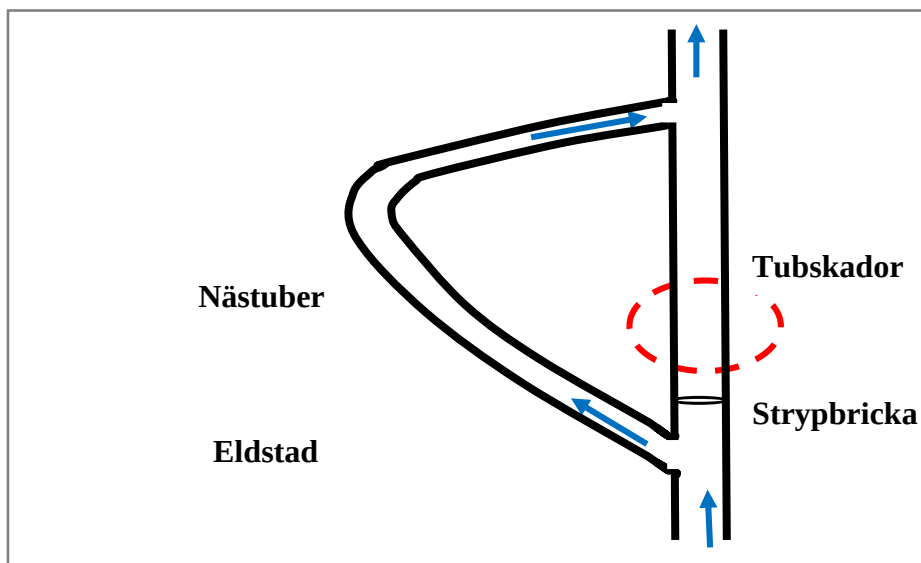
Tuberna var stigartuber för vatten och ånga och ångblåsor anrikades i tubens horisontella del.

Ångblåsorna försämrade kylningen av materialet och trots att tuberna var inmurade blev materialtemperaturen tillräckligt hög för att lokal och snabb oxidation skulle uppstå på tubernas insidor. I tuben fanns tjocka och homogena magnetitklumpar. Analys av klumparna visade att de bestod av ren järnoxid (magnetit) utan inslag av föroreningar. Pannan var konstruerad för 140 bar (336 °C) och pannvattnet hade varit mycket rent. Kontroller av oxidskikten på uttagna tubprov i andra eldstadstuber från samma vägg hade visat låga och normala tjockleksvärden på 20-30 µm.

Korrosionsmekanismen bedömdes vara hetvattenoxidation på grund av övertemperatur. Orsaken till skadorna konstaterades vara felkonstruktion och tuberna ersattes med tuber utan horisontell inloppsdel i lådan.

4.6.3 Cirkulationsfel vid överlast

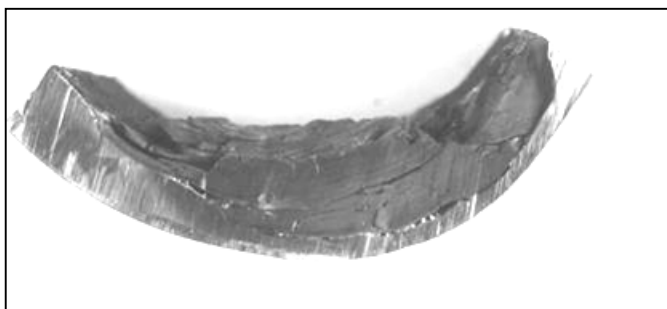
Ett annat exempel på hetvattenoxidation orsakades av stagnanta ångzoner i bakväggstuber på en kraftverkspanna. På de raka tuberna i bakväggen hade en näsa byggts inåt eldstaden för att styra rökgaserna och därmed förbättra värmeöverföringen i eldstaden. I de raka tuberna fanns strypbrickor för styrning mellan de raka tuber och nästuber. Efter ca 10 års drift utan tecken på störningar inträffa läckor på 10 av de de raka tuberna bakom näsan. Dessutom var 20 andra tuber av bakväggens 140 tuber skadade genom ansvällningar. Läckagen inträffade vid mycket kall väderlek och maximal pannlast. En skiss över skadornas position visas i Figur 77.



Figur 77. Skiss över skadepositionen för hetvattenoxidation i bakväggstuber.

Figure 77. Schematic of the position for hot water oxidation in back wall tubes.

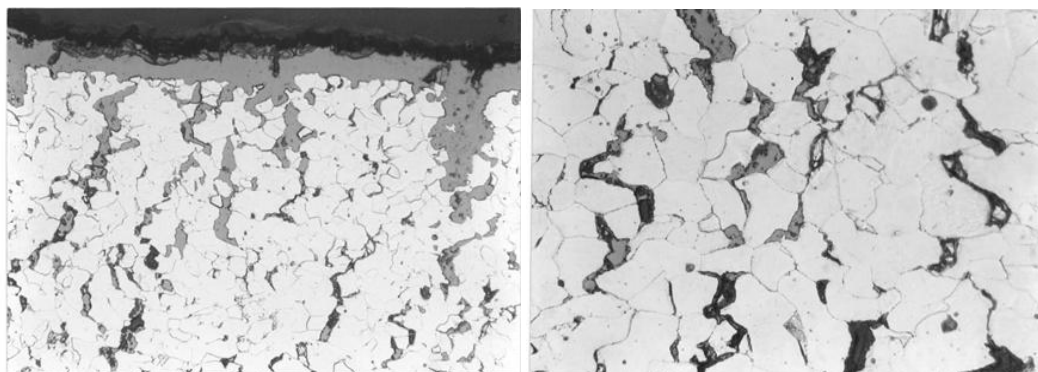
De läckande tuberna hade sprickor i små ansvällningar på tuberna utsidor som varit vänd in mot eldstaden. På insidorna fanns kompakta stenliknande klumpar av ren magnetit. Tubernas nominella mått var 57x5,6 mm och oxidskalen var upp till 8 mm tjocka. Ett tvärsnitt av ett skadat tubområde visas i Figur 78.



Figur 78. *Tvärsnitt av tubskada som orsakats av hetvattenoxidation.*

Figure 78. *Cross section of tube damage caused by hot water oxidation.*

Ingen utdragning av materialet fanns intill de genomgående sprickor som fanns i restmaterialet. Detta visar att sprickningen skett i försprödat material. Bilder på materialets mikrostruktur visas i Figur 79.



Figur 79. *Väteförsprödning i tubvägg som skadats av hetvattenoxidation.*

Figure 79. *Hydrogen embrittlement of the tube wall damaged by hot water oxidation.*

Förekomsten av utvidgade korngränser (Figur 79) visar att vätgas utvecklats vid oxidationsprocessen som skadat tuberna. Pannvattnet har varit av utmärkt kvalitet med låg konduktivitet och högt pH-värde. Att ett surt pannvatten skulle vara orsaken till skadorna kan därför uteslutas. Oxidationen och väteutvecklingen måste därför ha skett genom reaktioner mellan vattenmolekyler och järn.

Förutsättningen för att en snabb oxidation skall uppstå i tuberna är att materialtemperaturen höjs väsentligt. Detta kan ske lokalt om strömningsfel uppstår vid höglast. Sannolikt kyls den raka tubdelen bakom näsan av ett vattenflöde vid normaldrift. Vid stigande last ökar värmebelastningen på nästuberna. Eftersom mer ånga bildas i nästuberna ökar också strömningshastigheten genom dessa tuber. Samtidigt minskar vattenflödet genom de raka tuberna. Vid för hög last bildas en konstant ångzon ovanför strypbrickorna, kylningen försämras och materialtemperaturen stiger. Temperaturen har varit kraftigt förhöjd men ej gått upp i mjukningstemperaturen för materialet.

I detta mellanläge har materialet skadats genom vatten(-ång-)oxidation. Tubväggarna har försprödats av väte och slutligen har läckage av pannvatten uppstått.

Konstruktionen av bakväggen är mindre lämplig eftersom fördelningen av vattenflödet mellan nästuber och raktuber påverkas av lasten. Vid höglast avtar flödet genom de raka tuberna och vid överlast förloras kylningen genom att konstanta ångzoner bildas ovanför strypbrickorna. Konstruktionen ändrades också efter det att skadorna inträffat.

Skador orsakade av hetvattenoxidation förekommer inte så ofta statistiskt sett men visar att omfattande tubskador i form av materialavverkning på insidan av panntuber kan ske även om den vatten-ångmiljö materialet utsätts för inte innehåller aggressiva ämnen.

4.6.4 Ångspalter under tjocka beläggningar

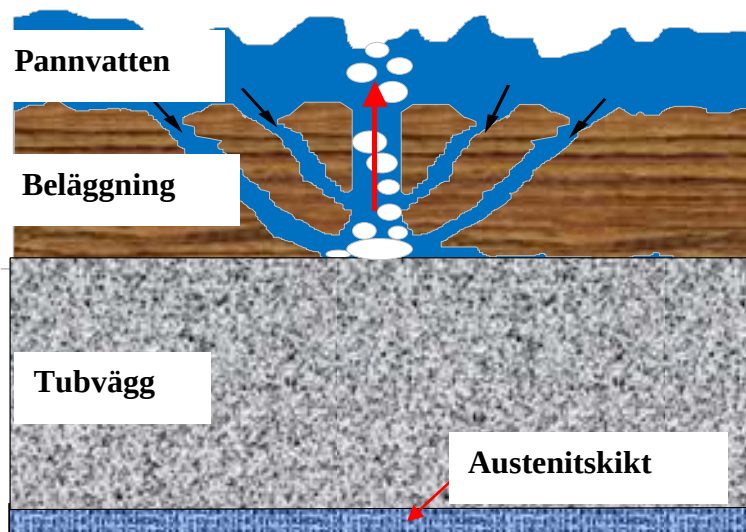
4.6.4.1 Skador på compoundtuber

I eldstaden på en sodapanna uppstod vattenläckage och skadeutredningar visade att skadorna hade startat på tubernas vattensida som hetvattenoxidation under beläggningar. Vid hetvattenoxidationen frigörs atomärt väte som diffunderar in i kolstålet och ger upphov till skador i form av mikrosprickor utefter korngränserna. Väte som diffunderat igenom kolstålet har stoppats upp vid det rostfria yttre skiktet på compoundtuberna. Bulor har sedan uppstått i skiktet som överhettats och smält. Mikrosprickor har växt samman och försvagat den tryckbärande kolstålsdelen av tuben och läckage har slutligen uppstått i genomgående sprickor.

Anledningen till att hetvattenoxidationen hade uppstått bedömdes vara att värmebelastningen varit för hög i pannans nedre del i kombination med vattensidiga beläggningar. Dessa faktorer hade medfört störningar i kokförloppet på insidan tuberna. Lokalt hade konstanta ångspalter bildats invid tubväggen. Förhöjningen av tubtemperaturen på de ställen där dessa ångspalter bildats hade varit utlösande faktor för initieringen av hetvattenoxidationen.

4.6.4.2 Kokförlopp på tubernas insidor

Vid värmeöverföringen genom tubväggen sker en förångning av vattnet på tubytan. Uppkomsten och tillväxten av ångblåsor har en benägenhet att orientera sig utefter ojämnheter i ytan och lämna ytan på vissa punkter s.k. kärnbildningspunkter. Om det finns tjocka och porösa beläggningar på tubytan kommer kanaler att bildas i beläggningen genom vilka ångan lämnar ytan. Återfyllningen av pannvatten i dessa kärnbildningspunkter för ångan sker genom andra och sneda kanaler i beläggningen. En skiss över ett teoretiskt flödesförlopp för ångbubblor och vatten genom beläggningen omkring en kärnbildningspunkt visas i figur 80.



Figur 80. Kokförlopp i kärnbildningspunkt i tjocka och porösa beläggningar.

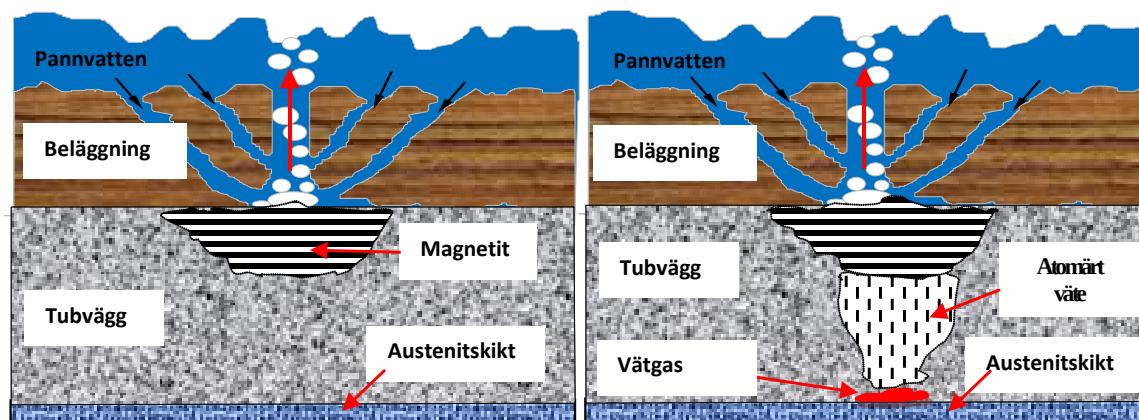
Figure 80. Boiling process in the nucleation point inside a thick and porous deposit.

Fysikaliskt påverkas kokförloppet av beläggningens egenskaper och den specifika värmebelastningen. På vissa ställen i beläggningen kan kanalbildningen orsaka ett kritiskt kokförlopp genom att det förångade vattnet inte hinner ersättas. En konstant ångspalt kommer i ett sådant fall att försämra kylningen med en stigande materialtemperatur som följd. Den förhöjda materialtemperaturen blir då en utlösande faktor för initieringen av hetvattenoxidation.

4.6.4.3 Skademekanismer

Skadorna börjar med att den förhöjda materialtemperaturen orsakar en förhöjd reaktionshastighet mellan vattenmolekylerna i ångan och järn. Syret i molekylerna oxiderar järn till magnetit. Magnetiten växer inåt i tubväggen och bildar stenliknande klumpar. Strukturen i dessa magnetitklumpar är tydligt skiktad (lamellerad). Detta visar att skikten upprepande lossnar från tubytan. Efter varje släpp från ytan startar en ny sekvens med oxidation av en tubyta vilket förklarar varför oxidationen har en förhållandevis snabb inträngning i tubväggen. Efterhand som magnetiten blir tjockare försämras kylningen och materialtemperaturen stiger vilket medför att oxidationen får ett snabbare förlopp.

Vid oxidationen frigörs väte och den del av vätet som befinner sig i atomär form diffunderar in i materialet. Skisser över händelseförloppet visas i Figur 81.

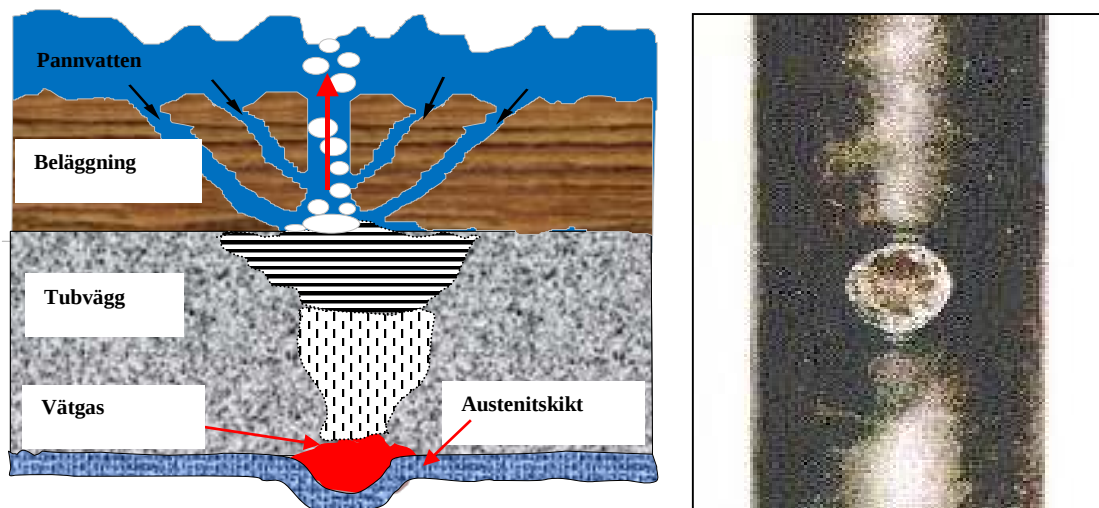


Figur 81. Skisser över angrepp av hetvattenoxidation på insidan av en komponenttub.

Figure 81. Outline of a hot water oxidation attack inside a compounding tube.

Det atomära vätet anrikas i materialets korngränser och slås samman till molekyllär form. Vätet kan även delvis reagera med kolet i korngränserna och bilda metan. Gasbildningen utvidgar korngränserna och materialet tappar sin hållfasthet genom försprödning.

Bedömt efter skadornas utseende på komponenttuben har vätgasen i korngränserna anrikats mellan magnetitklumparna och det austenitiska yttre skiktet på tuberna. En skiss över ett tänkt förlopp och en skadebild visas i Figur 82.



Figur 82. Skiss över skadeförlopp och bild på uppkommen skada

Figure 82. Schematic of the damage sequence and photo of the damage

Vätgasen har utövat ett stigande tryck och korngränserna har utvidgats och växt samman till mikrosprickor. Innanför austenitskiktet har vätet stoppats upp och kylningen av skiktet

har försämrats. Vid ytterligare temperaturstegring har skiktet mjuknat och vätgasen i kombination med panntrycket har tryckt ut en bula på skiktet enligt skissen. Bula har sedan smält och ett runt hål har uppstått i austeritskiktet som framgår av bilden på utsidan av tuben. Vattenläckage via mikrosprickor uppstod sedan genom hålen i austeritskiktet.

En mångfald av små ansvällningar fanns på tuberna företrädesvis på de områden där värmebelastningen var högst. Flera läckage befarades uppstå och alla tuber i ugnen byttes ut.

5 Skador och skademekanismer i turbiner

I detta kapitel beskriver Jüri Tavast skador och skademekanismer i ångturbiner. De vanligast förekommande skadorna diskuteras vad gäller orsak, förekomst och utseende samt hur de kan förebyggas.

De skadetyper som tas upp är:

- Korrosionsutmattning
- Spänningskorrosion
- Erosionskorrosion
- Stilleståndskorrosion

5.1 Skador och skademekanismer i turbiner

Ång- och vattenkemin har en avgörande betydelse för tillgängligheten och tillförlitligheten hos ångkraftanläggningar. Risker för beläggningar liksom korrosionsfenomen som korrosionsutmattning, spänningskorrosion och erosionskorrosion är direkt beroende av ångkemin. Kostnaderna för beläggningar och korrosionsangrepp är höga, ofta betydligt högre än vad många anläggningsägare inser.

5.2 Korrosionsutmattning

Korrosionsutmattning av lågtrycksturbinskovlar är enligt internationella erfarenheter en av de vanligaste, om inte den allra vanligaste orsaken till reducerad tillgänglighet och tillförlitlighet hos ångturbiner [10]. Denna typ av skada är vanligtvis lokaliserat till Wilsonlinjen och är ett generellt problem för alla typer av kondensanläggningar.

Under normal kontinuerlig drift skulle en kombination av en relativt hög cyklisk belastning och en aggressiv fuktig miljö leda till skovelhaveri p.g.a. korrosionsutmattning redan efter mycket korta tider med tanke på att antalet cykler ökar oerhört snabbt i en turbin som roterar med 3000 varv per minut eller mer. Detta är dock inte så vanligt.

I de flesta fall uppträder korrosionsutmattning av turbinskovlar i stället efter relativt långa tider och orsakas då främst av plötsliga och/eller oregelbundna transienter som medför en aggressiv miljö eller en hög cyklisk belastning under en relativt kort tid. Till exempel medför en plötslig ökning av nivån i panndomen en risk för ökad mekanisk överbäring av pannvatten till ångan, och därmed en mer aggressiv ångkemi. Skadade eller mindre väl fungerande vattenseparatorer i domen medför också en risk för försämrad ångkemi. Vad det gäller den cykliska belastningen på skovlarna så kan den t.ex. variera med körsättet i anläggningar där flera pannor levererar ånga till ett och samma ångsystem. Lagerproblem kan också medföra en ökad cyklisk last på skovlarna.

En genomgång av de praktiska erfarenheterna av korrosionsutmattning i lågtrycksturbinskovlar visar att ångkemin är en av de mest kritiska parametrarna. Redan

10 Tavast J., *Korrosionsutmattning i ångturbinskovlar – Erfarenheter, inverkan av faktorer och möjliga åtgärder*, Värmeforskrappport nr. 595, dec. 1996

en relativt låg halt av föroreningar i form av salter som klorider och sulfater medför en ökad risk för korrosionsutmattnings. En förbättrad ångkemi är därför en konkret åtgärd för att minska risken för korrosionsutmattnings i lågtrycksturbinskovlar. Det är sannolikt också den mest effektiva åtgärden.

Följande åtgärder rekommenderas därför:

- Se över riktlinjerna för ångkemin för den aktuella anläggningen och modifiera dem efter behov.
- Öka möjligheterna att följa riktlinjerna för ångkemin genom att utbilda personal vad det gäller betydelsen av en god ång- och vattenkemi
- Mät ångans natriumhalt och sura konduktivitet online
- Finn och eliminera orsaken till eventuella avvikelser från riktlinjerna för ångkemin.

5.2.1 Konsekvenser och kännetecken

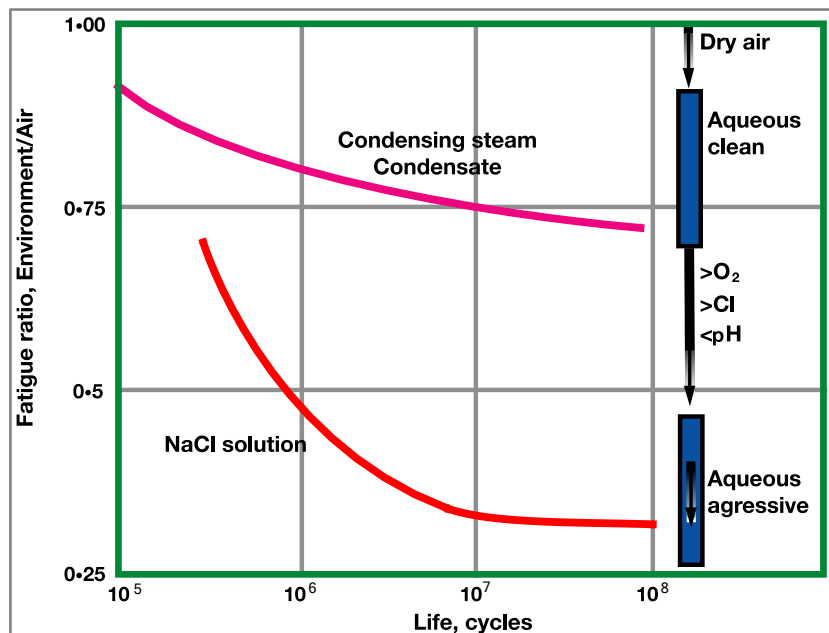
5.2.1.1 Konsekvenser

Den praktiska konsekvensen av korrosionsutmattnings är en ofta drastisk sänkning av den nominella utmattningsgränsen. Det kan vara på sin plats att påpeka att de sekundära skadorna efter ett haveri orsakat av korrosionsutmattnings av lågtrycksturbinskovlar ofta medför mycket höga kostnader, t.ex. p.g.a. förlorad produktion. Det är inte möjligt att i förväg kvantifiera risken för korrosionsutmattnings i en specifik anläggning p.g.a. svårigheten att kvantifiera den lokala miljön och de lokala dynamiska spänningarna, speciellt under transienter. Mindre variationer i dessa parametrar kan resultera i vad som verkar slumpartad förekomst av korrosionsutmattningssskador. Det har t.ex. hänt att en av flera nominellt identiska ångturbiner på en och samma anläggning med ånga från en och samma panna och med samma nominella drift drabbats av korrosionsutmattnings medan övriga inte drabbats av några problem.

Två olika typer av korrosionsutmattnings kan påvisas vid laboratorieförsök:

- **“Passiv” korrosionsutmattnings:** I milda miljöer där man inte får lokala korrosionsangrepp i form av gropfrätning så får man normalt bara en lätt till måttlig reduktion av utmattningsgränsen jämfört med utmattningsgränsen i luft. Den övre kurvan i Figur 83.
- **“Aktiv” korrosionsutmattnings:** Sänkningen av utmattningsgränsen är ofta drastisk i korrosiva miljöer, d.v.s. i sådana miljöer där man får lokala korrosionsangrepp i form av gropfrätning. Detta exemplifieras av den undre kurvan i Figur 83.

Figur 83 visar exempel på utmattningskurvor vid "passiv" (över kurvan) liksom vid "aktiv" korrosionsutmattning (under kurvan) av skovelmateriel 12 % Cr i olika typer av miljöer [11].



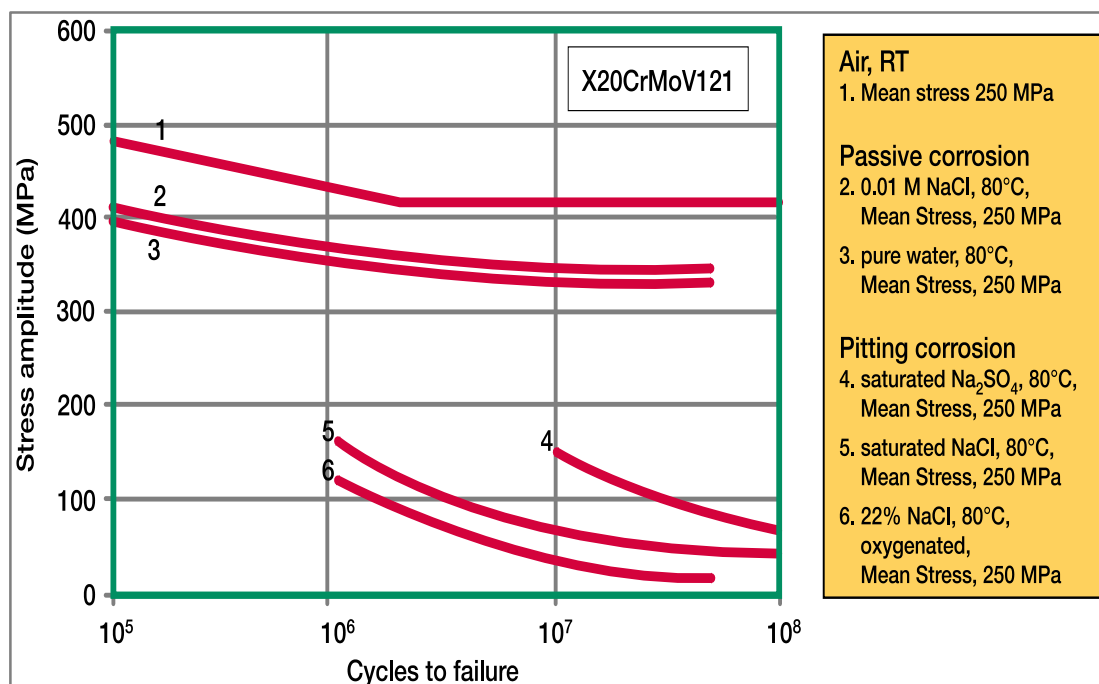
Figur 83. Exempel på utmattningskurvor vid "passiv" liksom vid "aktiv" korrosionsutmattning.

Figure 83. Example of fatigue curves at "passive" and "active" corrosion fatigue.

Testresultaten [12] i Figur 84 visar att reduktionen i utmattningsgränsen i en mer eller mindre inert miljö vanligtvis inte överstiger ca 20-30 % jämfört med värdet i luft. Sprickorna initieras vid glidlinjer och dislokationer vid ytan vid "passiv" korrosionsutmattning. I en starkt aggressiv miljö kan utmattningsgränsen ibland reduceras med så mycket som 90 %.

11 Batte A.D. et al, The corrosion fatigue of 12% Cr blade steels in low pressure environments, *Corrosion Fatigue of Steam Turbine Blade Materials, Workshop Proceedings Palo Alto, California, Sept 1981*, p.4-77 to 98.

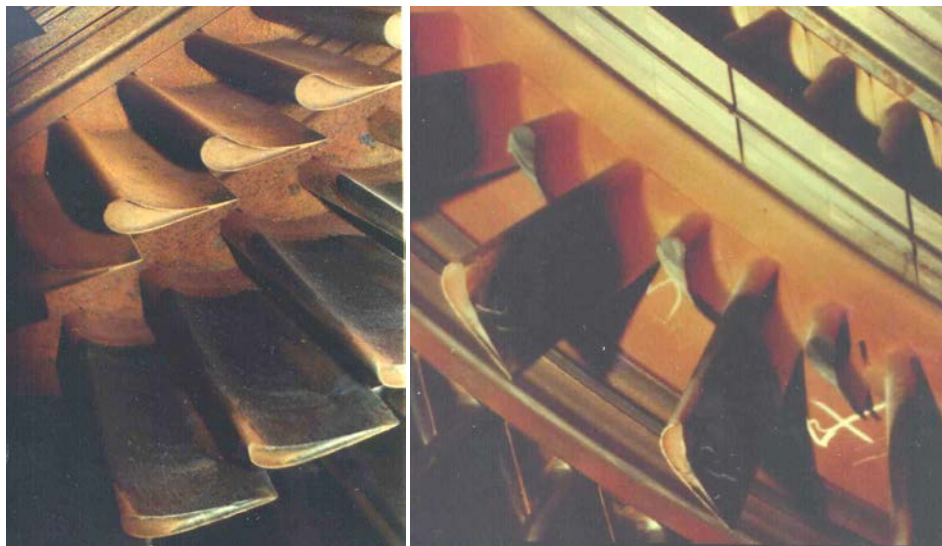
12 Denk J., Scarlin R.B., COST 501-II, *Stress Corrosion and Corrosion Fatigue of Blading Materials, A Review of Work package 8, part 1, EUCO/MCS/08/93*



Figur 84. Testresultat som visar inverkan av miljön på utmattningsgränsen för konventionellt skovelmateriel, 12 % Cr

Figure 84. Test results showing the influence of the environment on the fatigue limit of conventional turbine blade material, 12% Cr

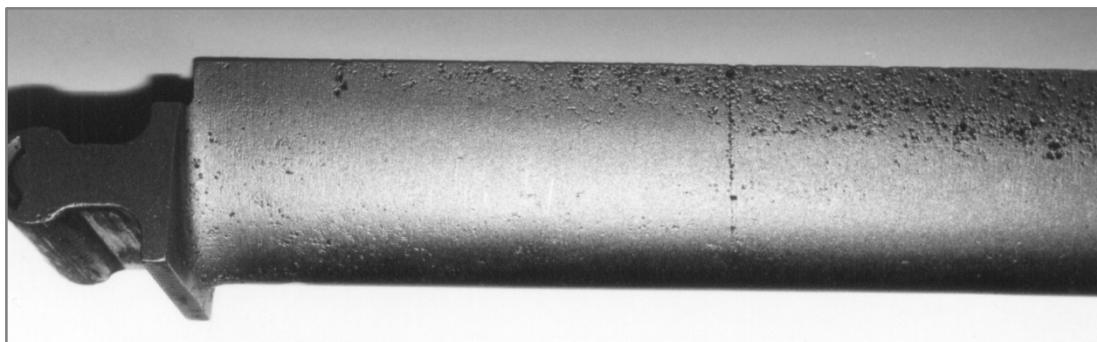
Korrosionsutmattning av lågtrycksskovlar är vanligtvis lokaliserad till Wilsonlinjen. Detta illustreras av Figur 85 och Figur 86.



Figur 85. Samma skovelsteg före respektive efter skovelhaveri orsakad av korrosionsutmattning

Figure 85. The same bladestages before and after blade failure caused by corrosion fatigue

Figur 85 visar ett och samma skovelsteg före respektive efter skovelhaveri orsakad av korrosionsutmattning. Den ljusbruna ytan på skoveln är normalt i kontakt med torr överhettad ånga medan den mörkgrå ytan normalt är i kontakt med fuktig ånga [13]. Figur 86 visar ett typiskt exempel på en sprucken lågtrycksskovel med djupa frätgropar.



Figur 86. *Korrosionsutmattningsspricka i en lågtrycksskovel med djupa frätgropar orsakade av inläckage av havsvatten i kondensorn*

Figure 86. *Corrosion fatigue crack in a low pressure turbine blade with deep pits caused by inward leakage of seawater in the condenser*

5.2.1.2 Kännetecken

Korrosionsutmattning är en typ av högcykelutmattning. Om antalet belastningscykler med en amplitud överstigande den s.k. utmattningsgränsen är för stort kan högcykelutmattning inträffa och medför spröda brott i de flesta konstruktionsmaterial. När man talar om utmattningsgränsen vid konventionell högcykelutmattning förutsätter man att miljön är inert, d.v.s. icke korrosiv. Vid korrosionsutmattning talar man i stället om utmattningsgränsen i en mer eller mindre korrosiv miljö. Utmattningsgränsen är vanligtvis betydligt lägre vid korrosionsutmattning än vid konventionell högcykelutmattning.

Vid mikroskopundersökning av brott orsakade av olika typer av högcykelutmattning uppvisar brottytan ofta så kallade rastlinjer – tydliga markerade linjer vinkelrätt mot tillväxtriktningen som visar var spricktillväxten tillfälligt avstannat då den cykliska belastningen tillfälligt legat under den nivå som krävs för spricktillväxt. Vid konventionell högcykelutmattning ser man ofta också s.k. striationer, spår av tunna linjer också dessa vinkelrätt mot sprickans tillväxtriktning. Man brukar i de flesta fall anta att en striation motsvarar tillväxten under en belastningscykel. Vid korrosionsutmattning kan dock korrosionsangreppen på sprickytan medföra att det är svårt att se sådana striationer.

Tiden till brott är ofta flera år vilket tyder på att tiden till brott vanligtvis domineras av initieringstiden, enligt ovan sannolikt i kombination med relativt sällsynta och korta perioder med höga cykliska laster under transienter.

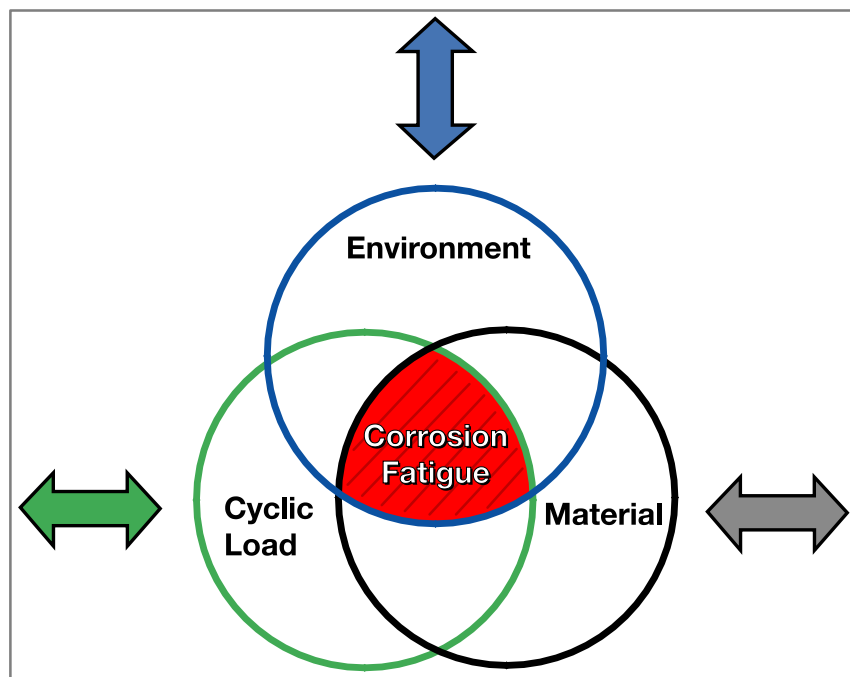
13 *Turbine Steam Path Damage: Theory and Practice, Volume 2, Damage Mechanisms*, p. 24-1, EPRI, ISBN 0-8033-5063-5, 1999

Effekten av korrosionsutmattning är vanligtvis tydlig vid laboratorieförsök i form av en mer eller mindre tydlig sänkning av utmattningsgränsen jämfört med utmattningsgränsen i inert miljö, t.ex. luft. Effekten ökar med ökande aggressivitet hos miljön, t.ex. med ökande kloridhalt och sjunkande pH-värde. I praktiken är det inte lika enkelt att bevisa att ett haveri orsakats av korrosionsutmattning. I sådana fall måste man vanligtvis förlita sig till indicier enligt nedan:

- Berörda skovlar är nästan alltid lokaliserade till Wilsonlinjen.
- Tecken på högcykelutmattning vid betydligt lägre dynamisk last eller betydligt färre belastningscykler än vad som förväntas i inert miljö.
- Vid metallografisk undersökning av spruckna skovlar hittar man vanligtvis relativt raka, transkristallina sprickor, d.v.s. sprickor som går igenom kristallkornen. Dessa sprickor går också vinkelrätt mot den dominerande spänningsriktningen. I vissa fall kan det finnas interkristallina inslag, d.v.s. att sprickorna delvis följer korngränserna. Detta skiljer sig inte från vad man förväntar sig att finna vid konventionell högcykelutmattning. En avvikelse är dock enligt ovan att vid korrosionsutmattning så har korrosionsangreppen ofta utplånat de flesta spåren av striationer.
- Lokala korrosionsangrepp i form av gropfrätning. Frätgropar är dock inte ett nödvändigt villkor för korrosionsutmattning utan bör snarare ses som en indikation på att miljön varit tillräckligt aggressiv för att man ska kunna få aktiv korrosionsutmattning.
- Närvaro av beläggningar som innehåller mer än några tiondels % av klorider och/eller sulfater. Inte heller detta är dock ett nödvändigt villkor för korrosionsutmattning eftersom vattenlösliga beläggningar kan tvättas bort under transienter som uppstart och laständringar.

5.2.2 Mekanism och inverkan av faktorer

Korrosionsutmattning orsakas av inverkan av en dynamisk last och en aggressiv miljö på ett material som kan vara känsligt för korrosion enligt Figur 87. Dynamiska laster orsakas t.ex. av skovlarnas egenfrekvens, asymmetriska laster vid ångavtappningar eller obalans orsakad av beläggningar. Det vanligaste skovelmaterialet med 12 % Cr är normalt tillräckligt hårdigt i rent kondensat. Anrikning av föroreningar i relativt ”ren” kondenserande ånga kan emellertid medföra en korrosiv miljö i det första kondensatet i övergångszonen mellan torr och fuktig ånga.



Figur 87. De viktigaste inverkanse faktorerna vid korrosionsutmattning

Figure 87. The main influencing factors on corrosion fatigue

5.2.2.1 Kemisk miljö

Som tidigare nämnts så är korrosionsutmattning av lågtrycksskovlar så gott som alltid lokaliserad till övergångszonen mellan torr och fuktig ånga p.g.a. anrikning av föroreningar i det första kondensatet. Det är också där som man vanligtvis kan hitta lokala korrosionsangrepp i form av frätgropar. Risken för gropfrätning beror på materialval och lokala miljöfaktorer som halten klorid (och sulfat) i kondensatet och/eller i beläggningar på skovlarna. En annan viktig faktor är syrehalten i den eventuella fuktfilmen på skovlarna under stillestånd.

Risken för korrosionsutmattning och gropfrätning ökar med sjunkande pH-värde och ökande kloridhalt. Den kritiska kloridhalten varierar dock med andra miljöfaktorer. Stagnanta förhållanden som under beläggningar eller i skovelfästningarna verkar vara det värsta fallet [14]. Laboratorieförsök har visat att en ökande syrehalt ökar riskerna, speciellt vid låga pH-värden och vid relativt höga kloridhalter [15]. Nyare undersökningar har dock visat att syrehalten i den kondensatfilm som fälls ut på skovlarna under drift är låg. Inverkan av syret är därför sannolikt begränsad till en ökande risk för gropfrätning under stillestånd. Koldioxid, t.ex. från inläckande luft, kan i och för sig medföra en viss

14 Atrons A., Faber G., Meyer H., Müller M., Maggi C., Hoffelner W., Speidel M.O., Evaluation of BBC experience with low-pressure steam turbine blades, Steam Turbine Blade Reliability Seminar and Workshop, EPRI CS-4001, Proceedings, juli 1985, p. 4-1 - to 22.

15 Effertz P-H., Hagn L., Investigation of the Corrosion Fatigue Behaviour of Turbine Blading Material in the Area of the First Condensation, Der Maschinenschaden 55 (1982), Heft 2, p.67-80 (in German).

sänkning av pH-värdet i kondensatet. Detta tycks dock inte öka risken för gropfrätning i ”rostfria” skovlar av 12 % Cr, däremot i låglegerade rotormaterial [12].

5.2.2.2 Inverkan av den kemiska sammansättningen av beläggningar

Ett antal undersökningar visar att risken för skovelhaveri är klart beroende av ångkemin [16][17][18][19]. Risken ökar vid förekomst av beläggningar som innehåller aggressiva föroreningar som klorider och sulfater. Analys av beläggningar från ett stort antal lågtrycksturbiner i USA visade ett klart samband mellan halten natrium, klorid och sulfat och korrosionsutmattning av lågtrycksturbinskovlar. Däremot verkar fosfat ha en viss skyddande effekt [13]. Som en grov tumregel kan man säga att en kloridhalt som överstiger 0,2 viktprocent indikerar en aggressiv beläggning[16]. Se Figur 88.

	Genomsnittlig halt i beläggningar från lågtrycksturbiner			
	viktsprocent			
	Na	Cl	SO ₄	PO ₄
Med gropfrätning eller korrosionsutmattning	9,9	5,7	5,1	0,5
Utan gropfrätning eller korrosionsutmattning	1,7	0,1	1,6	0,8

Figur 88. *Inverkan på gropfrätning och korrosionsutmattning av den kemiska sammansättningen av turbinbeläggningar.*

Figure 88. *Effect of chemical composition of turbine deposit on the risk for pitting and corrosion fatigue.*

En undersökning genomförd av en amerikansk turbintillverkare gav i stort sett samma resultat. Beläggningar från 18 lågtrycksturbiner där korrosionsutmattning orsakat skovelhaveri analyserades och i 15 av dessa innehöll beläggningarna betydande halter av klorider. I 14 innehöll beläggningarna natriumsalter, främst klorider och sulfater [17].

5.2.2.3 Wilsonlinjen

Anrikningen av olika föroreningar i ångan från ppb till ppm i det första kondensatet och ibland till % i beläggningar på turbinskovlarna kan förklaras genom olika anrikningsmekanismer. Att salter och andra svårflyktiga föroreningar verkligen anrikas i det första kondensatet i anslutning till Wilsonlinjen har påvisats genom fältnätningar av

16 Turbine Steam, Chemistry and Corrosion, EPRI TR-103738, Aug. 94.

17 Corrosion Fatigue of Steam Turbine-Blading Alloys in Operational Environments, EPRI CS-2931, Sept 1984.

18 Hagn L., Possibilities and Limitations of Life Time Estimation of Boilers and Steam Turbines, Der Maschinenschaden 65 (1992), Heft 4, p. 117-126 (in German).

19 Drahy J. et al, Betriebserfahrungen mit der Korrosion an Skoda-Dampfturbinen der Leistungsklasse 200 MW, Energianwendung und Energietechnik, 42. Jg, Heft 4, April 1993, p. 188-191.

ledningsförmågan i det första kondensatet [16]. Det är övergångsområdet mellan torr och fuktig ånga som kallas Wilsonlinjen.

När ångan börjar kondensera så etableras en ”dynamisk” jämvikt mellan ångan och vattenfasen bestämd av fördelningsfaktorn för respektive ämne. Svårflyktiga ämnen med låg fördelningskoefficient anrikas i det första kondensatet, medan lättflyktiga ämnen med hög fördelningskoefficient i stället anrikas i ångfasen och transporteras nedströms i turbinen med ångan. Omväxlande kondensering och avdunstning av kondensat på skovlarna vid transienter som laständringar bidrar starkt till uppkoncentreringen av föroreningar i anslutning till Wilsonlinjen. Anrikningen av svårflyktiga ämnen som salter och i viss mån en del syror som ättiksyra och myrsyra bidrar till att öka risken för korrosionsangrepp och det är därför inte förvånande att korrosionsproblem som gropfrätning, korrosionsutmattning och i viss mån spänningskorrosion i första hand lokaliseras till detta område.

5.2.2.4 Riktlinjer för ångkemi

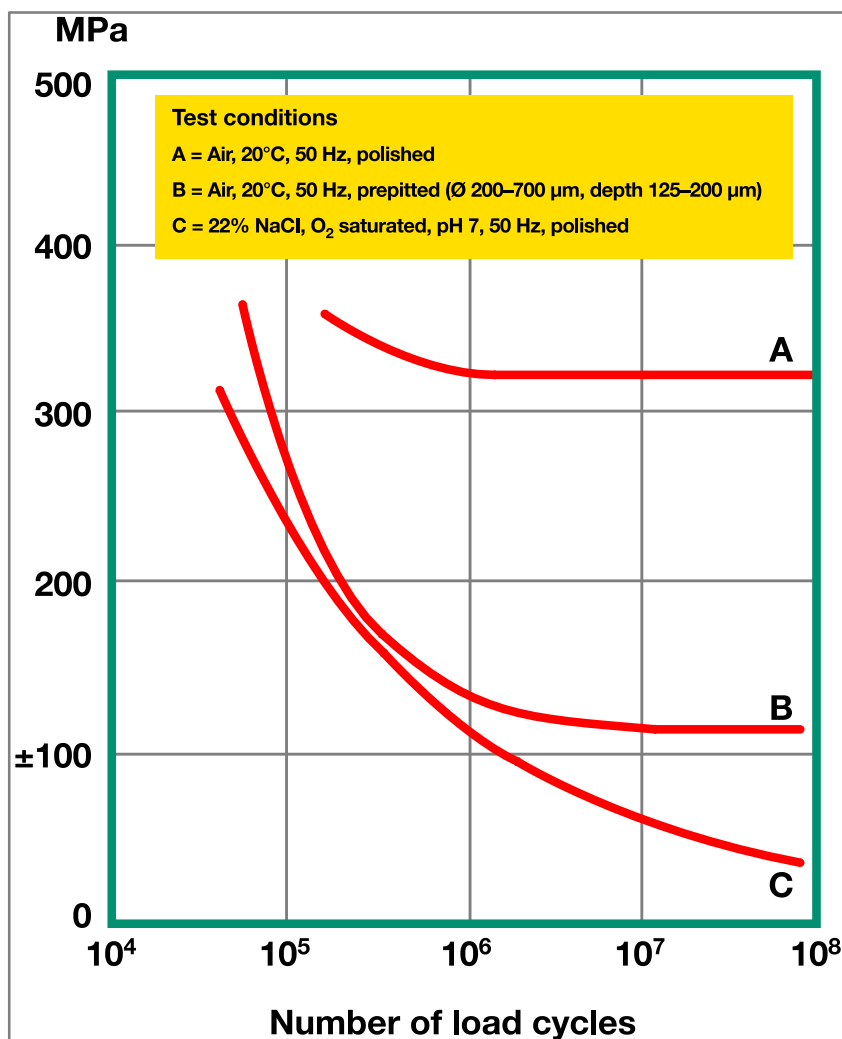
Av de tidigare avsnitten framgår att den acceptabla halten av olika föroreningar i ångan är beroende av vad som händer i lågtrycksturbinen. På senare tid har uppdaterade riktlinjer för ångkemi vid ångturbindrift getts ut av olika organisationer. Skillnaderna mellan moderna riktlinjer för ångkemi är ofta relativt små. De flesta större leverantörer av ångturbiner har också egna riktlinjer som i stort sett ansluter till de internationella riktlinjerna. Se kapitel 10 riktvärden.

5.2.3 Betydelsen av frätgropar

Sprickor orsakade av korrosionsutmattning återfinns ofta men inte alltid i anslutning till frätgropar. Förekomst av frätgropar visar att miljön varit tillräckligt korrosiv för att det skall finnas risk för korrosionsutmattning om övriga villkor är uppfyllda. Den mekaniska anvisningsverkan av frätgropar är normalt av mindre betydelse. Djupa frätgropar kan naturligtvis medföra en spänningskoncentration med det är ovanligt med så djupa frätgropar i havererade skovlar.

Figur 89 visas resultatet av ett försök där ett skovelmateriel med 12 % Cr provats under tre olika förhållanden vid 50 Hz [20]. Utmattningsgränsen för förkorroderade provstavar med relativt djupa frätgropar (kurva B) provade i luft är som förväntat lägre än motsvarande utmattningsgräns för släta polerade provstavar (kurva A). Utmattningsgränsen för släta polerade provstavar i en korrosiv miljö är emellertid ännu lägre (kurva C). Försöket visar att det finns en renodlad miljöeffekt som medför en drastisk sänkning av utmattningsgränsen som är mer dramatisk än effekten av relativt djupa frätgropar. Man skulle i och för sig kunna invända att orsaken är att den maximala provningstiden på 23 dygn (för upp till 10^8 cykler) antagligen är tillräcklig för att man ska kunna få relativt djupa frätgropar också i de från början släta provstavarna.

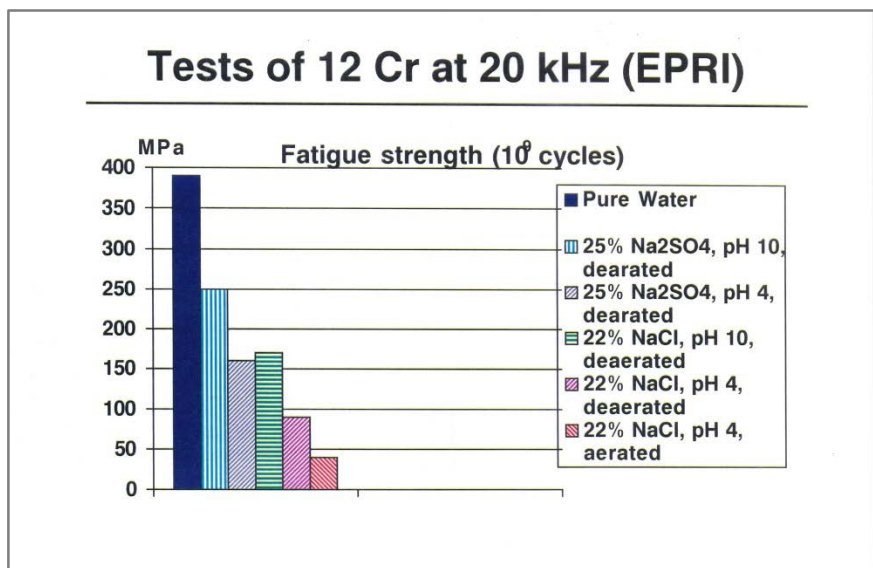
20 Drahy J. et al, *Betriebserfahrungen mit der Korrosion an Skoda-Dampfturbinen der Leistungsklasse 200 MW, Energianwendung und Energietechnik*, 42. Jg, Heft 4, April 1993, p. 188-191



Figur 89. *Inverkan av miljö och förkorroderade provstavar med relativt djupa frätgropar*

Figure 89. *Influence of environment and precorroded test specimens with relatively deep pitting*

Det finns försök som klart visar att man kan få en väsentlig sänkning av utmattningsgränsen, alltså korrosionsutmattning, utan några betydande frätgropar bara den lokala miljön är tillräckligt aggressiv. Se Figur 90. Det aktuella försöket genomfördes vid så hög frekvens, 20 kHz, så att man endast behövde ca 14 timmar att uppnå ett i försökssammanhang mycket stort antal cykler (10⁹). En exponeringstid på 14 timmar är alldeles för kort för att man ska kunna få frätgropar av ett så stort djup att de ska ha någon som helst mekanisk anvisningsverkan, oberoende av vilken av de aktuella miljöerna man provat i. Trots detta fick man stora skillnader i utmattningsgräns i de olika miljöerna [16].



Figur 90. Miljöinverkan vid korrosionsutmattningsförsök vid kort försökstid

Figure 90. Environmental influences on corrosion fatigue after short test time

5.2.4 Mekanisk last

En reduktion av de dynamiska lasterna i övergångszonen mellan torr och fuktig ånga minskar naturligtvis risken för korrosionsutmattning i detta område. Det faktum att det är vanligt med återkommande skador visar att detta inte är någon enkel uppgift [21][22]. Det blir inte lättare av att de kritiska påkänningarna vanligtvis tycks hänga ihop med någon form av transient. Under normal drift är de cykliska spänningarna normalt lägre än ± 50 MPa.

Man tar normalt inte full hänsyn till risken för korrosionsutmattning vid design av lågtrycksturbinskovlar. Det är i praktiken inte möjligt att designa skovlar för den drastiska sänkning av utmattningsgränsen som en starkt aggressiv miljö skulle kunna leda till. Andra åtgärder måste också vidtas. Den viktigaste av dessa är att uppfylla kraven på ångkemin.

Kulpeening är en metod att föra in tryckspänningar i skovlarna. Detta reducerar medelspänningen och är fördelaktigt eftersom det leder till en ökad utmattningsgräns i korrosiva miljöer. Man kan visserligen hävda att detta bara är en temporär åtgärd i starkt korrosiva miljöer eftersom djupa frätgropar kan nå igenom skiktet med tryckspänningar. I de flesta fall är dock frätgroparna inte tillräckligt djupa för detta [12][17].

21 Dewey R.P., Rieger N.F., Survey of Blade Failures in Turbine-Generator Units, EPRI CS 3891, May 1985

22 Höxtermann E., Blade Failures in Steam Turbines, VGB Kraftwerkstechnik 59, Heft 12, dec. 1979, p. 952-964 (in German)

5.2.5 Inverkan av skovelmaterial

En ökad hårdighet mot korrosion medför vanligtvis en ökad hårdighet mot korrosionsutmattning. Skillnaderna mellan olika material minskar dock vanligtvis i starkt aggressiva miljöer. Det mest korrosionshårdiga material som används för lågtrycksturbinskovlar idag är en titanlegering, Ti6Al4V. Det är också det dyraste [23]. Detta material används dock normalt inte främst p.g.a. dess goda egenskaper vad det gäller korrosionsmotstånd utan snarare för att den låga specifika vikten medför en relativt låg centrifugalbelastning. Ett annat alternativt material som uppvisat gott motstånd mot korrosionsutmattning både vid fältprovning och i praktiken är ett utskilningshårdande rostfritt stål med ca 15 % Cr, 1 % Mo och 5 % Ni [24]. I kompressorskovlar i gasturbiner har erfarenheterna inte varit lika positiva, antagligen p.g.a. den mycket högre syrehalten i vattenfasen jämfört med i ångturbiner.

5.2.6 Rekommendationer

Det effektivaste sättet att minska risken för utmattningskorrosion av lågtrycksskovlar i existerande ångturbinanläggningar är att se till att man följer de riktlinjer för ångkemin som anges i moderna riktlinjer och standarder. Följande åtgärder rekommenderas för att underlätta detta:

- Utbilda personalen om betydelsen av ång- och vattenkemin och om möjliga konsekvenser av drift med oren ånga.
- Övervaka ångkemin online, speciellt natrium och sur ledningsförmåga
- Sök och eliminera orsaken till avvikelser från gällande ångkemikrav.

5.2.7 Slutsatser

Korrosionsutmattning av lågtrycksturbinskovlar är enligt samstämmiga internationella erfarenheter en av de dominerande orsakerna till bristande tillförlitlighet och tillgänglighet hos ångturbiner. Drabbade skovlar är så gott som alltid lokaliserade till övergångszonen mellan torr och fuktig ånga.

Korrosionsutmattning av lågtrycksskovlar är ett generellt problem för alla typer av turbiner i kondensanläggningar.

Haveri p.g.a. korrosionsutmattning efter relativt kort drifttid tyder på en kombination av en kritisk dynamisk belastning och en lokal aggressiv miljö under normal drift. Haveri efter lång drifttid tyder på att miljön eller den dynamiska lasten ändrats till det värre med tiden eller att haveriet orsakats av någon form av relativt kortvarig transient som medfört en starkt aggressiv miljö eller hög cyklisk belastning under en relativt kort tid.

Slutsatsen av ett antal genomgångar av erfarenheter från fältet är att ångkemin är en av de mest kritiska inverkanse parametrarna. En beläggning innehållande mer än några

23 Tavast J et al., *The Use of Titanium in Water/Steam Cycles of Power Plants, International Conference on Interaction of Non-Iron Based Materials with Water and Steam, EPRI/VGB, Piacenza, Italy, June 1996*

24 Tavast J., *Fältprovning av lågtrycksturbinskovlar med förbättrad hårdighet mot korrosionsutmattning, Värmeforskrapport nr. 811, juli 2003*

tiondels % av klorider och/eller sulfater leder till en betydande risk för korrosionsutmattnings.

Förbättrad ång- och vattenkemi är därför en väg till minskad risk för korrosionsutmattnings i lågtrycksturbinskovlar. Följande åtgärder rekommenderas för att uppnå en förbättrad ång- och vattenkemi:

- Utbildning
- Kontinuerlig uppföljning av ångkemin, främst natrium och sur ledningsförmåga
- Sök och eliminera orsaker till avvikelser från gällande riktlinjer för ångkemin

5.3 Spänningskorrosion

Vid spänningskorrosion medför yttre och/eller inre dragspänningar i kombination med en specifik korrosiv miljö sprickbildning som i värsta fall kan leda till ett totalt haveri. En del material är dock känsliga för spänningskorrosion i flera olika typer av miljöer. Sprickorna bildas vinkelrätt mot den dominerande spänningsriktningen. Till skillnad från utmattningsprickor, inklusive sprickor orsakade av korrosionsutmattnings, är spänningskorrosionssprickor ofta starkt förgrenade. Typen av sprickning, interkristallin eller transkristallin, beror på den aktuella kombinationen av material och miljö. Ett välkänt exempel på spänningskorrosionssprickning är transkristallina sprickor i austenitiska rostfria stål i kloridmiljöer vid temperaturer över ca 60 °C.

Vid spänningskorrosionssprickning avgörs den totala livslängden av den sammanlagda tiden för initiering av sprickor och den tid som det tar för den längsta sprickan att tillväxa till en kritisk längd. Den kritiska spricklängden vid en viss given belastning ökar med ökande seghet hos materialet.

5.3.1 Erfarenheter av spänningskorrosionssprickning i ångturbiner

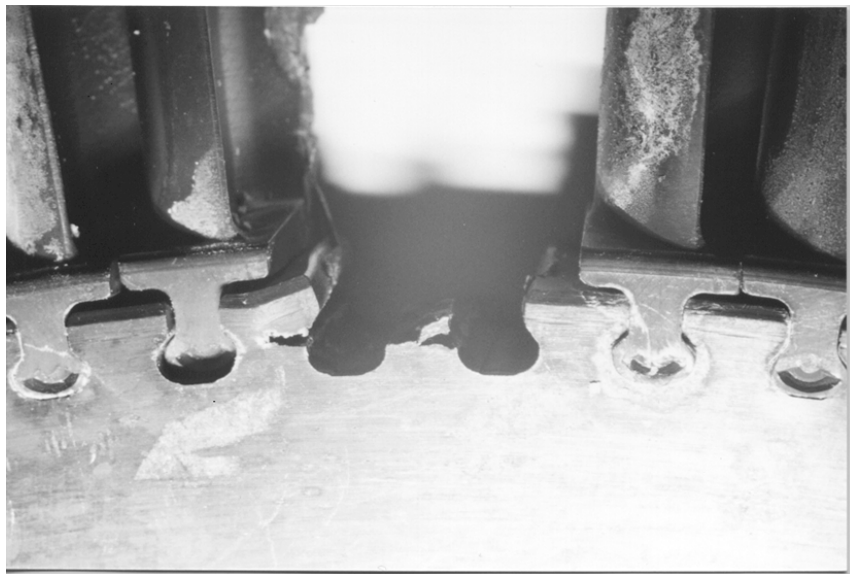
5.3.1.1 Natriumhydroxid

Figur 91, Figur 92 och Figur 93 visar exempel på spänningskorrosionssprickning i ångturbiner. Utsatta komponenter är främst lågtrycksturbiner med rotor och skivor av låglegerat stål. Denna skademekanism är däremot numera mycket ovanlig i komponenter som skovlar och ledskenor av martensitiska rostfria stål med ca 12 % krom. Den vanligaste utlösande orsaken till spänningskorrosionssprickning i ångturbiner är förorenad ånga, vanligtvis ånga med förhöjda halter av natriumhydroxid. Sådana sprickor är normalt lokaliserade till området ett eller ett par steg före Wilsonlinjen. Orsaken är att natriumhydroxiden är så starkt hygroskopisk att den bildar en aggressiv natriumhydroxidlösning i detta område trots att ångan är överhettad i de fall som halten av natriumhydroxid är så hög att den fälls ut. I anslutning till och efter Wilsonlinjen medför i stället den rikliga tillgången till fukt att natriumhydroxiden snabbt späds ut till ofarliga halter.

De exempel på spänningskorrosionssprickning i lågtrycksturbiner som visas i Figur 91, Figur 92 och Figur 93 är orsakade av alltför hög halt av natriumhydroxid i ångan. De beläggningar som bildas vid utfällning av natriumhydroxid i turbinen är vattenlösliga och

alkaliska. De innehåller ofta höga halter av karbonat eftersom hydroxiden reagerar med koldioxiden i luften då turbinen tagits ur drift. Detta upptäcker man enkelt genom den kraftiga gasutveckling som uppstår när man droppar lite syra på ett prov av beläggningen.

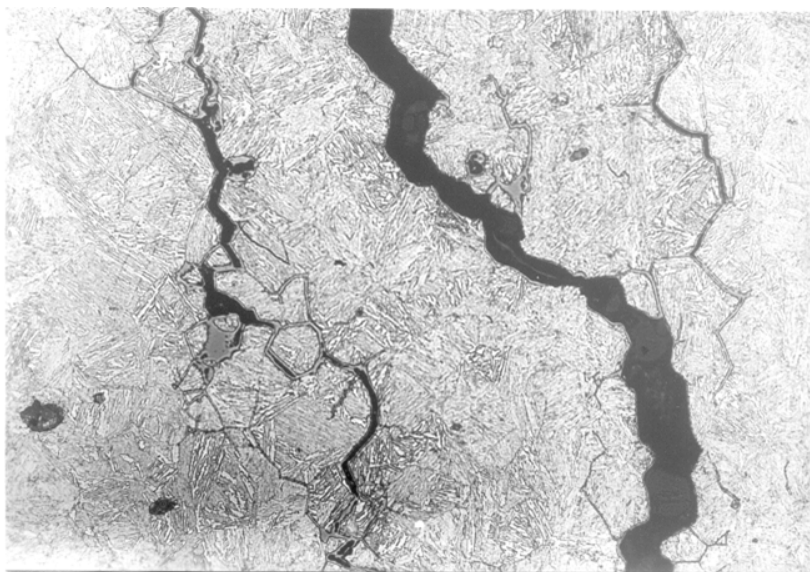
Figur 91 visar spänningskorrosionssprickning i en turbinskiva av låglegerat stål p.g.a. drift med alltför hög halt natriumhydroxid i ångan. Sprickorna i de relativt högt belastade skovelinfästningarna har medfört att flera skovlar släppts med omfattande följdskador som följd.



Figur 91. *Spänningskorrosionssprickning i en turbinskiva av låglegerat stål*

Figure 91. *Stress corrosion cracking in a turbine disc of low-alloy steel*

Sprickorna i Figur 91 är kraftigt förgrenade och interkristallina vilket framgår av Figur 92 som visar en förstoring av sprickorna i Figur 91. Detta är typiskt för spänningskorrosion i låglegerat stål i alkalisk miljö.



Figur 92. *Förstoring av sprickorna i Figur 91*

Figure 92. *Enlargement of the cracks in Figure 91*

Figur 93 visar en skada som upptäcktes vid penetrantprovning. Skadan utgjordes av omfattande spänningskorrosionssprickor i radieövergången mellan axel och turbinskiva. Sprickorna var så djupa att man var tvungen att svarva bort skivan och fortsätta driften utan det aktuella turbinsteget.



Figur 93. *Omfattande spänningskorrosionssprickor i radieövergången mellan axel och turbinskiva*

Figure 93. *Severe stress corrosion cracking in the radius between shaft and turbine disc*

5.3.1.2 "Ren" kondenserande ånga

Under vissa förutsättningar kan också "ren" kondenserande ånga medföra spänningskorrosionssprickning i lågtrycksturbiner. Med "ren" ånga avses i detta fall en ångkemi som är tillräckligt bra för att uppfylla kraven i normala riktlinjer för ångkemi men där anrikningsmekanismerna i övergångszonen mellan torr och fuktig ånga kan medföra en tillräckligt aggressiv miljö för att utlösa spänningskorrosionssprickning. Detta gäller främst tidigare typer av rotorerna där konstruktionen var sådan att man p.g.a. hög belastning tvingades välja material med mycket höghållfasthet. Inverkan av hög hållfasthet (sträckgräns) och hög belastning belyses närmare i avsnitt 5.3.2 nedan. Problemet har också varit lokaliserat just till övergångszonen mellan torr och fuktig ånga, alltså inte till stegen innan som vid spänningskorrosionssprickning i alkalisk miljö.

Ett exempel på en konstruktion där detta åtminstone tidigare medfört återkommande spänningskorrosionssprickning i "ren" kondenserande ånga är rotorerna med påkrympta turbinskivor i äldre nukleära anläggningar. I de flesta av dessa anläggningar har man numera övergått till konstruktioner och tillverkningsprocesser som medger val av rotormaterial med lägre hållfasthet. Införande av tryckspänningar i högt belastade områden genom kulblästring eller tryckvalsning är en annan åtgärd som använts för att minska riskerna.

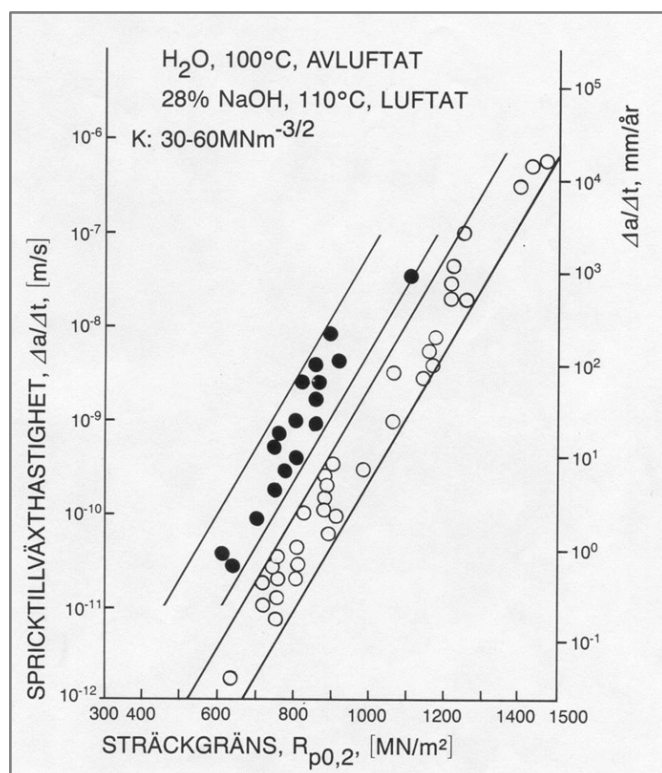
Spänningskorrosionssprickning i "ren" kondenserande ånga är normalt ett långsamt förlopp. Detta medför att det i de flesta av de drabbade anläggningarna varit möjligt att fortsätta driften eller åtminstone göra en konservativ bedömning av när rotorn senast måste bytas ut. Detta har dock krävt en tidsödande återkommande oförstörande provning för uppskattning av den nominella hastigheten för spricktillväxten.

5.3.2 Inverkande faktorer

De viktigaste inverkanse faktorerna när det gäller risken för spänningskorrosionssprickning i lågtrycksturbinrotorer är följande:

- Ångkemin
- Materialets sträckgräns
- Belastning
- Temperatur

Figur 12 visar hur två olika typer av miljöer, koncentrerad natriumhydroxidlösning respektive "ren" kondenserad ånga, inverkar på tillväxthastigheten för spänningskorrosionssprickor i ett låglegerat stål av den typ som används i lågtrycksturbinrotorer. Tillväxthastigheten i den koncentrerade natriumhydroxidlösningen är storleksordningen 100 gånger högre än i kondensatet av "ren" ånga för material med samma sträckgräns.



Figur 94. Tillväxthastigheten hos spänningsskorrosionssprickor i låglegerade rotormaterial i natriumhydroxid (fyllda symboler) respektive kondensat (ofyllda symboler) som funktion av sträckgränsen [25]

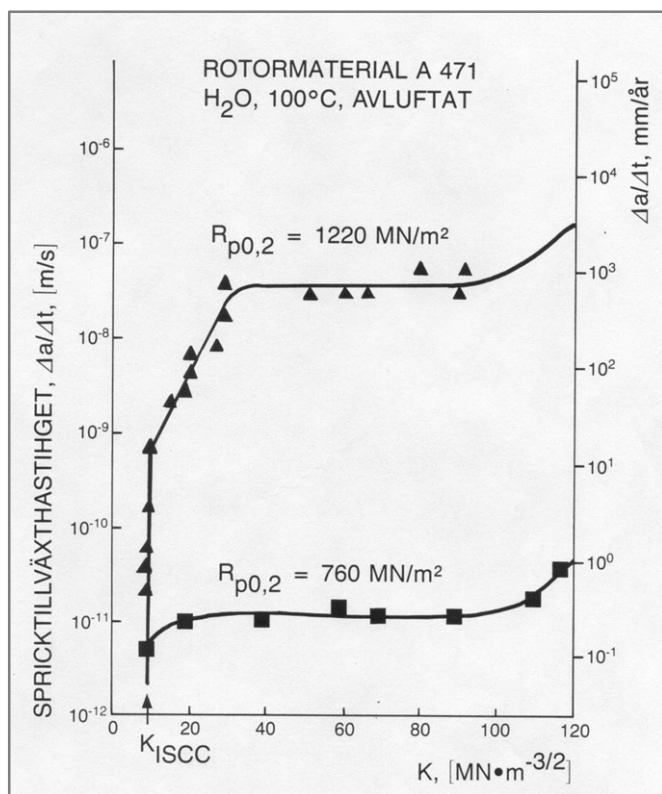
Figure 94. Propagation rate of stress corrosion cracks in low alloy rotor material in sodium hydroxide (filled symbols) and condensate (open symbols) v.s. proof strength

Figur 94 visar också att tillväxthastigheten för spänningsskorrosionssprickor i låglegerade rotorstål är starkt beroende av materialets sträckgräns. En ökning från 700 till 900 MN/m² medför t.ex. en ökning av tillväxthastigheten med en faktor av storleksordningen 100 både i koncentrerad natriumhydroxid och i ren kondenserad ånga.

Inverkan av belastningen uttryckt som spänningsintensiteten K på tillväxthastigheten är relativt liten inom ett ganska brett intervall. (Spänningsintensiteten K är beroende av dragspänningen och den lokala mekaniska anvisningsfaktorn av den aktuella sprickan).

Figur 95 visar inverkan av sträckgränsen på tillväxthastigheten av spänningsskorrosionssprickor i "ren" kondenserande ånga för ett låglegerat rotormaterial värmebehandlat till normal respektive extremt hög sträckgräns [25]. Vid normal sträckgräns är tillväxthastigheten relativt låg; storleksordningen några tiondels mm/år. Vid extremt höga sträckgränser är tillväxthastigheten däremot så hög att en spänningsskorrosionsspricka skulle medföra ett haveri efter mycket kort tid. I ett sådant fall kan man säga att tiden till brott är nästan helt beroende av initieringstiden för sprickorna. Den ogynnsamma

inverkan av extrema sträckgränser medför numera att man undviker att använda sådant rotormaterial.

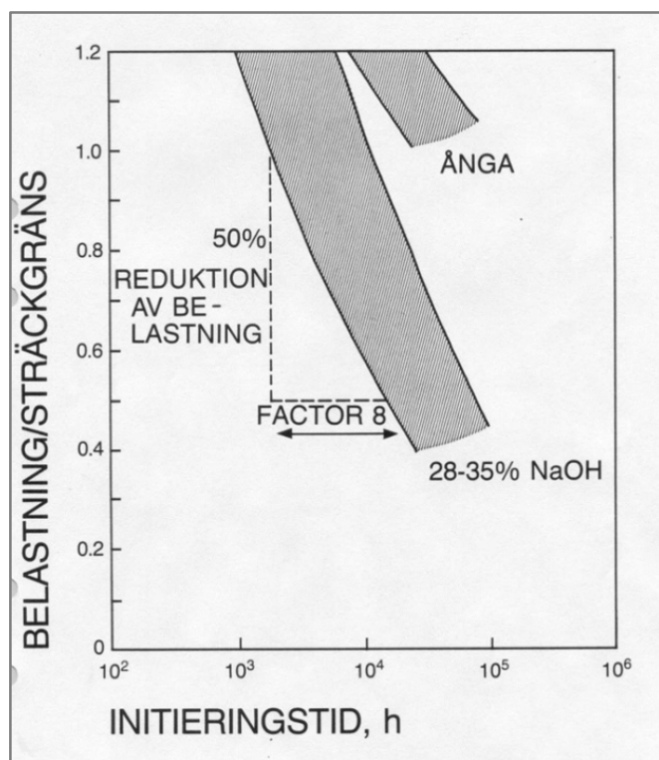


Figur 95. Inverkan av sträckgränsen på tillväxthastigheten i försök i ren kondenserad ånga

Figure 95. Influence of proof strength of propagation rate at tests in pure condensing steam

En ökande temperatur medför ökande tillväxthastighet för spänningskorrosionssprickor. Denna inverkan är dock betydligt mindre dramatisk än inverkan av miljö respektive sträckgräns.

Vad det gäller inverkan på initieringstiden så visar olika försök att initieringstiden som väntat är betydligt kortare i en aggressiv miljö som koncentrerad natriumhydroxid. Som förväntat medför också ökande belastning en minskad initieringstid [25]. Se Figur 96. Däremot är det svårare att hitta försöksresultat som visar i vilken mån som sträckgränsen inverkar på initieringstiden. Troligen medför en ökande hållfasthet också minskad initieringstid men effekten är sannolikt mindre dramatisk än för tillväxthastigheten.



Figur 96. *Inverkan av miljö och belastning på initieringstiden för spänningskorrosionssprickning i låglegerat stål*

Figure 96. *Influence of environment and load on initiation time for stress corrosion cracking in low alloy steel*

5.3.3 Slutsatser

Spänningskorrosionssprickning i ångturbiner är huvudsakligen ett problem i anläggningar där man har svårt att uppfylla kraven på ångkemin, framförallt vad det gäller natrium, eller snarare natriumhydroxid. Spänningskorrosionssprickning orsakad av natriumhydroxid är normalt lokaliserad till stegen närmast före övergångszonen mellan torr och fuktig ånga.

Den viktigaste åtgärden för att undvika spänningskorrosion är att följa riktlinjerna för ångkemi, framförallt vad det gäller natrium (natriumhydroxid).

I vissa fall kan man också få spänningskorrosionssprickning i "ren" kondenserande ånga. Detta gäller främst för äldre rotorkonstruktioner som p.g.a. höga belastningar krävde material med mycket hög hållfasthet. Sprickorna är i detta fall lokaliserade till övergångszonen mellan torr och överhettad ånga. Spänningskorrosionssprickning i denna relativt milda miljö är dock normalt ett långsamt förlopp som när det väl upptäckts kan hanteras genom en återkommande oförstörande provning för att åstadkomma en konservativ bedömning av den nominella tillväxthastigheten för sprickorna. Byte till modernare typer av rotorerna med lägre belastningar som gör det möjligt att använda material med lägre hållfasthet är i detta fall det bästa sättet att minska riskerna. Införande av tryckspänningar i ytan genom kulblåstring eller tryckvalsning minskar risken för problem ytterligare.

5.4 Erosionskorrosion

Erosionskorrosion i komponenter av kolstål och vissa typer av låglegerat stål är ett vanligt problem i fuktig ånga, både i konventionella och i nukleära anläggningar. I en del fall kan erosionskorrosion också förekomma i kondensat, matarvatten och pannvatten.

Exempel på komponenter som drabbats är:

- turbinhus, mellanväggar och rotorerna i konventionella kondensturbiner liksom i turbiner i nukleära anläggningar
- economizertuber och förångartuber i pannor
- ångsidan av värmeväxlare som förvärmare och värmekondensorer

I Handboken behandlas de för erosionskorrosion viktigaste inverkande faktorerna liksom möjliga motåtgärder.

5.4.1 Erfarenheter, utseende och lokalisering av angrepp

5.4.1.1 Turbinhus, mellanväggar, skovelbärare och rotorerna

I konventionella kondensturbiner är risken för erosionskorrosionsangrepp begränsade till den fuktiga ångan nedströms Wilsonlinjen. Risken varierar mellan olika anläggningar, beroende på skillnader i termodynamisk utläggning och driftsätt. I nukleära anläggningar är ångan fuktig i större delen av turbinen.

Den ytmässiga utbredningen av angreppet kan vara mycket varierande från anläggning till anläggning. Detsamma gäller angreppsdjupet. Själva angreppsytan är ofta relativt slät, med en ljusgrå till svart färg. I enstaka fall har angreppen varit så djupa att tätkanter i mellanväggar lossnat. Figur 97 och Figur 98 exemplifierar sådana djupa angrepp.



Figur 97. *Mellanvägg med djupa erosionskorrosionsangrepp*

Figure 97. *Severe erosion corrosion on diaphragm*

Figur 97 visar en del av delningsplanet i ett turbinhus med en mellanvägg med djupa erosionskorrosionsangrepp vid infästningen av tätkanterna mot rotorn och i infästningen av mellanväggen mot turbinhuset.

Ett annat exempel på erosionskorrosion visas i Figur 98 där en tätkant har lossnat p.g.a. det djupa angreppet.

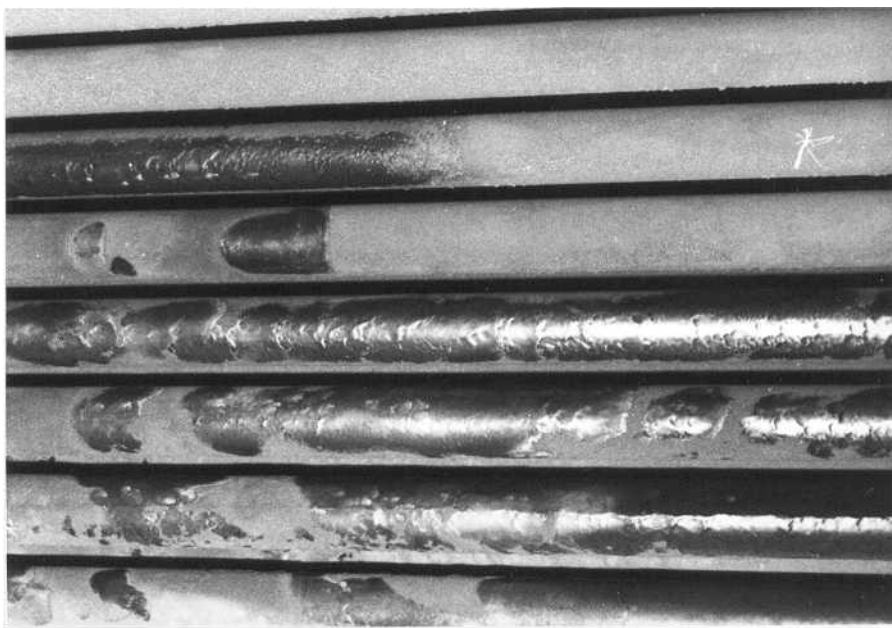


Figur 98. *En tätkant har lossnat p.g.a. det djupa angreppet*

Figure 98. *One sealing edge has become detached because of the deep attack*

5.4.1.2 Värmeväxlare

Erosionskorrosion är ett av de vanligaste problemen på ångsidan av värmeväxlare som värmekondensorer och förvärmare. Angreppen är koncentrerade till de yttre tubraderna i områden med hög ånghastighet, t.ex. i närheten av ånginlopp etc. Figur 99 nedan visar erosionskorrosionsangrepp på ångsidan i en lågtrycksförvärmare.



Figur 99. *Utvändiga angrepp i kolstålstuber i en LTFV*

Figure 99. *External attack on carbon steel tubes in a LPPH*

En inventering av erfarenheterna från värmekondensorer med kolstålstuber visar till exempel att ca två tredjedelar av undersökta värmekondensorer har angrepp på ångsidan orsakade av erosionskorrosion och/eller dropperosion. Den nominella angreppshastigheten på ångsidan i värmekondensorer kan i ogynnsamma fall uppgå till drygt 0,2 mm/år. Den verkliga angreppshastigheten är naturligtvis högre, eftersom angrepp av denna typ endast tillväxer under drift.

Angreppen är enligt ovan vanligtvis lokaliserade till de yttre tubraderna i områden med hög ånghastighet. Angreppen är ofta relativt utsträckta och täckta av en ytterst tunn grå till svart oxidfilm. Angreppsdjupet varierar, men själva den angripna ytan känns trots detta relativt slät. Lösa brunaktiga korrosionsprodukter kan tillkomma vid stillestånd i fuktig miljö.

Erosionskorrosionsangreppen begränsas vanligtvis till den del av tuben som är vänd mot den inströmmande ångan. Till skillnad mot vid dropperosion kan dock angreppen i vissa fall också uppträda på "baksidan" av tuben. Angreppen avtar normalt några tubrader in i tubsatsen. I enstaka fall har dock angrepp observerats ända upp till 6-7 tubrader in i värmekondensorer.

Figur 100 visar en skada med erosionskorrosionsangrepp på ångsidan av tuberna i 6:e och 7:e tubraden i en värmekondensor. De yttre tubraderna har avlägsnats.



Figur 100. *Erosionskorrosionsangrepp på ångsidan av tuberna i en värmekondensor*

Figure 100. *Erosion corrosion on the steam side of the tubes in a district heating condenser*

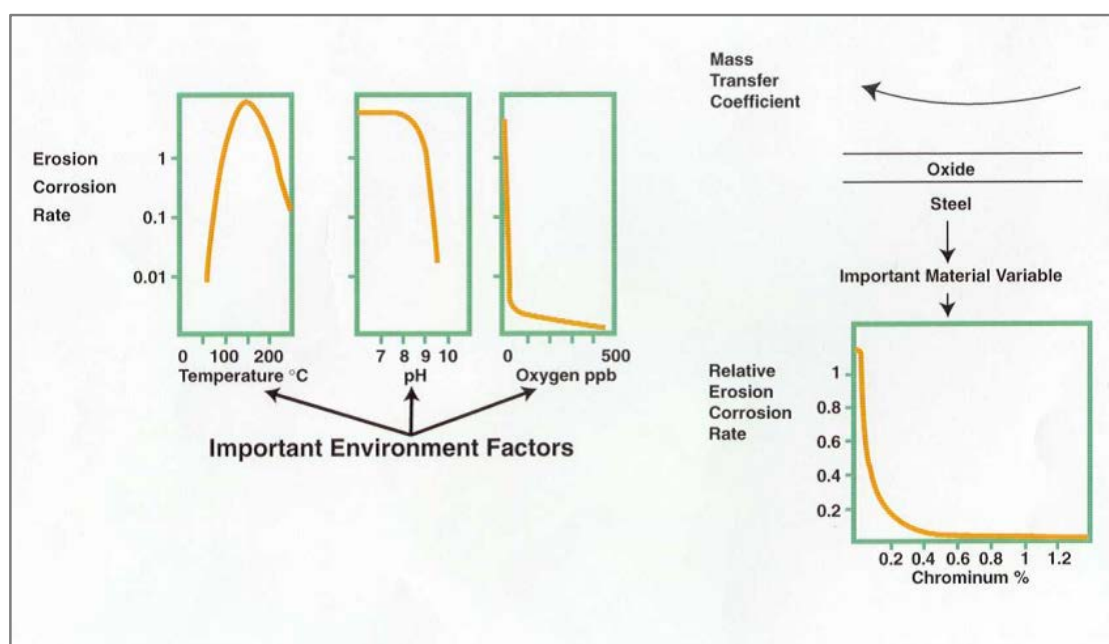
I värmekondensorer och förvärmare kan ett läckage i en tub medföra omfattande sekundära skador på närliggande tuber i form av erosionskorrosionsangrepp och dropperosionsangrepp p.g.a. det höga trycket på vattensidan. Höljen och stödplåtar är också utsatta även om angreppen i dessa tjockväggiga komponenter för det mesta är mindre kritiska. Vidgade "tubhål" i stödplåtarna kan medföra risk för ökade vibrationer och skador p.g.a. nötning och utmattning. I kondensorer kan den fuktiga ångan medföra en del angrepp på höljet, även om angreppshastigheten normalt är blygsam.

Erosionskorrosion är mera ovanlig på vattensidan. I en del fall har dock erosionskorrosionsangrepp upptäckts i vattenkammare och tubplåtar på vattensidan i lågtrycksförvärmare, däremot inte i högtrycksförvärmare eller i värmekondensorer.

5.4.1.3 Mekanism och inverkan av faktorer

Benämningen erosionskorrosion tyder på ett samspel mellan fysisk erosion och korrosion. Detta är dock endast fallet vid extrema strömningshastigheter. "Strömningssinducerad korrosion" skulle vara ett mera korrekt uttryck, eftersom den viktigaste effekten av en ökad strömningshastighet (turbulens) är en ökad masstransport och därmed en ökad korrosionshastighet. I engelskspråkig litteratur använder man numera i linje med detta för det mesta begreppet FAC som står för "Flow Accelerated Corrosion", alternativt "Flow Assisted Corrosion". Se även kapitel 4.3.2.3.1 om FAC.

Figur 101 visar de viktigaste inverkan faktorerna vid erosionskorrosion av kolstål och låglegerat stål.



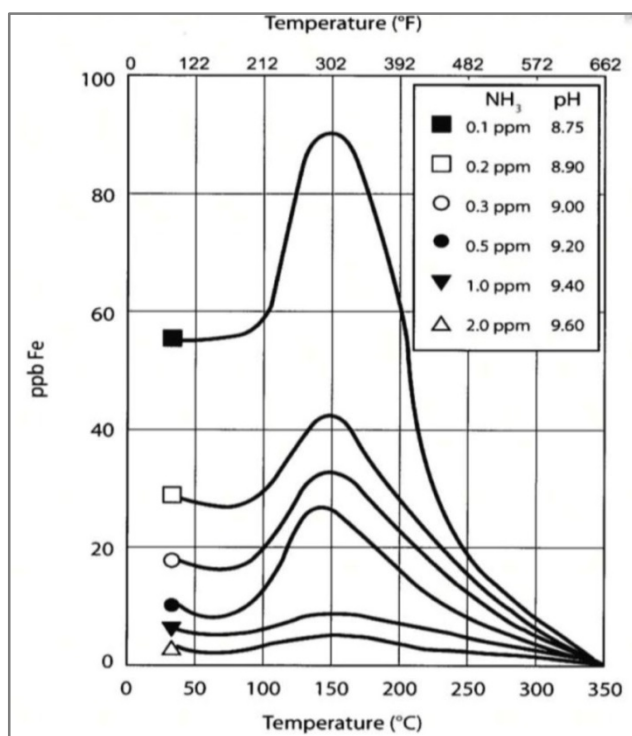
Figur 101. Den relativa angreppshastigheten vid erosionskorrosion av kolstål och låglegerat stål som funktion av de viktigaste inverkan faktorerna

Figure 101. The relative corrosion rate at erosion corrosion of carbon steel and low alloy steels as a function of the main influencing factors

Under normala förhållanden begränsas korrosionshastigheten av kolstål och låglegerat stål av lösligheten av järn i gränsskiktet närmast ytan. Lösligheten är i första hand beroende av temperaturen och vattenfasens pH-värde och/eller syrehalt samt skyddsskiktets sammansättning. Om strömningförhållandena ändras så att transporten av järnjoner från ytan ökar, sjunker järnhalten i gränsskiktet närmast ytan, och ytterligare järn kan lösas ut. Resultatet blir en ökad angreppshastighet, eller med andra ord erosionskorrosion. Drivkraften är beroende av skillnaden mellan lösligheten och den aktuella halten i gränsskiktet närmast ytan. Av resonemanget framgår också att det är strömningshastigheten vinkelrätt mot ytan som inverkar på angreppshastigheten. Effekten av de viktigaste inverkan faktorerna framgår schematiskt av Figur 101 ovan.

5.4.1.3.1 Temperatur

Lösligheten av järn ökar med ökande temperatur. Samtidigt underlättas dock uppbyggnaden av ett skyddsskikt och vid tillräckligt hög temperatur medför skyddsskiktet en minskad korrosionshastighet. Effekten av detta blir att angreppshastigheten vanligtvis är som högst kring ca 150 °C enligt Figur 102. Detta innebär alltså att man vid inspektion av en anläggning i första hand kan förvänta sig att finna erosionsangrepp i komponenter i kontakt med fuktig ånga vid ca 150 °C.



Figur 102. Den relativa angreppshastigheten vid erosionskorrosion av kolstål och låglegerat stål som funktion av de viktigaste inverkanse faktorerna

Figure 102. The relative corrosion rate at erosion corrosion of carbon steel and low alloy steels as a function of the main influencing factors

5.4.1.3.2 pH-värde

Vid konventionell alkalisk vattenbehandling är pH-värdet i vattenfasen avgörande för angreppshastigheten. Lösligheten av järn minskar med ökande pH-värde och vid ett pH-värde kring 9,5 kan angreppshastigheten normalt försummas. Se Figur 101. Orsaken till att erosionskorrosionshastigheten normalt är högre i fuktig ånga än i kondensat eller matarvatten är att det först utfällda kondensatet vanligtvis har ett relativt lågt pH-värde, eftersom flyktiga alkaliseringsmedel som ammoniak anrikas i ångfasen. Det först utfällda kondensatet har därför en lägre halt alkaliseringsmedel än det totala kondensatet, och får därmed också ett lägre pH-värde.

5.4.1.3.3 Syrehalt

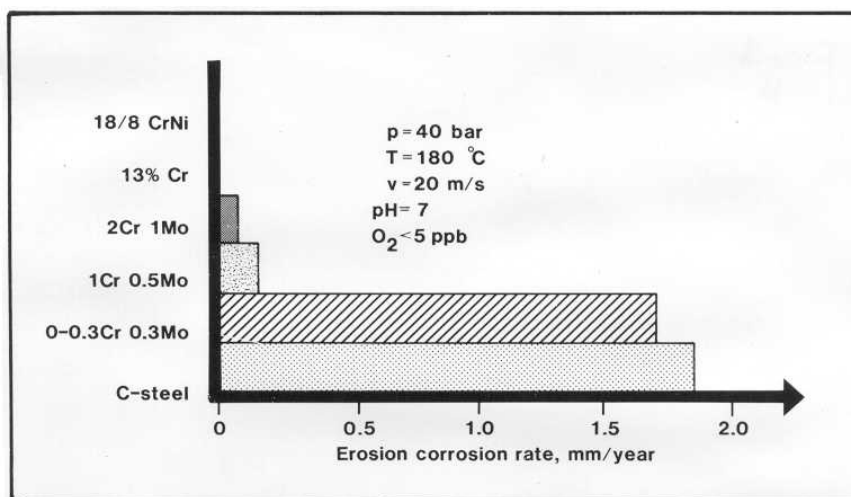
Vid vattenbehandling som baseras på en viss syrehalt i vattnet i kombination med ett relativt lågt pH-värde kring 8,5, s.k. OT (oxygen treatment), är syrehalten i vattenfasen en avgörande faktor. Se Figur 101. Normalt anses då en syrehalt någonstans mellan 20-50 ppb vara tillräcklig för att reducera angreppshastigheten till en acceptabel nivå. Syrehalten i det första kondensatet i fuktig ånga är dock normalt betydligt lägre, eftersom syre anrikas i ångfasen. Se kapitel 10.2.2 om OT.

5.4.1.3.4 Material/Ytbeläggning

En ökande kromhalt medför ett ökat motstånd mot erosionskorrosion. Se figur 6 nedan. Koppar och molybden har också en viss inverkan. Motståndet mot erosionskorrosion ökar därför i ordningen:

kolstål $\Rightarrow$ låglegerade kromstål $\Rightarrow$ rostfria stål

Figur 103 visar materialsammansättning (kromhalt) inverkan på korrosionshastigheten vid ett erosionskorrosionsförsök i neutral miljö och låg syrehalt [26].



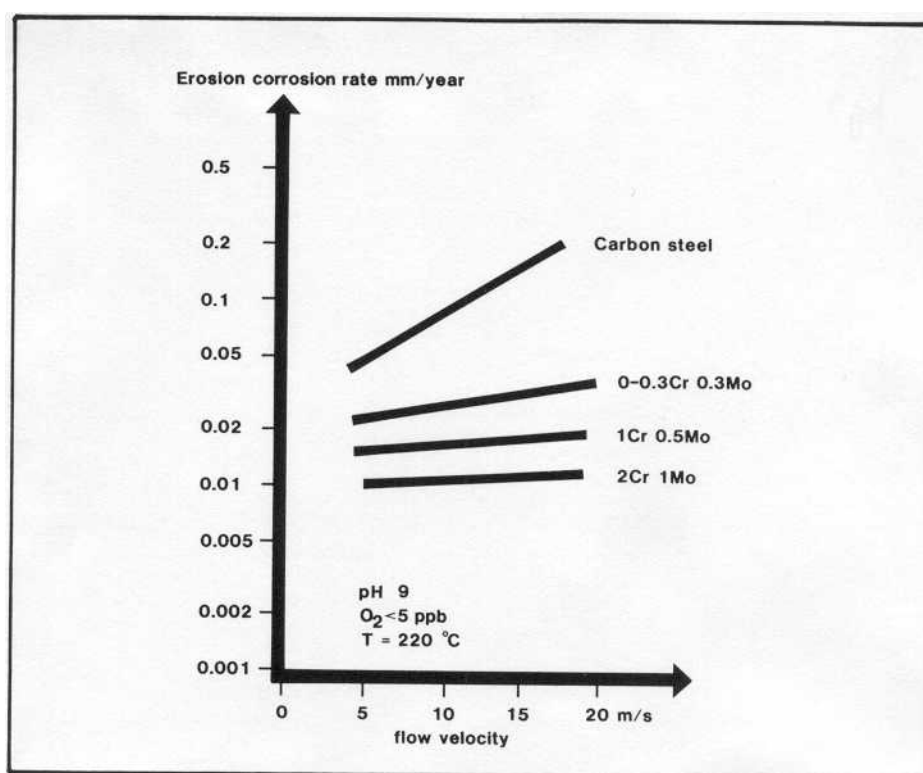
Figur 103. *Inverkan av materialsammansättning vid erosionskorrosion i neutral miljö och låg syrehalt.*

Figure 103. *Influence of material composition on erosion corrosion in a neutral environment and low oxygen level.*

5.4.1.3.5 Strömningshastighet

Angreppshastigheten ökar med ökande strömningshastighet (v), eller snarare med ökande turbulens, och under i övrigt likartade förhållanden är angreppshastigheten proportionell mot v^x . Exponenten x är större för kolstål än för mer legerade material, vilket alltså innebär att kolstål är mera känsligt för en ökande strömningshastighet än mer legerade material. Se Figur 104. I fuktig ånga är det strömningshastigheten i kondensatfilmen som är avgörande för angreppshastigheten. Normalt innebär en måttlig ändring av temperaturen eller kemin mera för angreppshastigheten än en måttlig ändring av strömningshastigheten.

Figur 104 visar inverkan av strömningshastighet vid ett erosionskorrosionsförsök i konventionell alkalisk miljö [26].



Figur 104. Inverkan av strömningshastighet vid erosionskorrosion i konventionell alkalisk miljö.

Figure 104. Flow rate effect on erosion corrosion in conventional alkaline environment.

5.4.1.3.6 Fukthalt

För att man skall kunna råka ut för erosionskorrosion krävs närvaro av vatten. I fuktig ånga talar man ofta om en kritisk fukthalt, under vilken man anser att risken för erosionskorrosionsangrepp kan försummas. Det är dock omöjligt att ange någon generell "säker" högsta fukthalt, dels p.g.a. inverkan av andra kritiska faktorer som temperatur och kemi, dels p.g.a. risken för lokal ansamling av fukt, t.ex. i rörkrökar.

5.4.1.3.7 *Slutsats*

Vid termodynamisk dimensionering av kondensturbiner brukar man försöka uppskatta risken för erosionskorrosionsangrepp genom att rita in och bedöma expansionslinjens läge i ett s.k. Mollier-diagram. Se bilaga B. Enligt ovan kan man åtminstone dra slutsatsen att en hög fukthalt vid ca 150 °C indikerar en avsevärd risk för erosionskorrosionsangrepp.

5.4.1.4 Möjliga motåtgärder

Enligt ovan avgörs angreppshastigheten vid erosionskorrosion främst av följande faktorer:

- Temperaturen
- Den lokala kemin (pH-värde och syrehalt i vattenfasen)
- Materialets eller ytbeläggningens kromhalt
- Den lokala strömningshastigheten i vattenfasen
- Fukthalten (i fuktig ånga)

I praktiken begränsas möjliga åtgärder mot erosionskorrosion normalt till åtgärder på material- och kemisidan, även om det i vissa fall kan vara möjligt att lokalt reducera fukthalten i fuktig ånga genom installation av någon form av fuktavskiljare. Av ekonomiska skäl är det däremot naturligtvis inte möjligt att reducera angreppshastigheten genom att undvika det kritiska temperaturområdet kring 150°C eller genom att sänka den genomsnittliga strömningshastigheten. I rörledningar kan det dock vara möjligt att reducera den lokala turbulensen genom bearbetning av svetsrågar etc.

5.4.1.5 Åtgärder material/ytbeläggningar

Motståndet mot erosionskorrosion varierar med materialets, eller snarare ytans, sammansättning, och ökar därför enligt ovan i ordningen:

kolstål ⇒ låglegerat kromstål ⇒ rostfritt stål.

Risken för erosionskorrosion kan alltså elimineras eller åtminstone reduceras genom införande av mer resistent material eller ytbeläggningar.

5.4.1.5.1 *Material*

I många fall räcker det med att gå från kolstål till ett låglegerat kromhaltigt stål. I en del kärnkraftverk har man t.ex. med gott resultat bytt kolstål mot låglegerat stål med en kromhalt på ca 1 eller 2 % i angräpningsavtappningsledningar. I andra kärnkraftverk har man i stället bytt till austenitiskt rostfritt stål. En kromhalt på 1 % är dock inte alltid tillräcklig för att undvika erosionskorrosionsangrepp. I en del konventionella kondensturbiner har man fått lokala angrepp i lågtrycksrotorer av låglegerat kromstål med en kromhalt på 1 – 2 %. Detta har i de flesta fall åtgärdats genom en nedsvärning av rotern. I en del fall har man dock tvingats tillgripa andra åtgärder eftersom nya angrepp upptäckts vid nästa revisionsavställning.

I en del konventionella anläggningar med allvarliga angrepp i turbinhus och/eller mellanväggar har man tvingats att bearbeta bort det skadade området och montera rostfria ringar för infästning av mellanväggar respektive tätkanter. Metoden är dock relativt

kostsam och tidskrävande. På sikt kan någon form av lämplig ytbeläggning vara ett alternativ, åtminstone i de fall då angreppen berör stora ytor.

I vissa värmekondensorer har man tubat om de yttersta tubraderna med mer beständiga material p.g.a. erosionskorrosionsangrepp. Austenitiska, ferritiska och ferritaustenitiska rostfria stål har satts in. Erfarenheterna är hittills goda. Framförallt de nya ferritaustenitiska rostfria stålen erbjuder intressanta möjligheter för värmekondensorer, förvärmare och mellanöverhettare.

5.4.1.5.2 Ytbeläggningar

Kravet på en ytbeläggning som skydd mot erosionskorrosionsangrepp är att den skall ha ett tillräckligt gott korrosionsskydd i aktuell miljö, samtidigt som vidhäftningen måste vara tillräcklig. En lämplig ytbeläggning måste naturligtvis också uppfylla andra krav som applicerbarhet, rimlig kostnad i förhållande till andra alternativ etc. Utvecklingen inom ytbelägningsområdet är mycket livlig och nya metoder och nya ytbeläggningar utvecklas hela tiden.

Olika varianter av flamsprutning av ytbeläggningar med god hårdighet mot erosionskorrosion har använts för att minska denna typ av angrepp i ångturbiner. Ett exempel är den s.k. "treskiktsmetoden" som bl.a. använts i nukleära men också i konventionella anläggningar. Metoden innebär i korthet att man med hjälp av konventionell flamsprutning på plats bygger upp ett ca 0,5 mm tjockt skikt bestående av ett bindsikt, ett mellansikt av ett 12 % Cr kromstål och ett toppskikt av ett austenitiskt rostfritt stål. På senare tid har man i en del fall slopat toppskiktet och i stället byggt upp skiktjockleken med det 12 % Cr kromstålet.

Konventionell flamsprutning är bara en av flera termiska sprutmetoder. Den stora fördelen med konventionell flamsprutning är att den är jämförelsevis väl lämpad för ytbeläggning på plats, under förutsättning att den aktuella komponenten är tillräckligt stor. Flera av de alternativa metoderna ger skikt med bättre vidhäftning och mindre inslag av porer och oxider än konventionell flamsprutning. Nackdelen är att de i de flesta fall är mest lämpade för applikation i en verkstad.

5.4.2 Åtgärder på kemisidan

Enligt Figur 101 ovan bör pH-värdet i vattenfasen närma sig pH 9,5 för att man skall kunna undvika erosionskorrosionsangrepp. För att höja pH-värdet i ånga och kondensat i konventionella anläggningar doseras någon form av flyktiga alkaliseringsmedel, vanligtvis ammoniak. På senare tid har också en del nya kommersiella organiska alkaliseringsmedel introducerats, främst inom processindustrin.

Problemet är att ammoniak, liksom många andra flyktiga alkaliseringsmedel, anrikas i ångfasen vid begynnande kondensation. Detta medför att det kan vara svårt att uppnå ett tillräckligt högt pH-värde i det första kondensatet, något som t.ex. förklarar varför angreppen på ångsidan av värmekondensorer och förvärmare är lokaliserade till de yttre tubraderna. Längre in i tubpaketet ökar pH-värdet i det utfällda kondensatet.

Genom tillsats av ca 10 ppm ammoniak i ångan skulle man kunna få ett pH-värde över pH 9,5 i det först utfällda kondensatet. Åtgärden är möjlig under förutsättning att det inte finns några kopparbaserade värmeväxlarytor i systemet. Förekomst av en kondensatrenings-anläggning med jonbytare medför dock komplikationer.

En del av de alternativa organiska alkaliseringsmedlen har en gynnsammare fördelningskoefficient än ammoniak och är dessutom starkare baser och dessa skulle t.ex. vid behov kunna användas i kombination med ammoniak. Exempel på sådana organiska aminer är etanolamin (ETA) och metoxypropylamin (MPA). Nackdelen är främst att termisk nedbrytning av organiska föreningar medför en ökning av halten sura korrosiva föroreningar, något som dessutom försvårar övervakningen av ångkemin. Mer information om detta finns t.ex. i referens [27]. Se även kapitel 10.3.6.1 om sur konduktivitet.

5.5 Stilleståndskorrosion

Den vanligaste orsaken till korrosion i ångturbiner och annan utrustning under stillestånd är samtidig närvaro av fukt och syre (luft). I de flesta ångturbiner är syrehalten i den eventuella vattenfasen under drift däremot mycket låg p.g.a. syrets höga flyktighet – vanligtvis <1 ppb. Stilleståndskorrosion kan i vissa fall orsaka väl så dramatiska och kostsamma skador som korrosion under drift. Beroende på material och miljö kan stilleståndskorrosion förekomma både som allmänskorrosion och som lokal korrosion.



Figur 105. *Stilleståndskorrosion i en ångturbin, före rengöring.*

Figure 105. *Lay-up corrosion in a steam turbine, before cleaning.*

27 Tavast,J., Fältprovning av etanolamin vid Idbäckens Kraftvärmeverk i Nyköping, Värmeforskrapport nr. 765, 2002

Figur 105 visar stilleståndskorrosion av typ allmätkorrosion (före rengöring). Huvuddelen av de bruna korrosionsprodukterna kommer från komponenter av kolstål eller låglegerat stål som turbinhus, rotor och turbinskivor. Dessa material drabbas av allmätkorrosion p.g.a. den fuktiga syrehaltiga miljön under stillestånd. Samtliga steg i turbinen hade ungefär samma utseende.

Figur 106 visar exempel på stilleståndskorrosion av typ gropfrätning i skovlar av 12 % kromstål (efter rengöring). Punktangreppen återfinns främst på ytor där det suttit kvar en salthaltig beläggning som fällts ut vid drift med förorenad ånga. Angreppen har initierats och tillväxt i den fuktiga syre- och salthaltiga miljön under stillestånd. Däremot har man inte fått några angrepp under drift eftersom miljön då består av torr överhettad ånga.



Figur 106. *Stilleståndskorrosion av typ gropfrätning i skovlar av 12 % Cr kromstål, efter rengöring.*

Figure 106. *Lay-up pitting corrosion on turbine blades made of 12 % Cr steel, after cleaning.*

Figur 107 visar stilleståndskorrosion av typ gropfrätning i ledskenor av 12 % kromstål efter rengöring. Den direkta orsaken till punktangreppen i det ”rostfria” materialet är kondensorläckage som medfört utfällning av salt i turbinen under drift och korrosionsangrepp under stillestånd.



Figur 107. *Stilleståndskorrosion av typ gropfrätning i ledskenorna av 12 % Cr-stål, efter rengöring*

Figure 107. *Lay-up pitting corrosion in guide vanes made of 12 % Cr steel, after cleaning.*

5.5.1 Inverkande faktorer

Uppkomst och omfattning av skador vid stilleståndskorrosion varierar med sådana faktorer som:

- stilleståndets längd
- typ av material i berörda komponenter
- förekomst av beläggningar av salter och/eller andra aggressiva föroreningar
- effekten av vidtagna skyddsåtgärder

Vid korrosion under drift är eventuella angrepp ofta lokaliserade till specifika områden av turbinen, t.ex. gropfrätning och korrosionsutmattning i övergångszonen mellan torr och fuktig ånga eller erosionskorrosionsangrepp i sista delen av turbinen där ångan är fuktig. Den första delen av turbinen där ångan vanligtvis är ”kraftigt” överhettad och därmed torr angrips normalt inte av korrosion under drift. Enda undantaget från detta är

natriumhydroxid som kan medföra spänningssprickning i stegen strax före Wilsonlinjen. Korrosionsangrepp i den första delen av turbinen där miljön under drift består av torr överhettad ånga är annars en klar indikation på stilleståndskorrosion (Figur 105). Om man också hittar lokala korrosionsangrepp av typ gropfrätning eller spaltkorrosion i komponenter av 12 % kromstål i detta område visar detta att åtminstone vid något tillfälle haft en alltför hög halt av salter i ångan under drift (Figur 106 och Figur 107).

5.5.2 *Möjliga motåtgärder för att undvika angrepp i ångturbiner*

Antalet möjliga åtgärder är relativt begränsat. En del är relativt teoretiska medan andra är omdebatterade, kanske mest för att det saknas praktiska erfarenheter från "nära" håll. Se kapitel 11 om avställning och konservering.

5.5.2.1 Torrluftsaggregat

Den vanligaste och antagligen enklaste metoden att reducera risken för stilleståndskorrosion är att installera/ansluta ett torrluftsaggregat, typ "Muntertork" under stillestånd. Denna bör anslutas så att den torra luften blåser från ånginloppet ned mot turbinkondensorn eller värmekondensorn, alternativt ångutloppet. Man bör sträva efter och övervaka att den utgående luften från aggregatet håller en relativ luftfuktighet som ligger under ca 40 %. Orsaken till detta är att natriumklorid, en av de vanligaste korrosiva föroreningarna i ångturbiner är hygroskopisk och börjar dra åt sig fukt vid högre fukthalt. Om det finns tillräckligt med restvärme i turbinen kan detta restvärme användas till att avdunsta eventuell kvarvarande fukt i turbinen innan torken kopplas in.

Att använda ett varmluftaggregat är en betydligt osäkrare metod eftersom fukthalten trots den förhöjda temperaturen kan bli för hög, framförallt under sommarhalvåret.

5.5.2.2 Kvävgasfyllning

I princip skulle man kunna undvika stilleståndskorrosion genom att släcka vakuum med kvävgas och därigenom undvika stilleståndskorrosion genom att stänga ut syret från turbinen på samma sätt som på vattensidan i en dompanna. Teoretiskt sett så borde detta vara en effektiv metod och förfarandet har föreslagits från flera håll men det är oklart om det tillämpas i praktiken.

5.5.2.3 Filmbildande aminer

Stilleståndskonservering med hjälp av filmbildande aminer, t.ex. ODA (Octadecylamin) har tillämpats i öststaterna och beskrivits i en del nyare publikationer, enligt dessa med gott resultat. Metoden är dock fortfarande inte vanlig i Västeuropa. Det skulle dock kunna vara värt att följa upp erfarenheterna av detta förfarande.

6 Utrustning för vattenrening

I detta kapitel beskrivs de tekniker och de typer av utrustningar som huvudsakligen används för att behandla spädvattnet till panna, d.v.s. rena det från oönskade komponenter.

Vissa av dessa tekniker används också i ett vatten/ångsystem, fjärrvärmesystem eller kylvattensystem för att upprätthålla vattnets och/eller ångans kvalitet.

Andra användningsområden kan vara rening av rökgaskondensat eller avloppsvatten etc.

De tekniker som behandlas i detta kapitel är:

- Mekanisk filtrering för att avskilja fasta partiklar
- Fällning och flockning för att avskilja kolloider och organisk material
- Avsaltning med membranteknik
- Avsaltning med jonbytesteknik



Figur 108. *Torv- och kolfilter*

Figure 108. *Filter made of peat and carbon*

Figur 108 visar ett filter beskrivet i försvarets *Handbok Överlevnad*. Det rekommenderas att man kokar vattnet efteråt om man har möjlighet då denna filtrering främst är tänkt för att filtrera bort större partiklar.

6.1 Mekaniska filter

Filtrering är den traditionella tekniken för att mekaniskt skilja ut partiklar från en vätska. Vätskan, i vårt fall vatten, rinner igenom filtermaterialets, det s.k. filtermediets, genomgående porer eller kanaler till filtrets utlopp. Storleken hos partiklarna är sådan att de inte kan komma in i dessa kanaler och därmed hindras de att tränga igenom filtret. Den mångfald av filterutrustningar som har tagits fram har varierande tekniska särdrag. Beroende på målsättningen för filtreringen, bl.a. om det är partiklarna eller vätskan som skall användas, och vilket resultat som eftersträvas, väljs olika filter i olika tillämpningar. I vattentekniken är målet oftast att avlägsna ett litet antal partiklar, som inte har något kommersiellt värde, från vätskan. Detta begränsar antalet filtertyper i bruk till ett mindre antal.

Storleken hos de partiklar som skall filtreras bort kan vara mycket olika - från några millimeter ned till några mikrometer eller t.o.m. bråkdelar av mikrometrar. När det gäller millimeterstora partiklar brukar man tala om silning och silar snarare än filtrering och filter. Man brukar tala om makromekaniska filter när det gäller större partiklar och mikromekaniska filter när partikelstorleken är under 1 mikrometer. Storleken hos partiklar kan vara ända ner till nanometerskalan, tusendelar av en mikrometer, fast det är ovanligt att ge namnet partikel till organiskt material som virus, bakterier, proteiner m.m. Ett grännsfall är de kolloidala partiklarna.

En partikel som är mindre än 10 μm brukar inte kunna ses med blotta ögat, och en partikel som är mindre än 0,1 μm brukar inte kunna ses med vanliga mikroskop. Partiklar med en storlek mellan 1 nm och 0,1 μm kallas kolloidala partiklar. Även om de inte syns ger de vattnet ett grumligt utseende om de är tillräckligt många.

Det som utmärker kolloidala suspensioner är att tyngdkraften inte längre kan användas för att få dem att sedimentera. Partiklarna bär elektriska laddningar på ytan och stöter ifrån varandra. Den elektrostatiske repulsionen mellan partiklarna är så stor att de inte kan komma tillräckligt nära varandra för att bilda en sammanhängande fällning. De stannar därför i suspension.

På grund av sin storlek passar de flesta kolloidala partiklar mekaniska filter. För att de skall kunna avskiljas måste andra filtertekniker användas, t.ex. omvänd osmos eller nanofiltrering. Alternativt måste partiklarna fås att bilda större aggregat genom till exempel flockning. Se kapitel 6.2.

Karakteristiska prestanda hos filter är avskiljningsgraden, d.v.s. den högsta partikelstorlek de släpper igenom, och tryckfallet som uppstår över filtret när ett givet flöde drivs genom filtret. När prestanda diskuteras brukar begreppen nominell avskiljningsgrad och absolut avskiljningsgrad användas. Den nominella avskiljningsgraden är ett värde som anges av filtertillverkaren: en viss andel (t.ex. 90 eller 98 viktsprocent) av partiklarna som är större än detta värde avskiljs av filtret. Det kan hända att större partiklar kan passera filtret. För att bestämma den absoluta avskiljningsgraden räknas partiklarna som passerat filtret, och det värde som anges för avskiljningsgraden är den partikelstorlek vid vilken partiklarna avskiljs till minst 99,9 %.

Man brukar även skilja mellan filter med ytverkan och filter med djupverkan. Ett filter med ytverkan är en barriär som inte medger att partiklarna tränger in i filtermediet. Partiklarna ansamlas på filtermediets yta och bildar så småningom en filterkaka. Denna filterkaka har också en filterverkan och hindrar ännu finare partiklar att tränga vidare, se avsnittet om precoatfilter.

Partiklarna tränger däremot in i ett filter med djupverkan, där partiklarna fångas i filtrets djup. Ett exempel på djupfilter är sandfiltren och ett exempel på ytfilter är ett vanligt filterpapper. Ett filter med ytverkan behöver inte vara mer än ett skal med tillräckligt stor area, medan ett filter med djupverkan skall ha en viss filtermedietjocklek eller höjd.

Gemensamt för alla partikelfilter som nämns i detta avsnitt är att partiklarna som hindras att följa med vattenflödet ansamlas i utrustningen. Vattnet som renas måste passera dels genom filtermediet, dels genom ansamlingen av partiklar på filterytan. Strömningsmotståndet ökar successivt, alltefter partiklar deponeras, och flödet genom utrustningen försämras. Det ökade motståndet innebär att pumptrycket måste ökas för att bibehålla samma flöde, eller att flödet genom filtret avtar.

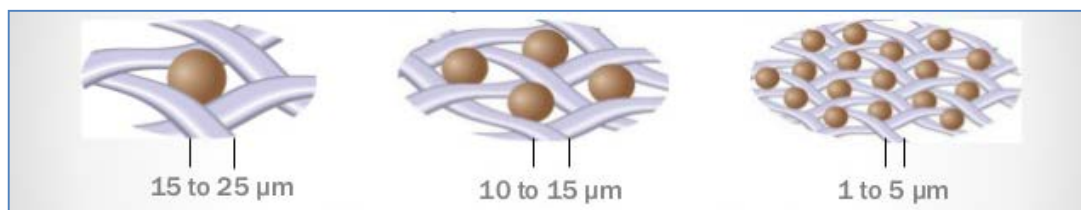
Då differenstrycket ökat så att fortsatt drift inte anses acceptabelt måste filtret tas ur drift, filtermediet rengörs eller byts ut, och filtret tas i drift igen. Kriterium för avbrott är ofta tryckfallet över filtret eller ett fast inställt tidsintervall.

6.1.1 Filter med ytverkan

Ett filter med ytverkan består av ett tunt filtermedium med ett mekaniskt stöd, t.ex. en filterduk som bärs upp av en silplåt, i en behållare. De partiklar som skall fångas är så pass stora i förhållande till filtermediets kanaler och porer att de inte förmår tränga igenom mediet. De kan vara mindre än dessa kanalers diameter men eventuellt ha en utsträckt form. Under ett inledningsskede kommer dessa mindre partiklar successivt att bilda bryggor över kanalerna i filtermediet och en filterkaka byggs upp. Filterkakan i sig själv kan anses vara ett filtermedium för ännu mindre partiklar.

När man konstruerar ett filter strävar man efter att åstadkomma en så stor total filterarea som möjligt med hänsyn till bl.a. utrustningens storlek, tryckfallet i utrustningen, tillgängligt utrymme, rengöring. Filtermediet skall ha så stor öppen area som möjligt.

Samma porstorlek kan åstadkommas med olika vävtekniker och med olika tjocklek hos fibrerna. Om filtermediet vävts ihop av tjocka fibrer är den öppna arean betydligt mindre än om det hade vävts ihop med tunna fibrer. Se Figur 109. Ett filter med ett enda plant, horisontellt ark är alltför utrymmeskrävande. Ett vanligt sätt är att man ökar den verksamma arean i förhållande till strömningsarean genom att vecka det plana filtret, som i luftfiltren till bilmotorer, eller dela upp filterytan på ett antal staplade ark. En annan lösning är att spänna filterduken kring en cylindrisk kärna till en stav, och att anpassa antalet stavar i filterbehållaren för behovet.



Figur 109. *Fibers karaktär avgör filtrets egenskaper*

Figure 109. *The fiber's character determines the filter characteristics*

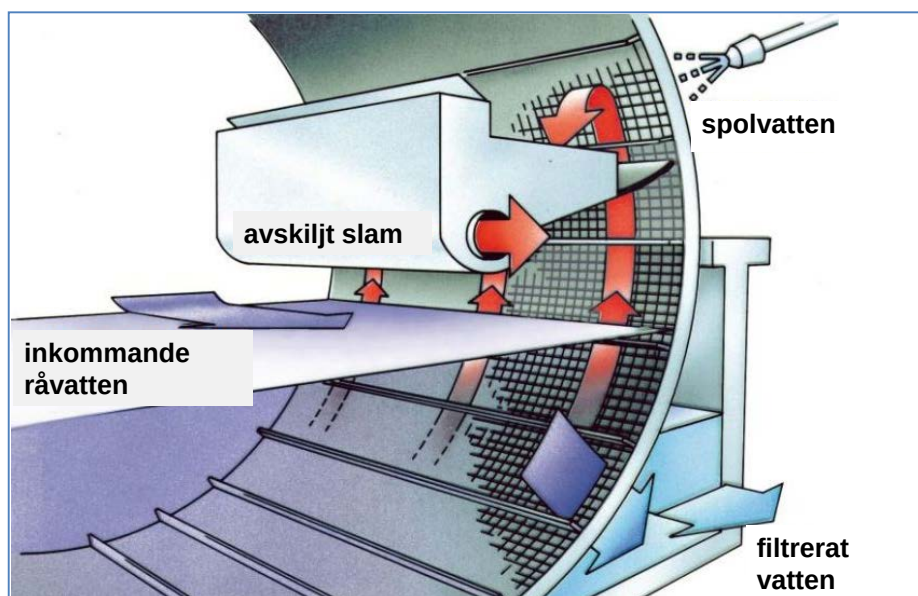
Vid rengöringen av filter är det inte nödvändigt att öppna filterhuset och avlägsna filterkakan manuellt. Filtren kan förses med mer eller mindre automatiska system för backspolning. En liten volym filtrerad vätska spolas på filtermediets baksida, varvid filterkakan lossnar från filtermediet. Denna partikelbemängda vätskevolym förs sedan ut ur utrustningen genom en sluss. Beroende på konstruktionen avbryts driften för reningen eller också utförs backspolningen under drift. En vanlig benämning är självrensande filter. Ibland kan det dock vara enklare att kassera det förbrukade filtret än att rengöra det, som i fallet veckade filter eller staplade ark.

Prestanda för filtret bestäms till stor del av filtermediet. Filtermediet eller filterduken kan utföras som papper, d.v.s. med fibrer som pressats ihop, med ganska oregelbundna porer och kanaler. De kan också vävas ihop av polymertrådar eller av metalltrådar vilket ger mer regelbundna kanaler. Storleken hos de minsta infångade partiklarna är 5-10 µm för vävda eller pressade dukar. För självrensande filter är minsta partikelstorlek 20-50 µm.

Tillverkningstekniken för filtermediet har betydelse för prestanda på ett mer indirekt sätt. Porstorleken kan variera i filtermediets djup och det kan bildas kanaler genom vilka en partikel kan tränga igenom filtret. I pressade filter kan partiklarna och vätsketrycket tränga isär fibrer och förstöra porerna, vilket leder till ett läckage av större partiklar än förväntat. Detta gäller även för vävda filter.

6.1.1.1 Trumfilter

Ett trumfilter består av en filterduk som är uppspänd på en roterande trumma. Filtren kan var uppbyggda på olika sätt men gemensamt är att vattnet passerar genom trumman (filterduken) varpå suspenderat material (slam) fastnar på duken. Filterduken spolas, kontinuerligt eller intermittent, ren med en mindre mängd filtrerat vatten. Spolvattnet samlas upp och led till avlopp. Figur 110 visar principen för ett trumfilter.



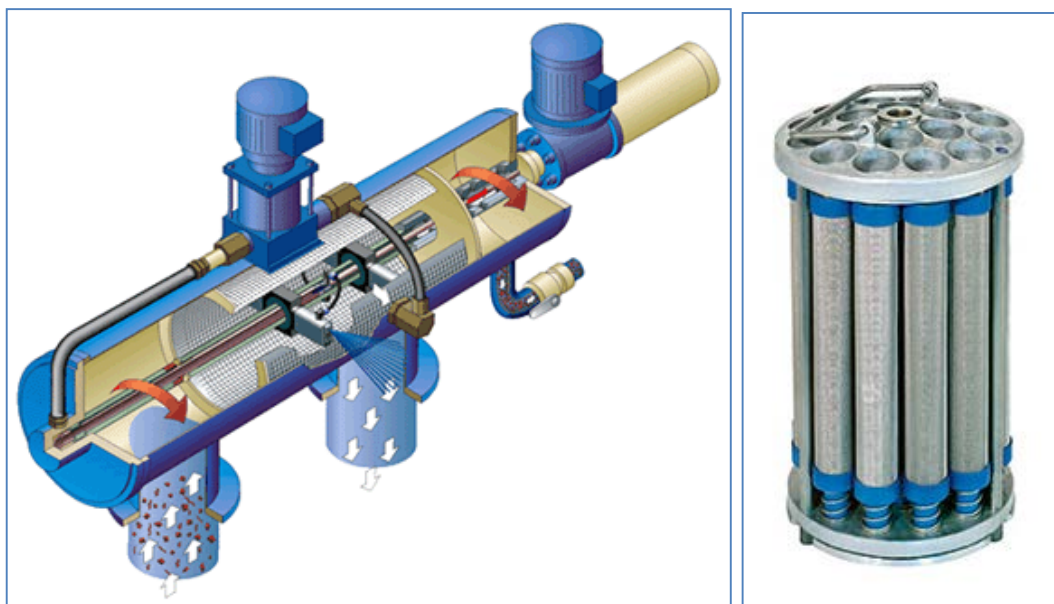
Figur 110. *Principiell uppbyggnad av ett trumfilter*

Figure 110. *Basic design of a drum filter*

Inom vårt teknikområde används trumfilter främst för filtrering av råvatten från vattendrag. Det är ofta det första renings- eller behandlingssteget. Det filtrerade vattnet kan sedan användas som kylvatten eller förse flockningsanläggningen eller avsaltningsanläggningen med vatten. Val av filtreringsgrad avgörs av aktuell råvattenkvalitet och varierar vanligtvis mellan 10-500 μm . I andra applikationer kan filtreringsgrader upp till 1000 μm vara aktuella.

6.1.1.2 Automatiska backspolningsfilter

En annan typ av silfilter (screen filter) är de med automatisk backspolning. Det förorenade vattnet strömmar genom en nätsil vars maskvidd valts med hänsyn till filtreringsbehovet. Val av filtreringsgrad avgörs av aktuell vattenkvalitet och varierar vanligtvis mellan 10-500 µm. Inuti nätsilen fångas föroreningarna upp och det renade vattnet passerar ut genom filtrets utlopp. När föroreningarna byggt upp en filterkaka på nätsilen kommer detta att orsaka ett tryckfall. Figur 111 visar två olika konstruktioner av silfilter.



Figur 111. Ett Filtomatfilter i genomskärning och en insats till ett Boll & Kirch filter

Figure 111. A Filtomat automatic self cleaning filter and a candle element from Boll & Kirch

När förinställt tryckfall uppnått startar den automatiska rengöringen. Rengöringen fungerar genom att ett eller flera munstycken sveper över nätsilen. Munstyckena är förbundna med en avloppsventil som öppnar och orsakar ett kraftigt undertryck genom munstyckena. Rengöringen tar några sekunder. Även under denna tid levereras filtrerat vatten.

6.1.1.3 Påsfilter

Ett påsfilter är ett exempel på ett ytfilter. Vattnet som ska filtreras strömmar inifrån påsen och utåt mot filterhusets vägg. Påsfiltrens användningsområde är normal 5-300 μm , även om det finns filterpåsar med en filtreringsgrad ner till 0,1 μm .



Figur 112. Påsfilterhus och filterpåsar

Figure 112. Bag filter house and filter bags

De vanligast förekommande materialen för utbytbara filterpatroner är polypropen, bomull eller glasfiber.

Filterpåsarna kan i vissa fall även fyllas med valfritt filtermedia, t.ex. aktivt kol, oljeabsorbent eller jonbytesmassa. Det medför att påsfiltret får djupfiltrets egenskaper.

6.1.2 Filter med djupverkan

Många partiklar som skall avlägsnas från ett vattenflöde är mindre än de kanaler som rimligen kan åstadkommas i en filterduk. De kan däremot upptas i djupet av ett filtermedium genom olika mekanismer:

- fastna mekaniskt i en kanal eller i en förträngning
- sedimentera i djupfiltret
- fastna på filtermediet yta genom adsorption

Det är däremot inte lika lätt att rengöra filtermediet från de infångade partiklarna som i ytfiltrets fall och återanvända det. I många fall byter man bara ut det förbrukade filtermediet mot ett nytt.

I ett djupbäddsfiler består filtermediet av partiklar eller korn som inte är fast förbundna med varandra. Bädden antar formen av den behållare i vilken den placeras. Partiklarna eller kornen får ett mekaniskt stöd från omgivande korn. Bädden vilar på en silyta som hjälper till att fördela vattnet.

6.1.3 Patronfilter

Patronfilter kan beroende på patronerna konstruktion vara antingen ett ytfiler eller ett djupfiler. Filterpatroner uppbyggda av en veckad filterduk är att betrakta som ytfiler medan garnlindade eller gjutna filter räknas som djupfiler. Figur 113 visar ett urval av alla de olika patronfilter som finns på marknaden.



Figur 113. *Olika typer av patronfilter*

Figure 113. *Different types of cartridge filters*

Patronfilter innehåller patroner som består av en stödjande kärna på vilken det filtrerande mediet är pålagt. Vattenflödets riktning är utifrån och inåt genom kärnan hos filterpatronen. När patronen förbrukats byts den ut mot en ny. Den förbrukade patronen kasseras. Storleken hos den minsta partikel som kan fångas in i ett patronfilter är ca 0,1 μm , och de vanligaste patronfiltren arbetar i intervallet 0,1-100 μm .

Filterpatroner kan ha olika utseenden. En vanlig typ består av en veckad filterduk i en ram som ger det ett mekaniskt stöd. En annan vanlig typ består av tvinnat garn som lindats kring en kärna. En tredje typ består av hoppresade fibrer som svetsats eller sintrats ihop genom någon process. Patronen kan ha samma porositet igenom hela filtret eller ha en graderad porositet. Med det menas att porositeten är störst i patronens yttre delar och minskar in mot kärnan. För en given avskiljningsgrad kommer i ett ograderat filter både stora och små partiklar att ha fångats i skiktet närmast inloppet. I ett graderat filter fördelas partiklarna jämnare över hela djupet, de grövre närmast inloppet och de finare

närmast utloppet. På så sätt utnyttjas filtrets hela djup, vilket ger det en större kapacitet och förlänger drifttiden.

De vanligast förekommande materialen för utbytbara filterpatroner är polypropen, bomull eller glasfiber. Filterpatronen av rostfritt stål och keramiska material förekommer också. Dessa filterpatroner byts normalt inte ut utan backspolas eller tas ut ur filterhuset och rengörs för att sedan åter sättas in.

6.1.3.1 Sandfilter och kolfilter

En typ av bäddfilter som använts i många år för att behandla råvatten är sandfiltren. Vatten passerar sakta genom en stor bädd av sand eller annat material varvid partikelformiga föroreningar avskiljs i sandbädden genom någon av de mekanismer som nämnts ovan (d.v.s. blockeras i en kanal, sedimenterar i bädden eller fångas in av bäddmaterialet). Partiklarna som fångas i ett sandfilter är i intervallet 0,2-60 μm . Vanligen används dessa djupfilter för att avskilja partiklar ned till 10 μm .

Sandfiltren kan vara ganska omfångsrika och de olika konstruktionerna syftar till att få ner storleken och sandmängden. Dessa utrustningar kan utföras som slutna kärl, eller som behållare öppna mot atmosfären.

Slutna filter eller trycksatta filter är utformade som cylindriska behållare av stålplåt och kan vara invändigt gummerade. Filtret innehåller en bädd av det filtrerande mediet som är upp till cirka 1 m hög. Maximal filtreringshastighet är cirka 10 m/h, vilket innebär maximalt 10 m³ vatten per kvadratmeter filterarea och timme.

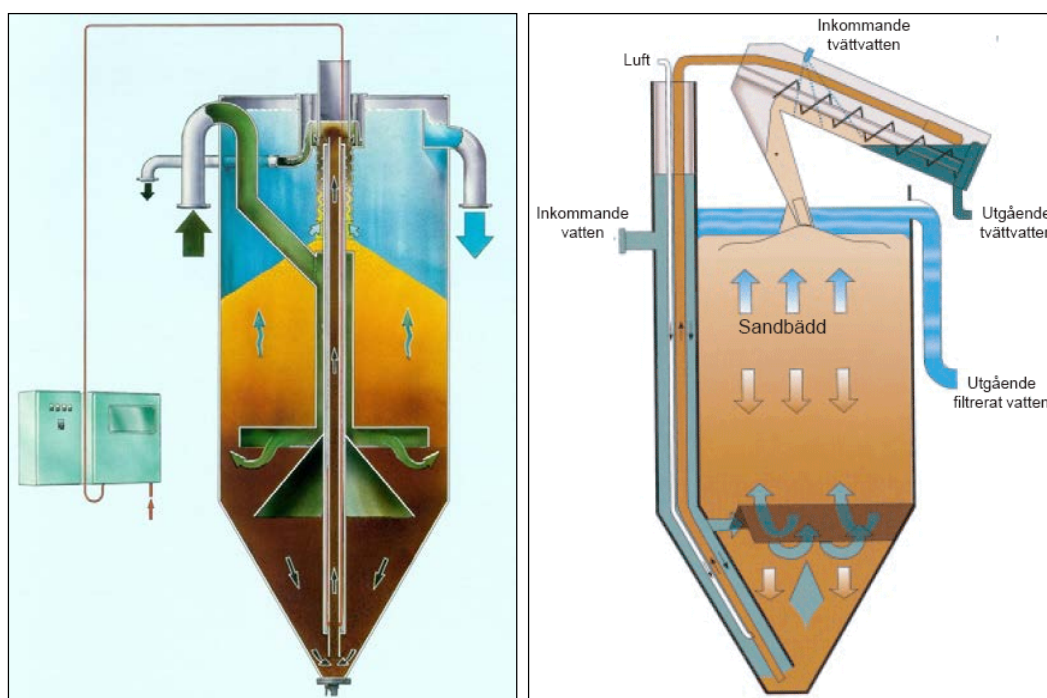
När partiklar tas upp i filtersanden stiger motståndet i sandbädden, d.v.s. tryckfallet över filterbädden. När tryckfallet nått ett visst värde, cirka 0,5 bar, måste de upptagna partiklarna avlägsnas genom returspolning med vatten med hög hastighet, cirka 40 m/h. Vid returspolningen är det viktigt att vattnet fördelas väl i sandbädden. I annat fall uppstår lätt kanalbildning till följd av dålig rensolning. Tryckluft kan användas för att luckra upp sandbädden. Det är mest effektivt att växla mellan luft och vatten om filtret är konstruerat för detta. Används luft och vatten samtidigt måste flödena begränsas så att sanden inte spolas ur filtret.

Spolvattnets hastighet måste vara så stor att filterbädden expanderar och föroreningarna följer med spolvattnet till avlopp. Vattentemperaturen spelar här en viss roll, eftersom sjunkhastigheten för partiklar i vatten ökar med minskad viskositet och eftersom vattnets viskositet snabbt avtar med ökad temperatur. Spolningstiden är beroende av föroreningsgraden. Spolning bör utföras tills dess att det utgående spolvattnet inte har någon synbar färg.

En äldre typ av slutet sandfilter är det s.k. *strålspolningsfiltret* eller *ejektorfiltret*. Detta skiljer sig från ett konventionellt filter främst genom spolningsmetodiken. Spolvattnet leds in i filtret, passerar en inbyggd ejektor och därefter ett centralt placerat rör. I ejektorn drar vattnet med sig sand genom röret. Centralröret mynnar en bit upp i filtret och där minskar hastigheten på vatten-sand-blandningen, varefter sandkornen sjunker. Under

transporten blir sanden renspolad. All sand kommer så småningom att passera runt i filtret genom ejektorn och centralröret.

I dag ersätts ofta de trycksatta sandfiltren med kontinuerligt arbetande sandfilter. Det finns två fabrikat av kontinuerligt arbetande sandfilter, Dynasandfilter och Carexfilter. Även om de har likartande funktion finns också flera skillnader. Figur 114 visar båda filtertyperna i genomskärning.



Källor: www.nordicwater.se respektive www.toveko.se

Figur 114. *Principiell uppbyggnad av ett Dynasandfilter (vänster) och ett Carexfilter (höger)*

Figure 114. *Cross-section diagram of a Dynasand filter (left) and a Carex filter (right)*

Gemensamt för båda filtertyperna är att vatten leds in i botten på filtret varpå fasta föroreningar fångas upp i sanden. Den smutsiga sanden pumpas upp från botten av filtret och tvättas ren i sandtvätten. Sanden renas genom att sandkornen gnuggas mot varandra och föroreningarna kan avskiljas med tvättvattnet. Efter rengöring i sandtvätten återförs den rena sanden till toppen av filtret och sprids ut jämt över hela sandbädden. På så sätt undviks stråkbildningar och kortslutningar i sandbädden.

I Dynasandfiltret sugas den smutsiga sanden upp, med hjälp tryckluft, av en mammutpump i centrum av filter. I ett Carexfilter rör sig sandtvätten horisontellt längs hela filtret fram och tillbaks och suger upp sanden från botten av filtret. Största skillnaden mellan ett Carexfilter och ett Dynasandfiltret är att i Carexfilter sker sandtvätten utanför filtret. Det innebär en lägre bygghöjd och i kombination med ett rektangulärt utförande ger det ett kompaktare filter som kan vara lättare att placera i trånga utrymmen. Dynasandfilter med sin sandtvätt i filtret har å andra sidan inga rörliga detaljer med alla fördelar det innebär.

Öppna sandfilter används oftast i kombination med flockningsutrustning. Sandfiltren skall ta hand om restflock och eventuellt andra komponenter i partikelform som inte avlägsnats i flockningen. Kontinuerliga sandfilter är en typ av öppna filter där både upptagning av partiklar och renspolning av filterbädden sker kontinuerligt. Såväl enkla öppna filter, som kontinuerliga sandfilter, kan användas för mekanisk filtrering utan flockningsförfarandet.

Ofta varierar storleken hos de partiklar som skall avskiljas inom ett brett intervall. Såväl millimeterstora som mikrometerstora eller nanometerstora partiklar förekommer samtidigt. Då halten partiklar i vattnet hög kan det vara ineffektivt att avskilja alla partiklar i ett enda filter. Ett grovt filter släpper igenom alla de finare partiklarna medan ett fint filter kommer att avskilja nästan alla partiklar. Det senare behöver dock rengöras med täta intervall, vilket kan bli oekonomiskt. Ett sätt är då att placera filtermedia med olika filtreringsgrad i samma filterbehållare.

En del av sandbädden i ett filter kan bytas ut mot andra filtermedia, och benämns då flermediafilter eller multimedialfilter. De filtrerande materialen väljs med avseende på densitet och kornstorlek så att filtermaterialen ligger skiktade med det grövsta materialet högst upp och det finaste längst ner.

Med rätt kombination av material lägger sig filtermaterialen i skikt även efter returspolning. Vanliga kombinationer är:

- Tvåmediafilter med antracit och vanlig sand
- Tremediafilter med antracit, vanlig sand och granatsand

Antracit har den lägsta densiteten och största kornstorleken medan granatsanden har den högsta densiteten och minsta kornstorleken. Det kan förekomma fler medier vilka då är sand av olika kornstorlek och densitet. Fördelen med flermedia är att upptagningen av föroreningar fördelas mellan de olika skikten. Filtreringshastigheten kan i regel ökas markant jämfört med konventionella sandfilter. Resultatet blir större flödeskapacitet med bibehållen kvalitet på filtratet.

Beroende på kvalitetskrav och sammansättning på det vatten som ska filtreras kan även andra medier än sand användas. En filterbädd bestående enbart av antracit kan vara ett alternativ för ytvatten och filter med aktivt kol används ofta för rening av avloppsvatten eller rökgaskondensat. Råvattenkvalitet och krav på filtrerat vatten avgör vilket filteralternativ som skall användas.

Aktivt kol är en naturprodukt framställt av kol, trä eller kokosnötter. Efter en aktiveringsprocess med ånga utvecklas en omfattande porstruktur. På detta sätt får aktivt kol en mycket yta, uppemot 2000 m²/g, och därmed stor filtreringskapacitet. Vid filtrering i kolfilter fastnar smutsen främst i de ojämnheter som finns på kolets yta men även mellan kornen.

Det finns även filtermaterial som kan avskilja järn, mangan eller arsenik etc.

6.1.3.2 Precoatfilter

Partiklar med en storlek som är mindre än 1 μm är svåra att avskilja av två skäl. Det ena är att filter med sådan avskiljningsgrad, d.v.s. med så små porer, är svåra att tillverka. Det andra är att strömningssmotståndet genom en filterkaka uppbyggd av så små partiklar är mycket högt och att filterkakan dessutom ofta är svår att avlägsna från filtret. En lösning är att belägga filtret med ett s.k. filterhjälpmedel som ger en porös filterkaka som förbättrar filtreringen och underlättar avlägsnandet av kakan från filtret.

Filterhjälpmedlet kan också användas som s.k. ”body aid”, i vilket fall de sprutas in i det partikelbemängda flödet som skall filtreras. Det ger en filterkaka som erhålls får en större genomsläpplighet för vatten och som lossnar lättare från underlaget.

Fördelen med filterhjälpmedel är att de gör det möjligt att filtrera bort partiklar som annars är svåra att avskilja. En nackdel är att volymen avfall från filtreringen blir större än om inget hjälpmedel används.

Ett precoatfilter utgörs av ett tryckkärl vari fasta filterelement är monterade. Filterelementen beläggs med en precoat genom att pumpa runt en uppslamning av filtermediet i vatten tills ett tillräckligt tjockt skikt har byggts upp. Därefter släpps vattenflödet som skall filtreras in i filtret. Föroreningarna fastnar i det pålagda filterskiktet. När strömningssmotståndet blivit för stort avbryts processen. Precoaten och partiklarna avlägsnas från filtret, t.ex. genom en stötvis backspolning eller returspolning med luft varpå en ny precoat läggs på filtret innan det tas i drift igen. Precoattekniken tillåter filtrering av partiklar från 0,1 μm och uppåt.

Filterelementen kan bestå av vertikala eller horisontella filterskivor med en yttre finmaskig filterduk, vanligen av syrafast stål. Den vanligaste typen utgörs dock av vertikala cylindriska filterstavar av syrafast stål, keramiskt material eller filterpatroner av textilmaterial.

Precoatfilter används främst för rening av ångkondensat inom cellolosa- och kraftindustrin. Se även kapitel 7.4.4 om kondensatrening.

6.1.4 Elektromagnetiska filter

Elektromagnetiska filter, vanligen förkortat till EMF, kan användas för att avskilja magnetiska järnoxider såsom magnetit, Fe_3O_4 , och hematit, $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. De används främst för filtrering av turbinkondensat och fjärrvärmevatten.

Ett EMF består t.ex. av en cylindrisk behållare fylld till ca 1 m höjd med mjukjärnskulor eller ett gitter. Ovanför kulorna eller gittret finns ett expansionsutrymme på ca 1 m. Utanpå behållaren finns en elektromagnetisk spole som matas med likström, varvid kulorna eller gittret blir magnetiska. Vattnet leds nedifrån och upp och magnetiska järnoxider avskiljs. Även andra föroreningar kan avskiljas om de är bundna till de magnetiska oxiderna. Se Figur 115.



Figur 115. *Elektromagnetiskt filter för kondensatrening*

Figure 115. *Electromagnetic filter for condensate polishing*

Före returspolning avmagnetiseras kulorna. Därefter returspolas med kondensat med ungefär samma flödes hastighet som vid normal drift. Filtreringshastigheten i ett EMF-filter kan vara över 500 m/h vilket är mycket högre än i andra mekaniska filter, där filtreringshastigheten är 5 - 50 m/h.

EMF är därmed synnerligen utrymmesbesparande. Behovet av spolvatten är också lågt. Spoltiden är endast någon minut. Tidsintervallet mellan returspolningarna är oftast lika och väljs med hänsyn till mängden föroreningar i vattnet.

6.2 Flockning och fällning

För att omvandla råvatten till processvatten av rätt kvalitet krävs mer eller mindre omfattande rening, som kan innefatta användning av kemisk fällning och flockning. Kemikalier tillsätts för att justera pH, neutralisera laddningar, underlätta flockbildning och separering av föroreningar. Samma metoder kan också användas vid behandling av processvatten före utsläpp.

Med fällning menas här en kemisk process där en fast förening fälls ut genom reaktion mellan lösta ämnen, det kan även innebära gas som löses i vatten och reagerar med salter. Genom fällning kan således lösta ämnen omvandlas till fasta så att de kan avlägsnas med mekaniska metoder, t ex sedimentering, filtrering, flotation.

Flockning är en mekanisk process där suspenderat material koaguleras genom laddningsneutralisation och tvingas agglomerera till större aggregat, som därefter lättare kan separeras från vätskan, t ex genom sedimentering, flotation. Figur 116 visar hur två partiklar med samma ytladdning kan fås att agglomerera genom tillsats av ett aluminiumsalt.



Källa: Svante Åberg, <http://school.chem.umu.se>

Figur 116. Laddningsneutralisation genom tillsats av ett metallsalt (Al^{3+})

Figure 116. Charge neutralization by addition of a metal salt (Al^{3+})

6.2.1 Flockningsprocessen

Flockning är en behandlingsprocess, vars syfte är att:

- Nedbringa råvattnets halt av organisk substans, huvudsakligen humusämnen i löst eller i kolloidal form
- Avlägsna ämnen som orsakar vattnets grumlighet, både kolloidala och synliga partiklar

Flockning innebär att små partiklar, som inte enkelt kan avlägsnas mekaniskt i sin ursprungsform, fås att öka i storlek, agglomerera. Efter flockningen avlägsnas de bildade aggregaten (flockarna) genom sedimentering, där flockarna faller ner genom vattnet till botten av en tank, eller genom flotation, där flockarna stiger upp till ytan genom att adsorberas på gasbubblor.

Humusämnen och kolloidala partiklar är mestadels negativt laddade. En utflockning av dessa kan ske endast om laddningarna neutraliseras, så att partiklarna inte repellerar varandra. En neutralisering kan ske genom att positivt laddade, helst flervärda, joner eller positivt laddade kolloidala partiklar tillsätts vattnet. Laddningsfördelningen på en partikelyta påverkas av pH-värdet, varför god pH-kontroll är nödvändig för en effektiv flockning.

Efter neutraliseringen är det andra steget en agglomerering (flockuppbyggnad) av de positiva och de negativa partiklarna till stora, synbara flockar. Detta sker genom kemisk bindning och framförallt genom fysikalisk adsorption. Vissa jonbytesreaktioner antas också äga rum vid utflockning av lerpartiklar och humusämnen. Det kan vara fördelaktigt

att tillsätta hjälpkemikalier till flockningsprocessen för att få flockar att växa eller ge dem bättre hållfasthet.

Flockningen genomförs vanligen i en flockningsanläggning som består av ett antal seriekopplade kammare. Varje kammare är försedd med en mekanisk omrörare. Omrörning behövs för att partiklar och flockar skall slås ihop till större flockar, men en alltför stark omrörning innebär att de bildade flockarna slås sönder. För att flockarna skall hinna bildas och mogna måste vattnet som behandlas ges en viss uppehållstid.

6.2.2 Kemikaliedosering

6.2.2.1 Fällning

Principen för kemisk fällning är att tillsätta ett ämne som reagerar med ett oönskat ämne i vattnet för att bilda ett nytt ämne med sämre löslighet, ett löst salt övergår då till fast ämne och kan avskiljas mekaniskt. Justering av pH-värdet kan behövas för att reaktion skall ske. Fällning kan också ske genom temperaturförändring. Ett ämne med negativ löslighetskoefficient i vatten kommer att fällas ut när temperaturen höjs.

Förr använde man släckt kalk och natriumhydroxid för att reducera hårdhet och magnesiumhaltig dolomitkalk för att reducera kisel i råvatten. Natriumkarbonat kunde doseras för att reducera sulfathårdheten och uppnå karbonatfällning. Vid fällning i varmt vatten ökade kapaciteten och effekten. I framförallt USA användes fosfatfällning av hårdhet med varm process. Metoderna har ersatts med effektivare tekniker för avhårdning numera.

För att reducera fosfor i avloppsvatten kan kalciumoxid användas för att bilda kalciumhydroxylapatit, som därefter går att avskilja mekaniskt. Fosforfällning görs också med aluminiumsalter.

Många metalljoner kan fällas ut genom att höja pH-värdet varpå en metallhydroxid bildas. Utfällningen av tvåvärda tungmetaller kan förbättras genom tillsats av en sulfidförening, t.ex. TMT (Trimercapto-s-triazine trinatriumsalt). Se kapitel 14 om tungmetallfällning i rökgaskondensat.

I samband med tillverkning av dricks- och processvatten används fällningskemikalier för att neutralisera elektriska laddningar på ytan av kolloidala partiklar, så att dessa inte längre kan hållas i suspension. Partiklarna kan vara 1-100 nm stora och är ofta för små för att avskilja genom gravitation (sedimentering) eller traditionella filter utan måste därför först fås att bilda större sammanhängande aggregat, flockar.

Koldioxid, kalk och natronlut används ofta för pH-justering. Ibland kan väteperoxid eller luftning erfordras för att kunna avskilja löst järn och mangan. I kommunala ytvattenverk används ofta klor i form av natriumhypoklorit eller klordioxid som förbehandling vid höga halter av färg, humus, lukt och smak.

Korrekt pH-värde och rätt dosering av fällningsmedel är viktiga parametrar, annars kan partiklarna bilda suspension på nytt. För både pH-värdet och doseringsmängden gäller att de får varken vara för lågt eller högt.

6.2.2.2 Flockning

Användningen av fällningskemikalier medför ofta en samtidig flockbildning, gränsen mellan fällning och flockning är därför inte helt tydlig. Vanliga fällningsmedel som aluminiumsulfat och järnklorid ger vid rätt dosering neutrala partiklar som tenderar att dra sig samman till större sammanhängande koagel som låter sig avskiljas genom sedimentering eller flotation. Effekten är speciellt påtaglig och förstärkt vid användning av polyvalenta metallsalter som polyaluminiumklorid (PAC). Varmt vatten har lägre viskositet än kallt, flockbildning och separering går därför snabbare vid förhöjd vattentemperatur.

Aluminiumsulfat, järnsulfat och järnklorid kräver noggrann inställning av pH-värdet, som för de flesta vatten ligger nära 6,0 för optimalt resultat. Salterna är sura i sig själva, men i starkt buffrade vatten eller vid hög humushalt måste pH-värdet justeras ned eller upp. Beroende på vattnets fortsatta användning kan man välja mineralsyror, natronlut eller natriumaluminat (NaAlO_2) för pH-justeringen. Natriumaluminat är ett basiskt salt som vid pH-justering även tillför aluminium till flockningsprocessen varpå mängden aluminiumsulfat eller PAC kan minskas.

En måttlig överdosering av fällningskemikalien ger något snabbare reaktion, men restmetallhalt och flockflykt kan öka dramatiskt. Rätt dosering kan sällan beräknas teoretiskt, utan måste först provas i laboratorieskala och därefter optimeras under aktuella driftbetingelser.

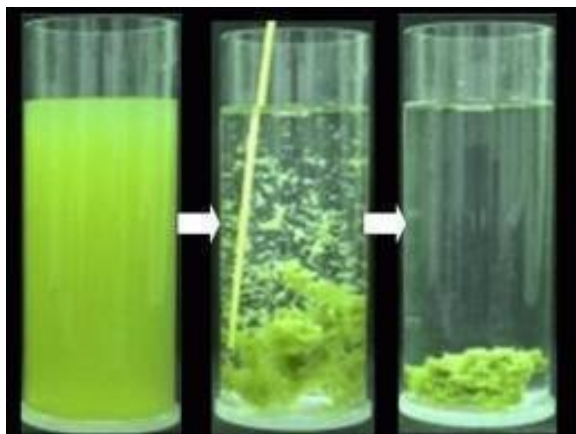
PAC är egentligen en polymer av aluminiumhydroxidklorid. Den har större toleransområde för pH-värdet jämfört med de enklare aluminiumsalterna och ger lägre förbrukning av aluminium. Ju högre valenstal det positivt laddade aluminiumhydroxidkomplexet uppnår, desto effektivare fungerar flockningen. Sammantaget ger polyaluminiumklorid lägre salthalt, stabilare rening och mindre slam.

Oavsett vilken fällningskemikalie som används kan hjälpkoagulanter behövas för att förbättra flockningen. Det är naturliga eller syntetiska polyelektrolyter, som kan vara oorganiska eller organiska och ha olika laddning.

Funktioner man eftersträvar kan vara:

- Snabbare koagulering för att få ökad kapacitet
- Stabilare flockar som ger mindre flockflykt
- Mindre förbrukning av metallsalt
- Lättare och fluffigare flockar för snabbare flotation

Det är mycket viktigt att hjälpkoagulanterna flockas ut fullständigt, eftersom de annars kan störa efterföljande reningsåtgärder och utrustning. Figur 117 visar hur resultatet kan förbättras genom tillsats av en hjälpkoagulant.



Figur 117. Resultatförbättring genom tillsats av en hjälpkoagulant

Figure 117. Improved flocculation result by addition of a coagulant

Vattenglas är en oorganisk hjälpkoagulant. Vattenglas är en vattenlösning av kiseldioxid och natrium- eller kaliumhydroxid. Lösningen aktiveras med t.ex. saltsyra för att frisätta kiseltsyra. Det katjonaktiva fällningsmedlet behöver tid till laddningsneutralisation innan den anjonaktiva aktiverade kiseltsyran tillsätts.

Andra oorganiska hjälpkoagulanter, som även har många andra användningsområden än vattenrening, är blekjord, som huvudsakligen är aluminiumsilikat med inslag av järn, magnesium och kalk. Den binder framförallt organiska kolloider. Zeoliter består av polyaluminiumsilikat med positiva metalljoner, t.ex. natrium, som är lätt utbytbara mot andra katjoner i vattnet.

Organiska hjälpkoagulanter består ofta av polyakrylamid i fast form eller som en oljeemulsion. De kan också baseras på polyaminer, amider och sampolymerisat. Molekylvikten kan variera från några tusen till flera hundra tusen. Till polymererna fogas tätare eller glesare placerade laddningar för att ge starkare eller svagare kat- eller anjoniska egenskaper, det går också att balansera laddningarna så att resultatet blir nonjoniskt. Doseringsmängderna ligger ofta under 1ppm.

De högmolekylära polymererna är mycket viskösa, även i vattenlösningar under 1 % och kräver speciell utrustning för att lösas och mogna före dosering. Emulsionerna är lättare att lösa före dosering, men de ökar samtidigt den organiska belastningen.

De katjonaktiva polymererna kan i enstaka fall helt ersätta fällningskemikalier och slammet blir då lätt att bränna, men deras främsta förmåga är att medverka till snabbare uppbyggnad av stabilare flockar och minska förbrukningen av fällningskemikalier.

De anjonaktiva polymererna kan i en del fall användas till att samla in katjonaktiva föroreningar, men de används främst för snabb flocktillväxt och för att bättre hålla fast de först bildade koagelen så att de håller för den kommande separeringen.

6.2.3 Avskiljning av flockarna

De flockar som byggs upp i omröringskamrarna måste avskiljas ur vattnet. Detta kan göras genom sedimentering, d.v.s. låta flockarna sjunka till botten, eller flotation där flockarna i stället lyfts till ytan för att avskiljas. Båda metoderna kräver att vattnet sandfiltreras efter den huvudsakliga flockavskiljningen för att säkerställa att inga flockar följer med det renade vattnet.

Utrymmesbehovet är betydligt mindre för en flotationsanläggning än för en sedimenteringsanläggning. En annan fördel med flotation är, att flockavskiljningen blir mycket god, över 95 %, vilket minskar belastningen på efterföljande sandfilter.

Uppehållstiden i en konventionell flockningsanläggning följd av sedimentering kan vara lång: upp till 60 minuter i flockningssteget och 2-3 timmar i sedimenteringsbassängen. Används en lamellseparator är flockningstiden kortare, ca 40 min, och uppehållstiden i sedimenteringen endast ca 12 minuter. I en flotationsbassäng är uppehållstiden ca 20 minuter.

Det är fördelaktigt med flotation när vattnet som skall behandlas är jonfattigt och har låg halt av suspenderat material (humus och kolloidala partiklar). Om halten suspenderat material är hög kan det vara fördelaktigt att använda ett sedimenteringsförfarande.

På senare år har det blivit allt vanligare med flockning i kontinuerligt arbetande sandfilter. Det innebär att både flockuppbyggnad och flockavskiljning sker i samma filter. De små mikroflockarna närmast inloppet hjälper till att snabbare bygga upp flockarna vilket gynnar processen.

Fördelarna med flockning i kontinuerligt arbetande sandfilter är:

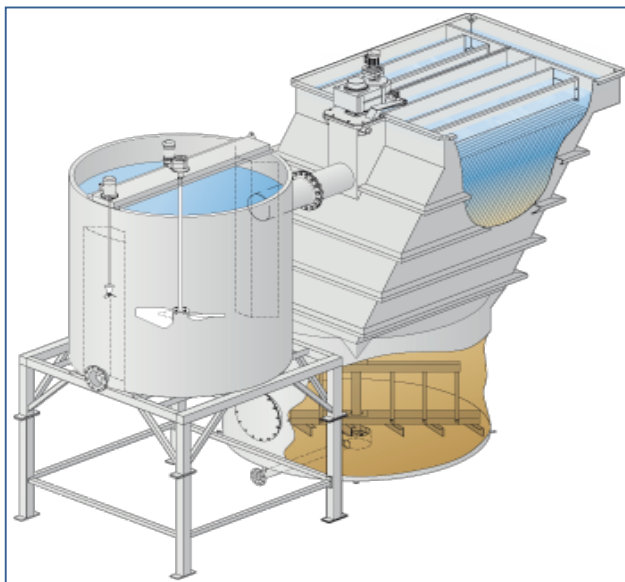
- Mindre platsbehov
- Snabbare responstid, resultatet av en förändring syns efter 15-20 minuter
- Lägre kemikalieförbrukning

6.2.3.1 Sedimentering

I sedimentationsprocessen utnyttjas densitetsskillnaden mellan vattnet och de bildade flockarna för att avskilja flockarna. I en bassäng tillåts de relativt tyngre flockarna falla ner till botten.

Äldre anläggningar är ofta byggda enligt sedimentationsprincipen. Från koaguleringsdelen leds vattnet till sedimenteringsbassängen. Vattnet strömmar där framåt med låg hastighet, medan flockarna genom tyngdkraften sjunker till bassängens botten. Sjunkhastigheten för flockarna är en funktion av partikelstorleken, skillnaden i densitet mellan partiklar och vatten samt vattnets viskositet. Ju lägre viskositeten är, desto större blir sjunkhastigheten. Om 80 % av flockmängden skall kunna frångiljas, erfordras vanligen en uppehållstid på ca 2 timmar. Bassängens dimensioner avgörs av uppehållstiden och vattenflödet. Sedimenteringsbassängerna kräver vanligen stort utrymme. Slammet med de sedimenterade flockarna tappas av intermitterant från bassängbotten med antingen pump, skrapor eller ventiler.

Den nödvändiga uppehållstiden i en sedimenteringsbassäng beror på bassängens djup. De finaste flockarna måste ges tid att falla till botten. Upphållstiden kan göras kortare i en grund bassäng, vilket dock kräver större ytor för ett oförändrat vattenflöde. Genom att placera mellanbottnar i sedimenteringsbassängen kan byggytan minskas samtidigt som fördelen med kortare uppehållstid uppnås.



Figur 118. *Flockningskammare följt av en lamellseparator. (Bild: Nordic Water)*

Figure 118. *Flocculation chamber followed by a lamella separator*

Lamellsedimentering är en speciell typ av anläggning där bottnar (plåtar) lagts med cirka 5 cm mellanrum. Plåtarna lutar för att slammet av sig själv skall kunna glida ner i en underliggande slamficka, se Figur 118. Upphållstiden är betydligt kortare i en lamellseparator än i en konventionell sedimenteringsbassäng.

6.2.3.2 Flotation

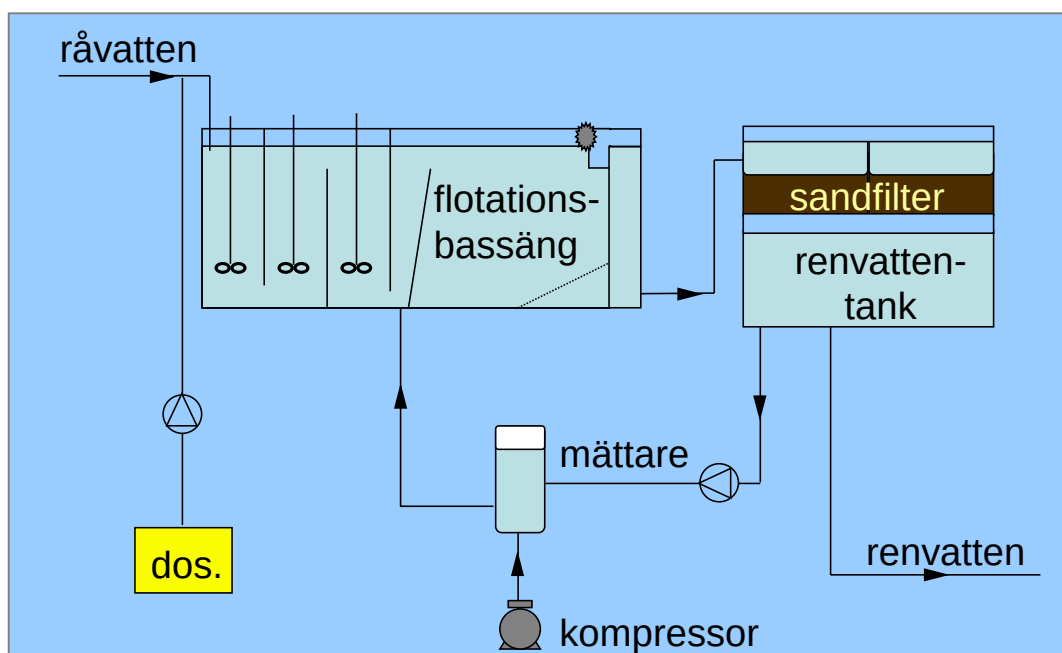
Vid en flotation tillsätts luftbubblor till vattnet som fäster på flockarna. I flotationsprocessen utnyttjas luftens låga densitet för att lyfta flockarna till ytan där de bildar slam. Slammet kan sedan skrapas av från vattenytan.

Vattnet med bildad flock från koaguleringsdelen leds till en flotationsbassäng. I den främre delen av bassängen tillsätts dispersionsvatten. Dispersionsvatten är vatten som är övermättat med luft genom att spruta in vatten i en tank (mättaren) som tryckhålls med tryckluft. Trycket i mättaren är 6-7 bar vilket gör att det går att lösa mer gaser än vad som är möjligt vid atmosfärstryck.

Dispersionsvattnet leds in i flotationsbassängen genom dysor placerade nära flotationsbassängens botten. Vattnet från koaguleringsbassängen passerar förbi dysorna och leds upp mot bassängens topp. I dysornas utlopp frigörs trycket på dispersionsvattnets

varpå luft frigörs och bildar mycket små luftblåsor, som i fäster på flockarna och lyfter dessa till vattenytan.

På flotationsbassängens vattenyta erhålles en matta av flock, som med ytströmmen går till avlopp via ett överlopp i bassängens borte del där det kan skrapas av med en vals. Det renade vattnet tas ut från botten i den borte delen av bassängen. Uppehållstiden i flotationsbassängen är ca 20 minuter.



Figur 119. Flotationsanläggning

Figure 119. Flotation plant

Det finns även flockningsanläggningar med cirkulär flotationsbassäng. Där leds vattnet in i centrum av bassängen och flocken flyter ut till ytterkanten. En avloppsränna finns runt hela bassängen. Med jämna mellanrum höjs nivån automatiskt i flotationsbassängen så att flocken bräddar över till avlopp.

6.2.4 Processoptimering

Det är många parametrar som påverkar resultatet i en flockningsanläggning. De påverkar dessutom varandra. Om t.ex. råvattenkvaliteten blir bättre måste mängden flockningsmedel minskas vilket oftast innebär att även kemikalien för pH-justering måste minskas.

De parametrar som har störst inverkan på renvattenkvaliteten är:

- Råvattenkvalitet varierar med årstiden. Även väderleken påverkar råvattenkvaliteten, t.ex. så kan ett häftigt regn kan snabbt ge ett betydligt sämre vatten.
- Temperaturen. Alla kemiska reaktioner är temperaturberoende. Flockuppbyggnaden blir bättre och går snabbare vid en högre temperatur.

- Doseringsmängden måste vara ”rätt” i förhållande till råvattenkvaliteten. Det är lika illa om den är för hög som för låg.
- pH-värde måste rätt, även här är det lika illa om den är för hög som för låg. Vid lutdosering bör denna styras mot flöde eller konduktivitet och övervakas av en pH-mätning. Styrning mot pH-värdet direkt kan leda till allvarliga störningar vid om pH-mätaren tappar kalibrering eller när pH-elektroden blir dålig.
- Flödet bör inte tillåtas variera för mycket och framför snabba variationer påverkar resultatet negativt.
- Uppehållstiden i olika stegen är viktig. I flockningskamrarna måste flockarna hinna utvecklas, i sedimentations- eller flotationsstegen måste flockarna hinna avskiljas. Uppehållstiden är en funktion av flödet och storleken på anläggningen. Det är inte ovanligt att vattenbehovet ändras efter det att anläggningen byggts vilket medför en för stor eller för liten med försämrad vattenkvalitet som följd.
- Övervakning. Förutom övervakning av pH-värdet i flockningskamrarna bör konduktiviteten, eventuellt även färgtalet eller grumlighet, mätas kontinuerligt på inkommande råvatten. Renvattnet bör övervakas genom kontinuerlig mätning av grumligheten före sandfiltren, d.v.s. efter sedimentations- eller flotationssteget för att snabbt se eventuella förändringar.

I en väl intrimmad flockningsanläggning bör som regel ett bra vatten kunna erhållas innan sandfiltret. Det sista steget i flockningsanläggningen, sandfiltret, bör betraktas som ett polisfilter och inte som ett reningssteg.

6.3 Jonbytesteknik

Vid avsättning renas vattnet med avseende på de salter som är lösta i vattnet. Avsättning av vatten genom jonbyte är den process som ger högst avskiljningsgrad av salter. Därför avslutas en reningsprocess med höga krav ofta av ett jonbytessteg. Därmed inte sagt att enbart jonbyte alltid är det bästa processalternativet, en kombination med membranprocesser blir allt vanligare.

Några grundbegrepp, som används nedan:

Joner:	Salter, liksom syror och baser, består av positivt eller negativt laddade atomer och molekyler. De positiva benämns katjoner(+) och de negativa anjoner(-) .
Jonbyte:	Ett förlopp där joner övergår mellan en vattenlösning och ett vanligtvis fast material. Processen är reversibel och transportriktningen beror på koncentrationen av jonen i vattnet och i det fasta materialet samt på fördelningsfaktorn, specifik för varje jon.
Jonbytesmaterial eller jonbytare:	Ett, vanligtvis fast, kornformigt, material av plast, som försetts med jonaktiva grupper. Katjonbytare har negativt laddade grupper och anjonbytare positivt laddade grupper.

Katjon(bytes)filter:	Behållare, vanligtvis tryckkärl, innehållande katjonbytesmaterial för jonbyte med vätska.
Anjon(bytes)filter:	Behållare, vanligtvis tryckkärl, innehållande anjonbytesmaterial för jonbyte med vätska.
Avhärdning:	Joner som bildar svårslösliga salter byts mot natrium.
Avsaltning:	Vattnets salter tas upp på jonbytare i utbyte mot vätejoner och hydroxidjoner. Dessa reagerar till vatten.
Regenerering:	Jonbytarna har en begränsad förmåga att byta joner. Sedan denna kapacitet utnyttjats, kan materialen ”laddas om” genom behandling med en syra (katjonbytare), ett alkali (anjonbytare) eller ett salt (avhärdning). Kallas regenerering.

6.3.1 Avhärdning genom jonbyte

Avhärdning innebär att vattnets innehåll av hårdhetsbildare (kalcium-, magnesium-, barium-, och strontiumjoner) tas upp på jonbytaren i utbyte mot natriumjoner. Bytet sker i filter med katjonbytare, som laddats med natriumjoner. I praktiken tar jonbytaren upp alla slags katjoner, således även järn-, kalium- och vätejoner. Vattnets innehåll av anjoner påverkas inte alls. Regenerering görs med natriumklorid, koksalt.

Avhärdning är tillräcklig för spädvatten till pannor med mindre än 10 bar arbetstryck. Innehåller råvattnet alkalinitet blir ånga som bildas sur av koldioxid.

Används också som förbehandling av vatten till RO-apparater och även för konsumtionsvatten i områden där grundvattnet har stor hårdhet.

6.3.2 Avsaltning genom jonbyte

Avsaltning innebär att alla joner, bortsett från ett litet, ofrånkomligt, läckage avlägsnas. Processen sker i två steg, katjonbyte följt av anjonbyte.

Vid katjonbytet tas de positiva jonerna, katjonerna, upp i utbyte mot vätejoner (H^+) från katjonbytaren. Sedan förs vattnet vidare till anjonbyte, då anjonerna tas upp i utbyte mot hydroxidjoner (OH^-). Vätejoner reagerar med hydroxidjonerna till vatten (H_2O).

Innan jonbytesförloppet startar har katjonbytaren laddats med vätejoner från en syra (vanligen svavelsyra eller saltsyra) och anjonbytaren med hydroxidjoner (oftast från natriumhydroxid).

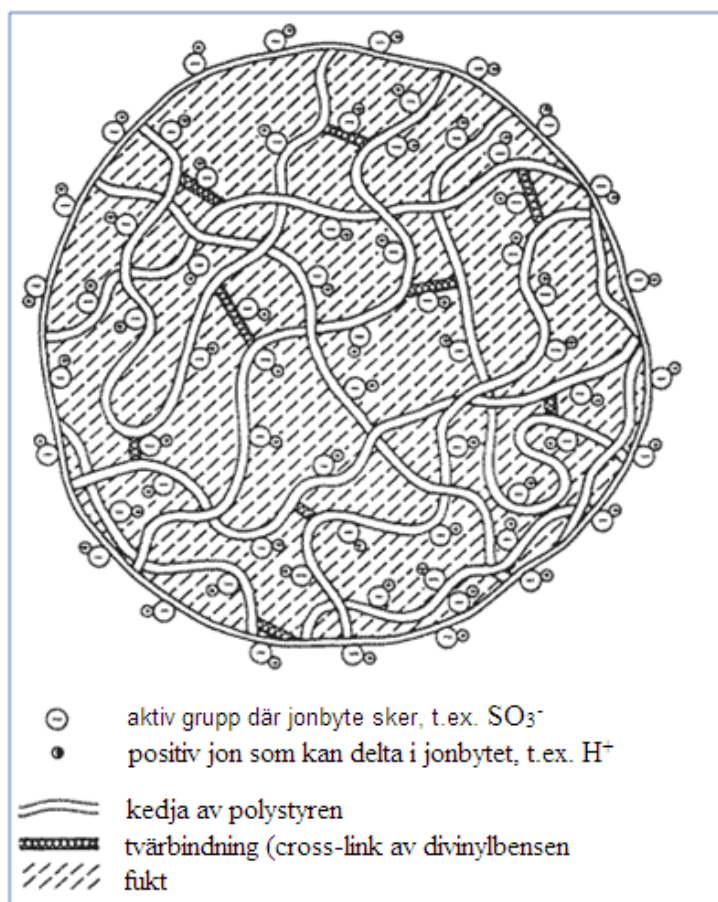
Genom katjonfiltret läcker 0,1-1 % av inkommande joner i form av natriumjoner. Anjonläckaget är försumbart, endast ca 0,002-0,020 mg kiselsyra passerar. Det avsaltade vattnet är därför svagt alkaliskt (pH 8-9) på grund av natriumhydroxid.

Om ytterligare rening (ofta kallad polering) krävs kan katjonbytet upprepas i ännu ett filter, osv. Poleringen kan också ske i ett blandbäddfilter, som innehåller både katjon-

och anjonbytare. I det fallet utgör poleringen också ett skydd mot genombrott av anjoner genom anjonfiltret. (Polera heter polish på engelska. Har skämtsamt översatts som *polis*, därav benämningen polisfilter.)

6.3.3 Jonbytesmaterial

Jonbytesmaterialet består av polystyren- eller akrylatplast. Plasten bildar långa kolkedjor som hålls samman med tvärbindingar. På kolkedjorna sitter aktiva grupper på vilka jonbytet sker. Jonbytesmaterialet kan liknas vid garnnystan där största delen av jonbytet sker inuti kornen.



Figur 120. Uppbyggnad av ett massakorn för katjonbyte

Figure 120. Expanded view of polystyrene bead

För avsaltning behövs katjonbytare och anjonbytare. De skall båda kunna byta joner vid alla vanligen förekommande pH-värden, och sägs då vara av stark typ. De är vanligen uppbyggda på ett plasticskelett. I katjonmassan byggs aktiva sulfonsyragrupper in genom behandling med svavelsyra. Anjonmassans (stark typ) aktiva grupper är en kvartär amin. Det saluförs även katjonbytare av svag typ, som kännetecknas av hög jonbyteskapacitet. Den levereras i väte-laddad form men fungerar endast så länge pH-värdet är högre än ca 5. I sitt arbetsområde är den mycket effektiv och kräver ett obetydligt syraöverskott för

omladdning (regenerering). Katjonbytare av svag typ används ändå mycket litet i de nordiska länderna.

Däremot används anjonbytare av svag typ i de flesta avsaltningsanläggningarna. Fördelarna är desamma som med svag katjonbytare, men därtill kommer att svag anjonbytare utgör ett viktigt skydd för den starka anjonbytare när det gäller organiska ämnen i inkommande vatten. Svag anjonbytare tar upp organiska ämnen (humusämnen) under jonbytet och avger dem under regenereringen. Utan detta skydd blir stark anjonbytare snabbt blockerad av humusämnen. Svag anjonbytare är mycket effektiv upp till pH-värde av ca 6. Anjonbytare av svag typ har aktiva grupper av tertiär amin.



Figur 121. *Katjonmassa*

Figure 121. *Cation resin*

Utöver de nämnda typerna av jonbytare finns det ett stort antal för olika ändamål.

Av speciellt intresse vid förbränning av biobränslen och avfall är jonbytare för tungmetaller. Jonbytarna är av typen svag katjonbytare med aktiva grupper som liknar klatbildare. De kännetecknas av mycket hög affinitet för t.ex. koppar, bly, nickel och kadmium. För kvicksilverreduktion behövs en annan typ av jonbytare.

Vid upparbetning av rökgaskondensat erhålls dels rent vatten och dels koncentratflöden, som innehåller tungmetaller. Även lakvatten från askdeponier kan innehålla otillåtet höga halter tungmetaller.

Halterna är låga och drifttiden för en sats jonbytare väljs ofta till en hel eldningssäsong.

Funktionen övervakas genom analyser, konduktivitet och pH-värde ändrar sig marginellt under driftperioden.

Jonbytarna kan efter regenerering (se nedan) användas gång på gång. De tungmetallhaltiga regenereringslösningarna man då erhåller måste i sin tur oskadliggöras eller deponeras. För regenereringen behövs både en syra – saltsyra eller svavelsyra – och natronlut.

I kraftverk med spädvattenberedning baserad på membranteknik finns inget annat behov för dessa starka och korrosiva kemikalier. Man väljer därför i många fall att sända jonbytaren till destruktion eller slutförvar efter en användning.

För mer information, se leverantörernas hemsidor. Marknaden i Europa (år 2014) domineras av Dow (varumärken Dowex och Amberjet), Bayer (varumärke Lewatit) och Purolite (varumärken Puropack och Purolite).

6.3.4 Regenerering

Sedan jonbytarnas kapacitet uttömts under driftperioden laddas de om med vätejoner resp. hydroxidjoner. Katjonbytaren behandlas med en syra (saltsyra eller svavelsyra). Syrakoncentrationen är så hög att jonbytesreaktionen blir omvänd den som gäller under drift. Syrans vätejoner driver ut de joner, som tagits upp under drift och tar plats på jonbytaren.

På motsvarande sätt driver hydroxidjonerna i natriumhydroxiden ut anjonerna ut ur anjonbytaren.

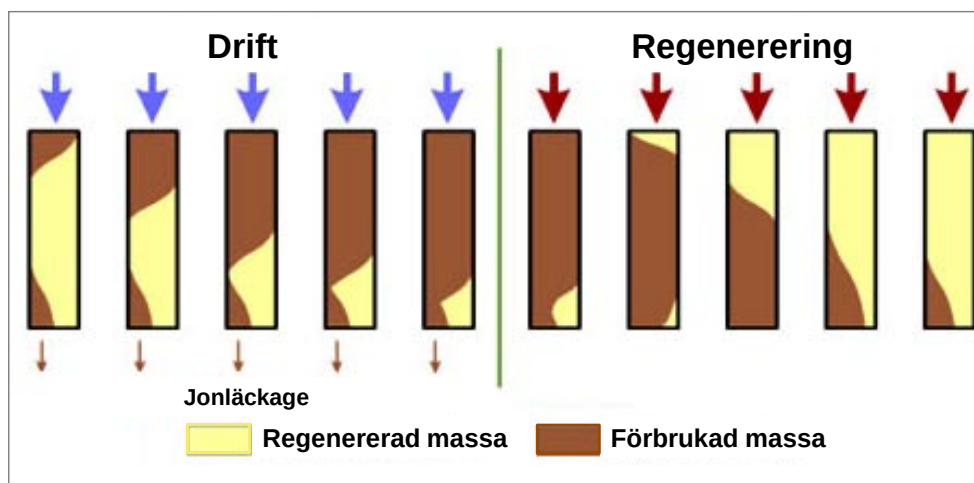
Regenereringen sker i tre steg:

- *Kemikalieinföring.* Utspädd syra (2-5 %) får strömma genom katjonbytaren, resp utspädd natriumhydroxid (4 %) genom anjonbytaren.
- *Förträngning.* Flödet av kemikalier stoppas av då rätt mängd tillförts, men spädvattenflödet fortsätter tills praktiskt taget hela kemikaliemängden sakta drivits genom jonbytarna.
- *Sköljning.* Resterna av kemikalier sköljs ut med ett högt vattenflöde.

Vid regenerering i medström (se nedan) föregås kemikaliebehandlingen av *Returspolning/Backspolning* som luckrar upp jonbytarbädden och avlägsnar fasta föroreningar.

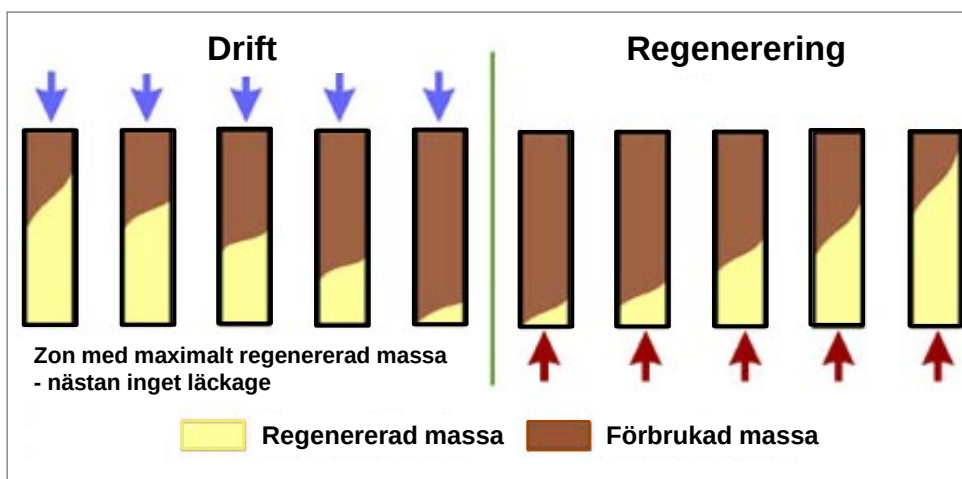
6.3.4.1 Regenerering i medström och motström

Man har två möjligheter. Antingen leds regenereringslösningen i samma riktning som driftflödet – medströmsregenerering – eller i motsatt riktning – motströmsregenerering. Motströmsregenerering är processmässigt överlägsen, vilket Figur 122 Figur 123 illustrerar. Här förutsätts att driftflödet strömmar uppifrån och ned men flödena kan även vara tvärt om, d.v.s. driftflödet nerifrån och kemikalieflödet uppifrån.



Figur 122. *Medströmsregenerering*

Figure 122. *Cocurrent regeneration*



Figur 123. *Motströmregenerering*

Figure 123. *Counter current regeneration*

Vid motströmsregenerering tillförs kemikalien den del av jonbytarbädden som är utloppsdel under drift. Jonbytare där blir mycket välregenererad, vilket leder till hög

renhet hos utgående vatten. Läckaget av natrium blir ca 10 % av det vid medströmsregenerering, samtidigt som den kemikaliedos som behövs är 30-50 % lägre. En lägre kemikaliedos medför dock att jonbytesmaterialet inte utnyttjas i samma utsträckning som vid medströmsregenerering.

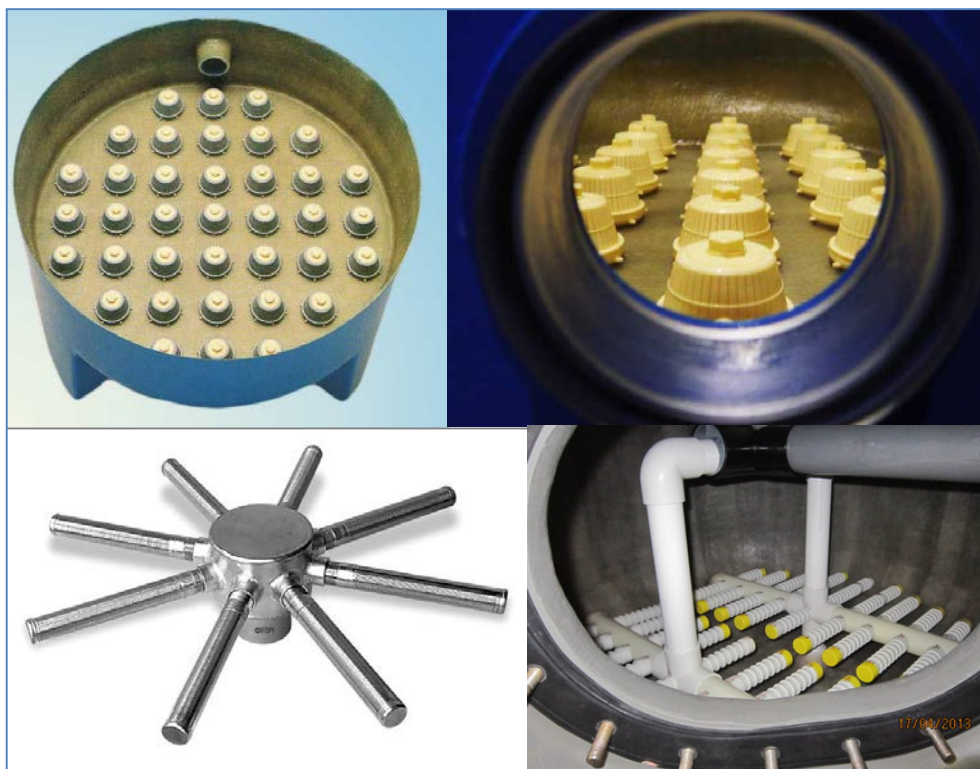
Anjonbytet förbättras också, speciellt avskiljningen av kiselsyra, läckaget är typiskt 2-5 mot 20-50 µg/l SiO₂ vid medströmsregenerering.

Processmässigt är motströmsregenerering överlägsen, men apparativt mera komplicerad, som beskrivs nedan.

6.3.5 Utrustning för jonbyte

6.3.5.1 Filterbehållare för medströmsregenerering

Jonbytarmassan placeras i en tank, oftast tryckkärl i form av en stående cylinder med kupade gavlar. Jonbytaren hålls kvar i filtret antingen av silrör anslutna till ett stamrör eller av filterdysor i en mellanbotten. Se Figur 124. Dysorna och silrören har en slitsvidd av ca 0,2 mm. Inloppet i filtrets överdel utformas så att strömningen blir jämn över hela ytan. Vid medströmsregenerering strömmar såväl vattnet under drift som regenereringskemikalierna uppifrån och ned genom filtret.



Figur 124. Plan botten med dysor respektive silrör

Figure 124. Filter bottom with nozzles and wire screen header

6.3.5.2 Filterkärn för motströmsregenerering

Här strömmar regenereringskemikalierna i motsatt riktning mot vattenflödet under drift. Då behövs slitsade anordningar även i filtrets överdel, antingen silrör eller en mellanbotten med dysor.

Ofta placeras både svag och stark anjonbytare i samma kärn. Då tillkommer en tredje mellanbotten med dysor. Se Figur 124.

Motströmsförfarandet uppnås antingen genom att driftflödet är nedåtriktat och regenereringsflödet uppåtriktat, så kallad Up-Co-Re (Dow), eller det motsatta, som kallas Schwebebett (Bayer) eller det liknande Amberpack (Rohm&Haas, numera Dow).

Filterbehållarnas mantelvolym ska vara toppfylld med jonbytare, varför returspolning inte kan göras i filtren. Filterbehållarna kompletteras därför med en gemensam returspolningstank.

6.3.5.3 Utrustning för avhårdning

Utöver filterbehållare med stark katjonbytare ingår en saltlösare och sammanbindande rör samt instrumentering. Vanligen ingår två filter så att avhärdat vatten produceras även då ett filter regenereras.



Figur 125. *Avhärtningsanläggningar*

Figure 125. *Water softening plant*

Saltlösaren är i mindre anläggningar av plast. Salt och vatten fylls på och det bildas en mättad lösning. Med hjälp av en flottörventil sker tömning under regenerering och återfyllning med vatten automatiskt. Införing av saltlösning i filtret sker med hjälp av en vattendriven ejektor, varvid saltlösningen späds ut till ca 10 %. Alternativt tillförs saltlösningen med en pump.

Driftperioden pågår, framförallt i mindre anläggningar, tills en förinställd volym vatten avhärdat. Om råvattnets hårdhet varierar och i de fall avhärddningens resultat är av stor vikt för efterföljande enheter, bör resultatet övervakas av en automatisk hårdhetsanalysator.

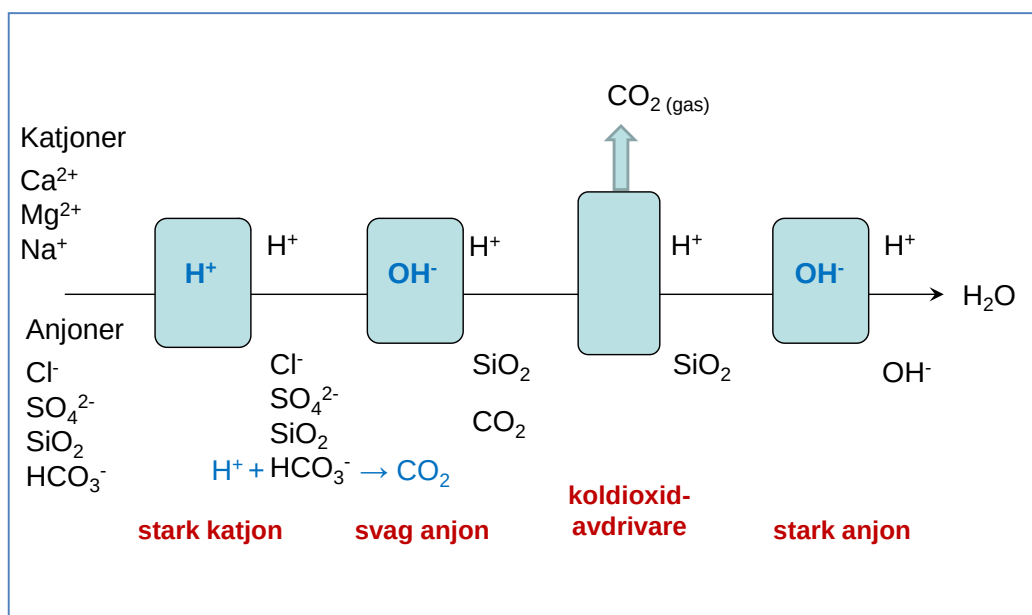
6.3.5.4 Utrustning för avsaltning

Vanligen ingår två eller flera filterlinjer med minst ett katjon- och ett anjonfilter. Avsaltat vatten kan då produceras kontinuerligt med en linje i drift medan den andra regenereras eller står i beredskap.

Därutöver krävs utrustning för regenerering, bestående av förrådstankar för syra och lut samt pumpar för de koncentrerade kemikalierna. Syra och lut späds med vatten till 3-5 % koncentration i en "blandningsstation" där vatten och kemikalieflödena mäts. Alternativt överförs syra och lut för en regenerering till var sin liten tank. Vid kemikalieinföringen trycksätts kärnen, med tryckluft, varpå kemikalien trycks in i jonbytaren.

Vanligen ingår också en neutralisationstank, där avloppen från filtren samlas upp under regenereringen. (Vid regenereringen passerar syraöverskottet långt före lutöverkottet; flödena måste därför samlas upp för att neutralisera varandra). I det fall det uppstår ett nettoöverskott efterjusteras pH-värdet med syra eller lut till godkänt värde.

Figur 126 visar vilka joner som teoretiskt byts ut i respektive steg i en avsaltningsanläggning bestående av: stark katjon - svag anjon - koldioxidavdrivare - stark anjon.



Figur 126. Översiktssbild av vilka joner som teoretiskt byts ut i respektive steg

Figure 126. Overview diagram of the ions theoretically exchanged in each step

I verkligheten sker inte jonbytet fullt ut som det visas i Figur 126.

Katjonfiltret tar inte upp alla natriumjoner utan ett mindre läckage av natriumjoner förekommer. Det medför att en mindre mängd natriumjoner kommer passera igenom hela avsaltningsanläggningen och lämna denna i form av NaOH.

I katjonfiltret omvandlas HCO_3^- till CO_2 . En mindre mängd HCO_3^- återbildas efter det svaga anjonfiltret p.g.a. pH-höjning.

Halten H^+ minskar i de båda anjonfiltren. De OH^- joner som frigörs vid anjonbytet reagerar med H^+ och bildar vatten.

All CO_2 sjunker i avdrivaren men blir inte noll. Resterande CO_2 omvandlas till HCO_3^- i det starka anjonfiltret (p.g.a. pH-höjning) och avskiljs där.

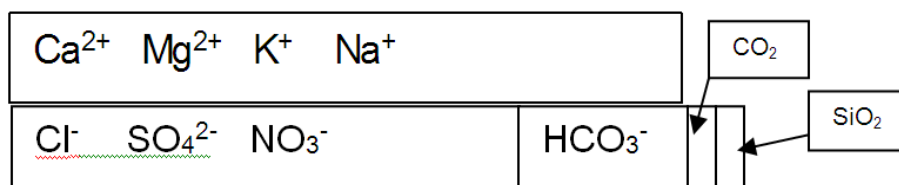
I kapitel 6.3.6 nedan ges en mer ingående beskrivning av jonbytesförloppet.

6.3.6 Kemiska förlopp under avsaltning genom jonbyte

Här följer en grafisk framställning av hur vattnets sammansättning förändras under jonbyte. Antaget natriumläckage (Na^+) förutsätter motströmsregenerering.

Råvatten:

Råvattnet i exemplet utgörs av ett simulerat vatten efter flockning och filtrering av ett normalt svenskt ytvatten. Kalk och koldioxid har tillsatts. Råvattnet innehåller katjoner och anjoner samt koldioxid och kiselsyra. Nedan visas jonbalansen i råvattnet.



Figur 127. Grafisk bild av jonbalansen i råvattnet

Figure 127. Graphical representation of the ion balance in the raw water

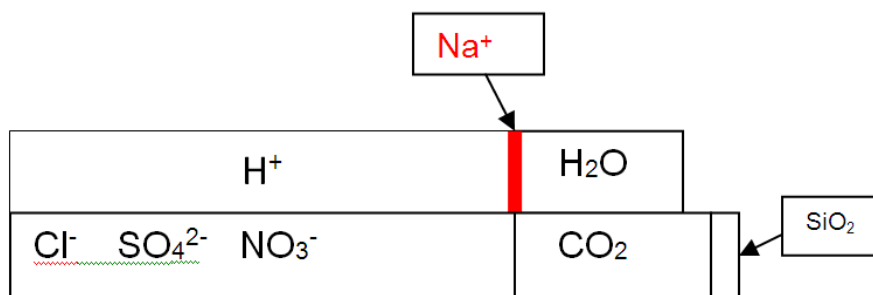
Efter katjonbytare:

Katjonerna byts mot vätejoner till ca 99,95 %. Na-läckage blir ca 0,05 % av summa anjoner av starka syror (Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-).

Vätejoner motsvarande vätekarbonatet neutraliseras varvid vatten och koldioxid bildas:



Kvarvarande vätejoner medför att pH-värdet sjunker till cirka pH 3.



Figur 128. Grafisk bild av jonbalansen i råvattnet

Figure 128. Graphical representation of the ion balance in the raw water

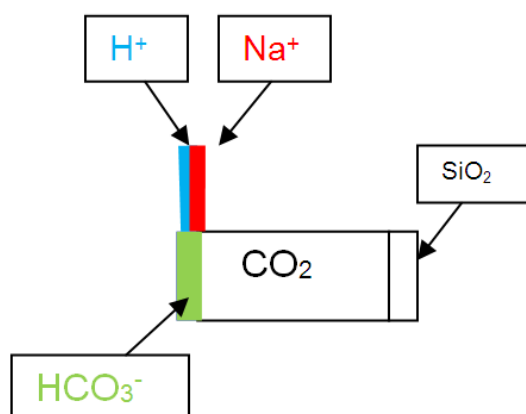
Efter svag anjonbytare:

Anjonerna av starka syror, d.v.s. SO_4^- och Cl^- byts mot OH^- -joner som reagerar med H^+ -jonerna och bildar vatten.

En liten mängd vätekarbonat återbildas.

pH-värdet blir ca pH 4,6

Jonbalans: $[\text{Na}^+] + [\text{H}^+] = [\text{HCO}_3^-]$



Figur 129. Grafisk bild av jonbalansen i vattnet efter svag anjonbytare

Figure 129. Graphical representation of the ion balance in the water after weak anion exchanger

Efter stark anjonbytare:

HCO_3^- tas upp i utbyte mot OH^- - joner.

CO_2 och SiO_2 slår sig samman med OH^- joner på jonbytaren och tas upp som anjonerna HCO_3^- respektive HSiO_3^- .

Na-läckaget finns kvar och lämnar anjonfiltret med en ekvivalent mängd OH^- -joner, d.v.s. som NaOH varpå pH-värdet stiger till pH 8,0-8,5.

OH^- joner försvårar ett fullständigt upptag av kisel syra. Läckaget blir 2-5 $\mu\text{g/l}$ SiO_2 .

Läckaget av övriga anjoner är försumbart.

6.3.7 Driftperiodens slut

Filtren kopplas vanligen linjevis, d.v.s. katjonfilter följs av anjonfilter. Efter en driftperiod regenereras filtren samtidigt. De kemikalieöverskott, som krävs, neutraliserar varandra.

Vid dimensioneringen strävar man efter att katjon- och anjonfiltren har samma jonbyteskapacitet. Då utnyttjas investeringen på ett bra sätt, se dock nedan.

I praktiken är detta mål svårt att nå, och reningsresultatet måste ändå övervakas på grund av risken för tillfälliga störningar eller långsiktiga förändringar.

Det avsaltade vattnets kvalitet övervakas med en konduktivitetmätare i utloppet från filtret med stark anjonbytare. När katjonfiltrets kapacitet är uttömd ökar natriumläckaget och konduktiviteten stiger. Då gränsen för godkänt värde överskrids stoppas driften och linjen regenereras.

Om anjonfiltrets kapacitet uttöms före katjonfiltrets kommer halten kisel syra att stiga snabbt. Konduktiviteten är oförändrad eller sjunker något. Därför måste en kisel syraanalysator kopplad till utflödet installeras.

Manuell provtagning och analys måste annars utföras minst en gång per timma, kisel syran kommer att drivas ut av alla de andra anjonerna. Koncentrationen av kisel syra kan därför bli mångdubbelt större än den i råvattnet och all kisel syra som tagits upp läcker ut på några timmar. Inte heller konduktivitetmätning ger tillräckligt tidig varning i detta fall.

Överskott av anjonkapacitet gör övervakningen säkrare. Det finns därför starka skäl för att överdimensionera anjonbytarna, även om kostnaden stiger.

Anjonbytarnas kapacitet kommer med tiden att sjunka snabbare än katjonbytarens. Den ekonomiska livslängden för anjonbytare är ofta 3-5 år och för katjonbytare 5-10 år.

6.3.8 Polerande filter

6.3.8.1 Katjonfilter

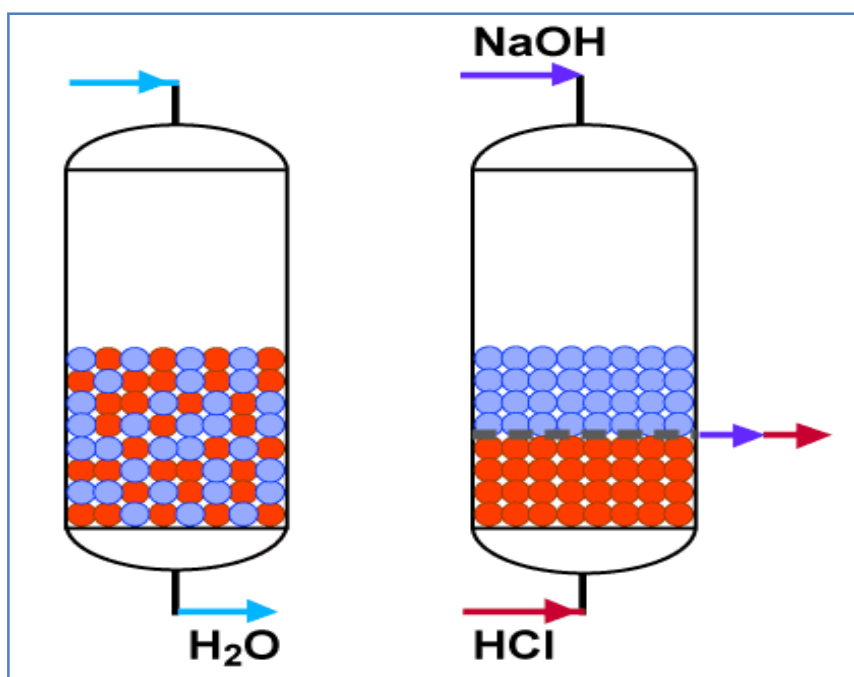
Om ytterligare rening krävs "poleras" vattnet i ytterligare filter. Dominerande jonläckage från en katjon-anjonlinje är natrium. Rening i ett filter med stark katjonbytare sänker natriumhalten till 0,001 mg/l eller lägre.

Natriumläckaget kommer dels från katjonfiltret men, i början av driftperioden även från kvardröjande natriumhydroxid i anjonfiltret. Katjonfiltrets effektivitet gör det möjligt att ta en filterlinje i drift vid högre Na-läckage än utan det polerande filtret.

Regenerering av det polerande katjonfiltret görs i serie med det arbetande. Apparativt sett är detta enkelt att arrangera.

6.3.8.2 Blandbäddsfiltre

Filtret innehåller en blandning av stark katjonbytare och stark anjonbytare. Filtret kan därför sänka halten av både katjoner och anjoner. Filtret skyddar därför mot problem vid genombrott av kiselsyra och andra anjoner. Det måste dock påpekas att blandbäddsfiltrets kapacitet är mycket begränsad och att det är svårt att vid normal regenerering avlägsna stora mängder speciellt av kiselsyra. Kravet på effektiv övervakning av katjon- och anjonfiltrens drift kvarstår.



Figur 130. *Principiell uppbyggnad av ett blandbäddsfiltre*

Figure 130. *Basic design of a mixed bed filter*

Regenerering av blandbäddsfiltar är förhållandevis komplicerad. Först måste katjon- och anjonbytarna separeras så att de bildar två skikt med gränsytan i höjd med en kollektor ansluten till avlopp. Därefter tillförs utspädd syra och utspädd NaOH underifrån resp uppifrån. Flödena möts vid kollektorn. Efter att kemikalierna drivits genom respektive massaskikt skall jonbytarna åter blandas. Efter slutsköljning av blandningen till godkänd konduktivitet är filtret driftklart.

Den inledande separationen är avgörande för regenereringens resultat. Moderna jonbytesmassor med snäv kornstorleksfördelning och olika medelkornstorlek har underlättat avsevärt.



Figur 131. *Blandbäddsfiltar*

Figure 131. *Mixed bed filter plant*

6.3.9 Underhåll och övervakning av avsaltningsanläggningar

Anläggningen innehåller ett stort antal ventiler, där speciellt de vid "blandningsstationen" måste underhållas noga. Vikten av noggrant underhåll gäller även för eventuella kemikaliepumpar.

Instrumenteringen är av vitalt intresse för säker och uthållig drift, speciellt konduktivitetsmätare och kiselsyraanalysatorer.

Övervakningen syftar till att snabbt upptäcka och avhjälpa fel. Dessa kan vara av tillfällig art såsom komponentfel eller handhavandefel. De kan också vara av långsiktig karaktär, orsakade av jonbytarnas åldrande eller förändringar av råvattnets sammansättning.

Högt tryckfall över filtren indikerar förekomsten av fasta partiklar i råvattnet. Dessa fastnar i första hand i katjonfiltret. Massan måste då renas genom returspolning. Vatten tas in i botten av filtret, strömmar uppåt genom filtret, och fortsätter via en slang till returspolningstanken. Ungefär hälften av massavolymen förs över till tanken. Föroreningarna lossnar från massakornen och spolas till avlopp. Efteråt återförs massan till filtret med hjälp av en ejektor kopplad till tankens botten. Vid returspolningen omblandas massan, vilket är till nackdel för jonbytet. Den första driftperioden brukar därför ge något sämre vatten.

Komponentfel som medför att regenereringen inte genomförs korrekt leder till att slutsköljningen misslyckas eller att filterlinjen i drift ger dålig vattenkvalitet efter ovanligt liten behandlad volym vatten. Övervaka nästa regenerering noga, notera ventilfunktioner, kemikalieflöden och tider och jämför med dokumentationen. Avhjälp felen och övervaka även nästkommande regenerering noga.

Råvattenanalysen varierar inte sällan med årstiden, speciellt om vattnet hämtas från ett vattendrag. Om vattnet renas genom flockning, kan kemikaliedosen behöva anpassas till vattnets varierande halt av organiska ämnen. Sammantaget kan vattenanalysen ändras ganska mycket under året. Att med de förutsättningarna regenerera efter ett fast värde på producerad volym ger en dålig driftekonomi.

Byte av vattentäkt eller förbehandling ger nya förutsättningar.

Med övervakning av konduktivitet och kiselsyra utnyttjas utrustningen fullt ut.

Genom loggning av råvattnets konduktivitet kan man kontrollera att anläggningens produktionsförmåga är omvänt proportionell mot konduktiviteten. (Produkten av volym gånger konduktivitet skall vara konstant.) Är produktionsförmågan lägre än så, finns det ytterligare faktorer att klarlägga.

Långsiktigt måste man räkna med att tiden för **slutsköljning** ökar. Det beror på att anjonbytarna ackumulerar organiska ämnen med förmågan att hålla kvar natrium från regenereringsmedlet. Tiden ökar alltmera och kan till slut leda till att filterlinjen inte är klar för drift i tid. Slutsköljningen tär dessutom på linjens jonbyteskapacitet, vilket ökar risken ytterligare.

Nämnda problem minskar drastiskt om det finns polerande filter, som kan hantera de förhöjda Na-värdena. Linjen kan då tas i drift vid relativt höga Na-läckage. Hög konduktivitet beror ytterst sällan på annat än natriumläckage från katjonbytaren och kvardröjande natrium i anjonbytaren.

Ackumulering av organiska ämnen i anjonbytarna leder också till att **jonbyteskapaciteten** går ned.

Genom behandling med varm alkalisk koksaltlösning kan föroreningarna tvättas bort, dock inte fullständigt. Efter 3-5 år är anjonbytarnas praktiska livslängd uppnådd och de bör ersättas med nya massor. För katjonmassor gäller 7-10 år.

På lång sikt kan tryckfallet över filtren stiga över acceptabla värden på grund av att jonbytarkornen förslits eller går sönder. De bildade småpartiklarna orsakar ett allt högre tryckfall. Genom returspolning enligt ovan kan småpartiklarna avlägsnas.

Oxidationsmedel såsom klor och klordioxid kan skada jonbytesmaterialen. Katjonbytarens plaststruktur angrips och kornens mekaniska styrka nedsätts. I drift deformeras kornen av tryckfallet vilket leder till ytterligare förhöjt tryckfall. Halten av klor i råvattnet får inte överstiga 0,1 mg/l.

Om oxidationsmedlet kommer fram till anjonbytarna sker en nedbrytning eller omvandling av massornas aktiva grupper. Den starka anjonbytaren omvandlas till svag typ, de aktiva grupperna passiveras eller till och med omvandlas till svag katjontyp. Vid regenerering kommer dessa grupper att ta upp natrium och bli mycket svårsköljda.

6.4 Membranteknik, UF – NF – RO

Tekniken ”omvänd osmos” bygger på det naturliga fenomenet osmos, som har avgörande betydelse för alla levande organismer.

Osmos förutsätter två lösningar med olika koncentration av lösta ämnen. Lösningarna skiljs åt av vägg, som släpper igenom lösningsmedlet men inte de lösta ämnena. Lösningsmedlet kommer nu att strömma från den utspädda till den koncentrerade lösningen.

Om den koncentrerade lösningen sätts under tryck kan strömningen hindras och till och med fås att byta riktning. Trycket på den koncentrerade sidan, som balanserar strömningen av rent lösningsmedel från den utspädda sidan, kallas det osmotiska trycket.



Figur 132. *RO-anläggning*

Figure 132. *RO plant*

För vanligt dricksvatten behövs ett tryck av 0,1-0,2 bar, under det att för havsvatten behövs ca 25 bar. Det senare motsvarar en ca 250 m hög havsvattenpelare på koncentrationsidan för att balansera kraften i det rena vattnet.

I tekniska sammanhang består nämnda väggar av tunna ark, som ges tillräcklig styrka av en stödväv. Den aktiva ytan kallas membran och kan liknas vid en silduk med hål av storleksordningen 0,1-0,5 nm. Själva membranerna är tunna och måste stödjas för att motstå de tryckskillnader som de utsätts för. Deras förmåga att hindra passage av lösta salter har åstadkommit genom att membranytorna försetts med överskottsladdningar, positiva eller negativa. Små oladdade molekyler, t.ex. H_2O , CO_2 och etanol, passerar däremot obehindrat genom membranet.

Positivt laddade membran hindrar katjoner att passera. Då kan inte heller anjoner passera, elektroneutralitet måste råda överallt. I praktiken sker dock alltid en diffusion genom membranerna.

Membranerna sägs vara semipermeabla, halvgenomträngliga, genom förmågan att släppa igenom vatten men inte salter. Flödet som passerar membranytan kallas permeat. Det flöde som inte passerar membranet kallas retentat. Vanligare benämningar idag är rejekt (ungefär "avvisat") eller koncentrat.

6.4.1 Partikelfiltrering och membranfiltrering

Filtrering för avskiljning av fasta partiklar ur en lösning görs med hjälp av ett filtermedium i form av ark eller en bädd av t ex sand. Partiklarna avskiljs och den rena lösningen strömmar ut. Själva lösningens sammansättning ändras inte.

Med RO sker en stor förändring av lösningens innehåll av lösta salter. Vid test av enstaka membranmoduler avskiljs minst 99 %. I en anläggning med flera moduler avskiljs i genomsnitt 95-97 % av salterna. Tillbakahållna salter samlas vid membranytan. Dessa salter måste föras bort oavbrutet för att processen skall kunna fortgå. Man låter högst 15 % av tillflödet till en membranmodul (se nedan) passera genom membranet. Resterande 85 % tar med sig salterna i koncentrerad form. Genom att koppla samman flera moduler kan vattenutbytet höjas till 85 % eller mera.

6.4.2 Membrantyper

De "tätaste" membranerna används för omvänd osmos, vanligen kallad RO efter engelskans Reverse Osmosis. Dessa membran håller tillbaka ca 99 % av tillförda lösta salter.

Membran med något större genomsläpplighet har i princip samma uppbyggnad som RO-membran och användningssättet är detsamma. Tekniken kallas NF, NanoFiltrering. Tvåvärda joner som Ca^{2+} och SO_4^{2-} avskiljs till 95 % under det att koncentrationen av envärda joner som Na^+ , Cl^- och HCO_3^- sänks till ca hälften.

RO används för avsaltning av vatten, medan NF brukas för att förbättra dricksvattens kvalitet. Membranerna kan antingen bestå av en enda polymer och ha en asymmetrisk struktur eller bestå av ett laminat av en tunn film på ett starkare underlag, så kallade kompositmembran.

6.4.3 Membranmoduler

Den överlägset vanligaste konstruktionen är spirallindade membran, se Figur 133. Två membran vänds med de aktiva ytorna från varandra. Ett poröst och starkt inlägg för permeatflödet placeras mellan membranen, som svetsas/limmas på långsidorna och den ena kortsidan. Den öppna kortsidan fästs över en slits i ett centrumrör.



Källor: www.h2odistributors.com & www.roplant.org

Figur 133. *Principiell uppbyggnad av ett spirallindat membran*

Figure 133. *Basic design of a spiral wound membrane*

På "membranpåsen" läggs ytterligare ett mellanlägg för att skapa en kanal för tillflödet/koncentratet. Påsen och mellanlägg rullas nu upp på centrumröret och förses med ett starkt hölje. I stora moduler är membranpåsens sammanlagda längd 20 m eller mera. Centrumröret förses därför med 5-10 slitsar till vilka lika många membranpåsar

ansluts. Därmed förkorta den spiralformade strömningsvägen för det renade vattnet, som tränger in i påsarna.

Moduler för kommersiella system har en diameter av 100 eller 200 mm. Längden är oftast 1 m, men även längre moduler förekommer. Modulerna placeras i tryckrör med plats för upp till sju moduler. Det finns också moduler med trycktåligt skal, som används i mindre anläggningar.

6.4.4 *Krav på tillflödet*

Inkommande vatten måste vara fritt från stora partiklar. Genom filtreringsprov med 0,2 µm filterpapper avgörs om vattnet behöver ytterligare förbehandling. Provet kallas SDI (Silt Density Index) och högsta tillåtna värde anges på datablad för respektive modul/membrantyp. Se kapitel 2.5.10.1 om SDI-mätning.

Något värde på organiskt material i vattnet anges inte. Grumligheten, som är ett mått på kolloidala organiska ämnen och/eller oorganiska ämnen får högst vara 1 NTU.

Saltsammansättningen i vattnet får inte ligga nära gränsen för utfällning, till exempel av kalciumkarbonat. Eftersom praktiskt taget alla salter återfinns i det lilla koncentratflödet blir uppkoncentreringen 4 – 6 gånger. Vattnet, som ofta redan från början är på gränsen till utfällning, måste förbehandlas. Man kan antingen sänka kalciumhalten genom avhärdning eller sänka karbonathalten genom pH-sänkning med en syratillsats. En tredje möjlighet är att tillsätta ämnen som förhindrar att kalciumkarbonat fälls ut, så kallade dispergeringsmedel, "anti-scaling agents". Se kapitel 7.3.1.1 om beläggningskontroll.

Vattnet måste vara fritt från klor, som kan reduceras till kloridjoner i filter med aktivt kol. Det anses att klor i form av kloramin kan godtas, med erfarenheterna är inte helt samstämmiga.

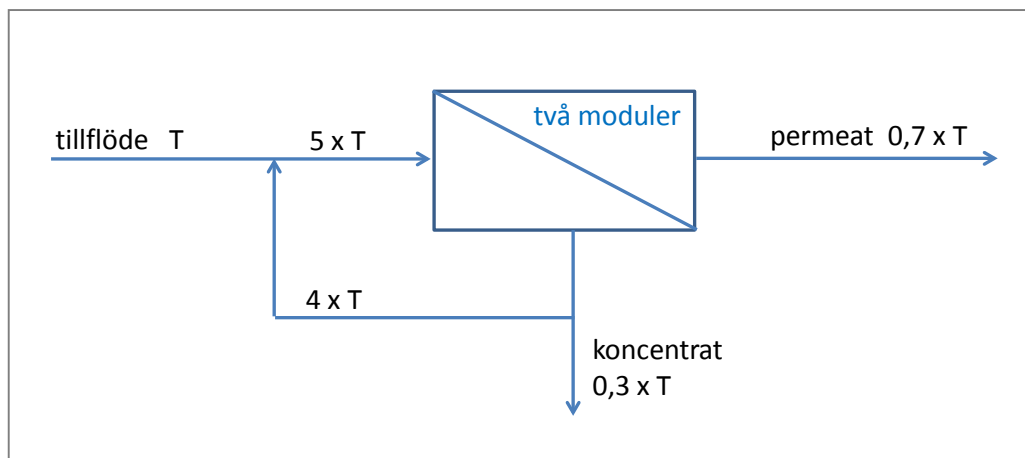
Temperaturen får högst vara 35 °C kontinuerligt.

6.4.5 *RO-aggregatets uppbyggnad*

Ju större efterfrågat permeatflöde, desto flera möjligheter till en fördelaktig konstruktion.

Vid behov av flöden under 5 m³/h ger moduler med diametern 4 tum (100 mm) möjlighet till elegantare konstruktion, men kostnaden blir alltid högre än med 8 tum (200 mm).

Om målet är ett recovery (vattenutbyte) om minst 75 % måste man oftast i små utrustningar cirkulera koncentrat. Figur 134 nedan visar att cirkulationen blir stor.



Figur 134. RO-aggregatets uppbyggnad

Figure 134. Basic design of a RO unit

Med seriekopplade moduler i ett tryckrör får man följande utbyten förutsatt att högst 15 % av vattnet till enskilda element blir permeat:

Antal Moduler	Recovery %	Beräkning
1	15	1-0,85 %
2	28	1-0,85 x 0,85 %
3	39	1-0,85 x 0,85 x 0,85 %
4	47	1-0,85 x 0,85 x 0,85 x 0,85 %
5	56	1-0,85 x 0,85 x 0,85 x 0,85 x 0,85 %

Med alla moduler i samma tryckrör kan man nå en recovery (utbyte) av ca 50 %. På grund av tryckfallet arbetar de senare modulerna vid lägre tryck och ger i praktiken ett mindre bidrag till utbytet än det som tabellen visar.

För att nå till 75 % recovery måste man cirkulera en del av kondensatet. Vid stora anläggningar kan man starta med två eller flera parallellkopplade tryckrör. Koncentratet från två tryckrör leds i ett tredje tryckrör. Då når man i princip målet utan cirkulation.

Mycket stora anläggningar skapas genom multiplicering av fördelaktigt designade delar.

6.4.6 Begränsningar vid konstruktion av anläggningar

Här används moduler med diametern 200 mm (8") som exempel:

- Tillflöde: högst 19 m³/h, framgår av membranets datablad
- Permeatuttag: högst 15 % av tillflödet till enskild modul
- Permeatflöde: högst 1,2 – 1,6 m³/h, framgår av membranets datablad

6.4.6.1 Konstruktionsexempel

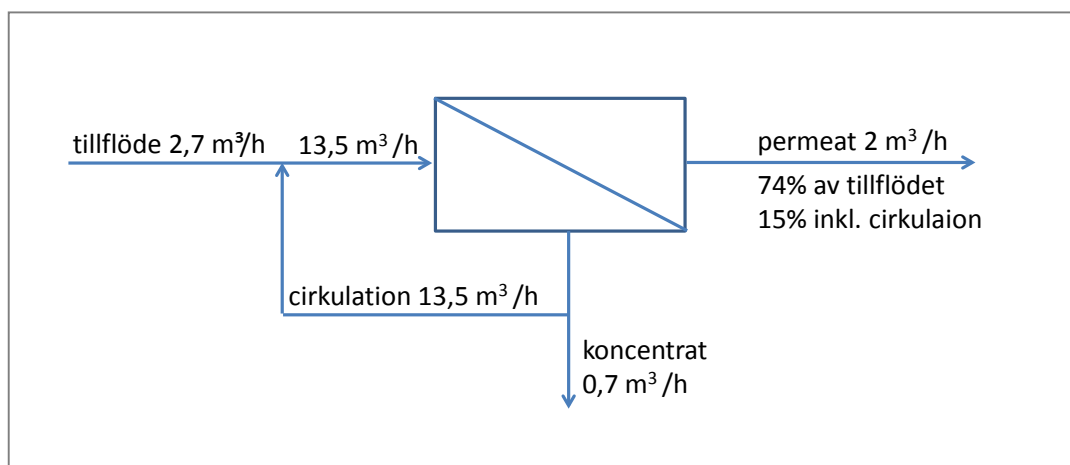
Exempel 1.

Önskat permeatflöde: 2 m³/h, tillflödet uppfyller alla krav.

Antal moduler: 2 st. placeras i ett tryckrör.

Utbyte: 75 % av tillflödet skall utvinnas som permeat.

Om 75 % skall utvinnas får tillflödet vara högst 2,7 m³/h, men då måste permeatuttaget vara 75 % av tillflödet mot tillåtna 15 %. Detta dilemma löses genom cirkulation av koncentrat. Se Figur 135.



Figur 135. *Konstruktionsexempel 1*

Figure 135. *Design example 1*

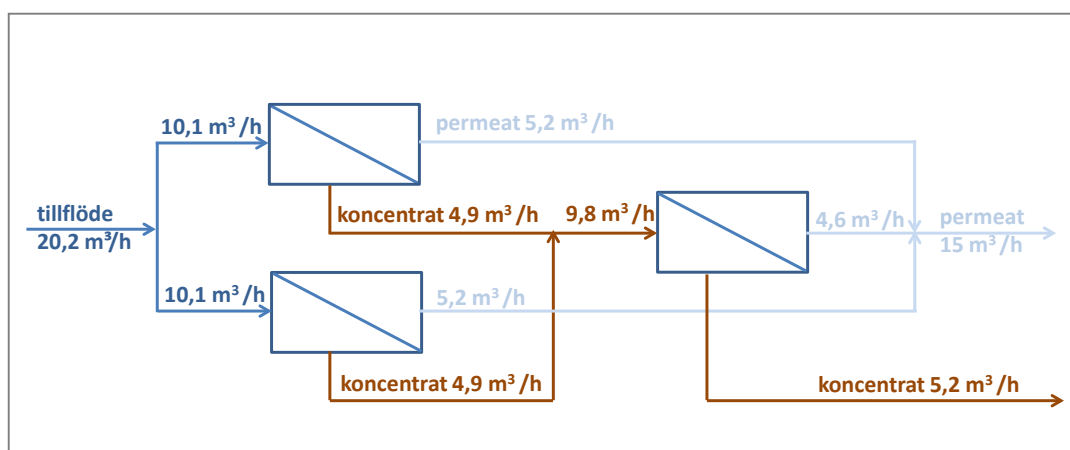
Genom cirkulation av koncentrat kan både kravet på utbyte och permeatuttag uppfyllas. Eftersom tillflödet blandas med ett stort cirkulationsflöde blir permeatkvaliteten låg. Tillflödet antas hålla 200 mg/l NaCl. Permeatet innehåller då 2,7 mg/l.

Exempel 2.

Önskat permeatflöde: 15 m³/h, tillflödet uppfyller alla krav.

Antal moduler: I en större anläggning kan man konfigurera moduler och tryckrör så att cirkulation inte behövs.
15 st. placeras i tre tryckrör. Tillflödet fördelas på två tryckrör och konzentratet från dessa förs till det tredje tryckröret.

Utbyte: 75% av tillflödet skall utvinnas som permeat.



Figur 136. *Konstruktionsexempel 2*

Figure 136. *Design example 2*

Genom ovanstående koppling behövs inte någon koncentratcirkulation. Vid i övrigt lika förhållanden blir permeatets salthalt 1,34 mg/l NaCl, d.v.s. hälften så hög som i exempel 1. Matningstrycket är ca 12,7 bar.

Exempel 3

Drifttemperaturens inverkan

Som exempel 2, men med drifttemperaturen sänkt från 20 till 10 °C.

Resultat: Salthalten sjunker till 0,69 mg/l NaCl, en halvering.
Matningstrycket måste höjas till 19 bar.

6.4.6.2 Kommentarer till exemplen

Leverantörernas datablad uppger 99,0 eller 99,5 % avskiljning vid standardiserad provning med 15 % permetuttag. I små anläggningar är det vanligt att koncentrat cirkuleras varigenom koncentrationen på inloppssidan höjs trefalt eller mera. Permeatkvaliteten försämras i motsvarande grad. I exempel 1 blir avskiljningen 98,8%. (Jämför inte avskiljningsgraden utan istället läckaget. Då framträder skillnaderna tydligt, 0,5 % att jämföra med 1,2 %)

Anläggningen i exempel 2 skulle kunna ha alla tre tryckrören parallellkopplade. Vattenkvaliteten försämras av den nödvändiga cirkulationen, men vissa serviceåtgärder förenklas, och anläggningen behöver inte stängas av helt.

Jämförelse av drift vid olika temperaturer visar att låg temperatur höjer permeatkvaliteten. Å andra sidan blir driftkostnaden högre på grund av att högre matningstryck erfordras.

6.4.7 *Faktorer som påverkar permeatets kvalitet*

Permeatets kvalitet förbättras av:

- Lågt vattenutbyte
- Låg cirkulation
- Låg temperatur
- Högt permeatuttag per m² membranyta

Lågt vattenutbyte medför att mera råvatten behövs. Ökar kostnaden, speciellt om vattnet köps från kommunalt vattenverk.

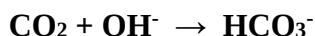
Låg temperatur medför att kostnaden för pumpning ökar.

Högt permeatuttag ökar risken för igensättning av membranen. Ökar kostnaden för membrantvätt eller utbyte.

6.4.8 *Permeatets sammansättning*

Vad gäller de lösta joniserade salterna återspeglas råvattensammansättningen ganska väl i permeatet. Tvåvärda joner som kalcium, avskiljs dock bättre än envärda joner som natrium. Likaså avskiljs de tvåvärda sulfatjonerna bättre än kloridjonen.

Små oladdade ämnen passerar membranen obehindrat. Koncentrationen i permeat och koncentrat blir densamma. Speciellt viktig är koldioxid. I de flesta kommunala dricksvatten med ett pH-värde något över 8 föreligger koldioxiden i huvudsak bunden som vätekarbonatjon. Koldioxiden omvandlas enligt formeln:



Koldioxid omvandlas till vätekarbonat. Ju högre pH-värde desto mindre andel föreligger som koldioxid. (Sambandet mellan pH-värde och andel koldioxid är logaritmiskt,

koncentrationen blir aldrig = noll.) Figur 19 visar jämviktsförhållandet mellan koldioxid, bikarbonat och karbonat i vatten vid olika pH-värden

Avskiljningen av vätekarbonat är hög, men obefintlig för koldioxid. Vid pH=8,3 är halten koldioxid 1 % av vätekarbonatet. Denna avskiljs till ca 99 % och koldioxiden inte alls. Det betyder att halterna i permeatet blir lika stora och pH-värdet 6,0 – 6,5!

I de fall permeatet kan användas som spädvatten saknar en så låg koldioxidhalt betydelse. Om ytterligare rening med jonbytare eller EDI behövs, kan koldioxiden vara den största enskilda föroreningen.

Om råvattnet är ett grundvatten med hög hårdhet och ett pH-värde mellan 7,0 och 7,5 kan koldioxidhalten vara 5 – 10 gånger större än summan av salterna i permeatet.

Om tillflödet innehåller ammoniak (NH_3) och ammoniumjon (NH_4^+) kommer ammoniumjonen att avskiljas men den oladdade ammoniaken passerar obehindrat. Kvoten av ammoniakhalt och ammoniumhalt ökar och pH-värdet i permeatet stiger. För att effekten skall bli märkbar måste tillflödets pH vara över ca 8,5.

6.4.9 Koncentratets sammansättning

Koncentratet innehåller ca 98 % av inkommande salter i ca 25 % av ursprunglig volym (75 % recovery, utvinningsgrad).

Det betyder att koncentrationen av varje ämne i råvattnet har fyrdubblats. Risken, att ämnen med begränsad löslighet bildar utfällningar, måste beaktas. För varje salt finns en s.k. löslighetsprodukt, Om den överskrids sker utfällning. Den i särklass största risken gäller kalciumkarbonat. Råvattnet avhärddas eller doseras "anti-scalants", som hindrar tillväxt av kalciumkarbonatkristaller.

Alternativt doseras en syra som sänker karbonathalten. Då stiger samtidigt koldioxidhalten, vilket komplicerar efterföljande polering av vattnet, om sådan erfordras. Kalciumhalten är oförändrad, vilket gör att halten i permeatet är för hög för EDI.

Men kravet på avhärddningens funktion måste vara högt ställda. Koncentrationen av kalcium stiger fyrfalt. Karbonatjonens koncentration stiger ännu mera eftersom pH-värdet är högre i koncentratet. Produkten av koncentrationerna blir 20 - 25 gånger högre i koncentratet än i råvattnet. Resthårdheten i det avhärddade vattnet får vara högst några procent av råvattnets hårdhet.

6.4.10 Polering av permeatet

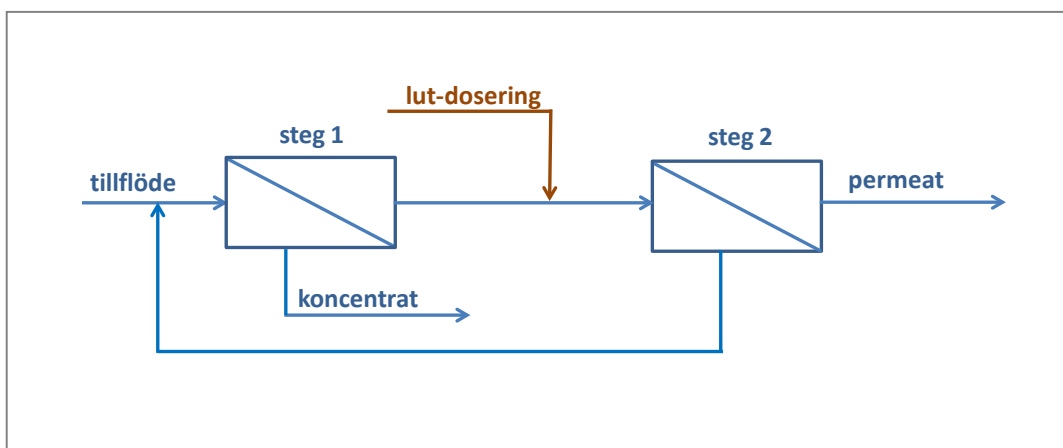
Om permeatet inte uppfyller ställda krav måste ytterligare reningssteg läggas till. Fyra alternativ står till buds:

- Blandbäddsfiler med fabriksregenererad jonbytare av engångstyp (engångsmassa)
- Blandbäddsfiler med regenereringsutrustning
- Rening av permeatet i ytterligare en RO-apparat
- EDI, elektroavjonisering

Blandbäddsfiler med engångsmassa är ett starkt alternativ vid små flöden. Andelen koldioxid bör inte vara hög. Utrustningen är enkel med reningskostnaden per volymenhet relativt stor.

Blandbäddsfiler med regenereringsutrustning tar bort en av de stora fördelarna med RO-alternativet, nämligen att inga starka frätande kemikalier förekommer i anläggningen. Kan möjligen vara fördelaktigt i mycket stora anläggningar, eller i processindustrier där syra och lut ändå hanteras.

Rening i ytterligare en RO-apparat ger en sänkning av de lösta salterna. Koldioxiden passerar även dessa membran och blir dominerande förorening. Man kan dosera natriumhydroxid före steg 2 för att omvandla koldioxiden men det kan vara mättekniskt svårt och leder vid överdosering till förhöjt natriumläckage. Vid lutdosering bör denna styras mot flöde eller konduktivitet och övervakas av en pH-mätning. Styrning mot pH-värdet direkt kan leda till allvarliga störningar vid om pH-mätaren tappas kalibrering eller när pH-elektroden blir dålig. Metoden innebär inget ytterligare vattenbehov eftersom koncentratet leds tillbaka till inloppet på steg 1.



Figur 137. Tvåstegs-RO med mellanliggande lutdosering

Figure 137. Two step RO with with intermediate caustic dosing

EDI liknar alternativ 1 och 2 med rening genom katjon- och anjonbyte, men jonbytarna regenereras kontinuerligt. Metoden beskrivs närmare i kapitel 6.5.

Reningsresultatet av kombinationen RO-EDI är bättre än i rena jonbytesanläggningar tack vare att organiska ämnen avskiljs mera fullständigt. Dessa molekyler är joniserade och deras bidrag till konduktiviteten framträder i mycket rena vatten.

Uttryckt i resistivitet kan man nå ett värde på $>18 \text{ M}\Omega\text{cm}$ med RO-EDI mot ca $17 \text{ M}\Omega\text{cm}$ i jonbytesanläggningar. Vid mätning på ultrarena vatten används ofta enheten $\text{M}\Omega\text{cm}$ (megohm) i stället för $\mu\text{S/cm}$ då det ger en bättre noggrannhet. Se Figur 138.

$\mu\text{S/cm}$	$\text{M}\Omega\text{cm}$
0,055	18,18
0,056	17,86
0,057	17,54
0,058	17,24
0,059	16,95
0,060	16,67

Figur 138. Jämförelse mellan $\mu\text{S/cm}$ och $\text{M}\Omega\text{cm}$

Figure 138. Comparison of $\mu\text{S/cm}$ and $\text{M}\Omega\text{cm}$

6.4.11 Underhåll av RO-anläggningar

Som beskrivits ovan innehåller anläggningen inte bara RO-enheten, utan dessutom:

- Avhärdningsfilter för att minska risken för kalkutfällning på membranytorna. I vissa fall kan dosering av syra eller en anti-scalant ersätta avhärdningsfiltret.
- Partikelfilter för att skydda RO-membranen
- Ev. utrustning för att reducera halten oxidationsmedel (klor) i råvattnet

Hårdhetsläckage från avhärdningsfilter måste kontrolleras regelbundet manuellt eller eventuell kontinuerligt med en hårdhetsanalysator. Alternativt måste doseringsutrustningens funktion verifieras genom att pH-mätaren kalibreras regelbundet, respektive genom kontroll av anti-scalantdosering.

Observera att vid utebliven dosering börja utfällningar bildas omedelbart och membranen blockeras snabbt. Ett förhöjt hårdhetsläckage utvecklas inte lika snabbt men måste ändå åtgärdas utan dröjsmål.

Partikelfiltren, vanligen filterpatroner, byts ut då tryckfallet når rekommenderat värde. Drifttiden mellan byten journalförs för att förändringar i vattnets partikelhalt skall kunna observeras. Vid behov analyseras halten oxiderande ämnen och filter med aktivt kol byts när förhöjt värde noteras.

6.4.11.1 RO-membranen

En förutsättning för bra övervakning och säkert underlag för åtgärder är journalföring. Följande bör noteras:

- Permeatflöde
- Koncentratflöde
- Temperatur
- Cirkulationsflöde
- Tryck, inkommande vatten, koncentrattryck mellan stegen och i utgående koncentrat
- Tryck utgående permeat.
- Permeatets konduktivitet

RO-membranen åldras, man räknar med att permeatflödet avtar med ca 15 % under den första treårsperioden genom att det aktiva skiktet komprimeras. För att bibehålla ursprungligt flöde måste trycket ökas. Pumpen för tillflödet är lämpligen varvtalsstyrd. Minskningen i permeatflöde är ännu större om **membranytorna blockerats** av ämnen i tillflödet, som inte kan passera membranen. Föroreningarna är antingen av organisk natur (humusämnen) eller oorganiska, såsom metallhydroxider och hårdhet.

Membranen tvättas först med en alkalisk lösning för att avlägsna organiska ämnen och därefter med en sur lösning för att lösa upp metallhydroxider och hårdhetsbildare. Behandling med en sur lösning är också fördelaktig för att snabbt återställa membranytorna efter alkalisk tvätt. (Om membranen är kraftigt blockerade av hårdhetsutfällningar kan en inledande sur tvätt behövas.)

Förutom tryckfallet tvärs över membranen måste också tryckfallet i koncentratkanalerna övervakas. Fasta föroreningar blockerar gradvis koncentratkanalerna och tryckfallet i strömningsvägen längs membranytorna ökar. Matningstrycket måste då ökas för upprätthålla ett oförändrat permeatflöde. Då kommer de första membranen att producera mer permeat än beräknat och de sista membranen mindre. Risken för igensättning av de första membranens ytor ökar och därmed behovet av tvättning.

Finfördelat fast material, såsom lera, kan i någon mån avlägsnas genom kraftig spolning av koncentrasidan utan permeatproduktion. Annars återstår membranbyte; uppföljning av förbehandlingen är därför mycket viktig. Regelbunden mätning av SDI eller annan typ av filtreringsprov bör göras.

Plötsligt uppträdande höjning av permeatets konduktivitet uppkommer om ett membran skadas eller om någon tätning, som skiljer permeat från koncentrat i tryckrören, läcker. Skadan kan lokaliseras genom sondering i permeatrören. Man behöver då bara ta ut moduler och skarvrör ut ett tryckrör.

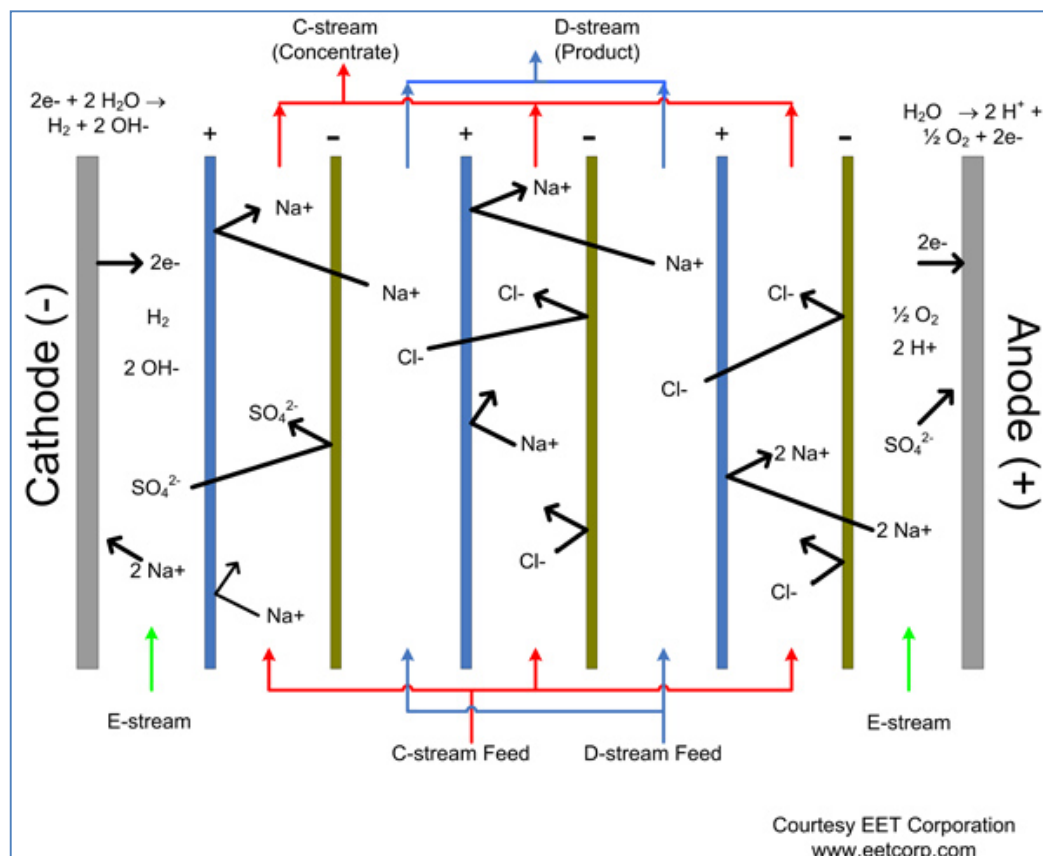
6.5 EDI

EDI är en förkortning av engelskans **E**lectro **D**eIonisation är en metod för avsaltning av vatten. Den svenska benämningen är elektroavjonisering.

Metoden bygger på en samverkan mellan jonspecifika membran, jonbytesmaterial och elektrisk ström. Till skillnad från konventionellt jonbyte är EDI kontinuerligt arbetande. Upptäckten av jonspecifika membran lade grunden. Membranens är uppbyggda av katjon- eller anjonbytare, som gjuts till ark, med eller utan bindemedel. De har mycket liten genomsläpplighet för vatten, men katjonmembran släpper igenom katjoner och anjonmembranen anjoner.

6.5.1 Elektrodialys

Den första tillämpningen kallas ElektroDialys (ED). Omväxlande katjon- och anjonmembran anordnas enligt Figur 139. Vatten strömmar i mellanrummen och en likspänning läggs tvärs strömningsriktningen.



Figur 139. *Principiell uppbyggnad av ED, ElektroDialys*

Figure 139. *Basic design of ED, electrodialysis*

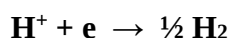
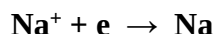
Vattenflödet delas upp och leds in i mellanrummen mellan membranerna. Katjonerna, t ex natrium, vandrar i riktning mot den negativa elektroden. De hindras av det anjonaktiva

membranet. På motsvarande sätt vandrar anjonerna mot den positiva elektroden, men hindras av det katjonaktiva membranet. Jonerna (= salterna) anrikas i varannan kanal och varannan kanal utarmas på salter.

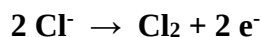
6.5.1.1 Elektrodreaktioner

Då katjonerna når katoden bildas primärt motsvarande metall, som dock omedelbart reagerar med vattnet.

Vid katoden sker:



Vid anoden sker:



Det bildas alltså vätgas vid katoden samt syrgas och klorgas vid anoden. Mängderna är dock så små att normal ventilation håller koncentrationerna på en ofarlig nivå.

6.5.1.2 Reningsresultat

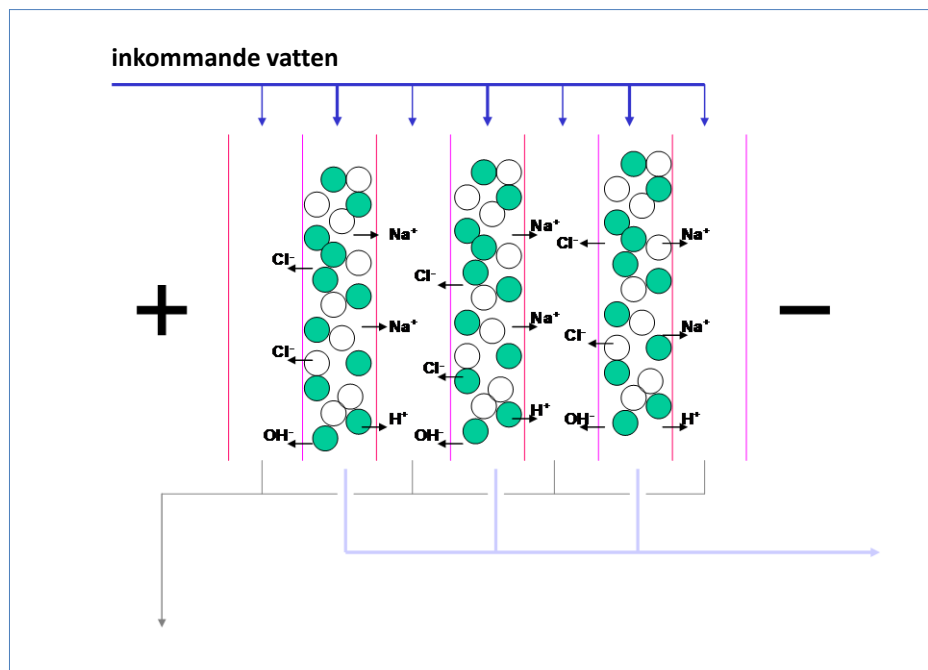
Saltkoncentrationen sjunker normalt till ca 50 % av tillflödets, vilket inte är tillräckligt för polering av spädvatten. Elektrodialys används som första steg före avsaltning av saltrika vatten.

För ca 50 år sedan upptäcktes att om renvattenkanalerna fylldes med jonbytesmaterial höjdes avskiljningsförmågan dramatiskt. Grunden för EDI var lagd.

6.5.2 Elektroavjonisering

Genom att fylla renvattenkanalerna med blandbäddsjonbytare sänkte man det elektriska motståndet drastiskt. Jonerna kan lätt ”hoppa” mellan jonbytarkornens aktiva grupper, med väsentligt mindre motstånd. En förutsättning för ett bra resultat är att det finns en obruten följd av katjonbytare resp. anjonbytare mellan membranen. Ju bredare kanal desto större är risken för avbrott och högt motstånd. Avståndet mellan membranen är därför högst 3 mm.

I koncentratkanalerna är halterna så mycket högre – och därmed motståndet lägre – att jonbytarfyllning inte är lika betydelsefull. Det förekommer dock konstruktioner med jonbytare även i koncentratkanalerna och även driftsätt där koksaltlösning tillförs koncentratet för att sänka det elektriska motståndet.



Figur 140. *Principiell uppbyggnad av EDI, Electro Deionization*

Figure 140. *Basic design of EDI, Electro Deionization*

De första EDI-apparaterna var i övrigt uppbyggda på samma sätt som förebilderna ED. Elektrodreaktionerna är exakt desamma som för ED. Eftersom EDI arbetar med RO-permeat kommer strömstyrkan per volymsenhet vatten att vara mycket lägre i ED-enheter.

Förutom EDI förekommer benämningarna CDI (Continuous Deionisation) och CEDI.

6.5.2.1 Funktion

I den övre delen är jonbytarna i utmattad form. De tjänstgör endast som språngbräddor för inkommande joner.

I nederdelen är salthalten i renvattenkanalerna så låg att den pålagda spänningen även räcker till jonisering av vatten till vätejoner och hydroxidjoner. Spjälkningen sker där det finns både positiva och negativa ytladdningar, antingen blandbäddsjonbytare eller jonbytare och membran av olika typ.

Väte- och hydroxidjonerna vandrar i det elektriska fältet och tvingar jonerna att vandra in i koncentratkanalerna. Samtidigt överförs jonbytarna till regenererad form. Därigenom kan halten joner sänkas till mycket låga nivåer. Likaså kan de oladdade CO_2 och SiO_2 fångas in som HCO_3^- resp SiO_3^- och transporteras bort i det elektriska fältet.

6.5.2.2 Reningsresultat

En konduktivitet av ca 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ i inkommande vatten ger en produkt med konduktiviteten 0,055 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Omräknat i resistivitet från 0,2 $\text{M}\Omega\text{cm}$ till 18+ $\text{M}\Omega\text{cm}$.

Hög halt koldioxid och kiselsyra i tillflödet försvårar reningen, men genom sänkning av flödesbelastningen och höjning av strömstyrkan kan samma reningsresultat nås.

6.5.2.3 Krav på tillflödet

Vattnet till en EDI får högst innehålla 0,05 °dH, motsvarande 0,36 mg/l Ca. Det innebär i praktiken att vattnet måste avhärddas. Om EDI:n föregås av RO kan tillflödet till denna avhärddas.

RO kan skyddas mot utfällningar genom pH-sänkning eller dosering av "anti-scalants", men hårdhetsläckaget i RO-permeatet blir då högre än vad EDI kan acceptera. Dosering av syra medför dock att vätekarbonat omvandlas till koldioxid, vilket enligt ovan försvårar EDI's arbete. I övrigt kan EDI godta det som är lämpligt för RO med avseende på temperatur och fritt klor.

Halten koldioxid bör vara låg. Endast i områden med grundvattentäkter med hög hårdhet och vid återvinning av rökgaskondensat är dock koldioxidhalten så hög att åtgärder behövs. Se kapitel 14.3.2.3.1 om CO_2 -avskiljning vid rening av rökgaskondensat.

6.5.3 Utföranden av EDI-aggregat

6.5.3.1 Ursprungligt utförande

I ursprungligt utförande liknade apparaterna snarast en filterpress med ramar som täcktes av membran och med ett utrymme för jonbytesmaterial. Varannan ram innehöll blandbäddsjonbytare och varannan endast ett poröst stödmaterial.

Paketet av ramar hölls samman av två gavlar och spännbultar. Gavlarna innehåller elektroderna.

Vattnet, som skall avsaltas, leds in via en anslutning i gaveln och fördelas till varannan ram genom en längsgående kanal i ramarnas överdel. Vattnet, som skall bilda koncentratet, leds in i en annan anslutning på gaveln och fördelas i varannan ram. Renvatten och koncentrat samlas upp och leds ut genom kanaler i den ena gaveln. Dessutom matas elektroderna separat med vatten.

För att uppnå tillräcklig salthalt i koncentratet fordras ibland att koncentrat cirkuleras med en pump.

6.5.3.2 Jonbytare även i koncentratkanalerna

För att ytterligare sänka motståndet i koncentratkanalerna fylldes även dessa med blandbäddsjonbytare. Man kunde då avstå från cirkulationspumpen, vilken har avsevärt större energiförbrukning än själva jontransporten.

6.5.3.3 Varvade katjon- och anjonbytare

Med blandbäddsjonbytare är skiktjockleken i ramarna begränsad enligt ovan. Antalet membran som behövs per volymenhet behandlat vatten är därför jämförelsevis stort. Om vattnet istället strömmar genom skikt som omväxlande innehåller katjon- eller anjonbytare kan skiktet göras betydligt tjockare, 8-10 mm. Antalet membran minskar och kostnaden sänks avsevärt. (Jämför med upprepade konventionella katjon- och anjonbyten i stället för blandbäddsjonbyte.)

Funktionen blir nu en annan. För att kunna transportera katjoner till katoden måste motsvarande mängd anjoner transporteras i motsatt riktning. Anjonerna hindras av katjonmembranen. Därför behövs hydroxidjoner, som bildas genom uppdelning av vattenmolekyler.

På motsvarande sätt behövs i skiktet med anjonbytare en positiv jon som vandrar i motsatt riktning. I detta fall vätejoner. Överskottet av vätejoner, som också bildas i katjonskiktet, neutraliserar de hydroxidjoner, som bildas i anjonskiktet. Detta leder till att strömutbytet blir lägre, men kostnadsökningen är marginell.



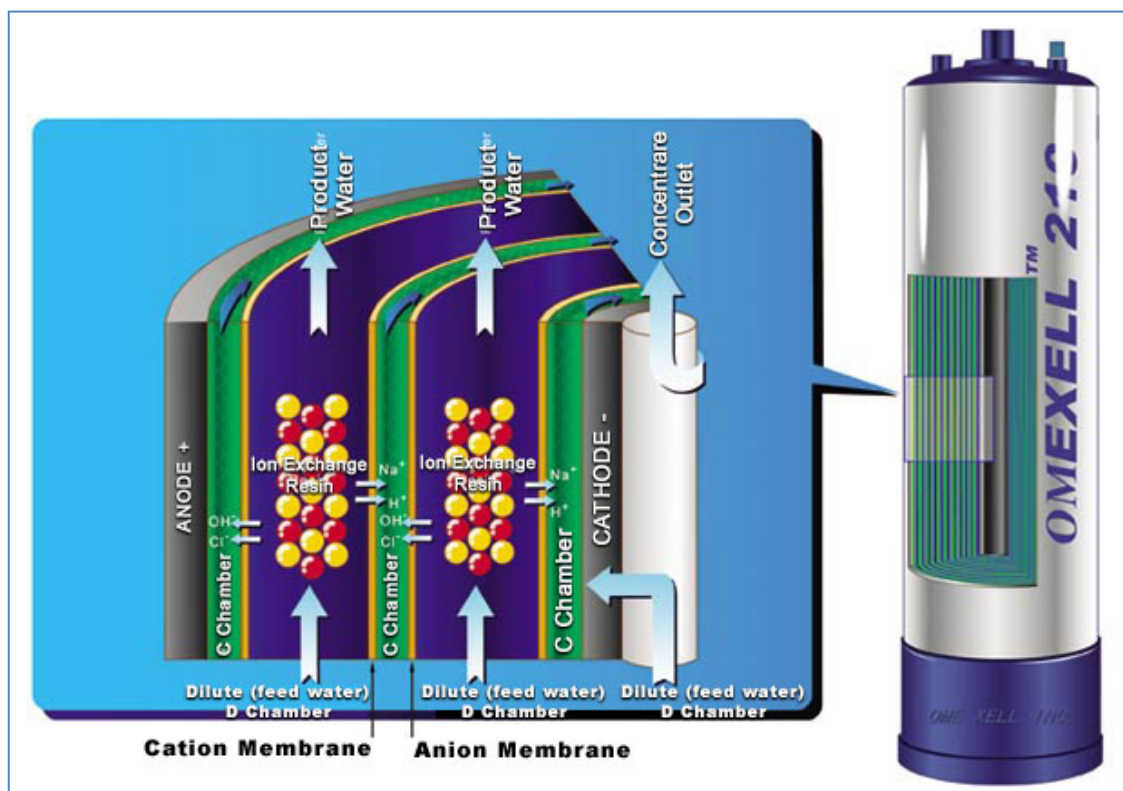
Figur 141. *EDI:er från tre olika tillverkare*

Figure 141. *EDI:s from three different manufacturers*

6.5.3.4 Spirallindade membran

Konstruktionen liknar RO-moduler. Katjon- och anjonmembran - med blandbäddsmassa i vartannat mellanrum och ett stödsikt i de andra mellanrummen – lindas upp på ett centrumrör. På röret är anoden anbragd. Katoden utgörs av ett nät, som viras utanpå spirallullen. Det hela omges av ett trycktåligt hölje.

Huvuddelen av tillflödet (som skall renas) leds in perifert i den jonbytarfyllda spiralen och en mindre del, som skall koncentreras, i den andra spiralen. Den pålagda spänningen får jonerna att vandra och samlas i koncentratkanalen. Renvattnet, på engelska ofta kallat "Dilute", och koncentratet tas ut genom anslutningar i modulens andra gavel.



Figur 142. *Spirallindad EDI-module*

Figure 142. *Spiral wound EID module*

6.5.3.5 Utföranden – en sammanfattning

”Filterpress”	Blandbäddsjonbytare endast i renvattenkanalerna Blandbäddsjonbytare både i renvatten- och koncentratkanalerna Omväxlande skikt av katjon- och anjonbytare i renvattenkanalerna
Spirallindade	Blandbäddsjonbytare i renvattenkanalerna
Koncentratcirkulation	Apparaterna förses ibland med koncentratpump

6.5.4 Skötsel och underhåll

Driftdata, i form av tryck, flöden och vattenkvalitet, måste insamlas och registreras regelbundet genom journalföring. Utan dessa uppgifter är det mycket svårt att fastställa orsakerna till eventuella störningar.

Under drift kontrolleras regelbundet att tryckfallet är stabilt, att inmatad spänning är konstant och att produktkvaliteten är konstant. Såväl EDI-apparatens som data från uppströms placerade enheter (oftast RO-apparat) skall noteras. För en meningsfull uppföljning krävs att tillflödets (vanligen RO-permeat) konduktivitet och pH-värde, totalt klor och temperatur har noterats.

Stigande tryckfall tyder på att permeatet innehåller fasta partiklar, som sätter igen renvatten- och koncentratkanalerna. Över tid kan jonbytesmaterialet sönderdelas och orsaka höjning av tryckfallet. Kan endast rättas till genom byte av EDI-modulen.

Ökad matningsspänning för bibehållen produktkvalitet orsakas av försämrad funktion hos de jonaktiva membranerna. Orsaken kan vara hårdhetsläckage eller humusämnen som passerar genom RO. Båda bildar utfällningar på membranerna, som delvis kan kompenseras av höjd matningsspänning.

6.5.4.1 Tvätt av EDI-aggregat

Igensättning av membranerna leder till försämring av renvattnets kvalitet. För varje aggregattyp finns en högsta tillåtna matningsspänning. Senast då denna nås måste aggregatet tvättas för att kvalitetskravet skall kunna uppfyllas.

- Spolning med koksaltlösning
- Tvätt av katjonmembran och katjonmassa med utspädd saltsyra.
- Spolning med koksaltlösning
- Tvätt av anjonmembran och anjonmassa med alkalisk koksaltlösning
- Renspolning med RO-permeat 20-30 minuter. OBS Spänningslöst!
- Driftsättning med spänning. Renvattnet leds till avlopp tills godkänd kvalitet uppnås.

7 Vattenbehandling i vatten-ångcykeln

I detta kapitel beskrivs de metoder och typer av utrustningar som huvudsakligen används för att behandla vattnet i vatten-ångcykeln.

Vissa av dessa tekniker används också i fjärrvärmesystem eller kylvattensystem för att upprätthålla vattnets och/eller ångans kvalitet.

Andra användningsområden kan vara rening av rökgaskondensat eller avloppsvatten etc.

De tekniker som behandlas i detta kapitel är:

- Avgasning d.v.s. avlägsnande av gaser såsom syre, koldioxid men även ammoniak
- Avblödning och bottenblåsning för att reglera salthalten i pannan
- Dosering av kemikalier till vattenångcykeln
- Kondensatrening

Lars Bäcklund har skrivit om avgasning och Leif Bjurmalm har skrivit om kemikaliedosering.

7.1 Avgasning

Avgasning av vatten innebär att alla lösta gaser avlägsnas mer eller mindre fullständigt. Gaserna är olika lösliga, de svårslösliga lämnar vattnet och de lättlösliga stannar i större utsträckning. Gaserna transporteras bort av vattenånga som tillförs eller kokar av.

Vid **avdrivning** tillförs en bärargas, som transporterar bort den gas man vill avlägsna, samtidigt som bärargasen löser sig i vattnet.

Gasers löslighet anges ofta som jämviktsfaktorn, alltså koncentrationen i gasfasen delat med koncentrationen i vattnet. Ett högt värde innebär att gasen är svårslöslig och tvärtom. Jämviktsfaktorn är temperaturberoende, men i övrigt konstant.

Enligt Henrys lag gäller:

$$P = K_H \times c$$

där: P = partialtrycket av en löst gas (bar)
 c = koncentrationen av gasen i vätskefas (molbråk)
 K_H = Henrys konstant, unik för varje gas

Några exempel på Henrys konstant vid 20 °C:

Gas	K_H
Syre	35000
Koldioxid	300
Ammoniak	20

Jämviktsfaktorn ökar vid stigande temperatur, d.v.s. gasen är allt mindre löslig.

Syreborttagning ned till 10-20 ppb O_2 sker genom gas/vätskekontakt i relativt enkla apparater. För de båda andra gaserna ovan krävs motströmsapparater för att gasbehovet skall vara rimligt.

Koldioxid drivs av vid rumstemperatur, medan ammoniakavdrivning oftast kräver högre temperatur.

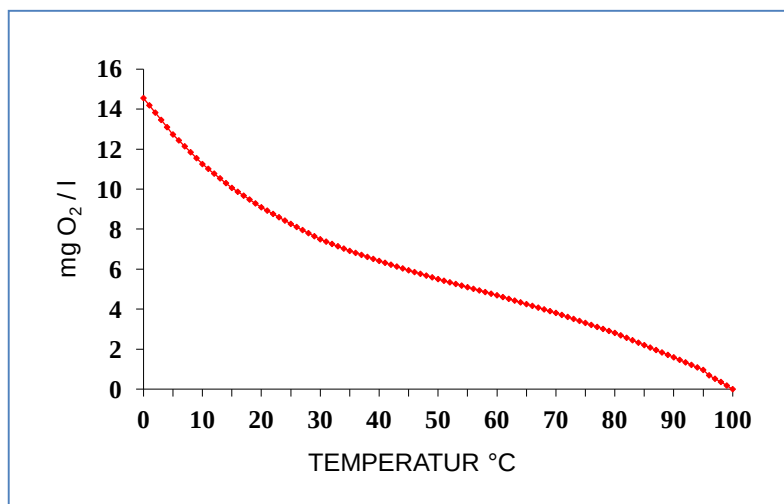
Kemisk avgasning används dels för eliminering av restsyra efter termisk avgasning och dels vid små spädvattenbehov. Se kapitel 7.3.1.2.4.

7.1.1 Allmänt

Avsaltat vatten innehåller löst syrgas, som ger upphov till korrosion på de låglegerade stålmaterial som normalt används i systemen. Den lösta syrgasen måste därför avlägsnas, avgasas, till en mycket låg nivå på syrekonsentrationen. Vattnet innehåller också andra gaser, ofta kväve, som i varierande grad kan avgasas.

Halten av en löst gas i vätska är beroende av temperaturen samt halten av denna gas i gasfasen ovanför vätskeytan. Dessa två omständigheter används i den termiska avgasningen genom att vattnets temperatur höjs till kokpunkten och den frigjorda gasen transporteras bort av ett vatten-ångflöde. Vattnet behöver ändå i många fall förvärmas innan det tillförs pannsystemet, för att minimera materialpåkänningar orsakade av temperaturvariationer.

Avgasningsfunktionen och uppvärmningen kombineras ofta i ett steg i matarvattenberedningen. Utrustningen består då av en tank, ofta trycksatt, med inbyggd avgasningsutrustning eller en avgasare monterad ovanpå tanken. Matarvattentanken är till en del fylld med vatten, ofta omkring halva volymen, resterande volym är under drift fylld med ånga. För att effektivisera avgasningen finfördelas vattnet före avgasningen i det ångfyllda utrymmet, antingen genom en dysa eller med hålförsedda plåtar. Inkommande spädvatten har syrehalt på 10 000-12 000 $\mu g O_2/l$ (ppb). Se Figur 143. Restsyrehalten i utgående vatten är normalt 5-20 $\mu g O_2/l$. Flödet av avdragsånga, som behövs för att föra bort gaserna, är ca 0,5-2 % av spädvattenflödet.



Figur 143. *Lösligheten för syre i vatten vid atmosfärstryck*

Figure 143. *The solubility of oxygen in water at atmospheric pressure*

Koncentrationen av syre i vatten bestäms av temperaturen och syrets partialtryck i gasfasen. Vid temperaturer upp till 40 °C är syrets partialtryck 0,2 bar och avtar sedan till noll på grund av vattenångans allt högre partialtryck. Det gör att lösligheten för syre i vatten avtar snabbt när temperaturen närmar sig 100 °C (kokpunkten).

Då ånga används för uppvärmning och avgasning tillförs denna i vattenvolymen och finfördelas med ett eller flera fördelningsrör, ofta kallat tystkokarrör. Den huvudsakliga avgasningen sker i avgasaren, men genomströmningen av ångblåsor i vattenvolymen sänker vattnets gasinnehåll ytterligare.

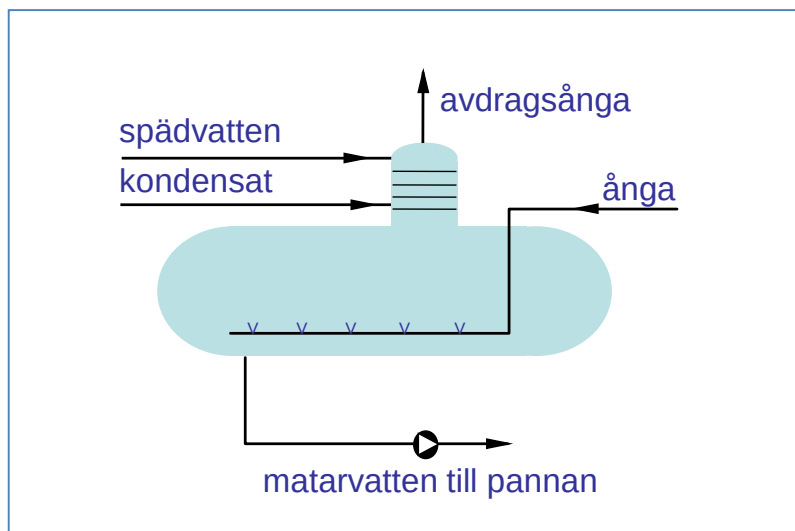
Då ånga inte finns tillgänglig kan vattnet värmas i en värmeväxlare före inloppet till avgasaren till en temperatur högre än vattnets kokpunkt i avgasaren. Vattnet leds sedan in i avgasaren genom en dysa varvid finfördelning av vattnet sker samtidigt som ånga bildas av det inkommande vattnets högre energiinnehåll.

Till matarvattentanken leds också återfört kondensat eller också blandas spädvatten och returkondensat i ett kärl varefter denna blandning leds till matarvattentanken. I de fall då kondensatet leds direkt till matarvattentanken är det viktigt att inloppet är beläget så att avgasning av kondensatet kan ske om så är nödvändigt.

I de fall kondensatet håller högre temperatur än matarvattnet bildas expansionsånga i matarvattentanken. Denna expansionsånga får inte väsentligt påverka genomkokningen av vattenvolymen. Om en sådan risk föreligger skall kondensatet ledas ned i vattenvolymen via ett eget tystkokarrör så att expansionsångan medverkar vid genomkokningen.

7.1.2 Kaskadavgasare

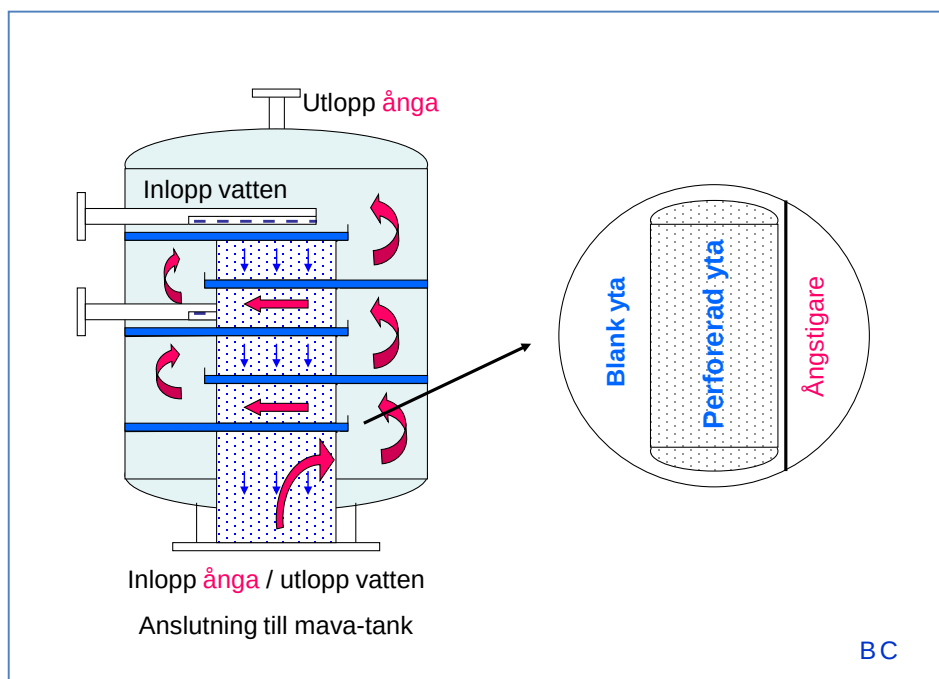
Den hittills mest använda principen för avgasning i Sverige är *kaskadavgasning*. Kaskadavgasaren kombineras oftast med matarvattentanken och placeras ovanpå denna. Se Figur 144. Variationer i utrustningarnas konstruktion förekommer, men driftprincipen är densamma. Avgasning med kaskadavgasare sker i de flesta fall vid övertryck.



Figur 144. *Matarvattentank med kaskadavgasare*

Figure 144. *Feed water tank with tray-type (cascade-type) deaerator*

Avgasaren innehåller rostfria/syrafasta plåtar, kaskadplåtar, som är monterade horisontellt. Kaskadplåtarna är försedda med sidokanter och över en del av ytan finns ett stort antal hål. Dimensioneringen av kaskadplåtar skall vara sådan att allt inkommande vatten endast passerar genom kaskadplåtarnas hål. Se Figur 145.



Figur 145. Kaskadavgasare

Figure 145. Tray-type (cascade-type) deaerator

Normalt tillförs ånga till matarvattentanken via ett s.k. tystkokarrör vilket är försett med ett antal hål jämnt fördelade i längdriktningen, och monterat strax ovanför botten i tankens längdriktning. Tystkokarröret lutar något i förhållande till horisontalplanet och har inloppssidan högst. Därigenom undviks alltför stora vibrationer, på grund av ångimplosioner, vid uppstart med kallt vatten i tanken. Namnet, tystkokarrör, syftar på den förhållandevis låga ljudnivån genom att effekten av ångimplosionerna har begränsats genom lutningen av röret.

När vattnet har passerat avgasaren och når tanken, är syrgasnivån normalt ej tillräckligt låg. Det är därför viktigt att matarvattnets uppehållstid i tanken är tillräckligt lång så att slutavgasningen blir effektiv. Vid ett lämpligt ångbehov för värmning av vattnet i avgasaren erhålls en genomströmning av ånga i matarvattenvolymen i tanken, varvid restavgasningen slutförs. Med en fullgod avgasning av matarvattnet ska restsyrehalten vara lägre än 0,01 mg/l O₂ (10 µg/l, 10ppb).

Ett litet ångflöde, avdragsånga, släpps ut till atmosfären från avgasarens topp tillsammans med de frigjorda gaserna från vattnet. Det är erfarenhetsmässigt mycket svårt att manuellt reglera in ett lämpligt flöde och därför skall en strypbricka finnas inmonterad. Strypbrickan dimensioneras efter in- och utflöden från tanken och temperaturen i dessa medier samt trycket i tanken.

En del av energin i avdragsångan kan återvinnas. Ofta sker värmeväxling mot spädvattnet. Då avdragsångflödet är kontinuerligt bör även flödet av det energiupptagande mediet vara kontinuerligt för att inte temperaturvariationerna skall ge för stora materialspänningar

eller ångimplosioner i värmeväxlaren. Observera vid materialval att avdragsången innehåller hög syrehalt, flera g/l.

Om anläggningen inte är i drift kontinuerligt, t.ex. stopp över veckoslut, är det fördelaktigt att en ventil på avdragsångledningen stängs för att hålla uppe tryck och temperatur så länge som möjligt i matarvattentanken. Ventilen måste dock kopplas till en annan funktion så att den alltid är öppen då inkommande vatten skall avgasas efter stoppet.

Avgasarens placering på tanken har betydelse för strömningsbilden i tanken. Den kan därmed ha betydelse för avgasningen genom att uppehållstiden för vattnet i tanken blir för kort om inte hela vattenvolymen utnyttjas.

För höga restsyrehalter kan bl.a. bero på för lågt tryck och för låg temperatur i matarvattentanken. Orsaken kan också vara för litet avdragsångflöde, defekta kaskadplåtar eller tystkokarrör. Regleringen av tillflöde och värmeånga skall justeras in så att ett ständigt övertryck i tanken säkras.

7.1.3 *Dysavgasare*

I dysavgasaren finfördelas inkommande vatten i ångfasen, oftast med endast en dysa. Vattnet förvärms till strax under kokpunkten vid rådande tryck. Då dysan inte kräver stort utrymme i höjddled monteras den direkt i ångrummet i matarvattentanken. Om flödet till dysan varierar inom ett snävt intervall kan en enkel dysa utan regleringsmöjlighet användas. Då stora flödesvariationer förekommer används en dysa med variabel öppning. Detta åstadkoms med hjälp av en självverkande anordning som håller vattentrycket före dysan konstant.

Matarvattentanken är ofta indelad i en avgasningsdel och en förrådsdel genom att skärmlåtar finns inmonterade, se Figur 146. I allt väsentligt är funktionen i övrigt likadan som kaskadavgasarens. Restavgasning sker i förrådsvolymen.



Figur 146. *Matarvattentank med dysavgasare*

Figure 146. *Feed water tank with spray-type deaerator*

7.1.4 *Expansionsavgasare.*

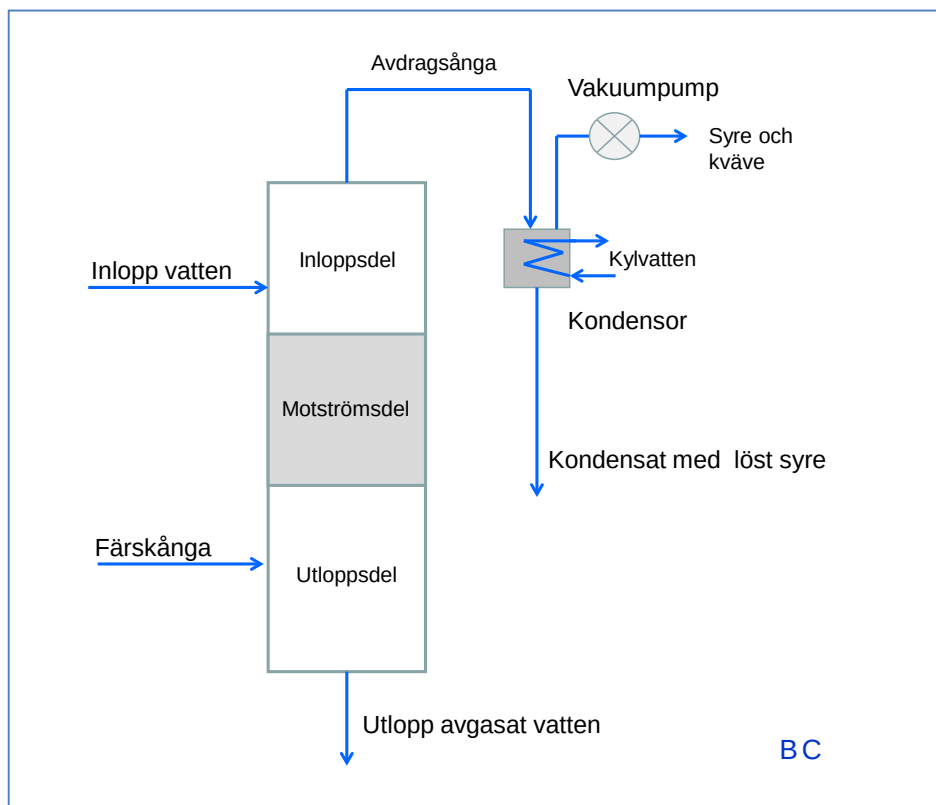
I expansionsavgasaren förvärms det inkommande vatten till en högre temperatur än den kokpunkt som motsvarar trycket i kärlet. Då kommer en del av vattnet att förångas. Ångan som då bildas kallas expansionsånga och medverkar till att finfördela vattendropparna och transportera bort de frigjorda gaserna.

Expansionsavgasaren används oftast då ånga inte finns tillgänglig, t.ex. i system med hetvattenpannor. Värmningen av vattnet till avgasaren kan göras genom värmeväxling mot pannvatten och hetvatten i kombination med el-patroner.

7.1.5 Vakuumavgasning

Vakuumavgasning används då vattnet, av något skäl, bör värmas så lite som möjligt.

För vakuumavgasning kan de ovan beskrivna apparaterna användas. De måste kompletteras med en pump som upprätthåller vakuum genom att transportera bort gaserna och vattenånga. En kondensor kan installeras före pumpen för att avlasta dess kapacitet. Se Figur 147.



Figur 147. Vakuumavgasare med kondensor före pumpen

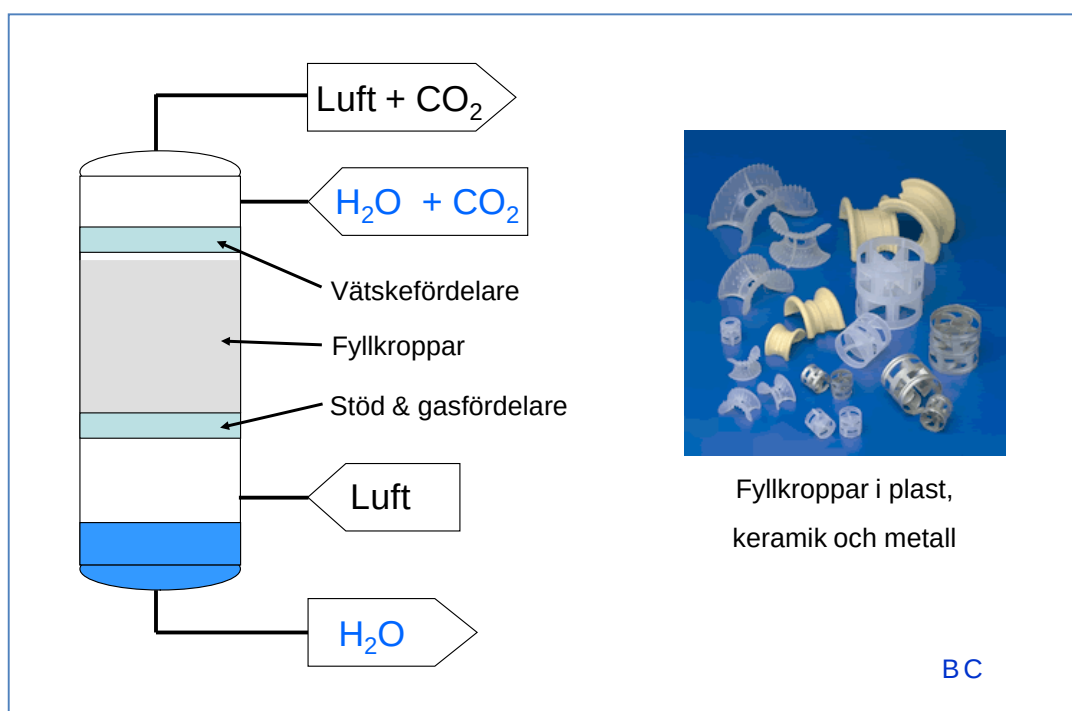
Figure 147. Vacuum deaerator

Likaså behövs en pump som transporterar bort det avgasade vattnet. Alternativt dras utloppet ned i ett så kallat "barometriskt ben".

Vid användning av kaskad- eller dysavgasare måste vattenånga tillföras nedifrån för att fullgod effekt skall erhållas.

7.1.6 Kolsyreavdrivare

En separat avdrivare för koldioxid, oftast kallad kolsyreavdrivare, kan användas efter en stark katjonbytare då kolsyra förekommer i stort sett enbart som CO_2 . Denna består av en kolonn innehållande någon form av fyllkroppar med en skikthöjd av 2-3 meter. Vattnet strilar ner genom kolonnen och möter en gasström, som blåses in underifrån med en fläkt. Vanligtvis används vanlig luft, som innehåller ca 0,36 % CO_2 . Fullständig avdrivning kan därför inte ske, i praktiken nås en resthalt av 4-6 mg/l. Koldioxidavdrivningen sker utan någon speciell förvärmning av vattnet. Se Figur 148.



Figur 148. Fyllkroppskolonn för koldioxidavdrivning

Figure 148. Carbon dioxide stripper and random packing

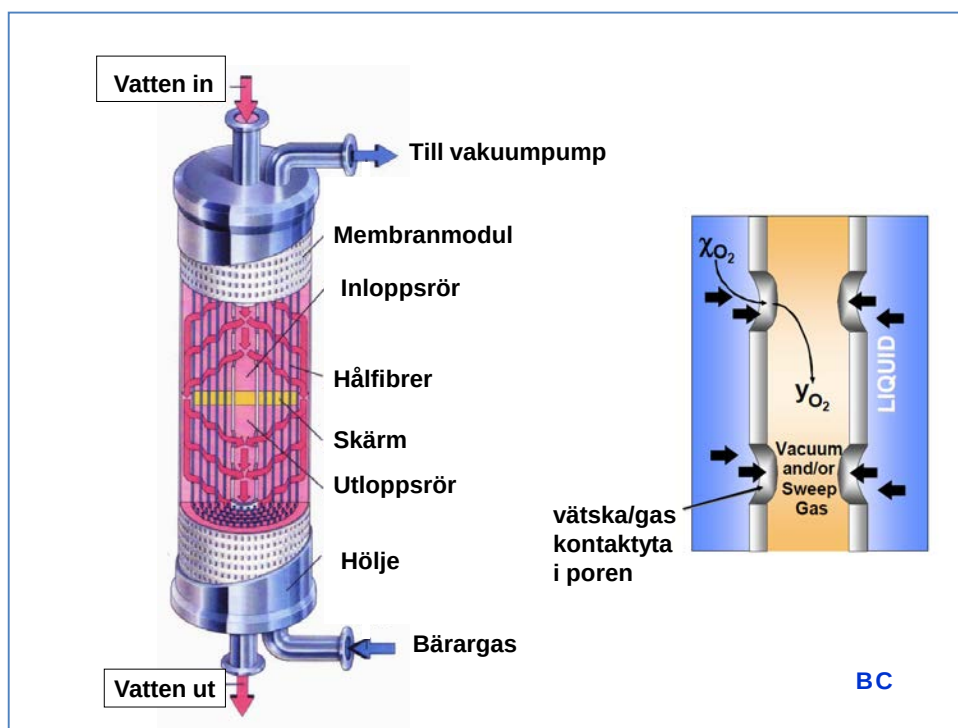
Denna typ av utrustning kan även användas för avskiljning av ammoniak vid t.ex. rening av rökgaskondensat. Se kapitel 14.2.2.1.5 om ammoniakavskiljning vid rening av rökgaskondensat.

Vid många anläggningar används även membranavgasare för att avlägsna koldioxid ur vatten. Det gäller främst i vattenreningsanläggningar byggda med membranteknik. Exempel på placering av dessa är mellan RO- och EDI-aggregaten i en totalavsaltningsanläggning eller efter RO-aggregatet i en rökgaskondensatanläggning. Se kapitel 7.1.7

7.1.7 Membranavgasare

I de metoder som beskrivits ovan är gasfas och vattenfas i direkt kontakt med varandra. Metodernas effektivitet är beroende av att en stor kontaktarea mellan faserna skapas i utrustningen och av att diffusionsvägen i vattnet är kort. Vattenfasen slås sönder i droppar eller strilar, vilket kan leda till att utrustningen får en stor volym. Komplikationer kan också uppstå vid avskiljningen av droppar från gasströmmen.

I en membranavgasare håller ett membran vattnet fysiskt åtskilt från gasfasen men tillåter överföring av komponenter i gasform från ena sidan till den andra. Genom membranets konstruktion kan stora kontaktareor och korta diffusionsvägar i vattnet ordnas i en begränsad volym, som i övrig membranteknik. Figur 149 visar en principskiss av ett kontaktmembran och en förstoring av hålfibers porer.



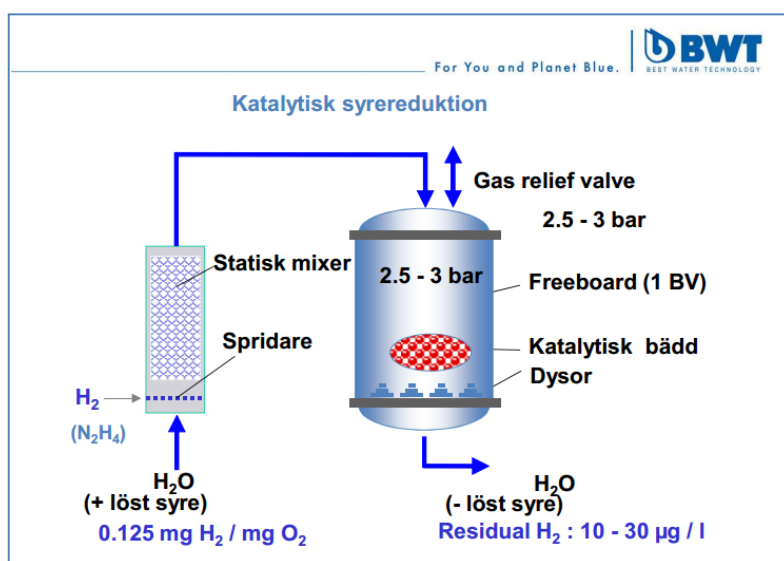
Figur 149. Membran för avgasning av vatten från Liqui-Cel®

Figure 149. Liqui-Cel® Membrane Contactor used for degassing liquids

Membranet får inte vätas av vattnet och utförs därför i t.ex. polypropen. Porstorleken är ca 0,05 μm . Membranet kan utföras som hålfibrer eller som lindade folier. På gassidan kan vakuum (avgasning) eller en inert drivgas (avdrivning) användas för att skapa förutsättningar för överföringen av de lösta gaserna. Drifttemperaturen är begränsad till högst ca 50 °C.

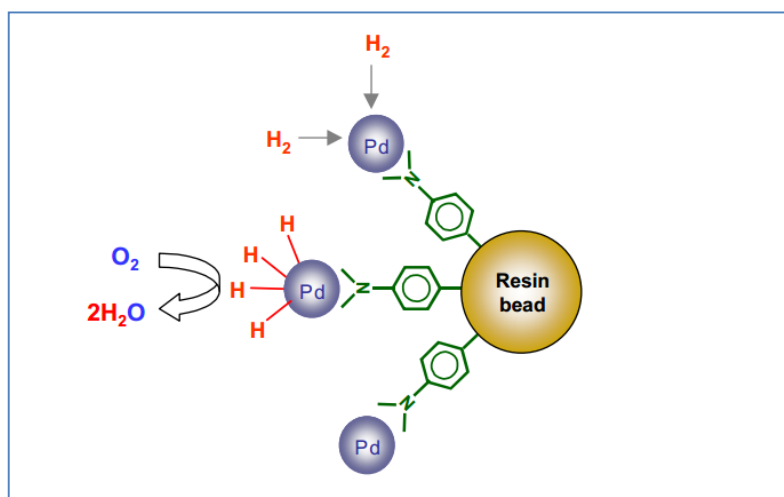
7.1.8 Katalytisk avgasning

Katalytisk avgasning är en form av kemisk avgasning. Apparaturen består av en sluten behållare för katalysator i form av palladium, som fällts ut på en katjonbytare. Vätgas tillsätts vattnet via en dysa i inloppsledningen före behållaren. Med katalysatorns hjälp reagerar vätgas med den lösta syrgasen och bildar vatten. Metoden kan användas vid mycket låg temperatur. För att minska risken med vätgas i det avgående vattnet monteras ett avgasningssystem efter katalysatorbehållaren. Metoden är enkel och effektiv, men risken med vätgashantering är ej helt utredd. Se Figur 150 och Figur 151.



Figur 150. Katalytisk syrereduktion

Figure 150. Catalytic oxygen reduction



Källa: BWT

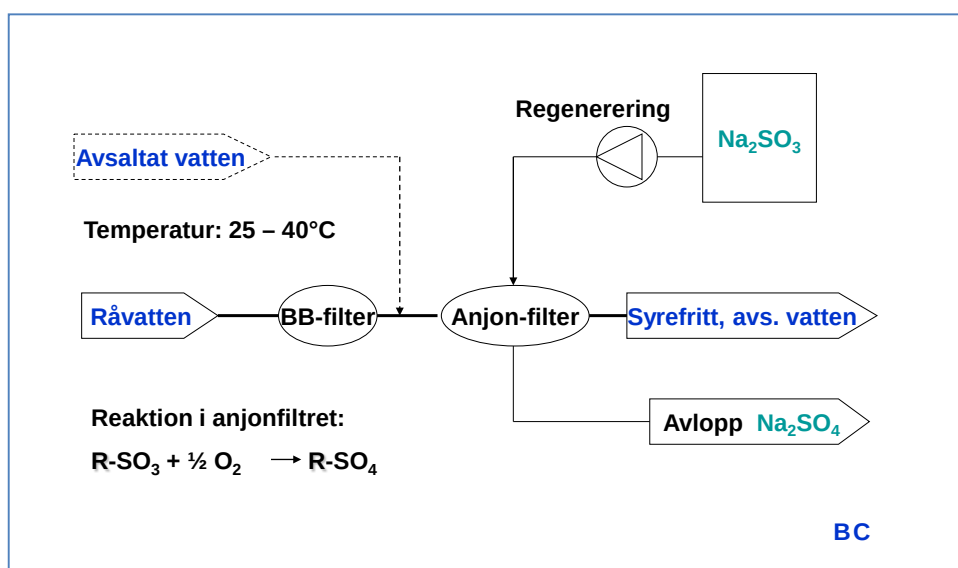
Figur 151. Katalytisk syrereduktion

Figure 151. Catalytic oxygen reduction

7.1.9 Annan kemisk avgasning

Kemisk avgasning kan göras med sulfitjoner som oxideras av luftsytet till sulfatjoner. Vattnets salthalt stiger något.

Alternativt laddas en anjonbytare med sulfitjoner. I drift oxideras dessa till sulfatjoner, som stannar kvar på jonbytaren. Salthalten förblir oförändrad. Detta alternativ förutsätter ett avsaltat vatten in till jonbytaren. Figur 152 visar hur en sulfitregererad jonbytare kan matas antingen direkt med avsaltat vatten eller råvatten via ett blandbäddsfiltet.



Figur 152. Syrereduktion med sulfitregererad jonbytare

Figure 152. Oxygen reduction using a sulfite regenerated ion exchanger

Oxidationshastigheten är starkt temperaturberoende, drifttemperaturen rekommenderas vara minst 35 °C.

Se även kapitel 7.3.1.2.4 om syrereducerande kemikalier.

7.2 Avblödning, bottenblåsning

Vid ångproduktion blir föroreningar som inte är flyktiga kvar i vattenfasen. För att koncentrationen av de lösta och fasta ämnena i pannvattnet inte skall överskrida det aktuella riktvärdet, måste dessa ämnen i lämplig grad avlägsnas. Detta sker genom att tappa av en del pannvatten ur pannan, vilket kallas för utblåsning. Utblåsningen kan ske kontinuerligt eller diskontinuerligt. Kontinuerlig utblåsning görs i huvudsak för att reglera salthalten och avtappningen sker från domen eller en av falltuberna. Diskontinuerlig utblåsning, som vanligen kallas chockblåsning eller bottenblåsning, har som huvudsaklig uppgift att avlägsna slam och partiklar (korrosionsprodukter). Detta görs vanligtvis från en eller flera samlingslådor i nedre delen av pannan. I många fall tillämpas båda dessa förfaringssätt.

Det gränsvärde som först uppnås för pannvattnet bestämmer hur stort flöde pannvatten som skall blåsas ut från pannan. Det är inte ovanligt att gränsvärden överskrids för flera ämnen samtidigt.

I anläggningar med avhärdat spädvattnet bestäms utblåsningsgraden:

- vanligtvis av p-alkaliteten
- av kiselsyrahalten om kiselsyrahalten är hög i spädvattnet
- halten organiskt material om oflockat ytvatten används
- i samband med uppstart, efter stopp, ofta av mängden korrosionsprodukter (Fe, Cu)

I anläggningar med avsaltat spädvatten bestäms utblåsningsgraden:

- vanligtvis av kiselsyrahalten
- i samband med uppstart, efter stopp, ofta av mängden korrosionsprodukter (Fe, Cu)

Oavsett spädvattenkvalitet och panntyp styrs ofta utblåsningen av konduktiviteten i pannvattnet. Det är dock inte konduktiviteten i sig som är avgörande utan av erfarenhet vet man att t.ex. en viss p-alkalitet eller kiselhalt motsvaras av en viss konduktivitet.

Utblåsningen i procent av mängden matarvatten kan beräknas med hjälp av en av följande approximativa formler:

$$B_m = \frac{c_m}{c_p} \times 100 \%$$

$$B_a = \frac{c_s}{c_p - c_s} \times 100 \%$$

- där:
- B_m** - utblåsning i %, räknat på mängden matarvatten
 - B_a** - utblåsning i %, räknat på mängden utgående ånga, som inte återvinns som kondensat
 - c_p** - koncentration av visst ämne i pannvatten
 - c_m** - koncentration av samma ämne i matarvatten
 - c_s** - koncentration av samma ämne i behandlat spädvatten
 - B_a** är alltid högre än **B_m**.

Utblåsningen beräknas säkrast genom bestämning av natriumhalt eller kiselsyrahalt i pannvatten och matarvatten. I pannor med avhärdat spädvatten kan även kloridhalten vara ett alternativ. För en ungefärlig bedömning kan värdena på specifika konduktiviteten användas, om pannvattnets konduktivitet bestäms i neutraliserat prov. Ett korrekt värde erhålls dock inte eftersom jonernas ekvivalentledningsförmåga avtar med ökad jonhalt.

Då spädvattnet är totalavsaltat kan ovanstående formel ge osäkra beräkningar om halterna av de olika ämnena i matarvattnet är mycket låga. Här är det bäst att använda natrium- eller kiselhalten i beräkningen.

Kontinuerlig utblåsning kan ske med värmeåtervinning. Vid låga panntryck och små mängder värmeväxlas det utblåsta vattnet ofta direkt mot spädvattnet. Vid höga tryck och/eller stora mängder expanderar först det utblåsta vattnet i ett expansionskärl. Expansionsången leds till matarvattentanken eller till ett lågtrycksångnät. Vattnet från expansionskärlet kan värmeväxlas mot spädvatten eller i vissa fall fjärrvärmevatten. Observera att detta förutsätter ett flöde av kylmedium (spädvatten) på andra sidan av värmeväxlaren.

Den kontinuerliga konduktiviteten kan med fördel styras mot t.ex. konduktiviteten i pannvattnet eller en fast proportion av ångproduktionen.

Chockblåsningen företas för att avlägsna slam från de delar av pannan, där partiklar kan ansamlas, t.ex. fördelningslådor. Antalet chockblåsningar får anpassas till järn- eller slamhalten i varje enskilt fall. Då vattenrörspannor chockblåses är det viktigt att tiden för öppning av utblåsningsventilen är kort med tanke på risken för cirkulationsstörningar i pannan. En eldrörspanna är inte lika känslig för cirkulationsstörningar, varför ventilerna för chockblåsning av en eldrörspanna kan vara öppna längre.

Om det är svårt att hålla pannvattenkvaliteten med enbart chockblåsningar skall en ventil för kontinuerlig utblåsning installeras. Chockblåsningen kan också styras med en timer för att på så sätt möjliggöra en frekvent utblåsning av en mindre mängd pannvatten.

7.2.1 Återvinning av bottenblåsningsvatten

Bottenblåsningsvatten från pannor som inte doseras med fosfat kan återanvändas som spädvatten till fjärrvärmesystemet. En förutsättning är dock att ett mekaniskt filter installeras för avskiljning av de korrosionsprodukter som finns i pannvattnet. Det mekaniska filtret bör ha en filtreringsgrad på 1 µm för att ge en bra avskiljning av magnetit. Det är också viktigt att systemet för återvinning utformas så att vattnet inte syresätts.

Ammoniak medför en risk för korrosion på koppar. En förutsättning för korrosion på koppar i fjärrvärmesystem är en ammoniumhalt över 10 mg/l i syrefri miljö. Då syre finns närvarande accelererar korrosionen redan vid lägre ammoniumhalter. Vid inläckage av syre finns alltså risk för korrosion men det gäller även kolstål. Risken för kopparkorrosion är mycket liten i ett fjärrvärmesystem med syrefritt vatten och ett pH-värde på 9,5-10,0 samt en ammoniumhalt <5,0 mg NH₄/l.

Bottenlåsningssvatten från pannor som doseras med fosfat bör inte användas som spädvatten till fjärrvärmesystemet. Fosfaten reagerar med hårdhet i fjärrvärmevattnet och skapar en volym slam som är svår att avlägsna ur systemet. Bildningen av ett slam innebär också en ökad risk för beläggningar i värmeväxlarna.

7.3 Kemikaliedosering till vatten-ångcykeln

Det finns en mängd tillsatsmedel som kan doseras i syfte att förbättra vattnets kvalitet i vatten-ångcykeln. Avsikten är att förbättra systemets funktion och tillgänglighet samt förebygga korrosion och beläggningar. Kemikalier kan också behövas för att ställa in lämpligt pH-värde, ge mer stabil vattenkemi vid driftvariationer, ge nödvändigt stöd vid tillfälliga inläckage, avställning, uppstart osv.

Kemiska tillsatsmedel skall emellertid inte användas för att ersätta eller underlätta optimering av exempelvis jonbyte, termisk avgasning, kondensatfiltrering.

Förenklat kan sägas att skador på materialytor kan härledas till antingen korrosion eller beläggningar. Korrosion innebär materialförlust och är en irreversibel process, medan beläggningar ofta kan avlägsnas och är därmed en reversibel process.

Dosering av kemikalier görs för att optimera vattnets sammansättning i enlighet med de specifika krav som ställs på anläggningen. Kemikalierna kan inriktas på antingen beläggningskontroll eller korrosionskontroll, men ofta föreligger här synergier, exempelvis ger renare ytor lägre korrosionshastighet, vilket minskar mängden korrosionsslam. Här beskrivs några vanliga kemikalier och deras huvudsakliga funktion och användningssätt. Vid val av kemikalier måste hänsyn tas till såväl nedbrytningsprodukter som till hantering, där både Kemikalieinspektionen såväl som Arbetsmiljöverket har synpunkter.

7.3.1 Problemområden

Vatten-ångsystem är vanligtvis mer eller mindre slutna kretsar där endast små mängder spädvatten behöver tillföras. Eftersom vattnet genomgår fasövergång och koncentrationsförändring föreligger svårigheter att ställa in lämplig vattenkemi i alla systemdelar samtidigt.

Ånga och kondensat är i teorin rent vatten med konduktivitet 0,055 $\mu\text{S}/\text{cm}$ vid 25°C men i praktiken tillkommer både överbäring av salter, avgång av sura gaser och kiselsyra jämte flyktiga alkaliseringsmedel. Dessutom tillkommer korrosionsprodukter, huvudsakligen från kondensatsystemet. Ett specialfall är genomströmningspannor utan ångdom där allt matarvatten går ut i ångsystemet.

Pannvatten innehåller alla komponenter från matarvattnet, men är koncentrerat 5-500 gånger. Alla komponenter förekommer inte i samma proportioner som i matarvattnet. En del bryts ned, reagerar med kemikalier, fälls ut som beläggningar eller avgår i gasform, även korrosionsprodukter tillkommer här.

Matarvatten består av returkondensat och spädvatten, jämte eventuella kemikalier. Det skall vara renat från oönskade salter, gaser, organiskt material, partiklar och kolloider,

men dessa processer är inte hundra procentiga. Ju sämre vattenrening, desto mer kemikalier går det åt, och desto mer pannvatten måste blåsas ut.

Spädvatten behandlas med olika reningsmetoder för att anpassas till anläggningsspecifika krav. Svårigheter föreligger att hålla jämn vattenkvalitet i systemet trots variationer i flöde, råvattenkvalitet, vid filterbyte och andra avvikelser. Kemikalier kan behöva doseras efter andra variabler än flöde.

7.3.1.1 Beläggningskontroll

Kemikalier kan doseras för att antingen förhindra att beläggningar bildas eller för att lösa upp redan bildade beläggningar. Flera beläggningsinhibitorer har båda dessa egenskaper.

Fosfater används flitigt för restavhårdning vid låga tryck, i enstaka fall även för total avhårdning där jonbytare saknas. Polyfosfater är då att föredra eftersom dessa dels har en tröskeffekt (halten behöver endast komma över en förhållandevis låg tröskel för att ge god effekt) och inte ger slam i matarvattentanken, dels fäller hårdhet i pannan genom omvandling till ortofosfat. Dosering med fast alkaliseringsmedel måste göras till erforderligt pH för att fällning skall kunna ske. Verkansättet är att ortofosfat reagerar med hårdhetsbildare i vattnet, exempelvis kalciumkarbonat, och bildar olöslig kalciumhydroxylapatit. Metoden ger slam som måste dispergeras för att inte ge pålagringar. Vid högtrycksanläggningar används fosfat främst för att ge stabilare pannvattenkemi och hindra lutsprödhet.

Exempel på ortofosfater är trinitrat-, dinatrium- och mononatriumfosfat. De skiljer sig inbördes åt genom olika pH-värden. Exempel på polyfosfater är hexametafosfat och tripolyfosfat. Utsläpp av fosfat från pannvattenbehandling kan ibland vara ett miljöproblem då fosfat är ett växtnärsalt.

Fosfonater utgörs av organiskt bunden fosfat och används som tröskelinhibitorer, dvs halten av ämnet behöver endast komma över en förhållandevis låg tröskel för att ge god effekt. Metoden utvecklades först av tvättmedelsindustrin i syfte att minska användningen av fosfat. Verkansättet är att de små mängder av fosfonat som kommer in i beläggningen tillsammans med hårdheten ger sådan störning av kristallmönstret vid utfällningen att inga större sammanhängande lager av hårdhet kan utbildas. Det slam som istället bildas är i allmänhet så fint att det inte kan uppfattas med blotta ögat.

Exempel på fosfonater är aminotrismetylenfosfonat (AMP_0), hydroxietandifosfonat (HEDP), fosfonobutankarboxylat. Den senare är egentligen en kombination av fosfonat och karboxylat, samma aktiva substans som i polyakrylat.

Polyakrylat hör till gruppen karboxylsyror och är precis som fosfonat en svag anjon. Den reagerar således med vattnets katjoner, exempelvis kalcium, järn och koppar. Det är också fråga om mycket stora molekyler, som genom att samla upp många små partiklar gör dessa lättare att blåsa ut än andra föroreningar såsom fosfatslam. Polyakrylat kan också tränga in i och mjuka upp eller spränga loss redan utbildade hårda beläggningar, varför en viss försiktighet tillråds vid användningen.

Exempel på polykarboxylater är natriumsalter av polyakrylsyra, polymetakrylsyra, polymaleinsyra. Genom att variera molekylstorlek och laddningstäthet går det att skraddarsy polykarboxylater för att maximera verkan mot exempelvis gips, fosfatslam eller järnoxid osv. Natriumpolyakrylat används med gott resultat för att bygga upp ett tätare och mer homogent magnetitskikt i samband med 50-timmarsdrift efter betning av pannor.

Sulfonat används där extra god beläggningskontroll är nödvändig. Till skillnad från fosfonat och akrylat är sulfonat en stark anjon och binder därför alla katjoner och ger fullständig kemisk avhärdning. Jämför med katjonfilter i svag respektive stark form. Sulfonat sampolymeriseras ofta med polystyren som i en jonbytare, men uppträder fortfarande som ett lösligt salt i vattnet, även när det tagit upp hårdhet.

Kelatbildare är starka avhärdningsmedel som ger lösliga komplex med hårdhet och metaller i vattnet. De måste doseras i exakt stökiometrisk mängd och blir relativt dyrbara att använda vid stor mängd hårdhet. För låg dos ger inte fullständig avhärdning, medan för hög dos kan ge omfattande materialförlust på panntuber. Kontrollerad dosering med natriumnitritotriacetat (NTA) eller natriumetylendiamintetraacetat (EDTA) kan tillämpas som en ”kontinuerlig betning” för att kontrollera magnetittillväxten. Denna tillämpning har förekommit i USA men är inte något som kan rekommenderas med tanke på riskerna.

Lignin är ett naturligt ämne som raffinerats från vedämnet i skogsråvara och innehåller högre eller lägre halter av karboxyl- och sulfonatgrupper. Lignosulfonat är ett sådant dispergeringsmedel som kan innehålla upp till 2 % aktiv sulfonat. Användningen ger relativt hög organisk belastning och begränsas därför till lågtrycksanläggningar.

Tanniner är garvsyror, som förutom dispergerande förmåga också besitter reduktionsförmåga, speciellt i alkalisk miljö. Äldre produkter gjordes av barkextrakt och kunde ibland ge okontrollerad slamavlagring. Senare produkter utgår från hydrolyserbara sockerestrar, som kan sönderdelas till pyrogallol och pyrokatekol och är fullständigt vattenlösliga. Genom sitt låga bidrag till konduktiviteten har användningen vid elektrodpannor ökat.

7.3.1.2 Korrosionskontroll

Korrosion kan uppträda på många olika ställen i vatten-ångcykeln. De flesta doseringsmedel kan dock endast motverka korrosionen enstaka delar. Exempelvis kan fasta alkaliseringsmedel höja pH-värdet i matarvatten och pannvatten men inte påverka ånga och kondensat. Reglering av alkaliteten i syfte att ställa in optimalt pH-värde för en viss reaktion är väsentligt för kontroll av både korrosion och beläggning. Reduktion av syre fordras i flera fall antingen för att ta bort hela syremängden där avgasare saknas eller är defekt, eller vanligare för restsyreborttagning. Målet är att hålla en svagt reducerande miljö för att kunna styra kemin till passivitetsområdet i ett Pourbaix-diagram för stålytan, se Figure 242. Observera att pH-värdet i det varma vattnet inte är detsamma som vid prov på rumstempererat vatten.

För snabbare passivering efter en betning kan en kontrollerad oxidation ge bra effekt, dosering av syrgas, väteperoxid eller nitrit kan då användas. För att effektivisera korrosionskontrollen används med fördel även dispergeringsmedel, som förbättrar förutsättningarna för att bygga upp täta passiva ytskikt.

7.3.1.2.1 Fasta alkaliseringsmedel

För att skydda pannan mot korrosion doseras normalt ett icke flyktigt alkaliseringsmedel till pannvattnet. Fasta alkaliseringsmedel följer inte med i ångfasen.

Natriumhydroxid, kaliumhydroxid, litiumhydroxid är fasta alkaliseringsmedel som stannar i pannvattnet, ångan går då att använda även i samband med livsmedel. Natriumhydroxid doseras ofta som flytande natronlut.

7.3.1.2.1.1 Trinatriumfosfat

Trinatriumfosfat är svagare basiskt och räcker ofta till att ensamt ge både rätt pH-värde och lagom fosfatöverskott. Flera kommersiella kvaliteter av trinatriumfosfat duger inte för matarvattenbehandling då de innehåller för mycket föroreningar. Endast rena fosfatlösningar bör användas.

Fosfatkemi används idag i uppskattningsvis nära två tredjedelar av samtliga större dompannor världen runt. I Sverige är andel pannor med fosfatkemi ännu större. Orsaken är främst natriumfosfatets gynnsamma inverkan vad det gäller:

- **Pannvattnets pH-värde och buffertförmåga.** Sammansättningen av pannvattnet intill tubytan kan skilja sig avsevärt från sammansättningen av pannvattnet i övrigt. En anledning är anrikning då vattnet förångas vid tubytan. Anrikningen kan medföra en kraftig förändring av det lokala pH-värdet vid tubytan och därmed orsaka skador. Inläckage av salthaltigt vatten, som salt eller bräckt vatten eller kyltornsvatten, medför vanligtvis surt pH. Andra vatten kan medföra en kraftigt alkalisk miljö.

Ett alkaliseringsmedels buffertkapacitet är av stor betydelse vad det gäller möjligheten att undvika risken för aggressiv miljö intill tubytan, framför allt i förångartuber med kraftiga beläggningar. En av de största fördelarna med fosfatbehandling är att den normalt medför en god buffertkapacitet hos pannvattnet.

- **Risken för utfällning av pannsten.** En av de största orsakerna till att man en gång i tiden införde fosfatkemi är just fosfatets förmåga att bilda kalcium- och magnesiumfosfat som lättare avlägsnas via bottenblåsningen än motsvarande karbonater (pannsten). Detta kan fortfarande vara av betydelse i anläggningar där resthårdhet skulle kunna förekomma. Den ökande användningen av totalavsaltat matarvatten har dock medfört att detta vanligtvis inte längre är det viktigaste motivet att dosera fosfat.
- **Löslighet av aggressiva salter i ångan.** Fosfatets inverkan på lösligheten av aggressiva salter i ångan är av intresse med tanke på vad som kan hända i kondensat- och turbinsystemet. Närvaro av fasta alkaliseringsmedel som natriumfosfat och natriumlut medför att aggressiva föroreningar i pannvattnet som klorider och sulfater i första hand förekommer som natriumsalter. Lösligheten av dessa natriumsalter i ånga är mycket låg också vid det höga trycket i domen. Den normalt dominerade mekanismen för transport av klorider och sulfater till ångan är därför en mekanisk överbäring med droppar av pannvatten.

Vid AVT-kemi (d.v.s. då enbart ammoniak och/eller aminer doseras) förekommer klorider och sulfater huvudsakligen som relativt lättflyktiga ammoniumsalter vilket innebär att överbäringen p.g.a. lösligheten i ångan kan vara av större betydelse än överbäringen p.g.a. förekomsten av droppar av pannvatten i ångan.

7.3.1.2.1.2 Fosfat eller lut

Det finns olika syn på vilket alkaliseringsmedel som är bäst att dosera till pannvattnet. I Danmark förordar Fælleskemikerne dosering av lut. I svenska anläggningar är det dock inte speciellt vanligt med lutdosering till pannvattnet, endast ett fåtal större kraftvärmeverk med höga panntryck doserar lut.

Det vanligaste doseringsprogrammet i svenska anläggningar är att dosera fosfat till pannvattnet och ammoniak till matarvattnet. Fosfatdoseringen kan styras mot konduktiviteten i pannvattnet medan ammoniakdoseringen styrs mot konduktiviteten i ånga eller kondensat.

Det finns för och nackdelar med båda behandlingsmetoderna.

En fördel med lutdosering är att det går att mäta sur konduktivitet på pannvattnet vilket ger en bra indikation på eventuella inläckage i t.ex. kondensatsystemet. Överbäring av pannvatten till ångan kan dock inte detekteras med sur konduktivitet i mättad ånga vilket är fallet vid fosfatdosering. Hydroxidjonerna neutraliseras i den sura katjonbytaren vilket inte fosfatjonerna gör. Vid anläggningar med natriumanalysatorer på mättad ånga har detta dock mindre betydelse.

Vid lutdosering eller då endast ammoniak doseras till systemet finns en ökad risk för alkalisk korrosion vid lokal uppkoncentrering av pannvattnets salter i värmebelastade spalter, porösa beläggningar och vid ångfilm på tubytor i ång- och turbinsystem. Vid fosfatdosering blir pH-värdet på indunstningen lägre och inte skadlig för systemet.

I pannor med hög värmebelastning som doseras med fosfat finns det risk för betydande fosfatutfällningar på tubväggarna. Vid höga tryck och värmebelastningar kan en s.k. hide-out effekt erhållas, d.v.s. en uppkoncentrering av fosfatet mot den värmebelastade ytan. I detta förlopp deltar ej hårdheten. Av denna orsak brukar fosfat ej doseras vid tryck över 160 bar. Se kapitel 4.4.2 om hide-out.

Ur arbetsmiljösynpunkt är fosfaten att föredra då stänk av lut kan ge allvarliga personskador.

7.3.1.2.1.3 Andra alternativ

Natriumkarbonat och natriumbikarbonat kan i vissa fall användas för alkalisering. De är relativt ofarliga att handskas med, men bildar vid uppvärmning natriumhydroxid i pannvattnet. Dessvärre frigörs också koldioxid som gör ångan mer aggressiv.

Trietanolamin kan jämföras med fasta alkaliseringsmedel genom sin höga kokpunkt 325 °C, men försämrar passiveringen och ger hög organisk belastning.

Flyktiga aminers fördelningskoefficient medger, framförallt vid lägre panntryck, att vätskefasen får en viss pH-höjning, medan man vid högre panntryck ser större effekt av nedbrytning till organiska syror.

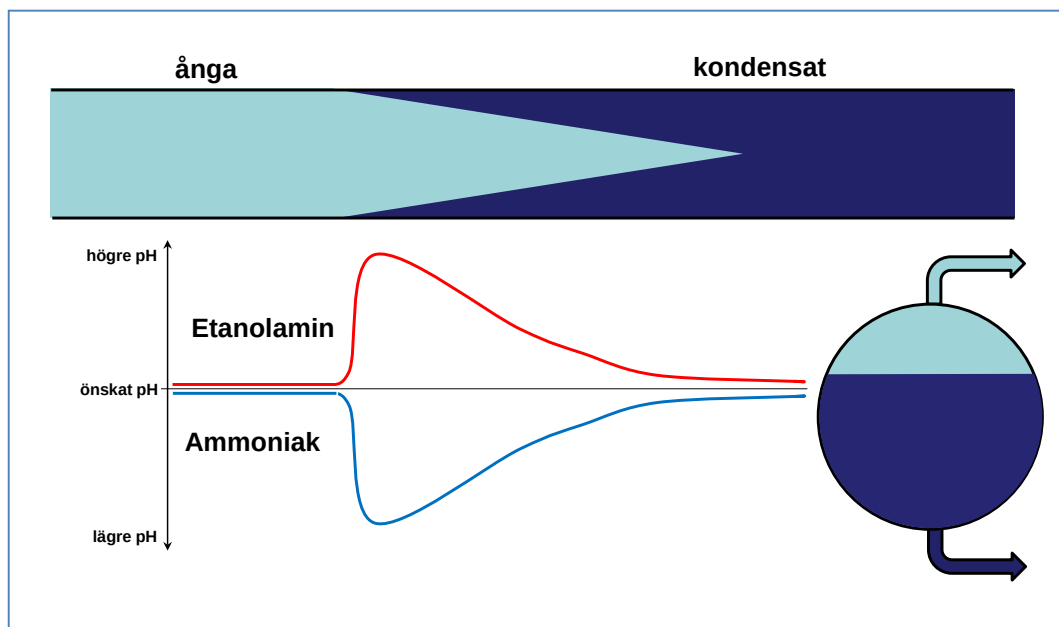
7.3.1.2.2 Flyktiga alkaliseringsmedel

Flyktiga alkaliseringsmedel används för att pH-justera ånga och kondensat genom att neutralisera koldioxid och i viss mån även organiska syror. De flyktiga alkaliseringsmedlen övergår till ångfasen i högre eller lägre grad, beroende på medlets distributionsförhållande, och kondenserar ut när ångan återgår till vattenfas.

Kokpunkt, distributionsförhållande mellan ång- och vätskefas, specifik alkaliseringsförmåga och termostabilitet är viktiga faktorer att värdera. Distributionsförhållandet (fördelningskoefficienten) anger hur stor del av ämnet som föreligger i ångfas jämfört med i vätskefas och skall beräknas för det tryck och den temperatur som råder där man bäst behöver skyddet. Det är nödvändigt att kokpunkten är så låg att ämnet kan följa med ångan ut, men en låg kokpunkt ger också arbetsmiljöproblem.

Alkaliseringsförmågan kan vara en ekonomisk fråga, men alltför stora och komplicerade molekyler tillför onödigt mycket organiska ämnen i förhållande till sin förmåga att neutralisera koldioxid.

Figur 153 visar hur pH-värdet varierar i det första kondensatet i en kondensator beroende på vilket alkaliseringsmedel som doseras. Här förekommer både vatten (kondensat) och ånga och beroende på alkaliseringsmedlets distributionsförhållande löser sig en större eller mindre mängd i vattenfasen.



Figur 153. *pH i det första kondensatet och beroende på aminens distributionsförhållande*

Figure 153. *pH in the first condensate relative to the amine distribution ratio*

Beroende på vilket alkaliseringsmedel som doseras kan pH-värdet bli mycket lågt alternativt mycket högt lokalt, medan det ligger på en bra nivå där det bara finns ånga eller kondensat. Genom att blanda flera aminer med olika distributionsförhållande kan ett tillfredsställande pH-värde erhållas i hela systemet.

Ammoniak används oftast i form av 25 % ammoniakvatten och är ett sedan länge etablerat alkaliseringsmedel. Trots stark lukt, låg kokpunkt 38°C och restriktioner kring hantering och lagring är det ofta ett tekniskt och ekonomiskt bra alternativ, ensamt eller i kombination med andra aminer. Skador på koppar och dess legeringar förekommer vid hög dosering, vilket ofta är nödvändigt p.g.a. ammoniaks ogynnsamma distributionstal. Vid högtrycksanläggningar är det ibland enda alternativ p.g.a. sin goda termostabilitet.

Alkoholaminer, t.ex. etanolamin, propanolamin, butanolamin och deras många relaterade varianter såsom monoisopropanolamin, metoxypropylamin, dimetylamoetanol, dimetylaminometylpropanol, dietylamoetanol, aminometylpropanol, är alla förhållandevis bra ur arbetsmiljösynpunkt. De vanligaste aminerna täcker in kokpunktsintervallet 118-178°C och har oftast gynnsamma distributionstal vid måttliga temperaturer. Förmågan att regenereras, d.v.s. att efter att ha fångat upp koldioxid i ånga och kondensat åter kunna spalta av koldioxiden i avgasaren och återanvändas i systemet, är god.

Cykliska eller heterocykliska aminer, såsom cyklohexylamin och morfolin, används fortfarande i stor omfattning, både av tradition och för sina tekniska egenskaper som bra kokpunkt, 129 °C respektive 134 °C. Stränga arbetsskyddsbestämmelser, låg flampunkt och stark lukt gör att användningen minskar, liksom morfolins misstänkta cancerogena effekt.

7.3.1.2.3 *Filmbildare*

I en vidare tolkning kan tanniner och många passiveringsmedel sägas vara filmbildande, men normalt avses endast filmbildande aminer. Det är ämnen som är svårlösliga i vatten och har en hydrofob, katjonisk aminogrupp som lätt fäster vid metall. Teorin är att en skyddande film som täcker hela metallytan skall kunna hålla skadliga gaser, partiklar och salter på distans så att inga angrepp kan ske.

Oktadecylamin var den först använda filmbildaren, men det förekom flera olika med kedjelängd på 12-36 kolatomer. Vid rätt användning gav den ett mycket bra skydd genom den stora distansen mellan vätska och metall. En annan specifik egenskap var att kondenserad vattenånga på exempelvis torkcylindrar inte kunde bilda en värmeisolerande vattenfilm utan drog ihop sig till lätt avrinnande droppar så att het ånga kunde få bättre kontakt med metallytan. Cirka 20 % bättre värmeöverföring kunde rapporteras. Problem med okontrollerad slambildning orsakade haverier som gjorde att användningen praktiskt taget upphörde i Sverige.

Polyaminer kom senare med samma motivering som för oktadecylamin att kunna ge skydd genom att separera vätska och metall. Polyaminerna var mer lösliga, hade viss förmåga att dispergera föroreningar och varje molekyll innehöll flera aminogrupeer att fästa vid metallytor. Filmen blev emellertid tunnare och inte lika homogen, den bättre lösligheten i vatten gav ojämnt skydd och flera skador inträffade där man saknat syrereduktion och neutralisering.

Polyaminer anses ofta vara farliga inhibitorer då de korrosionsfrämjande ämnena i vattnet (syrgas och vätejoner) inte neutraliseras utan är kvar i vattnet. Det kan innebära ett accelererat angrepp om det uppstår en blotta i filmen. Filmtjockleken och därmed skyddsverkan kan variera med flödes hastigheten.

Användningen av filmbildande aminer upphörde praktiskt taget i Sverige efter ett antal pannhaverier i slutet av 1980-talet. I Norge, Ryssland och på kontinenten används filmbildande aminer med goda erfarenheter.

Det finns numera tillgång till bättre formulerade filmbildare, där man tagit hänsyn till tidigare svagheter avseende skydd mot syre och lågt pH. Man bör dock uppmärksamma potentialen för skumning vid hög ångrumsbelastning och risken för att större mängder slam kan klibbas ihop till större aggregat.

7.3.1.2.4 Syrereduktion

Det förekommer både icke flyktiga och flyktiga syrereducerande kemikalier på marknaden. De icke flyktiga används för att reducera syrehalten i exempelvis matarvatten, pannvatten eller hetvattensystem. De flyktiga syrereduktionsmedlen kan även skydda ång- och kondensatsystemet då de följer med över i ångan.

7.3.1.2.4.1 Icke flyktiga syrereducerande kemikalier

Natriumsulfit reagerar snabbt med syre och bildar sulfat i vattnet. Sulfit är billigt, säkert att hantera och följer inte med ångan. Reaktionshastigheten kan ökas genom tillsats av katalysator, oftast koboltsalt. Sulfit bildar mycket slam och kan sällan användas vid höga panntryck (>40 bar), eftersom frätande sulfider kan bildas vid hög temperatur. I praktiken används inte sulfit vid anläggningar med avsaltat spädvatten. Den effektiva syrebindningen förefaller hämma magnetitbildningen.

Natriumbisulfit används också på samma sätt, dock inte så ofta i Sverige. Det är mera lösligt i vatten men p.g.a. stark lukt och lågt pH-värde mindre lämpligt att använda till matarvatten. Relativt höga överskott brukar fordras av både sulfit och bisulfit för säker syrereduktion.

Erythorbat (isoaskorbat), framförallt natriumerythorbat och ammoniumerythorbat har fått ökad användning. Produkterna är säkra vid hantering och mycket bra passivatorer, även vid låg temperatur. Nedbrytningsprodukter, beroende på miljö, är huvudsakligen koldioxid och acetater, som sänker pH. Endast låga överskott erfordras och reaktionshastigheten är hög i alkalisk miljö.

Tanniner, i huvudsak hydrolyserbar gallotannin, kan räknas till reduktionsmedlen genom sin bildning av pyrogallol och pyrokatekol, som oxideras lätt i alkalisk miljö. Vid nedbrytningen bildas koldioxid och andra organiska syror. Hanteringen av tanninprodukter medför inga arbetsmiljörisker.

7.3.1.2.4.2 Flyktiga syrereducerande kemikalier

Hydrazin (hydrazinhydrat) är tekniskt sett ett idealiskt reduktionsmedel som inte bildar slam och vars nedbrytningsprodukter huvudsakligen är kvävgas och vatten. En viss nedbrytning till ammoniak bidrar även till alkalisering av ångan. Eftersom hydrazin reagerar relativt långsamt medger detta en viss omlagring av syre vid metallytan och gynnar därvid bildningen av passiv magnetit. Dessvärre är hälsomässig bedömning och användningsvillkor numera så stränga att användningen i praktiken har stoppats.

Hydrokinon är vanlig som katalysator till långsammare reduktionsmedel men är också själv ett starkt reduktionsmedel. Bildar koldioxid, väteperoxid, aceton och en mängd andra ämnen beroende på vattnets sammansättning. Starkt allergiframkallande.

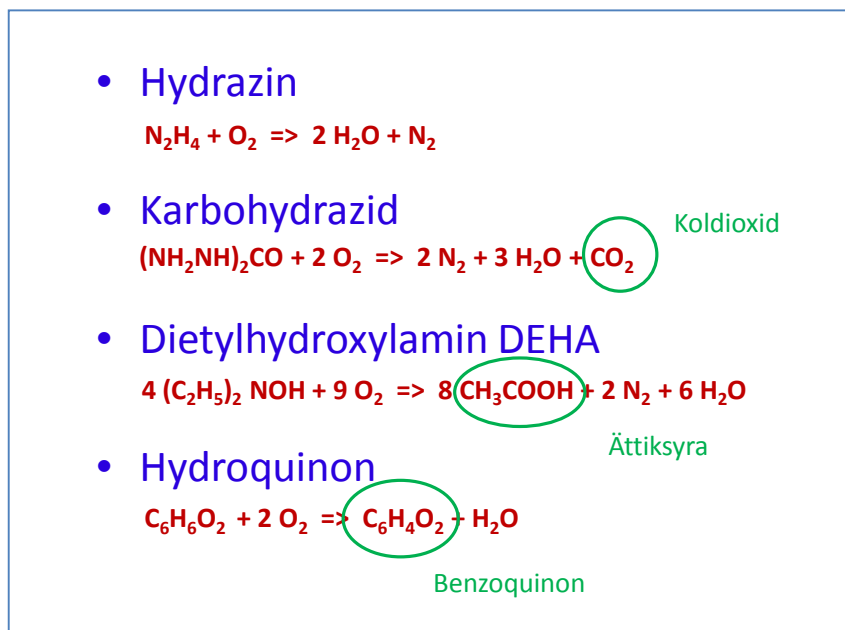
Hydroxylaminer, såsom dietylhydroxylamin och isopropylhydroxylamin har kommit att framstå som huvudalternativ till hydrazin, framförallt i USA och offshore. Nedbrytningsprodukterna är bl.a. kvävgas, aldehyder och acetater som sänker pannvattnets pH-värde. Reaktionshastigheten är hög i alkalisk miljö och kan katalyseras med hydrokinon.

Karbohydrazid (1,3-diaminourea) är ett relativt säkert alternativ till hydrazin. Huvudsakligen bildas koldioxid och ammoniak vid nedbrytning, men inga organiska syror. Ämnet tillverkas genom reaktion mellan hydrazin, alkohol och kolsyra. Nedbrytning genom hydrolys till hydrazin börjar vid 134 °C. Vid ca. 204 °C är all hydrazin nedbruten till ammoniak, kvävgas och vatten.

Metyletylketoxim är ett ofgiftigt, billigt och starkt luktande lösningsmedel. Kemikalieinspektionen varnar för allergirisken. Den bildar koldioxid och metyletylketon vid nedbrytningen.

Azaguanin, ett pyrimidin- eller aminoguanidinderivat, bildar huvudsakligen koldioxid och ammoniak vid nedbrytning, men såsom vid karbohydrazid även hydrazin, varför speciell omsorg måste ägnas hanteringen.

Figur 154 visar några syrereduktionsmedel och deras reaktion med syre samt vilka restprodukter som bildas.



Figur 154. Några syrereduktionsmedel reaktioner med syre

Figure 154. Some oxygen scavengers and their reaction with oxygen

7.4 Kondensatrening

Förr ansåg man att kondensat var ett rent vatten, varför det utan behandling kunde återföras till ångpannorna. I våra dagar måste man på grund av högre tryck och värmebelastningar i pannorna ägna större uppmärksamhet åt kondensatens kvalitet, som i jämförelse med ett totalavsaltat spädvatten ofta är klart sämre. Kondensaten kan innehålla en avsevärd mängd föroreningar som kan ge upphov till beläggningar och korrosion i pannorna. Beroende på anläggning kan kondensatet innehålla korrosionsprodukter, hårdhet, kiselsyra, salter, olja, fetter och i cellulosaindustrin avlutar från processen.

Korrosionsprodukter består främst av järn- och kopparoxider. De kan bildas dels under drift om ånga och kondensat är korrosiva, dels under stillestånd. Vid stillestånd kommer luft in i systemen med korrosion som följd. De bildade korrosionsprodukterna lossnar sedan under drift och transporteras med kondensat och matarvatten till pannorna.

Vid start av en panna, turbin, pappersmaskin etc. efter ett stopp, kan halten korrosionsprodukter vara mycket hög. Om möjligt bör därför kondensatet vid start köras till avlopp till dess huvuddelen av korrosionsprodukterna avlägsnats.

För att avlägsna korrosionsprodukterna och eventuella andra fasta partiklar används mekaniska filter. De korrosionsprodukter som finns i kondensat förekommer som partiklar med mycket varierande storlek. Partiklarnas storlek kan variera från någon mm till bråkdelar av μm . Det krävs alltså filter med mycket bra avskiljningsgrad för att kunna avlägsna korrosionsprodukterna.

Andra svårigheter med att filtrera kondensat är att flödena ofta är stora och varierande samt har hög temperatur. De högsta temperaturerna, 120-130 °C, förekommer vid industrianläggningar. Vid värmeverk och kraftvärmeverk är temperaturerna betydligt lägre, 20-90 °C. Se även kapitel 6.1 om mekanisk filtrering.

7.4.1 Påsfilter och silfilter

Påsfilter och silfilter (screen filter) används vid vissa anläggningar för att rena kondensatet. Detta är dock något som normalt inte rekommenderas då avskiljningen av korrosionsprodukter inte är tillräcklig.

7.4.2 Elektromagnetiska filter

Elektromagnetiska filter, EMF, för rening av kondensatet med avseende på magnetiska järnoxider används på några kraftvärmeverk i Sverige med bra resultat. Funktionen på EMF beskrivs i kapitel 6.1.4.

7.4.3 Patronfilter

Patronfilter innehåller ett antal patroner som består av en stödjande kärna på vilken det filtrerande mediet är placerat. Filtermaterialet är vanligtvis polypropylen men även bomull eller glasfiber förekommer. Filterpatroner har en graderad porositet och för varma vatten en kärna av syrafast stål. Porositeten är störst i patronens yttre delar och minskar mot kärnan.

Det har förekommit att filterelement av polypropylen har oxiderats och brutits ner av syrerika korrosionsprodukter. En lösning har då varit att byta ut dessa mot filterelement i bomull eller syrafast material.

Dessa filter kan avskilja partiklar ned till ca 1 μm . De används i mindre och medelstora anläggningar där denna filtreringseffekt är tillräcklig. Investeringskostnaden är låg, men driftkostnaden relativt hög. Filter med högre avskiljningsgrad än 1 μm ger inte tillräcklig avskiljning av korrosionsprodukter och bör inte användas.

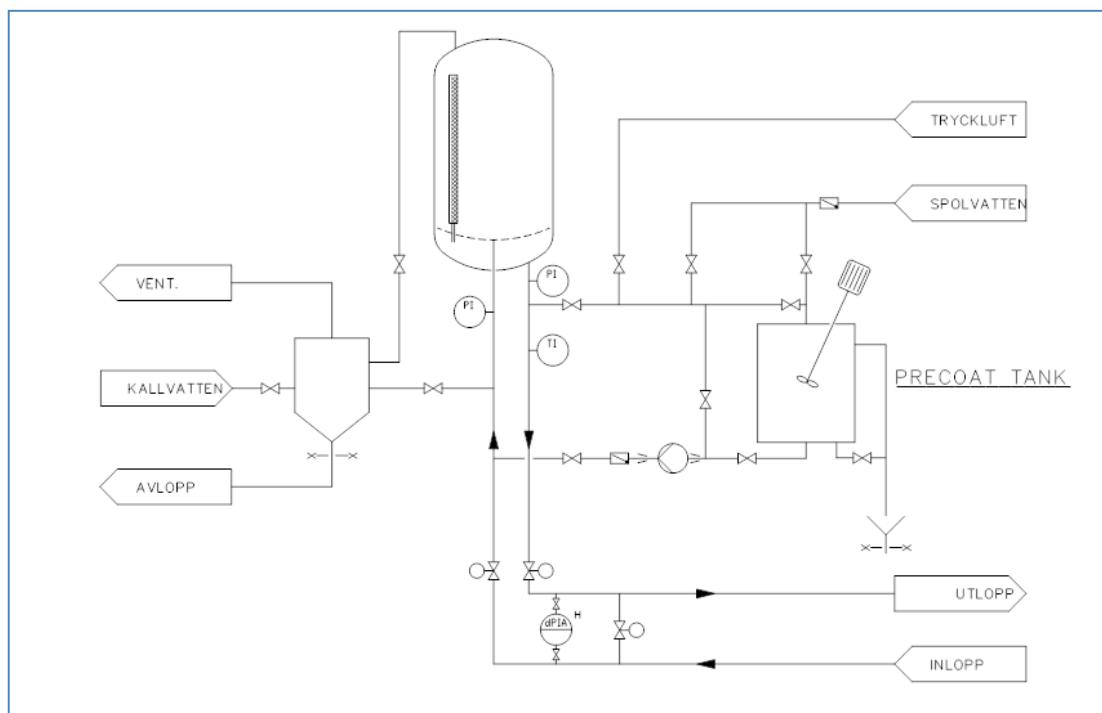
För övervakning av filtren uppmäts tryckfallet över filtren. När tryckfallet över filtren uppnått ett visst värde öppnas filtren och patronerna byts ut mot nya och de använda patronerna kasseras. Försök med att spola rent patronerna har gjorts med mycket dåliga resultat. Även ett rent, nystartat patronfilter har ett visst differenstryck. Uppmäts inget differenstryck är det något fel på filtret eller filterpatronerna.

7.4.4 Precoatfilter

Där filtreringseffekten för patronfiltren ej är tillräcklig och där man har stora flöden används ofta precoatfilter för filtrering av kondensaten. Precoatfilter är s.k. tunnskiktsfilter, d.v.s. man bygger upp en till arean stor, men tunn filterkaka. Till detta använder man sig av filter som invändigt är fyllda med skivor eller stavar. På skivorna eller stavarna läggs det filtrerande mediet. När differenstrycket överstiger ett förbestämt värde avlägsnas det pålagda filtermaterialet och ett nytt skikt läggs på.

Den vanligaste typen av precoatfilter i Sverige är filter med stavar. Som filterhjälpmedel används i dag i huvudsak pulverjonbytare och olika konstfibrer.

Precoatfilter med pulverjonbytare kan filtrera bort partiklar ned till en storlek av 0,1-0,5 μm . Uppbyggnaden av ett precoatfilter framgår av Figur 155. Vid normal drift ligger pulverjonbytaren utanpå stavarna och samlar upp de partiklar som finns i kondensaten. Vid renspolning blåses luft och vatten bakvägen in i stavarna, filterkakan slås bort och spolas till avlopp.

Figur 155. *Precoatfilteranläggning*Figure 155. *Precoat filter plant*

Precoatfilter med pulverjonbytare har en viss jonbyteskapacitet. Till följd av det tunna skiktet är dock denna begränsad. Om t.ex. ett råvattenläckage erhålls som motsvarar 0,05 °dH kan ett precoatfilter avhärda condensatet under 10-20 timmar beroende på vilken hastighet filtret är dimensionerat för. Ovanstående gäller upp till en temperatur av 120 °C.

Avsaltningsförmågan blir dock starkt begränsad dels på grund av att andelen anjonbytare är liten i blandningen, dels på grund av att anjonbytaren klarar högst 50 °C. Om temperaturen är under 50 °C kan filtret vid t.ex. 1 % inläckage av kommunalt vatten med en salthalt på ca 2,5 mekv/l avsalta condensatet under 3-4 timmar, sedan är den jonbytande kapaciteten slut, se Figur 10. Om temperaturen på condensatet är >50 °C erhålls endast en marginell eller ingen kiselsyreduktion. Anjonbytaren tjänstgör här i princip som en svag anjonbytare och reducerar endast klorider och sulfater.

Precoatfiltrets huvudsakliga uppgift blir alltså att tjänstgöra som ett mekaniskt filter. Som pulverjonbytare används en blandning av nermalld stark katjonbytare och stark anjonbytare. Man använder normalt en större andel katjon- än anjonbytare. Ett vanligt blandningsförfarande är två delar katjonbytare och en del anjonbytare. Vid blandningen av katjon- och anjonbytare bildas flockar. Dessa flockar är en förutsättning för att jonbytare ska bli kvar på filterstavarna och inte läcka genom dessa. Erhålls inga flockar vid blandningen får denna ej läggas på filtret. En orsak till att flockar ej bildas kan t.ex. vara för liten andel anjonbytare.

Precoatfilter med pulverjonbytare har i Sverige använts upp till ca 130 °C. I utlandet ska dessa filter ha använts vid betydligt högre temperaturer, upp till 150 °C. Filterelement i bl.a. syrafast material, nylon och polypropylen används. I Sverige har filterelement av polypropylen använts upp till 120 °C. Vilken typ av element som ska användas i det enskilda fallet avgörs av kondensatets temperatur och de föroreningar som kan finnas i kondensatet. Om t.ex. oxiderande ämnen kan förväntas i kondensaten bör syrafasta element väljas.

En nackdel med precoatfilter med hängande eller stående element är att om flödet faller bort kan filterkakan lossna från stavarna. Om filtret då startas på nytt kommer föroreningarna i kondensatet att gå in i stavarna på de ställen där filterkakan lossnat och stavarna kommer att blockeras. För att undvika detta finns i allmänhet utrustning för rundpumpning genom filtret. Denna startas automatiskt när flödet går ned till en visst värde.

Övervakning av driften sker liksom vid patronfilter genom övervakning av tryckfallet över filtren. Dessutom bör analys av järn- och kopparhalt före respektive efter filtren göras. För höga järn- och kopparhalter efter filtren visar att genombrott erhållits. Filtren ska då ställas av för renspolning och påläggning av nytt precoatmaterial.

7.4.5 Jonbytande filter

För att ta bort hårdhet ur kondensat används stark katjonbytare i natrium- och/eller ammoniumform. De jonbytande filtren placeras ofta efter ett mekaniskt filter. Om kondensaten körs direkt in på ett jonbytande filter kan jonbytare och silsystem i botten på filtren bli blockerade av korrosionsprodukter.

Dessa filter fungerar bra vid avhärdat spädvatten. Vid totalavsaltat fungerar de dock mindre bra beroende på följande. Filtren regenereras ofta med natriumklorid. Under drift tar de då upp alkaliseringsmedel ur kondensaten och avge natrium. Kondensat, matar- och pannvatten kommer om än i låga koncentrationer att i huvudsak innehålla natronlut. Vid indunstning av ett sådant kondensat, matar- eller pannvatten kan så höga pH-värden erhållas att alkalisk spänningskorrosion uppstår. Indunstning kan erhållas t.ex. i ångsystemet i samband med insprutning för temperaturreglering eller i en panna under en beläggning eller i en spalt.

Genom att regenerera filtren med ammoniumklorid (NH_4Cl) i stället för natriumklorid (NaCl) kan ovan nämnda nackdel elimineras. Regenerering med ammoniumklorid har dock också nackdelar. Vid t.ex. inläckage av råvatten till kondensatet tas hårdheten upp i filtren och ersätts med en ekvivalent mängd ammonium. Kondensatet kommer då att innehålla ammoniumklorid och ammoniumsulfat. I pannan spaltas dessa under bildning av ammoniak som medföljer ångan och saltsyra och svavelsyra som blir kvar i pannan och sänker pH-värdet på pannvattnet.

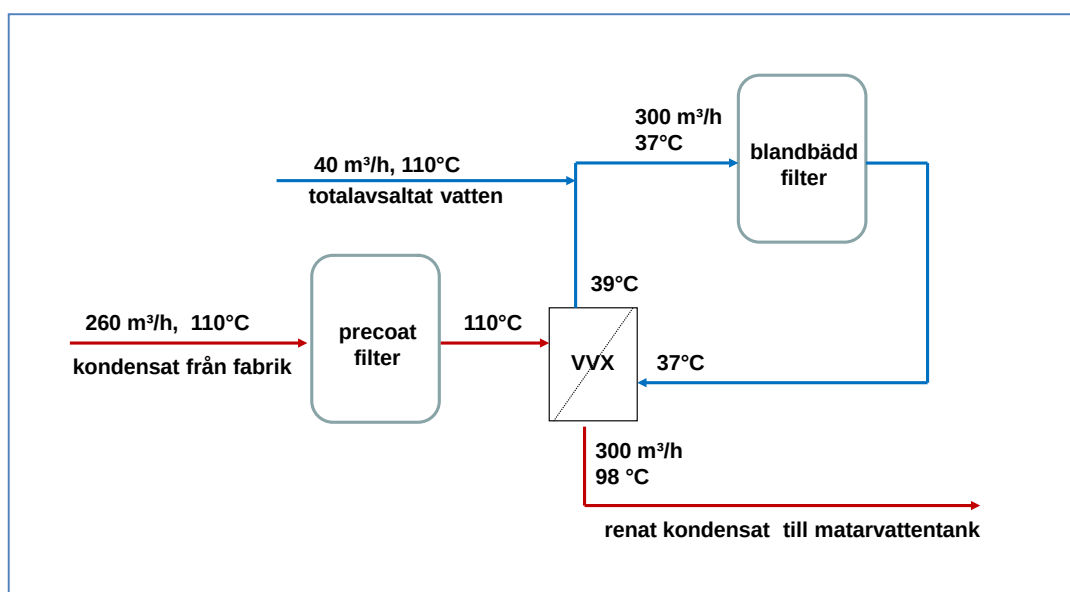
Vid totalavsaltat spädvatten har alltså dessa filter olägenheter hur de än hanteras. För att försöka eliminera olägenheterna använder sig några leverantörer av s.k. blandregenerering. Man använder då en blandning av natrium- och ammoniumklorid. En vanlig blandning är ca 20 % NaCl och ca 80 % NH_4Cl .

Natriumhalten i kondensatet efter filtren sänks härvid från 0,1-0,5 till ca 0,05 mg Na/l. Risken för spänningskorrosion minskar, men elimineras ej. Risken för surt pannvatten vid inläckage av hårdhet i kondensaten är större än vid regenerering med enbart natriumklorid.

Huvuddelen av de störningar i vattenkemin som under 1970-och 1980-talen förekommit i svensk cellulosaindustri har varit av ovan diskuterad art. Ett antal fall med surt pannvatten och alkalisk spänningskorrosion har inträffat. Av dessa orsaker och då råvatteninläckage kraftigt minskat under senare år är användningen av katjonbytare som kondensatfilter vid denna typ av anläggningar mycket diskutabel.

En god övervakning av kondensatkvaliteten i kombination med precoatfilter med pulverjonbytare är i de flesta fall fullt tillräckligt för att erhålla en tillfredsställande renhet på kondensaten.

Vid kraftverk och kraftvärmeverk är temperaturen på kondensaten i många fall ej högre än att kondensaten kan filtreras genom blandbäddsfiler. Vid industrianläggningar är temperaturen ofta för hög för att kondensaten skall kunna filtreras genom blandbäddsfiler, men temperaturen kan dock via värmeväxling nedbringas så att hela matarvattenflödet kan filtreras genom blandbäddsfiler. På detta sätt kan en mycket hög matarvattenkvalitet erhållas och risken för beläggningar och korrosion i stort elimineras. Figur 156 visar ett exempel på en kondensatreningssystem med regenerativ värmeväxling.



Figur 156. *Kondensatreningssystem med regenerativ värmeväxling*

Figure 156. *Condensate polishing plant with regenerative heat exchange*

Vid alla typer av kondensatfilter är det viktigt att undvika snabba variationer i kondensatflödena. Snabba variationer pressar t.ex. ihop filterkakan på precoatfiltret och

förkortar gångtiderna. Den största nackdelen är dock den ökade belastning som erhålls på filterbottnar och silelement. Läckage kan erhållas med driftstörningar som följd.

De bästa driftförhållandena erhålls vid konstant flöde. Därför brukar man ofta ordna med konstanthållning av flödena genom filtren. Det kan t.ex. göras genom att en returledning dras från ledningen efter kondensatfiltret tillbaka till kondensattanken. Genom att reglera flödet till matarvattentanken och returflödet till kondensattanken kan ett konstant flöde hållas genom kondensatfiltret.

7.4.6 *Oljehaltiga kondensat*

Kondensat som kan bli förorenade med olja får inte återföras till matarvattentanken. Olja kan ge kolhaltiga beläggningar på de värmebelastade ytorna i pannor. Sådana beläggningar har en mycket dålig värmeledningsförmåga. Redan en mycket tunn beläggning räcker för att ge en överhettning av tubmaterialet. Beläggningar av organiskt kol är dessutom mycket svåra att avlägsna ur pannor.

Kondensatet från oljeförvärmare och från uppvärmning av oljetankar leds av ovanstående skäl därför ofta till avlopp. Vid större anläggningar medför detta stora energiförluster. Vid dessa anläggningar bygger man istället ett sekundärt system för oljeförvärmarna och uppvärmning av oljetankar. Ångan från pannan går till en ånggenerator eller en värmeväxlare. Där tillverkar man ånga eller hetvatten för oljeförvärmare och oljetankar. Kondensatet från ånggeneratoren eller värmeväxlaren tas tillbaka till matarvattentanken. Erhålls ett läckage i en oljeförvärmare kommer oljan bara in i sekundärsystemet, men inte till matarvattensystem och pannor. Sekundärsystemet bör utrustas med oljevarnare eller annan instrumentering som kan varna för inläckage av olja.

7.4.7 *Kondensat förorenade av lutar*

I cellulosafabriker kan lut från kokeri och indunstningsanläggningar läcka ut och förorena kondensaten. Lut i pannorna ger liksom olja beläggningar med en hög halt organiskt kol. Dessutom medför lut i pannvattnen lätt skumning med förorenad ånga och beläggningar i överhettare och turbin som följd.

Om läckage förekommer med täta intervaller brukar kondensaten ej tas tillvara för matarvattenberedning, utan värmeväxlas mot t.ex. ingående spädvatten. I de flesta fall återförs dock kondensaten till pannorna. Det är då nödvändigt att noga övervaka kondensatens renhet. Manuell övervakning är ej tillräcklig utan denna måste ske genom kontinuerlig mätning med instrument som vid förorenat kondensat larmar och släpper kondensatet till avlopp. För denna övervakning används ofta konduktivitetmätare. En bättre övervakning erhålls genom övervakning av sur konduktivitet eller natriumhalt.

En sak som ofta inte beaktas vid konstruktion av utrustning för övervakning av kondensatkvaliteten är att det tar en viss tid från det att kondensatet nått mätpunkten till dess att automatventilen ställt om till avlopp. Mätpunkten och automatventilen måste alltså ligga tillräckligt långt från varandra. Annars kommer en del förorenat kondensat passera förbi ventilen innan denna hinner koppla om till avlopp. Vidare måste också en fördröjning finnas vid återställningen så att ledningen mellan mätpunkt och ventil hinner spolas ren.

8 Hetvatten- och fjärrvärmesystem

I detta kapitel beskrivs de metoder och typer av utrustningar som huvudsakligen används för att behandla hetvatten- och fjärrvärmesystem.

Det som behandlas är:

- Spädvattenkvaliteter
- Vattenrening och filtrering
- Tryckhållning
- Kemikaliedosering

Dessutom diskuteras de riktvärden som rekommenderas för hetvatten- och fjärrvärmesystem mot bakgrund av spädvattenkvalitet.

8.1 Hetvatten- och fjärrvärmesystem

Ett hetvattensystem är på samma sätt som ett ångsystem ett sätt att överföra värme från det ställe där värme produceras, t.ex. en panna, till ett ställe där värme förbrukas. Valet mellan ånga och hetvatten som fysisk värmebärare i en krets beror i stor utsträckning på behoven. Vid temperaturer omkring 100 °C eller lägre oftast är ett system med hetvatten enklare och billigare än ångsystem.

De största hetvattenkretsarna i Sverige är fjärrvärmenäten, med temperaturer i intervallet 40-120 °C i framledningen och 30-60 °C i returledningen. I större städer kan näten ha en betydande geografisk utsträckning och det är inte ovanligt att dessa innehåller tiotusentals kubikmeter vatten.

Inom både industri och kraftvärmeverk förekommer hetvattensystem och mellankylsystem med temperaturer på allt mellan 20-180 °C. Även ett radiatorsystem i en villa är att betrakta som ett hetvattensystem.

Gemensamt för alla hetvattensystem är att de är slutna system med mycket liten påfyllning av nytt vatten. Det medför att vattenkemin bli trög och eventuella förändringar i vattenkvalitet normal sker långsamt. Vid inläckage av vatten från t.ex. ett sekundärt system eller kylmedia kan vattenkemin ändras snabbt beroende på förhållandet mellan inläckage och volym i systemet.

Det största problemet i ett hetvattensystem är som regel inläckage av syre via inläckage av luft eller syrerikt vatten.

8.1.1 Fjärrvärmesystem

Rekommendationerna baseras på erfarenheter från drift av hetvattensystem med framledningstemperaturer mellan 40 och 120 °C. De gäller för system med materialen stål, koppar och kopparlegeringar under normala driftbetingelser.

Korrosionen minimeras genom:

- ett högt pH-värde, så att vätgasproducerande korrosion inte uppstår
- en låg syrehalt, vilket ger en låg korrosionshastighet
- en låg konduktivitet (låg salthalt), vilket också ger en låg korrosionshastighet

Kravet på vattenkvaliteten är beroende på om fjärrvärmenätet är direkt eller indirekt kopplat med pannan.

8.1.1.1 Indirekt kopplade system

Med indirekt koppling menas att pannan och fjärrvärmenätet är skilda åt med värmeväxlare. Detta förekommer vid alla kraftvärmeverk och större värmeverk, men även vid många mindre värmeverk.

8.1.1.2 Direktpopplade system

I en direktpopplad panna värms fjärrvärmevattnet direkt i pannan och önskad temperatur shuntas ut. Kraven är högre i system med direktpopplade pannor p.g.a. att ytemperaturen är högre i pannan än i en värmeväxlare, vilket ökar risken för utfällningar (beläggningar) av t.ex. hårdhet. Kraven på vattenkvalitet i avgörs också av systemets storlek. Gränsen brukar dras vid 10 MW.

8.1.2 Mellankylsystem

Ett mellankylsystem är ett sekundärsystem mellan t.ex. vatten/ångcykeln och olja eller ett processmedium som skall värmas upp. Syftet är att minimera risken för läckage av olja eller processmedium till primärsystemets kondensat, om energin ska återvinnas.

Kvalitetskravet för vattnet i ett mellankylsystem är i princip detsamma som för vattnet i ett hetvattensystem men anpassas efter kravet på primärkretsen för att minimera konsekvensen av ett läckage i värmeväxlaren.

Några generella riktvärden för mellankylsystem finns inte utan dessa måste avgöras från fall till fall beroende på förutsättningarna vid den aktuella anläggningen. I de flesta fall bör riktvärdena för fjärrvärmesystem kunna användas som en utgångspunkt. Det är också viktigt att ta hänsyn till ytemperaturerna i systemet när riktvärden tas fram.

Materialvalet i mellankylsystemet har också stor betydelse. Genom att utföra systemet i t.ex. rostfritt syrafast material kan korrosionsproblemen byggas bort. Påfyllningen med ett avsaltat eller avhärdat vatten ger ett vattensystem med mycket liten risk för vattensidiga problem.

Mellansystemets drifttryck bör vara lägre än i primärsystemet i syfte att ytterligare minska risken för läckage in i primärsystemet. Man bör inte ha automatisk påfyllning av mellankretsen då det ökar risken för att eventuella fel och läckage inte upptäcks i tid.

Eftersom mellankylsystemet är avsett att skydda primärsystemet mot kontaminering bör övervakning av vattnet i mellankylsystemet utökas med avseende på den aktuella

föroreningsrisken, d.v.s. lämplig analysparameter för att tidigt upptäcka spår av oljan eller processmediet.

8.2 Rekommenderade riktvärden

I Figur 157 anges rekommenderade riktvärden för hetvatten- och fjärrvärmesystem mot bakgrund av spädvattenkvalitet. De gäller generellt även för mellankylsystem.

parameter		fjärrvärmevatten		
spädvattenkvalitet		avsaltat	avhärdat	obehandlat
pH		9,5-10,0	9,5-10,0	8,0-9,0
konduktivitet	µS/cm	<50 ¹⁾	<spädvattnet	<spädvattnet
hårdhet	°dH			
indirekt kopplade system		<0,1	<1,0	se text
direkt kopplade system <10MW		<0,1	<0,5	se text
direkt kopplade system >10 MW		<0,1	<0,1	se text
restsyre, O ₂	µg/kg	<10	<10	<10
järn, Fe	µg/kg	<50	<100	<100
koppar, Cu	µg/kg	<20	<20	<20
klorid, Cl	mg/kg	<3	<100	<100
sulfat, SO ₄	mg/kg	<2		
ammonium, NH ₄	mg/kg	<5	<10	<10
olja & fett	mg/kg	<1	<1	<1
fasta partiklar	mg/kg	<1	<10	<10

1) I system med induktiva mätare kan det finnas behov att höja konduktiviteten genom dosering.

Figur 157. Riktvärden för hetvatten- och fjärrvärmevattensystem

Figure 157. Target values for water in district heating systems

Några riktvärden anges inte för konduktiviteten men man bör vara uppmärksam på att lägre salthalt medför mindre risk för gropfrätning. Konduktiviteten är också en bra parameter för att upptäcka förändringar i vattenkemin. Normalt används avhärdat och avgasat vatten i indirekta system. Om kloridhalten överskrider 100 mg/kg bör vattnet avsaltas för att minska risken för skador på t.ex. komponenter av rostfritt stål.

Fasta partiklar i fjärrvärmenätet utgörs dels av korrosionsprodukter och dels av slagg, grus och annat från montaget. Halten ska vara så låg som möjligt för att undvika igensättningar och erosion. Vid höga halter bör delströmsfilter installeras i systemet.

Den viktigaste parametern, gällande vattenkvaliteten i ett mindre hetvattensystem utan avgasat spädvatten, är mängden tillfört spädvatten. Det är viktigt att spädvattenmängden och eventuellt inläckage är så liten som möjligt. Varje liter spädvatten tillför syre till systemet som ger upphov till korrosion och ökar risken för läckage med driftstörningar som följd.

8.2.1 *Rekommenderad spädvattenkvalitet för större system*

Spädvatten till alla större och medelstora fjärrvärmesystem ska vara avgasat, oavsett om spädvattnet är avhärdat eller avsaltat.

I fjärrvärmesystem kopplade till kraftvärmeverk rekommenderas avsaltat spädvatten. Risken för störningar i samband med inläckage av fjärrvärmevatten till kondensatet via kondensorn minskar med ett renare fjärrvärmevatten. I ett saltfritt vatten är också korrosionsnivån lägre.

I övriga fjärrvärmesystem rekommenderas åtminstone avhärdat spädvatten. I alla system med hårdhet i vattnet finns en potentiell risk för kalkutfällning på värmeöverförande ytor. Bästa sättet att minimera risken för kalkutfällning är att eliminera källan genom avhärdning antingen av spädvattnet eller med ett avhärtningsfilter i en delström i systemet.

8.2.2 *Rekommenderad spädvattenkvalitet för mindre system*

I alla system med hårdhet i vattnet finns en potentiell risk för kalkutfällning på värmeöverförande ytor. I möjligaste mån bör man använda ett avhärdat spädvatten till fjärrvärmesystemet. Bäst resultat erhålls om ett avhärtningsfilter installeras i en delström i fjärrvärmesystemet. Filtret kan då avhärda både det cirkulerande fjärrvärmevattnet och spädvattnet som tillsätts strax före avhärtningsfiltret. Detta är dock inte en lösning på ett problem med inläckage av hårt vatten. Det inläckande vattnet innehåller även syre som ger en ökad korrosion i systemet.

I praktiken kan det dock vara svårt att motivera en dyr vattenbehandlingsutrustning för ett mycket litet fjärrvärmesystem. Det innebär att man i en del fall måste kompromissa och anpassa riktvärdena till den verklighet man befinner sig i. Det går att göra men man ska vara medveten om de risker det innebär. Vid en kompromiss mellan ekonomi och vattenkvalitet går det inte att garantera en störningsfri drift även om nedanstående rekommendationer följs. Risken för störningar bör dock vara betydligt mindre än i ett system helt utan kontroll.

Behovet av avhärdning av spädvattnet ökar med ökad spädvattenmängd och vattnets hårdhet. Fjärrvärmesystem med endast ringa läckage och mycket liten spädmatning kan ofta spädmatas med oavhärdat spädvatten medan system med stora läckage och hög spädmatning bör spädmatas med avhärdat spädvatten.

8.2.2.1 Syre

Som tidigare nämnts är den viktigaste parametern gällande vattenkvalitet i mindre hetvattensystem utan avgasat spädvatten den tillförda mängden spädvatten.

I mindre fjärrvärmesystem, utan termisk avgasning eller avgasning med membranteknik, kan vattnet avgasas kemiskt genom tillsats av ett syrereduktionsmedel. Detta behövs normalt inte om spädmatningen ligger på en låg nivå.

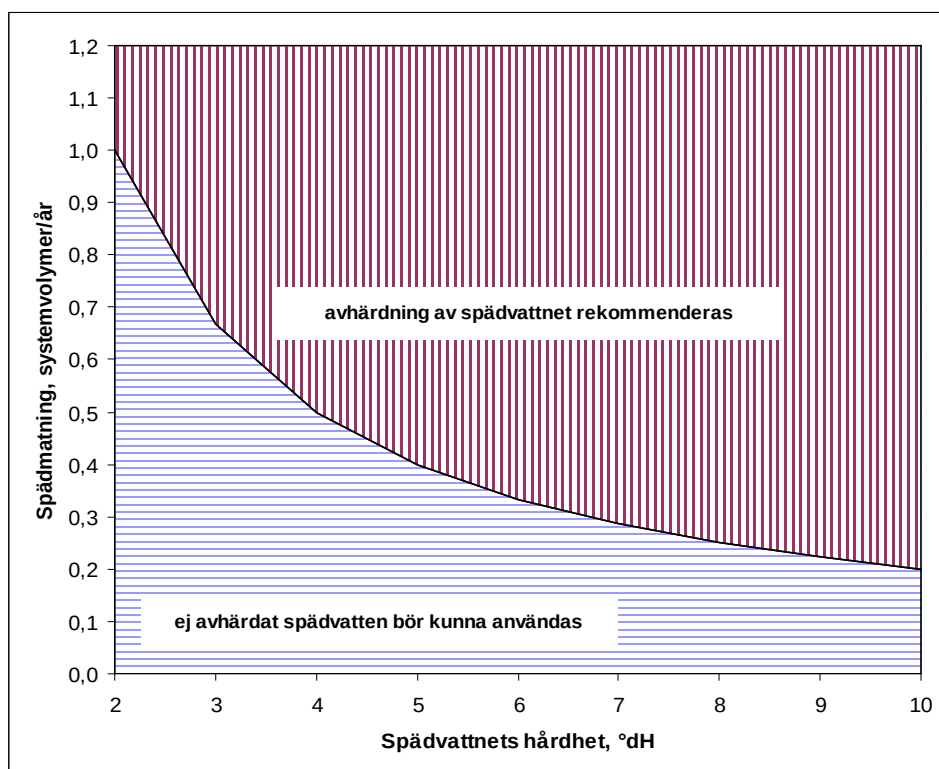
Vid större spädvattenbehov rekommenderas tillsats av ett syrereduktionsmedel. Ett större spädvattenbehov innebär en påfyllning som motsvarar dubbla systemvolymen räknat per år eller mer.

8.2.2.2 pH-värde

I fjärrvärmesystem som spädmatas med oavhärdat spädvatten bör pH-värdet på fjärrvärmevattnet ligga mellan pH 8,0 och 9,0. pH-värdet behöver inte vara högre så länge järnhalten är låg och ofärgade papper erhålls membranfiltrering. För högt pH-värde medför att hårdheten i vattnet faller ut direkt och medför risk för kalkbeläggning på värmeöverförande ytor.

8.2.2.3 Hårdhet

Mängden tillförd hårdhet till systemet är den avgörande parametern när det gäller om spädvattnet ska avhärddas eller ej. Ett försök att åskådliggöra detta görs i kurvan nedan som kan tjäna som vägledning om huruvida man bör installera avhärddningsfilter eller ej. Se Figur 158.



Figur 158. *Mängden tillförd hårdhet avgör om små fjärrvärmesystem kan klara sig utan avhärdat spädvatten.*

Figure 158. *The amount of added hardness decides whether small district heating systems is in need of softened make-up water.*

Enligt kurvan ovan bör ett fjärrvärmesystem med en volym på 10 m³ spädmatas med avhärdat vatten om spädvattnet har en hårdhet på 5 °dH och spädmattningen överstiger 4 m³/år eller 0,33 m³/månad (0,4 systemvolym).

8.3 Vattenrening

Flera av de tekniker och den utrustning som används för att behandla spädvattnet till pannor är även lämpliga för att behandla till hetvatten- och fjärrvärmesystem. Dessa beskrivs i kapitel 7.

8.3.1 Delströmsrening

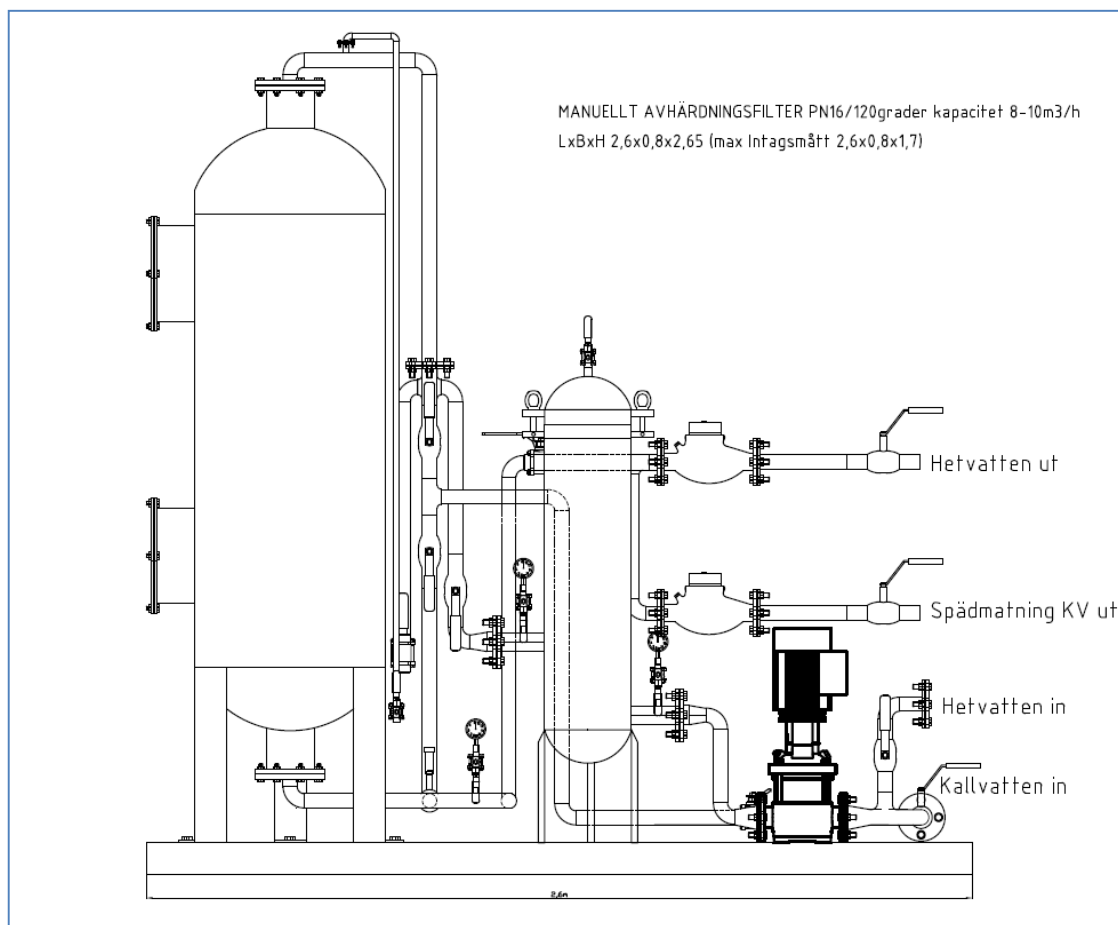
Det är viktigt att avlägsna korrosionsprodukter som bildats i hetvattensystemet. Halten ska vara så låg som möjligt för att undvika igensättningar i ventiler och armaturer samt minska risken för erosionsskador. Vid höga halter bör ett mekaniskt filter installeras i en delström i systemet.

Det är sällan kostnadseffektivt att behandla hela systemflödet. I stället placeras filtret i en delström. Delströmmen brukar vara 1-3 % av huvudströmmen. Ytterligare en fördel med filtret i en delström är att om filtret sätter igen påverkas inte driften av systemet.

Vanligtvis används patronfilter med polypropentråd lindad runt en rostfri kärna för att avskilja korrosionsprodukter och slam ur ett hetvattensystem. Val av lämplig avskiljningsgrad för filterpatronerna måste avgöras från fall till fall. För att få en bra avskiljning av magnetit rekommenderas en filtreringsgrad på 1 μm .

I alla system med hårdhet i vattnet finns en potentiell risk för kalkutfällning på värmeöverförande ytor. Bästa sättet att minimera risken för kalkutfällning är att eliminera källan genom avhärdning antingen av spädvattnet eller med ett avhärtningsfilter i en delström i systemet. I anläggningar med stora inläckage av hårt vatten kan ett avhärtningsfilter installerat i en delström vara ett sätt att minska risken för hårdhetsbeläggningar på värmeöverförande ytor. Observera dock att detta inte är en lösning på problemet med inläckage av hårt vatten utan bara ett sätt att minska följdskadorna. Orsaken till inläckaget måste hittas och åtgärdas.

Ofta installeras patronfilter och avhärtningsfilter i serie i nämnd ordning. Patronfiltret skyddar då jonbytesmassan från korrosionsprodukter och livslängden förlängs. Se Figur 159.



Figur 159. *Delströmsrening bestående av patronfilter och avhärdningsfilter.*

Figure 159. *Water softener plant for partial flow purification*

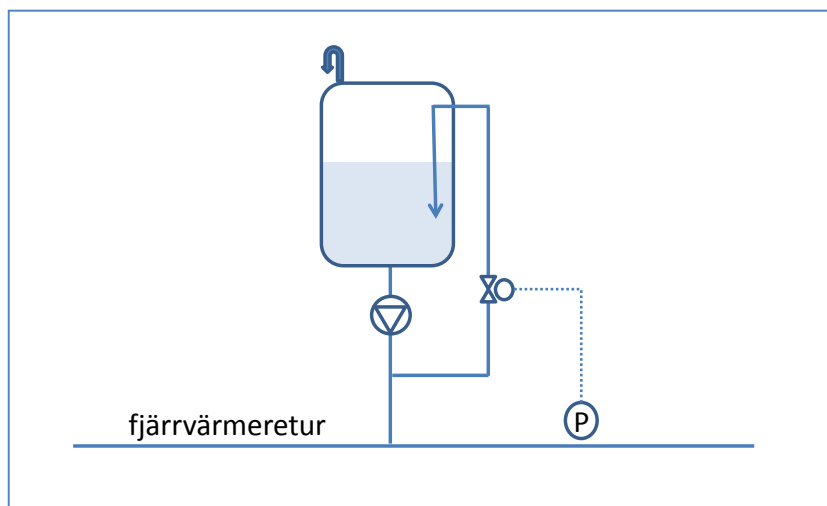
8.4 Expansionskärl och tryckhållning

Expansionskärlet skall vara så stort att det kan ta upp de volymförändringar som sker till följd av temperaturförändringar i systemet. Hetvattensystemet skall inte vara försedd med säkerhetsventil om det inte finns något säkerhetskrav på detta. Vid en temperaturhöjning i hetvattenkretsen bräddas vatten till avlopp via expansionskärlet, vilket medför att nytt vatten måste fyllas på då temperaturen återigen har sjunkit.

Expansionskärlet är en vanlig källa till inläckage av syre. Ett trycksatt expansionskärl är att föredra då övertrycket förhindrar luften att komma i kontakt med vattnet.

Tryckhållning av expansionskärl skall inte ske med luft om inte luften och vattnet är åtskilda på ett effektivt sätt, t.ex. via en gummibälg.

Ett ofta förekommande system för tryckhållning, framför allt på mindre system, är med en tryckhållningspump och automatisk ventil. Pumpen går hela tiden för att tryckhålla systemet. Om trycket blir för högre än börvärdet, exempelvis p.g.a. en temperaturökning, öppnar ventilen och släpper tillbaka vatten till expansionskärlet. Se Figur 160.



Figur 160. *Expansionskärl med tryckhållningspump och återströmningsventil.*

Figure 160. *Expansion vessel with pressure holding pump and backflow valve*

Den här typen av tryckhållning medför ett kontinuerligt tillskott av syre till vattnet och bör i största möjliga utsträckning undvikas. Syret medför en ökad korrosion i systemet. I första hand är det ledningen mellan tryckhållningspumpen och hetvattensystemet som korroderar sönder.

Att byta material i denna utsatta ledning till exempelvis rostfritt eller koppar är inte en lösning på problemet. Det medför bara att korrosionsskadorna uppstår längre ut i systemet där det ofta är svårare att upptäcka och åtgärda läckaget.

I system där denna typ av tryckhållning redan installerats kan syretillskottet minskas genom att leda in vattnet som återförs till expansionskärlet under vattenytan för att minska luftinblandningen.

8.5 Dosering av kemikalier

Fjärrvärmesystem har stor volym med låg vattenomsättning vilket gör dem tröga och förändringar i vattenkemin sker relativt långsamt.

I större fjärrvärmesystem som spädmatas med ett avgasat och avhärdat eller avsaltat matarvatten behövs som regel ingen dosering.

I mindre fjärrvärmesystem, industriella hetvattensystem och mellankylsystem kan det vara aktuellt med tillsats av någon kemikalie för att justera vattenkvalitet.

Beroende på spädvattenkvalitet, vattenomsättning m.m. kan det vara aktuellt att dosera kemikalier för att förhindra korrosion på koppar och andra metaller i systemet samt förhindra beläggningar.

Vanligast är att dosera lut för att justera pH-värdet och eventuellt någon kemikalie för att reducera syrehalten (kemisk avgasning).

Vidare doseras kemikalier för att underlätta läcksökning av hetvattensystem.

Dosering av fosfat för att binda hårdheten rekommenderas inte. Detta skapar en volym slam som är svår att avlägsna ur systemet. Bildningen av ett slam innebär också en ökad risk för beläggningar.

8.5.1 Justering av pH-värdet

I fjärrvärme- och hetvattensystem med avhärdat eller avsaltat spädvatten är riktvärdet för pH-värdet pH 9,0-10,0. Vid lägre pH-värdet ökar risken för korrosion medan högre pH-värden medför en onödig kemikaliekostnad.

När matarvatten används som spädvatten är detta redan pH-justerat och ytterligare alkalisering behövs sällan.

I hetvattensystem som innehåller hårdhet är riktvärdet för pH-värdet pH 8,0-9,0. Det lägre riktvärdet beror på att hårdheten ger ett viss korrosionsskydd. Vid högre pH-värde kommer en del av hårdheten att falla ut som kalkbeläggningar i systemet.

Den vanligaste kemikalien för att pH-justera vattnet i ett hetvattensystem är natriumhydroxid (lut). Det är ett billigt och effektivt alkaliseringsmedel och doseras vanligtvis som 25 % lösning.

Natriumkarbonat och natriumbikarbonat kan i vissa fall användas för alkalisering.

8.5.2 Syrereduktionsmedel

Syre kan komma in i systemet via spädmatningen, expansionskärlet, inläckage i värmeväxlare, panikfyllningar med oavgasat vatten etc.

De flesta större fjärrvärmesystem i Sverige spädmatas med ett avgasat matarvatten vilket ger goda förutsättningar för en störningsfri drift. I dessa anläggningar doseras som regel inte några kemikalier för restavgasning. En del av anläggningarna har varit i drift i mer än 40 år utan att några störningar orsakade av syrekorrosion har observerats.

Om den termiska avgasningen av spädvattnet till fjärrvärmesystemet inte är fullgod skall avgasningens funktion förbättras i första hand. I andra hand kan syrereducerande kemikalier doseras till vattnet för att nedbringa halten löst syre till en acceptabel nivå. Att avgasa vatten enbart med kemikalier bör undvikas.

I mindre fjärrvärmesystem och industriella hetvattensystem där inläckage av råvatten eller syre är ett problem kan ett överskott av ett syrereduceringsmedel i systemvattnet minska risken för korrosionsskador.

Effekten av restavgasning med dessa medel är begränsad. De låga halter som idag måste hållas i systemen kan förbrukas snabbt vid ett inläckage av råvatten. Är inläckaget i ett nät så stort att den syrereducerande tillsatsen förbrukas helt erhålls ett överskott av syre i vattnet som ger korrosion.

De vanligast förekommande syrereduceringsmedlen för hetvattensystem är:

- **Natriumsulfit** som reagerar snabbt med syre och bildar sulfat i vattnet. Sulfit är billigt, säkert att hantera. Reaktionshastigheten kan ökas genom tillsats av katalysator, oftast koboltsalt. Vid dosering av natriumsulfit föreligger risk för utfällning av kalciumsulfit. Lösligheten för kalciumsulfit är mycket låg och hårdheten i systemet får vid dosering av natriumsulfit vara maximalt 0,5 °dH.
- **Erythorbat** (isoaskorbat), framförallt natriumerythorbat och ammoniumerythorbat har fått ökad användning. Produkterna är säkra vid hantering och mycket bra passivatorer, även vid låg temperatur. Nedbrytningsprodukter, beroende på miljö, är huvudsakligen koldioxid och acetater, vilka sänker pH-värdet varför det även kan behövas ett alkaliseringsmedel (pH-höjande). Endast låga överskott av erythorbat erfordras och reaktionshastigheten är hög i alkalisk miljö.
- **Tanniner**, i huvudsak hydrolyserbar gallotannin, kan räknas till reduktionsmedlen genom sin bildning av pyrogallol och pyrokatekol, som oxideras lätt i alkalisk miljö. Vid nedbrytningen bildas koldioxid och andra organiska syror. Hanteringen av tanninprodukter medför inga arbetsmiljörisker.

Doseringen bör göras till en punkt i systemet där det blir en tillfredsställande inblandning i systemvattnet.

Kemikalier skall inte användas i onödan. Verkligheten är dock inte alltid idealisk och då kan det vara bra med en plan B. Kopparkorrosion i slutna system orsakas emellanåt av högt pH i närvaro av syre. Erforderlig syrehalt finns ofta närvarande, åtminstone i mindre system utan avgasning. Genom att sänka syrehalten ytterligare kan man ibland reducera korrosionen på alla metaller.

Koppar korroderar även i syrefri miljö om det finns sulfid- eller kloridjoner. Kopparjoner i vattnet ökar korrosionshastigheten på stål. Ett alternativ eller komplement till syrereduktion kan vara att tillföra en specifik kopparinhibitor, erforderlig halt kan vara så låg som 0,1 ppm. Analys av koppar, järn och pH kan ge besked. Om kopparkorrosion eller kopparjoninducerad korrosion är ett problem kan man överväga att dosera kopparinhibitor.

8.5.3 Korrosionsinhibitorer

Korrosionsinhibitorer kan i vissa fall användas i ett hetvattensystem som skydd mot korrosion. Det är emellertid tveksamt om de behövs i hetvattensystem och bör därför endast doseras om det föreligger ett problem.

Vid problem med korrosion på koppar och koppar och dess legeringar kan dosering av **tolyltriazol** och **bensotriazol** vara aktuell. De skyddar redan vid låga halter. Ingår i många tillsatser för både öppna och slutna system. Se även kapitel 15.6.2.

Kopparhaltiga korrosionsprodukter kan orsaka galvanisk korrosion på stål, en kopparinhibitor reducerar således indirekt även korrosionen på stål.

8.5.4 Beläggningsinhibitorer

Ämnen som kan ge beläggningar bör så långt det är möjligt minimeras genom förbehandling av spädvattnet eller delströmfiltrering. I de fall då detta inte tillräckligt eller ekonomiskt försvarbart kan problemet åtgärdas genom dosering av en beläggningsinhibitor. dosering av beläggningsinhibitorer förekommer främst i industriella hetvattensystem där spädvattenkvaliteten ofta är lägre.

Fosfonater utgörs av organiskt bunden fosfat och används som tröskelinhibitorer, d.v.s. halten av ämnet behöver endast komma över en förhållandevis låg tröskel för att ge god effekt. Verkansättet är att de små mängder av fosfonat som kommer in i beläggningen tillsammans med hårdheten ger sådan störning av kristallmönstret vid utfällningen att inga större sammanhängande lager av hårdhet kan utbildas. Det slam som istället bildas är i allmänhet så fint att det inte kan uppfattas med blotta ögat.

Polyakrylat hör till gruppen karboxylsyror och är precis som fosfonat en svag anjon. Den reagerar således med vattnets katjoner, exempelvis kalcium, järn och koppar. Det är också fråga om mycket stora molekyler, som genom att samla upp många små partiklar gör dessa lättare att blåsa ut än andra föroreningar såsom fosfatslam. Polyakrylat kan också tränga in i och mjuka upp eller spränga loss redan utbildade hårda beläggningar, varför en viss försiktighet tillråds vid användningen.

Exempel på polykarboxylater är natriumsalter av polyakrylsyra, polymetakrylsyra, polymaleinsyra. Genom att variera molekylstorlek och laddningstäthet går det att skraddarsy polykarboxylater för att maximera verkan mot exempelvis gips, fosfatslam eller järnoxid osv.

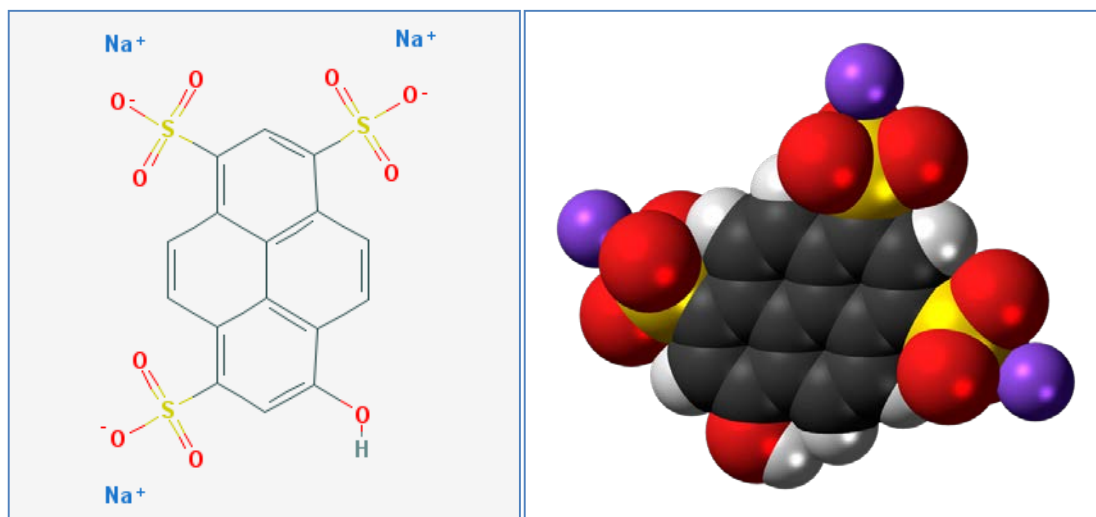
Sulfonat används där extra god beläggningskontroll är nödvändig. Till skillnad från fosfonat och akrylat är sulfonat en stark anjon och binder därför alla katjoner och ger fullständig kemisk avhärdning. Jämför med katjonfilter i svag respektive stark form. Sulfonat sampolymeriseras ofta med polystyren som i en jonbytare, men uppträder fortfarande som ett lösligt salt i vattnet, även när det tagit upp hårdhet.

Lignin är ett naturligt ämne som raffinerats från vedämnet i skogsråvara och innehåller högre eller lägre halter av karboxyl- och sulfonatgrupper. Lignosulfonat är ett sådant dispergeringsmedel som kan innehålla upp till 2 % aktiv sulfonat.

Tanniner är garvsyror, som förutom dispergerande förmåga också besitter reduktionsförmåga, speciellt i alkalisk miljö. Äldre produkter gjordes av barkextrakt och kunde ibland ge okontrollerad slamavlagring. Senare produkter utgår från hydrolyserbara sockerestrar, som kan sönderdelas till pyrogallol och pyrokatekol och är fullständigt vattenlösliga.

8.5.5 Läcksökning

Utläckage från ett fjärrvärmenät kan spåras genom en tillsats av ett färgämne till vattnet i systemet. I Sverige och Finland används pyranin, ett grönt fluorescerande färgämne, i fjärrvärmenät medan man i andra länder har andra färgämnen. Pyranin är natriumsaltet av pyrensulfonsyran och den kemiska strukturnamn är trinatriumpyrentrisulfonat.



Figur 161. *Pyranin, trinatrium-8-pyren-1,3,6-trisulfonat*

Figure 161. *Pyranine, trisodium 8-hydroxypyrene-1,3,6-trisulfonate*

Pyranin är ett färgämne med lätt grön färg och fluorescerande egenskaper. Färgstyrkan och fluorescensen varierar med vattnets sammansättning. Denna variation är inte rätlinjig utan mer i form av tröskelvärden, högre salthalt ger bättre fluorescens.

Fluorescensen och färgintensiteten ökar då lösningen värmts upp. Efter en senare avsvälning kvarstår denna ökning. Färgen avklingar långsamt, men utsätts lösningen för en längre tids ljuskontakt, skiftar den långsamt från grönt till gult.

Ämnet är löslöst i kallt vatten. Det åtgår cirka 6 liter vatten rör att lösa 1 kg pyranin. Pyraninet är i pulverform. Pyraninet i en lösning tas upp även anjonbytare eller aktivt kol, medan det ej tas upp av en katjonbytare, t.ex. avhärdningsfilter.

Detekteringen av pyranin är enkel. Vid stora eller små läckage detekteras dessa visuellt, medan mycket små läckage kan detekteras med hjälp av UV-ljus.

Hur små läckage som kan detekteras med respektive metod beror på förbrukningsvattnets sammansättning och doseringsstyrkan i fjärrvärmevattnet.

Om olika distributionssystem har förlagts nära varandra, t.ex. fjärrvärme och fjärrkyla i samma tunnel, kan det vara lämpligt att använda ett annat färgämne i fjärrkylasystemet än i fjärrvärmesystemet.

I Värmeforskrappport nr 343 "*Färgämne för läckageindikering*" från 1989 redogörs för en undersökning av olika färgämnen i syfte att finna ett ämne med vilket hetvatten och fjärrvatten skulle kunna märkas för att underlätta läcksökning. Man fann att pyranin var det mest lämpliga men det fanns även andra alternativ som kan vara aktuella i de fall man vill ha ett alternativ till pyranin.

9 Kontroll och övervakning

I detta kapitel beskrivs hur ett provtagningssystem för vatten och ånga i en energianläggning bör utformas för att ge representativa prover. Även förslag på omfattning av övervakning av vattenkvaliteten både vad gäller on-lineinstrumentering och manuella analyser.

Kapitlet omfattar en sammanställning och viss uppdatering av innehållet i två tidigare Värmeforskrapporter. Dessa rapporter går att ladda ner från Värmeforsks rapportdatabas för den som vill fördjupa sig inom teknikområdet eller se referenser. För referenser hänvisas till originalrapporterna.

- Värmeforsk rapport nr 893 ”*Bästa möjliga övervakning av vattenkemin i anläggningar med turbin*”, november 2004.
- Värmeforsk rapport nr 1120 ”*Provtagningssystem för vatten och ånga*” oktober 2009.

För ytterligare fördjupning om provtagningssystem och övervakning av vattenkvaliteten rekommenderas även följande internationella standarder:

- ASME PTC19.11, “*Steam and Water Sampling, Cooling, and Analysis in the Power Cycle*”, August 6, 2008.
- VGB-S-006-00-2012-09-EN, “*Sampling and Physico-Chemical Monitoring of Water and Steam Cycles*”, Dec 5, 2012.
- IAPWS TGD “*Corrosion Product Sampling and Analysis for Fossil and Combined Cycle Plants*”, July 2014.
- IAPWS TGD “*Instrumentation for monitoring and control of cycle chemistry for the steam-water circuits of fossil-fired and combined-cycle power plants*”, July 2015

IAPWS TGD (Technical Guidance Document) om instrumentering är en grundläggande internationell standard som ger rekommendationer på en lägsta acceptabla uppsättning instrument för on-lineövervakning av vattenkemin.

Vid nybyggnation används ofta VGB:s standarder av pannleverantörer och turbinleverantörer.

9.1 Kontroll och övervakning av vattenkvaliteten

Att det är viktigt med en bra vattenkemi är de flesta överens om. En bra vattenkvalitet är lönsamt då det borgar för lång livslängd samt en säker och ekonomisk drift. Det är ett kortsiktigt tänkande att inte investera i genomtänkt utrustning för vattenbehandling såsom vattenreningsanläggning, doseringsutrustning och instrument för kvalitetsövervakning.

Några ekonomiska fördelar med en bra vattenkvalitet är minskad risk för driftstörningar, bättre verkningsgrad på turbin och panna, lägre vattenförbrukning och lägre kemikalieförbrukning. Kostnaden för ett haveri på en turbin eller panna blir som regel betydligt större än enbart reparationskostnaden. Den stora kostnaden är produktionsbortfallet. Ett

haveri kommer sällan vid låg last eller låg beläggning. Reparationer som ska göras med kort varsel blir dyrare än de som kunnat planeras under en längre tid.

Design och funktion av provtagningssystem för vatten och ånga vid energianläggningar är inte sällan undermåliga och ibland även direkt felaktiga vilket kan leda till driftstörningar p.g.a. att erhållna analysvärden inte motsvarar verkligheten i vattenångcykeln. Detta gäller tyvärr även nybyggda anläggningar.

Det spelar ingen roll hur mycket som investeras i on-lineinstrument om provuttagen är felaktigt utformade eller om inget vet hur man bör agera vid eventuella larm. Övervakning av vattenkemin är en kedja av funktioner som alla måste fungera fullt ut för att bli bra. Det gäller:

- Provtagningsutrustning med påstick, ledningar, ventiler och kylare
- On-lineinstrument
- System för hantering av mätvärden
- Rutiner för uppföljning och utvärdering
- Instruktioner för larm och avvikande värden
- Rutiner och instruktioner för kalibrering och service av utrustningen
- Alla ska känna till vikten av rätt vattenkvalitet

Med en rätt utformad och efterlevd övervakning av vattenkemin är risken för driftstörningar orsakade av dålig vattenkvalitet liten.

En långtgående on-lineinstrumentering med genomtänkta och anpassade system för uppföljning och utvärdering av mätvärdena ger den överlägset bästa kontrollen av vattenkemin i anläggningen. Det är dock viktigt att se till helheten när vattenbehandling och övervakning av vattenkemi byggs upp. Det är inte mängden instrument eller antal vattenkemister på labbet som är det väsentligaste utan att alla funktioner i övervakningskedjan måste fungera ihop som en enhet.

I takt med att övervakningen allt mer läggs över på instrumentering ökar givetvis kraven på tillförlitligheten på on-lineinstrumenten. Vikten av bra rutiner för kalibrering, underhåll och service kan inte nog understrykas.

Kemiresurserna bör flyttas från manuell vattenprovtagning till fortlöpande utvärdering av trender och mätvärden och därmed öka möjligheterna att förhindra driftstörningar orsakade av felaktig vattenkemi. Kemistens roll blir att kvalitetssäkra vattenkemin för att optimera processen ur ett vattenkemiperspektiv.

9.2 Provtagning

Syftet med all provtagning är att få ut en mindre mängd av processvattnet som har motsvarande sammansättning som huvudflödet. Det finns mycket litteratur om provtagnings-system och den gemensamma nämnaren är vikten av att erhålla representativa prover. Ofta understryks att analys av ett felaktigt uttaget prov kan vara sämre än ingen provtagning alls.

På framför allt två områden har synsättet och riktlinjerna för provtagningssystem för vatten och ånga i energianläggningar ändrats under de senaste åren. Det gäller flödes hastighet i provtagningsledningar samt utformning av provtagningssonder.

Problematiken när det gäller representativ provtagning och provtagningssystem är ett internationellt problem. På senare tid har både VGB och IAPWS gett ut standarder i ämnet.

Dimensionering av ett provtagningssystem kräver förståelse för provets beteende i provtagningsledningen.

9.2.1 Felkällor

Analysen kan aldrig bli mer rättvisande än vad provtagningen medger. Alla fel på vägen till instrumenten eller analyslaboratoriet kommer att påverka analysresultatet. Fel i analysresultatet kan i sin tur innebära att fel beslut fattas i kontrollrummet, vilket kan medföra ökade driftkostnader samt ökad risk för driftstörningar och i värsta fall haveri på turbin eller panntuber.

Några exempel på kostsamma felbedömningar:

- Analysresultat som är felaktigt låga på t.ex. ånga kan leda till allvarliga skador på turbin eller ge beläggningar i överhettare.
- Analysresultat som är felaktigt höga på t.ex. ånga kan leda till att turbinen stoppas i onödan med ett kostsamt produktionsbortfall som följd.
- Felaktiga analysresultat på pannvatten kan medföra en för hög eller för låg avblödning. Det resulterar i ökade driftkostnader alternativt medför risk för beläggningar på panntuber.

Det finns många felkällor till felaktiga analysresultat:

- provet tas ut på fel ställe i systemet
- provuttaget är felkonstruerat
- partiklar och joner kan fastna i provtagningsledningen
- partiklar och joner kan lossna från provtagningsledningen
- provets sammansättning kan påverkas/ändras under transport mellan systemet och analysatorn eller provflaskan
- föroreningar kan kontaminera provet under själva provuttaget

En av de mest beskrivna felkällorna i litteraturen är bristande isokinetisk provtagning. Det gäller framför allt vid provtagning på mättad och överhettad ånga.

När det gäller hur provet påverkas i provtagningsledningen är det inte bara sedimentering eller medtryckning av sedimenterade partiklar det handlar om. I litteraturen finns ett flertal olika fenomen uppräknade. Se kapitel 9.2.3 om deposition och erosion.

9.2.2 *Kondensering*

Mättad ånga börjar kondensera direkt i provtagningsledningen för att ofta vara helt utkondenserad innan provet når provtagningskylaren. Det innebär att i en varierande lång del av provtagningsledningen förekommer ett tvåfasflöde, d.v.s. vatten och ånga, där det är stor skillnad på den kemiska sammansättningen i de båda faserna.

Vattenfilmen rör sig betydligt långsammare än ångan. Ytan på vattenfilmen har vågor som varierar med vattnets och ångans hastighet. Ångflödet rycker loss vattendroppar från vattenfilmens vågtoppar. Dropparna bärs fram med ångan, stöter ihop med andra vågtoppar och fångas upp. Vattenfilmens tjocklek växer gradvis med ytterligare kondensation. När vattenfilmen vuxit till en viss tjocklek utvecklar flödet ett skummande kärnflöde där stora bubblor av ånga flödar snabbare än omgivande vatten. Gradvis minskar storleken på bubblorna tills all ånga kondenserat ut och resulterar i ett enfasflöde av vatten.

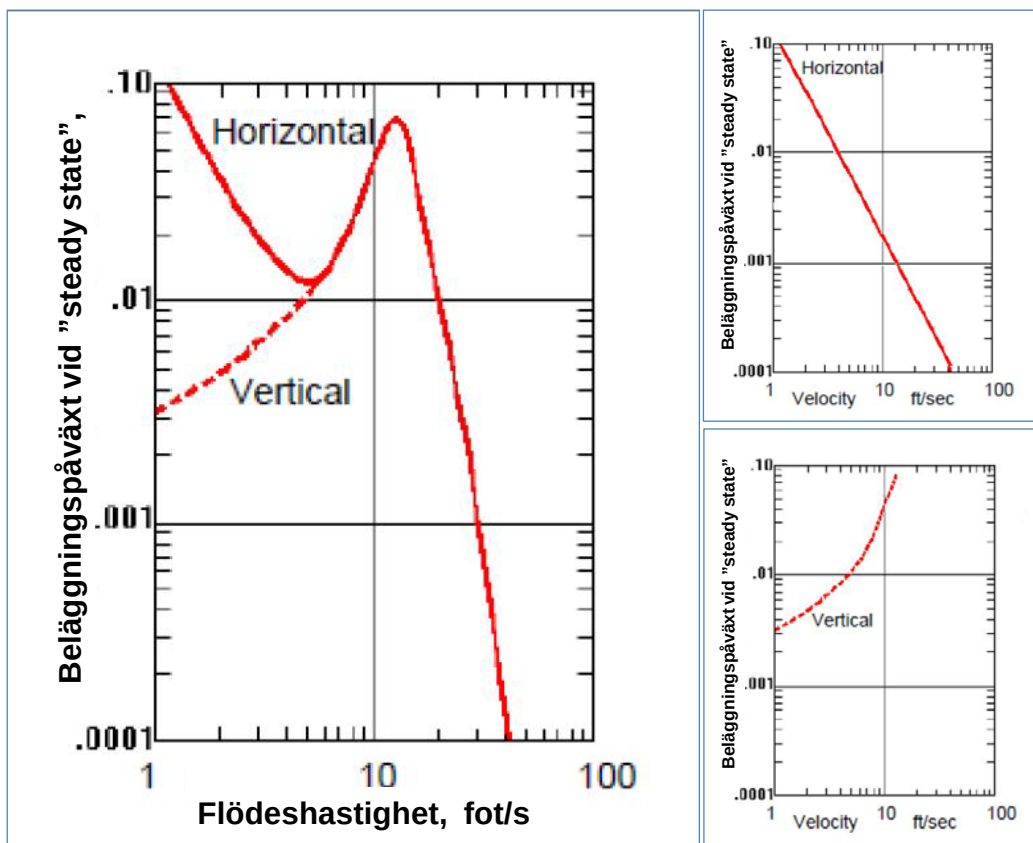
Ett prov med överhettad ånga genomgår samma förlopp men med den skillnaden att ångan inte börjar kondensera förrän temperaturen på provet sjunkit under kondensationspunkten. Lösligheten för salter lösta i ångan är i första hand beroende av trycket. Så länge trycket ligger på ungefär samma nivå i provtagningsledningen är lösligheten relativt konstant. Flera studier har visat att föroreningar i överhettad ånga har en tendens att falla ut och bilda beläggningar på den torra rörväggen där temperaturen är högre än kondensationspunkten.

9.2.3 *Deposition och erosion*

Partiklar och föroreningar i provet kan ge utfällningar i provtagningsledningen. Föroreningar kan deponeras på ytan i provtagningsledningen genom gravitationskrafter (t.ex. sedimentation) men även via vaktbildning där partiklar kan transporteras mot rörväggen och fastna mot ytan eller via diffusion etc.

En del partiklar som fastnat, kommer senare att erodera bort från rörväggen p.g.a. skjuvkrafter från vattnet. Dessa eroderade partiklar återinträder till vattenströmmen. En accepterad teori är att såväl deposition som erosion ökar med ökad flödeshastighet. Efter en tid med konstant flöde erhålls en jämvikt mellan deposition och erosion.

EPRI genomförde en större undersökning [28] 1979 av flödeshastighetens inverkan på deposition och erosion i provtagningsledningen. Ett resultat av undersökningen visas i Figur 162. Kurvan visar mängden beläggning på provtagningsledningens yta vid olika flödeshastigheter på provet. Dessa resultat ligger till grund för rekommendationen med en flödeshastighet på 1,8 m/s (6 ft/sec).



Figur 162. Flödeshastighetens inverkan på deposition och erosion

Figure 162. Sample flow rate influence on deposition and erosion

Figur 162 visar hur jämvikten mellan deposition och erosion varierar med flödeshastigheten. Vid en låg flödeshastighet erhålls en hög deposition i provtagningsledningen, främst orsakad av sedimentation (horisontell påbyggnad). Deposition orsakad av sedimentering minskar med ökande flödeshastighet. Samtidigt ökar depositionen, p.g.a. andra orsaker än sedimentering, med ökande flödeshastighet. Det kan t.ex. vara påslag orsakade av vaktbildningar eller elektrostatiska och elektrokemiska krafter (vertikal påbyggnad). Vid en flödeshastighet över 3,3 m/s (11 ft/sec) blir vattnets eroderande effekt så hög att beläggningstillväxten åter minskar men då blir tryckfall och flöde så höga att det inte längre är praktiskt ur provtagningsynpunkt.

28 EPRI Report No NP-522, "Survey of Corrosion Product Generation, Transport, and Deposition in Light Water Nuclear Reactors", Final Report, March 1979

Denna empiriska studie visar att ett minimum av deponerade ämnen finns vid ca 1,8 m/s (6 ft/sec).

Förutom en hög flödes hastighet är det viktigt med ett konstant flöde i provtagningsledningen. Studier [28] har visat att det tar upp till 30 dygn innan jämvikt mellan utfällning och erosion erhålls i en provtagningsledning efter en förändring i flödet.

Det har på senare tid diskuterats om deposition och erosion i provtagningsledningar är mer beroende av Reynolds tal än flödes hastigheten. Då Reynolds tal är proportionellt mot produkten av hastigheten och diametern anger denna teori att lägre flödes hastigheter kan accepteras i ledningar med större diameter. Det har varit dåligt med dokumentation som stöder denna teori men en ett föredrag [29] på EPRI:s konferens i juni 2009 tar upp ämnet. En jämförelse mellan praktiska försök och teoretiska beräkningar presenterades och diskuterades. Slutsatsen var att Reynolds tal spelar en större roll än flödes hastigheten vid utformning av provtagnings system.

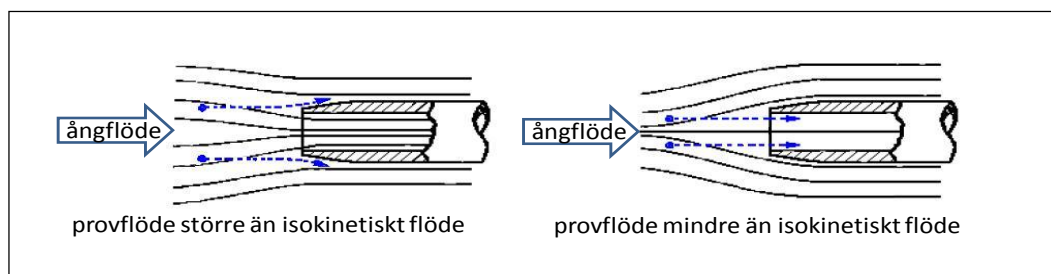
9.2.4 Isokinetisk provtagning

Isokinetisk provtagning anses generellt som den bästa tekniken att erhålla representativ provtagning i tvåfasflöden. Exempel på tvåfasflöden är vatten innehållande fasta partiklar, mättad ånga med vattendroppar eller överhettad ånga med fasta partiklar. Det är viktigt att det uttagna provet har samma proportion mellan de två faserna som huvudflödet då den kemiska sammansättningen är helt olika i faserna. Isokinetik är mest kritisk vid analys av fasta partiklar i ånga eftersom täthetskillnaden mellan ånga och partiklar normalt är större än mellan vatten och partiklar. Dessutom är ångans viskositet normalt lägre än vattnets viskositet.

Vid isokinetisk provtagning måste provflödet som tas in i provtagningssonden ha samma flödes hastighet, d.v.s. samma hastighet och riktning som huvudflödet. Då erhålls samma proportion av faserna i sonden som i huvudflödet.

29 K. Daucik, "Design of Sampling Devices for Water/Steam Cycle", EPRI Conference, Boston, June 2009.

Tröghetslagen medför att om provflödet är för lågt kommer tyngre partiklar, t.ex. vattendroppar i mättad ånga, att passera in i sonden även om huvudflödet viker av och strömmar förbi sondens öppning. Det innebär att provet kommer innehålla en större proportion föroreningar som härstammar från vattendroppar än vad som finns ångan. Se högra bilden i Figur 163.



Figur 163. *Flödeslinjer utan icke-isokinetisk provtagning*

Figure 163. *Result of nonisokinetic sampling*

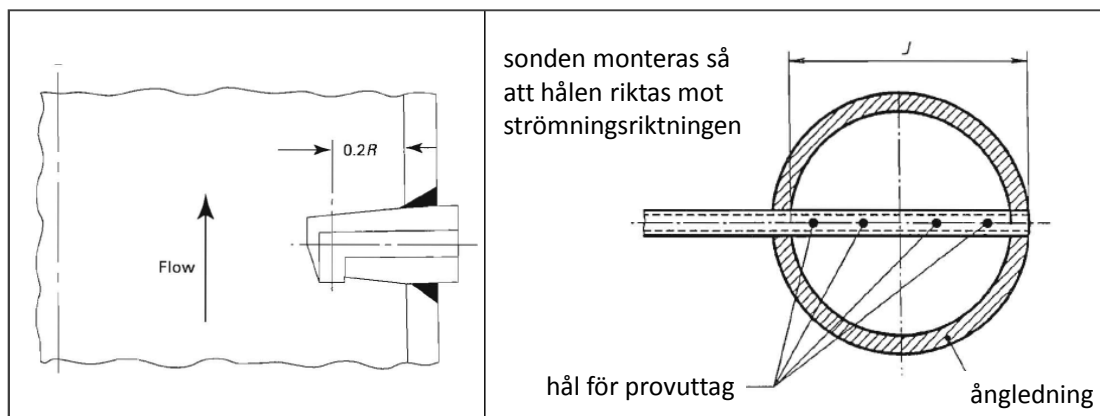
På motsvarande sätt kommer, vid för högt provflöde, de tyngre vattendropparna inte följa med huvudflödet in i sonden utan passera förbi sonden med resultat att föroreningar i vattendropparna blir underrepresenterade i provet. Se vänstra bilden i Figur 163.

Isokinetisk provtagning på ånga är i praktiken mycket svårt att åstadkomma då ångmängden, och därmed ånghastigheten, varierar med lasten i anläggningen. Isokinetisk provtagning försvåras också av att sonden i sig stör ångflödet.

Det har genomförts ett flertal jämförande provserier med olika utföranden och typer av provtagningssonder för att försöka fastställa vilken sond som bäst lämpar sig för provtagning på ånga.

9.2.5 Dimensionering av provtagningssonden

En provtagningssond kan ha ett eller flera hål. En provtagningssond med ett hål kallas i litteraturen för "singleport-sond" och en med flera hål för "multiport-sond", se exempel i Figur 164. Meningen med en multiportsond är att den ska ta ut prov på flera punkter i ledningens tvärsnitt och därmed ge ett mer representativt prov. Det är dock viktigt att man tar hänsyn till att flödes hastigheten är högre i ledningens centrum än ut mot kanterna. Det innebär att om alla hål är lika stora kommer prov från ledningens centrum vara överrepresenterat i samlingsprovet.



Figur 164. Exempel på en singleport-sond och en multiport-sond för provtagning på ånga

Figure 164. example of a single port nozzle and a multiport nozzle for steam sampling

Provtagningssondens öppning eller öppningar kan beräknas med följande formel för isokinetisk provtagning.

$$d = D \times \sqrt{\frac{P}{A}}$$

d = diametern på inloppshålet i sonden i mm

D = vatten- eller ångledningens diameter i mm

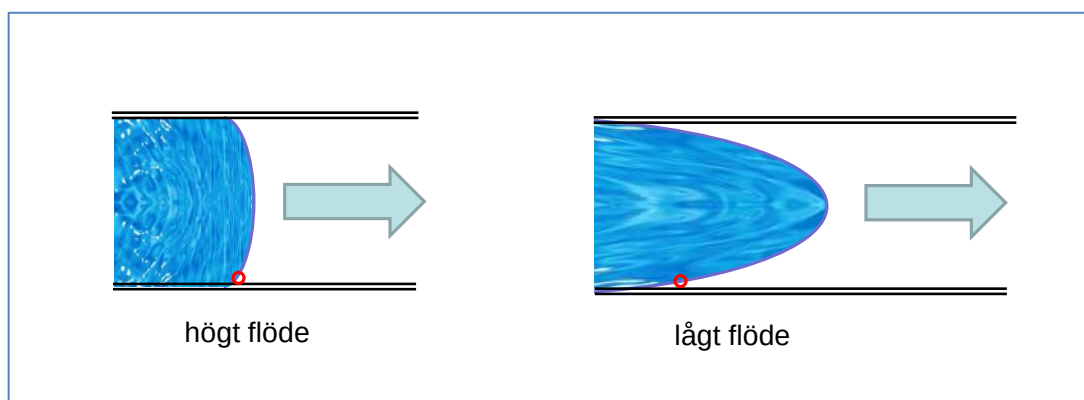
P = provmängden i kg/h

A = vatten- eller ångflödet i ledningen i kg/h

För att säkerställa isokinetisk provtagning måste inloppshålet beräknas för varje provtagningssond utifrån de data som gäller för respektive position i systemet. Hålet i sonden borras lämpligast med den standardborr som ligger närmast den beräknade håldiametern. Hållkanterna ska inte fasas. Håldiametrar mindre än 2,5 mm (3/32 tum) bör inte användas p.g.a. risk för igensättningar.

Figur 165 visar exempel på hur strömningsprofilen i en ångledning kan se ut. Om ångflödet ökas ökar flödeshastigheten på ångan mer i centrum av ledningen än närmare väggen vilket medför en spetsigare profil. Ett lägre ångflöde ger en plattare profil.

På ett avstånd motsvarande $0,1\varnothing$ är förändringen i flödeshastighet i stort sett försumbar vid måttliga variationer i ångflödet.



Figur 165. Exempel på strömningsprofilen i en ångledning vid högt respektive lågt flöde

Figure 165. Example of the velocity profile in a steam pipe at high and low flow

Även i ledningar med turbulent strömning finns ett skikt med laminär strömning invid tubväggen. Ju turbulentare flödet är i ledningen desto tunnare blir skiktet med laminärt flöde.

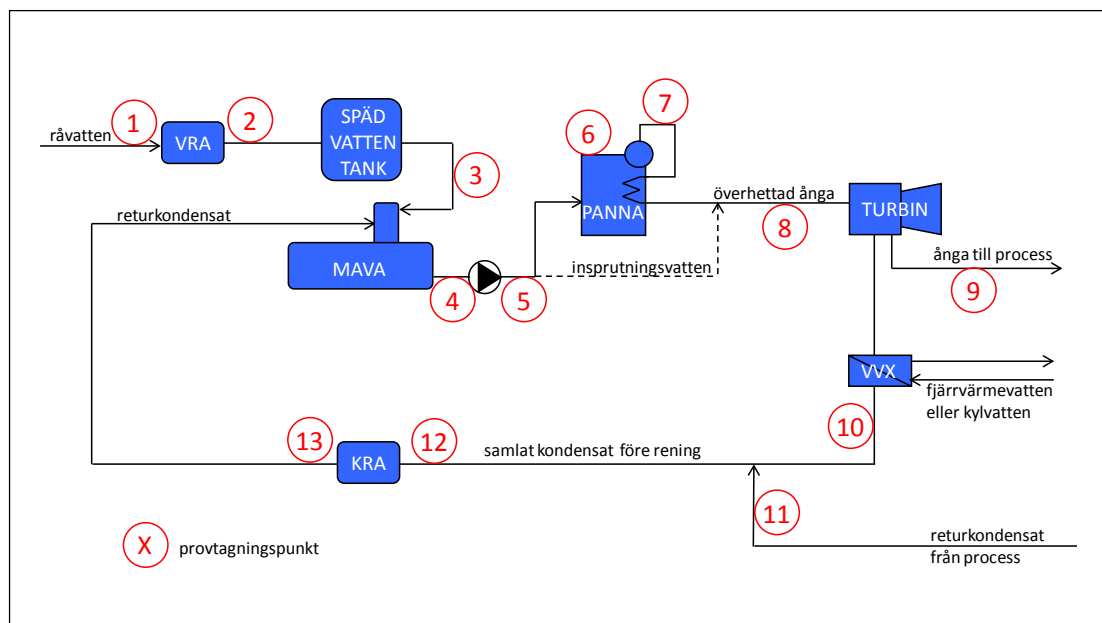
9.3 Provtagningsystem

De rekommendationer som anges i detta kapitel ökar sannolikheten för att ett uttaget prov på vatten eller ånga är representativt för det aktuella systemet.

9.3.1 Provpunkter

Vilka provtagningspunkter som är aktuella för en anläggning beror givetvis på hur anläggningen ser ut. En principskiss på vilka provtagningspunkter som bör finnas visas i figuren nedan. Vissa provpunkter används för driftövervakning och andra främst för felsökning i samband med driftstörningar eller avvikande analysvärden.

Den grundläggande principen är att vattenkemin ska kunna kontrolleras efter varje behandlingssteg och efter varje punkt där den kan komma att ändras samt där avvikande analysvärden kan orsaka skador eller driftstörningar i anläggningen.



Figur 166. Exempel på placering av provtagningspunkter

Figure 166. Example of sample point placing

Nedan följer en beskrivning av provtagningspunkterna i Figur 166 med kommentarer på deras placering. Observera att detta är endast en vägledning och provuttag i en energianläggning måste utformas utifrån förutsättningarna på plats och den utrustning som finns vid anläggningen.

1. **Råvatten.** Provuttag på råvatten placeras lämpligen på ledningen för inkommande vatten. I anläggningar med flera linjer är det viktigt att uttaget placeras på den gemensamma ledningen så att det inte spelar någon roll vilken linje som är i drift.
2. **Efter vattenrening.** Minst ett provuttag ska finnas efter vattenreningsanläggningen (VRA). Det rekommenderas dock att provpunkter dessutom placeras efter varje steg i vattenreningsanläggningen för bättre övervakning och hjälp vid driftstörningar.
3. **Spädvatten.** I anläggningar med en spädvattentank efter VRA bör det finnas ett provuttag även efter tanken, d.v.s. på det vatten som går till matarvattentanken.
4. **Matarvatten före pump.** Uttaget bör placeras på matarvattenledningen före matarvattenpumpen för att säkerställa strömning i provpunkten. I anläggningar med flera pumpar är det viktigt att uttaget placeras på den gemensamma ledningen så att det inte spelar någon roll vilken pump som är i drift. Uttaget kan även placeras i matarvattentanken. Då är det viktigt att uttaget placeras på ett ställe med god vattenomsättning för att representativt prov ska erhållas.
5. **Matarvatten efter pump.** Uttaget placerat efter matarvattenpumpen men före eventuell dosering till pannan.

6. **Pannvatten.** Det finns flera bra ställen att placera provuttag för pannvatten. Det kan placeras i domen eller på en falltub. Ofta placeras det på bottenblåsningsledningen vilket inte alltid är så bra då det inte alltid strömmar vatten där. I pannor med tvångscirkulation placeras det bäst på ledningen efter cirkulationspumpen.
7. **Mättad ånga.** Mättad ånga är det prov som är svårast att ta ut på ett representativt sätt vilket ställer höga krav på provuttaget. Provuttaget ska sitta i ångledningen mellan domen och överhettaren. Det är inte ovanligt att det finns flera ångledningar ut från domen som matar separata överhettare. Bäst säkerhet erhålls givetvis med ett provuttag i varje utgående ångledning från domen. För en panna med en dom som har fem utgående ledningar för mättad ånga räcker det inte med ett provuttag. Det bör sitta ett uttag på varje utgående ledning. För en panna med femton utgående ledningar kanske det räcker med ett uttag på varannan ångledning. Den risk man löper när man inte tar prov från varje utgående ångledning är att en skadad cyklon eller annan fuktavskiljare kan medföra att stora mängder föroreningar kan följa med ångan utan upptäckt. Föroreningarna kan ge skadliga beläggningar i turbin eller på värmeöverförande ytor i överhettare.
8. **Överhettad ånga.** Provuttaget placeras på huvudångledningen före turbin. Provuttaget ska vara placerat efter eventuellt påstick för insprutningsvatten eller kylare för reglering av ångtemperatur. I anläggningar med mellanöverhettare ska det finnas provuttag på både varm och kall mellantrycksånga.
9. **Processånga eller lågtrycksånga.** Provuttag bör finnas på lågtrycksånga och placeras efter tryckreducering.
10. **Turbinkondensat.** Provuttag på turbinkondensatet placeras lämpligast på ledningen efter kondensatpumpen.
11. **Delkondensat.** Provuttag bör finnas på alla delkondensat som tas tillbaka till matarvattentanken. Ju längre ut i systemet övervakningen sker desto mindre inläckage kan upptäckas, spåras och åtgärdas.
12. **Kondensat före KRA** (KondensatReningsAnläggning). Ett provuttag bör finnas före KRA. Det är enda sättet att säkerställa om avvikande värden efter KRA beror på fel i KRA eller på ett förorenat kondensat.
13. **Kondensat efter KRA.** Minst ett provuttag ska finnas efter KRA. Beroende på KRA:s design kan det vara aktuellt med provuttag efter varje steg i reningsanläggningen för bättre övervakning och hjälp vid driftstörningar.

Det kan även finnas andra vattensystem i en anläggning där det kan finnas behov av att följa och dokumentera vattenkvaliteten. Det kan vara t.ex. fjärrvärmesystem, interna kyl- eller hetvattensystem etc.

9.3.2 *Provuttag och sonder*

I princip rekommenderas att alla provuttag förses med sonder då man vid behov även bör kunna analysera partiklar i vattnet, t.ex. i samband med en driftstörning eller vid avvikande analysvärden. Enda undantaget är efter vattenrening (Figur 166, punkt 2) där endast konduktivitet samt eventuell natrium- och kiselhalt är aktuella att övervaka. Det gäller även provpunkter som placeras efter respektive steg i vattenreningsanläggningen.

Sonden ska placeras på en raksträcka, om möjligt minst 35 diametrar efter och 4 diametrar före detaljer som påverkar flödesbilden såsom rörböjar, ventiler, mätflänsar etc. I de fall raksträckan är för kort ska ett förhållande 9:1 mellan uppströms och nedströms sträcka eftersträvas.

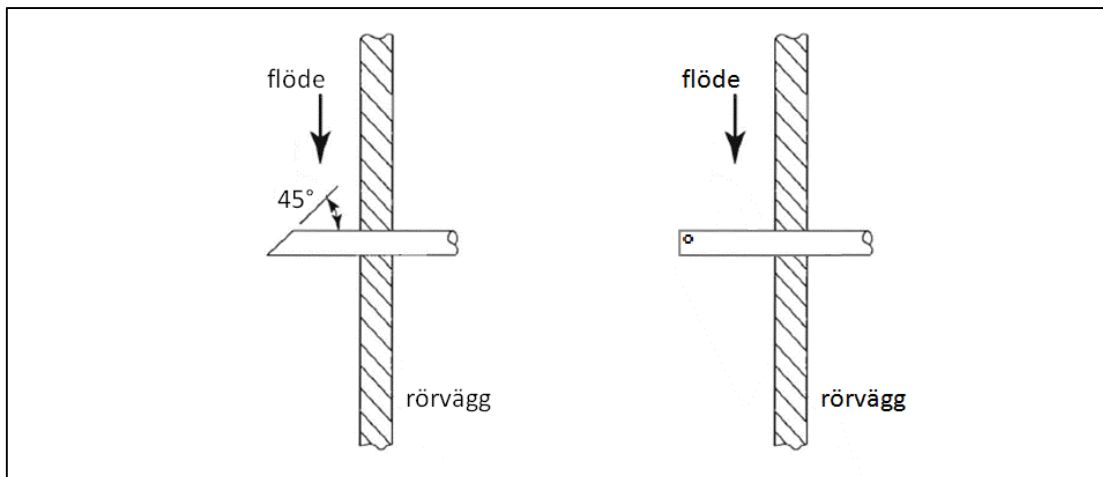
Materialet i provtagningssonden bör helst vara av rostfritt syrafast stål. Provtagningssonder för ånga kan vid behov utföras i samma material som ångledningen för att erhålla bättre förutsättningar vid insvetsning. Konstruktionen ska vara stadig och rejäl.

9.3.2.1 Vatten

Isokinetisk provtagning är kanske inte nödvändig för provtagning på vatten. Undantaget är vatten med höga halter suspenderat material där isokinetisk provtagning är att rekommendera. De vatten som normalt förekommer i vatten-ångcykeln har som regel låga halter suspenderat material. Provuttagen bör dock designas så att isokinetisk provtagning erhålls vid full last.

Vid provtagning på vatten ska sonden om möjligt placeras i en vertikal ledning med nedåtgående flöde vilket innebär bästa möjliga inblandning av fasta partiklar i vattnet. I de fall provet måste tas ut från en horisontell ledning ska sonden placeras i överkant av ledningen för att undvika att sedimenterat slam orsakat av låg strömningshastighet i ledningen påverkar provet.

En provtagningssond enligt Figur 167 rekommenderas för alla uttag för prov på vatten. Sonden ska stickas in 0,1 Ø i rörledningen. Det finns även andra sonder som ger ett motsvarande representativt provuttag men den rekommenderade sonden har ett enkelt utförande och är välbeprövad.



Figur 167. Rekommenderade provtagningssonder för provtagning på vatten

Figure 167. Recommended Nozzles for Sampling for Water

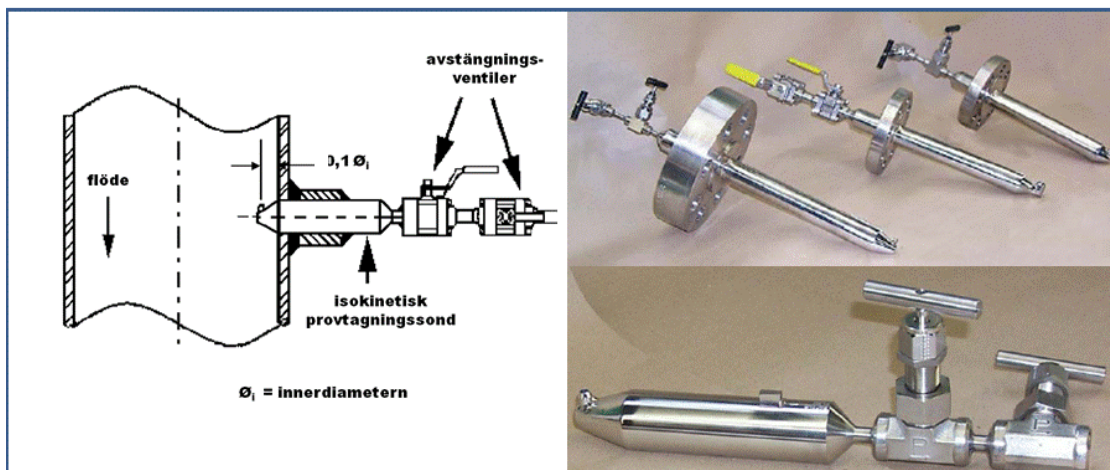
9.3.2.2 Ånga

Vid all provtagning på både mättad och överhettad ånga rekommenderas isokinetisk provtagning. Provtagningssonden designas så isokinetiska förhållanden gäller vid full last för mättad ånga och vid by-passflödet för överhettad ånga. Se kapitel 9.2.5 för dimensionering.

Föroreningar i mättad ånga orsakas som regel av överbäring av pannvatten till ångan. Risken för överbäring ökar med lasten varför provuttaget för mättad ånga ska dimensioneras för isokinetisk provtagning vid full last.

Sonden för överhettad ånga ska dimensioneras för isokinetisk provtagning vid by-passflödet för att det är då förutsättningarna är sämst för en bra ångkvalitet. Då är värmeutvidgningen i pannan som störst vilket kan medföra att magnetit, som har en sämre värmeutvidgning än godset i tuben, släpper från tubytorna. Det är också i det skedet som det ska avgöras när ångan är tillräckligt ren för att ledas till turbin.

Det finns många olika typer av sonder som ger ett mer eller mindre representativt prov på ånga. För provtagning på ånga rekommenderas en sond enligt Figur 168. Sonden ger ett representativt prov när inloppshålet placeras på ett avstånd av 0,1 x innerdiametern på ångledningen räknat från ångledningens insida. Där kan flödes hastigheten i det närmaste exakt förutsägas och ett full utvecklat turbulent flöde kan garanteras. Sonden kan antingen svetsas in i ångledningen eller anslutas med en fläns.



Källa: ASME D1066-06 och Jonas Inc.

Figur 168. Rekommenderad provtagningssond för provtagning på ånga

Figure 168. Recommended Nozzle for Sampling for Steam

Multiportsonder som tar ut prov på flera punkter i ångledningens tvärsnitt ska endast användas där ångans strömningsprofil kan fastställas.

Framför allt på provtagningssonder för ånga rekommenderas att det finns skriftliga rutiner för regelbunden inspektion då dessa utsätts för stora påfrestningar i form av termisk stress och erosionskorrosion.

9.3.3 Provtagningsledning

Provtagningsledningen transporterar provet från provtagningssonden fram till provtagningskylaren. Ledningen ska designas så att risken för att provet påverkas på vägen blir så liten som möjligt. Det förutsätter ett högt och konstant flöde. En provtagningsledning som regelbundet måste rensas är felldesignad.

Provtagningsledningar ska vara utförda i rostfritt syrafast stål och med en godstjocklek som motsvarar systemets tryckklass.

Provtagningsledningen bör vara så kort som möjligt då risken att provet påverkas ökar med längden på ledningen. Ledningen får inte ha några "dead-legs", d.v.s. förgreningar eller avstick utan flöde där partiklar kan ansamlas.

Det optimala provtagningsystemet har mycket korta ledningar. Vid många anläggningar vill man dock gärna samla all provtagningsutrustning i en centralt placerad rigg vilket kan innebära provtagningsledningar på upp mot 200 meter varför åtgärder måste vidtagas för att erhålla representativa prov.

9.3.3.1 Provtagning på vatten

Det är främst tryckfallet i provtagningsledningen som avgör vilken dimension som ska användas. Systemtrycket måste övervinna tryckfallet i ledningen.

Vid provtagning på vatten rekommenderas en flödes hastighet i provtagningsledningen på 1,8 m/s. Det minimerar risken för utfällningar orsakade av sedimentation och andra fysikaliska fenomen såsom deposition och erosion, samt termodynamiska, kemiska och fysikaliska förändringar såsom reaktion med syre, kristallisering och adsorption.

Ett spann mellan 1,2-2,1 m/s kan accepteras. Vid provtagning på ånga gäller samma sak om provet kondenseras ut direkt efter sonden i en primär kylare. Figur 169 visar vilka flöden den rekommenderade flödes hastigheten på 1,8 m/s motsvarar.

rördimension mm	invändig diameter mm	flöde ml/min	flöde kg/h
Ø 3x0,5	2	339	20
Ø 6x1	4	1 356	81
Ø 8x1	6	3 052	183
Ø 10x1	8	5 426	326
Ø 12x1	10	8 478	509

Figur 169. *Provvattenflöde vid olika rördimensioner vid en flödes hastighet på 1,8 m/s*

Figure 169. *Sample flow at different tubing dimensions and a flow rate of 1.8 m/s (6 ft/sec)*

I många svenska anläggningar är de befintliga provtagningssystemen designade för låga flödes hastigheter, ca 0,2 m/s, på vattnet i provtagningsledningarna. Denna flödes hastighet är för låg för ett representativt provuttag för analys av fasta partiklar. Provvattenflödet bör kunna ökas åtminstone vid manuella provuttag för analys av järn, koppar och korrosionsprodukter. Se rekommendationerna för befintliga anläggningar i kapitel 9.3.3.2.2.

9.3.3.2 Provtagning på ånga

Det finns några olika systemlösningar som kan användas för provtagning på mättad och överhettad ånga.

- Provtagningsledningar med så låga flöden att ledningarna måste rensas vid normal, kontinuerlig drift rekommenderas inte vid nybyggnation
- Bästa alternativet är en mycket kort ledning där ångan inte hinner kondensera ut före provtagningskylaren. Kylaren placeras direkt i anslutning till provtagningssonden och provet kyls till 25 °C. Även ledningen efter kylaren ska vara så kort som möjligt. För att undvika utfällningar av föroreningar i ledningen eftersträvas ett flöde av 1,8 m/s på det kylda ångkondensatet efter kylaren. Manuella prov tas ut direkt efter kylaren där även onlineinstrumenten är placerade. Det innebär alltså korta provtagningsledningar både före och efter provtagningskylare.

- Ett nästan lika bra alternativ är att kondensera provet i en primär provtagningskylare direkt efter provtagningssonden. Avståndet bör vara så kort som möjligt och inte överstiga 6 meter. Det räcker att kyla provet till strax under kondensationspunkten i detta steg. Provtagningsledningen dimensioneras så att provet kan transporteras som vatten med hög strömningshastighet (ca 1,8 m/s) till den centrala provtagningsriggen där provets temperatur justeras till ca 25 °C i en sekundär kylare.

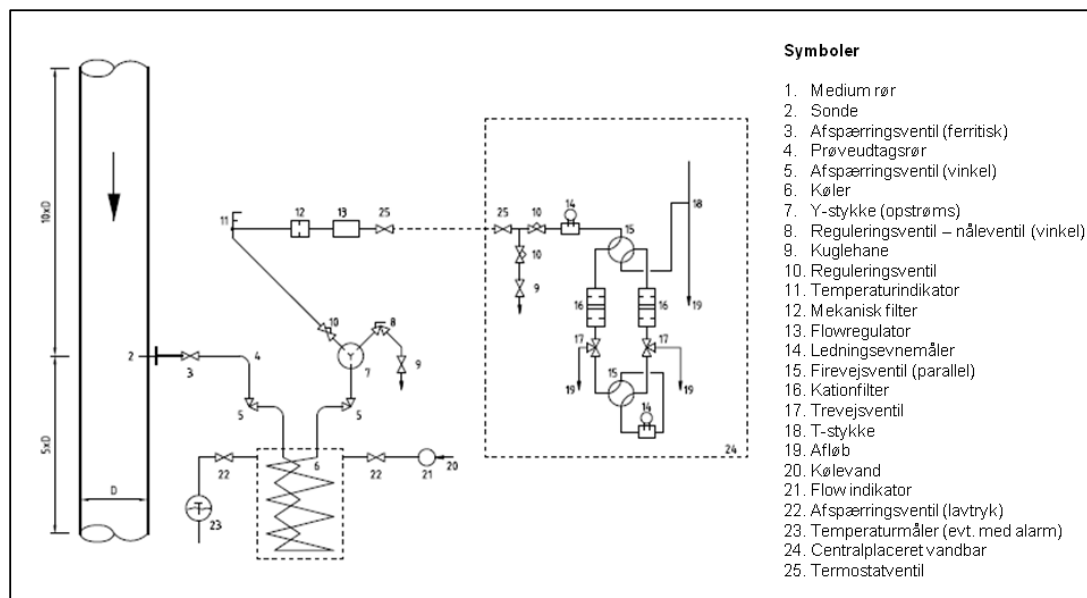
Då det som regel saknas lämpligt kylvatten i anslutning till provtagningspunkten finns denna lösning endast vid ett fåtal anläggningar. Det är främst större kraftverk byggda på 60- och 70-talet som utrustades med en primär provtagningskylare direkt i anslutning till provuttaget.

I samband med nybyggnation är det denna lösning som rekommenderas i första hand p.g.a. av dess praktiska och användarvänliga utformning. Den skapar förutsättningar för en representativ provtagning samtidigt som provtagningsutrustning och onlineinstrument kan samlas i ett centralt placerat provtagningsrum.

- En lösning som tagits fram av Dong Energy och som innebär kylning av provet i anslutning till provuttaget, manuellt provuttag för korrosionsprodukter direkt efter kylaren och transport av provet som vatten till de centralt placerade onlineinstrumenten är också ett intressant alternativ som bör övervägas. Se Figur 170.

9.3.3.2.1 *Provtagningsystem enligt Dong Energy*

Dong Energy i Danmark har tagit fram en lösning som bygger på de amerikanska rekommendationerna vad gäller hög flödeshastighet på vattnet i provtagningsledningen men med en annan design. En kylare placeras i nära anslutning till provuttaget och provet kyls till 25 °C. Se Figur 170. Det kylda provet leds, som vatten, via ett partikelfilter (12) och en flödesregulator (13) till den gemensamma provtagningsriggen där onlineinstrument för samtliga provpunkter är samlade. Partikelfiltret fångar upp fasta föroreningar och förhindrar att dessa faller ut i ledningen fram till onlineinstrumenten. Då onlineinstrumenten endast analyserar lösta föroreningar anses flödet i ledningen från provtagningskylaren inte ha någon betydelse än på responsen av mätvärdet.



Figur 170. *Provtagningsystem enligt Dong Energy.*

Figure 170. *Sampling system suggested by Dong Energy*

Vid provtagning för analys av järn eller andra fasta föroreningar i ångan tas provet ut direkt efter provtagningskylaren (ventil 9). Vid provuttag för järnanalys ökas flödet rejält för att rensola ledning och kylare. Provet tas ut efter ca 15 minuter med bibehållet högt flöde.

Detta är en lösning som relativt lätt bör kunna införlivas i befintliga provtagningsystem. Det innebär visserligen en investering att installera provtagningskylare och dra fram lämpligt kylvatten men befintliga provtagningsledningar kan användas för att leda provet till den centrala riggen med on-lineinstrumenten.

9.3.3.2.2 *Befintliga anläggningar*

I många svenska anläggningar är de befintliga provtagningsystemen designade för låga flödes hastigheter, 0,2–0,5 m/s på vattnet i provtagningsledningarna. Det är också osäkert om prov tas ut under isokinetiska förhållanden.

För befintliga anläggningar med befintliga provtagningsystemet rekommenderas:

- Att provtagningsystemet kontrolleras.
Om det är osäkert hur provtagningsystemet är konstruerat bör en kartläggning av systemet genomföras. Kartläggningen ger svar på om det finns provtagningssonder och hur dessa är konstruerade och placerade, rördimensioner, vilka flöden som krävs för isokinetisk provtagning, provvattenmängder etc.

Därefter fattas beslut om systemet ska byggas om och i vilken omfattning, alternativt inte byggas om. Det är i första hand vid analys av fasta partiklar i provet som det är viktigt att ha ett högt flöde i provtagningsledningen.

- **Ombyggnation.**
Provtagningsystemet anpassas till de rekommendationer som ges i rapporten i möjligaste mån, utifrån de tekniska och ekonomiska förutsättningar som finns vid den aktuella anläggningen. De mest kritiska provtagningspunkterna är de där det är av intresse att analysera järnhalten i provet.

I befintliga anläggningar kan det vara både kostsamt och besvärligt att installera en extra provtagningskylare i anslutning till provtagningssonden och dra fram lämpligt kylvatten. Men det är nästan en förutsättning för att säkerställa en representativ provtagning med minimal risk att provets sammansättning påverkas under transport till analysutrustningen. Se även kapitlet 9.3.7 angående vattenåtervinning.

En kompromiss kan vara att byta ut provtagningskylaren så att en större provvattenmängd kan tempereras. Det möjliggör att ett högt flöde vid provtagning kan användas, åtminstone vid manuella provuttag för analys av järn, koppar och andra korrosionsprodukter. Vid provtagning görs först en kraftig renspolning av provtagningsledningen, därefter justeras ett högt flöde (ca 1,8 m/s) in och efter 30 minuter med konstant flöde kan provet tas ut varpå flödet åter sänks till 0,2–0,5 m/s.

- **Utan ombyggnad eller anpassning till riktlinjerna.**
Väljer man att behålla ett lågt provtagningsflöde kommer föroreningar att fastna i provtagningsledningen. Det är då viktigt med regelbunden renspolning. Hur ofta ledningen måste rensas är beroende på vattenkvaliteten. I många anläggningar rensas ledningarna flera gånger i veckan och alltid före provuttag för järnanalys.

Det är också viktigt att vara medveten om att provet kanske inte är representativt för systemet och sätta sig in i vad detta innebär.

Brist på isokinetisk provtagning medför för prov på mättad ånga att alla analysvärden kan ifrågasättas, framför allt kisel, natrium, sur konduktivitet och järn. I överhettad ånga påverkas främst analyser av korrosionsprodukter.

Ett **lågt flöde i provtagningsledningen** medför för mättad ånga att främst järn och andra fasta föroreningar kan falla ut i provtagningsledningen. I överhettad ånga gäller det även salter såsom kisel och natrium. Flödesvariationer i provtagningsledningen kan medföra att deponerade föroreningar frigörs med felaktigt höga analysvärden som följd.

9.3.3.3 Tryck- och flödesreglering

Förutom en hög flödes hastighet rekommenderas också ett konstant flöde i provtagningsledningen. Provtagningsystemet ska utformas så att det inte uppstår variationer i flöde vid till exempel uttag av manuella prov eller om en analysator tas ur drift.

Bästa sättet att erhålla konstant flöde i provtagningsledningen är med hjälp av en tryckhållningsventil, en s.k. mottrycksregulator, som släpper en delström av provet till avlopp (eller återvinning). När ett on-lineinstrument kopplas in eller tas ur drift minskar

eller ökar mängden vatten i denna delström och flödet i provtagningsledningen förblir konstant. Manuella vattenprov tas med också fördel ut från denna delström.

9.3.4 Ventiler

Direkt efter provtagningssonden placeras en avstängningsventil för att man ska kunna genomföra service på provtagningssystemet. Vid många anläggningar monteras dubbla avstängningsventiler på provtagningsledning med högre tryck (>40 bar) för ökad säkerhet. Detta är dock inget krav.

Avstängningsventilerna ska ha samma invändiga diameter som provtagningsledningen.

Av praktiska skäl kan en ventil installeras före provtagningskylaren. Denna ventil ska också ha samma innerdiameter som provtagningsledningen. Ytterligare ventiler på provtagningsledningen bör undvikas före provtagningskylaren.

Efter provtagningskylaren placeras en eller flera ventiler för att reducera trycket. Det är viktigt att dessa ventiler är konstruerade för tryckreducering för att undvika slitage.

För prov med tryck över 40 bar kan det vara svårt att reglera tryck och flöde med en nålventil. En lösning kan då vara att välja en reducentventil av typ "rod-in-tube" eller på svenska "stav-i-kapillärrör" vilket ger en säker och problemfri reduktion av trycket. Vid tryck under 40 bar räcker det som regel med en högkvalitativ nålventil.

Materialet i samtliga ventiler ska vara av hög kvalitet och utförda i syrafast rostfritt stål eller motsvarande.

9.3.5 Provtagningskylare

Alla prov med en temperatur över 50 °C måste kylas i en provtagningskylare. Temperaturen som provet ska kylas ned till beror på vilka analyser som är aktuella. Kylardimension, kylvattenflöde och temperatur ska väljas för varje enskild applikation. Vanligtvis kyles provet till en temperatur så nära 25 °C som möjligt.

Det är viktigt att tänka på att dimensionera kylaren för det högre flöde som behövs för renspolning av provtagningsledningarna.

Provtagningskylarna ska vara tillverkade i ett material som inte påverkar eller påverkas av provet. Det innebär åtminstone rostfritt syrafast stål. I vissa applikationer krävs kylare av högre legerat stål eller andra korrosionsströga material. Exempel på sådana applikationer kan vara där kylvattnet utgörs av fjärrvärmevatten eller ett vatten med hög kloridhalt.

Vid provtagning på ånga rekommenderas en primär provtagningskylare direkt i anslutning till provtagningssonden för att snabbt kondensera provet. Den primära kylarens funktion är att kyla provet till under kondensationspunkten. Som kylvatten kan t.ex. kondensat, fjärrvärmevatten eller matarvatten användas för att återvinna värmeenergi i provet.

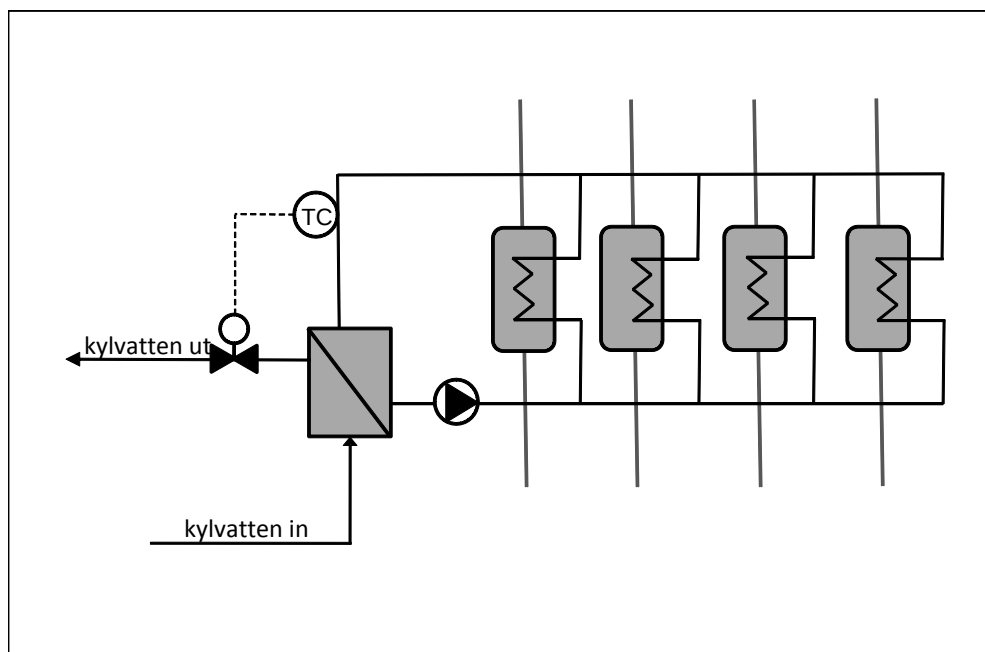
Prov på pannvatten eller andra prov med högt energiinnehåll kan med fördel kylas i två steg för att lättare kunna återvinna värmeenergin i provet. Det blir också lättare att reglera flöde och temperatur på provvattnet. En primär kylare på pannvatten kan dock placeras i anslutning till den sekundära provtagningskylaren då det inte föreligger något behov av kondensering av pannvattnet.

9.3.5.1 Kylning

Vilket vatten som ska användas som kylvatten bestäms av förutsättningarna för respektive anläggning. Det spelar inte så stor roll vilket vatten man använder under förutsättning att det är tillräckligt rent för att inte ge upphov till beläggningar på de värmeöverförande ytorna i kylaren.

Dagens kylare är effektiva och skillnaden mellan temperaturen på inkommande kylvatten och utgående prov är ofta liten. Ett vanligt förekommande problem på svenska anläggningar är svårigheten att reglera in kylvattenflödet så att provvatten får en temperatur på önskad 25 °C. Orsaken är att temperaturen på kylvattnet ofta är låg.

För att underlätta reglering av prov- och kylvattentemperaturerna rekommenderas ett slutet tempererat kylvattensystem. Se Figur 171. Det slutna kylvattensystemet kan i sin tur kylas med lämpligt vatten som finns att tillgå. Gärna på ett sätt så att värmeinnehållet kan återvinnas.



Figur 171. *Provtagningskylare med slutet kylvattensystem.*

Figure 171. *Sample coolers with closed circuit cooling system.*

Det är betydligt lättare att få en gemensam temperaturreglering att fungera tillfredsställande än en separat reglering för varje kylare. Genom att använda en kylvattentemperatur på drygt 20 °C kan ett högre kylvattenflöde användas och temperaturen på provet blir i stort sett konstant även om flödet ändras.

9.3.5.2 Nödkylsystem

Tillgången på kylvatten till provtagningsriggen bör säkerställas. Det är framför allt en säkerhetsaspekt. Vid utebliven kylning kommer varmt vatten och ånga att spruta ut ur provtagningskylarna vilket medför en potentiell risk för personskada. Sikten i ett ångfyllt rum är kraftigt nedsatt och risken för brännskador är överhängande.

Det finns flera sätt att förhindra skador på personal och utrustning orsakade av kylvattenbortfall. Några exempel är:

- prioriterade kylvattenpumpar
- en högt placerad nödkyltank som kan förse kylarna med vatten vid t.ex. strömavbrott.
- en temperaturvakt som stänger av provvattenflödet vid hög temperatur.

9.3.5.3 Övervakning av temperatur och flöde

En temperaturvakt rekommenderas på ledningen mellan provtagningskylaren och analysatorerna eller onlineinstrument. Det ger ett bra skydd vid driftstörningar som innebär ett kylvattenbortfall.

En självverkande termisk avstängningsventil som stoppar provtagningsflödet utan att släppa vatten till avlopp är att föredra. Det är självstyrda, mekaniska anordningar som inte behöver elektricitet, tryckluft, eller hydraulik. De återställs manuellt efter ett tillslag vilket säkerställer att provflödet inte återupptas innan orsaken till tillslaget har åtgärdats.

Temperaturövervakning, där en temperaturgivare ger signal till en reglerventil att öppna vid hög temperatur, kan också användas. Det avledda vattnet bör ledas till ett avspänningskärn om utebliven kylning kan medföra att vattnet blir varmare än 100 °C för att undvika att provtagningsrummet ångfylls. Ett ångfyllt rum kan leda till både personskaador och skada på instrument och annan utrustning.

Temperaturvakten bör ha en manuell återställning. Vakter med automatisk återställning bör undvikas då de släpper på vatten när temperaturen åter sjunkit under inställd temperatur. När vakten stänger sjunker temperaturen på vattnet som står i ledningen och vakten öppnar igen. Om det fortfarande saknas kylvatten kommer temperaturvakten åter att stänga för att fortsätta öppna och stänga växelvis tills orsaken till problemet åtgärdats.

Aktuell temperatur kan som regel erhållas och dokumenteras från något av onlineinstrumenten för t.ex. pH-värde eller konduktivitet.

En flödesmätare på provtagningsflödet efter provtagningskylaren är inget krav men kan vara till stor hjälp vid intrimning av flödes hastighet och för övervakning av provtagningsystemet.

9.3.6 Renspolning

Det finns tillfällen då en renspolning av provtagningssystemet är befogad, t.ex. i samband med driftsättning av en ny panna eller efter ett längre stopp.

En möjlighet till renspolning av provtagningssystemet bör finnas. Avsticket för renspolningsvatten placeras lämpligast efter provtagningsskylaren. Då erhålls även renspolning av kylaren. Avsticket kan även placeras före kylaren men då måste renspolningsvattnet ledas till avspänningskärl.

I provtagningssystem som är designade för höga flödeshastigheter kan renspolningen begränsas till fyra ledningsvolymeter och ett flöde som är 25 % högre än vid normal drift.

Provtagningssystem som är designade för lägre flödeshastigheter, 0,2–0,5 m/s, måste renspolas regelbundet. Renspolningsfrekvensen måste bestämmas erfarenhetsmässigt utifrån flöde, grad av föroreningar i det aktuella provet etc. Det faktum att en del partiklar fastar i provtagningsledningen måste tas med i beräkningen vid utvärdering av analysvärdena. Renspolningen bör ske med ett flöde motsvarande en flödeshastighet som överstiger 1,8 m/s med god marginal under 5–10 minuter.

9.3.7 Vattenåtervinning

De rekommendationer som ges i rapporten medför högre flöden än tidigare riktlinjer för både provvatten och kylvatten. Både överskott av kylt provvatten och kylvatten kan och bör återvinnas.

Flödeshastighet och provvattenmängd har ingen koppling till storleken på pannor eller flödet i ångledningen. Det innebär att provvattenmängderna blir i stort sett desamma oberoende av anläggningens storlek. I en liten anläggning blir dock vattenförlusten via provtagningsskylarna proportionellt större i förhållande till den totala spädvattenmängden än för en stor anläggning. Därmed blir effekten av ökade provvattenflöden och behovet av återvinning av provvatten större vid en mindre anläggning.

Överskott av provvatten kan med fördel samlas upp i en tank för att sedan pumpas till lämplig återföringspunkt i systemet. De flesta vattenströmmarna kan återföras till vattenångkretsen, flertalet direkt utan rening. Beroende på kvalitet kan provvattenströmmarna återföras till systemet via lämplig tank för råvatten, spädvatten, kondensat eller kanske direkt till matarvattentanken. Prov på pannvatten bör som regel renas innan det återförs till systemet. Det kan ske genom att överskottet av kylt pannvatten leds till råvattentanken för rening i befintlig avsaltningsanläggning.

För kylvatten kan både vatten och energi återvinnas. Hur detta bäst genomförs i praktiken måste lösas från fall till fall utifrån de förutsättningar som gäller vid den aktuella anläggningen.

9.4 Övervakning av vattenkemin

Samtliga relevanta parametrar i riktvärdestabellen för den aktuella anläggningen bör kontrolleras regelbundet genom direkt eller indirekt mätning. pH-värdet kan t.ex. ofta övervakas indirekt genom mätning av konduktiviteten, vilket är en enklare och mer tillförlitlig mätmetod. Se kapitel 10.2.5.4 om pH-mätning.

Det är viktigt att alla avvikande värden följs upp och orsaken kontrolleras/åtgärdas. Det gäller även mindre avvikelser där någon åtgärdsnivå inte överskrids. Genom att alltid följa upp dessa mindre avvikelser erhålls en ovärderlig kunskap om den egna anläggningen. Kunskap som kan hjälpa till att förhindra framtida driftstörningar och eventuella haverier.

9.4.1 *Omfattning, kärnparametrar*

Varje anläggning bör ha en miniminivå av instrumentering för mätning av de viktigaste parametrarna. Utifrån dessa mätningar kan åtgärder vidtas för att säkerställa att uppsatta riktvärden kan erhållas och därmed förhindra problem orsakade av en felaktig vattenkemi.

Det kan i princip räcka att mäta total och sur konduktivitet på alla provtagningspunkter i vatten-ångcykeln (se Figur 166). Det räcker i många fall för att larma om det sker någon förändring i vattenkemin. Det ger dock inte svar på vad som har hänt.

Vid de flesta energiproducerande anläggningar kompletteras instrumenteringen även med instrument för pH, natrium, kisel och restsyre för att få en heltäckande övervakning av vattenkemin i systemet. Dessa parametrar tillsammans med total och sur konduktivitet kallas för kärnparametrar eller "key parameters" på engelska. Se kapitel 10.2.5 om kärnparametrar.

9.4.2 *Manuella analyser*

Alla parametrar går inte att övervaka med hjälp av on-lineinstrument. Analys av korrosionsprodukter (järn, koppar) och fosfat måste göras manuellt. Analysfrekvensen för dessa parametrar måste avgöras från fall till fall för att bäst passa den aktuella anläggningen.

Analys av fosfat och koppar gäller endast anläggningar där fosfat doseras respektive system med som innehåller kopparkomponenter såsom kondensorer eller förvärmare etc.

Manuella analyser för kontroll av onlineinstrumenten behöver göras regelbundet för att kontrollera att on-lineinstrumenten visar tillförlitliga värden. Förslagsvis görs detta en gång i månaden samt vid avvikande värden eller oförklarliga svängningar i trendkurvorna. Man måste dock vara uppmärksam på att vissa instrument kan kräva en frekventare tillsyn.

9.4.3 On-lineövervakning

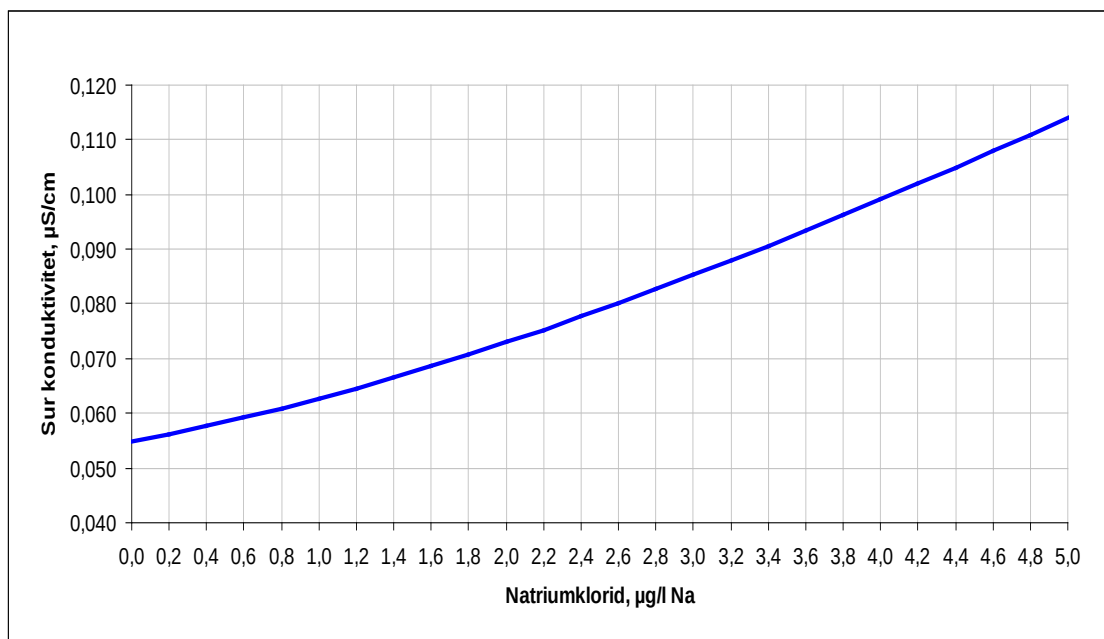
En fråga som ofta ställs är hur många on-lineinstrument som behövs för en tillfredsställande övervakning av vattenkemin. Här ges en rekommendation på en lägsta omfattning av on-lineinstrument som bör kunna accepteras. Omfattning av onlineinstrumenteringen bör dock avgöras individuellt för varje enskild anläggning.

Givetvis ger fler onlineinstrument en bättre övervakning och kontroll av anläggningen under förutsättning att instrumenten visar rätt och sköts på rätt sätt. En väl genomtänkt onlineinstrumentering ger möjlighet till en överlägsen övervakning av vattenkemin.

I takt med att övervakningen allt mer läggs över på instrumentering ökar givetvis kraven på tillförlitligheten på on-lineinstrumenten. Vikten av bra rutiner för kalibrering, underhåll och service kan inte nog understrykas.

Sur konduktivitet är en viktig parameter för övervakning av kvaliteten i vatten-ångcykeln. Det är en enkel, pålitlig och väl beprövad metod som kräver mycket lite underhåll.

Kurvan nedan visar förhållandet mellan natriumklorid, angiven som natriumhalt, och sur konduktivitet i rent vatten. Vid 0 µg/kg Na härrör sig konduktiviteten, 0,055 µS/cm, av vattnets dissociation till vätejoner och hydroxidjoner. (källa Lars Bäcklund)



Figur 172. *Natriumklorids inverkan på sur konduktivitet (25 °C)*

Figure 172. *The impact of sodium chloride on acid conductivity (25 degC)*

I princip kan man övervaka vattenkemin i ett kraftvärmeverk genom att bara mäta total och sur konduktivitet på alla vatten i vatten-ångcykeln. Det kan dock vara svårt att upptäcka inläckage via kondensatsystemet eller kiselläckage i avsaltningen och är inget

som rekommenderas om man inte har stor kunskap i vattenkemi och vilka krav som måste uppfyllas. För säkerhets skull bör även kisel och natrium mätas.

Låga halter föroreningar i form av NaCl eller Na₂SO₄, i t.ex. ånga, kondensat eller matarvatten, detekteras bättre genom mätning av natriumhalt än med sur konduktivitet. En natriumanalysator kan mäta natriumhalter mindre än 0,1 µg/kg Na med god noggrannhet. En natriumhalt som är 10 gånger högre, 1,0 µg/kg Na motsvarande 2,5 µg/kg NaCl, ger en ökning av sur konduktivitet på 0,008 µS/cm. En ökning som lätt försvinner i bruset från andra störningar som koldioxid eller vattnets temperaturvariationer.

Det är dock viktigt att tänka på att alla natriumanalysatorer drabbas av en insomningseffekt redan efter en kortare tids mätning (något dygn) på vatten med låg natriumhalt. Elektroden måste "väckas" regelbundet för att snabbt kunna reagera på små variationer i natriumhalt. Det kan göras genom provväxling där vatten med högre natriumhalt kopplas in på instrumentet med jämna intervall eller genom daglig kalibrering med en kalibreringslösning med högre natriumhalt.

En natriumanalysator eller en kiselanalysator är relativt dyra instrument. Genom att komplettera den med en provväxlare kan upp till sex provvattenströmmar analyseras i samma instrument. Provväxlingen innebär en diskontinuerlig övervakning med intervall som är beroende på hur många kanalen som används. Men även om man "bara" får ett mätvärde i timmen per vattenprov så är det 24 mätvärden per dygn. Jämfört med manuella analyser en gång i veckan är det mycket. Variationer i vattenkvaliteten mellan mättillfällen kan avläsas av en van "vattenkemist" med hjälp av total och sur konduktivitet.

9.4.4 Pannor med avsaltat spädvatten

I riktvärdestabellerna i denna handbok anges inte värden på åtgärdsnivå 3, ÅN3, för alla parametrar, utan endast för de som medför akut fara om de överskrids. Se kapitel 10.2.4 om åtgärdsnivåer.

I tabellen nedan visas en sammanställning av de parametrar som har riktvärden på ÅN3 vid anläggningar med avsaltat spädvatten. De är så viktiga för anläggningen att de bör övervakas kontinuerligt.

anläggning	provpunkt	pH-värde	konduktivitet total	konduktivitet sur	kiselsyra	natrium	restsyre
alla	avsaltningen		X		X		
	ånga			X	X	X	
	kondensat	X					
pannor med FOSFAT-dosering	matarvatten			X			X
	pannvatten	X	X				
pannor med AVT-kemi	matarvatten			X			X
	pannvatten	X		X			
pannor med LUT-dosering	matarvatten			X			X
	pannvatten	X	X	X			
genomströmningspannor	matarvatten	X		X		X	X

Figur 173. Sammanställning av de parametrar som har riktvärden på ÅN3 vid anläggningar med avsaltat spädvatten.

Figure 173. Compilation of parameters with action level 3 target values for plants with demineralised feed water.

Observera att den nedan rekommenderade lägsta omfattningen av online-instrument inte ger en heltäckande övervakning av vatten-ångcykeln utan måste kompletteras med mer omfattande manuella vattenanalyser. En utökad online-instrumentering medför en mindre omfattning av manuella analyser.

Graden av online-instrumentering är beroende av tryckklass i pannan, då högre tryckklass medför ökade krav på renhet i vatten-ångcykeln. I anläggningar med panntryck:

>100 bar Rekommenderas online-instrumentering åtminstone enligt Figur 173.

En mer omfattande online-instrumentering är dock ofta att föredra, t.ex;

- sur konduktivitet och/eller natriummätning på kondensat ger värdefull information om eventuella föroreningar i kondensatet.
- total konduktivitet på kondensat eller ånga kan användas för att kontrollera doseringsnivån på alkaliseringsmedlet.
- kisel i pannvatten.

40-100 bar Rekommenderas åtminstone online-instrumentering enligt Figur 173. Kisel är dock inte nödvändigt att mäta kontinuerligt.

En mer omfattande online-instrumentering är dock ofta att föredra, t.ex;

- sur konduktivitet och/eller natriummätning på kondensat ger värdefull information om eventuella föroreningar i kondensatet. Vid industrianläggningar är detta extra viktigt då risken för förorenat kondensat är stor.
- total konduktivitet på kondensat eller ånga kan användas för att kontrollera doseringsnivån på alkaliseringsmedlet.
- kisel­mätning på vattnet efter avsaltningen ger en förbättrad övervakning då kisel inte ger utslag på konduktivitet.

<40 bar
med
turbindrift Rekommenderas åtminstone kontinuerlig övervakning med sur konduktivitet på ånga och syrehalten i matarvattnet samt total konduktivitet på matarvatten, pannvatten och ånga.

Vid hög sur konduktivitet bör även natriumhalten övervakas.

Konduktivitet, både sur och total, är ett effektivt, enkelt och billigt sätt att övervaka vattenkvaliteten. Man kan med fördel sätta in ett flertal konduktivitetsmätare i systemet för att därigenom få värdefull information om ång- och vattenkvaliteten och tidigt kunna se förändringar i vattenkemin.

9.4.5 Pannor med avhärdat spädvatten

I riktvärdestabellerna i denna handbok anges inte värden på åtgärdsnivå 3, ÅN3, för alla parametrar, utan endast för de som medför akut fara om de överskrids.

I tabellen nedan visas en sammanställning av de parametrar som har riktvärden på ÅN3 vid anläggningar med avhärdat spädvatten. De är så viktiga för anläggningen att de bör övervakas kontinuerligt.

provpunkt	hårdhet	pH-värde	konduktivitet total	konduktivitet sur	kiselsyra	natrium	restsyre
spädvatten	X						
matarvatten							X
pannvatten		X	X				
ånga				X	X	X	
kondensat		X					

Figur 174. Sammanställning av de parametrar som har riktvärden på ÅN3 vid anläggningar med avhärdat spädvatten

Figure 174. Compilation of parameters with action level 3 target values for plants with softened feed water.

Vid de tryckklasser som är aktuella för pannor med avhärdat spädvatten, behöver i de flesta fall inte natrium och kisel mätas kontinuerligt med online-instrument. En regelbunden kontroll med manuella analyser i kombination med online-mätning av sur konduktivitet bör ge tillfredsställande övervakning av ångkvaliteten.

Vid turbindrift bör även natriumhalten övervakas om värdet på sur konduktivitet är högt.

Observera att den rekommenderade lägsta omfattningen av onlineinstrument inte ger en heltäckande övervakning av vatten-ångcykeln utan måste kompletteras med manuella vattenanalyser. En ökad online-instrumentering medför en mindre omfattning av manuella analyser.

Online-mätning av hårdheten efter avhärningsfiltren är inte nödvändig, även om det ger en ökad driftsäkerhet. Det räcker som regel att mäta hårdheten efter avhärningsfiltren manuellt efter regenerering och regelbundet i slutet av driftcykeln.

9.4.6 Dokumentation

Oavsett om övervakningen sker med manuella analyser eller med on-lineinstrument är det viktigt att dokumentera resultaten.

Vid många anläggningar skrivs manuella analyser in i ett protokoll som sedan hamnar i en pärm på laboratoriet. Det ger en dålig överblick av långsamma förändringar i vattenkemin. Analysvärden som istället lagras digitalt, i t.ex. en Excel-fil, ger möjlighet till uppföljning och utvärdering av trender under längre tid. Det är då lätt att ta fram trendkurvor som kan jämföras med andra processdata, ger en ökad förståelse av anläggningen och underlättar utredning av driftstörningar eller avvikande analysvärden.

Det bästa är om manuella analysresultat också kan avläsas i samma system som on-lineinstrumenten. Det ger möjlighet att jämföra manuella analyser med analysvärden från instrumenten.

Det finns anläggningar där man installerat ett flertal online-instrument utan att ansluta dessa till ett centralt övervakningssystem. Övervakningen sker genom att regelbundet, ett par gånger per dygn, läsa av och skriva ner aktuella analysvärden i en logg. Detta är givetvis något som inte kan rekommenderas.

9.4.7 Uppföljning, utvärdering och rapportering

En bra övervakning av vattenkemin ställer krav på de system som finns för uppföljning av vattenkemivärdena. Systemen måste vara designade för detta ändamål. Det får inte vara så att övervakningen måste anpassas till systemet utan systemet ska anpassas utifrån bästa sätt att övervaka vattenkemin.

En väl genomtänkt online-instrumentering ger möjlighet till en överlägsen övervakning av vattenkemin. De framsteg som görs inom IT kan och bör utnyttjas i en större omfattning för övervakning av vattenkemin än vad som görs i dagsläget.

Vid genomgång av trendkurvor ska alla oförklarliga toppar undersökas även om inte riktvärdet överskrids. Det ger ökad kännedom om anläggningen och många störningar kan avväjas i förväg.

Ett bra kvitto på hur vattenkemin varit under året får man vid den årliga invändiga besiktningen av anläggningen. Det är att rekommendera att den som ansvarar för vattenkemin också är med vid besiktningen. Fotodokumentation av besiktningen underlättar bedömning och jämförelse med tidigare besiktningar. Det är lätt att glömma hur det sett ut tidigare men med ett foto går det lättare. Eventuella beläggningar i panntuber eller turbin bör analyseras. Se kapitel 12.1 om invändig besiktning.

9.4.8 Instruktioner

Det grundläggande ska vara att ingen ska behöva tveka över vad som ska göras i en viss situation. Det ska finnas instruktioner som klart och tydligt beskriver tillvägagångssättet vid avvikande värden och larm.

Ett exempel på en instruktion för larm på ”hög kiselhalt efter avsaltning” kan vara:

1. Kontrollera flödet till analysatorn, justera vid behov
2. Kontrollera blandbäddsfiltret
3. Om larmet kvarstår ring driftingenjören

Det ska också vara entydigt vilka värden som är avvikande eller inte. Riktvärden kan med fördel anges på alla ställen där de kan tänkas underlätta värdering av analysvärdet, t.ex. på skärm i kontrollrummet, i analysprotokoll, på displayer till online-instrumentet. Se Figur 175.



Figur 175. Exempel på placering av provtagningspunkter

Figure 175. Example of sample point placing

Rutiner för kalibrering och service av online-instrumenten ska upprättas och följas för att säkerställa funktionen hos instrumenten. Någon instruktion för själva kalibreringen brukar man inte behöva ta fram då den som finns i manualen till instrumentet för det mesta går utmärkt att använda.

9.4.9 Utbildning

Förståelsen för vikten av en bra vattenkemi måste spridas inom hela företaget. Det är ingen bra lösning att bara en person har hela ansvaret och all kunskap. Det ställer orimliga krav på den personen och gör företaget sårbart.

En förutsättning för att få en fungerande övervakning är förankring på ledningsnivå. Det är tydligt att på anläggningar där driftledning har insett vikten av en bra vattenkemi och handlar därefter fungerar det också.

Såväl driftpersonal som driftledningen bör ha genomgått en utbildning i matarvattenbehandling med tyngdpunkten på förståelse för hur anläggningens olika delar påverkar varandra och felsökning vid avvikande analysvärden. Målsättningen är att ”alla ska känna till vikten av rätt vattenkvalitet”.

Det är viktigt att berörd personal vet vad som ska göras och kontrolleras vid eventuella larm och avvikande vattenkemivärden.

9.4.10 Rekommendationer

Det spelar ingen roll hur mycket som investeras i online-instrument om provuttagen är felaktigt utformade eller om inget vet hur man bör agera vid eventuella larm. Övervakning av vattenkemin är en kedja av funktioner som alla måste fungera fullt ut för att bli bra. Det gäller:

- Provtagningsutrustning med påstick, ledningar, ventiler och kylare
- Online-instrument
- System för hantering av mätvärden
- Rutiner för uppföljning och utvärdering
- Instruktioner för larm och avvikande värden
- Rutiner och instruktioner för kalibrering och service av utrustningen
- Alla ska känna till vikten av rätt vattenkvalitet

Med en rätt utformad och efterlevd övervakning av vattenkemin är risken för driftstörningar orsakade av dålig vattenkvalitet liten.

9.4.10.1 Provtagningssystem

Vid nybyggnation rekommenderas att rekommendationerna som anges i denna handbok följs fullt ut för att säkerställa en representativ provtagning.

Vid befintliga anläggningar är givetvis det bästa att bygga om provtagningssystemet så att det följer rekommendationerna i handboken men det kan vara svårt att ekonomiskt försvara denna ombyggnad. Alternativet kan vara en kompromiss med en mindre åtgärd för att göra det bästa möjliga av situationen utifrån förutsättningarna i den aktuella anläggningen.

Det är då viktigt att sätta sig in i vad detta innebär för anläggningen om det inte kan säkerställas att provet är representativt.

9.4.10.2 Övervakning

I handboken rekommenderas en miniminivå för online-instrumentering. Online-instrumenteringen bör dock anpassas individuellt för varje enskild anläggning för att säkerställa bästa möjliga övervakning i förhållande till anläggningens behov och förutsättningar.

10 Riktvärden

I detta kapitel ges en sammanställning av de senaste riktvärdena för vatten och ånga. Riktvärdena är anpassade för svenska energiproducerande anläggningar.

De riktvärden som anges i denna handbok baseras i huvudsak på de riktvärden som anges i nedanstående standarder och rapporter.

- Värmeforsk rapport 958 *”Riktvärden för vatten och ånga anpassade för svenska energianläggningar”*
- ”VGB-Standard *“Feed Water, Boiler Water and Steam Quality for Power Plants/Industrial Plants”* (VGB--S-010-T-00;2011-12.EN), December 2011
- IAPWS Technical Guidance Document, *“Volatile treatments for the steam-water circuits of fossil and combined cycle/HRSG power plants”*, July 2010.
- IAPWS Technical Guidance Document, *“Phosphate and NaOH treatments for the steam-water circuits of drum boilers of fossil and combined cycle/HRSG power plants”*, September 2011.
- IAPWS Technical Guidance Document, *“Steam Purity for Turbine Operation”*, September 2013.

Några mindre uppdateringar har gjorts mot bakgrund av de riktvärden som utgivits på senare tid av VGB och IAPWS. Dessa riktvärden från VGB och IAPWS rekommenderas även för den som vill fördjupa sig inom området.

Det ska påpekas att de riktvärden som anges i denna handbok är rekommendationer och inte tvingande i strikt juridisk mening. De är tänkta som ett stöd för den driftansvarige som ska sköta och övervaka sin anläggning.

10.1 Bakgrund

Vatten- och ångkemin i ett system måste hålla en hög kvalitet för att skador till följd av korrosion och beläggningar i möjligaste mån skall kunna minimeras. Detta innebär bl.a. ett högsta innehåll av salter och föroreningar som kan ge upphov till eller öka risken för korrosion eller som kan överskrida mättnadsnivån och bilda beläggningar.

Erfarenheter av bl.a. skador och driftstörningar har sammanställts av ett flertal organisationer vilka sedan gett ut rekommendationer, riktlinjer, angående vilken kvalitet som vatten och ånga bör ha i systemens olika delar.

Genom att anpassa vattenbehandlingen och vattenkemin i systemet så att riktvärden innehålls undviks i de allra flesta fall förlopp som kan leda till skador. Detta innebär dock inte att skador alltid kommer att inträffa om riktvärden tillfälligtvis överskrids, inte heller att skador aldrig kommer att inträffa om riktvärden innehålls.

I ett leveranskontrakt för en anläggning ska det skrivas in värden för vatten- och ångkvalitet. I dessa fall är angivna värden tvingande och om de inte innehålls innebär det ett avtalsbrott. I andra länder kan riktvärden vara tvingande i högre grad.

Riktlinjer och riktvärden ges ut i olika länder, under former som är specifika för varje land och dess lagstiftning. Även stora företag inom ett land kan ha sina egna riktlinjer. Internationella organisationer har också sammanställt riktvärden.

Strukturen och omfattningen hos olika dokument med riktvärden, såväl nationella som internationella, är mycket varierande. Vissa innehåller endast en enkel uppsättning riktvärden medan andra ger riktlinjer med en struktur som liknar den hos en handbok i vattenkemi. De storheter för vilka riktvärden anges är inte alltid desamma. Somliga använder ett fåtal riktvärden, andra betydligt fler, beroende på den hjälp som avses lämnas till den driftansvarige.

I stort sett är de kvalitetskrav som ställs i de olika uppsättningarna av riktvärden likvärdiga. Det förekommer dock betydelsefulla skillnader för ett antal storheter, där olika bedömningar har gjorts av olika organisationer. En orsak till detta kan vara att anläggningar byggs och utformas på olika sätt på olika håll i världen. Även körsätt och driftförhållanden kan påverka nivån på enskilda parametrar.

10.2 Allmänt

Riktvärden anges för olika typer av vattenbehandling och material i systemen. Beaktande har också gjorts för användande av andra alkaliseringsmedel än ammoniak för pH-justerings av ånga, kondensat och matarvatten.

De riktvärden som anges i detta kapitel gäller för kontinuerlig drift, med en mer eller mindre konstant last. Vid idrifttagandet av en ny anläggning eller vid anläggningar med cyklisk drift, d.v.s. med frekventa start och stopp (t.ex. spetslastpannor), är det inte alltid möjligt att hela tiden innehålla riktvärdena. Vid igångsättning av en anläggning som stått stilla bör kontinuerligt driftförhållande uppnås inom ett par timmar. Speciella åtgärder kan vara nödvändiga vid anläggningar som körs i cyklisk drift för att uppnå kontinuerliga driftförhållanden så snart som möjligt. Sådana åtgärder kan t.ex. vara filtrering eller dumpning av örent kondensat under de första timmarna.

Riktvärdena syftar till att undvika skador på utrustningen. Inom vissa tillämpningar (sjukvård, livsmedelindustri, m.fl.) kan andra krav ställas på ångans kvalitet och på de tillsatser som doseras. Ofta anpassas också materialvalet efter dessa krav.

10.2.1 Spädvattenkvalitet

Riktvärdena har delats upp i tabeller beroende på spädvattenkvalitet. Kraven på framför allt pannvatten är olika beroende på om anläggningen spädmatas med avhärdat eller avsaltat spädvatten.

För ånga gäller i princip samma riktvärden och åtgärdsnivåer för alla energianläggningar, oavsett spädvattenkvalitet. Den sura konduktiviteten kan dock vara högre i anläggningar med avhärdat spädvatten p.g.a. koldioxid och eventuella organiska föroreningar. IAPWS har gett ut en TGD [30] (Technical Guidance Document) gällande ångkvalitet till

30 IAPWS Technical Guidance Document, "Steam Purity for Turbine Operation", September 2013.

turbiner. I denna TGD anges riktvärden för ånga, utifrån turbinens krav på ångkvalitet, oavsett vilken typ av anläggning ångan kommer ifrån.

När de gamla riktvärdena, som angavs i föregångaren till denna handbok (Värmeforsk rapport nr. 729) togs fram kördes de flesta anläggningarna i Sverige fortfarande med avhärdat spädvatten. I dagsläget ser det annorlunda ut och avsaltat spädvatten används vid allt lägre panntryck. Orsaken är att allt fler inser att driftekonomin blir bättre med avsaltat spädvatten samtidigt som investeringskostnaderna för avsaltningsanläggningar blivit allt lägre.

Fördelarna är många, bl.a:

- Med ett renare spädvatten minskar behovet av bottenblåsning vilket ger bättre driftekonomi.
- Skyddsskiktetsbildningen på panntuberna blir bättre med lägre salthalt vilket ger minskad risk för korrosion.
- Beläggningsgraden i panntuberna minskar, vilket minskar behovet av kemisk rengöring.
- Det allmänna underhållet på pannan blir lägre.
- Mängden doseringskemikalier blir betydligt mindre.
- Vid avsaltningen med RO-teknik avskiljs >99 % av allt organiskt material.

Generellt är ett avsaltat vatten att föredra även för pannor med lägre tryckklass.

Avsaltat spädvatten rekommenderas för alla ångproducerande anläggningar.

Förr skiljde man mellan avsaltat och totalavsaltat vatten. Avsaltat vatten renades i en avsaltningsanläggning bestående av stark kat- och anjonbytare medan det totalavsaltade vattnet renades i en motsvarande avsaltningsanläggning kompletterad med ett blandbäddsfiltret för polering av vattenkvaliteten.

Motströmsregenerering medförde en ökad vattenkvalitet även om behovet av polerande filter kvarstod. Jonbytestekniken utvecklas kontinuerligt och i dag är det vanligt med polerande katjonfilter istället för blandbäddsfiltret. Det bedrivs en omfattande forskning inom jonbytesteknik och i framtiden, med ny teknik för t.ex. fördelning av vatten och kemikalier i filtren, kommer med största säkerhet vattenkvaliteter som närmar sig det som tidigare kallades totalavsaltat vatten att kunna erhållas utan efterföljande polering.

I dag kan motsvarande vattenkvalitet även framställas med andra vattenreningstekniker. Membrantekniken fick sitt genombrott på 1990-talet och är i dag den dominerade vattenreningstekniken inom t.ex. kraftindustrin. I ett RO-aggregat avskiljs huvuddelen, vanligtvis 95-98 %, av salterna. Vattnet måste dock renas ytterligare för att uppfylla de krav som ställs vid anläggningar med högre panntryck, vilket kan göras i ett efterföljande blandbäddsfiltret. I blandbäddsfiltret används nästan uteslutande engångsmassa, dvs. jonbytesmassan regenereras inte när den förbrukats utan byts ut mot ny färdigregenererad massa.

På senare år har det blivit vanligt att det polerande blandbäddsfiltret ersätts med ett eller flera EDI-aggregat. Det är teknik där vattnet poleras med en kombination av jonbytesteknik, membranteknik och likström. Se 6.5.2 om elektro-avjonisering

Figur 176 visar vilken kvalitet som bör kunna uppnås, i genomsnitt under driftcykeln, med olika vattenreningstekniker. (Källa: Lars Bäcklund)

Reningsteknik	Vattenkvalitet
Stark kat- och anjon (medströmreg.)	<0,3 µS/cm
Stark kat- och anjon (motströmreg.)	<0,5 µS/cm
Stark kat- och anjon med polerande katjon	<0,2 µS/cm
Stark kat- och anjon med polerande blandbädd	<0,1 µS/cm
RO	<5 µS/cm
RO med polerande blandbädd	<0,1 µS/cm
RO / EDI	<0,07 µS/cm

Figur 176. *Kvaliteter på avsaltat vatten*

Figure 176. *Demineralised water qualities*

I handboken används uttrycket avsaltat vatten för samtliga vattenkvaliteter där huvuddelen av salterna avlägsnats i vattenreningsanläggningen. Riktvärdena på spädvattnet styr utformningen av vattenreningsanläggningen.

10.2.2 Pannvattenbehandling

Fosfatdosering rekommenderas för alla pannor med **avhärdat spädvatten**. Även i anläggningar med väl fungerande jonbytesfilter kommer det avhärdade vattnet att innehålla någon, om än mycket låg halt resthårdhet. Här finns en potentiell risk för beläggningar på värmeöverförande ytor i pannan. Se kapitel 4.2.3.

I anläggningar, som spädmatas med **avsaltat vatten**, finns några olika sätt att behandla pannvatten. I denna handbok anges riktvärden för de tre vanligaste behandlingsmetoderna i Sverige. Riktvärden anges även för genomströmspannor med syrgasdosering.

AVT

AVT (All Volatile Treatment) är ett amerikanskt uttryck och innebär behandling med enbart ammoniak och/eller (flyktiga) alkaliserande aminer.

FOSFAT

Dosering av fosfat i kombination med ammoniak och/eller alkaliserande aminer är det vanligaste behandlingssättet vid svenska anläggningar. Kallas PT (phosphate treatment)

på engelska. Erfarenheterna av denna behandling är mycket goda. Se kapitel 7.3.1.2.1.1 om dosering av fosfat.

LUT

Dosering av lut (NaOH) används vid en del anläggningar för att justera pH-värdet i pannvattnet och därmed skapa förutsättningar för en bra pannvattenkemi. Kallas CT (caustic treatment) på engelska. Lutdoseringen kompletteras med ammoniak och/eller alkaliserande aminer.

Dosering av lut till pannvattnet är vanligt förekommande i stora delar av världen, bl.a. Danmark och Tyskland. I Sverige doseras lut vid en del kraftvärmeanläggningar med högre panntryck. Doseringen bör göras med viss försiktighet eftersom felaktig dosering eller överbäring av pannvatten till ångan kan medföra spänningskorrosion i systemet, vilket ställer höga krav på övervakning av bl.a. ångkvaliteten.

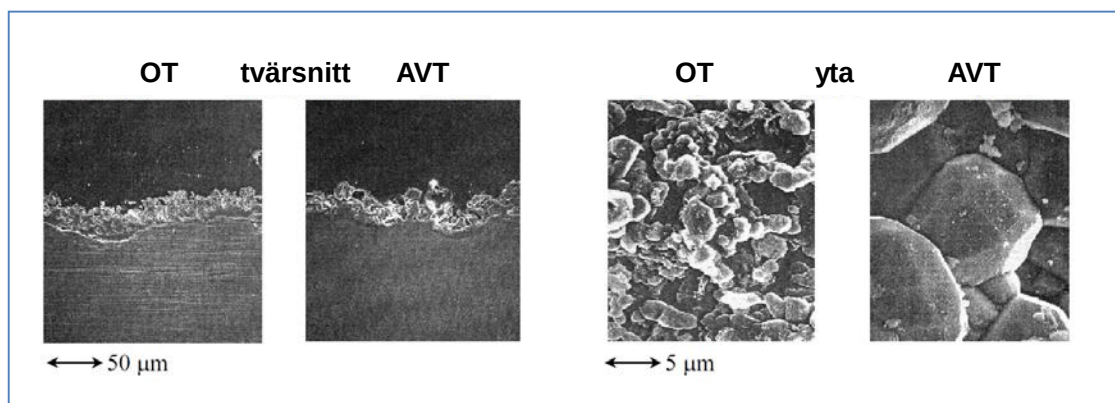
OT

OT (Oxygenated Treatment) är en behandling där matarvattnet doseras med ammoniak i kombination med dosering av syrgas för att minska korrosionen i pannan och dess matarvattensystem. OT används främst för genomströmningspannor med kan användas även för dompannor.

Vid OT doseras syrgas in i matarvatten för att erhålla en syrenivå mellan 30-50 ppb. Syrgasen doseras vanligtvis både till ledningen efter kondensatfilter och till matarvattenledningen före matarvattenpumpen.

Syret bildar ett skyddande skikt av hematit (Fe_2O_3) ovanpå magnetiten. Hematitskiktet är tätare och har en jämnare yta än magnetitskiktet som erhålls vid dosering av enbart ammoniak. Se Figur 177. Det medför ett lägre motstånd för vattenflödet. Risken för FAC minskar också med OT. Se även kapitel 4.2.1.2 om hematitbildning.

En förutsättning vid OT är att den sura konduktiviteten kan hålls under $0,15 \mu\text{S}/\text{cm}$. Bästa sättet att säkerställa en låg sur konduktivitet är att installera ett jonbytande kondensatfilter (precoat-filter eller djupbäddfilter).



Figur 177. Tvärsnitt och yta av panntuber vid OT och AVT-behandling

Figure 177. Cross section and surface of boiler tubes with OT and AVT

10.2.3 Material i systemen

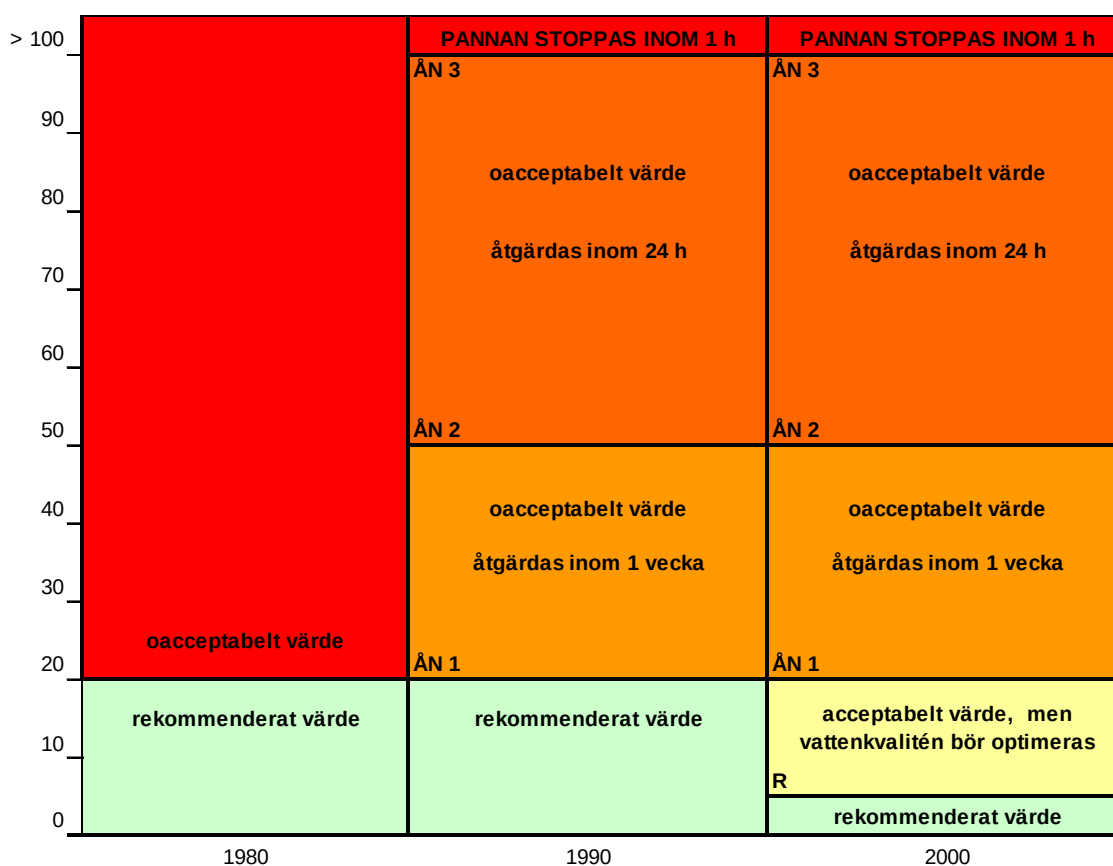
Riktvärdena för framför allt pH-värde är beroende på vilka material som finns i systemet. Vanliga material i vatten-ångcykeln är kolstål och rostfria stål. I framför allt äldre anläggningar kan det finnas koppar eller kopparlegeringar i kondensat- och matarvattensystem.

Koppar är känsligt för komplexbildande föreningar, t.ex. ammoniak, som vid höga halter medför risk för förhöjd korrosionsnivå, speciellt vid närvaro av syre och koldioxid. Det är därför extra viktigt att ha kontroll på pH-värdet och syrehalten i system med värmeväxlare i koppar. Ammoniak kan också i vissa fall medföra risk för spänningsskorrosion i kopparlegeringar.

10.2.4 Åtgärdsnivåer

Förr angavs riktvärden endast med ett värde. Alla värden över (eller under) riktvärdet var oacceptabla. För att hjälpa anläggningsägare och ansvariga operatörer började man på 1990-talet införa "action levels" eller åtgärdsnivåer. Det innebär att ett överskridande delas in i nivåer där värdena kan accepteras under kortare perioder. Även periodens längd anges.

På senare år har även en rekommenderad nivå börjat anges. Det vill säga värden som normalt erhålls under en längre tid med kontinuerlig drift. Vid värden som avviker från normal drift bör en åtgärd göras för att återfå det normala värdet även om man ligger långt ifrån en oacceptabel nivå. Se Figur 178.



Figur 178. Riktvärden och åtgärdsnivåer

Figure 178. Target values and action levels

OBSERVERA! Det måste påpekas att angivna tidsintervall är grovt uppskattade trots att de är allmänt vedertagna. Hur lång tid en anläggning kan köras med avvikande värden är drift- och anläggningsberoende. Varje start, stopp och driftstörning påverkar anläggningens livslängd och/eller tidsintervallet fram till nästa kemiska rengöring på ett negativt sätt.

Förklaring av åtgärdsnivåerna:

Analysvärden lägre än R (eller inom angivet intervall) är det analysvärde som normalt erhålls vid en längre tids drift med konstanta förhållanden, s.k. steady-state. En säkerhetsmarginal finns inbakad i riktvärdet. Nivån förväntas medföra låg risk för problem i form av beläggningar eller korrosionsangrepp.

R - Rekommenderat värde. Värdet som anges är endast en fingervisning av vad man normalt kan förväntas att uppnå. **OBSERVERA** att detta värde är anläggningsberoende och **MÅSTE** tas fram separat för varje enskild anläggning.

Intervallet mellan rekommenderat värde och åtgärdsnivå 1 är ett acceptabelt värde. Analysvärden som överstiger (eller understiger) rekommenderad nivå innebär att vattenkemin inte är optimal. Orsaken till detta bör undersökas och eventuellt åtgärdas även om ÅN1 inte överskrids.

ÅN1 - Åtgärdsnivå 1 anges i riktvärdestabellerna.

Intervallet mellan ÅN1 och ÅN2. Här finns en potentiell risk för korrosion och/eller kontaminering. Åtgärder måste vidtas för att återkomma till normal nivå inom en vecka. Maximalt tillåten tid vid åtgärdsnivå 1 är två veckor/år (med undantag för tid vid driftsättning, dvs. första uppstart av anläggningen).

ÅN2 - Åtgärdsnivå 2 anges i riktvärdestabellerna.

Intervallet mellan ÅN2 och ÅN3. Här föreligger stor risk för korrosion och/eller kontaminering. Åtgärder måste vidtas för att återkomma till normal nivå inom 24h. Maximalt tillåten tid vid åtgärdsnivå 2 är 48 timmar/år (med undantag för tid vid driftsättning, dvs. första uppstart av anläggningen).

ÅN3 - Åtgärdsnivå 3 anges i riktvärdestabellerna.

Analysvärden som överstiger (eller understiger) ÅN3 nivå innebär omedelbar fara för anläggningen. Stoppa anläggningen så fort som omständigheterna tillåter för att undvika skador. Systemet måste felsökas och åtgärder vidtas för att återföra vattenkemin till rekommenderad nivå innan pannan åter startas.

ÅN3 anges inte för alla parametrar utan endast för de parametrar som anses medföra akut fara för haveri i anläggningen om de överskrids.

Fördelen med att rekommendera värden som erhålls vid en tids kontinuerlig drift är att riktvärden då mer speglar en normal drift. Riktvärden som ligger långt från de värden som erhålls normal drift har egentligen inget värde. Om man t.ex. vid normal drift alltid har en kiselhalt i ångan under 2 µg SiO₂/kg så innebär det att när kiselhalten stiger över 5 µg SiO₂/kg är något inte som det ska vara i anläggningen. Orsaken till avvikelsen bör undersökas samt eventuellt åtgärdas. Det finns ingen anledning att vänta tills kiselhalten överstiger riktvärdet 20 µg SiO₂/kg. Åtgärdsnivåerna är också ett bra stöd för driftpersonalen vid osäkerhet om vilka nivåer som man bör ligga på.

10.2.5 Kärnparametrar

Det kan i princip räcka att mäta total och sur konduktivitet på alla provtagningspunkter i vatten-ångcykeln för att övervaka förändringar i vattenkemin. Det ger dock inte svar på vad som har hänt. Därför kompletteras on-lineinstrumenteringen vanligtvis med t.ex. instrument för pH, natrium, kisel och restsyre för att få en heltäckande övervakning av vattenkemin i systemet. Dessa parametrar tillsammans med total och sur konduktivitet kallas för kärnparametrar eller ”*key parameters*” på engelska.

10.2.5.1 Total konduktivitet

Total konduktivitet är ett mått på salthalten i vattnet och en bra parameter för att detektera eventuella förändringar i systemet. Se även kapitel 2.5.3 konduktivitet.

En rekommenderad nivå på riktvärden anges i tabellerna för total konduktivitet i matarvatten, ånga och kondensat. Värdena som anges gäller endast vid ammoniakdosering, andra alkaliseringsmedel kan ge en högre (eller lägre) konduktivitet.

Alla anläggningar bör ha riktvärden för total konduktivitet i matarvatten, ånga och kondensat. De måste anpassas individuellt för den aktuella anläggningen beroende på vilket alkaliseringsmedel som används. Vid kontinuerlig störningsfri drift är det endast alkaliseringsmedlet som ger konduktivitet i ångan. Konduktiviteten är alltså proportionell mot aminhalten och därmed även pH-värdet. Det innebär att konduktiviteten kan användas för att kontrollera och styra doseringsmängden av ammoniak eller andra alkaliserande aminer.

Riktvärden för total konduktivitet bör även sättas, individuellt för varje anläggning, för andra vatten där allmänna riktvärden inte anges. Total konduktivitet är en ovärderlig parameter när det gäller att upptäcka avvikelser och/eller störningar i vattenkemin.

Riktvärden för konduktivitet i pannvatten i pannor med avhärdat spädvatten anges som den faktiska konduktiviteten i pannvattnet. Tidigare har riktvärdet för konduktiviteten angetts på neutraliserat prov, där provet neutraliserades med syra mot fenolftalein för bestämning av konduktiviteten.

10.2.5.2 Sur konduktivitet

Den s.k. sura konduktiviteten är en av de viktigaste och vanligaste kontrollparametrarna gällande ångkvalitet vid turbindrift och så gott som alla förekommande riktlinjer för ångkvalitet anger ett visst högsta riktvärde för den sura konduktiviteten.

Internationellt har sur konduktivitet har flera olika namn, t.ex. Cation Conductivity, Acid Conductivity. Ett begrepp som introducerats på senare tid är CACE, vilket står för Conductivity After Cation Exchanger.

Fördelen med övervakning av sur konduktivitet är att det är en enkel och billig metod att övervaka halten av föroreningar i form av salter. Den sura konduktiviteten mäts efter att provvattnet passerat genom en kolonn med starkt sur katjonbytarmassa. I den starkt sura katjonbytarmassan byts katjonerna i den kondenserade ångan ut mot vätejoner. Detta medför att det annars dominerande bidraget till ledningsförmågan från baser som

ammoniak och alkaliserande aminer elimineras, eftersom baser omvandlas till vatten. Eventuellt förekommande salter, t.ex. klorider och sulfater, omvandlas till syror, med en uppskattningsvis tre gånger så hög ledningsförmåga som motsvarande neutrala salt.

Den starkt sura katjonbyttarmassan "renodlar" och förstärker alltså salternas bidrag till den elektriska ledningsförmågan och fungerar därmed som en sorts "kemisk förstärkare".

Problemet är att även mindre aggressiva föroreningar som koldioxid och organiska syror ger ett bidrag till den sura ledningsförmågan. Detta kan leda till en relativt hög bakgrunds nivå av sur konduktivitet, vilket gör det svårt att innehålla det specificerade riktvärdet. Det gör det också svårt att använda sur konduktivitet för att uppskatta halten av starkt aggressiva anjoner som klorider och sulfater, eftersom bidraget av dessa döljs av bidraget från koldioxid och organiska syror.

Koldioxid är en vanlig förorening i vatten-ångcykeln. Inläckage sker via kondensorer och övriga delar i kondensatsystemet. Genom att aktivt arbeta med att minska inläckage via dessa system kan halten koldioxid minimeras. Koldioxid bildas även genom termiskt sönderfall av organiska föreningar i spädvatten och returkondensat vid de höga temperaturer som råder i panna och överhettare. En ytterligare källa till bildning av koldioxid och även organiska syror är sönderdelning av doseringskemikalier innehållande organiska aminer och syrereduktionsmedel.

Problematiken med en hög bakgrunds nivå av sur konduktivitet p.g.a. en förhöjd halt av koldioxid och/eller organiska syror hanteras i dessa riktlinjer. Detta har man inte tagit hänsyn till i tidigare riktlinjer.

I anläggningar som använder organiska doseringskemikalier som t.ex. organiska aminer och syrereduktionsmedel blir ofta den sura konduktiviteten högre än vad rekommenderade riktvärden tillåter i samband med att produkterna bryts ned. Det behöver inte betyda att detta innebär en fara för anläggningen. Högre värden på sur konduktivitet än vad som anges i riktvärdena kan i dessa fall accepteras under förutsättning att pH-värdet ligger inom angivna riktvärden och att det kan säkerställas att den sura konduktiviteten inte orsakas av några för anläggningen skadliga ämnen. Genom att t.ex. mäta natriumhalten kan man säkerställa att den höga sura konduktiviteten inte beror på NaCl, Na₂SO₄ eller NaOH etc.

Även om man väljer att under vissa förutsättningar tolerera en viss förekomst av dessa föroreningar, så återstår problemet att en hög bakgrunds nivå av sur ledningsförmåga kan dölja relativt höga halter av klorider och sulfater, t.ex. vid inläckage av kylvatten eller fjärrvärmevatten i systemet, eller vid en onormalt hög mekanisk överbäring av pannvatten från domen. Man måste då övervaka halterna av dessa mera aggressiva föroreningar på något annat sätt, t.ex. via natriummätning.

Natriummätning detekterar dock inte ammoniumklorid och ammoniumsulfat i ånga vid AVT-kemi. I anläggningar med blandbäddsfiler för rening av kondensatet räcker det inte med natriummätning för att upptäcka ett läckage av regenereringskemikalier.

I anläggningar där man betraktar koldioxid och/eller organiska syror som föroreningar som inte kan tolereras över en viss halt måste man naturligtvis vidta åtgärder. Aktuella

åtgärder kan vara att se över kemikaliebehandlingen, minimera risken för inläckage av vatten och luft till vatten-ångcykeln, installera kondensatfilter etc.

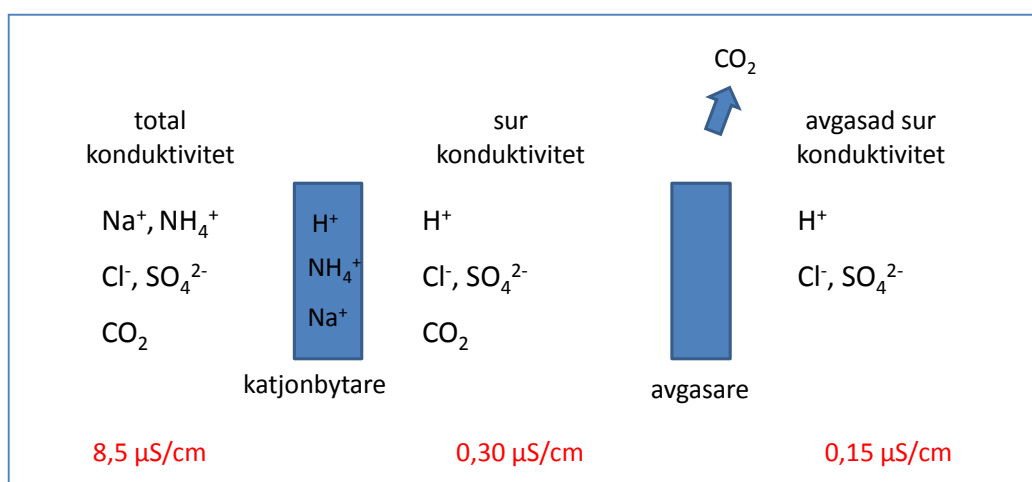
Det finns anledning att ytterligare en gång understryka att sur konduktivitet inte kan användas för att indikera förekomst av natriumhydroxid i ångan eftersom natriumhydroxid omvandlas till vatten vid passage genom den sura katjonbytaren. Detta är en svaghet eftersom natriumhydroxid är en mycket aggressiv förorening i ångsystemet. Se även kapitel 7.3.1.2.1

10.2.5.3 Avgasad konduktivitet

Koldioxid i provet ger utslag på sur konduktivitet. Även om koldioxid inte anses skadlig för systemet så ger den ett förhöjt värde. Det går inte att i förväg avgöra om detta förhöjda värde kommer av koldioxid eller andra skadliga anjoner i provet. Koldioxiden ger alltså en förhöjd basnivå på sur konduktivitet som kan göra det svårt att tolka analysvärdet.

Genom att driva av koldioxiden och mäta avgasad konduktivitet får man ett mått på de skadliga föroreningarna i provet.

Figur 179 ger ett exempel på total, sur och avgasad konduktivitet och vad som ger upphov till respektive konduktivitet.



Figur 179. Skillnaden mellan total, sur och avgasad konduktivitet

Figure 179. The difference between total, acid and degassed conductivity

I exemplet leds ånga med en total konduktivitet på 8,5 µS/cm genom katjonbytaren. Natrium- (Na⁺) och ammoniumjonerna (NH₄⁺) upp i jonbytaren och byts mot vätejoner (H⁺) och resulterar i en sur konduktivitet på 0,30 µS/cm. Detta är över riktvärdet som generellt är <0,20 µS/cm för ånga till en turbin.

Genom att driva av koldioxiden (CO₂) i provet, genom uppvärmning eller strippning med kvävgas, och mäta den avgasade konduktiviteten (0,15 µS/cm) kan det konstateras att värdet ligger under gällande riktvärde och alltså inte utgör någon fara för turbinen.

Sammanfattningsvis kan sägas att:

- Total konduktivitet är ett mått på hur mycket ammoniak eller amin som doseras
- Sur konduktivitet är ett mått på mängden föroreningar
- Avgasad konduktivitet är ett mått på mängden skadliga föroreningar

10.2.5.4 pH-värde

pH-värdet är en av de viktigaste parametrarna att ha kontroll på vid all vattenbehandling. Det ger information om vattnets karaktär, t.ex;

- är vattnet korrosivt eller ej
- föreligger det risk för beläggningsbildning
- vilken miljöpåverkan vattnet har
- ligger det inom riktlinjerna för vattenreningsanläggningen

Trots att pH-mätning är den vanligaste analysen på vattenprover är det svårt att analysera korrekta mätvärden. pH-elektrodena driver och måste kalibreras regelbundet samtigit finns det många felkällor. Vid många anläggningar upplevs pH-mätning som ett problem, framför allt vid on-linemätning.

Den upplevda svårigheten med pH-mätning har lett till att intresset för en alternativ mätmetod har ökat. Den går ut på att istället för att mäta med en traditionell pH-elektrod görs en beräkning av pH-värdet utifrån värdena på sur och total konduktivitet.

Några fördelar med denna nya typ av pH-mätare är:

- Säkrare mätning
- Lägre driftkostnader och mycket litet underhåll
- Inget kalibreringsbehov
- Mindre provvattenflöde
- Mindre platsbehov med flera mätparametrar i samma instrument

Ytterligare en fördel med dessa instrument är att de förutom att visa pH-värdet även visar sur och total konduktivitet med möjlighet att ta ut signal till styrsystemet för alla tre parametrarna.

Nackdelen är att följande villkor måste uppfyllas för att beräkningen av pH-värdet ska bli rätt:

- Provet får bara innehålla ett syra-bas par, dvs. en alkaliserande kemikalie.
- Föroreningar i provet är till övervägande del NaCl.
- Vid pH-värden <8 måste koncentrationen av föroreningar vara små i förhållande till halten alkaliseringsmedel.
- Fosfathalten måste vara <0,5 mg/l. Instrumentet kan alltså inte bestämma pH-värdet på fosfatdoserade pannvatten.

10.2.5.5 Restsyre

Vid restsyrehalter under 1 µg/kg O₂ finns risk för erosionskorrosion i ekonomisern. Det är som regel ingen fara för anläggningen vid normala förhållanden då det alltid finns en liten syrehalt kvar efter avgasning i matarvattentanken. Se kapitel 4.3.2.3.1 om FAC.

Vid användning av syrereduktionsmedel kan restsyrehalten i vissa fall bli för låg. Syrereduktionsmedel bör endast användas vid störningar i den termiska avgasningen eller vid driftfall då syrehalten överstiger ÅN1.

10.2.5.6 Natrium

Natrium är den överlägset vanligaste förekommande katjonen i vatten-ångcykeln. Det är också mycket lätt att analysera natrium i låga halter (ppb). Ofta används natrium som en indikator på att vattenkvaliteten är tillfredsställande. När natriumhalten är låg är som regel även halten skadliga ämnen, som t.ex. klorider och sulfater, låg.

Analys av natrium kan med fördel användas för övervakning av kondensatkvaliteten då även mycket små inläckage i en kondensor ger ett tydligt utslag på natriumhalten. Detta kan vara ett alternativ till att mäta sur konduktivitet vid anläggningar där andra alkaliseringsmedel än ammoniak doseras.

Vid indunstning av pannvattensalter, i spalter eller beläggningar i ångsystem eller turbin, kan natriumhydroxid ge upphov till lutsprödhet d.v.s. alkalisk spänningskorrosion. Det gäller framför allt i anläggningar där inte fosfat doseras.

Se kapitel 7.3.1.2.1.2 om för- och nackdelar med fosfat respektive lut.

10.2.5.7 Kiselsyra

Kiselsyra kan ge allvarliga beläggningar på turbinskovlarna varför det är viktigt att ha kontroll på kiselhalten i systemet för att säkerställa att halten inte blir för hög i ångan till turbin.

Kiselsyrans fördelningskoefficient, dvs. förhållandet mellan koncentrationen i ångfas och vattenfas är temperatur- och tryckberoende. Det innebär att kiselsyrans löslighet i ångfasen ökar med stigande tryck och minskar när trycket sjunker. Det innebär i sin tur att riktvärdet för kiselsyra i pannvattnet sjunker med stigande tryck.

10.2.5.8 Järn

Förhöjda järnhalter i vatten-ångsystemet är ofta en indikation på en förhöjd korrosionsnivå och bör undersökas och eventuellt åtgärdas.

Det är viktigt att järnhalten hålls så låg som möjligt i matarvattnet då de järnföreningar som tillförs pannan lätt bildar beläggningar på ytorna i panntuberna.

Vid höga järnhalter i matarvatten och/eller pannvatten är det viktigt att snabbt sänka järnhalten genom ökad avblödning. I de fall källan är ett förorenat kondensat måste kondensatet dumpas för att skydda panna och efterföljande anläggningsdelar.

Ett enklare alternativ att bestämma järnhalt i vatten-ångcykeln är med en våtkemisk metod är genom membranfiltrering (milliporefiltrering). Provet filtreras, med hjälp av vakuum i en speciell filterapparat, genom ett membranfilterpapper med en porositet på 0,45 µm. Vid de aktuella pH-värdena i vattenångcykeln omvandlas eventuella järnjoner snabbt till järnoxid. Det innebär att allt järn som finns i vattnen i de aktuella systemen förekommer som järnoxider och fångas upp på membranfiltret.

Genom att jämföra filterpapprens färgnyans och färgintensitet med färdiga standarder kan inte bara järnhalten utan även vilken sorts järnoxid som finns i provet bestämmas. På flera håll upplevs det som svårt att uppskatta järnhalten med hjälp av standarden då färgerna inte alltid stämmer överens men man blir snabbt van och noggrannheten är lika bra som den våtkemiska analysen med tanke på de felkällor som den metoden har.

När membranfilterpappren tejpas upp på protokoll med ett blad per provtagningspunkt kan man lätt följa den visuella trenden hur järnhalt och oxidsammansättning varierat med tiden. Genom att läsa av järnhalten mot standarden kan ett siffervärde erhållas som kan läggas in i en databas och en grafisk trend kan erhållas.

10.2.5.9 TOC – Totalt Organiskt Kol

TOC, Total Organic Carbon eller Totalt Organiskt Kol, är ett samlingsnamn på organiskt material som omfattar allt organiskt kol i vattnet antingen löst i vattnet, bundet till suspenderat material eller som gas. Exempel på föroreningar som ger utslag på TOC är humusämnen, organiska syror såsom myrsyra och ättiksyra.

Misstankar om att TOC kan orsaka korrosion på panntuber och i turbiner har lett till att allt fler anläggningsägare börjat se över möjligheterna att analysera TOC. Höga halter koldioxid och/eller organiska syror i matarvatten eller ånga är åtminstone i teorin något som bör undvikas. Underlaget för att med säkerhet kunna säga att det är en huvudorsak till skador är dock mycket begränsat.

I VGB:s riktlinjer skriver man att halten organiska föroreningar bäst bestäms som DOC, Dissolved Organic Carbon eller löst organiskt kol. Kunskap om vilken typ av organiska föroreningar det rör sig om är viktig, inte bara summanvärdet DOC. VGB rekommenderar att man strävar efter att nå halten <0,1 mg/kg DOC. I vissa anläggningar kan även denna nivå vara för hög beroende på vilken förorening som ger utslag på DOC-analysen. Ju högre spådmätningen är desto lägre bör halten DOC vara.

Avsaltning med membranteknik (RO-anläggning) ger ett vatten med betydligt lägre halter av organiskt innehåll, dvs. låga halter DOC eller TOC, än avsaltning med jonbytesteknik.

I anläggningar med flockat ytvatten bör halten organiskt material kontrolleras före och efter flockningsanläggningen som en funktionskontroll. Förr angavs halten organiskt material som "permanganatförbrukning" men nu används enheten COD-Mn. COD står för Chemical Oxygen Demand eller kemisk syreförbrukning på svenska.

Riktvärdet för halten organiskt material i vattnet efter en flockningsanläggning är <3,5 mg/kg COD-Mn, vilket motsvarar 15 mg/kg KMnO_4 .

Vid flockning med aluminiumsalt bör även restaluminiumhalten kontrolleras regelbundet i renvattnet efter flockningsanläggningen. Riktvärdet för restaluminium är <0,1 mg/kg Al.

10.2.6 Vattenkvaliteter

Olika vattenkvaliteter kan ha olika namn vid olika anläggningar. Nedan följer en beskrivning av de vatten som omfattas av riktvärdena i denna handbok och vilken vattenkvalitet som avses.

Vattenkvalitet	Beskrivning
Råvatten	Råvatten är vattnet före spädvattenreningsanläggningen och kan utgöras av stadsvatten, grundvatten, sjövattnet, älvvattnet etc. I många anläggningar där råvattnet utgörs av ytvatten måste humushalten i vattnet sänkas genom flockning före avsaltningsanläggning.
Renvatten	Renvattnet är vattnet efter flockningsanläggningen.
Avhärdat vatten	Vatten efter ett avhärtningsfilter. I ett avhärdat vatten har hårdheten (kalcium och magnesium) ersatts av natriumjoner vilket innebär att salthalten i vattnet inte sänks.
Avsaltat vatten	Vatten där huvuddelen av salterna har avlägsnats. I Figur 176 beskrivs renhetsgraden för avsaltade vatten för olika vattenreningstekniker.
Spädvatten	Det vatten som används för att ersätta vattenförluster i ett system. Riktvärden anges för spädvatten direkt efter vattenreningsanläggningen.
Matarvatten	Blandning av kondensat och spädvatten som tillförs pannan.
Insprutningsvatten	Vatten som sprutas i ångan efter överhettare eller mellan två överhettare för att reglera temperaturen på utgående ånga.
Pannvatten	Vatten i en panna med själv- eller tvångscirkulation.
Mättad ånga	Utgående ånga från domen, före överhettaren.
Överhettad ånga	Ångan före turbin, dvs. efter överhettare och efter temperaturreglering med insprutningsvatten eller ångkylning i Dolezalkylare.
Mellanöverhettad ånga	Ångan efter det första turbinsteget som återhettas i pannan vid lägre tryck.
Kondensat	Det vatten som erhålls vid kondensering av ånga i turbin-kondensor eller värmeväxlare. Kan även vara kondenserad ånga från produktionsavdelningar i en industri. Riktvärden anges efter ev. kondensatrening.
Fjärrvärmevatten	Cirkulerande vatten i ett fjärrvärme- eller hetvattensystem.

Figur 180. Vattenprov som omfattas av riktvärdena i handboken

Figure 180. Water samples provided with target values in this handbook

10.3 Riktvärden för vatten och ånga

10.3.1 Ånga och kondensat

Riktvärdena för ånga i tabellen nedan gäller såväl mättad som överhettad ånga.

parameter		ånga				ånga				kondensat				kondensat			
vattenkemi		AVT och LUT				FOSFAT				AVT och LUT				FOSFAT			
material i systemet		Cu ¹⁾		Fe ²⁾		Cu ¹⁾		Fe ²⁾		Cu ¹⁾		Fe ²⁾		Cu ¹⁾		Fe ²⁾	
pH	R	9,0-9,3		9,2-9,6		9,0-9,3		9,2-9,6		9,0 - 9,3		9,2 - 9,6		9,0 - 9,3		9,2 - 9,6	
	ÅN1	8,5	9,4	8,8	10,0	8,5	9,4	8,8	10,0	8,5	9,4	8,8	10,0	8,5	9,4	8,8	10,0
	ÅN2	8,2	9,5	8,0	10,5	8,2	9,5	8,0	10,5	8,2	9,5	8,0	10,5	8,2	9,5	8,0	10,5
	ÅN3																
konduktivitet µS/cm	R	3 - 6 ³⁾		4 - 11 ³⁾		3 - 6 ³⁾		4 - 11 ³⁾		3 - 6 ³⁾		4 - 11 ³⁾		3 - 6 ³⁾		4 - 11 ³⁾	
	ÅN1																
	ÅN2																
	ÅN3																
sur konduktivitet µS/cm	R	<0,10 ⁴⁾		<0,20 ⁴⁾		<0,20 ⁴⁾		<0,30 ⁴⁾		<0,20 ⁴⁾		<0,30 ⁴⁾		<0,20 ⁴⁾		<0,30 ⁴⁾	
	ÅN1	0,20		0,30		0,30		0,30		0,30		0,30		0,30		0,30	
	ÅN2	0,50		0,50		0,50		0,50		0,50		0,50		0,50		0,50	
	ÅN3	1		1													
kisel, SiO ₂ µg/kg	R	<5		<5		<5		<5		<5		<5		<5		<5	
	ÅN1	20		20		20		20		20		20		20		20	
	ÅN2	30		30		30		30		30		30		30		30	
	ÅN3	50		50													
hårdhet °dH	R									<0,003		<0,003		<0,003		<0,003	
	ÅN1									0,01		0,01		0,01		0,01	
	ÅN2									0,02		0,02		0,02		0,02	
	ÅN3																
natrium, Na µg/kg	R	<3		<5		<3		<5		<3		<5		<3		<5	
	ÅN1	5		10		5		10		5		10		5		10	
	ÅN2	10		20		10		20		10		20		10		20	
	ÅN3	20		40													
järn, Fe µg/kg	R	<10		<10		<10		<10		<10		<10		<10		<10	
	ÅN1	20		20		20		20		20		20		20		20	
	ÅN2									50		50		50		50	
	ÅN3																
koppar, Cu µg/kg	R	<1		<1		<1		<1		<3		<3		<3		<3	
	ÅN1	3		3		3		3		3		3		3		3	
	ÅN2									10		10		10		10	
	ÅN3																
restsyre, O ₂ µg/kg	R									<10		<10		<10		<10	
	ÅN1									20		20		20		20	
	ÅN2																
	ÅN3																

1) Cu gäller anläggningar med värmeväxlare i koppar/kopparlegeringar.

2) Fe gäller anläggningar utan värmeväxlare i koppar/kopparlegeringar.

3) Gäller endast ammoniakdosering, andra alkaliseringsmedel kan ge högre konduktivitet.

4) Högre värde kan accepteras under vissa förutsättningar om det kan säkerställas att värdet inte beror på förekomst av mer aggressiva ämnen genom t.ex. natriummätning. Se texten kapitel 10.2.5.2

Figur 181. Riktvärden för kondensat och ånga till ångturbin

Figure 181. Target values for condensate and steam for steam turbines

Riktvärdena i denna handbok gäller i första hand för anläggningar med ångturbiner. Ånga som används för andra tillämpningar t.ex. inom sjukvård, läkemedelsindustri eller livsmedelindustri har ofta speciella krav på ångans kvalitet, beroende på användningsområde. Ångan vid dessa anläggningar tillförs ofta direkt in i tillverkningsprocessen eller direkt i ventilationen för luftbefuktning vilket medför restriktioner på innehåll och tillsatsmedel. Det innebär att det krävs individuellt anpassade riktvärden och det är brukligt att anpassa materialval och systemdesign för att undvika korrosion istället för att justera vattenkvaliteten.

Vid kontinuerlig störningsfri drift bör kondensatkvaliteten och ångkvaliteten vara i stort sett densamma. Mindre inläckage av luft eller vatten i kondensorer och värmeväxlare kan medföra en försämrad kondensatkvalitet.

Högre värden på sur konduktivitet i ånga och kondensat, än vad som anges i riktvärdena, kan i vissa fall accepteras. Se kapitel 10.2.5.2 om sur konduktivitet.

Riktvärdena för kondensat gäller för det kondensat som återförs till systemet via matarvattentanken och som kan påverka kvaliteten på matarvattnet. Analys på kondensatet görs alltså efter ett eventuellt kondensatfilter. Givetvis är det viktigt att även analysera kondensat före ett kondensatfilter för att tidigt upptäcka eventuella störningar i kondensatsystemet och dokumentera filtrets effektivitet.

Vid vissa anläggningar och/eller driftfall kan en försämrad kondensatkvalitet kompenseras med ökad bottenblåsning av pannan under tiden för felsökning och åtgärd. I anläggningar som reglerar ångtemperaturen med matarvatten som insprutningsvatten är det i dessa fall extra viktigt att ha kontroll på kondensat- och matarvattenkvaliteten.

Om systemet så tillåter kan kondensat som inte uppfyller riktvärdena dumpas för att man ska slippa stoppa pannan i samband med en driftstörning. Inom processindustrin är kontinuerlig övervakning av kondensatkvaliteten och automatisk dumpning av kondensat ofta en förutsättning för kontinuerlig drift.

10.3.2 Pannor med avsaltat spädvatten

Avsaltningsanläggningen är en mycket viktig del av anläggningen. Genom den passerar allt vatten som används i vatten-ångcykeln. Ju större mängd salter, kiselsyra etc. som avskiljs i avsaltningsanläggningen desto mindre mängder av dessa ämnen belastar systemet. I en anläggning där pannan bottenblåses efter kiselhalten i pannvattnet kan bottenblåsningen halveras om kiselhalten i spädvattnet kan sänkas från 5 µg SiO₂/l till 2,5 µg SiO₂/l.

I dag är det vanligt att pannor med tryck ner mot 10 bar spädmatas med avsaltat spädvatten. RO-tekniken har medfört att det blivit lätt att avsalta vatten utan att behöva hantera syra och lut. I anläggningar med lägre tryck räcker det som regel med ett RO-aggregat som ger ett vatten med <5 µS/cm. Någon polering av vattenkvaliteten med blandbäddsfiler är normalt inte nödvändig vid panntryck mindre än 40 bar.

Även en panna som spädmatas med avsaltat spädvatten måste bottenblåsas. Det går inte att ha samma salthalt (konduktivitet) som i en panna spädmata med avhärdat vatten. Avsattat spädvatten innebär en helt annan vattenkemi (saltsammansättning) än avhärdat spädvatten.

Vid avhärdat spädvatten är det oftast kiselsyrahalt eller alkaliteten som är avgörande för bottenblåsningen. I en panna spädmata med avsattat vatten är bottenblåsningen avsevärt mycket lägre, 0,2-0,5 %, av matarvattenmängden. Det betyder att de få salter som finns kvar i spädvattnet koncentreras upp i pannan mellan 200 och 500 gånger, varpå risken ökar för att koncentrationen av klorid eller sulfat blir så hög att magnetitskiktet påverkas.

VIKTIGT!
Vid drift av en panna, spädmata med avsattat vatten,
SKA INTE
riktvärden för pannor med avhärdat spädvatten användas.

På sidorna som följer anges riktvärden för pannor, spädmata med avsattat vatten, med olika vattenkemi.

10.3.3 Pannor med fosfatkemi

Tabellen visar riktvärden för pannor med avsaltat spädvatten och fosfatkemi.

parameter		spädvatten ¹⁾		matarvatten						pannvatten							
domtryck, bar		<40 ²⁾	>40	<40				>40				<40		40 - 100		100 - 160	
material i systemet				Cu ³⁾		Fe ⁴⁾		Cu ³⁾		Fe ⁴⁾							
pH	R			9,0-9,3		9,2-9,6		9,0-9,3		9,2-9,6		9,8-10,2		9,5-10,0		9,4-9,6	
	ÅN1			8,5	9,4	8,8	10,0	8,5	9,4	8,8	10,0	9,5	10,5	9,4	10,2	9,3	9,7
	ÅN2			8,2	9,5	8,0	10,5	8,2	9,5	8,0	10,5	9,0	10,7	9,0	10,3	9,0	9,9
	ÅN3											8,5	11,0	8,5	10,5	8,5	10,2
konduktivitet µS/cm	R	<5	<0,10	anläggnings specifikt,				3 - 6 ⁵⁾		4 - 11 ⁵⁾		25-100		15-50		10-30	
	ÅN1	10	0,20	får inte vara högre än								100		50		30	
	ÅN2	25	0,50	att pannvattenkvalitén								250		100		50	
	ÅN3			uppfylls								500		200		100	
sur konduktivitet µS/cm	R			<0,20 ⁶⁾													
	ÅN1			0,30													
	ÅN2			0,50													
	ÅN3			1													
kisel, SiO ₂ µg/kg	R	<100	<10	anläggnings specifikt, får inte vara högre än att pannvattenkvalitén uppfylls						0,25 x ÅN1							
	ÅN1	200	20							enligt kurva figur 5							
	ÅN2	500	50							2 x ÅN1							
	ÅN3																
hårdhet °dH	R	<0,01		<0,005													
	ÅN1	0,02		0,01													
	ÅN2	0,05		0,02													
	ÅN3																
natrium, Na µg/kg	R	<500	<5	⁷⁾		<5											
	ÅN1	1000	10														
	ÅN2	2500	20														
	ÅN3																
restsyre, O ₂ µg/kg	R			<5 ⁸⁾													
	ÅN1			20													
	ÅN2			50													
	ÅN3			100													
fosfat, PO ₄ mg/kg	R									enligt kurva figur 6							
	ÅN1																
	ÅN2																
	ÅN3																
järn, Fe µg/kg	R			<20			<10			Anläggningsspecifikt, avgörs från fall till fall							
	ÅN1			30			20										
	ÅN2			100			50										
	ÅN3																
koppar, Cu µg/kg	R			<3		<3											
	ÅN1			10		3											
	ÅN2			25		10											
	ÅN3																

1) Spädvatten direkt efter avsaltning, högre värden kan ev. accepteras om riktvärden för pannvatten och ånga uppfylls.

2) Avsaltning med RO, utan polering i blandbäddfilter e.d, bör gå bra i de flesta fall.

3) Cu gäller anläggningar med värmexchangers i koppar/kopparlegeringar.

4) Fe gäller anläggningar utan värmexchangers i koppar/kopparlegeringar.

5) Gäller endast ammoniakdosering, andra alkaliseringsmedel kan ge högre konduktivitet.

6) Högre värde kan accepteras under vissa förutsättningar om det kan säkerställas att värdet inte beror på förekomst av mer aggressiva ämnen genom t.ex. natriummätning. Se texten kapitel 10.2.5.2

7) Om matarvatten används som insprutningsvatten gäller samma värden som för pannor >40 bar.

8) Ett helt syrefritt vatten kan innebära risk för erosionskorrosion.

Figur 182. Riktvärden för pannor med avsaltat spädvatten och fosfatkemi

Figure 182. Target values for boilers with phosphate treatment and demineralised feed water

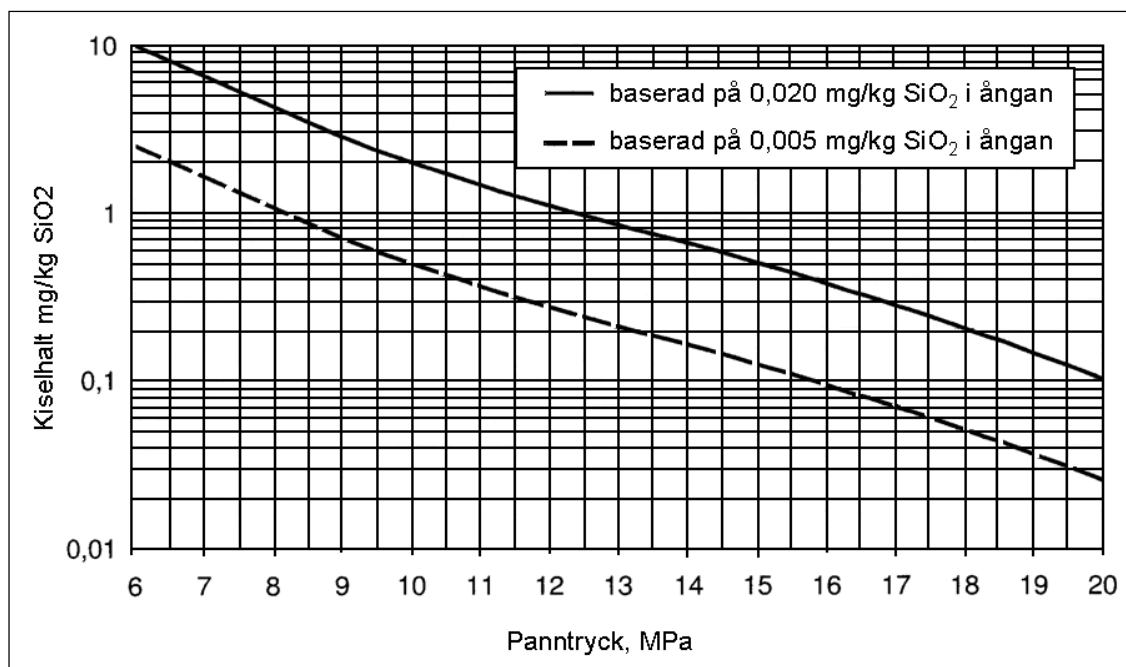
10.3.3.1 Sur konduktivitet

I anläggningar där matarvatten inte används som insprutningsvatten kan högre värden på sur konduktivitet i matarvatten, än vad som anges i riktvärdena, accepteras.

Även i anläggningar där matarvatten används som insprutningsvatten kan högre värden på sur konduktivitet, än vad som anges i riktvärdena, accepteras i vissa fall. Se kapitel 10.2.5.2 om sur konduktivitet.

10.3.3.2 Kiselsyra

Rekommenderad nivå på kisel i ånga är $<5 \mu\text{g/kg SiO}_2$. Åtgärdsnivå 1 ligger på $20 \mu\text{g/kg SiO}_2$. Figuren nedan visar riktvärden för kiselsyra vid olika domtryck. (Källa VGB) Observera att värdena i figuren anges i mg/kg ($1 \text{ mg/l} = 1000 \mu\text{g/kg}$).



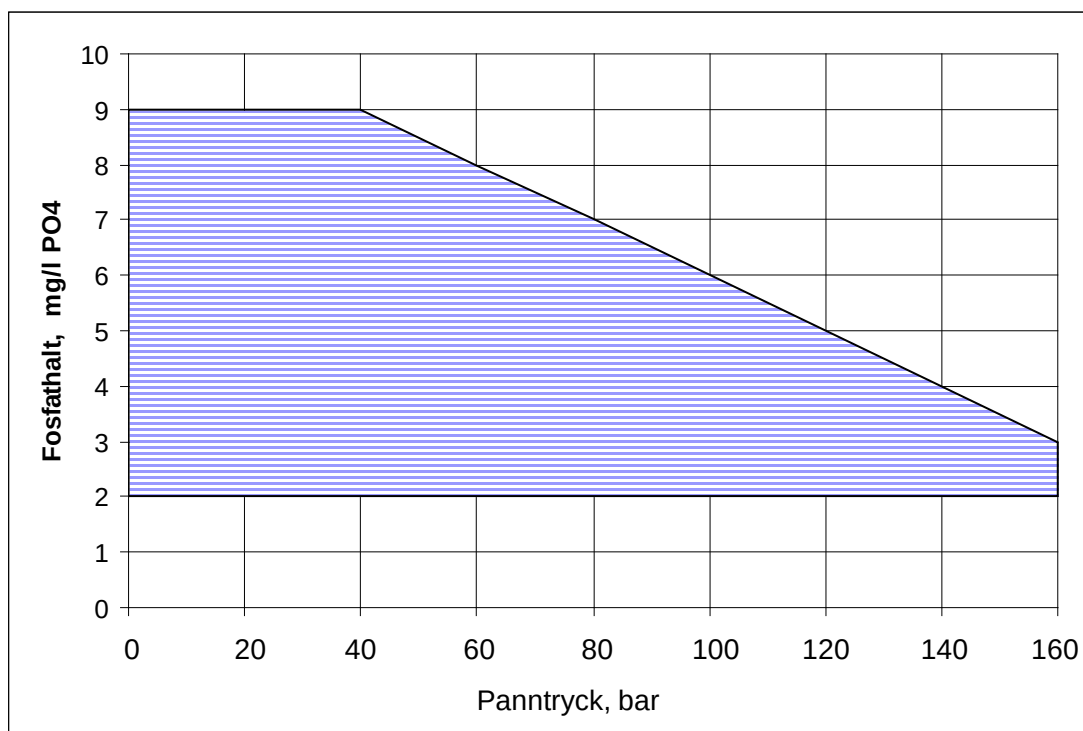
Figur 183. Riktvärden för kiselhalt i pannvatten vid olika domtryck och avsaltat spädvatten

Figure 183. Silica target values in boiler water (demineralised feed water) versus drum pressure

För anläggningar med tryck under 60 bar gäller samma tabell som för pannor med avhärdat spädvatten, se Figur 190.

10.3.3.3 Fosfat

Figuren nedan visar rekommenderat intervall för fosfathalt i pannvatten vid olika domtryck. Vid panntryck över 160 bar bör inte fosfat användas pga. av risk för hide-out. Se kapitel 4.4.2 om hide-out.



Figur 184. Riktvärden för fosfathalt i pannvatten vid olika domtryck och avsaltat spädvatten

Figure 184. Phosphate target values in boiler water (demineralised feed water) versus drum pressure

Det är främst pH-värdet i pannvattnet som avgör vilken fosfathalt som behövs för en viss panna, d.v.s. pH-värdet i pannvattnet justeras genom att öka eller minska fosfatdoseringen.

I pannor där det behövs en högre buffertkapacitet i pannvattnet bör fosfathalten ligga i den övre delen av intervallet för att erhålla bästa möjliga buffertkapacitet. Svårigheter att erhålla bra ångkvalitet eller problem med hide-out kan medföra att det för vissa pannor är aktuellt att istället ligga i underkant av intervallet.

Den enklaste varianten av fosfatbehandling innebär dosering av trinatriumfosfat i kombination med ammoniak och/eller alkaliserande aminer. Detta ger en kemikaliebehandling som är enkel att övervaka och erfarenheterna i Sverige är mycket goda.

10.3.4 Pannor med AVT-kemi

Riktvärdena gäller pannor som doseras med enbart ammoniak och/eller alkaliserande aminer.

parameter		spädvatten ¹⁾		matarvatten						pannvatten							
domtryck, bar		<40 ²⁾	>40	<40				>40		<40		40 - 100		100 - 160			
material i systemet				Cu ³⁾		Fe ⁴⁾		Cu ³⁾		Fe ⁴⁾							
pH	R			9,0-9,3		9,2-9,6		9,0-9,3		9,2-9,6		9,8-10,2		9,5-10,0		9,4-9,6	
	ÅN1			8,5	9,4	8,8	10,0	8,5	9,4	8,8	10,0	9,5	10,5	9,4	10,2	9,3	9,7
	ÅN2			8,2	9,5	8,0	10,5	8,2	9,5	8,0	10,5	9,0	10,7	9,0	10,3	9,0	9,9
	ÅN3											8,5	11,0	8,5	10,5	8,5	10,2
konduktivitet µS/cm	R	<5	<0,10	anläggnings specifikt,				3 - 6 ⁵⁾		4 - 11 ⁵⁾		25-100		15-50		10-30	
	ÅN1	10	0,20	får inte vara högre än								100		50		30	
	ÅN2	25	0,50	att pannvattenkvaliteten								250		100		50	
	ÅN3			uppfylls								500		200		100	
sur konduktivitet µS/cm	R			<0,20 ⁶⁾													
	ÅN1			0,30													
	ÅN2			0,50													
	ÅN3			1													
kisel, SiO ₂ µg/kg	R	<100	<10	anläggnings specifikt, får inte vara högre än att pannvattenkvaliteten uppfylls						0,25 x ÅN1							
	ÅN1	200	20							enligt kurva figur 5							
	ÅN2	500	50							2 x ÅN1							
	ÅN3																
hårdhet °dH	R	<0,01		<0,005													
	ÅN1	0,02		0,01													
	ÅN2	0,05		0,02													
	ÅN3																
natrium, Na µg/kg	R	<500	<5	⁷⁾		<5											
	ÅN1	1000	10			10											
	ÅN2	2500	20			20											
	ÅN3																
restsyre, O ₂ µg/kg	R			<5 ⁸⁾													
	ÅN1			20													
	ÅN2			50													
	ÅN3			100													
fosfat, PO ₄ mg/kg	R									enligt kurva figur 6							
	ÅN1																
	ÅN2																
	ÅN3																
järn, Fe µg/kg	R			<20		<10		Anläggningsspecifikt, avgörs från fall till fall									
	ÅN1			30		20											
	ÅN2			100		50											
	ÅN3																
koppar, Cu µg/kg	R			<3		<3											
	ÅN1			10		3											
	ÅN2			25		10											
	ÅN3																

1) Spädvatten direkt efter avsaltning, högre värden kan ev. accepteras om riktvärden för pannvatten och ånga uppfylls.

2) Avsaltning med RO, utan polering i blandbäddfilter e.d. bör gå bra i de flesta fall.

3) Cu gäller anläggningar med värmväxlare i koppar/kopparlegeringar.

4) Fe gäller anläggningar utan värmväxlare i koppar/kopparlegeringar.

5) Gäller endast ammoniakdosering, andra alkaliseringsmedel kan ge högre konduktivitet.

6) Högre värde kan accepteras under vissa förutsättningar om det kan säkerställas att värdet inte beror på förekomst av mer aggressiva ämnen genom t.ex. natriummätning. Se texten kapitel 10.2.5.2

7) Om matarvatten används som insprutningsvatten gäller samma värden som för pannor >40 bar.

8) Ett helt syrefritt vatten kan innebära risk för erosionskorrosion.

Figur 185. Riktvärden för pannor med avsattat spädvatten och AVT-kemi

Figure 185. Target values for boilers with demineralised feed water and AVT treatment

10.3.4.1 Sur konduktivitet

Högre värden på sur konduktivitet än vad som anges i riktvärdena för matarvatten kan i vissa fall accepteras. Se kapitel 10.2.5.2 om sur konduktivitet.

Fördelningskoefficienten, d.v.s. förhållandet mellan koncentrationen i ångfas och vattenfas är temperatur- och tryckberoende och ökar framförallt med ökande tryck. Vid AVT-kemi föreligger eventuella klorider och sulfater som ammoniumsalter. Vid fosfatkemi föreligger de däremot som natriumsalter. Ammoniumklorid och ammoniumsulfat har en betydligt högre fördelningskoefficient än natriumklorid och natriumsulfat vilket medför en större risk för överbäring av eventuella klorider och sulfater vid AVT-kemi än vid t.ex. fosfatkemi. Därför är riktvärdet för sur konduktivitet i pannvattnet lägre vid AVT-kemi än vid fosfatkemi.

10.3.5 Pannor med lutdosering

Riktvärdena i tabellen gäller pannor där lut (NaOH) doseras för att justera pH-värdet i pannvattnet och därmed skapa förutsättningar för en bra pannvattenkemi. Lutdoseringen kompletteras med ammoniak och/eller alkaliserande aminer.

parameter		spädvatten	matarvatten								pannvatten					
domtryck, bar			<40						>40		<40		40 - 100		100 - 160	
material i systemet			Cu ¹⁾		Fe ²⁾		Cu ¹⁾		Fe ²⁾							
pH	R		9,0-9,3		9,2-9,6		9,0-9,3		9,2-9,6		9,8-10,2		9,5-10,0		9,4-9,6	
	ÄN1		8,5	9,4	8,8	10,0	8,5	9,4	8,8	10,0	9,5	10,5	9,4	10,2	9,3	9,7
	ÄN2		8,2	9,5	8,0	10,5	8,2	9,5	8,0	10,5	9,0	10,7	9,0	10,3	9,0	9,9
	ÄN3										8,5	11,0	8,5	10,5	8,5	10,2
konduktivitet	R	<0,10	3 - 6 ³⁾		4 - 11 ³⁾		3 - 6 ³⁾		4 - 11 ³⁾		15 - 40		8 - 25		6 - 10	
µS/cm	ÄN1	0,20									8	80	6	40	5	12
	ÄN2	0,50									2,5	125	2,5	50	2,5	20
	ÄN3										0,8	250	0,8	80	0,8	40
sur konduktivitet	R		<0,20 ⁴⁾								<10		<10		<5	
µS/cm	ÄN1		0,30								50		50		30	
	ÄN2		0,50								100		100		50	
	ÄN3		1								250		250		100	
kisel, SiO ₂	R	<10	<5								0,25 x ÄN1					
µg/kg	ÄN1	20	20								enligt kurva figur 5					
	ÄN2	50	30								2 x ÄN1					
	ÄN3										-					
hårdhet	R		<0,003													
°dH	ÄN1		0,005													
	ÄN2															
	ÄN3															
natrium, Na	R	<5	<5								anläggningsspecifikt					
µg/kg	ÄN1	10	10								inte högre än att					
	ÄN2	20	20								ångkvaliten uppfylls					
	ÄN3															
restsyre, O ₂	R		<5 ⁵⁾													
µg/kg	ÄN1		20													
	ÄN2		50													
	ÄN3		100													
järn, Fe	R		<20				<10				Anläggningsspecifikt, avgörs från fall till fall					
µg/kg	ÄN1		30				20									
	ÄN2		100				50									
	ÄN3															
koppar, Cu	R		<3				<3									
µg/kg	ÄN1		10				3									
	ÄN2		25				10									
	ÄN3															

1) Cu gäller anläggningar med värmeväxlare i koppar/kopparlegeringar.

2) Fe gäller anläggningar utan värmeväxlare i koppar/kopparlegeringar.

3) Gäller endast ammoniakdosering, andra alkaliseringsmedel kan ge högre konduktivitet.

4) Högre värde kan accepteras under vissa förutsättningar om det kan säkerställas att värdet inte beror på förekomst av mer aggressiva ämnen genom t.ex. natriummätning. Se texten kapitel 10.2.5.2

5) Ett helt syrefritt vatten kan innebära risk för erosionskorrosion.

Figur 186. Riktvärden för pannor med avsaltat spädvatten och lutdosering

Figure 186. Target values for boilers with demineralised feed water and caustic treatment

10.3.6 Genomströmningspannor

Tabellen visar riktvärden för genomströmningspannor med AVT- eller OT-behandling.

parameter		spädvatten	matarvatten						ånga & kondensat					
material i systemet			Cu ¹⁾		Fe ²⁾		Fe ²⁾		Cu ¹⁾		Fe ²⁾		Fe ²⁾	
vattenkemi			AVT		AVT		OT		AVT		AVT		OT	
pH	R		9,0-9,3		9,2-9,6		8,4-9,0		9,0-9,3		9,2-9,6		8,4-9,0	
	ÅN1		8,8	9,3	9,2	9,8	8,4	9,8	8,8	9,3	9,2	9,8	8,4	9,8
	ÅN2		8,5	9,4	9,0	10,0	8,2	10,0	8,5	9,4	9,0	10,0	8,2	10,0
	ÅN3		8,2	9,5	8,6	10,4	8,0	10,4	8,2	9,5	8,6	10,4	8,0	10,4
konduktivitet µS/cm	R	<0,10	3 - 6 ³⁾		4 - 11 ³⁾		0,7-2,8 ³⁾		3 - 6 ³⁾		4 - 11 ³⁾		0,7-2,8 ³⁾	
	ÅN1	0,10	2	7	4	20	0,7	20						
	ÅN2	0,20	1	8	2	30	0,4	30						
	ÅN3	0,50	0,5	9	0,5	45	0,3	70						
sur konduktivitet µS/cm	R		<0,10 ⁴⁾		<0,10 ⁴⁾		<0,10 ⁴⁾		<0,10 ⁴⁾		<0,10 ⁴⁾		<0,10	
	ÅN1		0,20		0,20		0,15		0,20		0,20		0,15	
	ÅN2		0,30		0,50		0,20 ⁵⁾		0,30		0,50		0,20 ⁵⁾	
	ÅN3		1,0		1,0		1,0		1,0		1,0		1,0	
kisel, SiO ₂ µg/kg	R	<10	< 5						< 5					
	ÅN1	20	20						20					
	ÅN2	50	50						50					
	ÅN3	100												
natrium, Na µg/kg	R	<5	<2						<2					
	ÅN1	10	5						5					
	ÅN2	20	10						10					
	ÅN3	50	20						20					
restsyre, O ₂ µg/kg	R		5		5 - 20		30 - 150							
	ÅN1		10		100		250							
	ÅN2		50		250		500							
	ÅN3		100											
järn, Fe µg/kg	R	<10	< 5						< 5					
	ÅN1	20	10						10					
	ÅN2	50	20						20					
	ÅN3													
koppar, Cu µg/kg	R	<3	< 1						< 1					
	ÅN1	3	3						3					
	ÅN2	10	5						5					
	ÅN3													

1) Cu gäller anläggningar med värmeväxlare i koppar/kopparlegeringar.

2) Fe gäller anläggningar utan värmeväxlare i koppar/kopparlegeringar.

3) Gäller endast ammoniakdosering, andra alkaliseringsmedel kan ge högre konduktivitet.

4) Högre värde kan accepteras under vissa förutsättningar om det kan säkerställas att värdet inte beror på förekomst av mer aggressiva ämnen genom t.ex. natriummätning. Se texten kapitel 10.2.5.2

5) Syredoseringen stoppas om sur konduktivitet överstiger 0,20 µS/cm

Figur 187. Riktvärden för genomströmningspannor

Figure 187. Target values for once-through boilers

Genomströmningspannor (once-through boilers) saknar ångdom. Matarvatten leds in i ena änden av panntuben och ånga tas ut i den andra änden. Det innebär att de salter och andra föroreningar som inte transporteras vidare med ångan kommer att fällas ut i pannan. Det ställer givetvis extra höga krav på matarvattenkvaliteten och förutsätter kondensatrening och dosering med enbart ammoniak och/eller alkaliserande aminer.

10.3.6.1 Sur konduktivitet

Högre värden på sur konduktivitet än vad som anges i riktvärdena ovan kan i dessa fall accepteras. Se kapitel 10.2.5.2 om sur konduktivitet.

I anläggningar med blandbäddsfiler för rening av kondensatet räcker det inte med natriummätning för att upptäcka eventuella inläckage av reagenskemikalier.

10.3.7 Pannor med avhärdat spädvatten

Tabellen visar riktvärden för anläggningar, med domtryck upp till 60 bar, som spädmatas med avhärdat spädvatten.

parameter		matarvatten												pannvatten					
domtryck, bar		< 20				20 - 40				40 - 60				<20		20 - 40		40 - 60	
material i systemet		Cu ¹⁾		Fe ²⁾		Cu ¹⁾		Fe ²⁾		Cu ¹⁾		Fe ²⁾							
pH	R	9,0-9,3		9,2-9,6		9,0-9,3		9,2-9,6		9,0-9,3		9,2-9,6		10,8-11,5		10,8-11,5		10,5-11,0	
	ÅN1	8,5	9,4	8,8	10,0	8,5	9,4	8,8	10,0	8,5	9,4	8,8	10,0	10,5	11,8	10,5	11,7	10,3	11,3
	ÅN2	8,2	9,5	8,0	10,5	8,2	9,5	8,0	10,5	8,2	9,5	8,0	10,5	10,0	12,0	10,0	11,8	9,5	11,5
	ÅN3													9,0	12,5	9,0	12,5	9,0	12,0
konduktivitet µS/cm	R	anläggningsspecifikt												< ÅN1					
	ÅN1	får inte vara högre än att pannvattenkvaliteten uppfylls												enligt kurva figur 11					
	ÅN2													1,2 x ÅN1					
	ÅN3													1,5 x ÅN1					
p- alkalitet mekv/kg	R													2 - 5		2 - 4		1 - 2	
	ÅN1													1	8	1	5	0,5	2,5
	ÅN2													1	15	1	10	0,5	5
	ÅN3													-	-	-	-	-	-
kisel, SiO ₂ µg/kg	R	anläggningsspecifikt												0,25 x ÅN1					
	ÅN1	får inte vara högre än att pannvattenkvaliteten uppfylls												enligt kurva figur 12					
	ÅN2													1,25 x ÅN1					
	ÅN3																		
hårdhet °dH	R	<0,005				<0,005				<0,005									
	ÅN1	0,02				0,01				0,01									
	ÅN2	0,05				0,02				0,02									
	ÅN3																		
restsyre, O ₂ µg/kg	R	< 5																	
	ÅN1	20																	
	ÅN2	50																	
	ÅN3	100																	
fosfat, PO ₄ mg/kg	R													15		10		8	
	ÅN1													10	20	8	15	8	12
	ÅN2													-	30	-	25	-	20
	ÅN3																		
järn, Fe µg/kg	R	<30				<20				<10				Anläggningsspecifikt, avgörs från fall till fall ³⁾					
	ÅN1	50				30				20									
	ÅN2	200				100				50									
	ÅN3																		
koppar, Cu µg/kg	R	<3				<3				<3									
	ÅN1	20				10				3									
	ÅN2	50				25				10									
	ÅN3																		
permanganat- förbrukning, KMnO ₄ mg/kg	R																		
	ÅN1													300		180		85	
	ÅN2																		
	ÅN3																		

1) Cu gäller anläggningar med värmeväxlare i koppar/kopparlegeringar.

2) Fe gäller anläggningar utan värmeväxlare i koppar.

3) Allmänna riktvärden för järnhalt kan inte anges, utan måste avgöras från fall till fall.

Figur 188. Riktvärden för pannor med avhärdat spädvatten

Figure 188. Conductivity target values for boilers with softened feed water

Det enda generella kravet på ett avhärdat spädvatten är att det ska vara fritt från hårdhet. I vattnet efter en väl fungerande avhärtningsanläggning är riktvärdet för hårdheten $<0,01$ °dH. Övriga krav på spädvattnet avgörs av riktvärdena för matarvatten och pannvatten.

Vid anläggningar med avhärdat spädvatten kan avvikande värden i de flesta fall snabbt lösas genom ökad bottenblåsning eller justering av doseringen, såvida det inte rör sig om ett haveri i anläggningen.

Höga värden i matarvattnet, orsakade av t.ex. störningar i kondensatsystemet, kan som regel kompenseras med ökad bottenblåsning av pannan under tiden för felsökning och åtgärd.

I ett avhärdat vatten har endast hårdheten (kalcium och magnesium) ersatts av natriumjoner vilket innebär att salthalten i vattnet är oförändrad. Salterna i spädvattnet ackumuleras i pannvattnet varpå salthalten ökar. För att begränsa salthalten måste pannan bottenblåsas regelbundet. Det är viktigt att bottenblåsningen varken är för hög eller för låg. Låg bottenblåsning medför hög salthalt i pannvattnet medan en för hög bottenblåsning medför ökade kostnader då det är varmt pannvatten som tappas ut. Genom att återvinna energiinnehållet i vattnet kan kostnaden för bottenblåsningen minskas.

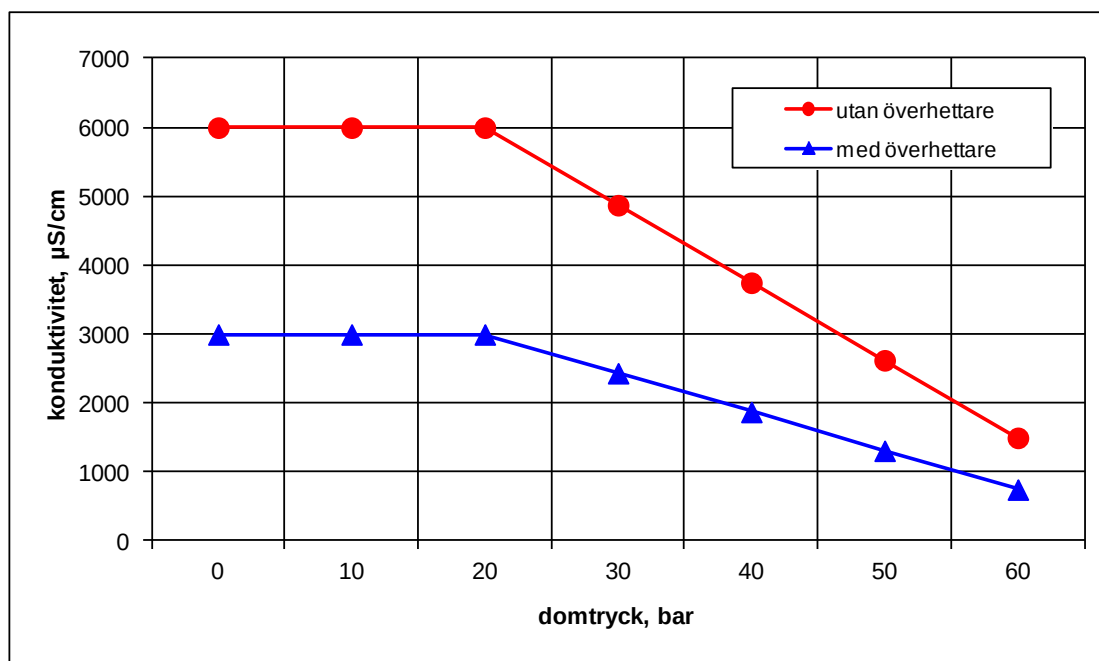
Mängden pannvatten som måste blåsas ut är beroende på salthalten i spädvattnet och uppskattas till ca 5-20 % av spädvattenmängden för de flesta pannor. Det innebär att för varje ton ånga/h måste mellan 1 och 5 m³ pannvatten blåsas ut per dygn. I mindre pannor kan det motsvara en större mängd vatten än hela pannvattenvolymen. Det betyder att även om hälften av pannvattnet blåses ut morgon och kväll blir salthalten för hög däremellan.

Vid kontinuerlig bottenblåsning tappas fortlöpande en mindre mängd pannvatten till avlopp. Det innebär att bottenblåsningen är densamma oavsett driftförhållande och last med pannvattenvärden som kan fluktuera kraftigt vid oregelbunden last. En automatisk bottenblåsning styrd mot konduktiviteten i pannvattnet ger en ekonomisk drift då bottenblåsningen varken blir för hög eller för låg oavsett driftförhållanden.

I vissa anläggningar kan det vara befogat att skärpa riktvärdena för att säkerställa en betryggande drift eller en tillfredsställande ångkvalitet.

10.3.7.1 Konduktivitet

I tabellen nedan anges riktvärdet för konduktivitet i pannvatten för anläggningar som spädmatas med avhärdat vatten. I anläggningar utan överhettare, dvs. pannor som producerar mättad ånga, accepteras en högre konduktivitet i pannvattnet (Källa VGB).



Figur 189. Riktvärden för konduktivitet i pannvatten vid olika domtryck och avhärdat spädvatten

Figure 189. Conductivity target values for boiler water (softened feed water) versus drum pressure

Kurvorna i figuren ovan är tagna från VGB:s Standard "Feed Water, Boiler Water and Steam Quality for Power Plants/Industrial Plants" och anger konduktiviteten för ÅN1. I standarden SS-EN 12952-12 finns samma kurvor med samma värden men där motsvarar de ÅN3. Detta har diskuterats på många håll i både ute i Europa och i Sverige. Författaren har valt att gå på VGB:s linje då den stämmer bäst överens med tidigare riktvärden från DENÅ som vi haft bra erfarenheter av under många år i Sverige.

En viktig skillnad mot tidigare riktvärden för konduktivitet i pannvatten är att i denna handbok anges riktvärdet för den faktiska konduktiviteten i pannvattnet. Tidigare har riktvärdet för konduktiviteten angetts på neutraliserat prov, där provet neutraliserades med syra mot fenolftalein för bestämning av konduktiviteten.

Riktvärdena medger att salthalten (konduktiviteten) kan vara hög i pannor med lågt tryck. Det finns dock vissa reservationer till angivna riktvärden som kan vara bra att känna till. I Värmeforsk rapport 557 "Korrosion i panntuber" redogör Ivan Falk för en serie undersökningar med korrosion i pannvatten med hög salthalt, 3000 µS/cm. Undersökningarna har utförts i syntetiskt pannvatten med en konduktivitet på

3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Detta är en relativt hög salthalt men ändå klart lägre än 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, som anges som övre gränsvärdet för salthalten i pannvatten för pannor med drifttryck på 20 bar. Resultaten visar att passiveringen och skyddsskiktetsbildningen är ofullständig och även att mindre korrosionsangrepp uppstår i metallytorna. Sannolikt inverkar den höga anjonhalten störande på de passiveringsreaktioner som normalt sker mellan kolstål och vatten så att skyddsskiktetsbildningen uteblir.

Konsekvenserna av en panndrift med en så hög salthalt som tillämpats vid provningarna, är en hög korrosionsnivå och utfällning av järnföreningar som bildar beläggningar. Detta leder fram till ökad risk för avlagringskorrosion och driftstörningar.

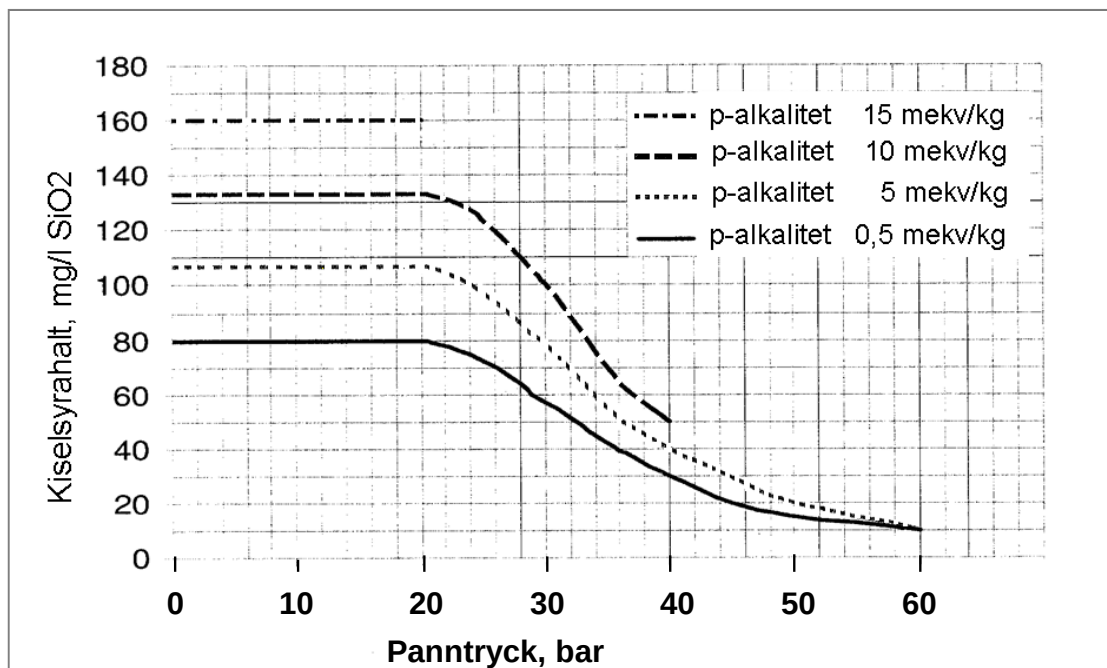
För att minska risken för korrosion rekommenderas att salthalten genom ökad bottenblåsning begränsas till en betydligt lägre nivå än den som anges i generella riktvärden. För att närmare ange var detta gränsvärde bör vara krävs flera passiveringsförsök med olika salthalter i pannvattnet.

En lägre temperatur och ett lägre panntryck är inte argument som motiverar lägre krav på vattenkvaliteten om hänsyn tas till passiveringskinetik och korrosionsnivå. Snarare bör ur denna synpunkt större uppmärksamhet riktas mot att vattenkemin är så optimal som möjligt för att metallytorna ska förbli passiva.

Används avhärdat spädvatten till ångpannor erhålls en för passiveringsreaktionerna ogynnsam anjonbalans. Generellt rekommenderas därför att anläggningar med enbart avhärdning av spädvatten kompletterar vattenanläggningen med membranfiltrering. Filtrering av spädvatten genom RO-membran ger en väsentligt förbättrad vattenkvalitet och minskar risken för korrosionsskador i panntuber.

10.3.7.2 Kiselsyra

I tabellen nedan anges riktvärdet för kiselsyra, SiO_2 , vid olika panntryck och nivåer på p-alkalitet i pannvattnet.



Figur 190. Riktvärden för kiselhalt i pannvatten vid olika domtryck och avhärdat spädvatten

Figure 190. Silica target values in boiler water (softened feed water) versus drum pressure

Kurvorna i figuren ovan är tagna från VGB:s Standard "Feed Water, Boiler Water and Steam Quality for Power Plants/Industrial Plants". Kiselsyrans fördelningskoefficient, d.v.s. förhållandet mellan koncentrationen i ångfas och vattenfas är temperatur- och tryckberoende. Det innebär att kiselns löslighet i ångfasen ökar med stigande tryck och minskar när trycket sjunker. För att undvika att kisel avlagras i turbin får kiselhalt i ångan inte överstiga $20 \mu\text{g/kg}$ vilket innebär att riktvärdet för kiselsyra i pannvattnet sjunker med stigande tryck.

Vid högre pH-värden och högre p-alkalitet minskar kiselsyrans flyktighet och en högre kiselhalt kan tillåtas i pannvattnet. Detta är endast tillämpligt i pannor med domtryck upp till ca 50 bar. I pannor med högre tryckklass är p-alkaliteten begränsad av andra orsaker.

Begreppet p-alkalitet anger vattnets syraförbrukning uttryckt som mekv/l. Värdet på p-alkaliteten erhålls genom titrering av ett vattenprov med syra och med fenolftalein som indikator. I pannvatten motsvarar p-alkaliteten i huvudsak alkaliteten av hydroxidjoner (OH^-) och karbonatjoner (CO_3^{2-}).

10.3.8 Hetvattenpannor

Riktvärdena nedan gäller hetvattenpannor i kontinuerlig drift. Många hetvattenpannor står i startberedskap och går endast kortare perioder åt gången. Järnhalten i dessa pannor är ofta betydligt högre än vad riktvärdena medger. Vid drift med hetvattenpannor med ånguttag bör i de flesta fall riktvärden gällande ångpannor användas.

parameter		spädvatten	matarvatten	pannvatten
pH	R			9,5-10,5
	ÅN1			
	ÅN2			
	ÅN3			
konduktivitet µS/cm	R			<1000 ¹⁾
	ÅN1			2000
	ÅN2			4500
	ÅN3			
hårdhet °dH	R	<0,01	<0,01	
	ÅN1	0,01	0,02	
	ÅN2			
	ÅN3	0,05		
restsyre, O ₂ µg/kg	R		5	
	ÅN1		20	
	ÅN2		50	
	ÅN3			
fosfat, PO ₄ mg/kg	R			10 - 20 ²⁾
	ÅN1			
	ÅN2			
	ÅN3			
järn, Fe µg/kg	R			anläggningsspecifikt ³⁾
	ÅN1			avgörs från fall till fall
	ÅN2			
	ÅN3			
koppar, Cu µg/kg	R			anläggningsspecifikt ⁴⁾
	ÅN1			avgörs från fall till fall
	ÅN2			
	ÅN3			

1) Hetvattenpannor med ånguttag bör bedömas som ångpannor

1) Konduktiviteten bör hållas betydligt lägre vid avsaltat spädvatten.

2) Gäller endast pannor som doseras med fosfat

3) Allmänna riktvärden för järnhalt kan inte anges, utan måste avgöras från fall till fall.

4) Allmänna riktvärden för kopparhalt kan inte anges, utan måste avgöras från fall till fall.

Figur 191. Riktvärden för hetvattenpannor

Figure 191. Target values for boilers without steam production

10.3.9 Hetvatten- och fjärrvärmesystem

Rekommendationerna baseras på erfarenheter från drift av hetvattensystem med framledningstemperaturer mellan 70 och 180 °C. De gäller för system med materialen stål, koppar och kopparlegeringar under normala driftbetingelser.

Korrosionen minimeras genom:

- ett högt pH-värde, så att vätegasproducerande korrosion inte uppstår
- en låg syrehalt, vilket ger en låg korrosionshastighet
- en låg konduktivitet (låg salthalt), vilket också ger en låg korrosionshastighet

Kravet på vattenkvaliteten är beroende på om fjärrvärmenätet är direkt eller indirekt kopplat med pannan. I en direktkopplad panna värms fjärrvärmevattnet direkt i pannan och önskad temperatur shuntas ut. Med indirekt koppling menas att pannan och fjärrvärmenätet är skilda åt med värmeväxlare.

Kraven är högre i system med direktkopplade pannor p.g.a. att ytemperaturen är högre i pannan än i en värmeväxlare.

I tabellen anges riktvärden för hetvatten- och fjärrvärmesystem mot bakgrund av spädvattenkvalitet.

parameter		fjärrvärmevatten		
spädvattenkvalitet		avsaltat	avhärdat	obehandlat
pH		9,5-10,0	9,5-10,0	8,0-9,0
konduktivitet	µS/cm	<50 ¹⁾	<spädvattnet	<spädvattnet
hårdhet	°dH			
indirekt kopplade system		<0,1	<1,0	se text
direkt kopplade system <10MW		<0,1	<0,5	se text
direkt kopplade system >10 MW		<0,1	<0,1	se text
restsyre, O ₂	µg/kg	<10	<10	<10
järn, Fe	µg/kg	<50	<100	<100
koppar, Cu	µg/kg	<20	<20	<20
klorid, Cl	mg/kg	<3	<100	<100
sulfat, SO ₄	mg/kg	<2		
ammonium, NH ₄	mg/kg	<5	<10	<10
olja & fett	mg/kg	<1	<1	<1
fasta partiklar	mg/kg	<1	<10	<10

1) I system med induktiva mätare kan det finnas behov att höja konduktiviteten genom dosering.

Figur 192. Riktvärden för hetvatten- och fjärrvärmevattensystem

Figure 192. Target values for water in district heating systems

Några riktvärden anges inte för konduktiviteten men man bör vara uppmärksam på att lägre salthalt medför mindre risk för gropfrätning. Konduktiviteten är också en bra parameter för att upptäcka förändringar i vattenkemin. Normalt används avhärdat och

avgasat vatten i indirekta system. Om kloridhalten överskrider 100 mg/kg bör vattnet avsaltas för att minska risken för skador på t.ex. komponenter av rostfritt stål.

Fasta partiklar i fjärrvärmenätet utgörs dels av korrosionsprodukter och dels av slagg, grus och annat från montaget. Halten ska vara så låg som möjligt för att undvika igensättningar och erosion. Vid höga halter bör delströmsfilter installeras i systemet.

Den viktigaste parametern gällande vattenkvaliteten, i ett mindre hetvattensystem utan avgasat spädvatten, är mängden tillfört spädvatten. Det är viktigt att spädvattenmängden och eventuellt inläckage är så liten som möjligt. Varje liter spädvatten tillför syre till systemet som ger upphov korrosion och ökar risken för läckage med driftstörningar som följd.

10.4 Rekommendationer och användning

Det ska påpekas att de riktvärden som anges i denna handbok är rekommendationer och inte tvingande i strikt juridisk mening. De är tänkta som ett stöd för den driftansvarige som ska sköta och övervaka sin anläggning.

I vissa anläggningar kan det vara befogat att skärpa riktvärdena för att säkerställa en betryggande drift. Det gäller framför allt om önskad ångkvalitet inte uppnås trots att pannvatten och matarvatten uppfyller gällande riktvärden.

Högre halter än gällande riktvärden för pannvatten och matarvatten kan accepteras i vissa anläggningar under förutsättning att riktvärdena för ångkvalitet uppfylls.

11 Avställning och konservering

I detta kapitel diskuteras de skador och problem som kan uppstå vid en felaktig konservering samt hur man bör göra för att undvika dessa.

Vid många anläggningar finns någon form av rutin för avställning och konservering av panna, turbin och annan kringutrustning vid revisionsstopp eller andra längre planerade stopp. Det kan tyckas vara viktigast då det rör sig om långa perioder. Men även frekvensen av stoppen har stor betydelse. Med felaktiga rutiner kan ett antal kortare stopp ge minst lika allvarliga skador som ett längre stopp.

Kapitlet omfattar en sammanställning och viss uppdatering av Värmeforskrapport nr 1005. Denna rapport går att ladda ner från Värmeforsks rapportdatabas för den som vill fördjupa sig inom teknikområdet eller se referenser. För referenser hänvisas till originalrapporten.

- Värmeforsk rapport nr 1005 *”Avställning och konservering av pannanläggningar”*, april 2007.

11.1 Bakgrund

En stor andel av de korrosionsskador som drabbar vatten/ång-cykeln i svenska energianläggningar går att härleda till felaktiga avställnings- och konserveringsrutiner. Det gäller skador i pannor, turbiner, kondensorer, etc. som orsakats av syrekorrosion pga. av bristfälliga rutiner.

Konservering av pannor är i teorin ett ganska enkelt förfarande. Det handlar i princip om att undvika kombinationen vatten och syre på stålytorna i systemet. Svårigheten att upprätta dessa förhållanden är sällan tekniska. Problemet är snarare brist på kunskap och engagemang eller ett kortsiktigt ekonomiskt tänkande.

Vid många anläggningar finns någon form av rutin för avställning och konservering av panna, turbin och annan kringutrustning vid revisionsstopp eller andra längre planerade stopp. Det kan tyckas vara viktigast då det rör sig om långa perioder. Men även frekvensen av stoppen har stor betydelse. Med felaktiga rutiner kan ett antal kortare stopp ge minst lika allvarliga skador som ett längre stopp.

Det finns mycket dokumentation om konservering av pannor i såväl svensk som utländsk litteratur. Några exempel på litteratur utgivna av erkända organisationer är:

- *”Konservierung von Kraftwerksanlagen”* som gavs ut av VGB 1981
- *”Kemiske anbefalinger til konservering af kraftværksanlæg”* utgiven av ELSAM
- *”Cycling, Startup, Shutdown and Layup Fossil Plant Cycle Chemistry Guidelines for Operators and Chemists”* utgiven av EPRI 1998
- *”The ASME Handbook on Water Technology for Thermal Power Systems”* från 1989

De flesta är överens om att väl fungerande konserveringsrutiner bara kan erhållas genom att upprätta rutiner individuellt för varje enskild anläggning. Varje anläggning är unik,

med unika förutsättningar och krav. Fungerande rutiner bygger på kännedom om den egna anläggningen och vilka följder en felaktig avställning kan innebära. Båsta förutsättningarna för en anläggning med lång livslängd erhålls när man systematiskt arbetar med att förbättra och utvärdera arbetet utifrån de behov och förutsättningar som finns. Övervakning av såväl torr- som våtkonserverade system är en viktig del av dessa rutiner.

Handboken bör kunna ge nödvändig kunskap om problemställningen samt tips och idéer vid upprättande av anläggningsspecifika rutiner för konservering och avställning.

11.1.1 Avgränsningar

Rökgassidan. Vid de flesta svenska energianläggningarna finns i dagsläget inte några rutiner för konservering då man ansett att det inte behövs. Vid eldning av bränslen med t.ex. högt svavel- och/eller kloridinnehåll kan det dock vara motiverat att ta fram rutiner för konservering av rökgassidan. Val av metod för konservering av pannans rökgassida är främst beroende på bränslemix och tas inte upp i denna handbok.

11.2 Teori

Avsikten med konserveringen av t.ex. en panna är att skydda anläggningen mot korrosion på vatten- och ångsidan av tuberna. Konservering omfattar i varierande grad också rökgassidan men detta behandlas inte i denna handbok.

Kolstål och låglegerat stål korroderar i närvaro av vatten och syre. Vid syrekorrosion måste alla tre ämnena finnas närvarande för att korrosionsprocessen ska kunna fortgå. Genom att eliminera en av komponenterna (stål, vatten eller syre) kan korrosionsprocessen förhindras.

- Stål i torr luft korroderar inte.
- Stål i syrefritt vatten korroderar inte.
- En målad stålyta korroderar inte även om både syre och vatten finns närvarande.

Korrosion i vattenfyllda system kan lite förenklat sägas vara orsakad av antingen syre eller vätejoner (lågt pH-värde) eller en kombination av dessa. Vid våtkonservering är det därför viktigt att även vara vaksam på pH-värdet i vattnet.

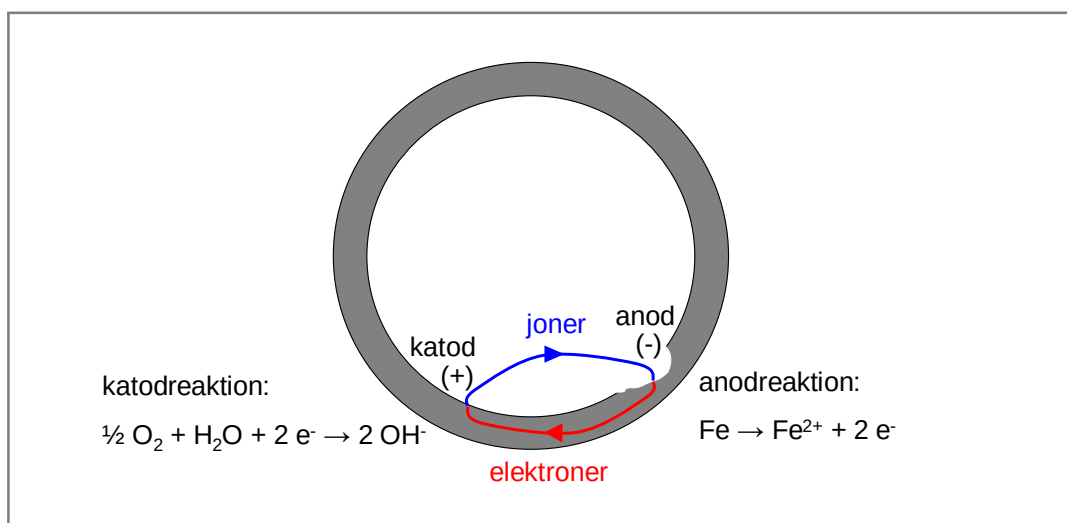
Det finns två grundprinciper för konservering av avställda pannor; torrkonservering och våtkonservering. Vid torrkonservering töms systemet på vatten och vid våtkonservering behålls vattnet i systemet.

Båda metoderna kan genomföras på flera olika sätt och vilket som är bäst måste avgöras från fall till fall utifrån de förutsättningar som gäller vid den aktuella anläggningen. Det är även vanligt med olika konserveringsförfaranden i olika delar av systemet.

11.2.1 Korrosion orsakad av syre

Reaktionen för korrosion är likvärdig med den reaktion som sker i ett våtcells batteri.

Den neutrala elektrolyten i batteriet sluter kretsen. När detta händer kommer metallen vid anoden att gå i lösning och lämna ifrån sig negativt laddade partiklar, s.k. elektroner. Dessa elektroner dras nu till pluspolen, katoden, genom metallisk ledning. Där reagerar dessa elektroner med syre och vatten och bildar negativt laddade hydroxidjoner. Hydroxidjonerna går i sin tur tillbaka till anoden via elektrolyten och sluter kretsen. Se Figur 193.



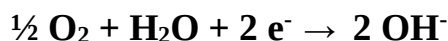
Figur 193. Galvanisk cell

Figure 193. Galvanic cell

Två elektrokemiska reaktioner sker samtidigt. Vid anoden omvandlas järn till järnjoner, dvs. metallen löses upp, och två elektroner frigörs:



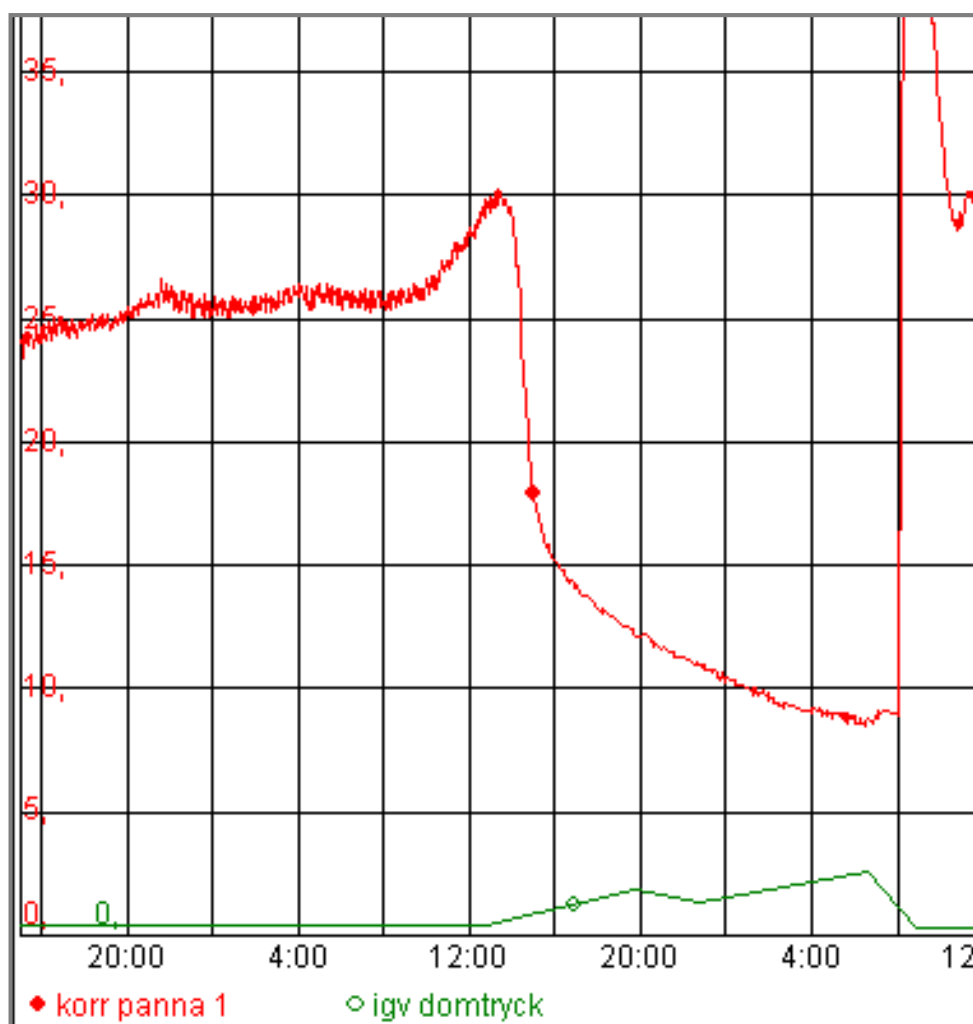
Vid katoden reduceras syre i närvaro av vatten och de två elektronerna, som frigjordes vid anoden, varpå hydroxidjoner bildas.



De två reaktionerna sker samtidigt och sätter vi ihop dem får vi:



Figur 194 nedan visar vilken kraftig påverkan syret har på korrosionshastigheten.



Figur 194. Förhållandet mellan korrosion och tryck i en hetvattenpanna

Figure 194. Relation between corrosion and pressure in a water boiler

Den gröna kurvan visar trycket (bar) i en ångdom och den röda korrosionsnivån (μA). Pannan är vattenfylld och tryckhållen med ångkudde. Så fort övertrycket försvinner (grön kurva) ökar korrosionen (röd kurva). När övertrycket återkommer sjunker korrosionen igen.

I figuren anges domtrycket med timmedelvärden medan korrosionen anges med femminutersmedelvärden vilket medför en viss förskjutning på tidsaxeln.

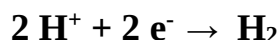
11.2.2 Korrosion orsakad av lågt pH-värde

Korrosion på stål och andra metaller förekommer även vid låga pH-värden. pH-värdet är ett mått på halten vätejoner i vattnet. Ju lägre pH-värdet är desto högre är halten vätejoner i vattnet.

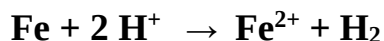
Även här sker två reaktioner samtidigt. Vid anoden går järnet i lösning på samma sätt som vid korrosion orsakad av syre.



Vid katoden reduceras vätejonerna till vätgas:



De två reaktionerna sker samtidigt och sätter vi ihop dem får vi:



Katodreaktionen minskar med stigande pH-värde eftersom halten fria vätejoner minskar med stigande pH-värde. Samtidigt minskar lösligheten av järnjoner med stigande pH-värde. Resultatet blir att korrosionen på stål ofta kan försummas vid pH-värden över ca pH 9,3. Genom att pH-justera vattnet kan den korrosion som orsakas av låga pH-värden därför elimineras.

Riktvärdena för framför allt pH-värde är beroende på vilka material som finns i systemet. Vanliga material i vatten-ångcykeln är kolstål och rostfria stål. I framför allt äldre anläggningar kan det finnas koppar eller kopparlegeringar i kondensat- och matarvattensystem.

Koppar är känsligt för komplexbildande föreningar, t.ex. ammoniak, som vid höga halter medför risk för förhöjd korrosionsnivå, speciellt vid närvaro av syre och koldioxid. Det är därför extra viktigt att ha kontroll på pH-värdet och syrehalten i system med värmeväxlare i koppar.

11.2.3 Inverkan av hög salthalt

Båda korrosionsförloppen som beskrivs ovan gynnas av en högre salthalt i elektrolyten beroende på att motståndet för korrosionsströmmen i vattenfasen minskar med ökande salthalt, dvs. när vattnets ledningsförmåga ökar.

Saltutfällningar, i t.ex. ångsystem eller turbin, orsakade av en bristfällig ångkvalitet ökar risken för korrosionsangrepp vid stillestånd. Saltutfällningarna kan utgöra hygroskopiska beläggningar som drar åt sig fukt och den då bildade salthaltiga elektrolyten ger förutsättningar för olika typer av korrosionsangrepp.

Anledningen till att rostfritt stål, även kallat 18/8-stål, har ett bra motstånd mot korrosion är att ytan täcks av ett tunt kromhaltigt oxidskikt som skyddar mot vidare korrosion. Liknande skyddsskikt av oxid bildas också på andra metaller, t.ex. koppar och aluminium. Kolstål och låglegerade stål bildar ett skyddande oxidskikt i form av magnetit och/eller hematit. Användningen av dessa material i t.ex. pannor är helt beroende av att förutsättningarna är sådana att ett skyddsskikt med tillräckligt goda egenskaper kan bildas. Skiktet ska vara tätt och förhindra eller åtminstone kraftigt reducera fortsatt korrosion under de rådande förhållandena.

I närvaro av höga salthalter innehållande halogener, t.ex. klorider, kan det skyddande oxidskiktet penetreras och en frätgrop bildas. I frätgropen uppstår en kemisk miljö som medför att korrosionen accelererar. Det inledande förloppet sker oftast i de försvagade zoner som kan finnas i oxidskiktet och där angreppen lättast får fäste. När gropen väl har bildats så fortsätter korrosionen autokatalytiskt, d.v.s. korrosionsförloppet genererar de ämnen som behövs, bl.a. vätejoner, för att kunna fortgå.

Vid rostfria stål måste vanligtvis halogener, främst klorider, närvara för att punktfrätning skall kunna uppstå. Bland katjonerna framkallar de oxiderande metalljonerna det största angreppet genom att underhålla katodprocessen. Korrosionsmiljöer, som innehåller reducerbara metalljoner är därför ytterst aggressiva med avseende på punktfrätning, även i frånvaro av luftsyre. Vid lösningar, som innehåller Cu(II) eller Fe(III)joner, är katodreaktionerna:



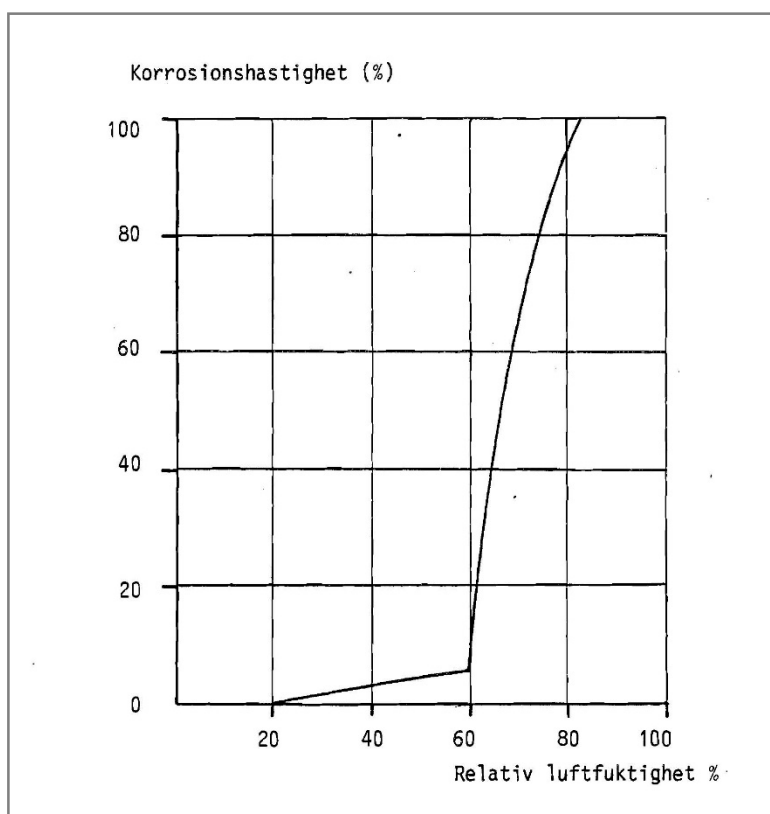
Alla kloridlösningar förmår framkalla punktfrätning vid närvaro av löst syrgas. Vid en höjning av temperatur och elektrolytkoncentration erhålls, då katodreaktionen är en metalljonreduktion, en starkt stegrad punktfrätningshastighet. Utgörs däremot katodreaktionen av syrgasreduktion får man först en stegring och sedan åter en sänkning av korrosionshastigheten.

11.2.4 Luftfuktighet

Om elektrolyten avlägsnas från metallen bildas inga anod- eller katodytor och korrosionen uteblir.

Vid torrkonservering strävar man efter att reducera fukten i en sådan grad att förutsättningen för korrosion försvinner. Korrosionshastigheten hos stål avtar med minskad relativ luftfuktighet (RH) och är vid ca 60 % praktiskt taget försumbar. Vanligtvis rekommenderas riktvärdet till <40 % relativ luftfuktighet vid torrkonservering.

Figur 195 visar korrosionshastigheten som funktion av relativ luftfuktighet.



Figur 195. *Korrosionshastigheten som funktion av relativ fuktighet*

Figure 195. *Corrosion rate vs. relative humidity*

Det bör påpekas att vid lokala ansamlingar av hygrokopiska salter och andra föroreningar, t.ex. sot, kan korrosionsangrepp uppstå vid betydligt lägre nivåer på den relativa luftfuktigheten än vad Figur 195 visar.

Det mest kända fuktighetsmättet är den relativa luftfuktigheten. Den uttrycks i procent och talar om hur stort ångtrycket är i förhållande till mättnadsångtrycket. Den relativa luftfuktigheten är alltså förhållandet mellan den aktuella mängden vattenånga i luften och den mängd som maximalt kan finnas där vid en viss temperatur. Det betyder att samma

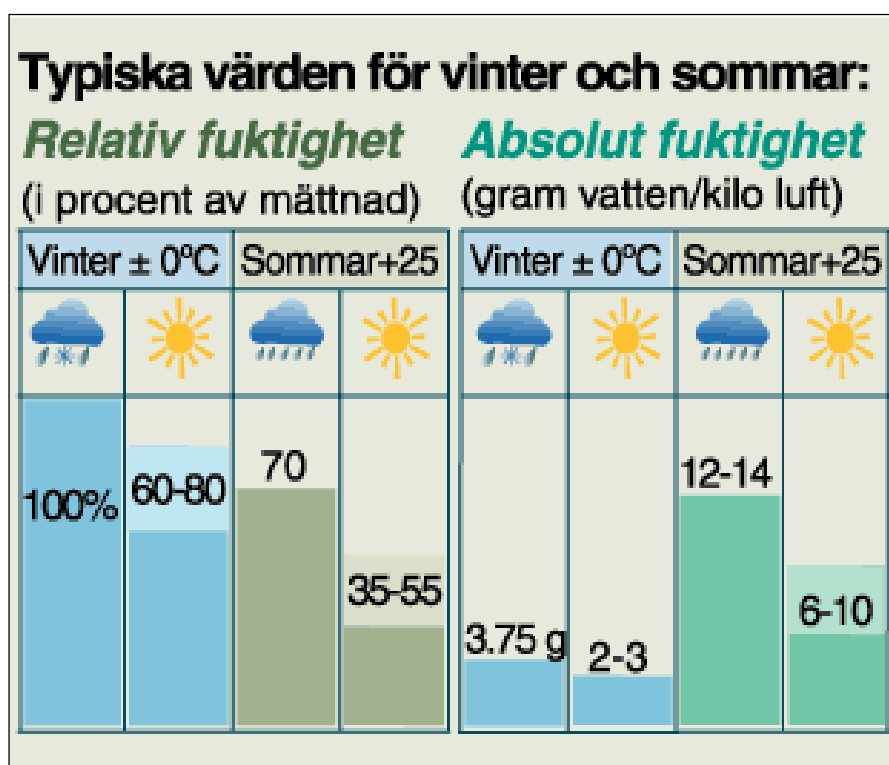
mängd vattenånga ger olika relativa fuktigheter vid olika lufttemperaturer. I mättad luft är den relativa luftfuktigheten 100 %.

Ju varmare det är desto mer vattenånga kan luften innehålla. Den relativa luftfuktigheten är därför ofta hög på vintern och lägre sommartid, då luften kan innehålla mycket mer vatten än på vintern. Den kan vara 100 % vid dimma eller regn.

Absolut fuktighet uttrycks i gram vatten per kilo torr luft och är låg på vintern och hög på sommaren.

Daggpunktstemperaturen är den temperatur som har det rådande ångtrycket som mättnadsångtryck. Ju torrare luften blir desto lägre blir daggpunkten, vilket innebär att det krävs allt lägre temperaturer för att vattenångan skall kondenseras. I mättad luft sammanfaller daggpunkten med den rådande lufttemperaturen.

Figur 196 nedan visar typiska värden på relativ och absolut luftfuktighet för sommar och vinter i Sverige.



Källa: SMHI

Figur 196. *Relativ och total luftfuktighet i Sverige*

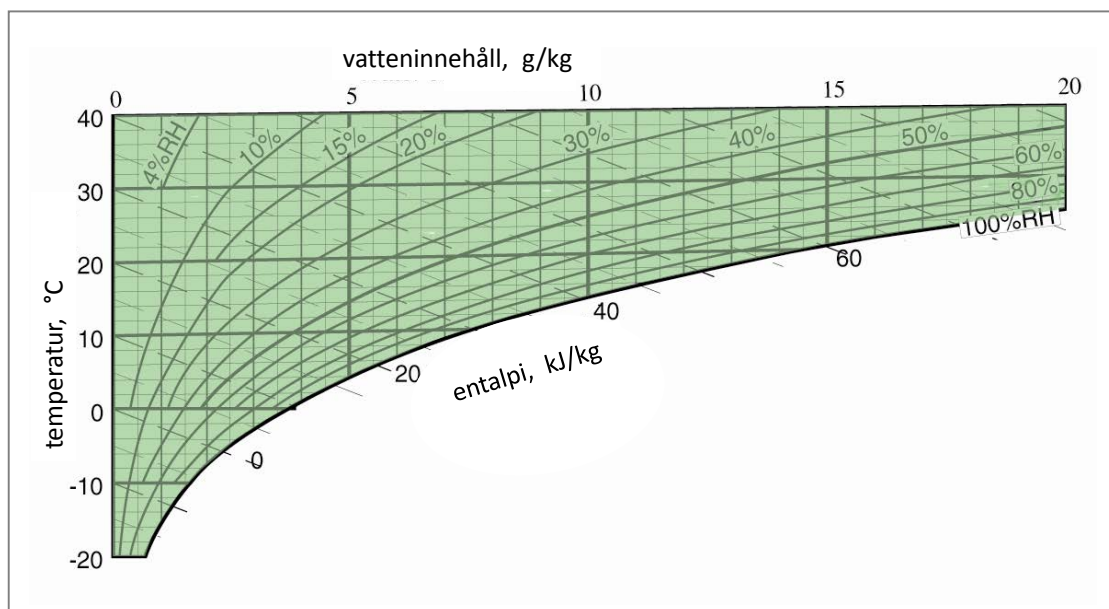
Figure 196. *Relative and total humidity in Sweden*

11.2.5 Luftfuktighet och avfuktning

Det går att styra och påverka luftfuktigheten. Den relativa luftfuktigheten kan sänkas genom att temperaturen på luften höjs. Vid ett vatteninnehåll på 9 g H₂O/g torr luft och 18 °C är den relativa luftfuktigheten 70 %. Om temperaturen höjs till 32 °C sjunker den relativa luftfuktigheten till 30 %. När temperaturen åter sjunker ökar den relativa luftfuktigheten.

Genom att avlägsna vatten ur luften kan både den absoluta och relativa luftfuktigheten sänkas.

I ett Mollierdiagram, eller IX-diagram, beskrivs sambandet mellan luftfuktighet, vatteninnehåll, temperatur och energi. Se Figur 197. Ett större mer omfattande diagram finns i bilaga B.



Källa: DST

Figur 197. IX-diagram

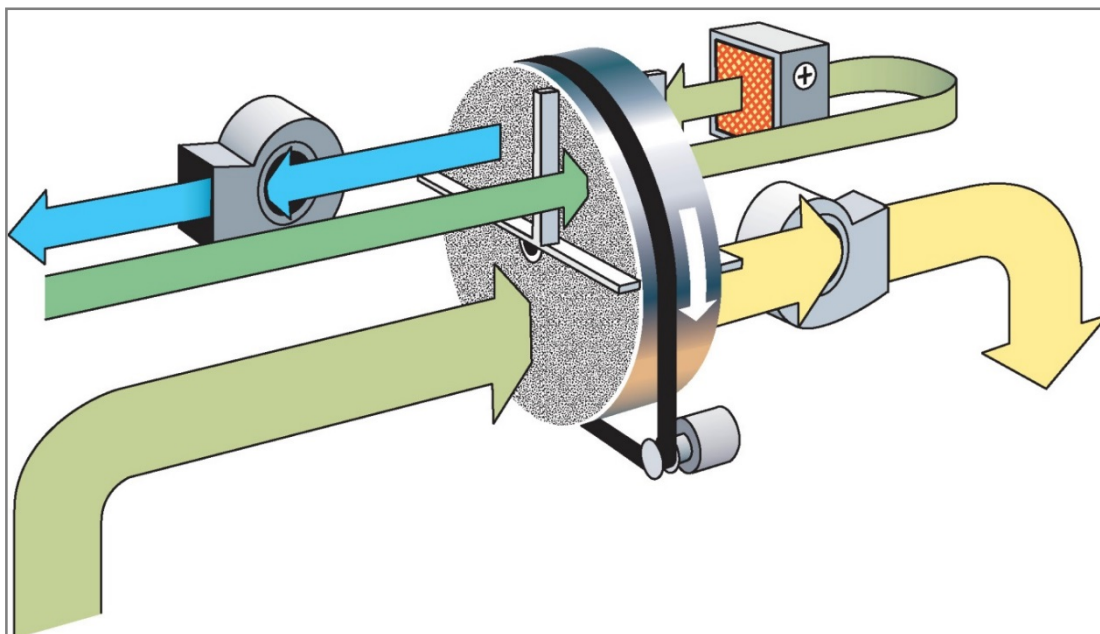
Figure 197. IX-diagram

Avfuktning av luft kan i princip ske på två olika sätt, genom kondensation eller adsorption av fukten som finns i luften.

I ett kondenseringsaggregat kyls luften ner och fukten får kondensera ut varpå luften återuppvärms till rumstemperatur.

Den vanligaste metoden att avfukta luft inom den svenska energibranschen är den så kallade adsorptionsmetoden.

I ett avfuktningsaggregat består adsorptionsdelen av en fuktadsorberande rotor som innehåller ett hygroskopiskt ämne, vanligtvis ett silicatmaterial. Rotorn roterar sakta, 30–40 rph, inuti aggregatet medan två separerade luftströmmar passerar genom rotorn. Se Figur 198.



Källa: DST

Figur 198. Funktionsprincipen hos adsorptionsavfuktare

Figure 198. The working principle of sorption technology

I den ena luftströmmen avfuktas luften genom att vattnet i luften adsorberas på rotorns yta. Vid en lufthastighet på 4 m/s och ett rotordjup på 200 mm adsorberas ca 4 g H₂O/m³ luft, vid normala förhållanden.

För att adsorptionsmaterialet inte ska bli mättat med vatten måste vattnet avlägsnas. Den andra luftströmmen utgörs av uppvärmd torkluft som kontinuerligt regenererar adsorptionsmedlet.

Ett torkluftaggregat för konservering av en pannanläggning bör normalt dimensioneras för ett vatteninnehåll på 14 g/kg torr luft på inkommande luft.

Luftomsättningen kan anges i systemvolym per timme (SV/h). Vid torrkonservering av pannanläggningar dimensioneras ofta torkaggregatet för 2 SV/h.

11.3 Metoder för konservering

Som tidigare nämnts finns två huvudsakliga metoder att konservera en avställd panna, torrkonservering eller våtkonservering. Vid torrkonservering töms systemet på vatten och vid våtkonservering behålls vattnet i systemet.

Båda metoderna kan genomföras på flera olika sätt och vilket som är bäst måste avgöras från fall till fall utifrån de förutsättningar som gäller vid den aktuella anläggningen. Det är även vanligt med olika konserveringsförfaranden i olika delar av systemet.

Innan man kan ta fram instruktioner för hur pannan ska konserveras måste pannans konstruktion ses över. Det är inte alla pannor som går att torrkonservera. Hängande överhettare eller andra lågpunkter som inte går att dränera kan medföra att pannan måste våtkonserveras.

Vidare finns det pannor som inte är förberedda för konservering under stillestånd, alltså pannor som enligt de ursprungliga förutsättningarna alltid skulle vara i drift. Ändrade driftförhållanden medför då problem om en längre stilleståndsperiod med utebliven konservering blir aktuell.

I samband med upphandling av en ny anläggning bör även problematiken kring avställning och konservering av anläggningen diskuteras. En ny anläggning bör vara förberedd för att konserveras på bästa möjliga sätt.

11.3.1 Torrkonservering

Torrkonservering bygger på att avlägsna fukt (vatten) ur systemet och därmed eliminera förutsättningen för korrosion.

När pannan ska stoppas för att torrkonserveras måste man tömma pannan på vatten medan den fortfarande är varm och under tryck. I litteraturen rekommenderas vanligtvis att pannan töms när trycket sjunkit till 2-10 bar beroende på anläggning och/eller tillverkarens instruktion. Tömningen måste ske under kontrollerade former och inte för snabbt för att undvika vakuum. Den energi (värme) som finns lagrad i godset bidrar till att vattnet som blir kvar i pannan vid tömning förångas.

Kvarstående vatten kan ge allvarliga problem vid torrkonservering om det inte kan avlägsnas. Det är viktigt att den relativa luftfuktigheten i en torrkonserverad panna är mindre än 40 %.

11.3.1.1 Torkad luft

Det bästa sättet att torrkonservera en panna är att låta torkad (avfuktad) luft strömma genom vatten- ångsidan av anläggningen. Förutom att skapa en bra miljö ur korrosionssynpunkt kan den torkade luften även ta upp eventuellt kvarvarande vatten eller fukt och transportera ut det ur systemet.

En tumregel vid dimensionering av ett torksystem, för t.ex. en ångpanna eller turbin, är att flödet bör vara ca 2 systemvolymer i timmen. Genom att förse torkaggregat med en

fläkt som ökar tryckuppsättningen kan ofta ett mindre aggregat användas. Det är som regel inte flödet utan trycket som är avgörande för att den torra avfuktade luften ska kunna strömma genom hela det konserverade systemet.

Det är viktigt att hitta rätt anslutningspunkter för torkaggregaten. En felaktig installation kan medföra att fukt sprider sig i systemet och ger värre skador än om inget torkaggregat skulle ha använts. Hänsyn måste tas till förutsättningarna vid den aktuella anläggningen.

Vid torrkonservering med torrluftsaggregat är det viktigt med en regelbunden uppföljning av luftfuktigheten i systemet. Lämpligen kontrolleras luftfuktigheten vid utblåsningspunkterna, manuellt eller med fast monterade hygrometrar, för att dokumentera och övervaka effekten av konserveringen. Luftfuktigheten måste övervakas regelbundet under hela konserveringsperioden, inte bara veckorna efter det att anläggningen har konserverats. Eventuella inläckage av vatten eller fukt via läckande ventiler eller läckage i värmeväxlare och kondensorer kan orsaka allvarliga skador då fuktig luft kan spridas i hela systemet.

11.3.1.2 Tryckluft

I en anläggning där det finns tillgång till torr oljefri tryckluft (instrumentluft) kan det ersätta luft från ett torkaggregat. Det är dock i de flesta fall ett dyrt alternativ.

11.3.1.3 Inomhusluft

Vid kortare stilleståndsperioder kan det räcka med att leda luft från pannrummet genom systemet med hjälp av en fläkt eller ejektor. En förutsättning är att pannan töms varm och under tryck för att största möjliga mängd vatten ska kunna avdunsta och sedan transporteras bort med hjälp av den inblåsta luften. Vid kortare reparationsstopp på ett par dagar kan det vara ett intressant alternativ då det ofta inte finns tid att koppla in torkluftaggregat.

Det måste påpekas att detta körsätt innebär en risk då luftfuktigheten i vårt land ofta ligger över riktvärdet på 40 % relativ luftfuktighet. Samtidigt är det oftast bättre att blåsa bort den fukt som finns kvar i pannan än att inte göra så.

11.3.1.4 Torkmedel

En äldre metod, som främst används utomlands, är att använda torkmedel för att åstadkomma en torr miljö inne i pannan vid konservering. Som torkmedel kan kiselgel, bränd kalk, litiumklorid eller något annat hygroskopiskt ämne användas.

Efter att pannan tömts på vatten placeras torkmedel inne i domen och eventuellt även i utvalda samlingslådor varpå pannan luckas på igen. Torkmedlet kontrolleras regelbundet med avseende på fuktupptagningsförmåga och byts ut vid behov. Det är viktigt att behållarna med torkmedel tas bort när pannan åter ska tas i drift.

11.3.1.5 Kemikalier

Ångfas-korrosionsinhibitorer, även kallade VCI (Vapour phase Corrosion Inhibitors), har funnits en längre tid på marknaden. De har dock inte slagit igenom som ett alternativ för konservering av pannanläggningar i Sverige.

Det finns ett flertal olika kemikalier som fungerar som ångfas-korrosionsinhibitorer. Gemensamt för kemikalierna är att de förångas och sprids via diffusion i systemet. Därefter kondenserar kemikalien ut på metallytan och bildar ett tunt skikt som ger ett korrosionsskydd.

En ny ångfas-korrosionsinhibitor, baserad på ammoniumbensoat, för att torrkonservera pannanläggningar har lanserats på den svenska marknaden under namnet Protec Sol. Konservering med ammoniumbensoat används på ett flertal anläggningar i USA och Europa. I Italien finns referenser på kraftverk upp till 800 MW.

Vid konservering töms pannan på vatten varpå kemikalien placeras i den tömda pannan som sedan luckas på. Ammoniumbensoaten förångas varpå den sprids via diffusion och kondenserar ut på ytorna i systemet. Se även kapitel 11.3.3.2 om våtkonservering med ammoniumbensoat.

11.3.1.6 Kvävgas

En annan metod är att tömma pannan med hjälp av kvävgaskudde. Konserveringsmetoden är relativt vanlig utomlands och i USA den kanske vanligaste metoden för torrkonservering.

Metoden går ut på att kvävgas kopplas till pannan, som inte behöver vara varm, och får trycka ut vattnet ur pannan. När pannan tömts på vatten appliceras ett övertryck, ca 0,5 bar, i pannan med hjälp av kvävgasen. Det gör inget om det blir en del vatten stående i kvar i lågpunkter då kvävgasen förhindrar luft (syre) att komma in i pannan. En förutsättning för att metoden ska fungera är att övertrycket upprätthålls, i alla delar av systemet som ska konserveras, hela tiden under såväl tömning av pannan som avställningsperioden.

En fördel med denna metod är att man kan tömma pannan under kalla förhållanden. En svensk applicering av metoden är i kombination med våtkonservering av pannan. Den vattenfyllda pannan tryckhålls med en kvävgaskudde som även omfattar överhettare och ångsystem fram till huvudångventilen.

Det är viktigt att vara medveten om risken för personskada vid läckage av kvävgas, framför allt vid arbete på pannans rökgassida, men även i pannhallen. Kvävgasen kan tränga bort luftens syre och kan bidra till kvävningsolyckor.

11.3.1.7 Riskinventering vid torrkonservering

Provtrycka kallt och tömma varmt. Vid en del anläggningar finns behov av att provtrycka pannan före avställningen. Orsaken kan t.ex. vara att man har frekvent återkommande problem med tubläckage. Det kan vara anläggningar som eldas med aggressiva bränslen eller har en historik med felaktigt avställda pannor etc. Genom att provtrycka pannan i kallt tillstånd kan man göra en invändig inspektion i samband med provtryckningen för att kunna upptäcka även mycket små läckor. Ett förfarande att elda på pannan, efter den kalla provtryckningen, för att därefter tömma pannan varmt och under tryck är att rekommendera.

Det är kostsamt att elda på bara för att tappa ner pannan på vatten, det kräver en extra arbetsinsats och är tidskrävande men på sikt lönar det sig.

Pannan skärs upp för tidigt. Ett inte helt ovanligt problem vid torrkonservering i anläggningar är att allt kortare revisionsperioder medför att reparations- och underhållsarbetena på anläggningen måste komma igång allt snabbare. Det tar en viss tid att avlägsna den fukt som finns systemet även om man använder torrluftsaggregat.

Om arbetena på anläggningen påbörjas för tidigt, dvs. innan all fukt avlägsnats, finns risk att den torra luftströmmen inte kommer åt alla delar av systemet. Luften tar lättaste vägen ut ur systemet och när säkerhetsventiler plockas ner för översyn, rörsystemen kapas etc. uppstår utblåsningspunkter som inte var avsedda när konserveringsproceduren planerades.

Kvarstående vatten. Om vatten blir stående kvar i delar av anläggningen ger det en utmärkt miljö för korrosion. En kubikmeter rumstempererat vatten innehåller ca 10 g syre medan en kubikmeter luft innehåller ca 200 g syre. Syret i luften löser sig i vattnet allt eftersom korrosionsprocessen förbrukar det syre som finns i vattnet.

Det är viktigt att snabbt avlägsna allt vatten vid torrkonservering av en anläggning. Där det inte går eller är svårt bör andra konserveringsmetoder övervägas.

Tömning av varm panna under tryck minskar risken för att vatten blir stående kvar i systemet.

Vatteninläckage. Inläckage av vatten via läckande ventiler eller läckage i kondensorer eller växlare kan medföra allvarlig korrosion i övriga delar av systemet om fukten sprids med torkluften. Bästa sättet att upptäcka eventuella inläckage är att regelbundet övervaka luftfuktigheten vid utblåsningspunkterna under hela avställningsperioden.

Övervakning. Övervakning av avställda och konserverade anläggningar får inte försummas. En regelbunden kontroll och övervakning av fukthalten på torkluften vid utblåsningspunkterna är bästa sättet att undvika korrosion orsakad av fuktig luft. Luftfuktigheten kan med fördel övervakas kontinuerligt med hygrometrar på de viktigaste punkterna i systemet.

Fuktig luft kan vara resultatet av inläckage av vatten, trasigt torkaggregat, felaktiga avställningsrutiner, felaktigt utfört eller pågående reparations- och underhållsarbete etc.

I anläggningar där man använder både våt- och torrkonservering samtidigt i olika delar av systemet uppstår gränssnitt mellan våta och torra anläggningskomponenter. Genom att använda dubbla avstängningsventiler med mellanliggande dränering kan en säker avskiljning säkerställas. Tillfredsställande funktion förutsätter regelbunden kontroll av eventuellt läckage i dränagedningen.

Glömma torkmedlet. Vid avfuktning med torkmedel kan det tyckas självklart att det är viktigt att komma ihåg att ta bort behållarna med torkmedel när pannan åter ska tas i drift, men det finns flera rapporter med driftstörningar orsakade av kvarglömt torkmedel. Redan små mängder kiselgel kan ge kraftigt ökade kiselhalter i systemet, vilket medför risk för förorenad ånga och turbinproblem. Bränd kalk som glöms kvar i pannan medför hög hårdhet i pannvattnet med risk för kalkutfällning på värmeöverförande ytor i pannan.

11.3.2 Uppfyllning

Den i vissa fall långa tid det tar att fylla pannan med vatten igen vid driftsättning kan ibland upplevas som en nackdel vid torrkonservering. Det skapar utrymme för diverse ”kreativa” lösningar som omfattar att fylla pannan med andra vattenkvaliteter än avgasat matarvatten.

Normalt rekommenderas att panna och övriga delar av systemet fylls med avgasat vatten med bästa möjliga vattenkvalitet vid uppfyllning efter ett stillestånd. Tillvägagångssätt som innebär uppfyllning med oavgasat spädvatten för att snabbare komma igång är inte att rekommendera.

Det kan vara en bra idé att installera en hjälpångpanna i anläggningar där man inte har tillgång till ånga när pannan eller pannorna är avställda. Hjälpånga kan användas för att avgasa matarvatten inför uppfyllning och idrifttagning samt för tryck- eller varmhållning vid avställd vattenfylld panna.

11.3.3 Våtkonservering

Våtkonservering behåller man pannan fylld med vatten. Det finns många fördelar med detta under förutsättning att man inte behöver öppna panna för reparations- eller underhållsarbeten. Främsta fördelen är den korta uppstartstiden. Framför allt inom industrin där en reservpanna måste kunna startas med mycket kort varsel är det ofta det enda rimliga alternativet.

Våtkonservering går ut på att eliminera närvaro av syre (luft) för att därigenom minimera korrosionen i systemet. Den syrefria miljön kan åstadkommas med tryckhållning med ång- eller kvävgaskudde, genom uppvärmning eller via en extern tryckkälla, alternativt med hjälp av kemikalier.

11.3.3.1 Tryckhållning

Tryckhållning av anläggningen är en effektiv metod för att utestänga syre (luft). Figur 194 visar syrets inverkan på korrosionshastigheten. Så fort övertrycket i pannan försvinner tar korrosionen i systemet fart.

Det behöver inte vara något högt övertryck utan det räcker med ett övertryck på 0,5 bar.

11.3.3.1.1 Tryckhållning genom uppvärmning

Genom att värma upp vattnet i pannan till över 100 °C erhålls ett övertryck i pannan som förhindrar att syre tränger in i systemet. Uppvärmningen kan ske på flera olika sätt.

Ett vanligaste sättet att varmhålla pannan är att man använder ånga från ångnätet till domen. Det är ett enkelt och okomplicerat sätt att tryckhålla pannan. En nackdel är att ånga kondenserar ut i pannan och vattennivån i domen stiger. För att hålla rätt nivå i domen måste pannan bottenblåsas varpå halten av eventuella doseringskemikalier, som t.ex. fosfat sjunker. Även pH-värdet kan bli lågt med tiden beroende på val av alkaliseringsmedel. Lågtrycksånga kan även tas från matarvattentanken för att lägga en ångkudde i domen. (OBS, inte avdragsånga!)

Vattnet i pannan kan också värmas med ånga i en slinga i botten på pannan för att erhålla ett övertryck. I och med att ångan går i en rørslinga genom bottenlådan och condensatet leds iväg påverkas varken vattennivå eller vattenkemi i pannan. En termisk cirkulation av vattnet erhålls också då uppvärmningen sker i botten av pannan.

Ett alternativ till att värma med ånga i en rørslinga i bottenlådan kan vara att ersätta ångan med hetvatten eller bottenblåsningsvatten från en annan panna. Pannvattnet kan även värmas via värmeväxlare mot ånga eller hetvattensystem.

Vid mindre anläggningar varmhålls pannan ofta genom intermittent eldning. Det är ett relativt kostsamt sätt att varmhålla anläggningen på men kan kanske vara enda alternativet.

11.3.3.1.2 Tryckhållning av kall panna

Med vatten

Det finns flera sätt att tryckhålla en avställd panna som är fylld med kallt vatten genom att utnyttja något annat vattensystem med tillräckligt tryck.

Vid mindre anläggningar går det utmärkt att använda fjärrvärmenätet för tryckhållning genom att dra en klenare ledning mellan nätet och pannans matarvattenledning. Fjärrvärmevattnet är syrefritt vilket är en förutsättning för att det ska gå att använda för tryckhållning utan att riskera korrosionsskador. Enda förbehållet är egentligen att vattenkvaliteten i fjärrvärmevattnet inte får avvika för mycket från kravet på pannvattenkvalitet.

Ett annat alternativ kan vara att använda matarvatten via en separat tryckhållningspump eller ledning. Matarvattnet har rätt vattenkvalitet för anläggningen och är syrefritt. Det förutsätter givetvis att matarvattentanken är i drift.

I anläggningar där kvaliteten på fjärrvärmevattnet är otillräcklig, så att det inte går att använda för tryckhållning och det av någon anledning inte går att använda matarvatten, kan ett expansionskärl ovanför pannan användas för tryckhållning. Expansionskärlet kan eventuellt fyllas med oavgasat vatten under förutsättning att pannan är fri från läckage. Vid ett eventuellt läckage kommer syrerikt vatten in i pannan via vattnet i expansionskärlet.

Med kvävgas

Pannan och andra delar av systemet kan också tryckhållas med hjälp av en kvävgaskudde. Kvävgasen ska kopplas in innan pannan blir trycklös.

Kvävgas för tryckhållning levereras flytande med tankbil eller på gasflaskor. Med en kvävgasgenerator kan man producera sin egen kvävgas där den förbrukas. Kvävgasen produceras ur tryckluft och kan erhållas med en renhet från 95 % upp till 99,999 %. Detta eliminerar behovet av flaskgas eller flytande kvävgas och hantering av dessa samt ger en avbrottsfri tillgång på kvävgas. En kvävgasgenerator fungerar genom att syre tas bort från tryckluft antingen genom en selektiv filtrering av gaser genom ett membran eller med hjälp av adsorbenter i kammare.

Vid tryckhållning av anläggningsdelar i energiproducerande anläggningar är det viktigt att kvävgasen är så ren som möjligt, helst 99,999 %. Redan mycket små mängder föroreningar i form av syrgas kan ge allvarliga korrosionsskador. Det är lika mycket syre i 10 m³ kvävgas, med en renhet på 99,9 %, som i 1 m³ oavgasat spädvatten.

Det är viktigt att vara medveten om att risk för personskada vid läckage av kvävgas, framför allt vid arbete på pannans rökgassida, men även i pannhallen. Kvävgasen kan tränga bort luftens syre och kan bidra till kvävningsolyckor.

11.3.3.2 Kemikalier

Hydrazin har historiskt sett varit det mest dominerande syrereduktionsmedlet. I nästan all litteratur om avställning och konservering av pannor och kringsystem anges dosering av hydrazin som ett alternativ.

Hydrazin är en otrevlig kemikalie att hantera. Den är HKS-klassad vilket innebär att den är Hudgenomträngande, Kancerogen och Sensibiliserande. Fr.o.m. 1 juli 1997 flyttades hydrazin till den så kallade B-listan. Det innebär att man måste ha tillstånd av Arbetsmiljöverket för att få använda produkten. Tillstånd ges inte om det finns alternativa produkter som är mindre hälsovådliga.

Rent tekniskt är hydrazin dock en utmärkt produkt för anläggningen varför den fortfarande används på många anläggningar runt om i världen.

Det finns alternativa kemikalier som kan vara aktuella för konservering av avställda pannor. Val av kemikalie är beroende på förutsättningarna vid den aktuella anläggningen och måste avgöras från fall till fall.

Några exempel på kemikalier som används vid konservering av pannor är:

Karbohydrazid som säljs under handelsnamnet Eliminox, är ett av flera alternativ till hydrazin som har kommit ut på marknaden i samband med att hydrazin fasas ut. Karbohydrazid har bra syrereducerande egenskaper och påminner en hel del i strukturen om hydrazin utan att ha hydrazinets hälsovådliga egenskaper. Karbohydrazid är ett flyktigt syrereduktionsmedel vilket innebär att det även kan ge ett korrosionsskydd i ångfasen. Nedbrytningsprodukterna är koldioxid, ammoniak och kvävgas.

Karbohydrazid används på många anläggningar i samband med våtkonservering där det förutom att reducera inläckande syre även bidrar till att passivera metallytan. Då Karbohydrazid är en flyktig kemikalie kan halterna i pannvattnet relativt lätt sänkas vid uppstart genom att blåsa ånga över tak.

Natriumsulfit är ett salt med bra syrereducerande egenskaper. Sulfit är inte flyktigt och ger därmed inget skydd i ångfasen av systemet. I de vattenberörda delarna av systemet erhålls dock ett bra korrosionsskydd. Sulfiten reagerar med syre varpå det bildas sulfat.

Fördelen med natriumsulfit är att det är en billig och förhållandevis harmlös kemikalie. Den höjer dock salthalten i pannvattnet och vid höga tryck kan den sönderdelas till svavelväte. Den är därför främst lämplig som syrereduktionsmedel i mindre ång- och hetvattenpannor med låga tryck. Natriumsulfit kan inte användas för hängande, odränerbara överhettare.

Vid dosering av saltbaserade syrereduktionsmedel, som t.ex. natriumsulfit, finns det en risk att salthalten (konduktiviteten) i systemet blir mycket hög. Det gäller framför allt när doseringsnivån är hög p.g.a. syreinläckage under konserveringsperioden. Det kan t.o.m. bli så att doseringen förvärrar situationen då vattnets korrosivitet ökar p.g.a. ökad konduktivitet. Det kan även vara aktuellt med vattenbyte under stilleståndet, p.g.a. hög salthalt, i system som våtkonserveras med saltbaserade kemikalier vid långa konserveringsperioder.

Ammoniumbensoat är en korrosionsinhibitor som bildar ett tunt anodiskt skyddsskikt på ytor av svart stål. Bensoat som korrosionsinhibitor har använts sedan länge och är bl.a. effektiv mot korrosion i vattenlinjen. Vid låg inhibitorkoncentration erhålls, till skillnad mot de flesta andra anodiska inhibitorer, snarare en allmän korrosion än de farliga lokala angreppen.

Ammoniumbensoat kan användas vid både torr- och våtkonservering av pannanläggningar. Det finns endast ett fåtal referenser på den svenska marknaden men där produkten testats är erfarenheterna goda. Se även kapitel 11.3.1.5.

Filmbildande aminer är en grupp korrosionsinhibitorer som bl.a. kan användas vid konservering. Dessa bildar ett tunt skyddsskikt på tuberna och förhindrar därmed att syre och/eller vätejoner (lågt pH-värde) kommer i kontakt med stålet. Det är viktigt att man är säker på vad man gör när man använder filmbildande aminer då dessa är vad man kallar en farlig inhibitor eftersom de aggressiva ämnena är kvar i vattnet. Om man har syre i

vattnet och det blir en mikroskopisk blotta i skyddsfilmen angrips stålet på denna lilla yta av t.ex. allt syre. Det kan resultera i ett allvarligt korrosionsangrepp på kort tid.

11.3.3.3 Riskinventering vid våtkonservering

Kalldrag. I anläggningar som står varmhållna kan inläckage orsakas av kalldrag som lokalt ger låga temperaturer och trycksänkning i systemet. Oavsett om varmhållningen görs direkt med ånga eller via en värmeslinga måste systemet dimensioneras för att klara av alla störningar som kan uppstå under avställningsperioden.

Recirkulation. Pannor och andra systemdelar som är våtkonserverade med syrereducerande kemikalier bör recirkuleras regelbundet för att doseringsnivån ska bli densamma i hela systemet. Det finns risk att ett inläckage av syre i en punkt förbrukar de tillsatta kemikalierna lokalt i anslutning till inläckaget. De vattenprov som tas ut för kontroll av halten syrereduceringsmedel görs troligtvis inte i denna punkt varpå ett felaktigt resultat erhålls och övervakningen blir långt ifrån den optimala.

Höga kemikalienivåer i vattnet kan resultera i förorenad ånga. Vid uppstart måste halterna sänkas innan ånga kan tas till turbin. Halterna kan sänkas genom t.ex. utblåsning, ångblåsning eller med cirkulation över ett kondensatfilter beroende på förutsättningarna vid den aktuella anläggningen och vilka kemikalier som använts.

Reglerna för utsläpp av vatten varierar mellan olika anläggningar. Kontrollera vilka regler som gäller vid den aktuella anläggningen innan vatten med höga halter av kemikalier tappas ut ur systemet.

Övervakning. Det är inte säkert att övervakning av vattenkvaliteten med online-instrumentering fungerar när anläggningen är våtkonserverad. Trycket vid konservering är ofta betydligt lägre än vid drift vilket kan medföra att det inte kommer fram tillräckligt med vatten till instrumenten. I de flesta fall är manuell provtagning att föredra för övervakning av avställda pannor. Det kan innebära att separata provuttag för manuella vattenprover måste monteras.

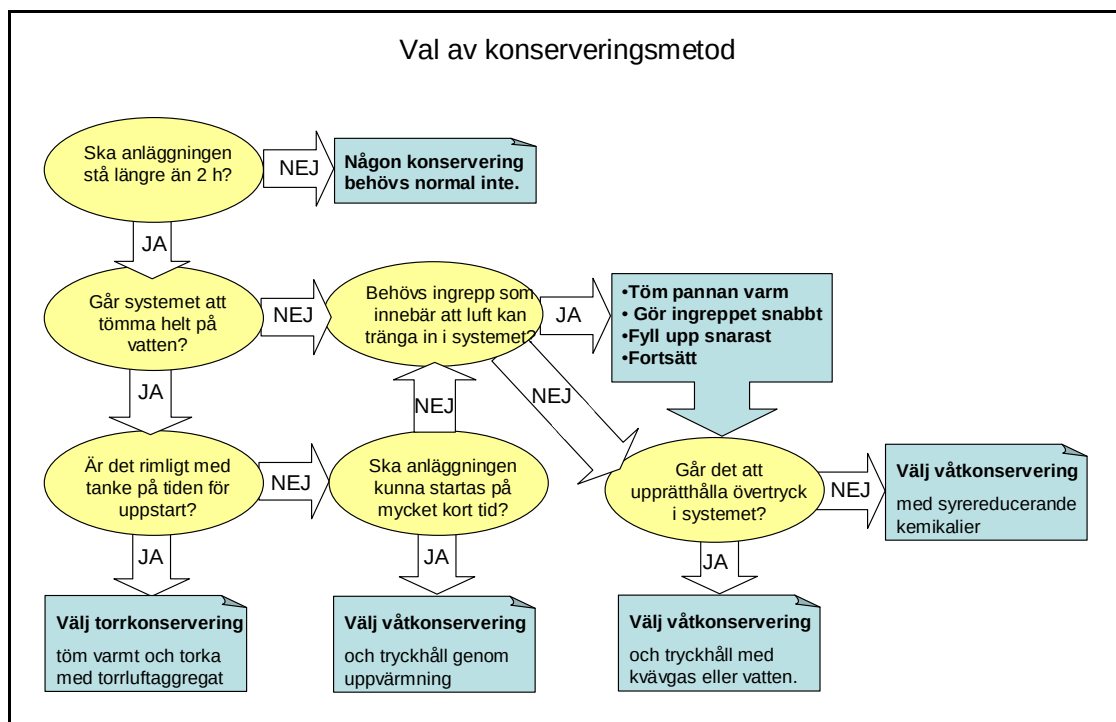
Frysrisk. Frysrisken vintertid får inte försummas.

11.4 Val av konserveringmetod

Både våtkonservering och torr torrkonservering ger bra förutsättningar för en minimal korrosion i systemet under förutsättning att konserveringen utförs på ett korrekt sätt. Oavsett val av konserveringmetod är det viktigt att konserveringen övervakas på ett korrekt sätt för att säkerställa önskat resultat.

En förutsättning för ett bra resultat vid avställning och konservering är att det finns genomtänkta rutiner för hela förfarandet. Rutinerna ska omfatta hela systemet, inte bara panna och turbin utan även kondensorer, förvärmare värmeväxlare, matarvattentank m.m. inklusive tillhörande rörsystem. Rutinerna ska även omfatta uppfyllning, driftsättning och övervakning.

I Figur 199 presenteras ett generellt schema för att underlätta val av avställningsmetod beroende av bl.a. stilleståndets längd, startberedskap och om anläggningen kommer att tömmas på vatten för underhåll eller reparation.



Figur 199. *Beslutsträd för att välja tillvägagångssätt vid avställning*

Figure 199. *Lay-up Decision Tree*

Med hjälp av ovanstående schema kan lämpliga avställningsrutiner tas fram för alla delar i systemet. Rutinerna ska omfatta både längre och kortare stopp som kan uppstå vid olika driftfall, både planerade och oplanerade stopp. Driftfall som ofta glöms bort är t.ex. en tubläcka eller annan driftstörning som kräver en snabb insats med tömd panna, eller en krånglande bränsleinmatning som kräver innebär ett driftstopp på en eller ett par dagar. Det är viktigt att tänka på gränsdragningen mellan torr- och våtkonserverade anläggningsdelar. Dubbla ventiler med mellanliggande dränering säkerställer att vatten från den vattenfyllda delen av systemet inte kommer in i den torrkonserverade delen.

11.4.1 Ny anläggning

En ny ångpanna provtrycks i regel flera månader före driftsättningen. Det är tyvärr nödvändigt med frekventa start och stopp av pannan med trycklöst system däremellan i samband med driftsättning av en ny pannanläggning.

I samband med den första fyllningen av en panna är det av största vikt att det finns ett genomtänkt konserveringsprogram som täcker tiden från första uppfyllningen och fram tills dess att pannan är klar för provdrift.

Felaktiga rutiner i samband med uppstart av en ny anläggning ger korrosionsangrepp som i framtiden kan utgöra den svaga punkt där korrosion, vid driftstörningar och avställning, kommer att fortsätta.

Hängande överhettare samt överhettare utan avluftare är i princip omöjliga att både fylla och tömma. I samband med provtryckning bör de fyllas så gott det går med avsaltat vatten pH-justerat med ammoniak till pH 10,0–10,5 och lämpligt syrereduktionsmedel.

Ett sätt att skydda systemet i samband med driftsättning kan vara att dosera en ångfaskorrosionsinhibitor, t.ex. ammoniumbensoat, som ger ett korrosionsskydd i såväl de vatten- som ångberörda delarna av systemet.

11.4.2 Pannor

11.4.2.1 Avställning

Tömning av pannor bör i största möjliga utsträckning ske med varm panna och under tryck för att säkerställa att så lite vatten som möjligt blir kvar i pannan. Det gäller alla pannor oavsett om det är små direktkopplade hetvattenpannor på ett fjärrvärmenät, industriångpannor eller stora kraftverkspannor.

Pannor som stått våtkonserverade med kallt vatten bör eldas på innan vattnet töms ur. Det medför ett extra arbetsmoment och kostnad för bränsle men lönar sig i längden.

Torkluftaggregat bör kopplas in så snart pannan är tömd på vatten för att utnyttja energiinnehållet i pannan till att förångare kvarstående vatten och därmed snabbt torka ur systemet.

Eventuella reparationsarbeten eller underhållsarbeten som innebär ingrepp i rörsystem eller liknande får inte påbörjas innan det kan dokumenteras att pannan är fri från fukt.

I de fall pannan inte kan tömmas varm och under tryck tar torkningen betydligt längre tid då all fukt måste tas upp av den torkade luften för att transporteras ut ur systemet. Eventuella vattensamlingar kan hindra den strömmande torra luften och det kan ta lång tid innan allt vatten avdunstat. Detta är i praktiken omöjligt i de flesta fall.

Pannor som ställs av för att våtkonserveras bör bottenblåsas kraftigt, under drift, timmarna innan nedeldningen påbörjas. Genom att avlägsna slam och sänka konduktiviteten på pannvattnet, som kommer stå kvar i pannan, under konserveringen minskar risken för stilleståndskorrosion. Kravet på ökad bottenblåsning i samband med avställning ökar med lägre kvalitet på spädvattnet och är störst vid hög salthalt och/eller höga halter organiskt material i spädvattnet. Det gäller även anläggningar med höga järnhalter i pannvattnet.

11.4.2.2 Konservering

Hur en panna ska konserveras avgörs av en rad faktorer, t.ex:

- konstruktion
- vilka systemdelar som skall omfattas av konserveringen
- avställningsperiodens längd
- startberedskap
- reparations- och underhållsbehov

Torrkonservering med inkopplat torrluftsaggregat är att föredra i de flesta fall där det är tekniskt möjligt att genomföra. Luftfuktigheten är lätt att övervaka och risken för störningar är liten.

En rätt utförd våtkonservering med tryckhållning är också ett bra alternativ. Det är dock viktigt att inte tappa övertrycket i systemet. Så fort övertrycket försvinner tränger syre in med korrosion som följd. Se Figur 194.

Vissa pannor står i startberedskap och måste kunna startas på kort tid. Det kan t.ex. vara industripannor som snabbt måste kunna startas för att inte äventyra produktionen i fabriken eller hetvattenpannor kopplade till ett fjärrvärmesystem. Här är det bästa alternativet varmhållning med ånga eller annan värmekälla.

Pannor som inte kan tömmas helt på vatten p.g.a. konstruktion med hängande tuber eller lågpunkter som inte kan dräneras måste våtkonserveras. Reparationer etc. som innebär att pannan måste tömmas på vatten bör genomföras så fort som möjligt varpå pannan återfylls med vatten direkt för att återstarta eller våtkonservera pannan. Eventuellt kan pannan doseras upp med lämpligt syrereduktionsmedel före tömning för att försöka minska korrosionen under tiden arbetet pågår.

Vid våtkonservering under längre perioder bör det finnas möjlighet att cirkulera vattnet i pannan. Det kan åstadkommas antingen med hjälp av panncirkulationspumpen eller med en särskild cirkulationspump i en egen krets.

11.4.2.3 Uppstart

Rutiner för uppstart av anläggningen efter ett stopp får inte försummas. Risken för korrosion är ofta betydligt större vid uppstart än vid normal drift. Flera faktorer ger en negativ inverkan:

- Vibrationer och temperaturförändringar ger en ökad mekanisk och termisk påverkan på materialet
- Transport av korrosionsprodukter är högre än vid drift vilket bidrar till utfällning i systemet.
- Korrosionsprodukter från kondensatsystemet transporteras till pannan.
- Ångkvaliteten är sämre innan konstanta driftförhållanden uppnåtts.
- Inte ovanligt med syre i vattnet.
- Ofta för hög eller för låg kemikaliedosering.
- Vattenkemin är inte i balans.

Uppstart av en avställd panna kräver ökad övervakning av vattenkvaliteten. Under stilleståndet kan föroreningar ha släppt i systemet eller trängt in från den omgivande atmosfären via kondensorläckage eller via luftinläckage i samband med arbeten i systemet etc.

I anläggningar med kondensatrening måste jonbytesfilter regenereras och precoatfilter beläggas i god tid före idrifttagning. Det är som regel i samband med uppstart som kondensatfiltren fyller störst funktion.

Vattenfyllda pannor kan som regel startas direkt. Om höga halter kemikalier har tillsats under konserveringen kan det vara aktuellt med ökad bottenblåsning och/eller omfattande friblåsning av ånga över tak för att sänka halterna innan anläggningen kopplas in på ångnätet.

Torrkonserverade pannor eller pannor som tömts för reparation eller underhåll bör fyllas med avgasat matarvatten, eventuellt kan kondensat från en annan panna användas.

Vid lite större anläggningar, där det inte finns tillgång på ånga för avgasning av matarvatten när pannan är avställd, bör en hjälpångpanna installeras. Hjälpångan kan även användas för tryckhållning etc.

Generellt rekommenderas att pannan fylls med avgasat matarvatten efter ett stopp med tömd panna. Det finns undantag men dessa förutsätter att man vet vad man gör och att det finns kunskap på företaget att bedöma riskerna för och emot.

Järnhalten i pannvattnet är ofta hög efter ett stopp. Det kan behövas en rejält förhöjd bottenblåsning av pannan i samband med uppstart för att snabbt sänka järnhalten till normal driftnivå.

Även järnhalten i kondensatet blir hög i samband med uppstart. I anläggningar utan kondensatrening måste kondensat med höga järnhalter dumpas, dvs. släppas till avlopp, tills järnhalten sjunkit under ett acceptabelt värde. Se riktvärden, kapitel 10. Installation av ett kondensatfilter förkortar uppstartstiden och mängden kondensat som måste dumpas. Vid större kraftverksanläggningar pumpas ofta matarvattnet, via en mindre cirkulationskrets, över kondensatfiltret för att erhålla ett vatten av bra kvalitet.

11.4.3 Överhettare

Ett problem vid all konservering är pannor med hängande överhettare då dessa i princip är omöjliga att både fylla och tömma. Hur man bäst ska konservera en panna med hängande överhettare måste avgöras från fall till fall beroende på lokala förutsättningar.

Överhettarna torrkonserveras som regel. Den lilla mängd vatten som kan stå kvar i överhettarna torkar som regel av energin (värmén) som finns kvar i pannan.

Fuktig luft eller felaktiga avställningsrutiner kan medföra att vatten kondenserar ut i överhettartuberna med korrosion som följd.

Torkad luft kan tas från pannan eller turbinen och ledas genom överhettarna för att säkerställa att ingen fukt kondenserar ut här vid torrkonservering.

Vid våtkonservering där pannan tryckhålls med kvävgas kan med fördel även överhettaren fyllas med kvävgas.

I en panna som tryckhålls med ånga kan även överhettaren tryckhållas på detta sätt.

11.4.4 Matarvattensystem

Det är inte ovanligt att matarvattentanken måste vara vattenfylld under perioden då panna och övriga anläggningsdelar ställs av och torrkonserveras. Matarvattentanken kanske även försörjer andra pannor eller ett fjärrvärmenät och kan därför inte tömmas annat än vid lagstadgad besiktning.

Det är viktigt att tänka på gränsdragningen mellan torr- och våtkonserverade anläggningsdelar. Dubbla ventiler med mellanliggande dränering säkerställer att vatten från den vattenfyllda delen av systemet inte kommer in i den torrkonserverade delen.

Även matarvattentanken bör tömmas från varmt tillstånd vid torrkonservering eller tömning i samband med besiktning eller liknande. Vatten blir ofta stående kvar i botten av matarvattentanken och bör avlägsnas så fort som möjligt. Eventuellt slam eller korrosionsprodukter som kan finnas på botten av matarvattentanken måste givetvis avlägsnas innan tanken återfylls med vatten.

En tömd matarvattentank kan torrkonserveras genom att torkad luft leds från pannan via ekonomiser och matarvattenledning. Detta ger ett bra skydd även av matarvattenförvärmarens vattensida. Eventuellt måste en eller flera backventiler tas bort eller vändas för att inte hindra luftströmmen.

Matarvattentanken kan givetvis även våtkonserveras, t.ex. genom att lägga på en kvävgaskudde i tanken. Ångsidan på matarvattenförvärmaren får inte glömmas bort.

11.4.5 Turbin

Turbinen kan inte fyllas med vatten utan måste torrkonserveras. Vid avställningsperioder som är längre än ett par dagar rekommenderas att ett torkluftsaggregat kopplas in.

Vid torrkonservering är det viktigt att det är tätt mot ett eventuellt mottryckssystem. Fukt kan annars komma in via avtappning eller mottrycksledning.

Beläggningar innehållande klorider och sulfater, orsakade av en undermålig ång- och/eller vattenkemi och bristande övervakning, kan ge allvarliga skador i turbinen vid stillestånd. Under drift är betingelserna vanligtvis sådana att korrosion inte uppstår i de delar som är i kontakt med torr överhettad ånga, men då turbinen stoppas kommer luft in i systemet vilket kan ge en fuktig syrerik miljö också i dessa områden. Salthaltiga hygroskopiska beläggningar kan dessutom ta upp fukt ur luften, speciellt om ett torrluftsaggregat inte är inkopplat, vilket medför korrosionsangrepp också i komponenter av högre legerade material.

Det finns även möjlighet att skydda en ångturbin vid stillestånd genom att hålla vakuum. Det tillämpas ibland och kan t.ex. vara aktuellt om man startar och stoppar ofta. Det förutsätter att spärrångssystemet och ejektorn är i drift. Spärrången utgörs av överhettad ånga, vanligtvis med ett tryck på minst 7 bar. För en ångturbin på 50-70 MW uppskattas ångförbrukningen till 0,1-0,2 kg/s. En fördel, framför allt vid kortare stopp, är att förfarandet håller turbinen varm vilket medför att den går snabbare att starta upp. Systemet kan kylas för att det inte ska bli för varmt. Det kan t.ex. ske via läckagekondensorn, via kylning från mincirkulationen i kondensatsystemet och/eller sprayvattnet till LT-turbinen.

Ett alternativ som inte använts så ofta, men som borde kunna vara en intressant metod, är kvävgasfyllning. Denna metod innebär att man släcker vakuumet i turbinen med kvävgas i samband med avställningen. Detta skulle eliminera stilleståndskorrosionen av turbinen och ångsidan av kondensorn. Kvävgasförbrukningen kommer till stor del att bero på volymen av turbinen och ångsidan av kondensorn. Ett måttligt övertryck, ca 0,5 bar, med kvävgas skulle medföra ett visst läckage genom axeltätningarna men läckaget skulle antagligen vara relativt litet och nästan försumbart, utom vid långa stopp, även om spärrångssystemet inte är i drift. Ejektorn ska naturligtvis inte vara igång.

11.4.6 Varmkondensorer och hetvattenväxlare

Primärsidan av varmkondensorn eller hetvattenväxlaren behandlas lämpligast på samma sätt som pannan eller ångsystemet i den aktuella anläggningen.

Sekundärsidan kan behandlas på flera olika sätt beroende på lokala förutsättningar. Vid kortare stopp är det inte aktuellt med någon konservering utan systemvattnet får stå kvar på sekundärsidan. Vid längre stillestånd bör dock varmkondensorer och hetvattenväxlare konserveras.

En våtkonservering kan t.ex. göras genom att:

- upprätthålla flödet på sekundärsidan.
- växlaren tryckhålls på sekundärsidan av systemtrycket utan flöde.
- vatten i en avskild krets, som tryckhålls och/eller doseras med syrereducerande kemikalier, kan cirkuleras genom värmeväxlaren på sekundärsidan.

Vid torrkonservering rekommenderas en forcerad torkning genom att systemet tappas under tryck medan vattnet fortfarande är varmt.

Torrluftaggregat rekommenderas vid all torrkonservering. Det är viktigt att kontrollera så att det inte står vatten kvar i rörledningarna till och från värmeväxlaren vid torrkonservering.

Det är viktigt att alla dränageventiler öppnas. Dränageventilerna måste givetvis vara monterade så att de verkligen tömmer systemet i de punkter där de är tänkta att tömma systemet.

11.4.7 Kallkondensorer

Kallkondensorer kan som regel stå med vattnet kvar på sekundärsidan vid kortare stopp. Vid längre stopp bör de tömmas på vatten och rensas med kommunalt vatten eller motsvarande.

En varning för saltavlagringar kan vara på sin plats då vattnet på sekundärsidan ofta utgörs av saltrika vatten. Kvarstående vatten, som uppkoncentreras, kan resultera i lösningar med höga saltkoncentrationer som kan ge upphov till galvaniska korrosionsangrepp. I kondensorer kyllda med havsvatten eller bräckt vatten kan sulfider, som bildats av mikroorganismer i den syrefria miljön, ge korrosion på koppar och mässingsmaterial. Vid korta stopp rekommenderas därför att ett litet flöde upprätthålls genom kondensorn.

I sötvattenkyllda kallkondensorer kan organiskt material som bryts ned ge lokalt höga halter kväveföreningar med spänningsskorrosion på koppar- och mässingstuber som följd.

I alla system där bräckt vatten eller ytvatten används för kylning finns risk för mikrobiell tillväxt när vattnet blir stillastående i samband med längre stilleståndsperioder.

11.4.8 Kondensatsystem

Kondensatsystemet omfattar vattensidan av lågtrycksförvärmare och lågtrycksförvärmare samt rörsystemet fram till matarvattentanken. Om övriga delar av anläggningen torrkonsveras bör även kondensatsystemet torrkonsveras. Det förutsätter dock att det går att dränera ut allt vatten.

Om det är svårt att tömma kondensatsystemet helt på vatten bör det våtkonsveras vid både långa och korta stopp. Det kan innebära stora investeringar att göra hela kondensatsystemet helt dränerbart. Om förvärmarna är gjorda av koppar eller i rostfritt material är risken för skador orsakade av stilleståndskorrosion liten.

I anläggningar med förvärmare av kolstål måste systemet spolas rent innan kondensat kan tas tillbaka till matarvattentanken i samband med uppstart. Kondensatsystemet fylls med kondensat eller matarvatten och pH-justeras med ammoniak till ett pH-värde på 9,1 för system i koppar och 9,6 för system i kolstål. Systemet bör tryckhållas med kvävgas eller syrefritt vatten.

Systemkomponenter i höglegerat (rostfritt) stål behöver som regel inte konsveras.

Generellt rekommenderas att reparationer och/eller andra ingrepp som innebär att kondensatsystemet måste tömmas läggs sist i stilleståndsperioden. I system där spädmatningen sker till kondensatsystemet vill man dock ofta färdigställa dessa arbeten tidigt då de anses viktiga för hela systemet. En riskanalys med för- och nackdelar ger underlag för prioriteringarna vid den aktuella anläggningen.

11.4.9 Spädvattenrening

Någon konservering av jonbytesfiltren i en avhärtnings- eller avsaltningsanläggning brukar inte behövas om det inte finns speciella skäl till detta.

I avsaltningsanläggningar som bygger på membranteknik är det däremot viktigt att skydda RO-membran mot mikrobiell tillväxt under avställningsperioden. Ett sätt kan vara att låta anläggningen producera vatten en halvtimme per dygn för förhindra att vatten blir stående i membranen.

Ofta konserveras RO-membranen med natriumbisulfit eller glykol. I driftinstruktionerna till RO-aggregatet finns rekommendationer om lämplig konserveringsvätska och hur man ska gå tillväga vid både konservering och avkonservering.

EDI-aggregat (ElectroDeIonisation) kan fyllas med en koksaltlösning vid längre stillestånds-perioder för att förhindra mikrobiell tillväxt.

11.4.10 Övrigt

Frysrisken i avställda anläggning får inte försummas. Det kan bli kallt vintertid i vårt land och ett öppet fönster eller en glömd port kan ge lokalt låg temperatur även inomhus.

Rostfritt syrafast material i varmkondensorer kan ofta betala sig relativt fort. De främsta fördelarna är:

- Man kan undvika läckage och pluggade tuber. Det är inte ovanligt med ett stort antal pluggade tuber, i äldre kondensorer med svarta tuber, vilket försämrar verkningsgraden.
- Bättre värmeöverföring genom att magnetit inte har samma tendens att falla ut och bilda beläggningar på en rostfri syrafast yta som på ytor av svart stål.
- Risken för stilleståndskorrosion blir i stort sett försumbar.

Vid tryckhållning med syrerika vatten kommer syre in i systemet, även om vattenförbrukningen är lika med noll, dvs. inget syrerikt vatten kommer in i pannan, via diffusion.

Ficks lag säger:

”Då vi har en koncentrationsgradient i ett visst system, kommer ämnena att diffundera från det ställe som har högre koncentration till det med lägre koncentration och detta fortsätter till jämvikten uppnås, och då är koncentrationen densamma över hela lösningen”.

Det innebär att då syre förbrukas i systemet tillförs ständigt nytt syre och korrosionen fortskrider.

11.5 Övervakning och riktvärden

Övervakning av anläggningen är viktigt även under stilleståndsperioder. Det gäller vid såväl torr- som välkonserverade system

Vid torrkonsivering måste placeringen av provtagningspunkter för kontroll av luftfuktigheten vara genomtänkt för att ge en representativ övervakning.

Vattnet måste cirkuleras i samband med provtagning på en våtkonserverad panna för att ett representativt prov ska erhållas.

Det finns endast ett fåtal riktvärden att hitta i litteraturen. Nedan anges de viktigaste riktvärdena för konserverade pannor samt värden som bör gälla i samband med uppstart.

De angivna värdena är främst att betrakta som stöd vid upprättande av riktvärden anpassade till den egna anläggningen.

11.5.1 Torrkonsivering

Vid torrkonsivering är den relativa luftfuktigheten den viktigaste kontrollparametern.

Genom att upprätthålla ett minimiflöde av torkad luft genom systemet säkerställs att ingen fukt blir stående i systemet.

Figur 200 visar riktvärden för de viktigaste parametrarna vid torrkonsivering. En förklaring till åtgärdsnivåerna i finns kapitel 10.2.4 om åtgärdsnivåer.

parameter	åtgärdsnivå	alla delar i systemet
relativ luftfuktighet %	R	<40
	ÅN1	50
	ÅN2	60
	ÅN3	
torrluftflöde SV/h	R	1 - 10
	ÅN1	
	ÅN2	
	ÅN3	

SV = Systemvolym

Figur 200. Riktvärden vid torrkonsivering

Figure 200. Dry lay-up target values

11.5.2 Våtkonservering

Vid all våtkonservering som innebär att pannan är trycksatt är övertrycket i systemet den viktigaste parametern att övervaka. Kontinuerlig mätning där trycket loggas och larm erhålls vid lågt tryck ger den bästa övervakningen.

Ett högre pH-värde i såväl pannvatten som övriga vattenfyllda delar av systemet rekommenderas vid våtkonservering för att minimera korrosionsnivån. Ett undantag är pannor, som spädmatas med avhärdat spädvatten, där pH-värdet vid drift ofta kan vara högre än pH 11. I dessa pannor är även konduktiviteten vid drift ofta en bra bit över 2000 µS/cm. Dessa pannor bör bottenblåsas så att konduktiviteten blir åtminstone <2000 µS/cm, helst under 1000 µS/cm. Vid blåsningen sjunker även pH-värde.

I samtliga vattenfyllda delar av systemet, som inte doseras med syrereduktionsmedel, är det viktigt att kontinuerligt hålla ett övertryck. Så fort trycket sjunker till atmosfärstryck tränger syre in i vattnet med korrosion som följd.

parameter	åtgärds-nivå	matarvatten	pannvatten	pannvatten	övriga systemdelar
vattenkvalitet			avhärdat	avsaltat	avsaltat
pH	R	9,5 - 9,6 ¹⁾	10,5-11,0	9,5 - 10,0 ¹⁾	9,5 - 9,6 ¹⁾
system UTAN komponenter i koppar/ kopparlegeringar	ÅN1	9,2 10,0 ¹⁾	10,2 11,2	9,4 10,2 ¹⁾	9,2 10,0 ¹⁾
	ÅN2				
	ÅN3				
pH	R	9,0 - 9,3			9,0 - 9,3
system MED komponenter i koppar/ kopparlegeringar	ÅN1	8,5 9,4			8,5 9,4
	ÅN2				
	ÅN3				
konduktivitet µS/cm	R	lägsta möjliga	< 1000	lägsta möjliga	lägsta möjliga
	ÅN1		2000		
	ÅN2				
	ÅN3				
sulfid mg/l	R		400-600		
	ÅN1		200 -		
	ÅN2				
	ÅN3				
EliminOx mg/l	R		1200-1600	1200-1600	
	ÅN1		800 2000	800 2000	
	ÅN2				
	ÅN3				
tryck bar	R	> 0,5	> 0,5	> 0,5	> 0,5
	ÅN1	0,2	0,2	0,2	0,2
	ÅN2				
	ÅN3				

¹⁾ Vid pH-justering med ammoniak är övre gränsen på pH-värden 10,5.

Figur 201. *Riktvärden vid våtkonservering*

Figure 201. *Wet lay-up target values*

Figur 201 visar generella riktvärden för våtkonserverade pannor. Under speciella förhållanden kan andra riktvärden vara aktuella. Rekommendationer från leverantörer av kemikalier, system och/eller komponenter måste givetvis följas även om de strider mot ovanstående riktvärden.

Angivna riktvärden för sulfit och Eliminox gäller endast pannor doserade med respektive syrereduktionsmedel.

Vid våtkonservering med kemikalier som inte behandlas i handboken kan det vara aktuellt med andra riktvärden än de som anges här. I de fall där andra kemikalier används vid konserveringen hänvisas till kemikalieleverantörens rekommendationer.

Några generella riktvärden för järn och koppar anges inte utan avgörs från fall till fall.

11.5.3 Uppstart

Vid all uppfyllning av pannor rekommenderas avgasat och avsaltat vatten som ska vara så rent som möjligt.

Returkondensat ska ledas till avlopp eller motsvarande och inte tas tillbaka till matarvattentanken förrän det är tillräckligt rent. Regelbunden provtagning och analys av kondensatet avgör när det kan tas tillbaka till systemet.

Vid våtkonservering med höga halter doseringskemikalier i pannvattnet måste halterna ofta sänkas innan ångproduktionen kan påbörjas. Det görs lämpligast genom kraftig bottenblåsning i kombination med spädmatning med avgasat matarvatten. Höga halter kemikalier i pannvattnet medför ökad risk för förorenad ånga.

12 Invändig inspektion av pannor och turbiner

I detta kapitel redogör Ivan Falk och Jüri Tavast för tillvägagångssätt och utvärdering av invändig inspektion av pannor och turbiner.

Det finns flera skäl till varför en invändig besiktning av panna med tillhörande kringutrustning ska genomföras.

Först och främst är det ett lagkrav där man som anläggningsägare är skyldig att genomföra regelbundna besiktningar av trycksatta anordningar. Den obligatoriska besiktningen kommer inte behandlas i denna rapport. Det finns mer att läsa om detta i t.ex:

- Tryckkärlsdirektivet PED 97/23/EG
- Arbetsmiljöverkets författningssamling AFS 2011:6 ”Tryckbärande anordningar”

En invändig besiktning av ytorna i panna, turbin och dess tillhörande kringutrustning är en förutsättning för att kunna bedöma om vattenkemin legat på en tillfredsställande hög nivå under driftsäsongen. Vattenanalyser med värden inom uppsatta riktvärden är rent krasst bara en vägledning. Det faktiska resultatet går bara att se vid en invändig inspektion.

Invändiga besiktningar är ett sätt att kvalitetssäkra anläggningen genom att man kan identifiera problem innan de orsakar skador. Felaktigheter som upptäcks på ett tidigt stadium kan åtgärdas tidigt vilket minimerar risken för driftstörningar i form av läckage, korrosion, beläggningar etc.

12.1 Invändig inspektion av pannor

En invändig inspektion är en frivillig del i det egna kvalitetsarbetet och det finns flera skäl till att utföra invändiga inspektioner av pannor med tillhörande kringutrustning. En invändig inspektion av ytorna i pannan och kringutrustningen är en förutsättning för att kunna bedöma om vattenkemin legat på en tillfredsställande hög nivå under driftsäsongen.

Resultaten från utförda vattenanalyser och on-lineinstrument ger en indikation om vattenkvaliteten ligger inom gällande riktvärden under driftperioden, men det faktiska resultatet går bara att se vid en invändig inspektion av pannan. Genom att följa systemytornas utseende och karaktär vad gäller jämnhet, magnetitskiktet och eventuella beläggningar av föroreningar erhålls en fortlöpande kontroll på vattenkemin.

Vid alla synliga defekter som bedöms ha samband med en felaktig vattenkemi bör en utredning göras. Invändiga inspektioner är ett sätt att kvalitetssäkra anläggningen genom att man kan identifiera problem innan de orsakar skador. Felaktigheter som upptäcks på ett tidigt stadium kan åtgärdas i tid vilket minimerar risken för driftstörningar i form av läckage, korrosion, beläggningar etc.

12.1.1 Visuell bedömning

En panninspektion ska omfatta en visuell inspektion av de invändiga ytorna i alla viktiga kärl såsom domar, samlingslådor, matarvattentank, nedblåsningskärl, kondensorer, värmeväxlare m.m. Vid den visuella inspektionen kontrolleras magnetitskiktet med avseende på färg, tjocklek och kvalitet. Eventuell förekomst av slam på botten av domen eller i bottenlådor kontrolleras. I de fall beläggningar av föroreningar från vattnet påträffas bör prov på dessa tas ut och analyseras.

Det rekommenderas att inspektionen fotodokumenteras. Det är ett utmärkt sätt att jämföra förändringar från år till år. Se Figur 202 och Figur 203.



Figur 202. Foton från inspektion av pannor med omfattande beläggningar och korrosion.

Figure 202. Photos from inspections of boilers with extensive deposits and corrosion.

Eventuella korrosionsangrepp undersöks och dokumenteras. Även mindre angrepp bör dokumenteras och följas upp kommande år för att säkerställa att skadan inte blir värre. Kontroll av svetsar med avseende på sprickbildning ingår i den periodiska besiktningen och tas inte upp här.



Figur 203. Foton från inspektion av en panna med bra magnetitskikt utan beläggningar och korrosionsangrepp.

Figure 203. Photos from inspections of boilers with sufficient magnetite layer and no deposits or corrosion.

12.1.2 Tubprov

Det är omöjligt att bedöma statusen i hela pannan vid en visuell inspektion. Stora delar av pannan går inte att komma åt. Det räcker ofta inte att bara kontrollera att det ser bra ut i domen. Beläggningar orsakade av hårdhet och/eller korrosionsprodukter bildas i första hand på de värmeöverförande tuber i pannan vilka inte är åtkomliga för visuell inspektion. Uttagning av provtuber och metallografisk undersökning är den mest tillförlitliga och den vanligast förekommande metoden för mätning och karakterisering av vattensidiga beläggningar.

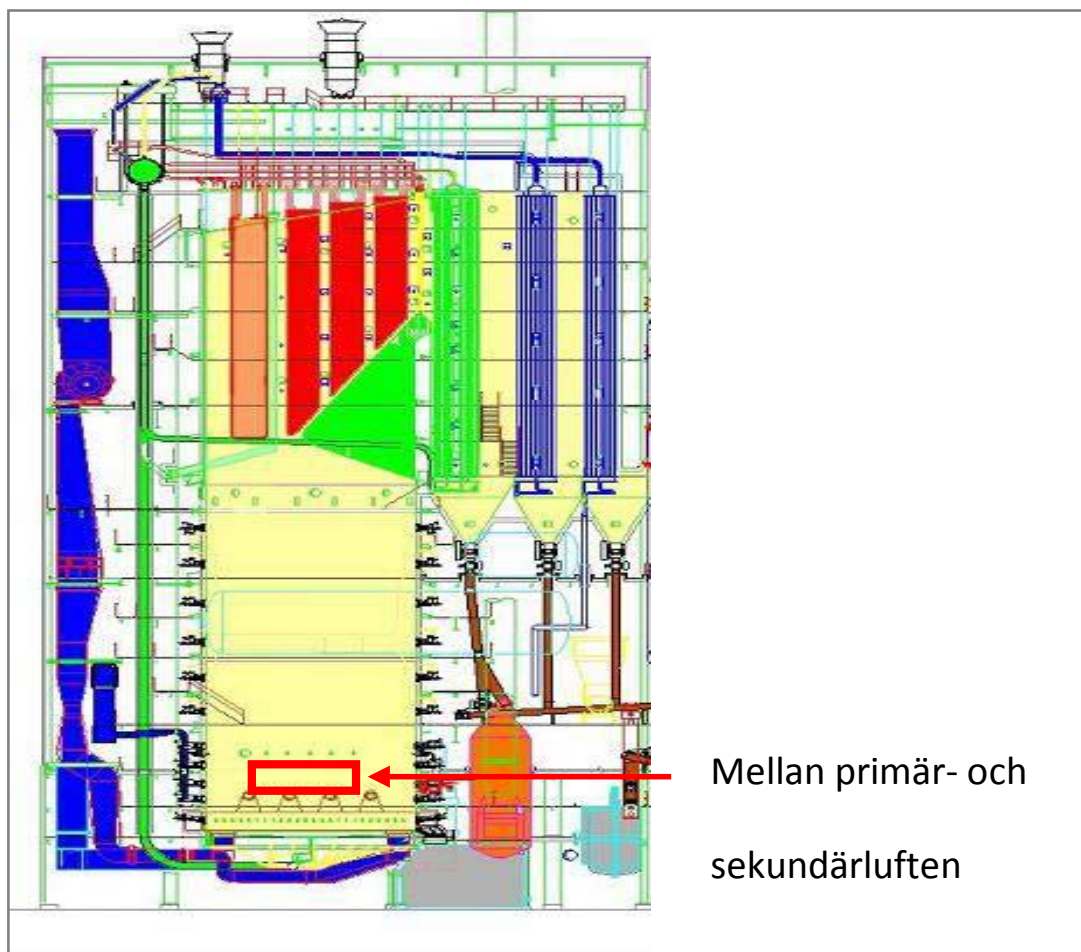
Vid en del anläggningar tas tubprov ut varje år som kontroll av beläggningsstatus i pannan. Resultaten ger underlag för bedömning av en kemisk rengöring av pannans vattensidor behöver utföras. Efter en drifttid på 10-15 år utan kemisk rengöring är risken tilltagande för att skador ska inträffa som medför pannstopp och avbrott i produktionen.

Andra speciella skäl för tubundersökningar kan vara incidenter i vattenreningen som medför att föroreningar eller surt vatten kommit in i pannan. Även observationer vid inspektioner under revisionsstopp i form av slam i domar och lådor ger anledning att ta ut tubprov för undersökning.

12.1.3 Uttag av tubprov

Vid uttag av tubprover är det viktigt att provet tas ut på rätt ställe. Vid undersökning eller uppföljning av beläggningstillväxten i panntuberna är det viktigt att provet tas från det område i pannan där värmebelastningen är som störst; där är också beläggningstillväxten som störst. Om provet tas ut där värmeöverföringen är något lägre kan felaktigt bättre resultat erhållas och fel slutsatser dras vilket kan leda till framtida driftavbrott.

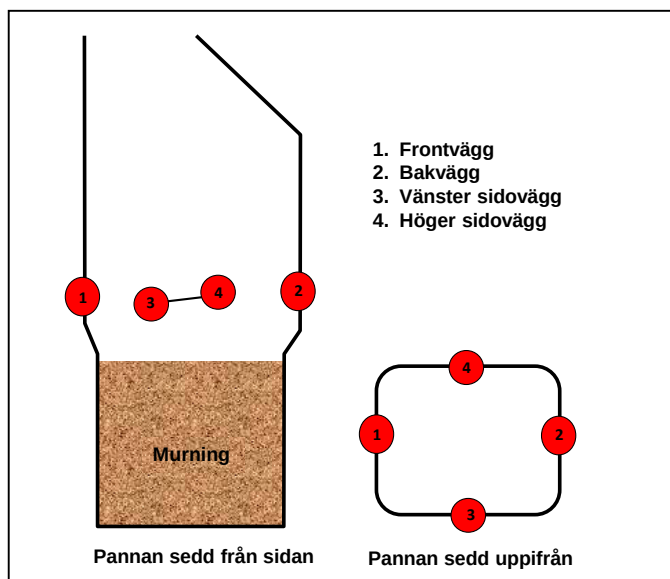
De föroreningar som finns i matarvattnet kommer in i domen och går genom fallrören ned till fördelningslådorna. I stigartuberna börjar ångbildningen och den är intensivast ovanför primärluftsportarna. Avsättningen av föroreningar och beläggningsbildningen sker primärt på denna nivå. Längre upp i tuberna minskar koncentrationen av de deponeringsbenägna föroreningarna. Som följd av detta blir beläggningarna tunnare högre upp i pannan. Tubproven bör därför tas ut mellan primär- och sekundärlufts-nivån på de områden där värmebelastningen är högst. En positionsbild för provtagning i en sodapanna visas i Figur 204.



Figur 204. *Lämplig position för uttagning av tubprover i en sodapanna*

Figure 204. *Suggested position for cutting out tube samples in a recovery boiler*

Värden på värmebelastningen kan endast anges som medelvärden för hela pannan. För varje enskild panna måste man således göra en uppskattning av var den lokala värmebelastningen är högst och var det av praktiska skäl är möjligt att ta ut tubproven. I Figur 205 visas lämpliga provpositioner i en fliseldad panna med murad nedre del av eldstaden.



Figur 205. *Lämplig position för uttagning av tubprov i en fliseldad panna.*

Figure 205. *Suggested position for cutting out tube samples in bio fueled boiler*

Valet av provtagningspunkt är viktigt för att representativa värden skall erhållas. Den styrande faktorn för tillväxten av beläggningar är värmebelastningen. Provtuberna bör således tas i de positioner i pannan där värmebelastningen är högst, d.v.s. precis ovanför murningen.

- Tubprov från ekonomisern tas normalt bara för att avgöra om ekonomisern skall ingå i en kemisk rengöring tillsammans med pannans eldstad
- Tubprover från kraftverkspannor tas normalt i eldstaden och i överhettarna
- I sodapannor tas tubprov från eldstaden och i förekommande fall från "vattenscreen"
- I normalfallet tas inga rörprover från sodapannors överhettare, då dessa normalt hinner bytas ut av andra orsaker långt före ångsidiga beläggningar blir ett problem. En kemisk rengöring av överhettare på sodapannor är p.g.a. pannornas konstruktion dessutom en mycket komplicerad procedur.

12.1.4 Makroskopisk undersökning

Tubproven bör vara 2-3 dm långa och i första hand bör tubprov inspekteras makroskopiskt. Proven delas på längden utefter fenorna på tubhalvan som varit vänd in mot eldstaden. Den frigjorda tubdelen som varit värmebelastad granskas visuellt och jämförelser görs med utseendet på tidigare undersökningar för att konstatera om det föreligger några synliga förändringar i beläggningen.

Vid den visuella granskningen av ytan i proven bedöms jämnheten, färgen och karaktären. Färgen på oxidskiktet ger en god information om vattenkemin varit tillfredsställande under den senaste driftperioden och i Figur 206 visas exempel på hur färgen på insidan av eldstads-tuber kan variera.



Figur 206. Exempel på olika färgnyanser på oxidskikt i eldstadstuber

Figure 206. Examples of oxide layer color shades on furnace tubes

En generell bedömning av färgnyanser ges i Figur 207

oxidfärg	oxidfas	bedömning
svart	magnetit	utmärkt
brun	maghematit	bra
röd	hematit	ej bra
gul	götit	korrosion

Figur 207. Generell bedömning av oxidskikt med olika färg.

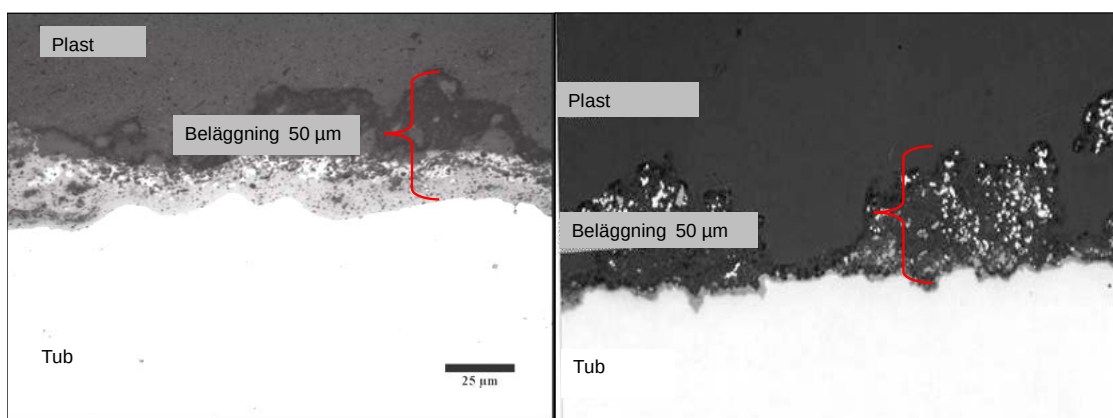
Figure 207. General evaluation of oxide layers with different color.

Är ytorna jämna kan materialytorna bedömas vara passiverade eftersom den inte har krutor och gul färg som skulle tyda på att förekommer pågående korrosion.

12.1.5 Metallografisk undersökning

På orört område på mitten av den värmebelastade tubhalvan kapas en 2 cm bred och 3 cm lång bit ut som används för plastingjutning, slipning och polering. I metallmikroskop granskas tvärsnittet av tubvägg, magnetitskikt och beläggning och representativa områden fotograferas vid lämplig förstoring.

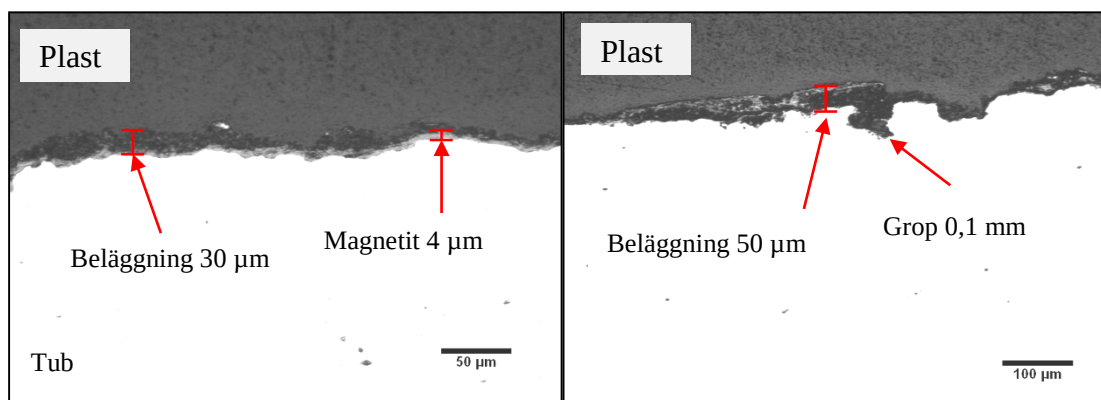
Beläggningsens tjocklek mäts och en bedömning görs av magnetitskiktets kvalitet. Magnetitskiktet är vanligen tunnare än 10 µm och kan i vissa fall vara svårt att urskilja från metallyta och beläggning. Om metallytan är jämn och inga korrosionsangrepp är synliga i metallen tyder detta på att det finns ett passiverande skikt på ytan. Själva beläggningen bedöms med avseende på förekomst av synliga föroreningar som t ex stråk av utfälld hårdhet eller metalliska partiklar av koppar. Exempel på beläggningar som innehåller stråk av föroreningar och metalliska kopparpartiklar visas i Figur 208.



Figur 208. Vita stråk av föroreningar resp. vita partiklar av metallisk koppar i beläggningen.

Figure 208. White streaks of impurities, resp. white particles of metallic copper in the deposit.

I många fall finns endast tunna beläggningar på tubytan. Det är dock väsentligt att tvärsnittsbilderna granskas med avseende på magnetitskiktets kvalitet. I Figur 209 visas bilder på tubyltor utan och med magnetitskikt.



Figur 209. Tubyltor med resp. utan skyddsskikt av magnetit.

Figure 209. Boiler tubes with, respectively without a protective layer of magnetite.

12.1.6 Kemisk sammansättning

Har beläggningen en tjocklek på 100-200 µm kan den skrapas bort från tubytan och efter upplösning analyseras våtkemiskt och kvantitativt. Är beläggningen tunnare kan det vara svårt att få tillräcklig mängd för att analysen ska bli representativ. Ett enklare sätt i dessa fall är att analysera beläggningen med SEM-EDS på en liten utskuren provbit från tubväggen. Analysen är halvkvantitativ men ger erfarenhetsmässigt en god information om sammansättningen.

12.1.6.1 Utvärdering av analysresultat

Resultaten från SEM-EDS-analyser innehåller många element i låga halter som saknar värde för beräkning och bedömning av beläggningens sammansättning. I första hand avses analysen utvisa om elementen i beläggningen utgör föroreningar som kommit in i pannan med matarvattnet och därefter deponerat på magnetitskikten. Många av de element som egentligen kommer från tubmaterialet kan utelämnas när bedömningen görs av vilka element som är föroreningar och i vilka kemiska föreningar dessa element bildar i beläggningen.

Ett första steg vid tolkning av elementaranalysen är att indela värdena i fyra grupper enligt följande: Hårdhet (Ca, Mg, P), kisel (Si), korrosionsprodukter (Cu, Zn) och järnoxid (Fe). Ett exempel på grupperingar av valda elementhalter från en analys visas i Figur 210.

Parameter	Viktsprocent
Hårdhet	
Ca	8,5
Mg	1,9
P	5,6
Kisel	
Si	0,6
Korrosionsprodukter	
Cu	-
Zn	0,6
Järnoxid (Magnetit)	
Fe	51

Figur 210. Exempel på gruppering av elementhalter från SEM-EDS-analys.

Figure 210. Example of element concentrations by SEM-EDS analysis.

I det ideala fallet när endast magnetit finns på ytan blir järnhalten 70-72 % och resterande del är syre. Förenklat kan järnhalten multipliceras med 1,4 och då blir oxidhalten nära

100 %. En första information från analysen är att ju lägre järnhalten är under detta värde desto mer föroreningar finns i beläggningen.

De helt dominerande elementen som orsakar uppbyggnaden av vattensidiga beläggningar är kalcium och magnesium som förekommer som hårdhet i vattnet. Andra viktiga föroreningar som är väsentliga för beläggningens egenskaper är koppar och kisel.

Kalcium (Ca) och magnesium (Mg) är hårdhetsbildande element som faller ut till fast substans med fosfor (P) till kalciumfosfat [$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$], resp. magnesiumfosfat [$\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$].

Ca- och Mg-halterna i tabellen kan stökiometriskt omräknas till fosfat och då blir värdena 21,3 resp. 6,8 % vilket ger en total halt av ca 28 % fosfat. Innehållet av fosfor (P) i dessa föreningar tillsammans uppgår till 5,9 %. SEM-analysen visar 5,6 % vilket är ett något lägre värde och antyder att det är ett svagt underskott av fosfat i förhållande till kalcium och magnesium i beläggningen.

Det kan noteras att det inte finns koppar i beläggningen och att kiselhalten är mycket låg.

I huvudsak består beläggningen av järnoxider (ca 72 %) och utfälld hårdhet (ca 28 %). Det bör även anmärkas att kalcium- och magnesiumhalterna är anmärkningsvärt höga och orsaken till inläckaget av föroreningar bör utredas.

Ett annat exempel på en analys av en beläggning med mer komplicerad sammansättning visas i Figur 211.

Parameter	Andel i procent (%) medelvärde
Syre, O	36,10
Natrium, Na	4,06
Magnesium, Mg	1,55
Kisel, Si	3,35
Fosfor, P	9,55
Svavel, S	1,90
Kalcium, Ca	13,21
Kalium, K	2,66
Mangan, Mn	0,78
Järn, Fe	28,02
Koppar, Cu	6,74

Figur 211. Exempel på en kraftigt förorenad beläggning som också innehåller mycket koppar

Figure 211. Example of a heavily contaminated deposit with high copper content

Järnhalten är 28 % och räknat som järnoxid blir halten ca 39 %. Resterande del som är ca 61 % utgör således föroreningar från vattnet.

Kalcium är utfällt som kalciumfosfat och 13 % Ca blir ca 33 % räknat som kemisk förening. Magnesium (1,5 %) blir ca 5,6 % magnesiumfosfat. Tillsammans utgör föreningarna ca 38,6 % som utfälld hårdhet i beläggningen. Beräknat från P-halten i analysen blir halten Ca-Mg-fosfat ca 48 %, vilket tyder på att det funnits överskott av fosfat i pannvattnet.

Kisel (3,4 %) föreligger som oxid och blir ca 7 % som kemisk förening. I anläggningar med avsaltat spädvatten påträffas normalt endast mycket små mängder kisel i beläggningarna, mindre än 2 % SiO₂. I anläggningar med avhärdat vatten kan kiselhalterna i beläggningarna vara betydligt högre.

Koppar (6,7 %) föreligger som metall och utgör således samma halt, (6.7 %), som beläggningsandel.

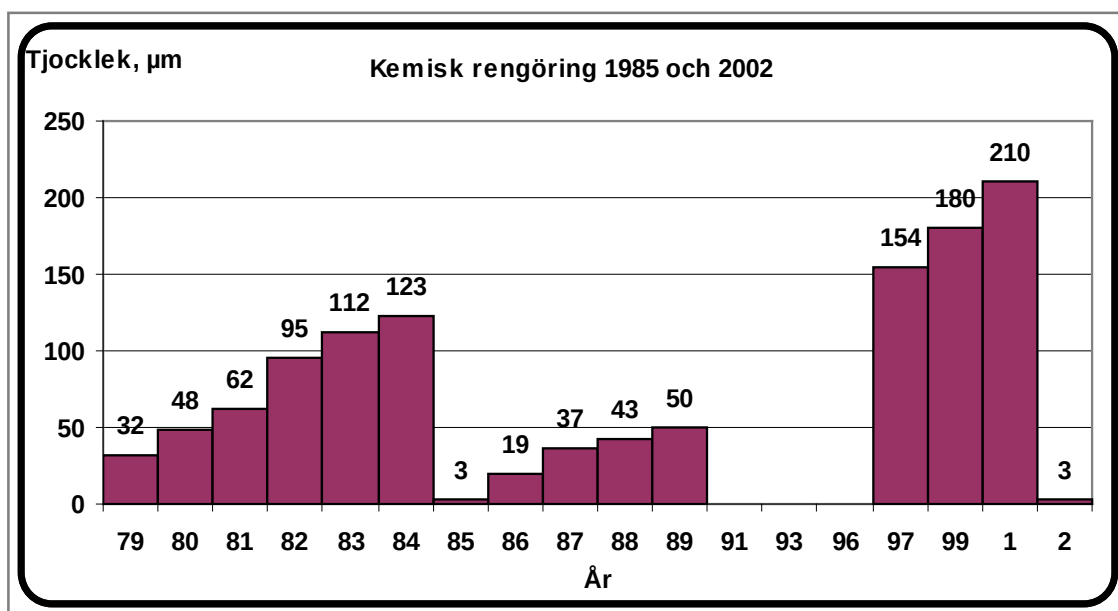
Summan av föroreningarna uppgår till ca 92 %. Resterande del kan vara föreningar av natrium och kalium men dessa element brukar vanligen inte vara påvisbara i beläggningar eftersom alkalialter är vattenlösliga.

Vid en generell bedömning av föroreningshalter kan kalciumhalter på nivån 5 % anses vara anmärkningsvärda och halter över 10 % som alarmerande. Risken för avlagringskorrosion är påtaglig om beläggningarna samtidigt är tjocka.

Kopparhalter på 2-3 % bedöms vara anmärkningsvärda och halter över 5 % bedöms vara alarmerande på grund av risken för korrosionsskador på tuberna.

12.1.6.2 Beläggningstjocklek

Vid metallografiska undersökningar mäts den totala tjockleken i μm i metallmikroskop på ett representativt område eller som ett medelvärde av 20-30 slumpvis valda positioner på tvärsnittet. Om mätningarna görs varje år på tubprov uttagna från samma position i pannans eldstad kan statistik över beläggningstillväxten skapas. I Figur 212 visas ett diagram över beläggningstjockleken i en kraftverkspanna.



Figur 212. Exempel på beläggningstillväxten i en kraftverkspanna med hög värmebelastning.

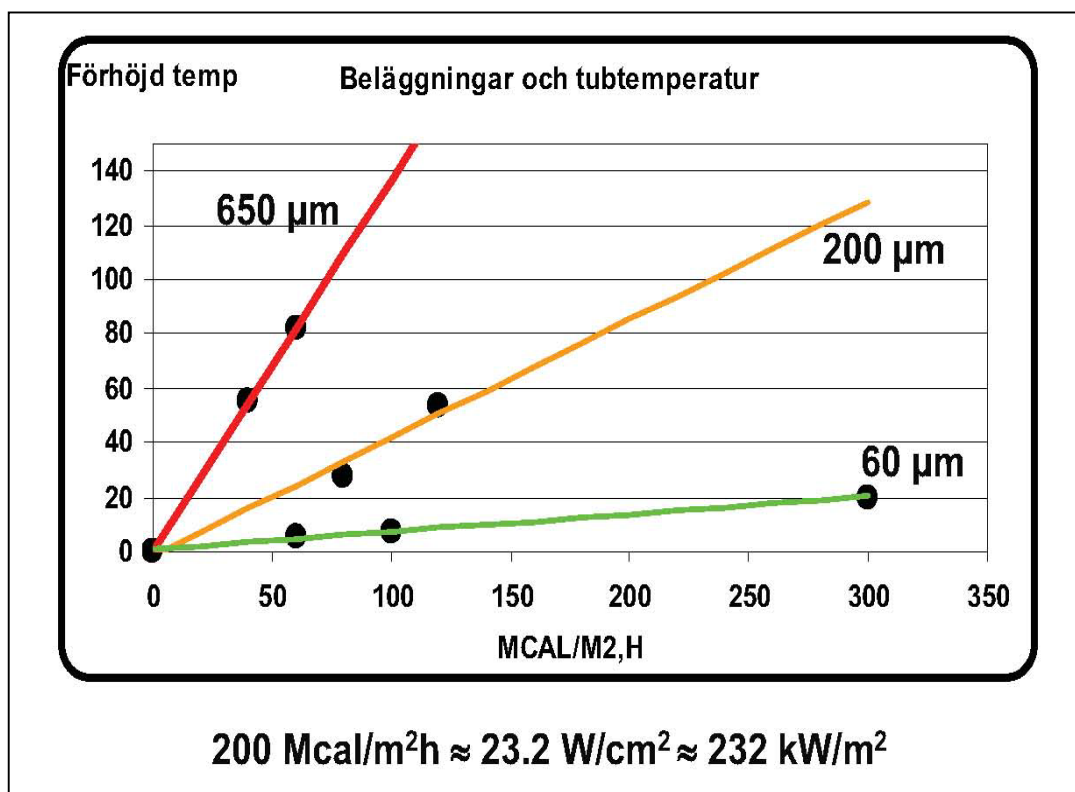
Figure 212. Example of deposit growth in a of high heat load power plant boiler.

Beläggningarna i detta fall var mycket porösa men innehöll inga föroreningar av utfälld hårdhet eller kisel. Ändå var tillväxthastigheten ganska hög och efter 10-15 års drift var tjockleken så hög att kemisk rengöring av eldstadstuberna var nödvändig.

Men tillväxten av beläggningar kan skilja sig i väsentlig grad från panna till panna och det finns pannor som har längre drifttid utan att tjockleken överstiger 50 μm .

Det är vattnets renhet och den specifika värmebelastningen som är avgörande för hur snabbt beläggningen tillväxer i tjocklek. I en del fall där kontrollen över vattenkemin varit bristfällig har beläggningar redan under första driftåret blivit så tjocka att risken för överhettning och materialskador varit påtaglig.

Ett urval av resultat från experimentella mätningar av materialtemperaturen på uttagna tubprov från industripannor under samtidig elektrisk motståndsuppvärmning och kylning visas i Figur 213. I figuren har temperaturhöjningen i materialet avsatts på Y-axeln och värmebelastningen på X-axeln. Mätningarna har gjorts på tre tuber som haft beläggningstjockleken 60, 200 resp. 650 μm på insidan.



Figur 213. Temperaturhöjningen i tubmaterialet avsatt mot den specifika värmebelastningen.

Figure 213. Temperature increase in tube material versus specific heat load.

Resultaten visar att beläggningstjockleken och värmebelastningen har en avgörande inverkan tubmaterialets temperatur. Vid 23,2 W/cm² ger en beläggning på 60 μm en måttlig höjning av materialtemperaturen med ca 15 °C över vattnets mättnadstemperatur vid aktuellt panntryck.

Men redan vid en beläggning på 200 μm orsakas en ökning av temperaturen med ca 80 °C vilket medför en påtaglig risk för överhettning eller förändringar i materialet efter längre tids drift.

Vid värmebelastningen 23 W/cm² kan således en beläggning på ca 150 μm bedömas vara en nivå där kemisk rengöring för borttagning av beläggningarna i eldstadstuberna bör rekommenderas.

Beläggningarna i de provade tuberna innehöll varierande grad av föroreningar från vattnet. Av resultaten kunde dock inget samband mellan olika kemiska föreningar och

inverkan på temperaturhöjningen avläsas. Den enda enskilda egenskap hos beläggningarna som entydigt orsakade den högsta temperaturökning var porositet i beläggningarna.

12.1.6.3 Beläggningarnas ytvikt

Det enklaste sättet att karakterisera beläggningar är att mäta tjockleken. En annan metod är att väga en preparerad provbit före och efter upplösning av beläggningen i inhiberad syralösning (ASTM 3483-78). Vid experimentella mätningar med denna metod på uttagna eldstadtuber och överhettartuber (Värmeforskrapport nr 113) utvärderades sambanden mellan beläggningarnas tjocklek, ytvikt och volymvikt.

Resultaten visade att oxidskikten i överhettartuber är helt kompakta och har en volymvikt som nära överensstämmer med den specifika vikten för ren magnetit ($5,2 \text{ g/cm}^3$). I eldstadtuber från kraftverkspannor var tätheten lägre och låg på nivå $3,5 \text{ g/cm}^3$. Eftersom beläggningar i eldstadtuber är heterogena används volymvikt i stället för specifik vikt.

Vid granskning av tvärsnittsbilder på beläggningar vid förstoringar på 300-500 ggr i metallmikroskop är det möjligt att bedöma porositeten och därmed göra en uppskattning av volymvikten. Vanligen gör dessa uppskattningar ett närmevärde på $2,5 \text{ g/cm}^3$ på beläggningar i eldstadtuber.

Om man vid metallografiska undersökningar har uppmätt tjockleken till ett visst värde är det möjligt att översätta tjockleken till ytvikt i mg/cm^2 med hjälp av en uppskattning av beläggningens volymvikt. Sambandet mellan de tre uttrycken för beläggningens karaktär och egenskaper kan förenklas efter förkortningar av sorterna.

Ytvikten i mg/cm^2 blir då lika med tjockleken i μm gånger 10 och dividerat med volymvikten i g/cm^3 .

Då beläggningar uppnår en tjocklek på 150 μm är en gräns uppnådd då risken för avlagringskorrosion och materialskador tilltar och en kemisk rengöring av pannan bör övervägas. En översikt över vad tjockleksvärdena i μm motsvarar i ytvikt visas i Figur 214.

Tjocklek, μm	Volymvikt, g/cm^3	Ytvikt, mg/cm^2	Ytvikt, g/m^2
10	2,5	2,5	25
10	3,5	3,5	35
100	2,5	25	250
100	3,5	35	350
150	2,5	37,5	375
150	3,5	52,5	525

Figur 214. Samband mellan beläggningars tjocklek, volymvikt och ytvikt.

Figure 214. Correlation between deposit thickness, density and surface weight.

Som framgår av värdena visar ytvikten lägre värden och beläggningarna är porösare och har lägre volymvikt. En porösare beläggning försämrar dock kylningen av tubväggen mera än en tätare beläggning. Tjockleksvärdena ger därför en bättre information om beläggningarnas farlighet för tubskador än ytvikten.

12.1.7 Oförstörande provning

I de fall mer omfattande skador kan befaras kan det vara aktuellt med en mer djupgående undersökning. Med oförstörande provning (OFP) är det möjligt att undersöka tillstånd och kvalitet för ett föremål utan att skada det.

Det finns ett flertal olika provningsmetoder att tillgå beroende på vad problemet är och vad man vill undersöka. Det är inte heller alltid nödvändigt att "skära hål" i pannan för att undersöka eventuella skador.

I Figur 215 visas exempel ett antal oförstörande provningsmetoder, både grundläggande och mer avancerade, som kan utföras var för sig eller i en lämplig kombination.

- Magnetpulverprovning (MT)
- Penetrantprovning (PT)
- Röntgenprovning (RT)
- Ultraljudsprovning (UT)
- Visuell kontroll (VT)
- Virvelstömsprovning (ET)
- Täthetsprovning (LT)
- Materialidentifiering (PMI)
- Avancerad VT; Videoprobe
- Avancerad RT; Digitalröntgen
- Avancerad UT; Phased array, TOFD, EMAT, IRIS, Long och Short Range UT
- Avancerad ET; MFL, SLOFEC, eddyMax, array ET

Källa: Inspecta

Figur 215. *Metoder för oförstörande provning*

Figure 215. *Methods of nondestructive testing*

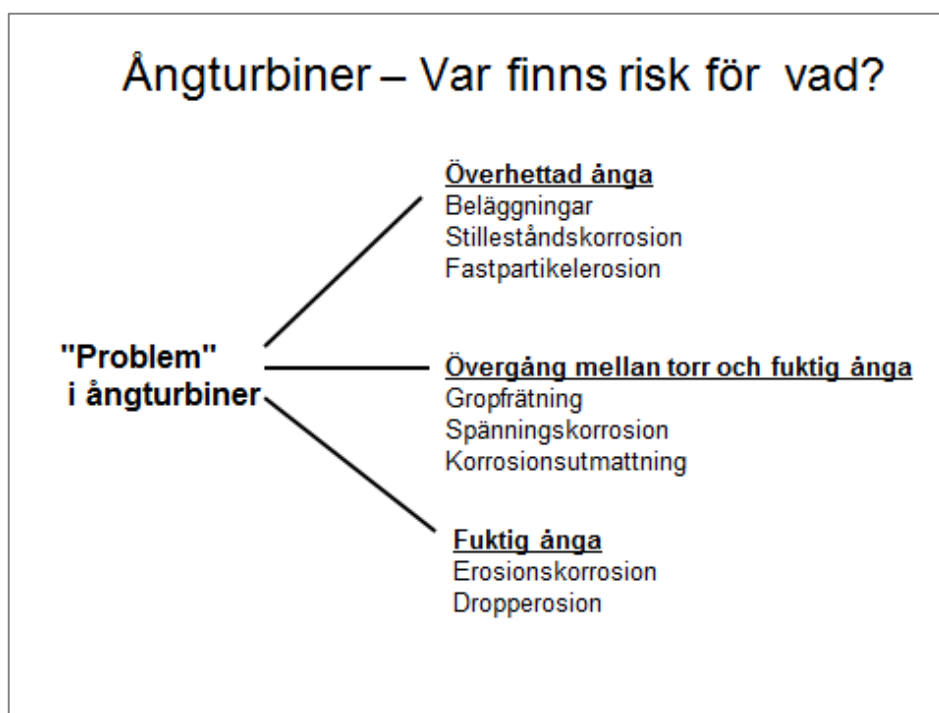
Det finns flera företag som specialiserat sig på oförstörande provning och som både kan utföra provning och utvärdera resultatet på ett korrekt sätt. Mer information om oförstörande provning finns på: www.ndtsweden.com

12.2 Invändig inspektion av turbiner

Enkelt uttryckt så ökar man möjligheterna att på ett tidigt stadium upptäcka problem och vid behov ta in extern hjälp med rätt kompetens och rätt utrustning, d.v.s. om man vet:

- vad man ska leta efter (kunskap om hur olika skadetyper ser ut),
- var man ska leta (kunskap om var olika typer av skador förekommer),
- hur man ska förbereda sig

Figur 216 visar schematiskt var olika typer av problem kan uppträda i en ångturbin.



Figur 216. Översikt över var man kan hitta olika typer av problem i en ångturbin

Figure 216. Overview of where to find different types of problems in a steam turbine

12.2.1 Förberedelser

12.2.1.1 Genomgång av ång- och vattenkemin

En av de viktigaste punkterna inför en inspektion är att gå igenom kemin i ång-/vattencykeln, t.ex. vad det gäller följande:

- status för ång- och vattenkemin, framförallt ångkemin, jämfört med interna och/eller externa riktlinjer
- eventuella trender sedan föregående genomgång
- tänkbara orsaker till upptäckta förändringar
- Ta reda på var man vid normal drift går från överhettad till fuktig ånga (kondensmaskiner). Kontakta turbinleverantören om uppgiften inte är tillgänglig.
- Gå igenom hur man kört sedan föregående inspektion (fullast, dellast, stillestånd?)
- Gå igenom de åtgärder som vidtas eller borde vidtas för att minska risken för korrosionsangrepp under stillestånd

12.2.1.2 Lämplig utrustning

Till att börja med ska man naturligtvis alltid försöka dra nytta av det som finns att tillgå vad det gäller kunskap, erfarenhet och sinnesintryck (syn, känsel och med viss måtta också smak). Om det är fråga om en större revisionsavställning är stora delar av turbinen vanligtvis åtkomliga. Då kommer man vanligtvis långt med en utrustning bestående av följande:

- Digitalkamera med ett bra makroobjektiv, handmikroskop eller åtminstone en bra lupp.
- Tillgängliga rapporter från tidigare inspektioner för att kunna upptäcka förändringar.
- Utrustning för att kunna ta prov på eventuella beläggningar t.ex. en spatel eller tunn kniv, något att samla upp beläggningen med samt burkar med etiketter för notering av var beläggningen kommer ifrån. För analys i svepelektronmikroskop (SEM) räcker det normalt med ungefär ett kryddmått av beläggningen. Röntgendiffraktionsanalys kräver en större provmängd, ca en tesked. Röntgendiffraktionsanalys ger matnyttig kompletterande information om sammansättningen av den eventuellt kristallina delen av beläggningar.
- Korrosionsprodukter och beläggningar kan dölja lokala korrosionsangrepp och därför behövs utrustning för att avlägsna beläggningar och/eller korrosionsprodukter, t.ex. i form av en vanlig eller en roterande rostfri borste (typ "Dremel") samt Scotchbrite.
- Magnet för att kunna skilja mellan magnetiska beläggningar (järnoxider) och andra typer av beläggningar.
- pH-papper och totalavsaltat vatten

Om man inte lyfter av ena halvan av turbinhuset så är man normalt begränsad till visuell inspektion av de sista turbinstegen från kondensorn om man inte har tillgång till ett lämpligt boroskop för inspektion via eventuella boroskophål. Det är tyvärr inte praktiskt möjligt att ta ut prov av beläggningar via boroskophålen för konventionell analys. I enstaka fall har det dock varit möjligt att avgöra om en beläggning är starkt alkalisk med

hjälp av pH-papper och en ren pappersnäsduk som fuktats med totalavsaltat vatten och tryckts mot beläggningen via tillgängliga boroskophål.

12.2.2 Skademekanismer i olika delar av turbinen

Enligt Figur 216 kan olika typer av problem uppstå i olika delar av turbinen. De flesta av de aktuella problemen behandlas tidigare i detta kapitel.

12.2.2.1 Torr överhettad ånga

I torr överhettad ånga finns det risk för framförallt beläggningar och stilleståndskorrosion samt i vissa fall också fastpartikelerosion. Beläggningar av natriumhydroxid kan dock medföra risk för lokala frätgropar eller spänningskorrosion i de sista stegen före Wilsonlinjen. Se kapitel 5.3 om spänningskorrosion.

Utfällning av beläggningar i torr överhettad ånga behandlas närmare i avsnittet som behandlar bakgrunden till kemikraven vid ångturbindrift medan stilleståndskorrosion behandlas i ett eget avsnitt. Se kapitel 3.3.1.1 om utfällning från ånga och kapitel 5.5 om stilleståndskorrosion

Fastpartikelerosion orsakas i förekommande fall av hårda partiklar av magnetit som skalar från pannans överhettartuber vid temperaturgradienter, vanligtvis främst vid avställning av pannan. Resultatet blir en ”blästring” av den första ledskenan i högtrycksturbinen vilket kan medföra en effektförlust p.g.a. en ändrad profil av ledskenan.

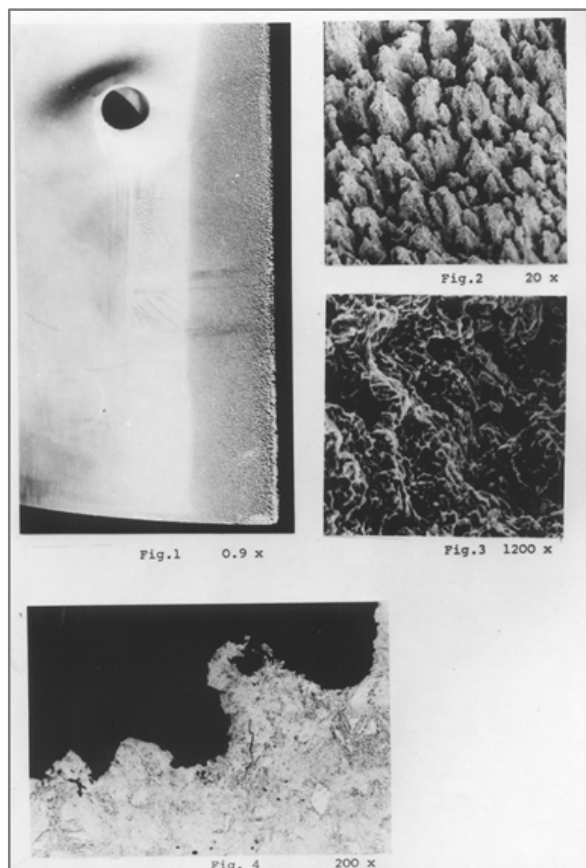
12.2.2.2 Wilsonlinjen i kondensturbiner

Området i anslutning till övergången mellan torr och fuktig ånga är speciellt utsatt för lokala korrosionsangrepp som gropfrätning och korrosionsutmattning. Se kapitel 5.2 om korrosionsutmattning

12.2.2.3 Fuktig ånga

I utloppsdelarna av kondensturbiner där ångan vanligtvis är fuktig under drift är beläggningar normalt inget signifikant problem även om stilleståndskorrosion kan medföra en del korrosionsprodukter. Däremot är det vanligt med erosionskorrosionsangrepp i komponenter av kolstål, gjutjärn och låglegerat stål. Se kapitel 5.4 om erosionskorrosion.

Avloppsskovlarna drabbas ofta av dropperosion i framkanten, främst i närheten av skoveltoppen. Se Figur 217.



Figur 217. *Exempel på dropperosion i en avloppsskovel*

Figure 217. *Example of droplet erosion on a last stage turbine blade*

Dropperosion som skademekanism är en form av utmattning där kollisionen mellan dropparna och skoveln medför en dynamisk belastning, en form av "vattenblästring". De viktigaste inverkanse faktorerna är den relativa dropphastigheten, droppstorleken och antalet droppar per tids- och ytenhet. Angreppshastigheten är efter en viss inkubationstid vanligtvis som högst i början av förloppet och det är sällan som man måste byta skovlar p.g.a. dropperosion.

13 Betning och kemisk rengöring

Felaktiga rutiner vid avställning och konservering står för en stor andel av korrosionsskadorna på svenska energianläggningar.

Varje anläggning är unik, med unika förutsättningar och krav. Väl fungerande konserveringsrutiner kan bara erhållas genom att upprätta rutiner individuellt för varje enskild anläggning.

I detta kapitel beskrivs tillvägagångssätt för betning och kemisk rengöring av pannanläggningar. Dessutom ges rekommendationer för val av konserveringsmetod och utförande av de olika systemdelarna i anläggningen.

Innehållet baseras i huvudsak på material som Lars-Åke Persson (Ingenjörfirman Hans Wistrand AB) och Ivan Falk har bidragit med.

13.1 Bakgrund

Behov av kemisk rengöring uppstår i alla pannor förr eller senare för att avlägsna bildade beläggningar från panntuberna. Beläggningar av järnoxider, salter och föroreningar på insidan av panntuberna orsakar en höjning av materialtemperaturen då beläggningarna utgör ett isolerande skikt mellan vattnet och tuben. Tidsintervallet mellan de kemiska rengöringarna kan variera kraftigt, 1-15 år, mellan olika pannor beroende på pannkonstruktion, värmebelastning och vattenkemi.

Vid rengöring av pannor och tillhörande kringutrustning finns det två begrepp som ofta förväxlas, betning och kemisk rengöring. Skillnaden mellan begreppen är:

Betning gäller för rengöring av nya pannor och system. Vid betningen avlägsnas glödska, oxider, svetsslagg och andra föroreningar från installationen.

Kemisk rengöring innebär rengöring av pannor och kringutrustning som varit i drift och där det handlar om att ta bort beläggningar som bildats under drift.

Ett tredje begrepp som också förekommer är **alkalisk urkokning**. Det kan vara ett enklare alternativ till betning, för pannor med lägre tryck och lägre krav på ångkvalitet.

metod	anläggning	kemikalie	vad tas bort
betning	ny panna >40 bar	syralösning	alla föroreningar på tubytorna
kemisk rengöring	panna som varit i drift	syralösning	alla föroreningar på tubytorna
alkalisk urkokning	ny panna <30 bar	alkalisk tvättlösning	olja, fett, glödska, slagg tar <u>inte</u> bort oxidskikt

Figur 218. Olika sätt att rengöra pannor

Figure 218. Different methods to clean a boiler

13.2 Betning av nya pannor

För en ny panna gäller det att man redan vid beställning av den nya anläggningen bör diskutera betningen med pannleverantören. Stutsar för tömning och cirkulation av kemikalierna ska monteras på lämpliga ställen för att underlätta betning.

I miljötillståndet för anläggningen bör det framgå att pannan av säkerhetsskäl ska betas innan driftsättning. Därefter finns även behov av kemisk rengöring med regelbundna intervall.

Under byggtiden bör vissa åtgärder vidtas för att underlätta betning och minimera oxidation av metallytorna. Det handlar främst om att hålla alla metallytor rena och torra så att korrosion och försmutsning minimeras fram till den första provtryckningen. Metallytornas kondition påverkas i hög grad av de förhållanden under vilka pannans olika komponenter tillverkas och förvaras.

Provtryckning av en ny panna sker normalt flera månader innan den tas i drift. I samband med den första fyllningen är det viktigt att ha ett väl genomtänkt program för konservering. Det ska finnas en plan för vilken vattenkvalitet som ska användas, vilka kemikalier som ska doseras, hur dessa doseras samt hur systemet ska fyllas. Dessutom ska man ha planerat för hur konserveringen ska kontrolleras under konserveringstiden. Se även kapitel 11.4.1 om konservering av nya pannor.

Syftet med betningen av en panna är att uppnå de uppställda renhetskraven för vatten och ånga på kortast möjliga tid. En betning gör de exponerade ytorna metalliskt rena, så att ett heltäckande, jämt och kompakt skyddsskikt av magnetit kan bildas, då pannan tas i drift. Kvaliteten och förmågan att motstå korrosion hos detta skyddsskikt är avgörande för pannans tillgänglighet och livslängd. Ett fullt utvecklat magnetitskikt erhålls först efter 1000-1500 timmars drift. Icke desto mindre är det avgörande för detta oxidskikts beskaffenhet att det bildas från en ren metallyta och vid rätt driftförhållanden vid

igångkörningen. Läggs inte grunden till skyddsskiktet under rätt förhållanden kan detta inte repareras senare.

I praktiken ska en betning avlägsna orenheter såsom rost, glödska, olja, fett, sand, slagg, och andra främmande föremål, som kommer från tillverkningen och montage av pannan samt skapa förutsättningar för ett skyddande magnetiskt skikt.

Hur och om en panna ska rengöras innan drifttagning bestäms av en mängd faktorer såsom värmeledning, tryck, krav på ångans renhet etc. Ekonomiska faktorer såsom kostnad för betningen och avfallshantering samt besparingar genom en tekniskt underlättad och snabbare igångkörning måste också vägas in.

13.2.1 Betning eller betas alkalisk urkokning

I Sverige och runt om i världen anses generellt att pannor med ett drifttryck över 40 bar ska betas före driftsättning. Betning av nya anläggningar har i Sverige sedan 1950-talet lett till en framgångsrik, snabb, störningsfri drifttagning och förstaårsdrift av nya pannor.

För pannor med drifttryck under 30 bar kan eventuellt ett enklare alternativ till betning, en s.k. alkalisk urkokning, väljas om inte speciella krav föreligger på ångans eller på någon eller några av de ingående komponenternas renhet. Även storlek på pannan har betydelse.

Största skillnaden mot en betning är att vid en alkalisk urkokning tas inte oxiderna bort från metallytan. Olja, fett och fasta föroreningar samt merparten glödska och slagg avskiljs dock effektivt.

En alkalisk urkokning utförs vanligen med en blandning av tri-natriumfosfat och natriumpolyakrylat.

13.3 Kemisk rengöring

När vi i Sverige talar om kemisk rengöring av pannor menar vi normalt rengöring av pannor som varit i drift.

Vid bedömning om behov av en kemisk rengöring föreligger görs en avvägning av beläggningstjocklek, föroreningar i beläggningen och hur länge sedan senaste kemiska rengöringen gjordes. Se även kapitel 12.1.2 om tubprov.

Det är också vanligt att man rengör pannan efter en ombyggnad eller större reparation. Fördelen är att man erhåller både en betning av nya tuber och en kemisk rengöring av de befintliga tuberna som ska vara kvar.

Framtida bedömningar av rengöringsbehov och/eller beläggningstillväxt underlättas när alla tuber har samma utgångsläge ur beläggningssynpunkt. Om man byter tuber vid olika tillfällen utan att rengöra hela pannan skapar man en mycket komplex grund för framtida bedömning av tubprover från pannan. Man måste då ta ut tubprover både från de gamla

kvarvarande delarna av pannan och från de nya delarna av pannan vid varje inspektion, för att kunna bedöma behovet av rengöring.

Beslutet om en kemisk rengöring bör vara underbyggt av uppgifter om beläggningarnas tjocklek och karaktär, kemisk sammansättning, drifttiden sedan föregående kemiska rengöring, pannans tillgänglighetskrav och konstaterade observationer vid de senast utförda inspektionerna.

Tillväxten av oxider, som följd av reaktioner mellan vattnet och tubmaterialet, är låg (10-15 $\mu\text{m}/\text{år}$), vilket innebär ca 10 års drift innan kemisk rengöring aktualiseras. Flera av de större kraftverkspannorna har rengjorts efter denna drifttid och vid oxidtjocklekar på 100-125 μm .

I industripannor, som har lägre värmebelastning, kan beläggningarna vara tjockare (upp till ca 250 μm) innan detta medför någon större risk för överhettningsskador eller korrosionsskador.

För sodapannor blir en entydig rekommendation mer komplicerad då man vanligtvis har en mera komplex kemisk sammansättning av beläggningarna. Dessutom varierar driftrycket i pannorna inom vida gränser, varför vi hänvisar till Figur 219 och till undersökning av tubprover från respektive panna.

Förekommande tabeller med angivande av beläggningstjocklek och ytvikter för att bestämma om och när en kemisk rengöring bör utföras har fått mindre och mindre aktualitet och bör användas med stor försiktighet.

En förenklad sammanfattning av kriterier, som används som underlag vid beslut om kemisk rengöring, visas i Figur 219.

	kriterium	orsaker	följder	kontroll, mätning
1	För hög materialtemperatur	Beläggningar Föroreningar Oxidtillväxt	Överhettning Strukturförändringar Sänkt hållfasthet	Tubprov, mätning av beläggningar, metallografi Temperaturmätning i tub med termoelement H ₂ -mätning
2	Korrosion i eldstadstuber	Föroreningar i matarvatten	Tubbrott, läckage	Kemikontroll Tubprov, metallografi H ₂ -mätning
3	Sned värmebelastning i ekonomiser och överhettare	Konstruktionsfel, överlast	Överhettning Strukturförändringar Sänkt hållfasthet	Ändrade behov för insprutningsvatten och temperaturreglering H ₂ -mätning
4	Tryckförluster	För tjocka oxisskikt, "riffelstruktur"	Mer pumpenergi Ojämn fördelning av vatten i förångartuber	ΔP-mätningar tubprov, tjocklek morfologi
5	Drifttiden			Max 10 år

Figur 219. Underlag till beslut om kemisk rengöring (källa: Ivan Falk 2000)

Figure 219. Basis for decision on chemical cleaning (source Ivan Falk 2000)

13.3.1 Kontroll av beläggningstillväxt

Vid den periodiska (årliga) invändiga besiktningen av pannan bör eventuella beläggningar kunna observeras. Det kan röra sig om en långsamt, år från år, växande beläggning eller en beläggning, som plötsligt uppkommit, vanligtvis p.g.a. fel på någon annan komponent i systemet.

Uttagning av tubprover och metallografisk undersökning är den mest tillförlitliga och vanligast förekommande metoden för mätning och karakterisering av beläggningar. Beläggningarna undersöks med avseende på tjocklek, karaktär och den kemiska sammansättningen.

På basis av dessa undersökningar kan uppskattningar göras om beläggningens värmeisolerande egenskaper och dess potentiella risk att orsaka skador på tuberna.

Hur ofta som provtuber bör tas ut för undersökning beror i hög grad på vilka erfarenheter man har från den aktuella anläggningen. I pannor med mycket hög värmebelastning görs mätningar varje år, vilket ger kontroll och dokumenterade värden över beläggningarnas tillväxthastighet samt ett bevis på hur vattenkvaliteten varit det senaste året.

I pannor med hög vattenkvalitet och ringa beläggningstillväxt kan tubprover tas ut med längre intervaller, t.ex. vart tredje år.

För sodapannor och industripannor med högre risk för föroreningar i matarvattnet föreslås uttagning av rörprov minst vartannat år. Efter tio års drift från senast utförd kemisk rengöring, eller då den maximalt tillåtna oxidtjockleken närmar sig, rekommenderas att dessa prov tas ut varje år eller vid ordinarie underhållsstopp.

Anläggningar med kondensatfilter, jonbytande och mekaniska, installerade på returledningen får ett avsevärt renare kondensat, vilket minskar risken för beläggningar i panntuberna. Därmed förlängs också intervallen mellan de kemiska rengöringarna.

13.3.1.1 Olika filosofier

Det finns olika synsätt på när man bör eller måste utföra en kemisk rengöring av en ångpanna.

I Sverige är den vanligaste metoden för att bestämma rengöringsbehovet att regelbundet skära ut rörprover från pannan.

Valet av provtagningspunkt är viktigt för att representativa värden skall erhållas. Den styrande faktorn för tillväxten av beläggningar är värmebelastningen. Provtuberna bör således tas i de positioner i pannan där värmebelastningen är högst.

13.3.1.1.1 Rengöring med jämna tidsintervaller

I många olika länder har man en annan rengöringsfilosofi än den skandinaviska. Många stora företag har en koncernpolicy att kemiskt rengöra sina pannor på vattensidan vart femte till sjunde år.

13.3.1.1.2 En kemisk rengörings påverkan på pannan

Det finns en ganska utbredd uppfattning att täta regelbundna rengöringar medför en ökad risk för korrosionsskador på pannans tuber. De inhibitorer som användes idag har en mycket hög skyddseffekt och korrosionen under en kemisk rengöring understiger 3 µm, varför denna risk är minimal. Korrosionen på rökgassidan överstiger normalt vida korrosionen på vattensidan, inkluderat kemiska rengöringar.

13.3.1.1.3 Långa eller korta intervall mellan de kemiska rengöringarna

Fördelen med långa intervaller mellan rengöringarna är att man sparar in tiden och pengarna som rengöringen kostar. Framtida rengöringar kan däremot bli komplicerade, tidsödande och kostsamma.

Genom att utföra de kemiska rengöringarna med kortare tidsintervaller vinner man följande fördelar:

- **Minskad risk för korrosion och skador.** Erfarenheten har visat att det ibland är förenat med vissa svårigheter att hitta den tub, som har den tjockaste och mest värmeisolerande beläggningen. Vid ett flertal tillfällen har det visat sig, att den tub som uppvisat de värsta beläggningarna, har skurits ut ur tryckkärlet av en helt annan

anledning än att leta efter beläggningar. Generellt minskas risken för korrosion och skador på tryckkärlet, om man rengör med tätare intervaller.

- **Planerade stopp blir kortare och billigare.** De mest kostsamma rengöringarna utförs i samband med tubhaverier och ev. byten av skadade tryckdelar i pannan. En väl planerad rengöring, förslagsvis var tionde till tolfte år, medför en kemisk rengöring på avsevärt kortare tid och med ett bättre resultat av den kemiska rengöringen med minskade kostnader som följd.
- **Bättre rengöringsresultat med kortare intervaller.** Efter vissa rengöringar, som utförts med mycket långa intervaller, har det visat sig att pannan inte är helt ren i alla delar. Det är visserligen rent i de tuber, vilka sitter nära den tub som uttagits för laboratorieundersökning och försöksrengöring. Det visar sig ibland, att tuber, som tagits ut vid senare tillfällen i andra delar av pannan kan ha restbeläggningar, som till och med kan ha bidragit till korrosion och tubskador. Man har vid vissa tillfällen tvingats att upprepa rengöringsbehandlingen för att erhålla rena metallytor. Det är lättare att få ett snabbt och perfekt rengöringsresultat om pannan inte har för många drifttimmar.
- **Enklare rengöringsprocedur och mindre miljöbelastning.** En panna med färre drifttimmar sedan den senast utförda rengöringen, är lättare att rengöra än en med tjugo års drift. Ofta krävs inte någon alkalisk förbehandling och efterbehandlingen blir mindre komplicerad och kan många gånger utföras med mindre åtgång av kemikalier, vilket också innebär en mindre belastning på den yttre miljön samt en minskad tidsåtgång.

13.4 Utförande

Utförandet som följer nedan är i stort sett samma vid betning och kemisk rengöring.

13.4.1 Förberedelser

Innan en kemisk rengöring startas skall ett rengöringsprogram upprättas. Ju större panna och rengöringsomfattning desto mera detaljerat rengöringsprogram krävs. För att utforma ett rengöringsprogram som leder till ett framgångsrikt utförande är noggranna förberedelser ett grundläggande villkor.

I förberedelserna ingår normalt följande moment:

- Uttagning av beläggningsprov eller tubprov samt analys av dessa.
- Kontroll av ritningsunderlag och andra tekniska förutsättningar.
- Infordrande av offert från en rengöringsfirma som förutom pris ska omfatta:
- Beskrivning av den kemiska behandlingen
- Förberedelser såsom mekaniska anslutningar, el- och vattenbehov m.m.
- Tidsprogram
- Garantier
- Försäkringar, som bör omfatta en ansvarsförsäkring för person och egendomsskador samt en försäkring av omhändertagen egendom d.v.s. själva pannan.
- Avfallskemikaliehantering med hänsyn till miljön enligt gällande regler.

Förberedelserna avslutas omedelbart före rengöringen, då man kontrollerar att alla ovanstående förutsättningar uppfyllts.

13.4.2 Val av kemisk behandling

Efter analys av tubprov eller beläggningsprov samt genomgång av systemets konstruktionsmaterial kan den kemiska behandlingsmetoden väljas. Proceduren inkluderar val av kemikalier, koncentration, temperatur och behandlingstid.

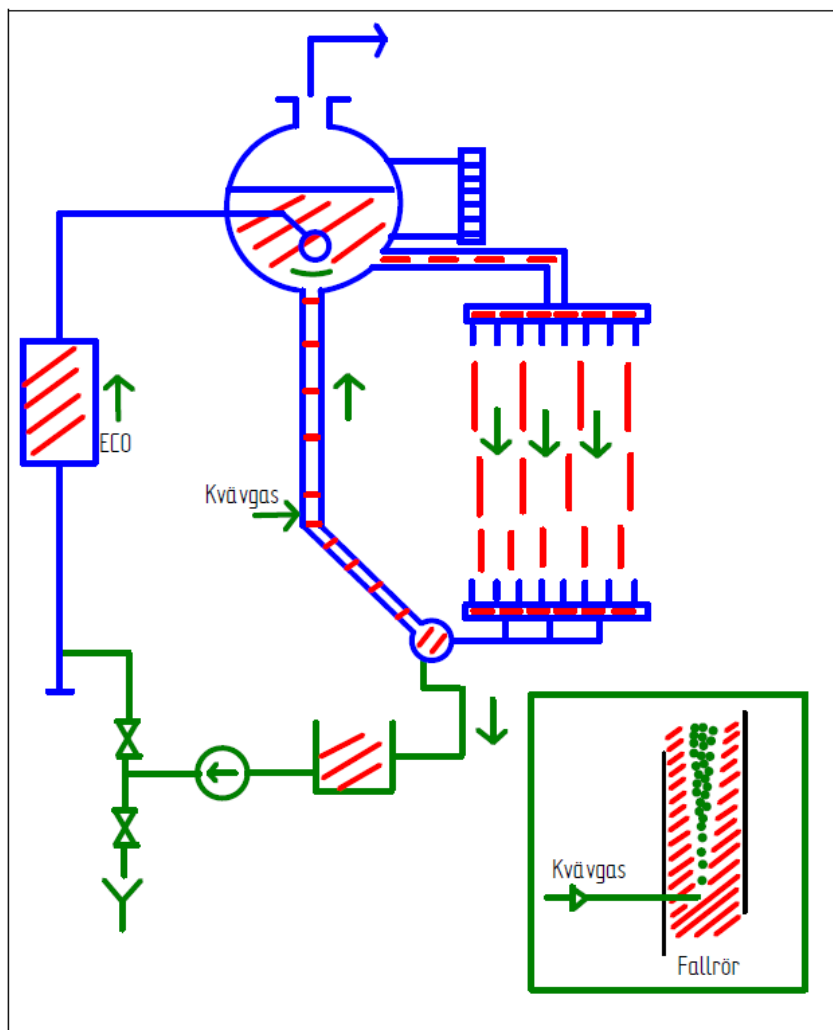
Ökad miljömedvetenhet och ökade myndighetskrav gör att påverkan på miljön, och möjlighet att på ett tillfredsställande sätt behandla uppkomna avfallslösningar, idag tillmätts ett allt större inflytande på val av kemisk behandlingsmetod.

13.4.3 Cirkulation av kemikalierna

En för rengöringsresultatet mycket viktig faktor är valet av cirkulationsmetod. Detta har betydelse för behandlingstid, kemikaliekoncentration, rengöringsresultat och omfattning av mekaniska förberedelser. De vanligaste cirkulationsmetoderna är:

- Tvångscirkulation med temporär cirkulationspump.
- Autocirkulation genom att injicera en inert gas i pannans fallrör. Då denna metod används krävs en betydligt mindre cirkulationspump jämfört med alternativ 1. Dessutom behövs normalt betydligt mindre mängd temporära anslutningar och rör.
- Stilleståndsbetning, d.v.s. betning eller kemisk rengöring utan cirkulation.

I många fall kombineras en eller flera av dessa cirkulationsmetoder. Se Figur 220



Figur 220. Autocirkulation med injektion av kvävgas i ett fallrör och pumpcirkulation av ekonomiser

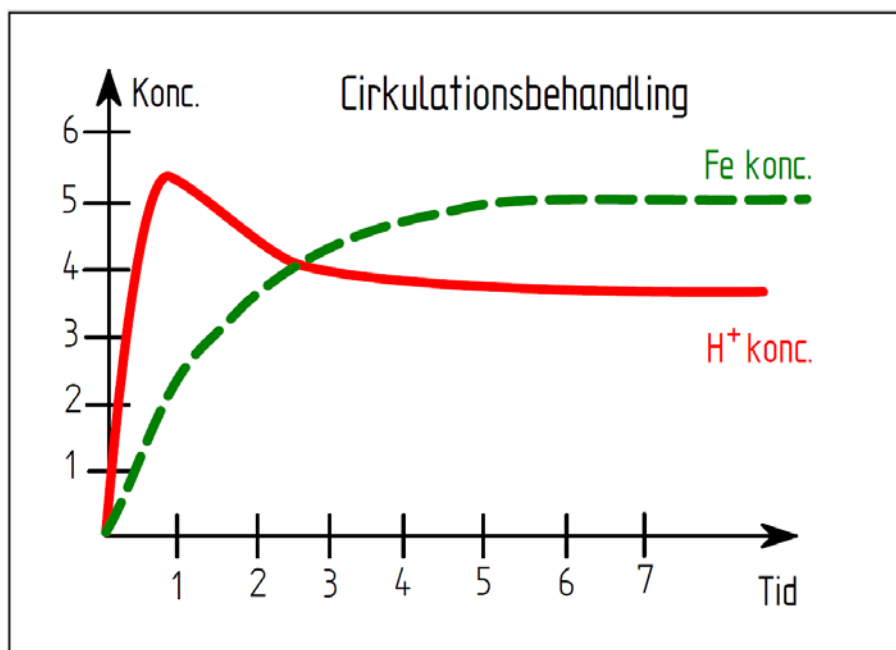
Figure 220. Circulation by nitrogen gas injection in a down pipe and pump circulation in the economizer

Vid en kemisk rengöring avlägsnas beläggningarna genom en kombination av kemisk upplösning av beläggningen och mekaniskt avlägsnande av den delvis upplösta beläggningen. Om man tar detta i beaktande är det lätt att inse att cirkulation av rengöringslösningen avsevärt förbättrar rengöringsresultatet.

En annan svårighet vid stilleståndsrengöring är att veta att tillräcklig mängd av kemikalier finns i systemets alla delar. Om det lokalt finns större mängder beläggningar förbrukas där en större del av kemikalierna. Vid rengöring med cirkulation tillförs istället hela tiden nya kemikalier till eventuella områden med lokalt stora mängder beläggningar.

Den kemiska rengöringsprocessen övervakas med kemiska analyser av rengöringslösningen. Se Figur 221. Utan cirkulation är det svårt, för att inte säga omöjligt, att erhålla

representativa prov och därmed också att kontrollera rengöringsprocessen med kemiska analyser. Dessutom kan representativa korrosionsmätningar inte utföras.



Figur 221. Typiska järn- och syrakoncentrationer vid cirkulationsrengöring

Figure 221. Typical acid and iron levels during circulation cleaning

13.4.4 Förbehandling

Vid betning av nya pannor består förbehandlingen normalt av en avfettningsbehandling. För att uppnå bästa effekt med den kemiska rengöringen måste eventuell olja och/eller fett först avlägsnas. Dessutom måste pannan vara fri från olja och fett vid igångkörningen. Denna behandling utförs genom att en lösning tillsatt vätnedel cirkuleras genom systemet.

Avfettningsbehandlingen kan förstärkas genom "alkalisering" d.v.s. en förhöjning av pH-värdet.

Vid en kemisk rengöring får undersökningen av tubprov eller beläggningsprov utvisa eventuellt behov av en förbehandling. Om beläggningen innehåller komponenter som är olösliga eller begränsat lösliga i syra kan en förbehandling krävas. Denna består vanligtvis av en kraftig alkalisk urkokning under tryck.

13.4.5 Syrabehandling

Vid syrabehandlingen avlägsnas oxider, glödskal och beläggningar som bildats under drift eller montage. De syror som vanligtvis användes i Sverige är:

- Fluorvätesyra (används vanligen vid betning)
- Saltsyra med tillsatsmedel (används vanligen vid kemisk rengöring)
- Citronsyra, sulfaminsyra eller andra syralösningar (användes i undantagsfall)

Material som normalt förekommer i pannkonstruktioner angrips av dessa syror varför en inhibitor måste tillsättas. Moderna inhibitorer har en mycket god skyddseffekt och vanligtvis underskrids den högsta tillåtna avfrätningen på 20 g/m² (eller max. 3 µm) med god marginal.

13.4.6 Neutralisation och passivering

Efter dränering av syralösningen och efterföljande sköljning är metallytorna mycket benägna att oxideras. För att förebygga oxidation under efterföljande inspektion och återställning av pannan utförs en passiveringsbehandling. En svag citronsyralösning cirkuleras i systemet för att avlägsna eventuella oxider som kan ha bildats under sköljning. Lösningens pH-värde höjs därefter genom tillsats av ammoniak, varefter ett oxidationsmedel tillsätts för att passivera metallytorna.

Om beläggningen innehåller koppar, kommer kopparn att pläteras ut på metallytorna som metallisk koppar under syrabehandlingen. I detta fall kan en särskild behandling för att avlägsna denna koppar kombineras med passiveringsbehandlingen.

13.4.7 Kontroll av rengöringsprocessen

Under den kemiska rengöringen kontrolleras rengöringsprocessen med kemiska analyser. Rengöringens slutpunkt bestäms genom analys av syrakoncentration och halt av upplöst järn. Inhibitorns effekt verifieras genom ett test som bygger på vätgasbildning på stålull.

Inhibitorns effekt kan också kontrolleras genom ett korrosionstest på korrosionskuponger tillverkade av de material som förekommer i pannkonstruktionen. Dessa kuponger placeras separat i en parallellkrets till pannan under rengöringen. Genom att väga kupongerna före och efter rengöringen kan materialförlust och därmed avfrätningen per ytenhet bestämmas. Det rekommenderas inte att placera korrosionskuponger inne i tryckkärlet. Om kupongerna lossnar kan detta orsaka betydande problem.

Efter rengöringen kontrolleras rengöringsresultatet genom inspektion av systemet. Domar och bottenlådor öppnas för inspektion och om så krävs görs en manuell rensolning. Skräp och slam som lämnas kvar i domar och fördelningslådor kan leda till avsevärda problem med igensatta och blockerade ventiler under igångkörningen av pannan. Därför är det mycket viktigt att detta moment utförs med yttersta noggrannhet. Rengöringsresultatet kan även kontrolleras genom att ta ut ett tubprov från pannan.

13.4.8 Uppbyggnad av skyddsskikt

Resultatet av en framgångsrik kemisk rengöring med efterföljande start av pannan skall, förutom en ren panna, resultera i ett tunt, jämnt och väl vidhäftande och skyddande oxidskikt.

Efter en kemisk rengöring är det därför viktigt att pannan startas under noggrann kontroll av vattenkemi och övriga driftförhållanden. Ju renare vatten desto bättre magnetiskt skikt. Trots en framgångsrik kemisk rengöring kan en igångkörning, som inte utförs under rätt förhållanden, medföra att bara halva målet med rengöringen uppnås.

En kemisk rengöring avslutas med en så kallad 50-timmarsdrift där pannan körs i minst 50 h, helst längre. Det ger en nöjaktig passivering av ytorna och därmed förhindras efterrostning av ytorna under den tid (någon vecka) som pannan är avställd mellan rengöringen och den nya driften. Passivfilmen är endast ca 1 µm tjock.

Ett fullt utvecklat magnetitskikt erhålls först efter 1000-1500 timmars drift. Icke desto mindre är det avgörande för detta oxidskikts beskaffenhet att det bildas från en ren metallyta och vid rätt driftförhållanden vid igångkörningen. Läggs inte grunden till skyddsskiktet under rätt förhållanden kan detta inte repareras senare.

Se kapitel 4.2 oxidskikt och beläggningar.

13.4.9 Avfallskemikaliehantering

Sedan början av 1970-talet har miljöfrågorna spelat en allt större roll vid utförandet av rengöringsprocessen och vid val av rengöringskemikalier. Fram till 1960-talets slut försökte man uppnå största möjliga utspädning av avfallet. Från att man på 1970-talet enbart neutraliserade syralösningarna, fram till idag har avfallshanteringen efter en vanlig kraftverkspannrengöring utvecklats till ett separat projekt.

Det finns idag lagar och förordningar som reglerar hantering, transport och deponering av kemikalier och avfall. Således ställer en optimering av komplexet: rengöringsresultat, avfallskemikaliehantering, miljö, kostnader, anpassat till de lokala miljöförutsättningarna, stora krav på tekniken.

Om den kemiska rengöringen inte kan omfattas av verksamhetens normala "miljö-tillstånd/villkor" måste en speciell utredning beträffande avfallshanteringen göras. Denna utredning ska tillställas anläggningens tillsynsmyndighet, som remitterar den till andra berörda myndigheter och beviljar tillstånd.

Miljöutredningen beskriver rengöringsförfarande, avfallskemikaliehantering samt anger de riktvärden som skall uppnås på vattenfas och slamfas. Den anger också vart vatten och avfall skall ledas ut och/eller deponeras. Varje miljöutredning blir med nödvändighet unik, då förutsättningarna skiftar från plats till plats och då kraven på rengöringsresultat och avfallshantering kontinuerligt skärps.

13.5 Rekommendationer

Tubprover bör tas ut regelbundet med ett lämpligt intervall för uppföljning av beläggningstillväxt och kontroll av vattenkemin. Förslagsvis tas tubprover ut var tredje år efter en kemisk rengöring eller driftsättning av en ny panna. Beroende på resultatet kan intervallet behöva justeras. Genom att följa upp resultaten kan tidpunkten för nästa kemiska rengöring uppskattas.

Vid bedömning om behov av en kemisk rengöring föreligger görs en avvägning av beläggningstjocklek, föroreningar i beläggningen och hur länge sedan den senaste kemiska rengöringen gjordes.

14 Rening av rökgaskondensat

I detta kapitel diskuteras de tekniker och de typer av utrustningar som huvudsakligen används för att rena rökgaskondensat.

Många av dessa reningstekniker används även i vatten/ångsystem och kylvattensystem, avloppsvattenrening etc. och har beskrivits i tidigare kapitel i handboken. I dessa fall hänvisas till aktuellt kapitel.

Olika sätt att kondensera och rena rökgaskondensat och vid anläggningar med olika förutsättningar och bränslemixar tas också upp.

Värmeforsk har gett ut ett stort antal rapporter som behandlar rökgaskondensering och rening av rökgaskondensat. För fördjupning om rening av rökgaskondensat rekommenderas i första hand:

- Värmeforsk rapport nr 1089 *”Utvärdering av erfarenheter av membranteknik för rening av rökgaskondensat”*, februari 2009.
- Energiforsksprojekt M 37792 *”Tungmetalljonbytare för rening av rökgaskondensat”*, mars 2015.

För ytterligare fördjupning rekommenderas de Värmeforskrapporter som behandlar rökgaskondensering och rening av rökgaskondensat. I kapitel 14.4 Litteratur finns dessa uppräknade med titel och rapportnummer.

14.1 Bakgrund

Det finns ett stort intresse vid kraftvärme- och värmeverk att rena utgående rökgaskondensat från rökgaskondenseringsanläggningen. En reningsanläggning för rökgaskondensat kan i många fall vara något så ovanligt som en miljöåtgärd med kort payoff-tid.

Rening av rökgaskondensatet möjliggör:

- bättre NO_x -avskiljning genom att ammoniakdoseringen kan ökas då överskott av ammoniaken (ammoniumslippen) hamnar i kondensatet kan avskiljas i efterföljande reningsanläggning
- att bränslen innehållande tungmetaller kan eldas utan att utsläppsnivåer överskrids
- återvinning av renat kondensat (både vatten och energi) till spädvatten till vattenångcykeln
- ett alltmer slutet vattenkretslopp

Utsläppskraven varierar mellan olika anläggningar, och därmed också motiven för att installera rökgaskondensering och kondensatrening. Vid kraftvärmeanläggningar körs ibland rökgaskondenseringen kanske i första hand som skrubber, för att effektivt rena rökgaserna, då den värme som fås vid kondenseringen påverkar elproduktionen negativt. Vid anläggningar där man eldar rena biobränslen eller naturgas är det vanligast att eftersträva maximal värmeutvinning.

I framtiden kommer incitamenten för att rena rökgaskondensat att öka ytterligare. Till detta bidrar bl.a. implementeringen av EU:s vattendirektiv³¹, som i förlängningen kan leda både till strängare utsläppskrav och höjda vattenkostnader. Också anläggningarnas interna miljöarbete, ihop med den tekniska utvecklingen på området, leder till att vattenkretsloppen sluts mer och mer. Nya anläggningar byggs ofta med spädvattenproduktion baserad på återvunnet rökgaskondensat.

Rökgaskondensering med tillhörande rening av rökgaskondensatet har funnits i många år. Först vid avfallseldade anläggningar där huvudskälet var förbättrad rening av rökgaserna. Reningen utgjordes från början av flockning och fällning följt av sedimentering och sandfiltrering. Detta sätt att rena rökgaskondensat används fortfarande vid många anläggningar med mer förorenade bränslen, t.ex. avfallseldade anläggningar och samförbränningsanläggningar.

Sedan början av 2000-talet baseras kondensatrening i huvudsak på membranteknik vid biobränsleeldade anläggningar och samförbränningsanläggningar. Membrantekniken ersätter här traditionell fällnings-, sedimenterings- och filtreringsteknik. Membrantekniken har ofta valts inte bara för att klara anläggningarnas miljökrav på vattenutsläpp, utan också som ett sätt att återvinna vatten. Det finns även anläggningar där membranteknik används i kombination med traditionell flockning och fällning.

Det finns inte en standardlösning för hur man bäst renar ett rökgaskondensat. Faktorer som avgör val av reningsteknik och design av anläggningen avgörs bl.a. av kvaliteten på

³¹ Europaparlamentets och rådets direktiv 2000/60/EG

det orenade rökgaskondensatet, aktuella miljökrav och eventuella användningsområden för renat rökgaskondensat.

När det gäller rening av rökgaskondensat är det viktigt att komma ihåg att ju mer föroreningar som avskiljs redan i rökgaserna, desto mindre föroreningar övergår i kondensatet och belastningen på vattenreningen minskar. Detta ger i sin tur en bättre fungerande vattenrening.

Den kemiska sammansättningen på rökgaskondensatet påverkas bl.a. av:

- Bränslemix
- Panntyp och driftförhållande
- Rökgasrening
- Rökgasernas renhet (före kondenseringen)

Bränslena vid våra svenska anläggningar varierar mellan allt från rent biobränsle som t.ex. skogsflis till ”smutsigt” hushållsavfall. Däremellan finns anläggningar med bränslemixar bestående av mer eller mindre återvunnet material.

Givetvis kommer därmed även behovet av och möjligheten att rena rökgaskondensat från dessa anläggningar att variera en hel del. Det är inte rimligt att i denna handbok redogöra för att tänkbara kombinationer av reningssteg. Författaren har därför valt att visa hur rökgaskondensat från två anläggningar, en avfallseldad och en biobränsleeldad, kan renas. I praktiken kan sedan alla redovisade reningssteg kombineras i alla möjliga kombinationer utifrån lokala förutsättningar.

14.2 Avfallseldade anläggningar

Vid avfallseldade anläggningar fungerar rökgaskondenseringen i första hand som en våt rökgasrening. Värmeåtervinningen i kondenseringssteget får man på köpet, men huvudskälet till att kondensering installeras är att stoftheter inte är tillräckligt för att rena rökgaserna.

De första rökgaskondenseringsanläggningarna som installerades vid avfallseldade anläggningar hade bara ett kondenseringssteg. Det innebar att alla föroreningarna hamnade tillsammans i rökgaskondensat. Reningen bestod i huvudsak av flockning och fällning med ett efterföljande sandfilter.

Rökgaskondensat från avfallseldade anläggningar innehåller betydligt mer föroreningar och har en högre salthalt än från biobränsleeldade anläggningar vilket gör det mer komplicerat att använda membranteknik.

Moderna avfallseldade anläggningar har oftast kondensering (rening) i flera steg:

- **Quench-steget** (skrubbersteget) där framför allt partiklar, tungmetaller samt en del klorider och ammoniak avskiljs. Detta steg innehåller det mest förorenade kondensatet.
- **Sura steget** (kloridsteget) där resterande klorider och ammoniak avskiljs.

- **Neutrala steget** (sulfatsteget) där svaveloxider avskiljs.
- **Kondenseringssteget** är huvudsakligen till för värmeåtervinningen. Här sker den huvudsakliga kondenseringen av vattnet i rökgaserna

De olika stegen kan ha skilda vattenkretsar, även om detta inte alltid är så. I vissa fall kan stegen byggas ihop så att t.ex. quench-steget och det sura steget utgör ett första steg följt av ett gemensamt neutralt och kondenseringssteg.

14.2.1 Rökgaskondensering

14.2.1.1 Quenchsteg

Quench (störtkylare) är standard på avfallsförbränningsanläggningar, och i takt med att allt ”sämre” bränslen eldas vid samförbränningsanläggningar kommer med största sannolikhet quenchen bli allt vanligare.

Syftet med quenchen är att snabbt kyla ner rökgaserna för att förhindra att vattnet i rökgaskondensorn förångas (och därmed inte kan tvätta ur rökgaserna effektivt) och se till att syradaggpunkter passeras snabbt för att skona materialet i rökgaskondensorn.

Genom att spruta in vatten, med ett högt flöde medström, sänks temperaturen till ca 70 °C. Det sker ingen energiförlust i quenchen, enbart en energiomvandling. Den energi som åtgår för att förånga vatten återvinns i efterföljande steg.

Quenchen har en separat vattenkrets och oftast finns en separat vattenbehandling för utgående quench-vatten. Vattnet som används för att sprejas in i rökgaserna tas från botten av quenchen. Det innebär att föroreningarna anrikas i kretsen då större delen av alla fasta och vattenlösliga föroreningar, som stoft, kalcium, tungmetaller och klorider, avskiljs här.

Ett mindre vattenflöde tappas av från kretsen för att reglera salthalten och mängden föroreningar i vattnet. Quenchen ger alltså upphov till en liten vattenström som är rik på föroreningar.

14.2.1.2 Surt steg

Syftet med det sura steget är att avskilja väteklorid och ammoniak. Alla klorider avskiljs inte i quenchsteget. I nästa reningssteg sprayas rökgaserna med vatten för att avskilja resterande klorider. Det sura steget är placerat i skrubbertornet och oftast fyllt med fyllkroppar. Fyllkropparnas syfte är att skapa en stor kontaktyta mellan spolflödet och rökgasens volym.

Kloriderna ger ett lågt pH-värde på vattnet, pH ~1. Vid lågt pH-värde omvandlas ammoniak till ammonium, d.v.s. ett salt som lätt löser sig i vatten, vilket medför att även huvuddelen av ammoniakslippen avskiljs i detta steg.

Det är viktigt med en god kontakt mellan vätska och gas. Skulle spolflödet minska så försämras avskiljningen kraftigt vilket innebär att man överför föroreningarna till nästa steg.

En del av vattnet från kretsen måste tappas av kontinuerligt för att inte salthalten ska bli för hög. Avdraget leds oftast till quenchkretsen och renas i samma reningsanläggning som quenchvattnet. I vissa fall kan vattnet från det sura steget renas separat eller återföras till pannan som t.ex. bränslebefuktning.

I vissa anläggningar kan kloridsteget vara integrerat med quenchsteget.

14.2.1.3 Neutralt steg och kondenseringssteg

Syftet med det neutrala steget är att rena rökgasen från svaveldioxid, SO_2 .

Det neutrala steget är placerat i skrubbertornet och oftast fyllt med fyllkroppar. Fyllkropparnas syfte är att skapa en stor kontaktyta mellan spolflödet och rökgasens volym.

Reningen av svaveldioxid bygger på en absorption mellan spolflödet, som bör ha ett relativt högt pH-värde, $\text{pH} > 6$, och svaveldioxiden i gasen. När den överförs till vätskan så omvandlas den till sulfit, SO_3^{2-} , som sedan oxideras till sulfat, SO_4^{2-} . Oxideringen sker av sig självt när det finns syre i närvarande.

I många anläggningar installeras ett gemensamt reningssteg för svaveldioxidrening och energiåtervinning medan man vid andra anläggningar delar upp neutrala steget och kondenseringssteget i två separata steg.

14.2.1.4 Kondenseringssteg

Syftet med det kondenseringssteget är att återvinna energin från rökgasen.

Som nämnts ovan installeras vid många anläggningar ett gemensamt reningssteg för svaveldioxidrening och energiåtervinning medan andra anläggningar delas sulfat- och kondenseringssteget upp på två separata steg.

Då huvuddelen av vatteninnehållet i rökgaserna kondenseras ut i kondenseringssteget erhålls ett högt vattenflöde ut från detta steg.

14.2.2 Rökgaskondensatrening

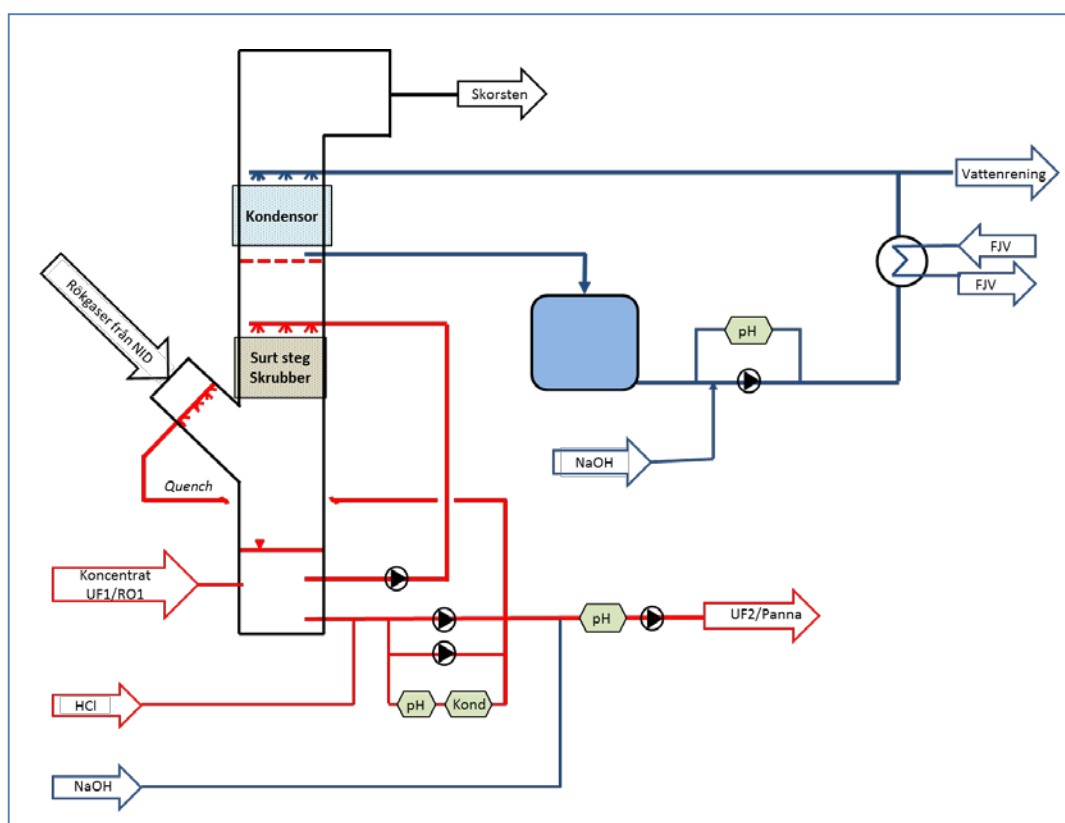
Val av reningsteknik måste avgöras från fall till fall då de lokala förutsättningarna varierar mellan olika anläggningar. Valet av reningsteknik för de olika utgående vattenströmmarna avgörs bl.a. av:

- kemisk sammansättning
- eventuella användningsområden för det reade vattnet
- miljökrav
- ekonomi

Bäst resultat erhålls om de olika vattenströmmarna renas var för sig.

Figur 222 visar ett exempel på en avfallseldad anläggning med två utgående vattenströmmar från rökgaskondenseringen:

- Ett utgående flöde av vatten med en hög halt föroreningar från de integrerade quench- och sura stegen.
- Ett utgående flöde av vatten med en betydligt mindre mängd föroreningar från de integrerade neutrala- och kondenseringsstegen.



Figur 222. Rökgaskondensering vid en avfallseldad anläggning

Figure 222. Flow gas condensation at a waste fueled plant

14.2.2.1 Rening av quenchvattenflödet

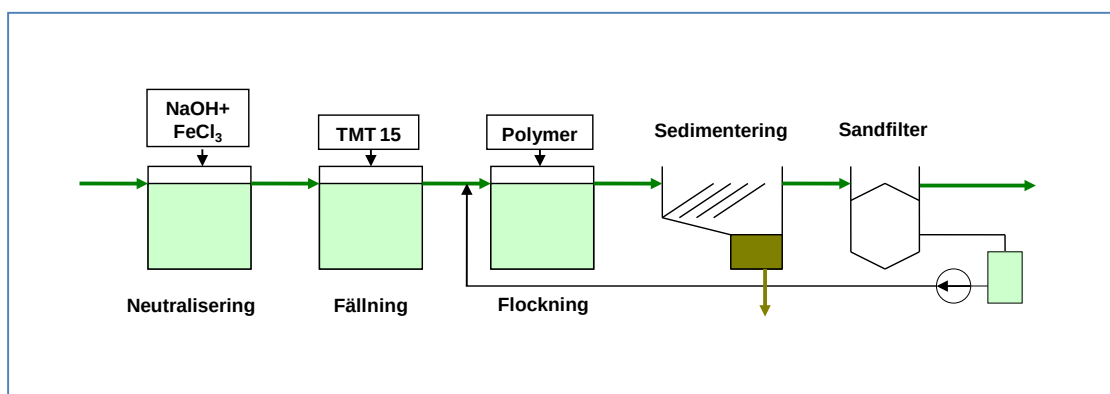
Som nämnts ovan avgörs val av reningsteknik av om vattnet kan återvinnas eller om det ska släppa ut till avlopp.

Användningsområden för återvunnet quench-vatten kan vara:

- asksläckning
- bränslebefuktning
- dysas in i pannan
- industrivatten med lågt kvalitetskrav

14.2.2.1.1 Suspenderat material

På grund av den höga halten suspenderat material och tungmetaller är oftast fällning och flockning bästa alternativet för att rena rökgaskondensatet med avseende på fasta partiklarna. En anläggning för fällning/flockning kan bestå av ett eller flera steg beroende på sammansättningen på vattnet som ska renas. Ett exempel på en anläggning för fällning/flockning med fem steg visas i Figur 223.

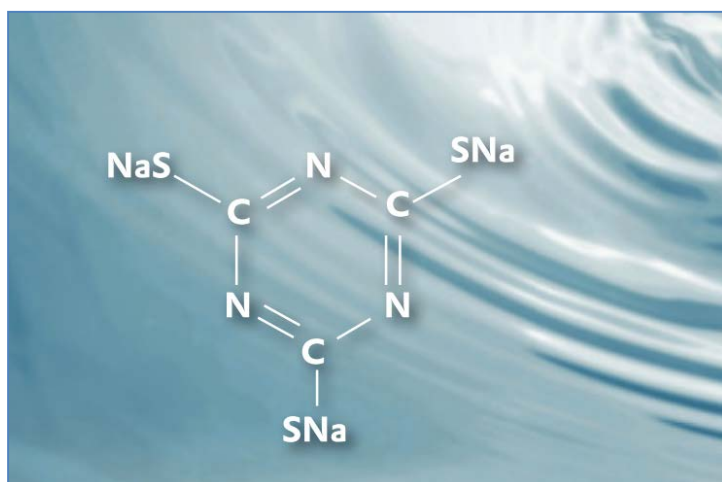


Figur 223. Exempel på en anläggning för fällning/flockning

Figure 223. Example of a flocculation plant

Rökgaskondensatet från quench-steget har ett mycket lågt pH-värde och måste pH-justeras för att det ska gå att fälla ut föroreningarna på ett tillfredsställande sätt. Samtidigt tillsätts järnklorid som fungerar som fällningskemikalie. Se kapitel 6.2 om fällning och flockning.

I nästa steg tillsätts TMT för att förbättra avskiljningen av tungmetaller. TMT (Trimercapto-s-triazine trinatriumsalt, C₃N₃S₃Na₃) är en sulfidförening som binder till tvåvärda tungmetalljoner. De lösta tungmetallerna binder till sulfidgrupperna och bildar en svårslöslig förening som sedan kan avskiljas.



Figur 224. *Strukturformel för TMT*

Figure 224. *Structural formula for TMT*

I det tredje steget tillsätts en polymer för att bilda större flockar som är lättare att skilja av i sedimenteringstanken.

Sedimenteringstanken är utrustad med lameller för att öka ytan i tanken vilket ger en snabbare sedimentering. Det är viktigt med ett jämt flöde genom sedimenteringstanken för att erhålla ett bra resultat. Flödesvariationer medför att sedimenterade flockar virvlar upp, följer med vattnet och belastar nästa reningssteg.

Sista steget utgörs av ett sandfilter. Det kan vara ett trycksatt filter som backspolas regelbundet eller ett kontinuerligt arbetande filter. Spolvattnet (tvättvattnet) från sandfiltret återförs till flockningstanken.

14.2.2.1.2 Keramiska UF-membran

Ett alternativ till flockning och fällning kan vara en ultrafilteranläggning utrustad med keramiskamembran. Fördelen med ett keramiskt membran är att det tål höga vattentemperaturer och kan tvättas med aggressiva tvättkemikalier.

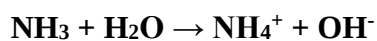
14.2.2.1.3 Salter

Någon rening av salter förutom ammonium och tungmetaller förekommer inte. Salthalterna i detta vatten är höga för att det ska vara lönsamt att återvinna.

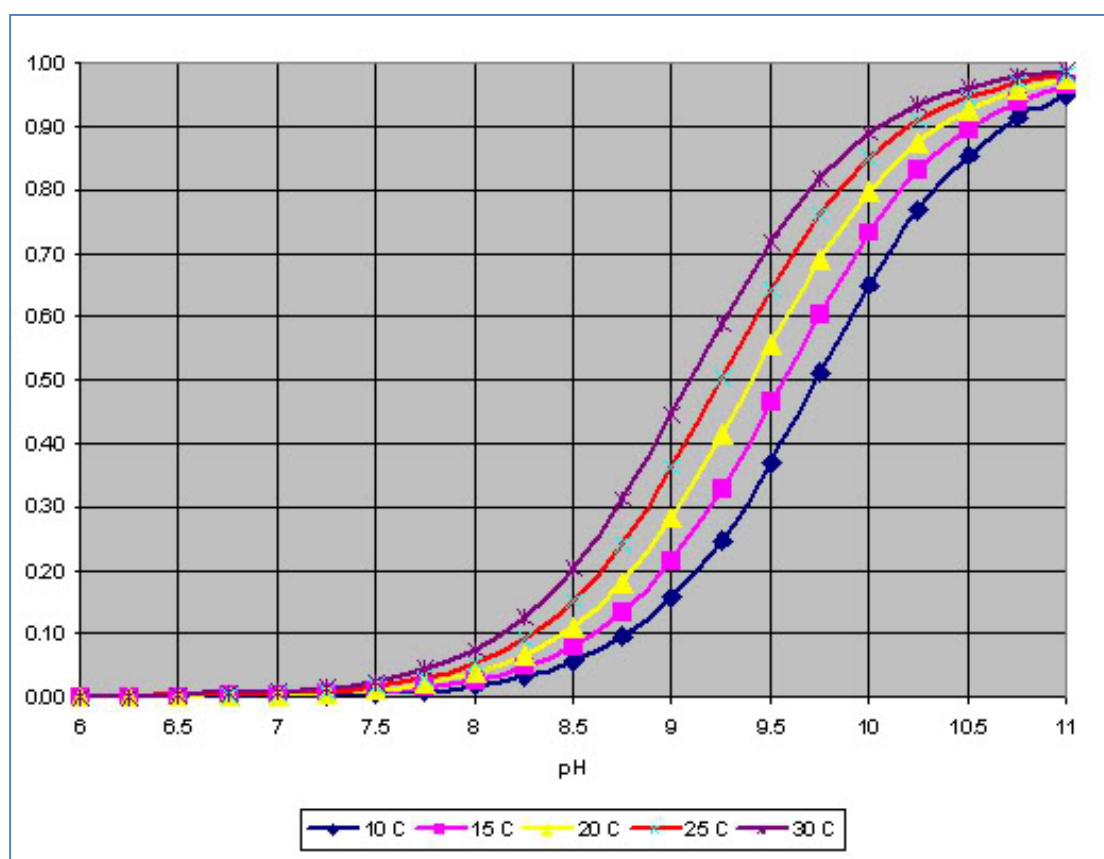
För avskiljning av ammonium och tungmetaller se kapitel 14.2.2.1.4 resp. 14.2.2.1.8.

14.2.2.1.4 Ammoniumavskiljning

Ammoniak löser sig i vatten varpå det bildas ammoniumjoner och hydroxidjoner.



Lösligheten är beroende av pH-värdet. Ju lägre pH-värde desto mer ammoniak kan lösas i vattnet i form av ammoniumjoner. När pH-värdet höjs omvandlas ammoniumjonerna åter till gasformig ammoniak som kan avskiljas ur vattnet med flera olika tekniker.



Figur 225. Andelen fri ammoniak i vatten vid olika pH-värden och olika temperaturer

Figure 225. Fraction of un-ionised ammonia at different pH values and different temperatures

I Figur 225 framgår att även temperaturen påverkar ammoniakens löslighet i vatten. Ju högre vattentemperaturen är desto större andel fri ammoniak återfinns i vattnet.

14.2.2.1.5 Stripper

Ammonium kan, efter pH-justering med lut till $\text{pH} > 11$, drivas av med luft i en stripper (avgasare). Ammoniakavdrivningen följer välkända fysikaliska lagar och är en väl beprövad teknik.

Avdrivaren består av en kolonn som är fylld med fyllkroppar av plast för att få en så stor kontaktyta som möjligt. I toppen på avdrivaren sprayas rejektet in efter temperatur- och pH-justering och får strila ner över fyllnadsmaterialet. Luft blåstes in i botten av avdrivaren varpå ammoniaken följer med luften ut och ammoniumhalten i rejektet reduceras. Luften som innehåller den avdrivna ammoniaken återförs till pannan som förbränningsluft varpå ammoniaken destrueras. Se även kapitel 7.1.6.

När uteluft eller luft från lokalen används för avdrivning av ammoniaken erhålls en kraftig temperatursänkning på rökgaskondensatet. Denna luft är relativt torr och i strippern erhålls en uppfuktning av luften genom att kondensat förångas. Den energi som åtgår för förångningen kommer från kondensatet och en temperatursänkning på kondensatet erhålls. Temperatursänkningen medför i sin tur försämrade ammoniakavdrivning. Det kan vara svårt att kompensera denna temperatursänkning genom att höja temperaturen på kondensatet före strippern.

Vid några anläggningar används uppfuktad förbränningsluft för att driva av ammoniaken. Fukten i luften medför att avdunstning och temperatursänkning av kondensatet minskar. En annan lösning kan vara att uppfukta luften genom att spruta in ånga i luften före strippern. Det kan dock vara en kostsam lösning om det inte finns spillånga att tillgå.

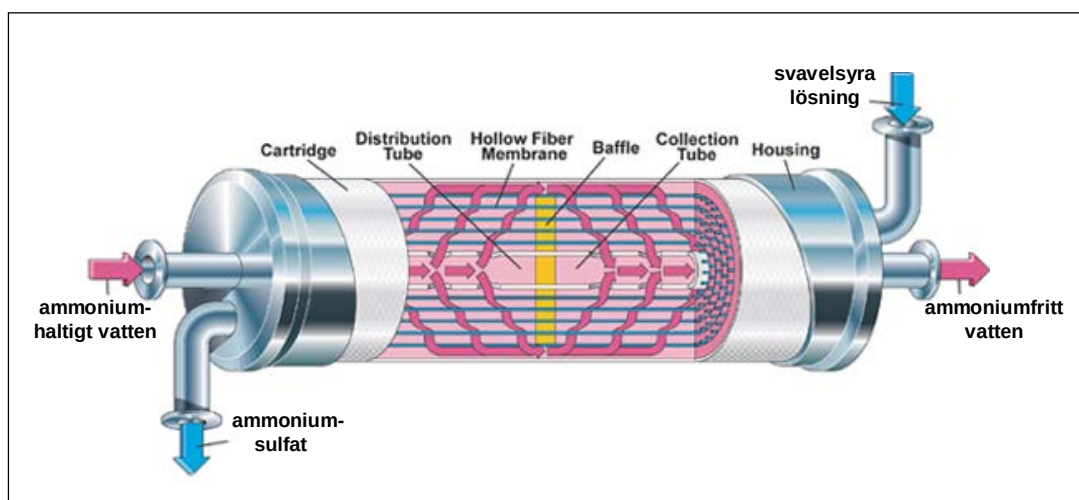
14.2.2.1.6 Luftuppfuktare

En luftuppfuktare har som funktion att överföra energin från rökgasen efter rökgaskondensorn till förbränningsluften. Detta sker genom att kondensera vatten från rökgasen och öka fukthalten i förbränningsluften. Vattenången i luften passerar förbränningsanläggningen som ett bulkflöde utan att reagera. Temperaturen på vattenången kommer dock att stiga varför den kan utnyttjas som nyttig värme i rökgaskondensorn. Förenklat kan processen jämföras med en värmepump där lågvärdig energi från rökgasen uppgraderas med en mindre del högvärdig för att kunna utvinnas.

I anläggningar med luftuppfuktare kan rotern utnyttjas för att driva av ammoniak ur vattnet. Genom att höja pH-värdet på kondensatet som sprayas över rotern omvandlas ammonium till ammoniak som kan följa med förbränningsluften och därmed destrueras i pannan. Den tillförda ammoniaken kan ge en positiv effekt på NO_x -reduktionen beroende på var luften tillförs pannan men det ska dock främst ses som en destruktion av ammoniaken.

14.2.2.1.7 Kontaktmembran

Kontaktmembranen som används för att avskilja ammoniak är precis samma membran som används för koldioxidavskiljning, se även kapitel 7.1.7 membranavgasare. Vid avskiljning av ammoniak används dock svavelsyra på sekundärsidan, i stället för luft, för att transportera bort den avskiljda gasen. Figur 226 visar ett kontaktmembran för ammoniumavskiljning.



Källa: www.membrana.com

Figur 226. Kontaktmembran för ammoniumavskiljning

Figure 226. Contact membrane for ammonia removal

Vid avskiljning av ammonium ur vatten måste pH-värdet först höjas till $\text{pH} > 11$ för att omvandla ammoniet till ammoniak. Ammoniak är en gas som kan diffundera genom membranet. Inuti membranet finns en svavelsyralösning. När ammoniaken diffunderar genom membranet och kommer i kontakt med svavelsyralösningen reagerar den och bildar ammoniumsulfat. Drivkraften i processen är koncentrationsskillnaden i ammoniak mellan primär- och sekundärsida. I och med att all ammoniak som passerar genom membranet omvandlas till ammoniumsulfat blir ammoniakhalten i princip noll på sekundärsidan.

Svavelsyralösningen cirkuleras genom membranet via en cirkulationstank. Ny svavelsyra tillsätts med en doserpump för att kompensera för bildad ammoniumsulfat. Den bildade ammoniumsulfatlösningen pumpas satsvis till en lagringstank för återföring till pannan eller destruktion.

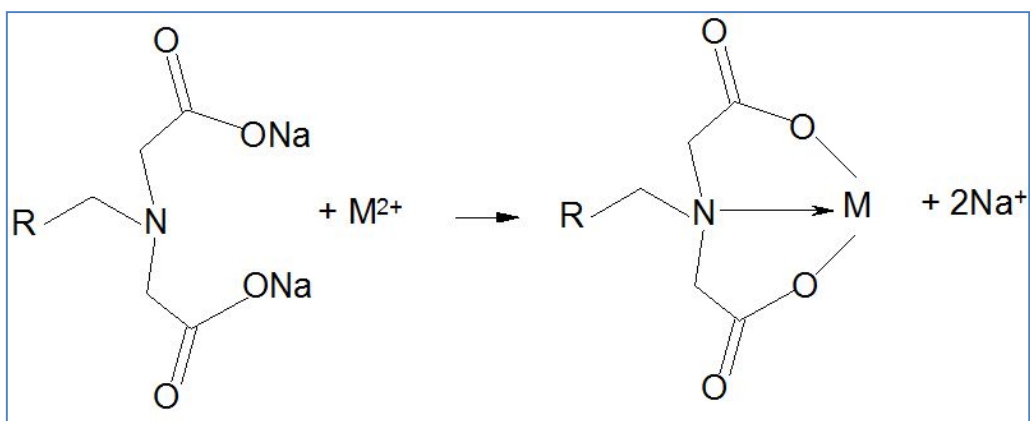
Användning av ammoniakgasmembran ställer stora krav på filtrering och förbehandling av vattnet för att halten suspenderat material inte ska bli för hög och orsaka igensättningar av membranet. I samband med att pH-värdet höjs, för att omvandla ammonium till ammoniak, fälls även en stor andel av de metalljoner som finns i vattnet ut som metallhydroxider. Det medför en stor potentiell risk för beläggningar och igensättning av membranet.

14.2.2.1.8 Tungmetallrening

Tungmetaller i rejektet kan avskiljas i ett jonbytesfilter (kallas ibland tungmetallfilter). Filtret är fyllt med en katjonmassa som är speciellt framtagen för att binda till sig tungmetaller. Det finns flera olika jonbytesmassor med hög affinitet för olika tungmetaller. Genom att analysera vattnet som ska renas kan en lämplig jonbytesmassa väljas ut.

Affiniteten är ett mått på hur hårt metalljonen binds till jonbytesmassan. Affiniteten påverkas av såväl halten av den aktuella jonen som den totala salthalten och saltsammansättning i vattnet. Vidare kan pH-värdet spela en avgörande roll.

För avskiljning av tvåvärda tungmetaller används en svagt sur katjonbytare med funktionella grupper av iminodiacetat (IDA). IDA-molekylen motsvarar en halv EDTA-molekyl och kan precis som EDTA bilda kelatkomplex med metalljoner. Tvåvärda tungmetalljoner binds hårdare till IDA-jonbytaren än tvåvärda alkaliska jordartsmetalljoner som t.ex. kalcium. Envärd alkalimetalljoner som t.ex. natrium binds ännu svagare. IDA-jonbytare är därför selektiva för 2^+ -tungmetaller.



Figur 227. Tungmetallavskiljning med IDA jonbytare

Figure 227. Heavy metal removal with IDA ion exchange resin

IDA-jonbytaren kan regenereras med syra men det innebär en otrevlig hantering av regenereringskemikalier och en större mängd vätska innehållande tungmetaller som måste tas omhand. Jonbytaren i denna applikation brukar därför inte regenereras utan när massan är förbrukad byts den ut och kasseras.

I anläggningar där man har krav på låga kvicksilverhalter kompletteras ofta IDA-jonbytaren med en katjonbytare med funktionella grupper som kan bilda kelat med specifika tungmetaller. Dessa använd främst för avskiljning av kvicksilver. Den är dock inte helt selektiv utan binder även andra tungmetaller.

Dessa jonbytare är till skillnad från IDA-jonbytaren inte regenererbara.

14.2.2.2 Rening av vatten från det sura steget

Vatten från det sura steget används ofta för att späda ut vattnet i quench-steget vilket i princip innebär att det kommer renas tillsammans med quench-vattnet. Quench-steget behöver ändå fyllas på med nytt vatten för att undvika att salthalten blir för hög i kretsen. I andra anläggningar kan vatten från quench-steget användas för att späda ut vattnet i det sura steget.

Andra alternativ kan vara att återvinna vattnet som bränslebefuktning eller att destruera vattnet genom att spruta in det i eldstaden.

Det finns ingen anledning att rena vattnet från det sura steget separat. Det medför bara extra utrustning till en hög kostnad.

14.2.2.3 Rening av vatten från det neutrala steget

Vattnet från det neutrala steget renas med fördel tillsammans med vattnet från kondensatsteget.

Det finns ingen anledning att rena vattnet från det neutrala steget separat. Det medför bara extra utrustning till en hög kostnad.

14.2.2.4 Rening av kondensatflödet

Det utgående vattnet från kondensatkretsen innehåller en betydlig mindre mängd föroreningar än vattnet från quench-kretsen.

Som nämnts ovan avgörs valet av reningsteknik av om vattnet kan återvinnas eller om det ska släppa ut till avlopp.

Användningsområden för återvunnet rökgaskondensat kan vara:

- asksläckning
- bränslebefuktning
- spolvatten eller industrivatten
- ersätta råvatten till spädvattenreningsanläggningen
- industrivatten
- brandvatten

Det finns i dagsläget några avfallseldade anläggningar där rening med membranteknik installerats i denna applikation. Det är i dessa fall en liknande anläggning som används för att rena rökgaskondensat från en bioeldad anläggning. Se kapitel 14.3. Som tidigare nämnt avgörs valet av reningsteknik utifrån kvaliteten på det inkommande rökgaskondensatet.

Ska vattnet inte återvinnas kan det i många fall räcka med pH-justering och sandfiltrering. Beroende på miljökrav och vattnets kemiska sammansättning kan det eventuellt finnas behov att komplettera med ett tungmetallfilter.

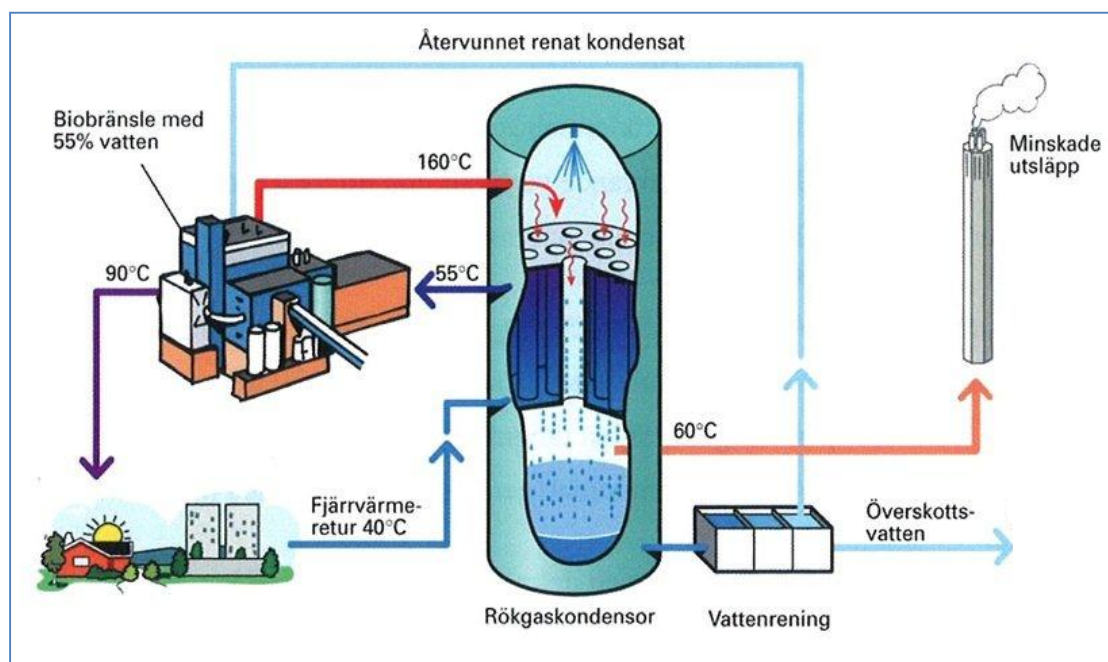
14.3 Biobränsleeldade anläggningar

Vid biobränsleeldade anläggningar fungerar rökgaskondenseringen i första hand som en energiåtervinning även om avskiljning av ammoniak och tungmetaller är en viktig del.

En bidragande anledning till det ökande intresset för rökgaskondensering vid biobränsleeldade anläggningar är möjligheten att erhålla en bättre NO_x -avskiljning. Ammoniakdoseringen till rökgaserna kan ökas då överskott av ammoniaken (ammoniumslippen) hamnar i kondensatet och avskiljs i reningsanläggningen.

14.3.1 Rökgaskondensering

I en biobränsleeldad anläggning sker kondenseringen som regel endast i ett steg. Samtidigt som vatteninnehållet i rökgaserna kondenseras avskiljs även partiklar, salter, tungmetaller och ammoniak ur rökgasen. Det ger att det blir endast en utgående vattenström som innehåller alla föroreningarna. Se Figur 228.



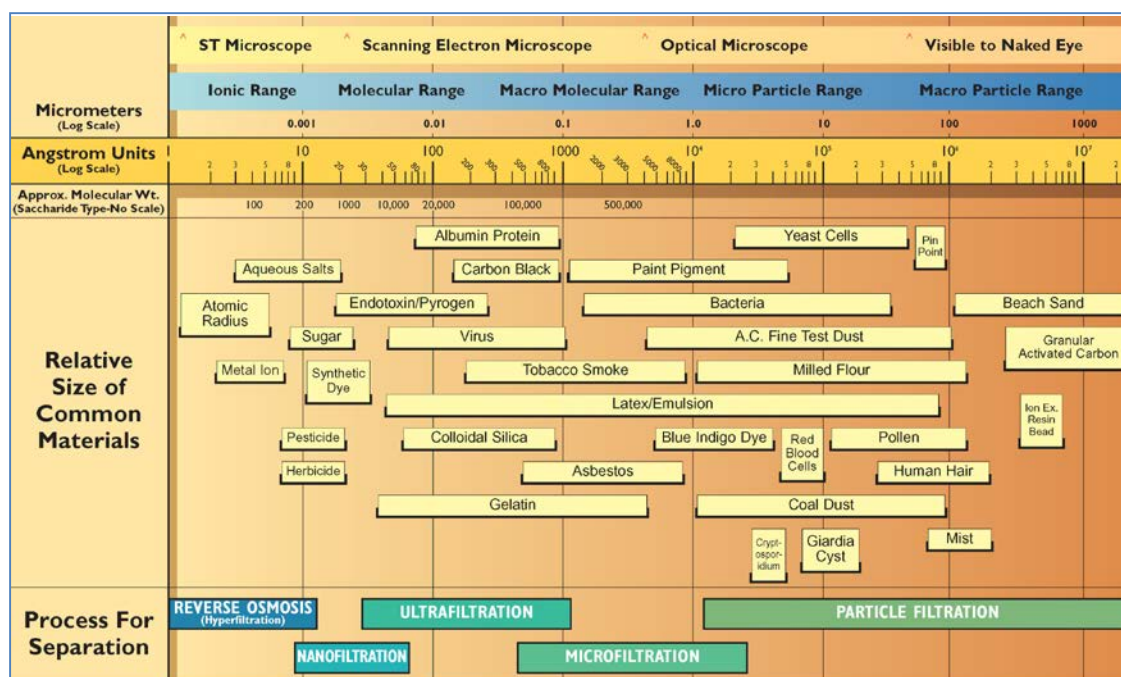
Figur 228. *Rökgaskondensering vid en biobränsleeldad anläggning*

Figure 228. *Flow gas condensation at a bio fueled plant*

14.3.2 Rening av rökaskondensat

Vid biobränsleeldade anläggningar används vanligtvis membranteknik för att rena rökaskondensatet. Rökaskondensatet från den här typen av anläggningar är relativt rent och tekniken har visat sig fungera bra.

Omvänd osmos eller RO-teknik är en teknik som kan användas vid rening av rökaskondensat och som möjliggör återvinning av vatten. Ultrafiltrering och mikrofiltrering är andra typer av membranteknik som används i anläggningar för rening av rökaskondensat. Figur 229 visar avskiljningsgraden för de olika teknikerna. Se kapitel 6.4 om membranteknik.



Källa: www.aquabio.co.uk

Figur 229. Avskiljningsgrad för olika membrantekniker

Figure 229. Membrane filtration spectrum

14.3.2.1 Förbehandling

RO-aggregatet är känsligt för igensättning orsakade av suspenderat material (partiklar) och saltutfällningar. För att skydda RO-membranen måste alla partiklar avlägsnas och framför allt får inte kalciumhalten vara för hög. Detta åtgärdas i förbehandlingen. Hur förbehandlingen ska se ut bestäms av kondensatets sammansättning.

Vid de första anläggningarna som byggdes utgjordes förbehandlingen av sandfilter följt av kolfilter. På senare tid har förbehandling med sandfilter ersatts av skaksil och ultrafilter vid ett flertal anläggningar.

I anläggningar med hårt vatten kan förbehandlingen även omfatta avhärdningsfilter.

14.3.2.1.1 Sandfilter

Sandfiltret avlägsnar en stor del av de suspenderade partiklarna och är oftast tillräckligt för att klara utsläppskraven för suspenderat material.

Sandfilter kan antingen vara designade för kontinuerlig filtrering där avskiljda partiklar fortlöpande avlägsnas ur filtret eller för intermittent drift där avskiljda partiklar avlägsnas genom backspolning av filtret.

Vattenkvaliteten efter sandfiltret ligger normalt på mindre än 10 mg/l suspenderat material, ofta betydligt lägre.

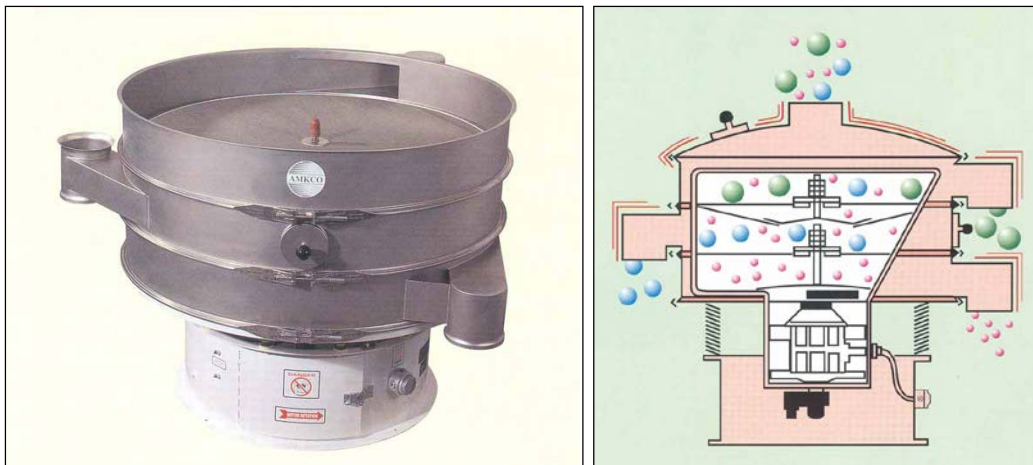
14.3.2.1.2 Kolfilter

I samband med driftstörningar i förbränningsprocessen eller rökgasreningen kan belastningen på sandfiltret bli för hög och halten suspenderat material i det filtrerade vattnet tillfälligt bli betydligt högre än normalt.

Innan UF-tekniken fick sitt genombrott installerades ofta ett kolfilter efter sandfiltret för att säkerställa att halten suspenderat material inte blev för hög till efterföljande RO-aggregat med ett bra resultat.

14.3.2.1.3 Skaksil

En skaksil, är ett filter som används på flera anläggningar för grovfiltrering före ultrafiltrering. Figur 230 visar en genomskärning av en skaksil.



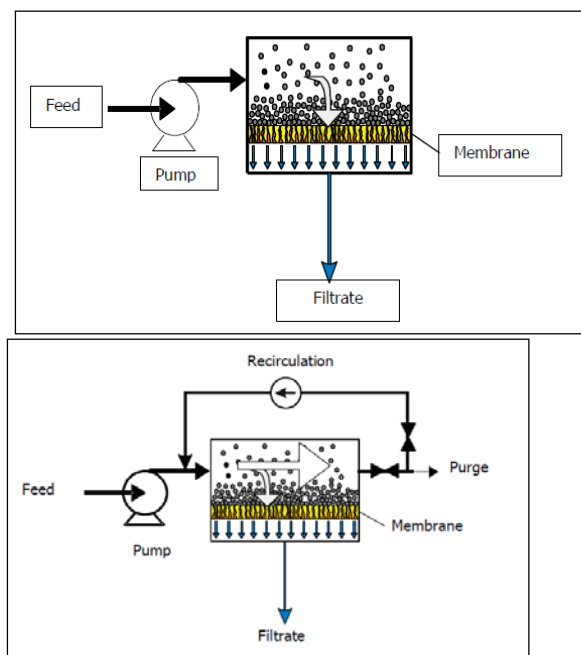
Källa: www.amkco.com

Figur 230. Bild och genomskärning av en skaksil

Figure 230. Photo and cross-section diagram of a Vibra Screen filter

14.3.2.1.4 Ultrafilter

På senare tid har ultrafilter, eller UF, ersatt kolfilter och ibland även sandfilter. UF bygger på membrantechnik och har en avskiljningsgrad på ca 1 000 Dalton. Ett UF-aggregat består av ett eller flera hålfibermembran, även kallat "spagettimembran", där vattnet vanligtvis filtreras från insidan och ut. Hålfibern har en innerdiameter på 0,8-mm. Ultrafilter med hålfibermembran kan konfigureras enligt två olika principer, antingen med s.k. deadend-filtrering eller crossflow-filtrering.



Källa: www.inge.ag

Figur 231. *Deadend-filtrering respektive crossflow-filtrering*

Figure 231. *Dead-end filtration v.s. cross flow filtration*

Vid deadend-filtrering passerar allt vatten som matas in i hålfibern genom membranet och ut på filtratsidan. Alla fasta föroreningar ackumuleras på membranytan och avlägsnas genom backspolning.

Deadend-filtrering anses av många vara bästa valet för vattenrening då halten fasta partiklar i vattnet anses som låg jämfört med andra typer av industriella applikationer. Det ger en enkel installation och låg driftkostnad.

I ett UF-membran i crossflow-utförande cirkuleras kondensatet i en loop över hålfibermembranen med hög hastighet så ett turbulent flöde erhålls inuti hålfibern. Det hjälper till att hålla membranytan fri från beläggningar.

Det renade kondensatet ersätts kontinuerligt med nytt kondensat i loopen. Med jämna mellanrum backspolas hålfibermembranen och loopen töms på smutsvatten. Spolintervall och spoltider kan lätt justeras på kontrollpanelen.

En fördel med ultrafilter i crossflow-utförande är att membranet klarar en betydligt högre belastning av partiklar i vattnet. Risken för igensättningen blir lägre.

Nackdelarna är större membran och en mer komplicerad anläggning då det tillkommer en cirkulationspump. Driftkostnaden för cirkulationspumpen blir relativt hög p.g.a. det höga differenstrycket över membranet.

Det finns även membranleverantörer som förordar att vattnet ska passera hålfibern utifrån och in ("outside-in"), d.v.s. att det rena vattnet tas ut genom hålet i hålfibern. Denna typ av membran brukar först backspolas med luft så att föroreningarna släpper från membranytan, därefter spolas föroreningarna bort med backspolvatten. Membran som arbetar "outside-in" har dock inte testats i applikationer för rökgaskondensat ännu.

Vid ultrafiltrering av mycket förorenade vatten eller där temperaturerna är höga kan keramiska UF-membran användas.

Tungmetaller i rökgaskondensatet som är partikelbundna kan till stor del avskiljas i en UF-anläggning. Lösta tungmetaller passerar genom UF-anläggningen och uppkoncentreras med övriga salter i RO-aggregatet för vidare avskiljning.

14.3.2.1.5 Avhärtningsfilter

Beroende på kalciumhalt i kondensatet kan förbehandlingen kompletteras med ett avhärtningsfilter. Vid låga kalciumhalter kan avhärtningsfiltret ersättas med en dosering av dispergeringsmedel eller syra.

I anläggningar där hårdheten i kondensatet eller annan vattenström anses hög bör avhärtningsfilter installeras för att effektivt ta bort kalcium- och magnesiumsalter. Dessa salter kan annars ge utfällningar i RO-membranen och/eller EDI-aggregatet. EDI är en förkortning av Electro DeIonisation.

Avhärtningsfilter är som regel standard i de anläggningar där stadsvatten blandas in för kylning av kondensatet eller där stadsvatten tas in vid låga kondensatflöden.

Man bör vara medveten om att avhärtningsfiltret inte bara tar upp kalcium- och magnesiumjoner utan även andra katjoner såsom t.ex. ammoniumjoner och tungmetaller i jonform. Alla joner som tagits upp i jonbytaren frigörs vid regenerering. Det innebär att spolvattnet kan innehålla höga halter ammonium och tungmetaller förutom kalcium och magnesium. Saltet som används vid regenereringen medför även en hög kloridhalt i spolvattnet.

För att minimera tiden då vatten står stilla i avhärtdarna kan dessa seriekopplas. Under normal drift förbrukas i princip endast den första avhärtdaren medan den andra agerar som polisfilter och tar bort eventuell resthårdhet.

Regenerering utförs som regel helt automatiskt och initieras i den första avhärtdaren med hjälp av en vattenmätare medan den andra avhärtdaren regenereras med inställda intervall. I anläggningar med två avhärtningsfilter kopplas dessa så att regenerering av båda filtren ej kan starta samtidigt, för att vattenreningsprocessen inte ska avbrytas.

14.3.2.1.6 Partikelfilter

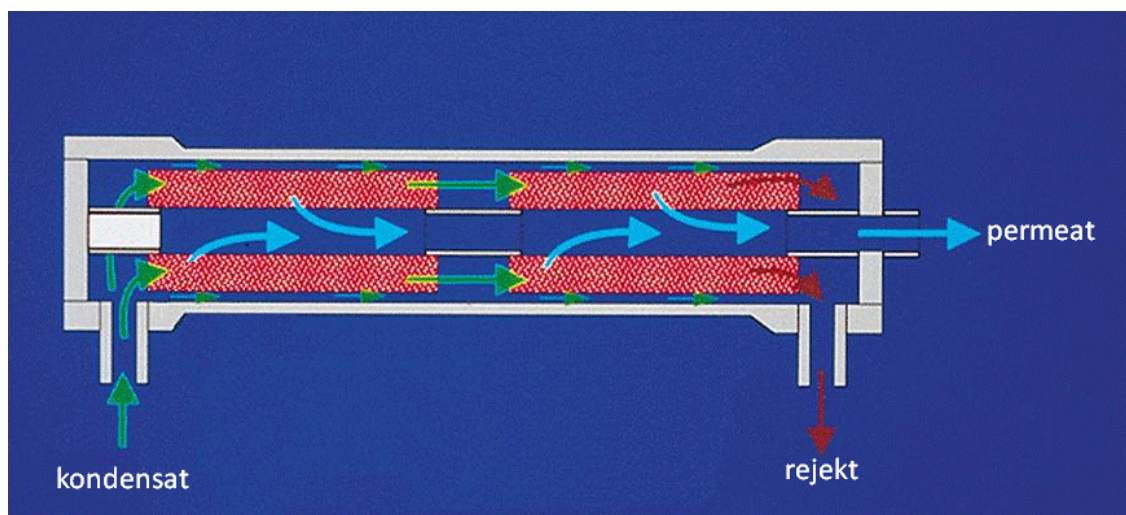
Precis före RO-aggregatet placeras som standard ett partikelfilter vars uppgift är att skydda RO-membranen från igensättning och blockering av större partiklar genom mekanisk filtrering av vattnet. Filtret kan ha olika benämningar i olika anläggningar, t.ex. förfilter, patronfilter, stavfilter, påsfilter, mek-filter etc.

Filtret kan utgöras av ett påsfilter eller ett stavfilter. I stavfiltret sitter stavar av polypropylen eller stavar fyllda med aktivt kol. Vanligtvis används en filtreringsgrad på 5 eller 10 μm . Filterstavar respektive filterpåsar byts när differenstrycket överskrider leverantörens riktlinjer.

14.3.2.2 RO-aggregat

I RO-aggregatet delas kondensatet upp i två vattenströmmar, det rena permeatet som eventuellt kan återvinnas och det "smutsiga" koncentratet, även kallat rejekt, som innehåller salter, tungmetaller, ammonium mm.

I RO-aggregatet uppkoncentreras salterna genom att rökgaskondensatet pressas genom ett membran under högt tryck. Membranet har den egenskapen att det släpper igenom vatten och gaser men håller tillbaka salter. Ett mindre saltläckage, 2-5 %, sker dock. Detta ger en saltavskiljning på 95-98 %. Se kapitel 6.4.1.



Figur 232. RO-membran

Figure 232. RO membrane

Ut från RO-aggregatet erhålls alltså två vattenströmmar, permeat och rejekt. Se Figur 232.

Permeatet är det reade vattnet som passerat genom membranet, ca 70-85 % av inkommande vattenmängd. Detta vatten kan återvinnas som processvatten eller efter ytterligare rening användas som spädmatning till fjärrvärmevatten eller pannor.

I rejektet, resterande 15-30 % av inkommande vattenmängd, återfinns de salter som fanns i kondensatet samt det vatten som behövs för att transportera bort salterna. Saltsammansättningen är densamma som i rökgaskondensatet och halterna är proportionella mot uppkoncentreringsfaktorn, d.v.s. 3-7 gånger så höga som i kondensatet.

14.3.2.3 Behandling av renvatten, permeat

Den renare vattenströmmen efter RO-aggregatet, permeatet, kan ofta återvinnas. Det finns flera användningsområden för permeatet. Det kan användas till att ersätta stadsvatten till avsaltningsanläggningen för spädvattenframställning eller i vissa fall renas direkt till spädvatten. Andra användningsområden är vatten för golvspolning eller vattensotning.

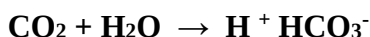
Permeatet håller så hög vattenkvalitet att det kan släppas till recipient eller kommunalt avlopp utan vidare rening i de fall det inte kan återvinnas.

Permeat som ska återvinnas kan, beroende på användningsområde, behöva renas ytterligare. Behandling av RO-permeat omfattar avskiljning av återstående salter med EDI-teknik eller i ett blandbäddsfiltre med jonbytesteknik samt avskiljning av koldioxid i en stripper eller med membranteknik.

14.3.2.3.1 Koldioxidavskiljning

Ofta utgörs föroreningarna i permeatet huvudsakligen av koldioxid. Koldioxid är en gas och avskiljs inte i RO-aggregatet utan passerar rakt genom RO-membranen. Bikarbonaterna avskiljs däremot på samma sätt som övriga joner.

Koldioxid löser sig i vatten varpå det bildas vätejoner och bikarbonatjoner.



Lösligheten är pH-beroende. Ju högre pH-värde desto mer koldioxid kan lösas i vattnet i form av bikarbonatjoner. När pH-värdet sänks omvandlas bikarbonatjonerna åter till gasformig koldioxid. Vid pH 4,3 föreligger alla bikarbonater som koldioxid. Vid pH 8,3 finns ingen koldioxid i vattnet. Figur 19 illustrerar förhållandet mellan koldioxid, vätekarbonat och karbonat och vid olika pH-värden.

Koldioxiden kan avskiljas med en CO₂-stripper eller i ett kontaktmembran. Tekniken följer välkända fysikaliska lagar och är väl beprövad.

Koldioxiden har också en buffrande effekt. När pH-värdet höjts med t.ex. lut (NaOH) reagerar koldioxid och bikarbonat i vattnet med hydroxidjonerna och det bildas karbonater. Det innebär att det går åt mer lut än vad som motsvaras av själva pH-höjningen.

14.3.2.3.1.1 Kontaktmembran

Vid avgasning av vatten med membrantechnik används kontaktmembran. Kontaktmembran kan användas för att avskilja flera olika gaser ur vatten. Vanligtvis används hålfibermembran, som påminner lite om tubvärmväxlare, där vattnet som innehåller gasen passerar på membranens utsida.

Vid avskiljning av koldioxid ur vatten måste pH-värdet sänkas för att omvandla bikarbonaterna till koldioxid. Bäst resultat erhålls vid $\text{pH} < 4,3$ då all bikarbonat föreligger som koldioxid. Koldioxid är en gas som kan diffundera genom membranet. Inuti membranen (sekundärsidan) strömmar luft. Koldioxiden diffunderar genom membranet och kommer att föras bort med luften. Drivkraften i processen är koncentrationsskillnaden i koldioxid mellan primär- och sekundärsida. I och med att all koldioxid som passerar genom membranet förs bort med luftströmmen blir koldioxidhalten i princip noll på sekundärsidan.

14.3.2.3.1.2 Stripper

Koldioxidavdrivning i en stripper är en väl beprövad teknik. Strippern består av en kolonn som är fylld med fyllkroppar av plast för att få en så stor kontaktyta som möjligt. I toppen på avdrivaren sprayas vattnet in och får strila ner över fyllnadsmaterialet. Luft blåses in i botten av avdrivaren varpå koldioxiden följer med luften ut. Luften som innehåller den avdrivna koldioxiden kan släppas ut till atmosfären.

14.3.2.3.2 Avskiljning av salter

Vid anläggningar där permeatet ska användas som spädvatten till pannorna måste det som regel renas ytterligare med avseende på salter.

14.3.2.3.2.1 Blandbäddsfiler

Ett blandbäddsfiler är ett jonbytesfiler fyllt med en blandning av katjonmassa och anjonmassa. Alla joner i vattnet, både katjoner och anjoner, tas upp i filtret varpå ett avsaltat vatten erhålls.

Vanligtvis används engångsmassa vilket innebär att massan byts ut mot ny när den är förbrukad. Det ger ett enklare förfarande än vid regenerering men driftkostnaden blir dock högre. Den högre driftkostnaden kan motiveras med att salthalten i vattnet är låg redan från början vilket ger långa gångtider på filtret. Se kapitel 6.3.8 om polerande filter.

14.3.2.3.2.2 EDI

Ett alternativ till blandbäddsfiler för att polera vattenkvaliteten efter en RO-anläggning kan vara med ett eller flera seriekopplade EDI-aggregat. EDI (Electro DeIonisation) ger en ytterst långt driven avsaltning av vattnet. Se kapitel 6.5 om EDI.

Det är inte ovanligt att ett blandbäddsfiler installeras efter ett EDI-aggregat. Det ska inte behövas men ger en extra säkerhet.

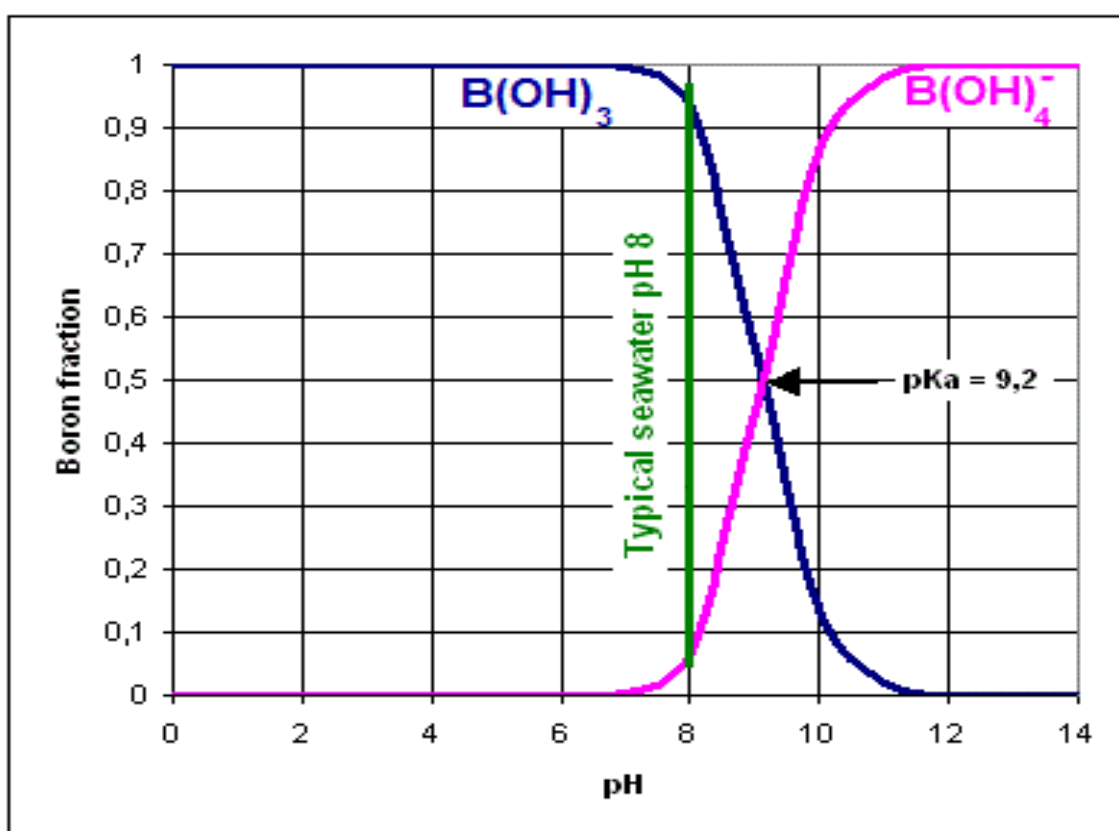
14.3.2.3.3 Bor

Beroende på bränslemix kan förhöjda halter bor förekomma i rökgaskondensatet. Bor används bl.a. i optiska ljusfibrer, halvledare och transistorer. Borax, dinatriumtetraborat, används som för rengöring och antiseptika, surhetsreglerare i livsmedel och läkemedel, emulgeringsmedel i kosmetika m.m.

Bor förekommer i vatten som borsyra (H_3BO_3 eller B(OH)_3) och borat (B(OH)_4^-).



Figur 233 visar pH-värdets inverkan på förhållandet mellan borsyra och borat.



Källa: www.lenntech.com

Figur 233. Jämvikten mellan borsyra och borat

Figure 233. Equilibrium of Boric Acid and Borate

Vid aktuellt pH-värde i rökgaskondensat, $\text{pH} < 8$, är jämvikten för reaktionen förskjuten åt vänster och bor föreligger till större delen bor som oladdad borsyra. I ett RO-membran är avskiljningen av laddade ämnen, såsom boratjonen (B(OH)_4^-), mycket effektiv medan avskiljningen av neutrala molekyler som borsyra B(OH)_3 är dålig.

14.3.2.3.4 Kvicksilver

Det råder stor osäkerhet kring avskiljning av kvicksilver i RO-membran. Det finns endast ett fåtal dokumenterade uppföljningar med skilda resultat. Det kan förklaras med att kvicksilver kan föreligga i flera olika former i rökgaskondensatet och dessa avskiljs i olika grad. Det spekuleras i om kvicksilver i gasform och i oladdad form kan passera igenom RO-membranet. Litteratur som klargör i vilka former som kvicksilver kan förekomma i rökgaskondensat och dess avskiljningsgrad i RO-membran saknas för närvarande (februari 2015).

14.3.2.4 Behandling av smutsvatten, rejekt

Den ”smutsiga” vattenströmmen efter RO-aggregatet, rejektet, innehåller i stort sett alla salter, tungmetaller, ammonium m.m. Den stora utmaningen är ofta att ta hand om detta rejektet. Vilket sätt som bör eller kan väljas är beroende på hur pannanläggningen är utformad och vilka förutsättningar som finns på den enskilda anläggningen.

Rejektet kan användas för något ändamål där föroreningarna inte påverkar användningen som t.ex:

- asksläckningsvatten
- vatten för kalksläckning
- vatten för att späda ut ammoniak eller urealösning
- bränslebefuktning

Ett annat alternativ kan vara att destruera rejektet genom att:

- det sprayas in i pannan och därmed "elda" upp föroreningarna
- skicka det till en destruktionsanläggning

I de fall där rejekt sprayas in i pannan kommer vattnet förångas och rökgasvolymen öka. Om rökgaskanalen inte är dimensionerad för detta högre rökgasflöde kan det medföra höga differenstryck i rökgaskanalen.

Vid anläggningar där det inte går att återvinna eller destruera rejektet måste det renas innan det kan släppas ut till kommunalt avlopp eller recipient. Vilken rening som behövs är avhängigt de miljövillkor som gäller för anläggningen. Vanligen måste halten ammoniak och tungmetaller reduceras innan rejektet kan ledas till avlopp.

Se rening av quench-vatten kapitel 14.2.2.1.

14.4 Värmeforskrapporter om rökgaskondensat

Det finns ett stort antal värmeforskrapporter som behandlar rökgaskondensering och rening av rökgaskondensat.

VÄRMEFORSK

RAPPORT NR.	TITEL	FÖRFATTARE
122	Betydelsen av konstruktionstyp och föravskiljning för stoftavskiljningsgrad, funktion och tillgänglighet vid rökgaskondensering vid biobränsleeldade anläggningar	Rönnbäck Marie, Wikström Evalena
288	Rökgaskondensering - Beskrivning av installationer och driftserfarenheter vid träbränsleeldade anläggningar	Dahlén G, Hägglund L
457	Erfarenheter från några svenska rökgaskondenseringsanläggningar	Brännland Rolf
568	Nyttiggörande av kondensat från rökgaskondensering	Goldschmidt Barbara
576	Reningsteknik vid rökgaskondensering	Westermarck Mats
643	Avsaltning av varmt rökgaskondensat med membranteknik	Axby Fredrik
719	Studie av rökgaskondensering för biobränsleeldade kraftvärmeanläggningar	Axby Fredrik
767	Rening av kondensat från rökgaskondenseringsanläggningar vid samförbränning av avfallsbränslen. Uppföljning av utsläpp.	Sundquist Lena, Dejfors Charlotte, Wrangsten Lars
792	Rökgaskondensering; Fördelning av emissioner mellan gas och kondensat	Axby Fredrik
800	Materialval vid rökgaskondensering	Goldschmidt Barbara, Nordling
838	Rökgasrening vid samförbränning i biobränslepannor i storleken 10-25 MW	Gyllenhammar Marianne, Larsson Sara
871	Utvärdering av bark för rening av vatten vid biobränsleeldade anläggningar	Hansson Christina, Hansson Helen, Hansson Sören
894	Praktiska konsekvenser för förbränningsanläggningar vid införandet av Vattendirektivet - Nya reningstekniker och förbättringsåtgärder	Axby Fredrik, Hansson Christina
895	Avancerad rening av rökgaskondensat	Axby Fredrik, Ekengren Östen,
902	Materialval vid rökgaskondensering	Nordling Magnus, Bergman
983	Avskiljning av submikrona partiklar vid biobränsleförbränning med rökgaskondensering eller kondenserande våta elfilter; Analys av	Rönnbäck Marie, Gustavsson Lennart
1006	Värmeanläggningar & Vattendirektivet - Metodik för konsekvensbedömning	Rossander Annelie, Andersson Jonas, Axby Fredrik, Schultz
1089	Utvärdering av erfarenheter av membranteknik för rening av rökgaskondensat	Goldschmidt Barbara, Ekdahl Emma och Hellman Mats
1184	Teknikval vid rening av rökgaskondensat i avfallsförbränningsanläggningar	Goldschmidt Barbara, Olsson Henrik, Carlström Helen
1220	Kartläggning av rökgaskondenserings-anläggningar med avseende på korrosionsrisker, biobränslekvaliteter, teknik och materialval	Stenqvist Per-Åke

15 Kylvatten

I detta kapitel beskrivs olika typer av kylvattensystem samt de metoder och typer av utrustningar som huvudsakligen används för att behandla kylvatten.

De tekniker som behandlas i detta kapitel är:

- Spädvattenkvalitet
- Filtrering
- Korrosion och korrosionsskydd
- Kemikaliedosering
- Åtgärder mot mikrobiell tillväxt
- Åtgärder mot Legionella

15.1 Kylvattensystem

Det finns flera olika typer av kylsystem, både vatten- och luftkylda. Gemensamt för alla typer av kylsystem är syftet att föra bort energi.

Kylvattensystem delas upp i direktgenomströmmande, slutna och öppna kylvattensystem. Ett slutet kylvattensystem kan ofta kylas i sin tur av ett direktgenomströmmande kylvattensystem.

15.1.1 Luftvärmväxlare

Luftvärmväxlare inkluderar bl.a. kylmedelskylare, luftkylda kondensorer, fläktluftkylare och fläktförångare. De förekommer i både industriell kylning och frysning samt luftkonditionering.

Luftvärmväxlare kallas också torra kyltorn och används främst i mindre kylsystem och system där kyleffekten är relativt liten.



Källa: Processor AB

Figur 234. *Kylmedelskylare för t.ex. kondensorkyla till kylkompressorer*

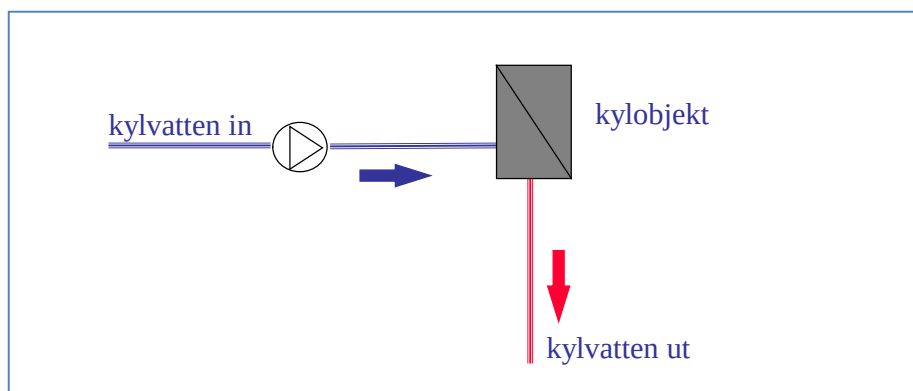
Figure 234. *Dry cooler for e.g. refrigeration compressor condenser*

Fördelarna är främst att vattenförbrukningen blir i stort sett försumbar liksom behovet av kemikalier för vattenbehandling. Nackdelarna är främst ett betydligt större platsbehov samt en högre driftkostnad.

Indirekt kylning med luft har endast minimal inverkan på vattenkvalitet i systemet som ska kylas och kommer därför inte att behandlas vidare denna handbok.

15.1.2 Direktgenomströmmande kylsystem

Direktgenomströmmande innebär att kallt vatten leds genom kylobjektet en gång och därefter till avlopp, i undantagsfall med någon form av energiåtervinning. Traditionellt används tekniken ofta vid processindustrier som är förlagda nära hav eller vattendrag med god tillgång till billigt råvatten, men ibland även där värmeenergin kan tillgodogöras i ett senare steg. Inom industrin finns ofta även mindre genomströmmande kylsystem som kyla med stadsvatten.



Figur 235. *Principskiss av ett genomströmmande kylvattensystem*

Figure 235. *Schematic diagram of a once-through cooling water system*

Temperaturhöjningen på vattnet är ofta liten och den energimängd som kan kylas bort är 4,2 MJ/grad/m³. Funktionellt kan systemet jämföras med en vattenberedare för förbrukningsvarmvatten.

Ett direktgenomströmmande kylsystem innebär en låg investeringskostnad men vattenförbrukningen blir förhållandevis hög.

15.1.2.1 Problemområden

Problemområden här kan vara försmutsning från ytvatten, korrosion, beläggningar av biofilm, ibland påväxt inne i värmeväxlare, avlagringar av salter på varma ytor. I några fall har det riktats invändningar mot uppvärmning av recipienten samt mot risken med utsläpp i händelse av läckage.

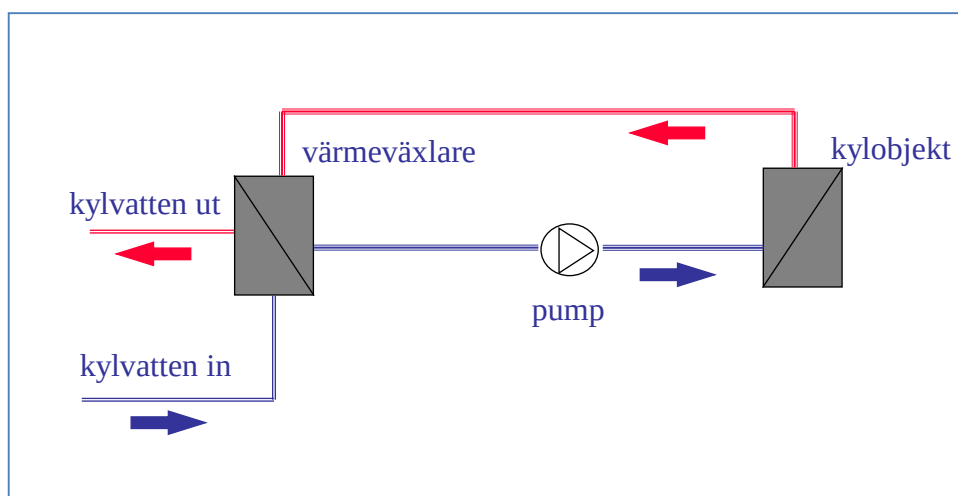
I ett genomströmmande kylvattensystem är det sällan aktuellt att behandla vattnet med kemikalier p.g.a. den höga vattenförbrukningen. Alternativet är istället att bygga bort risken för korrosion och beläggningar genom att välja ett bättre material i rörsystem, värmeväxlare och andra komponenter och installera lämpliga filter. Val av råvatten är också viktigt, ju högre kvalitet desto mindre problem.

Som nämnts ovan kan som regel de problem som kan uppstå med korrosion och beläggningar ofta byggas bort. Ett undantag är dock problem med mikrobiell tillväxt som kan kräva en kontinuerlig eller intermittent dosering av lämplig biocid.

15.1.3 Slutna kylsystem

Slutna kylsystem finns i storlekar med volymer från ett par liter (t.ex. kylsystemet i en bilmotor) upp till flera tusentals m³ i ett fjärrkylasystem. Kylsystem har funnits i industrier, datacentraler, kontors- och bostadsfastigheter i många år.

Vattnet cirkulerar i ett slutet system där det värms upp av förbrukaren, varpå det uppvärmda kylvattnet tas tillbaka till produktionsanläggningen, via en returledning, för att kylas ner igen. Kylningen kan ske på flera olika sätt, t.ex. med en värmepump eller kylning i värmeväxlare mot luft eller lämpligt vatten. Aktuella vatten kan vara havsvatten, recipientvatten, grundvatten, avloppsvatten, processvatten m.m.



Figur 236. *Principskiss av ett genomströmmande kylvattensystem*

Figure 236. *Schematic diagram of a once-through cooling water system*

Slutna recirkulerande kylsystem kan utformas så att de har kontakt med atmosfären via t.ex. en öppen tank eller ett öppet expansionskärl. Systemen kan också vara helt tillsluta utan någon kontakt med atmosfären.

Värmeenergin transporteras mellan en varm och en kall yta och om inte vattnet byts ut inträder så småningom kemisk jämvikt mellan vattnets salter och systemets ytor så länge cirkulation pågår. I system med luftkontakt sker däremot en ständig transport av syre från kalla till varma delar av systemet.

15.1.3.1 Problemområden

Problem föreligger ofta med korrosion och beläggningar av biofilm och korrosionsprodukter. Generellt gäller för alla kylsystem att ju bättre vatten man använder desto mindre problem uppstår, råvattenkvalitet och förbehandling är således av största vikt. Vidare måste filter och andra kvalitetsbevarande system vara funktionella och intakta.

15.1.3.2 Fjärrkyla

Fjärrkylasystem är storskaliga ledningsbundna kylsystem som funnits i Sverige sedan 1992 då det första togs i drift i Västerås. Därefter har installation av fjärrkylsystem expanderat kraftigt. En vanlig systemlösning för fjärrkyla är att distribuera kallt vatten vid 4 till 12°C från produktionsanläggningen ut i ledningsnätet. Oftast används en indirekt koppling av kretsarna i fjärrkylasystem, motsvarande den i fjärrvärmesystem, där vattnet skiljs från vattnet i abonnentanläggningen och från primärkretsen genom värmeväxlare.

Liksom för fjärrvärmesystem är korrosion orsakad av syre det största problemet i ett fjärrvärmesystem. Det finns flera källor till inläckage av syre (luft) i ett fjärrkylasystem, t.ex. via:

- påfyllning med oavgasat vatten
- öppna expansionskärl eller ackumulatortankar
- inläckage i undercentraler
- snabbfyllning med brandslang, m.m.

Korrosionen i ett fjärrkylasystem kan minimeras genom:

- ett högt pH-värde
- en låg syrehalt
- en låg konduktivitet (låg salthalt)

Fjärrkylsystem spädmatas ofta med vatten av samma kvalitet som till ångpannor. Detta i kombination med låg temperatur samt låga halter av syre och salter gör så att korrosionshastigheten blir låg. Vid låg temperatur sker inte passivering av ytorna naturligt som i en ångpanna utan måste ske med kemikalier, t.ex. erythorbat. Se kapitel 7.3.1.2.4.1 om icke flyktiga syrereduktionsmedel.

Vanligast är att dosera lut för att justera pH-värdet. Dosering av fosfat för pH-justering eller för att binda hårdheten rekommenderas inte. Detta skapar en volym slam som är svår att avlägsna ur systemet. Bildningen av ett slam innebär också en ökad risk för beläggningar.

Den viktigaste parametern gällande vattenkvaliteten i ett fjärrkylasystem utan avgasat spädvatten är mängden tillfört spädvatten. Det är viktigt att spädvattenmängden och eventuellt inläckage är så liten som möjligt. Varje liter spädvatten tillför syre till systemet som ger upphov till korrosion och ökar risken för läckage med driftstörningar som följd.

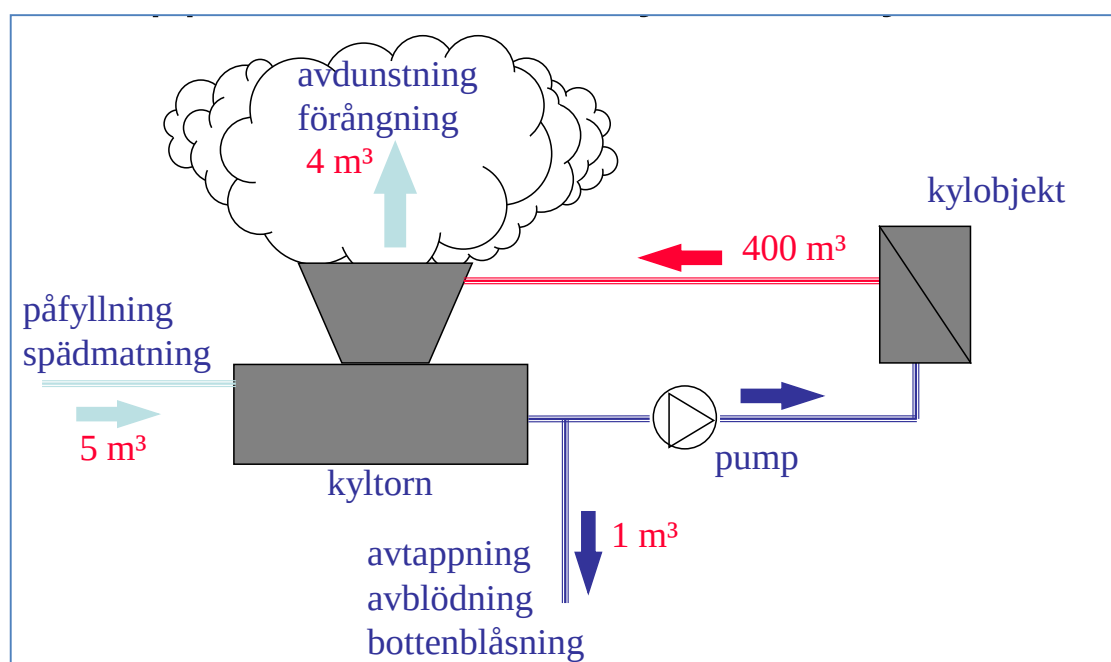
Fasta partiklar i fjärrkylanätet utgörs främst av korrosionsprodukter, men även av slagg, grus och andra föroreningar från montage. Halten ska vara så låg som möjligt för att undvika igensättningar och erosion i värmeväxlare och armaturer. Ett (eller flera) delströmsfilter bör alltid installeras i systemet.

De aktuella temperaturerna i fjärrkylasystem medför en miljö som kan gynna mikrobiell tillväxt. Detta är något som bör kontrolleras regelbundet.

15.1.4 Öppna kylsystem

Öppet recirkulerande innebär att det varma kylvattnet återförs till systemet och kyls igen med en kylanordning, ofta ett kyltorn eller en evaporativ kylare. I ett öppet kyltorn eller en evaporativ kylare förs värmeenergin bort genom att vattnet tvingas till avdunstning. Denna fasövergångsenergi är hög, storleksordningen är 2400 MJ/grad/m^3 vid 20°C .

Endast en liten del av det cirkulerande kylvattnet går förlorat genom avdunstningen, ofta mindre än 1 %, resten av det kylda vattnet återcirkuleras. Funktionellt kan systemet jämföras med ett ångsystem utan kondensatretur. Se Figur 237.



Figur 237. *Principskiss av ett öppet recirkulerande kylvattensystem*

Figure 237. *Schematic diagram of an open water system*

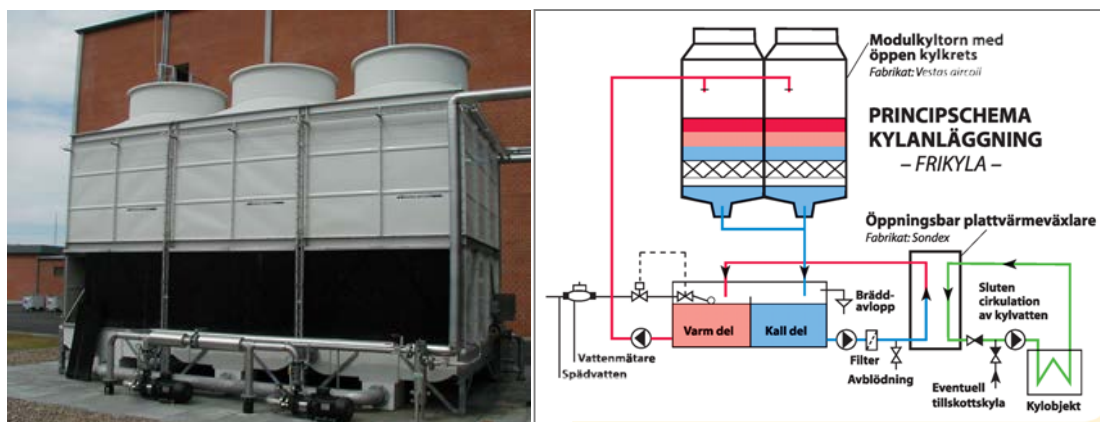
Kyltorn används bland annat för komfortkyla och vid olika industriella processer, kondenskraftverk och oljeraffinaderier etc.

Kyltorn installeras av flera skäl:

- Kostnaden för kylning med genomströmmande vatten är för hög
- Korrosion och beläggningar måste fås under kontroll
- Villkor för recipienten kan inte mötas
- Begränsad råvattentillgång
- Vattenbesparingen är betydande

En kylanläggning kan också fungera genom att enbart använda uteluft som är svalare än luften i det utrymmet som skall kylas. Den applikationen brukar kallas för att

använda *frikyla*. Även för vattenburna kylsystem finns möjligheten att utnyttja frikyla. Här måste någon form av värmeväxlare mot uteluften installeras. Se Figur 238.



Figur 238. *Kyltorn med frikyla*

Figure 238. *Cooling tower with free cooling*

Kyltorn kan variera i storlek från små takenheter till mycket stora hyperboloida strukturer som kan vara upp till 200 meter höga och 100 meter i diameter, se Figur 239. Dessa allra största kyltorn, som främst används för att kyla bort överskottsvärme i kärnkraftverk och värmekraftverk är ovanliga i de nordiska länderna, eftersom vi har en bra tillgång till kallt vatten som är ett effektivare kylmedium.



Figur 239. *Kyltorn vid ett kärnkraftverk*

Figure 239. *Cooling tower at a power plant*

15.1.4.1 Koncentrationsfaktor

Principen bakom alla kyltorn är att sänka kylvattentemperaturen genom förångning. Vid förångning av vatten åtgår energi. Denna energi tas från det varma kylvattnet varpå temperaturen i kylvattnet sänks. Värmet som avlägsnas kallas latent förångningsvärme.

Förångningsförlusten täcks genom tillsats av nytt vatten. Genom avdunstningen uppstår en uppkoncentrering av salter i det cirkulerande kylvattnet då salterna inte följer med i ångan utan blir kvar i vattnet. Denna uppkoncentrering kan drivas ganska långt, men för att förhindra att salthalten i kylvattnet blir för hög måste en del vatten blödas av. Det ger att man får en viss relation mellan tillfört vatten och det vatten som blöds av.

För att kyla bort 1 MJ energi åtgår 24 m³ direktgenomströmmande vatten vid 10 graders temperaturstegring, till ett kyltorn går det endast åt drygt 0,5 m³ spädvatten vid koncentrationsfaktor 5. Koncentrationsfaktorn är kvoten mellan tillfört och avtappat vatten, det innebär här en avdunstning av 0,4 m³ och att summan av avtappning och stänkförluster är 0,1 m³. Salthalten i det avtappade vattnet är här 5 gånger högre än spädvattnets.

Ett sätt att bestämma koncentrationsfaktorn är att jämföra kylvattnets kloridhalt med spädvattnets, klorider är mycket lösliga och ingår inte i beläggningar:

$$Cl_{kylv} / Cl_{spädv} = C_{Cl} \quad (\text{koncentrationsfaktor klorider})$$

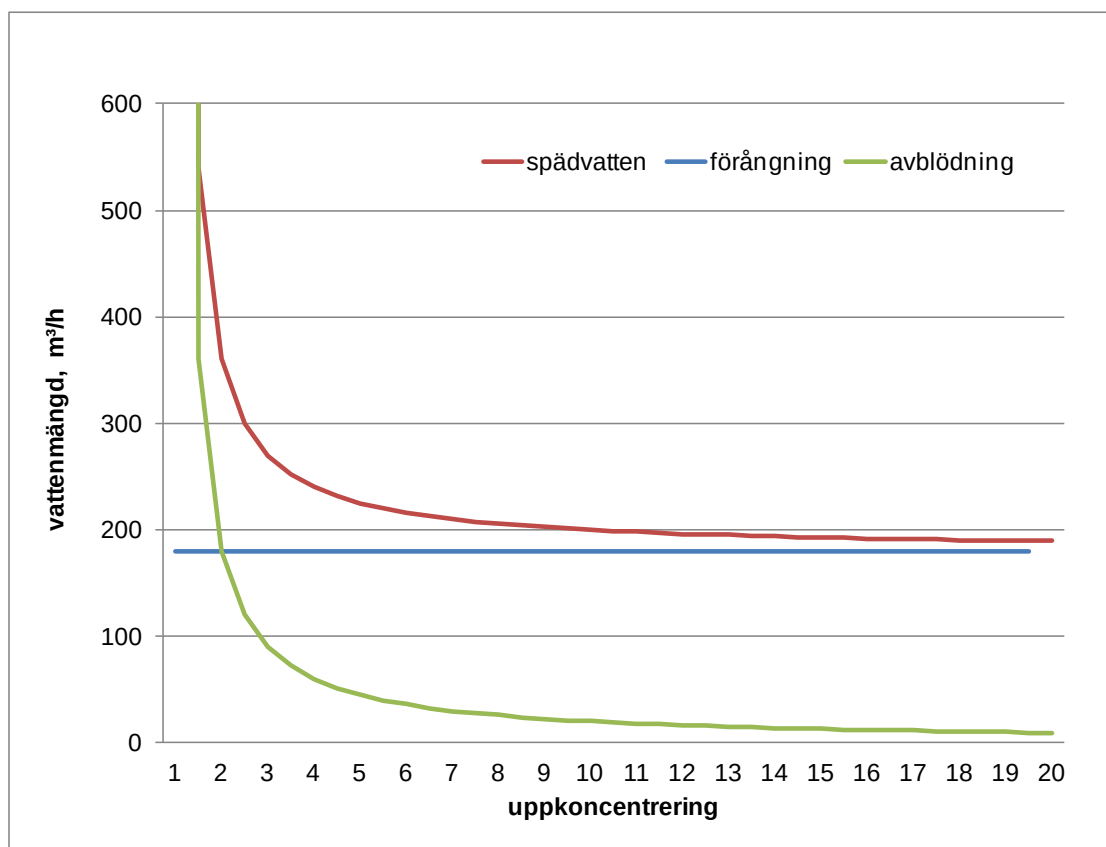
Vi kan göra motsvarande beräkning för kalcium, som är mer svårlöst:

$$Ca_{kylv} / Ca_{spädv} = C_{Ca} \quad (\text{koncentrationsfaktor kalcium})$$

Om vi nu finner att koncentrationsfaktorn för kalcium är lägre än koncentrationsfaktorn för klorider betyder det att en del av det kalcium som tillförts via spädvattnet har avlagrats inne i systemet.

Vid en uppkoncentrering större än 5 gånger vinner man inte så mycket vatten längre genom att ytterligare minskad avblödning. Vid högre uppkoncentrering ökar däremot risken för problem i takt med att salthalten i kylvattnet ökar. Risken för såväl beläggningar som korrosion ökar markant med högre salthalt.

Ofta anses en uppkoncentrering på 5-7 gånger vara mest fördelaktigt ur såväl teknisk som ekonomisk synvinkel. Det är en balans mellan kostnad för tillsatsvatten och kemikalier för vattenbehandling. Se Figur 240 som visar förhållandet mellan tillsatsvatten, avblödning och förångning.



Figur 240. Förhållandet mellan spädvatten, avblödning och förångning

Figure 240. The ratio between make-up water, bled and evaporation

15.1.4.2 Problemområden

Problemområden kan vara förknippade med både råvattenkvalitet och luftkvalitet. Ett öppet kyltorn är en effektiv våtskrubber och samlar in mycket luftburen smuts. Vattnet blir syremättat och korrosivt. Därtill kommer anrikningen av salter och föroreningar eftersom endast en liten del av kylvattnet förloras genom avblödning. Som om inte detta räcker tillkommer även biologiskt relaterade problem, vattnet är uppvärmt och rikt på salter och föroreningar som gynnar mikrobiell tillväxt och kan i värsta fall komma att utvecklas till en smittkälla.

Vid ökande koncentrationsfaktor minskar kylvattnets omsättningshastighet, varigenom atmosfärisk påverkan och biofouling ökar. Det är därför sällan meningsfullt att öka koncentrationsfaktorn för mycket, inte ens vid bra spädvattenkvalitet.

15.2 Spädvattenkvalitet

Det finns inga allmänna riktvärden för spädvattenkvaliteten till ett kylvattensystem. Oftast tar man det vatten som finns till hands. Därefter anpassas materialval, filterutrustning, kemikaliebehandling etc. till det aktuella vattnet.

Generellt kan man säga att ju renare vatten man tillför systemet desto mindre vattenrelaterade problem får man. Låg salthalt bör eftersträvas eftersom en svagare elektrolyt ger mindre transport av elektroner och joner vid korrosionsceller.

Vid genomströmningskylning är oftast renat ytvatten att föredra framför grundvatten. Låg salthalt i slutna system minskar tillgången på närsalter för mikroorganismer.

Vid evaporerande kyltornssystem kommer den ökande koncentrationsfaktorn vid för liten avblödning att kunna höja salthalt och pH till ogynnsamma nivåer. Det finns installationer vid kyltorn där avblödningen kunnat ersättas med ett sidokopplat RO-aggregat. På köpet har man fått minskad bioaktivitet.

Ett fjärrkylasystem ofta fördel spädmatas med fjärrvärmevatten. Det är ett vatten med bra kvalitet och framför allt ett syrefritt vatten.

15.3 Filtrering

Generellt gäller att renlighet gynnar korrosionsskyddet. Genom avlägsnande av smuts och partiklar från elektrolyten minskar uppkomsten av korrosionsceller och avlagringar, liksom även erosion. Det är därför alltid gynnsamt att installera effektiva filtersystem, ibland assisterade av kemiska hjälpmedel för flockning, dispergering eller annan hjälp. Att tillsätta inhibitorer till ett smutsigt eller korroderat system utan föregående rengöring kan ofta göra mer skada än nytta.

De fasta partiklarna i vattnet avlägsnas till en viss del via avblödningen men en stor del sedimenterar på botten av bassängen eller i systemdelar med låg strömningshastighet och bildar ett slam. Slammet utgör en utmärkt miljö för mikrobiell tillväxt i systemet.

Ett bra sätt att få bort partiklar och slam ur systemet är att installera effektiva filter på det cirkulerande kylvattnet. Filtrering av inkommande råvatten avskiljer inte de föroreningar som kommer in i systemet med luften, vilket med stor sannolikhet är den största källan. Filtrena monteras i en delströmskrets för att undvika driftstörningar om filtren skulle sätta igen.

I system med större vattenvolymer räcker det oftast inte att bara tappa av systemvatten för att minska halten föroreningar i vattnet. För att halten föroreningar i systemet ska halveras måste halva systemvolymen tappas ur vilket ofta är praktiskt omöjligt. Genom att installera ett delströmsfilter kan föroreningar i systemet avskiljas och avlägsnas med ett minimum av vattenförlust.

Alla kylvattensystem bör förses med ett eller flera delströmsfilter. Det gäller oavsett storlek och om det är ett direktgenomströmmande, slutet eller öppet kylvattensystem.

Vilken typ av filter som bör installeras måste avgöras från fall till fall beroende på vattenkvalitet, aktuella föroreningar, systemstorlek etc. Se kapitel 6.1 om mekaniska filter.

Filtreringsgraden har en avgörande betydelse för vattenkvaliteten. I ett förorenat system bör man börja med ett grövre filter, 100-200 μm , för att i takt med att vattnet i systemet blir renare minska till 50 eller ännu hellre 25 μm . I ett slutet kylvattensystem kan ännu finare filter med fördel användas. I ett fjärrkylsystem rekommenderas en filtreringsgrad på 1 μm .

Det hävdas ibland att filtrering och kemikaliedosering kan undvaras och ersättas med periodisk rengöring, detta är dålig teknik och ekonomi. Korrosion kan då inte kontrolleras. Isolerande beläggningar kan bildas varvid anläggningens prestanda successivt sjunker och verkningsgraden alltid är lägre än design. Biofilm kan utvecklas och kylvattnet kan bli en sanitär olägenhet.

15.4 Korrosion i kylvattensystem

Definitionen för korrosion är "Angrepp genom kemisk, oftast elektrokemisk, reaktion med omgivande medium" enl. TNC 67 (Korrosionsordlista utgiven av Terminologisentrum). Många material förutom metaller korroderar i varierande miljöer, såsom betong, glas och plast.

Vi begränsar här diskussionen till att definiera korrosion som upplösning av en metall genom elektrokemisk reaktion med sin omgivning, d.v.s. vatten. För elektrokemisk reaktion fordras en elektrolyt som är elektriskt ledande, jämte en elektrisk potentialskillnad mellan två punkter. Anod- och katodytor finns överallt på metallytan och skapar erforderliga potentialskillnader.

Två reaktioner sker samtidigt:

- Vid anoden oxideras metall till metalljon med positiv laddning och elektroner frigörs
- Vid katoden binds elektronerna med syre och vatten och bildar hydroxidjoner.

Hydroxidjonerna reagerar med metalljonerna och bildar metallhydroxid, som lagras över anoden. Vid någorlunda neutrala pH-värden är detta den dominerande mekanismen för korrosion, och hastigheten begränsas av tillgången på syre för att underhålla katodreaktionen.

Vid lågt pH frigörs istället vätegas. Korrosionshastigheten påverkas också av vattnets ledningsförmåga och temperatur, jämte relationen mellan storleken på anod- och katodytan.

Strömmen går alltid från anoden (minuspole) till elektrolyten och från elektrolyten till katoden (pluspole). Den mest ädla metallen blir katod och har högst elektrodpotential. Tabeller med galvaniska spänningsserier beskriver vilken metall som är ädlast i en viss korrosiv miljö.

Vid anoden sker en upplösning av metallen:

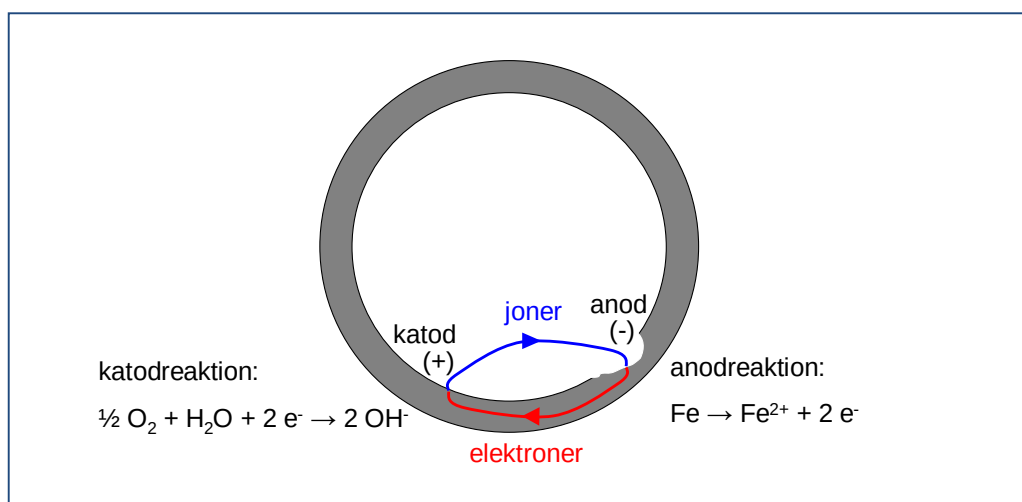


Elektroner frigörs, metallen oxideras och bildar lösliga joner. Elektronerna vandrar genom metallen till katoden.

Vid katoden sker samtidigt reduktion:



Figur 241 beskriver en korrosionscell där järn korroderar i närvaro av syre.



Figur 241. Exempel på en korrosionsceller

Figure 241. Example of an corrosion cell

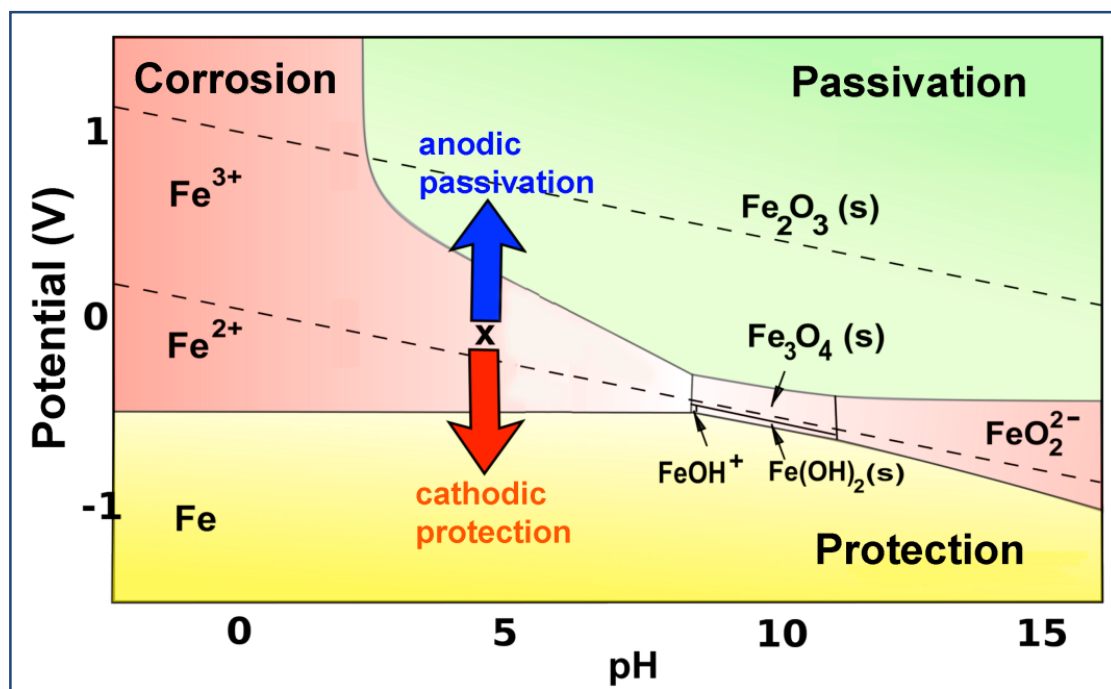
15.4.1 Korrosionsskydd

För att hindra korrosion i ett givet system använder man antingen passivatorer, som gynnar bildning av ett skyddande oxidskikt, eller inhibitorer, som bromsar anod- eller katodreaktionen, eventuellt båda.

Förutsättningen är att metallytorna är rena så att önskade reaktioner kan ske, därför kompletteras ofta formulerade produkter med renhållande ämnen, även skumdämpande och pH-reglerande ämnen kan ingå. För slutna system kan syret avlägsnas med reduktionsmedel.

Möjligheten till korrosion bestäms av metallens tillståndsform i kontakt med elektrolyten. Föreligger metallen i stabil form sker inget kemiskt angrepp. Av tillståndsdigrammet (Pourbaix diagram eller potential/pH diagram) i Figur 242 framgår vilken

elektrolytpotential och vilket pH som möjliggör immun metall eller bildning av beständiga, passiva skyddsskikt. Diagrammet gäller endast för en specifik situation, vanligen rumstempererat rent vatten vid atmosfärtryck. Förändring av tryck, temperatur och kemisk sammansättning av vattnet, likaväl som olika legeringsämnen i stålet, ger ett modifierat diagram.



Figur 242. Pourbaix diagram för järn

Figure 242. Pourbaix diagram for iron

Förklaring till exempeldiagram:

Diagonala streckade linjer anger vattnets egenskaper vid olika potential, ovan den övre linjen frisätts syre, nedan den undre frisätts väte. Heldragna linjer avgränsar metallens olika tillstånd i kontakt med vattnet.

I figurens exempel med elektrolytpotential 0 volt vid pH 5 kommer järn att korroderas genom oxidation till Fe^{3+} -joner som är lösliga i vatten. Vid högre elektrolytpotential bildas syrerik hematit, Fe_2O_3 , som ger ett anodiskt skydd. Skyddet är dock dåligt eftersom oxiden löser sig i vattnet. Vid lägre potential reduceras järn till immun, metallisk form. Som exempel är detta vad som sker när man lägger på en elektrisk spänning på markförlagda järnrör för katodiskt skydd, järnet blir då ädlare gentemot omgivande mark.

Om vi nu höjer pH i figuren till exempelvis 10 kommer vi också in i anodiskt passivt område där järnjoner oxideras till hematit. Om vi vid samma pH sänker potentialen genom en mer reducerande miljö når vi ett område där hematit övergår till magnetit, Fe_3O_4 , som är svårlös i vatten och därför ger ett bättre skydd. I underkanten på detta område kan vi erhålla järnhydroxid (rödrost), som visserligen ger katodiskt skydd men är mekaniskt instabilt. Ytterligare sänkning av potentialen, d.v.s. för starkt reducerande eller

vätefrisättande ger metalliskt järn, som visserligen är immunt i elektrokemiskt avseende men i princip oskyddat i mekaniskt avseende.

Höjer vi pH ytterligare kan vi på nytt komma in i ett område med lösliga järnoxidjoner. I ett syrefattigt pannvatten rör vi oss oftast nära den undre diagonallinjen, medan villkoren i ett syrerikt och rent kylvatten är närmare den övre diagonalen.

15.4.2 Mättnadsindex

Ett mättnadsindex är en teoretisk jämviktsmodell som ger en indikation på vilken grad av mättnad ett vatten har, med avseende på kalciumkarbonat. Ofta pratar man om jämviktsvatten eller att vattnet är i balans. Ett vatten som inte är i balans är antingen kalkfällande eller korrosivt.

Vattnets pH-värde samt innehåll av kalcium, koldioxid (alkalitet), salthalt (konduktivitet) och temperatur avgör om vattnet är korrosivt eller inte.

Det finns flera mått som karakteriserar korrosion/kalkutfällningstendensen för vatten, vanligtvis används Langeliers Saturation Index (LSI) eller Ryznar stabilitetsindex (RSI).

15.4.2.1 Langeliers mättnadsindex (LSI)

Langeliers stabilitetsindex (ibland Langeliers mättnadsindex) är ett beräknat värde som används för att förutsäga kalciumkarbonatets stabilitet i vatten. Den indikerar om kalciumkarbonat kommer att falla ut, lösas upp, eller vara i jämvikt i det aktuella vattnet. Wilfred Langelier utvecklade år 1936 en metod för att förutsäga det pH-värde vid vilket vatten är mättat med kalciumkarbonat (kallas pH_s).

LSI uttrycks som skillnaden mellan det systemets pH-värde (uppmätt) och mättnads-pH:

$$LSI = pH - pH_s$$

- För $LSI > 0$ är vattnet mättat och tenderar att fälla en beläggning av $CaCO_3$. Vattnet är kalkfällande.
- För $LSI = 0$ gäller jämvikt mellan vatten och $CaCO_3$. $CaCO_3$ varken fälls ut eller löses upp.
- För $LSI < 0$ är vattnet undermättat och tenderar att lösa upp fast $CaCO_3$. Vattnet är korrosivt.

I praktiken anses vatten med ett LSI-värde mellan -0,5 och +0,5 vara i jämvikt och $CaCO_3$ kommer varken att fällas ut eller bilda beläggningar.

Det är också värt att notera att LSI-värdet är temperaturkänsligt. LSI-värdet blir högre när vattentemperaturen ökar. Detta har särskilda konsekvenser i t.ex. ett vattensystem där temperaturen varierar. I systemdelar där det sker en temperaturökning kan $CaCO_3$ falla ut och bilda beläggningar och omvänt kan vattnet vara korrosivt i systemdelar med lägre temperatur.

15.4.2.2 Ryznars stabilitetsindex (RSI)

Ryznars stabilitetsindex (ibland Ryznars mättnadsindex) utvecklades från empiriska observationer av korrosionshastigheter och beläggningsbildning i stålrör. Ryznars mättnadsindex (RSI) utgår från en databas med tjockleksbestämningar på kalkbeläggningar i kommunala vattensystem för att förutsäga effekten av vattenkemin.

Indexet definieras som: $RSI = 2 \text{ pH}_s - \text{pH}$ (uppmätt)

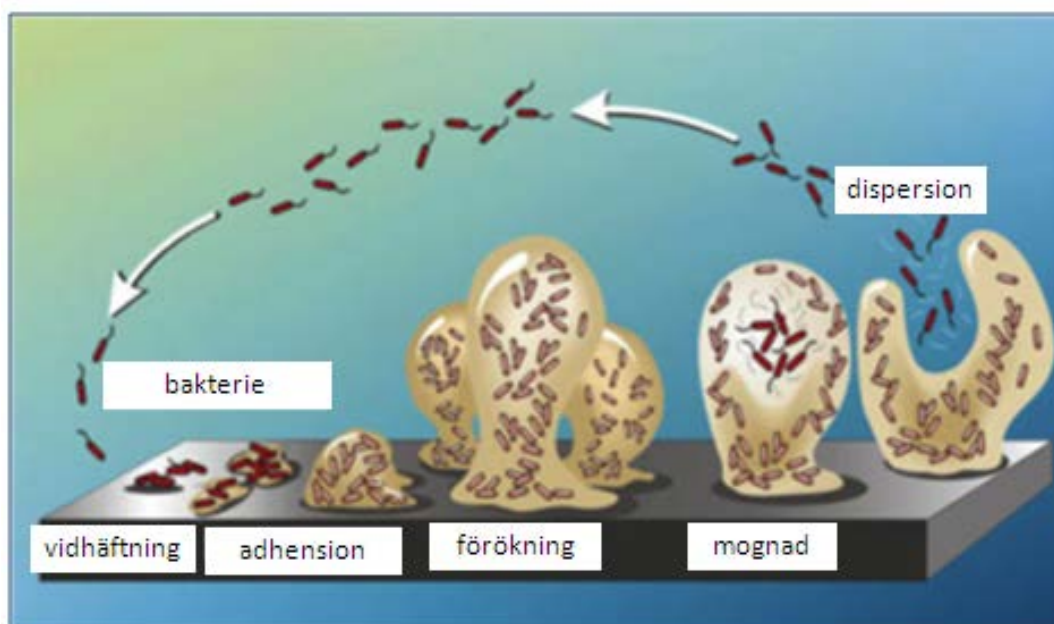
- För $RSI > 8$ är vatten undermättat och tenderar att lösa upp fast CaCO_3 . Vattnet är korrosivt.
- För RSI mellan 6,5-7 gäller jämvikt mellan vatten och CaCO_3 . CaCO_3 varken fälls ut eller löses upp.
- För $RSI < 6,5$ är vatten mättat och tenderar att fälla en beläggning av CaCO_3 .

Se även kapitel 2.5.8.2 om karbonatsystemet.

15.5 Mikrobiell tillväxt

I naturen är mikroorganismerna ofta bundna till ytor, det vi kallar biofilm. I industriella vattensystem är det denna beläggning som orsakar biofouling. Infektion av ett system sker emellertid genom planktoniska organismer som kan komma in med luft, vatten, verktyg etc. För tillväxt behövs närsalter och en kolkälla, t ex koldioxid eller olja.

Uppbyggnaden av en biofilm börjar normalt med att någon mikroorganism transporteras till en yta där livsvillkoren är bra. Se Figur 243. Det betyder oftast att ytan är smutsig eller ojämn och ger bra fäste. Vattnet skall ha lämplig temperatur, salthalt, pH-värde och innehålla näringsämnen, men sakna reproduktionsstörande ämnen. Därefter kan organismen sitta och invänta att födan kommer med vattnet och sedan föröka sig i lagom takt, exempelvis fördubbling av populationen var 20:e minut (*E.coli*).



Figur 243. Utveckling av biofilm

Figure 243. Bio film development

När tillväxten pågått en tid börjar problemen göra sig påminda: kapaciteten på värmeöverförande ytor går ned, flödeskapacitet och systemtillgänglighet minskar medan pumpkostnaden ökar. Filter och mätutrustning störs av lösryckt material och ett infekterat vattensystem kan utgöra en hälsorisk.

Jästsvamp och alger bildar långa slemtrådar som växer snabbt och som också innesluter smutspartiklar och andra mikroorganismer. En del bakterier bildar starkt vidhäftande slem av polysackarid och protein. Den förändrade kemiska miljön i och under slemavlagringar kan orsaka utfällning av salter och/eller korrosion.

I den biologiska avlagringen fastnar även korrosionsprodukter, partiklar och andra föroreningar från vattnet. Under den första aeroba filmen växer en anaerob biomassa fram, där organismer kan utveckla skyddande höljen som möjliggör selektiv jonpassage. Här kan korrosiva ämnen bildas, såsom ammoniumföreningar, svavelväte, mineralsyror, organiska syror m.m. Avlagringarna ger områden med olika syrekonzentration och orsakar korrosion i form av punktangrepp. I Figur 244 syns den svartfärgade anaeroba biomassan tydligt under den ljusare aeroba biomassan.

Att mäta bioaktivitet med odlingsprov på cirkulerande vatten säger ingenting om mängden biofilm i ett system, exempelvis är det svårt att påvisa förekomst av sulfatreducerande bakterier, SRB, eftersom dessa lever anaeroft under annan beläggning och sällan påträffas i strömmande vatten.



Figur 244. *Biofilm i ett kylvattensystem*

Figure 244. *Biofilm in a cooling water system*

Spridning av aerosoler i luft från t.ex. infekterade kyltornssystem, spraybefuktare m.m. är en hälsorisk. Bakterier kan då bäras med luften långa vägar och orsaka allvarlig infektion vid inandning.

15.6 Kemikaliedosering

En tillsatskemikalie kan vara ett enstaka ämne eller en formulerad produkt bestående av flera olika aktiva ämnen. Samma kemikalie kan ha flera användningsområden, exempelvis kan natriumhydroxid användas till pH-justering, regenerering av filter, rengöring från biofilm mm.

Kylvattenkemikalier används för tre huvudsakliga problemområden: korrosion, beläggningar av salter och korrosionsprodukter samt kontroll av mikroorganismer och biofilm.

Korrosion är en irreversibel reaktion där metall för alltid förstörs, medan en beläggning oftast går att avlägsna och ytan kan återställas till ursprungligt skick.

Korrosion främjas av hög syrehalt, förhöjd temperatur, förhöjd salthalt, felaktigt pH, hög flödes hastighet, biologisk aktivitet, men också av olämpligt materialval.

Ytterligare speciella kemikalier kan förekomma för exempelvis skumdämpning, färgmärkning, friktionsnedsättning, rengöring och inte minst frostskydd.

15.6.1 pH-justerande kemikalier

Natriumhydroxid eller flytande natronlut används för att höja ett för lågt pH. En mindre riskabel produkt att handskas med är natriumbikarbonat, men åtgången är större. pH kan ställas in så att vattnet varken är kalkfällande eller kalklösande vid en viss temperatur. Man gör då en beräkning av vattnets mättnadsindex och stabilitetsindex, med syfte att reducera korrosionspotentialen utan att vattnet blir beläggingsbildande. Langeliers mättnadsindex (LSI) väger samman vattnets kalciumhårdhet, totalalkalitet och salthalt till ett teoretiskt jämvikts-pH vid en viss temperatur, jämfört med uppmätt pH. Ryznars stabilitetsindex väger även in en faktor för reaktionshastigheten.

Svavelsyra används för att sänka pH, detta är framförallt vanligt vid öppna kyltornssystem, som gärna får för högt pH vid ökande koncentration. Finns aluminium, koppar eller zink i systemet är detta speciellt angeläget. Sulfaminsyra kan användas som ett något mindre riskabelt alternativ. Saltsyra används sällan då den ger en onödigt kraftig ökning av kloridhalten och korrosiviteten.

Vid uppvärmning av kylvatten ökar i allmänhet pH genom spaltning av vattnets alkalitet till hydroxider och koldioxid, exempelvis:



Koldioxid avgår i gasform medan natriumhydroxid stannar i vattnet och höjer pH. Effekten blir mycket påtaglig i kyltornskretsar när koncentrationsfaktorn ökar.

Kolsyra från inkommande vatten eller som bildas vid uppvärmning och pH-förändring kan ge korrosion på ledningar och apparatur av koppar, detta är främst ett problem vid direktgenomströmning.

15.6.2 Korrosionsinhibitorer

Användning av korrosionsinhibitorer är i stort sett förbehållet recirkulerande system. Slutna system kan ges ett ganska omfattande skydd, kostnaden är obetydlig så länge man inte byter vatten. Frysskydd av salt, etanol eller glykol ökar vattnets aggressivitet och kräver kraftiga inhibitorer. För kyltornssystem med stor vattenomsättning kan kemikaliekostnaden bli hög, även hanteringen av utsläpp har stor betydelse.

Inhibitorer kan vara oorganiska eller organiska föreningar med negativa laddningar som ger stark bindning till metallytan. Aktiva grupper med svavel ger starkare bindningar än de med kväve, som i sin tur brukar vara starkare än aminogrunder.

Där fosfater är tillåtet används fosfat- och fosfonatbaserade inhibitorer. Fosfat används i kombination med organiskt hjälpämne för att ge en kontrollerad fosfathalt vid metallytan, fosfonat (ATMP, HEDP, PBTC m.fl.) gynnar passiveringen av metallen, men fungerar samtidigt som en tröskelinhibitor för att hindra utfällning av salter.

Helorganiska korrosionsinhibitorer kan användas där det finns restriktioner mot fosfater. Polykarboxylater och ytaktiva ämnen används för bättre renhållning av ytorna, denna funktion är viktig för att passivering av ytorna skall kunna ske. Formulerade produkter

brukar innehålla flera av de nämnda ämnena jämte ytterligare hjälpämnen, och formulering har då gjorts för bästa anpassning till vattenkvalitet, temperatur, uppehållstid, material mm.

15.6.2.1 Anodiska inhibitorer

Anodiska inhibitorer verkar på anodytan genom att bromsa oxidationen, metallen förefaller bli ädlare. Kromsalter har förr använts för detta ändamål, ofta i kombination med fosfat för att bilda ett så kallat dianodiskt skydd, ibland förstärkt med zink. Kromsalter är cancerframkallande och alla metallerna har restriktioner för utsläpp och används därför praktiskt taget aldrig i öppna system. Molybden ingår i en del inhibitorer för slutna system, men effektiv halt är hög.

Natriumnitrit är en effektiv anodisk inhibitor i slutna system. Som de flesta i denna grupp betraktas nitrit som en farlig inhibitor, eftersom blottlagda punkter vid för låg inhibitorhalt utsätts för accelererad korrosion. Den kombineras därför oftast med borat eller bensoat. Den är också känslig för störande joner som klorid och sulfat. I öppna system oxideras nitrit till nitrat som inte skyddar järn, men som göder mikroorganismer. Nitrat skyddar däremot aluminium.

Andra ämnen som bromsar anodisk reaktion är silikat, fosfat och hydroxider. Svårigheter föreligger att få en kontrollerad deposition. Organiska hjälpinhibitorer används för detta ändamål. På köpet kan man då erhålla både anodiskt och katodiskt skydd.

Filmbildande ämnen skall vara polära för att erbjuda skydd, d.v.s. de skall innehålla en hydrofil grupp löslig i vatten och en hydrofob grupp som binder vid metallytan. Ett flertal tensider är effektiva inhibitorer, en nackdel kan vara att de lätt skummar. Katjoniska tensider ger starkt skydd även vid lågt pH, de används flitigt vid t ex betning av pannor. Polyaminer har liknande egenskaper, men är känsligare för föroreningar och har ibland orsakat igensättningar där filmtjockleken inte har varit under kontroll.

15.6.2.2 Katodiska inhibitorer

Katodiska inhibitorer verkar på katodytan genom att hindra reduktionsreaktionen. Syre reduceras och bildar tillsammans med metall och vatten metallhydroxider, som lagras över det anodiska området. Vid rätt pH bildas inga vätejoner. Som katodisk inhibitor fungerar kalciumkarbonat, man ställer då in vattenkemin så att vattnet blir kalkfällande och en elektriskt isolerande, tunn kristallin hinna bildas. Metoden används t ex för dricksvattenledningar. I recirkulerande system med olika temperaturer är det svårt att styra beläggningssbildningen.

Andra katodiska inhibitorer är polyfosfater som hexameta- och tripolyfosfat. Ortofosfat kan användas tillsammans med karboxylater för kontrollerad deposition. Till genomströmningssystem används små mängder polyfosfat för att minska inkrustbildning och minska avsättningar från "rött vatten". Även silikat används här, det ger både pH-höjning och skyddar koppar från kolsyraangrepp.

Katodiskt skydd inuti cisterner och av markförlagda rör utförs ibland med hjälp av påtryckt likström, ibland även med offeranoder av zink eller magnesium. Metoden

innebär att man gör ytan man vill skydda till katod. Förbrukningen av offermetall eller elenergi kan bli hög i starka elektrolyter.

Tolyltriazol och bensotriazol skyddar koppar och dess legeringar redan vid låga halter. Ingår i många kylvattentillsatser för både öppna och slutna system. Kombineras gärna med trietanolaminfosfat, bensoat eller silikat i frostskyddsvätskor, speciellt när vitmetaller skall skyddas.

Passivering av metallytorna ger mycket effektiv korrosionsminskning, alla vattenexponerade ytor får då liknande potential och korrosionsströmmen går ned. Fosfonater i kombination med dispergeringsmedel används för detta ändamål. Fosfonat bildar komplex med trevärt järn, rensar bort hydroxider och karbonater och håller metallytan ren så att en tunn skyddsoxidfilm kan utbildas. Tanniner (garvsyror) bildar med järn svårslösliga föreningar och ger en tunn avsättning som isolerar metallytan. Ytterligare en effekt är att tanninerna reducerar syre, detta dämpar också katodreaktionen.

15.6.3 Beläggningsinhibitorer

Ämnen som kan ge beläggningar bör så långt det är möjligt minimeras genom förbehandling av spädvattnet, men då detta sällan är tillräckligt eller ekonomiskt försvarbart används kemikalier för att hålla salterna i lösning.

Flera av de ämnen som används för passivering används också för att hindra beläggning av hårdhet och andra ämnen. Man har tidigare styrt vattenkemins jämvikt till att vara kalklösande, och därefter kompenserat den ökande korrosionen med starka inhibitorer som kunnat innehålla zink och krom. Detta är inte godtagbart längre. Därför styr man nu hellre vattenkemin till kalkfällande jämvikt och kompenserar för utfällningarna med hjälp av tröskelinhibitorer och dispergerande ämnen. Kännetecknande för en tröskelinhibitor är att redan en låg halt hindrar uppbyggnaden av en hård, jämn kristallstruktur, de bildade utfällningarna blir istället deformerade och faller lätt sönder. När tröskelvärdet har uppnåtts ökar inte effekten av en ökad dosering. I kombination med lämpligt dispergeringsmedel kan sedan bildat slam eller kolloida partiklar transporteras ut med avblödningen. *Se kapitel 15.4.2 om mättnadsindex.*

Kustbelägna anläggningar som använder saltvatten råkar ibland ut för att värmväxlare sätter igen sig av musslor, som kommer in som sporer. I en skyddad och varm miljö kan de sedan utvecklas till stora kolonier, som så småningom blockerar eller spränger värmväxlaren. Här har filmbildande aminer visat sig ha en viss effekt, eftersom de hindrar sporer att få fäste. Speciella biocider har utvecklats, men eftersom musslor reagerar snabbt på förändringar i vattenkvalitet kan de komma att hålla sig stängda under lång tid och vänta på normalisering av vattnet.

15.6.4 Biocider

Biologisk aktivitet förekommer i alla obehandlade vatten. Fritt rörliga, planktoniska organismer ger inte några problem med värmeöverföring eller korrosion, men kan fastna på olika ställen och starta tillväxt av en biofilm. Filmen orsakar korrosion och försämrar anläggningsprestanda. I ett kyltornssystem föreligger risk för utveckling och spridning av

legionella. Har legionella konstaterats i halter över godkänd aktionsgräns måste sanering utföras enligt ett noga föreskrivet förfaringssätt. Legionella förekommer inte i rena system.

Biocider sätts oftast in för att begränsa bioaktiviteten. Det är knappast möjligt eller försvarbart att hålla ett kylsystem helt sterilt, möjligen undantaget speciella slutna kylkretsar. Biocid betecknar ett ämne som kan döda levande organismer, olika prefix används för att ange den typ av organism som medlet avser att avdöda, t ex algicid, fungicid, baktericid.

Sedan september 2013 gäller nya regler för användningen av biocider. Det verksamma ämnet måste vara upptaget i en EU-förteckning och godkänt för att ingå i en viss produkttyp. Andra ämnen kan användas som ytrengöringsmedel utan att vara klassade som biocider. Ett kylsystem måste inte steriliseras för att vara funktionellt, däremot måste ytorna vara rena.

Klor, även brom och jod, i olika former har utbredd användning som oxiderande biocid. Kan förekomma som klorgas, natriumhypoklorit, klordioxid, kloraminer, bromoklorföreningar m.m. Ofta kostnadseffektiv och med brett verkansområde. Bäst vid lågt eller neutralt pH. Ökar korrosiviteten och bildar svårnedbrytbara halogenorganiska föreningar. Oxiderande biocider används ofta i låg dos vid kontinuerlig dosering.

Andra oxiderande biocider kan vara baserade på väteperoxid, ozon, natriumperkarbonat eller andra syrefrisättande salter. Hindrar utveckling av anaerober. Användbart vid slutna system men inte kostnadseffektivt i kyltorn.

Icke oxiderande biocider ger mindre korrosivitet men kan vid nedbrytningen tillföra oönskade komponenter och utveckla resistens. De binder ofta till cellens yta där cellväggen förstörs eller stryps så att näringstransport förhindras. De kan även vara ytaktiva och tränga igenom beläggningar och cellmembran.

Kvartära ammoniumföreningar är verksamma mot både slem- och algväxt, de har god vätförmåga och har egenskaper som katjonaktiva dispergeringsmedel. De kan skräddarsys för att ges lämpligt verkansspektrum. Kan användas vid högt pH. Vid nedbrytningen frisätts organiska ämnen och kväveföreningar som verkar gödande.

Tetrakishydroximetylfosfoniumsulfat (THPS) förstör cellväggen på bakterier. Risk för allergi.

Alkyloligoamider har god verkan mot grampositiva bakterier och alger.

Organiska svavelföreningar av karbamattyp har bra verkan mot anaerobt växande organismer såsom sulfatreducerande bakterier.

Bromnitropropandiol binder till cellväggen och stryper ämnestransporten. Kan tas upp genom huden.

Glutaraldehyd blockerar mikroorganismernas proteinbindningar och stoppar ämnesomsättningen. Även avlagrat slem och anaerober angrips och löses upp. Risk för allergi.

Isothiazolin-on är verksamt mot ett brett spektrum av mikroorganismer, även anaerober och grönalger. Den påverkar cellens enzymsystem, stryper metabolismen och är reproduktionsstörande. Långsam reaktion och bra varaktighet. Allergiframkallande och sensibiliserande vid överskriden tröskelnivå.

Det finns flera mer eller mindre vanliga kemikalier för att minska bioaktiviteten eller lösa upp avlagrad biofilm. Dispergeringsmedel och vätmedel gynnar rengöringsprocessen. Har olja eller liknande föroreningar kommit in i systemet kan biofilm snabbt utvecklas. Om anläggningen tål det kan det räcka med kraftig lutdosering eller ångbehandling för att få rent. Är det fråga om rengöring vid för hög halt av legionellabakterier finns rekommenderade metoder för sanering utgivna av bl.a. EWGLI (The European Working Group for Legionella Infections).

Som alternativ till kemisk behandling rekommenderas ibland metoder som bygger på ultraviolett ljus, högfrekvent ljud, kraftig turbulens mm. Fördelarna är bl.a. mindre kemikalieutsläpp och ingen risk för resistensbildning. Metoderna kan vara goda komplement men påverkar endast vattnet lokalt och momentant och har ingen räckvidd vidare in i systemet.

Om man känner till vilken typ av mikroorganismer som infekterat anläggningen kan man rikta behandlingen mot just dessa och på så sätt använda minsta möjliga mängd kemikalier. Man måste dock vara uppmärksam på att för liten dosering kan få motsatt effekt, detta gäller speciellt för icke oxiderande biocider, och även bedöma risken för att utslagning av en typ av organism kan möjliggöra för en konkurrerande art att få livsrum.

Ofta används två eller flera olika biocider används växelvis för att förhindra att mikroorganismerna i ett kylvattensystem blir resistenta mot behandlingen.

Ett vanligt sätt att begränsa kemikalieanvändningen är att utföra chockbehandling med hög dos biocid i stället för en kontinuerligt tillförd låg dos. Avdödat och lösgjort material måste snarast avlägsnas ur systemet genom effektiv filtrering eller vattenbyte, i annat fall återkommer tillväxten inom kort och ofta med högre intensitet. Denna åtgärd är speciellt angelägen i samband med lokalt verkande system som endast angriper planktoniska organismer, i annat fall kommer avdödat biologiskt material att kunna gynna bildningen av sessila (fastsittande) biofilmer.

15.7 Legionella

Legionella är ett släkte av gramnegativa bakterier i familjen Legionellaceae. Flera legionellaarter kan orsaka Legionärssjukan och Pontiacfeber. Den vanligaste arten är *Legionella pneumophila*. Bakterierna kallas ibland för jordbakterier, eftersom de förekommer i naturen i organiskt material.

Det finns mer än 50 identifierade arter av legionellabakterier, men bara en del av dessa orsakar lunginflammation. Bakterierna är gramnegativa, stavformade och har typisk storlek mellan 0,4 och 2 µm. Ofta växer de ut till långa kedjor av celler med längden 20 µm. De lever endast i sötvatten, men klarar av den högre salthalten inne i makrofager och amöbor, där de kan föröka sig kraftigt, celledning efter 1,5 till 3 timmar. När värdorganismen sprängs frigörs flera fagosomer med 10-20 legionellabakterier i varje.

Legionella och dess värdorganismer fastnar och lever gärna i biofilm, tillskott av järnsalter gynnar tillväxten. Tillväxt har påvisats inom temperaturområdet 18-42 °C, med ett optimum omkring 35 °C. Vid lägre temperatur stannar tillväxten, och vid 55-60 °C sker avdödning, vid 70 °C redan inom någon minut. Legionella trivs bäst när pH-värdet är omkring pH 7 eller strax under.

15.7.1 Legionärssjuka och Pontiacfeber

Legionella i kylvatten utgör ett speciellt uppmärksammat problemområde, sedan ett antal krigsveteraner drabbats av svår lunginflammation efter en kongress i Philadelphia 1976. Av de drabbade legionärerna avled senare 29 stycken. En tidigare okänd bakterie, som fick namnet Legionella Pneumophila, hade troligen spridits med vattendroppar från ventilationssystemet. Bakterien har senare identifierats på flera platser i världen i samband med svårare lunginflammation, många fall med dödlig utgång. Det första konstaterade smittfallet i Sverige inträffade 1979 i köpcentret Punkt i Västerås.

Smitta sprids oftast genom att bakterierna följer med aerosoler från kyltorn, spraybefuktare, bubbelbad, duschar, bioreningsbassänger, fordonstvättar, fontäner mm. Organismerna har där kunnat växa till i en biofilm i rörledningar och behållare, för att därefter slitas loss och tillfälligt vara planktoniska. Smitta sprids inte genom att dricka legionellainfekterat vatten eller genom kontakt mellan människor. Man kan inte vara kronisk bärare av Legionella, däremot kan antikroppar påvisas.

Sjukdomen är en nedre luftvägsinfektion, det krävs att bakterierna tränger ända ut i lungalveolerna, det skall dessutom vara tillräckligt många bakterier för att immunförsvaret skall kunna slå ut. Därav följer att personer med nedsatt immunförvar drabbas oftare och allvarigare. Rökare, vars naturliga slemhinnor och flimmerhår satts ur funktion, infekteras lättare, liksom äldre personer och alkoholmissbrukare. Män drabbas oftare än kvinnor. Inkubationstiden kan variera från 2 till 10 dagar men är ofta 5-6 dagar. Symptomen är hosta, hög feber, huvudvärk, bröstsmärtor och muskelvärk, även diarré och förvirring kan tillstöta. Sjukdomen kräver snabb insättning av antibiotika, möjligen även behandling i respirator.

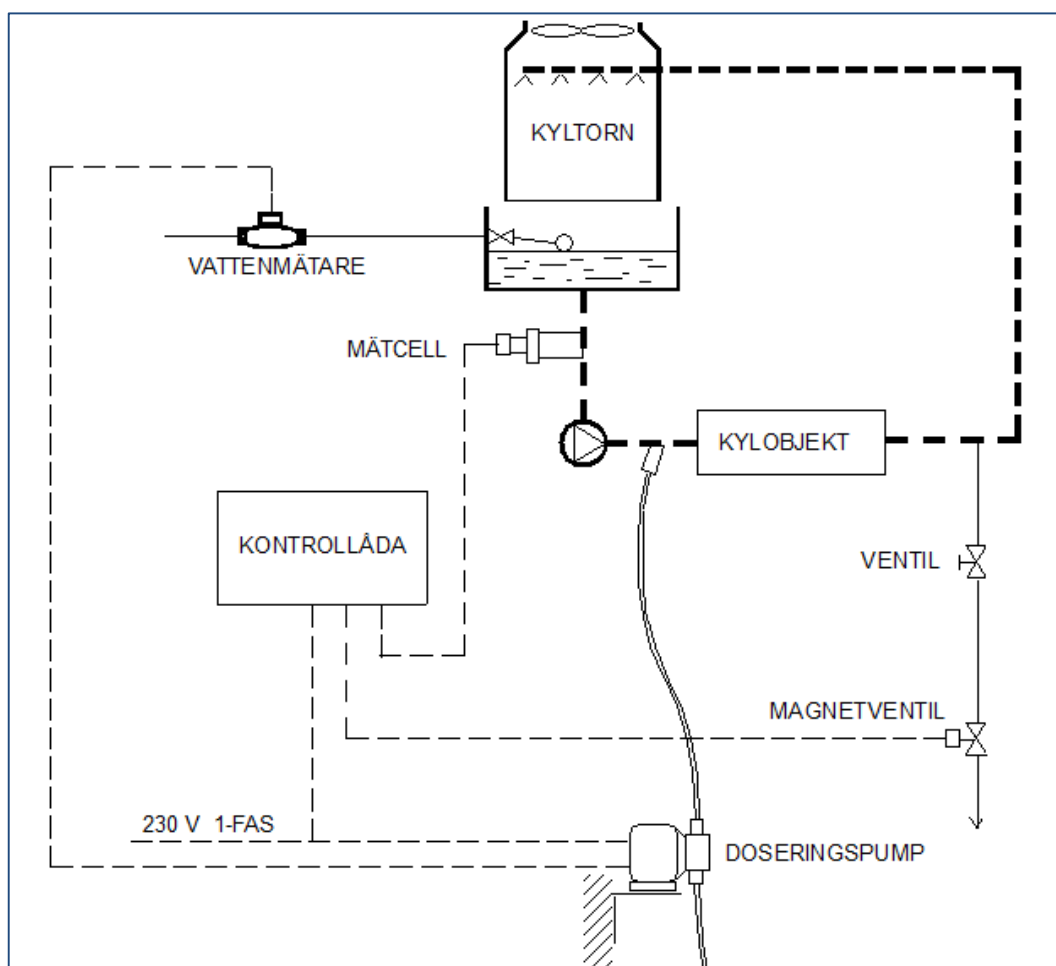
Pontiacfeber, som orsakas av samma bakterie som Legionella, visar istället symptom som vanlig influensa. Dessa uppträder redan 1-2 dagar efter infektionen men brukar mera sällan diagnostiseras. Sjukdomen brukar gå över utan behandling inom 3-7 dagar. Det finns grund att anta att de flesta av oss har utsatts för legionellabakterier utan att påverkas.

Legionellainfektion är enligt lag en anmälningspliktig sjukdom som skall anmälas till landstingets smittskyddsläkare och Folkhälsomyndigheten för smittspårning. Misstänkta utbrott vid en anläggning skall rapporteras till kommunens miljökontor.

15.8 Styrning och övervakning

Kontroll och övervakning har avgörande betydelse för resultatet av vattenbehandlingen, detta är speciellt angeläget vid öppna recirkulerande system där vattenkvaliteten kan ändras snabbt. En bra analys av råvattnet ger underlag för bedömning av behovet av förbehandling och visar vilka kontrollparametrar som är begränsande för vattnets användningsområde.

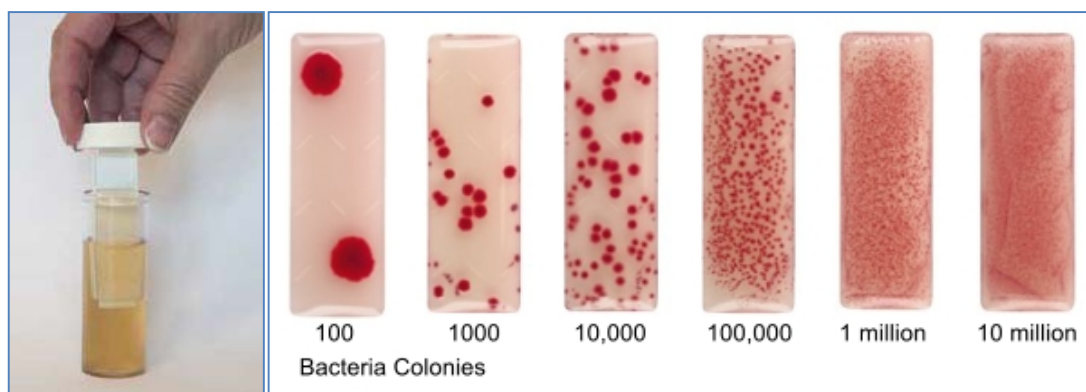
Ett automatiskt system för dosering och avtappning av kylvatten rekommenderas för att kunna erhålla en bra kontroll av vattenkvaliteten. Avtappningen bör vara konduktivitetsstyrd, även om någon annan parameter egentligen är avgörande. Regelbundna manuella analyser får sedan bekräfta om konduktiviteten svarar mot övriga gränsvärden. Anledningen är att mätning av t.ex. pH-värde eller inhibitorhalt är svårare/dyrare än att mäta konduktivitet.



Figur 245. *Exempel på automatisk dosering och avtappning*

Figure 245. *Schematic diagram of an automatic dosing and blowdown system*

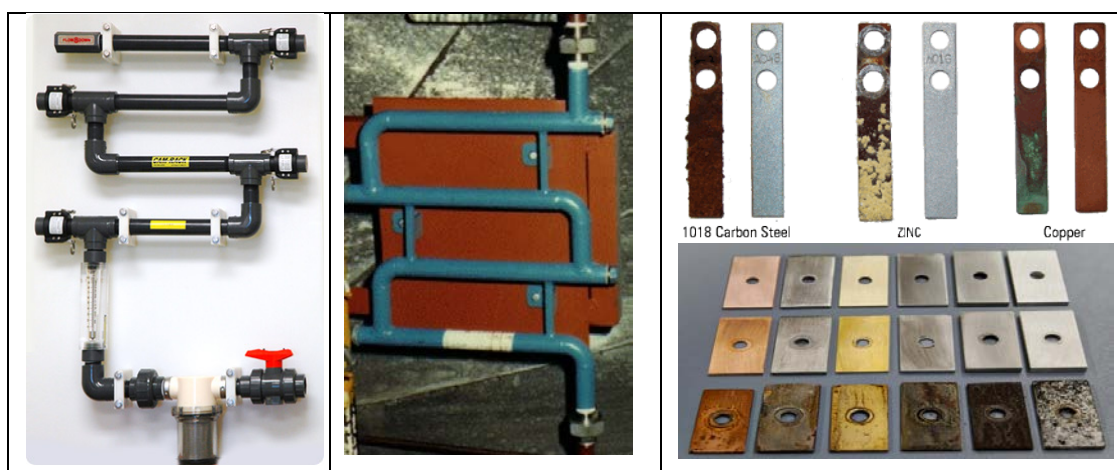
När det gäller biologisk aktivitet specificeras ibland aktionsnivåer, kontroll görs då med teststickor eller laborieprov. Teststickor (dipslides) är ett effektivt sätt att få en fingervisning om den mikrobiella aktiviteten i kylvattensystemet. Se Figur 246. Dessa mäter emellertid endast planktonisk aktivitet. Biofilm kan mycket väl utvecklas utan att ge särskilt stort utslag på bakterietesterna. Monitorer för biofilm har utvecklats, men fortfarande gäller att manuella inspektioner är säkrare. En bypass-ledning kan användas för ändamålet.



Figur 246. Teststickor för mätning av mikrobiell tillväxt i kylvattensystem.

Figure 246. Dipslides for microbial control in cooling water systems

Genom att installera utrustning för att mäta korrosionshastigheten i systemet kan man kontrollera att tillsatta kemikalier har avsedd verkan. Det finns instrument som kontinuerligt mäter korrosionshastigheten genom att mäta korrosionsströmmen mellan två elektrodytor. Ett enklare alternativ är att installera en rigg utrustad men demonterbara testkuponger av förekommande metaller. Se Figur 247.



Figur 247. Korrosionsriggar och resultat av mätningar med korrosionskuponger

Figure 247. Coupon racks and exposed corrosion coupons.

16 Rekommendationer för nya kraftvärmeverk

Nedanstående rekommendationer bör ställas som krav på leverantören av ett nytt kraftvärmeverk. Flertalet rekommendationer gäller även för industrianläggningar och pannor som installeras i befintlig anläggning.

16.1 Avsaltning av spädvatten

- Dosering av dispergeringsmedel som ett alternativ till avhärtningsfilter rekommenderas inte som förbehandling till RO-aggregat där permeatet därefter ska poleras i ett EDI-aggregat. Detta för att undvika att hårdhet (kalcium) läcker igenom RO-membranen. Redan mycket låga halter kalcium kan förgifta EDI-aggregatet.
- Garantivärden på spädvatten ska alltid anges efter EDI-aggregatet, d.v.s. före ett eventuellt blandbäddsfilt. (Det gäller dock ej rena jonbytesanläggningar).
- Garantivärden för kisel och natrium bör anges i $\mu\text{g/l}$. Om halten anges i mg/l ska den anges med tre decimaler, t.ex. $<0,010 \text{ mg/l}$ (inte $<0,01 \text{ mg/l}$).

16.2 Kondensatfilter

- I anläggningar med kondensatfilter blir uppstartstiden kortare då kondensatet bara behöver dumpas en kortare period. Ett väl fungerande kondensatfilter kan minska följd effekterna av förhöjda järnhalter i kondensatet.
- Kondensatfilter är inte ett krav men generellt rekommenderas installation av precoatfilter i anläggningar med tryck över 100 bar.
- Patronfilter med avskiljningsgrad på $1 \mu\text{m}$ kan användas i mindre och medelstora anläggningar där denna filtreringseffekt är tillräcklig. Investeringskostnaden är låg, men driftkostnaden relativt hög.

16.3 Provtagningsystem

- Alla provuttag på ånga ska förses med provtagningssonder.
- Sönderna ska dimensioneras för isokinetisk provtagning.
- Beräkningarna för isokinetisk provtagning ska ingå i dokumentationen.
- Det ska vara möjligt att ha ett flöde av $1,8 \text{ m/s}$ i vattenfasen i provtagningsledningen vid provtagning av järn.
- Provuttaget för pannvatten bör förses med en provtagningssond, det är dock inte ett krav.
- Provuttaget för pannvatten ska placeras i en falltub. Det är inte acceptabelt att placera provuttaget på bottenblåsningsledningen.
- Provuttag för ånga bör förses med en lokal kylare placerad direkt efter rotventilen. Kylaren kan förslagsvis kylas med fjärrvärmevatten eller spädvatten för energiåtervinning.
- Provtagningssond och rotventiler behöver inte vara av rostfritt syrafast stål utan kan utföras i samma material som i huvudledningen. Nedströms rotventilen ska provtagningsledningen utföras i rostfritt syrafast stål. Avståndet mellan rotventil och den rostfria syrafasta ledningen ska vara så kort som möjligt.

- Provtagningsledningen ska ha en invändig diameter på 4-6 mm med undantag för provtagning på ångledningar med tryck under 50 bar där en grövre dimension behövs för att säkerställa ett tillräckligt flöde.
- Ett slutet kylsystem med jämn temperatur rekommenderas.

16.4 Online-instrumentering

- Omfattning minst enligt rekommendationerna i kapitel 9.3.4.
- I tabellen nedan visas en sammanställning av de parametrar som är så viktiga, för en anläggning med avsaltat spädvatten, att de bör övervakas kontinuerligt.

anläggning	provpunkt	pH-värde	konduktivitet total	konduktivitet sur	kiselsyra	natrium	restsyre
alla	avsaltningen		X		X		
	ånga			X	X	X	
	kondensat	X					
pannor med	matarvatten			X			X
FOSFAT-dosering	pannvatten	X	X				
pannor med	matarvatten			X			X
AVT-kemi	pannvatten	X		X			
pannor med	matarvatten			X			X
LUT-dosering	pannvatten	X	X	X			

- OBSERVERA att denna minsta omfattning av online-instrument inte ger en heltäckande övervakning av vatten-ångcykeln utan måste kompletteras med mer omfattande manuella vattenanalyser.
- En utökad online-instrumentering medför en mindre omfattning av manuella analyser.

16.5 Dosering

- Storlek på doseringspumpar ska väljas så att alla doseringarna kan göras med så koncentrerade lösningar som möjligt.
- Någon rekommendation för val av lämplig doseringsfilosofi (AVT, LUT, PT, OT) ges inte i handboken.
- Doseringen av ammoniak/aminer för pH-justerings av ånga och kondensat bör styras mot konduktiviteten i ångan.
- Eventuell dosering av lut eller fosfat för pH-justerings av pannvatten bör styras mot konduktiviteten i pannvattnet.
- Syrereducerande kemikalier ska inte behöva doseras vid normal drift, men ska kunna doseras i samband med driftstörningar i avgasningen.

16.6 Uppstart

- Pannan ska konserveras under tiden mellan provtryckning och betning.
- Pannan ska konserveras under tiden mellan betning och driftsättning.
- Alla online-instrument ska vara driftsatta innan uppstart av anläggningen.
- Vid uppstart måste kondensatet köras till avlopp (dumpas) till dess att huvuddelen av korrosionsprodukterna har avlägsnats och gällande riktvärden uppfylls, åtminstone ÅN2 (åtgärdsnivå 2).
- I anläggningar med kondensatfilter kan kondensatet tas tillbaka tidigare under förutsättning att filtret är inkopplat och gällande riktvärde efter kondensatfiltret uppfyller åtminstone ÅN2.

16.7 Konservering

- Rutiner ska finnas för både korta och långa stopp. Med korta stopp menas stopp på ett par timmar upp till två veckor och med långa stopp menas stopp på över två veckor.

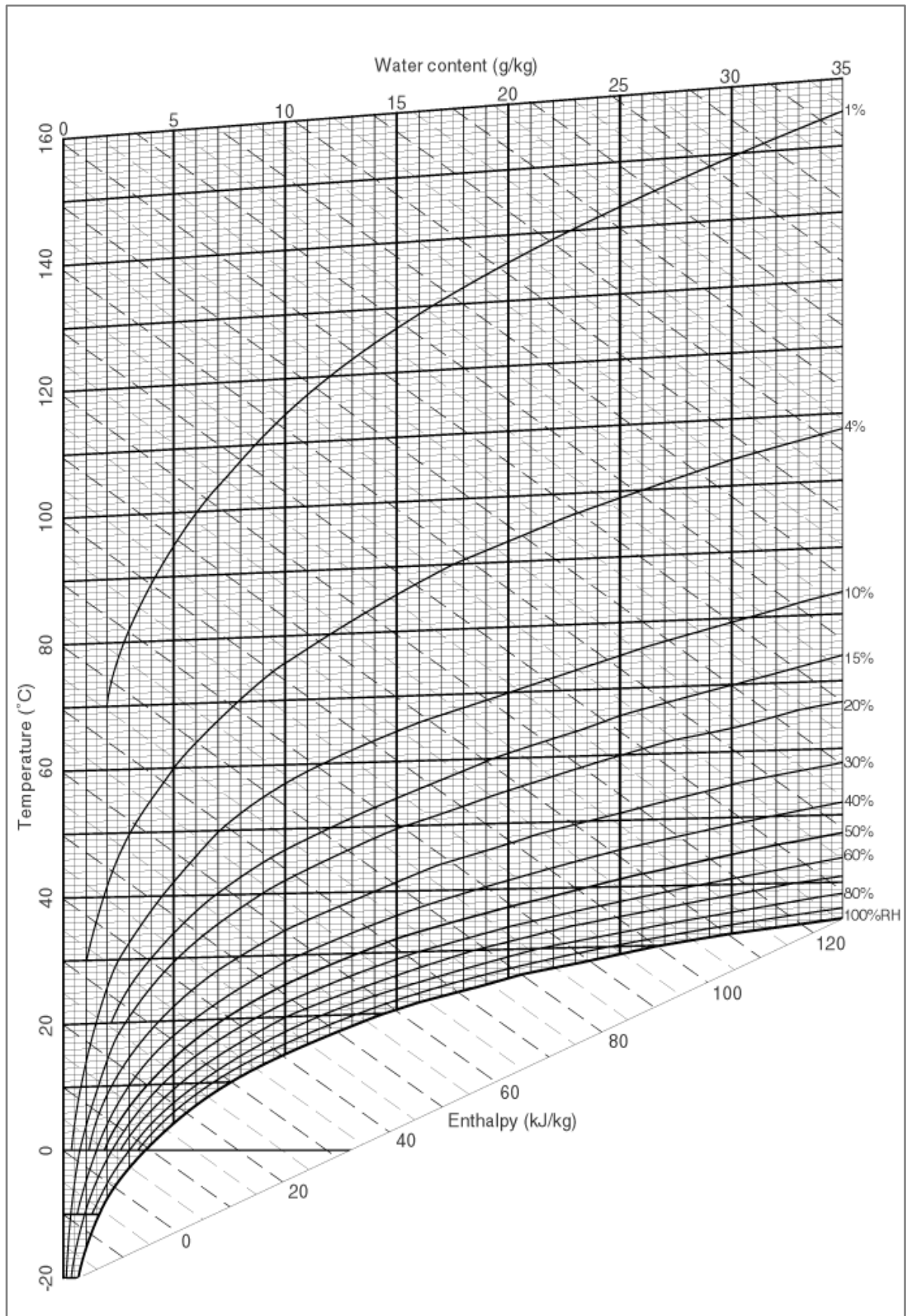
A Periodiska Systemet

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H Hydrogen 1,008	2 He Helium 4,002602	3 Li Litium 6,94	4 Be Beryllium 9,012182	5 B Bor 10,81	6 C Koldioxid 12,011	7 N Kväve 14,007	8 O Syre 15,999	9 F Fluor 18,998	10 Ne Neon 20,1797	11 Na Natrium 22,989	12 Mg Magnesium 24,305	13 Al Aluminium 26,981	14 Si Kisel 28,085	15 P Fosfor 30,973	16 S Svavel 32,06	17 Cl Klor 35,45	18 Ar Argon 39,948
19 K Kalium 39,0983	20 Ca Kalcium 40,078	21 Sc Skandium 44,955	22 Ti Titan 47,867	23 V Vanadin 50,9415	24 Cr Krom 51,9961	25 Mn Mangan 54,938	26 Fe Järn 55,845	27 Co Kobolt 58,933	28 Ni Nickel 58,6934	29 Cu Koppar 63,546	30 Zn Zink 65,38	31 Ga Gallium 69,723	32 Ge Germanium 72,63	33 As Arsenik 74,921	34 Se Selen 78,971	35 Br Brom 79,904	36 Kr Krypton 83,798
37 Rb Rubidium 85,4678	38 Sr Strontium 87,62	39 Y Yttrium 88,90584	40 Zr Zirkonium 91,224	41 Nb Nickel 92,90637	42 Mo Molybden 95,95	43 Tc Teknetium (98)	44 Ru Rutenium 101,07	45 Rh Rodium 102,905	46 Pd Palladium 106,42	47 Ag Silver 107,8682	48 Cd Kadmium 112,414	49 In Indium 114,818	50 Sn Tenn 118,710	51 Sb Antimon 121,760	52 Te Tellur 127,60	53 I Jod 126,90	54 Xe Xenon 131,293
55 Cs Cesium 132,90	56 Ba Barium 137,327	57-71 La Lantan 138,90	72 Hf Hafnium 178,49	73 Ta Tantal 180,94	74 W Volfram 183,84	75 Re Rhenium 186,207	76 Os Osmium 190,23	77 Ir Iridium 192,217	78 Pt Platina 195,084	79 Au Guld 196,96	80 Hg Kviksilver 200,59	81 Tl Tallium 204,38	82 Pb Bly 207,2	83 Bi Vismut 208,98	84 Po Polonium (209)	85 At Astat (210)	86 Rn Radon (222)
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89-103 Ac Aktinid (227)	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (268)	106 Sg Seaborgium (271)	107 Bh Bohrium (272)	108 Hs Hassium (270)	109 Mt Meitnerium (276)	110 Ds Darmstadtium (281)	111 Rg Roentgenium (280)	112 Cn Copernicium (285)	113 Uut Ununium (284)	114 Fl Flerovium (289)	115 Uup Ununpentium (288)	116 Lv Livermorium (293)	117 Uus Ununseptium (294)	118 Uuo Ununoctium (294)
101 La Lantan 138,90	102 Ce Cerium 140,116	103 Pr Praseodym 140,90	104 Nd Neodym 144,242	105 Pm Prometium (145)	106 Sm Samarium 150,36	107 Eu Europium 151,964	108 Gd Gadolinium 157,25	109 Tb Terbium 158,92	110 Dy Dysprosium 162,500	111 Ho Holmium 164,93	112 Er Erbium 167,259	113 Tm Thulium 168,93	114 Yb Ytterbium 173,054	115 Lu Lutetium 174,968	116 La Lantan 138,90	117 Ce Cerium 140,116	118 Pr Praseodym 140,90
137 Ac Aktinid (227)	138 Th Torium 232,0377	139 Pa Protaktinium 231,03	140 U Uran 238,02	141 Np Neptunium (237)	142 Pu Plutonium (244)	143 Am Americium (243)	144 Cm Curium (247)	145 Bk Berkelium (247)	146 Cf Californium (251)	147 Es Einsteinium (252)	148 Fm Fermium (257)	149 Md Mendelevium (258)	150 No Nobelium (259)	151 Lr Lawrencium (262)	152 Ac Aktinid (227)	153 Th Torium 232,0377	154 Pa Protaktinium 231,03

Atommassor inom parentes är ämnets vanligaste eller stabilaste isotop.

Periodiska Systemet Design och användargränssnitt Copyright © 1997 Michael Dayah. Ptable.com Senast uppdaterad 20 sep 2014

B Mollierdiagram



HANDBOK I VATTENKEMI FÖR ENERGIANLÄGGNINGAR

Handbok i vattenkemi för energianläggningar sammanfattar den kunskap om vattenbehandling för energianläggningar som finns utgiven på svenska.

Syftet med handboken är att fylla energibranschens och industrins behov av dels en modern introduktion till vattenbehandlingens praxis och till vattenkemien på svenska, dels ett uppslagsverk som ger ett första svar till de frågor som uppstår i den dagliga verksamheten.

Handboken riktar sig till driftpersonal, kemister, driftansvariga och alla andra som kommer i kontakt med vattenfrågor.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk