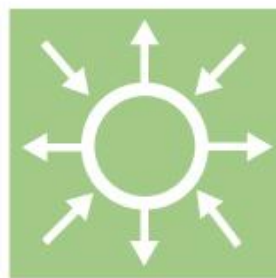
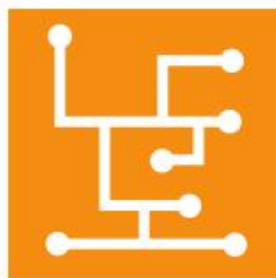


Studie av vattenlinjekorrosion på tätplåt ingjuten i betong vid kondensationsbassäng

Elforsk rapport 09:20



Bror Sederholm & Mariusz Kalinowski & Kaija Eistrat December 2008

ELFORSK

Studie av vattenlinjekorrosion på tätplåt ingjuten i betong vid kondensationsbassäng

I. Litteraturgenomgång

II. Undersökning av risken för vattenlinje-
korrosion på ingjuten i cylinderväggen –
Barsebäck I.

Elforsk rapport 09:20

Förord

Från och med 2007 påbörjades inom Elforsk ett nytt forskningsprogram kring betongkonstruktioner inom kärnkraftverken. Det finns ett behov av att bygga både kompetens och att utveckla teknikbasen för teknisk förvaltning av byggnader och konstruktioner inom kärnkraftindustrin. Det övergripande målet med det betongtekniska programmet är att säkerställa avsedd livslängd och hög tillgänglighet för svenska kärnkraftverk med bibehållen säkerhet.

Programmet finansieras av Vattenfall, av kärnkraftverken i Forsmark, Ringhals samt OKG i Oskarshamn, av Strålsäkerhetsmyndigheten (SSM) samt av Teollisuuden Voima Oy (TVO) i Finland.

Inom ramen för detta forskningsprogram har föreliggande projekt beställts för att studera om miljön som råder i en kondensationsbassäng kring vattenlinjen i spalten mellan stål och betong är korrosiv. Projektet som genomförts av Swerea KIMAB i samarbete med Cement och Betonginstitutet (CBI) har följts av Betongprogrammets styrgrupp bestående av Jonas Bergfors och Mårten Larson EON OKG, Jan Gustavsson och Urban Broms Vattenfall Ringhals, Christian Bernstone och Manouchehr Hassanzadeh Vattenfall Research and Development, Kostas Xanthopoulos SSM, Lars-Erik Berglund Vattenfall Forsmark samt Juha Riihimäki TVO. Elforsk tackar styrgruppen för värdefulla synpunkter och kommentarer.

Elforsk i februari 2009

Lars Wrangensten

Programområde El- och Värmeproduktion

Sammanfattning

Kondensationsbassängen vid svenska kärnkraftverk av BWR-typ består av en inre cylindrisk behållare av rostfritt stål omgiven av betong. En tätningssplåt av kolstål är ingjuten i betongväggen ca 300 mm från den rostfria behållaren. Från den inre, rostfria behållaren kan vatten läcka ut till betonginneslutningen, vilket kan innebära risk för korrosion på tätplåten.

Rapportens första del är en sammanställning av litteraturuppgifter rörande vattenlinjekorrosion och inverkan av helt eller delvis vätskefyllda hålrum vid en betongingjuten stållyta.

I rapportens andra del redovisas undersökningar av korrosionstillståndet hos insidan av tätplåten i Barsebäckverket I. Även betongprover har tagits ut från kondensationsbassängen in till tätplåten och undersökts på laboratorium.

På en stålkonstruktion som är delvis nersänkt i vatten styrs korrosionshastigheten generellt av syretillgången, med den högsta hastigheten strax ovanför eller i vattenytan, där tillgång till både elektrolyt och syre är god. Omkring själva vätskeytan (vattenlinjen) kan fördelningen av korrosionsangrepp modifieras av koncentrationsceller, så kallad vattenlinjekorrosion.

Den specifika vattenlinjekorrosionen drivs av skillnader i olika miljöfaktorer, framför allt syretillgång. Vattenlinjeförhållanden är tänkbara vid tätplåten dels omkring den vattenlinje som utläckande vatten bildar i betongen, dels i delvis vätskefyllda hålrum vid metallytan. Vattenlinjekorrosion genom luftningsceller eller andra koncentrationsceller ökar risken för genomfrätningar, även om den sammanlagda korrosionshastigheten inte ökar, genom att angreppen koncentreras till ett mindre område och får en mer lokal karaktär. Korrosionsangreppen i en luftningscell sker på den syrefattigare delen.

Korrosion på bara (inte betongtäckta) stållytor, som i håligheter, har i försök initierats även vid mycket låga kloridhalter och högt pH i omgivande betong. Hålrum i sig kan alltså utgöra en korrosionsrisk.

Från resultaten av undersökningarna, dels av korrosionstillståndet hos tätplåten och dels av uttagna betongprover från kondensationsbassängen i Barsebäck I kan följande slutsatser dras:

- Okulära undersökningar av tätplåtens korrosionstillstånd visade att tätplåten enbart har ytliga korrosionsangrepp. Tätplåten har inte varit utsatt för vattenlinjekorrosion.
- Korrosionsprodukternas utseende på tätplåten varierade med tillgången av syre. Röda, gråa och svartfärgade korrosionsprodukter förekom, sannolikt järnoxidhydroxid (FeOOH), hematit (Fe_2O_3) respektive magnetit (Fe_3O_4).
- De ytliga korrosionsangrepp som förekommer på tätplåten beror troligtvis på att kondensationsbassängen varit tömd sedan 2000, vilket lokalt förändrat miljön i kontaktytan mellan betong och stål: upptorkning, större syretillgång.
- Betongen i de undersökta borrhärnorna är överlag i bra kondition.

- Sprickfrekvensen i betongen är låg, utom i betongens yttre skikt (0-2 mm). Yttre skikt hos betongproverna där mikrosprickfrekvensen är hög till mycket hög har ett maximalt djup på 2 mm i alla prover utom 1:5 (hög sprickfrekvens till ett djup av 11 mm) och 3:3 (hög sprickfrekvens till ett djup av 4 mm).
- pH-värdet i vatten som är i kontakt med betongens bindemedel är ca 12,5.
- Betongens yttre skikt (djup i betongen: 0-2 mm) är karbonatiserat och visar tecken på fuktangrepp i form av partiell urlakning av cementpasta.
- Fuktbelastning på betongen har medfört bildning av sekundär ettringit i betongens luftporer. Denna bildning har inte någon betydande inverkan på betongens egenskaper.

Summary

The reactor containment in Swedish BWR-type nuclear power plants consists of an inner cylinder-shaped container of stainless steel, with an outer liner of carbon steel about 300 mm from the stainless steel container, both cast in concrete. If water leaks from the inner stainless steel container into the concrete, the risk of corrosion on the carbon steel liner may be increased by the presence of a waterline, and voids in the concrete at the metal surface.

The first part of the report is a survey of published information regarding waterline corrosion and the effect of wholly or partly liquid-filled voids at a steel surface cast in concrete.

The second part is a report on the investigations of the corrosion status of the steel liner on the inside of the reactor containment at the Barsebäckverket I plant and of the laboratory investigations of the concrete samples that were taken from the reactor containment wall.

The waterline corrosion effect is caused by local differences in environmental factors at the water/air border, primarily the supply of oxygen (air), which allows corrosion cells similar to galvanic cells to be set up. On a vertical, partly immersed steel structure the corrosion rate largely varies with the supply of oxygen, with the highest corrosion rate at or immediately above the waterline, where the supply of both oxygen (air) and electrolyte is good. The relative corrosion rates around the waterline may be modified by the action of various concentration cells.

Waterline effects due to aeration cells or other concentration cells have been shown to increase the risk for corrosion damage locally, even when the overall corrosion rate does not increase, since corrosion is concentrated to a smaller area and may have a more localised character. Waterline conditions can also develop at a cast-in metal surface inside partly water-filled voids in the concrete. Voids as such at a concrete/metal interface, leaving metal without adhering concrete, have also been shown to increase the corrosion risk. In laboratory experiments, corrosion on bare (not concrete-covered) metal surfaces occurred at quite low chloride concentration and high pH value in the surrounding concrete.

Based on the results of the investigations of the corrosion status of the steel liner, and of the concrete samples from the reactor containment the following conclusions can be stated:

- Visual inspections of the corrosion state of the steel liner showed that there was only superficial corrosion on the liner. The liner had not been subject to waterline corrosion.
- The appearance of the corrosion products on the steel liner varied with the supply of oxygen. Red, grey and black-coloured corrosion products were present, presumably iron oxide-hydroxide (FeOOH), hematite (Fe_2O_3), and magnetite (Fe_3O_4).
- The superficial corrosion that was observed on the steel liner is probably due to the fact that the reactor containment has been drained of water since 2000, which locally changed the environment in the

interface between concrete and steel: drying-up, with better access of air (oxygen)

- The overall state of the concrete in the examined core samples is good.
- The crack frequency in the concrete is low, except in the outmost (0-2 mm) concrete layer. The top layer with a high frequency of microcracks in the concrete samples has a maximum depth of 2 mm in all samples except 1:5 (high frequency of cracks to a depth of 11 mm) and 3:3 (high frequency of cracks to a depth of 14 mm)
- The pH value of the water in contact with the concrete binder is 12,5.
- The outer layer of the concrete (0-2 mm depth in concrete) is carbonated and shows signs of water damage
- Secondary ettringite had formed in the voids of the concrete as a result of the exposure to humidity. This has no significant influence on the properties of the concrete.

Innehåll

1	Bakgrund	1
2	Syfte	3
3	Litteraturstudie	4
3.1	Vattentransport och vattenlinje i betong	4
3.2	Korrosion vid vattenlinje	6
3.2.1	Vattenlinjekorrosion och koncentrationsceller	8
3.2.2	Lokalisering och omfattning av korrosionsangrepp i vattenlinje....	9
3.2.3	'Vattenlinjekorrosion' i förvaringstankar för kärnbränsle	10
3.2.4	Korrosionshastighet i vattenlinje: laboratorieförsök.....	10
3.2.5	Ökar korrosionen vid en vattenlinje?	11
3.3	Inverkan av hålrum och vattenlinje på korrosion av ingjutet stål.....	12
3.3.1	Korrosion i hålrum i betong vid metallplåt.....	12
3.3.2	Undersökningar av inverkan av hålrum på korrosion av stål i betong	14
3.4	Sammanfattning och slutsatser av litteraturstudie.....	18
4	Experimentellt arbete	21
4.1	Barsebäckverket I	21
4.2	Provtagning och undersökning av tätplåtens korrosionstillstånd	23
4.3	Undersökning av korrosionstillstånd hos tätplåt	24
4.4	Undersökning av betongkärnor	25
4.4.1	Strukturanalys av betong.....	25
4.4.2	Betongens karbonatiseringsdjup	25
4.4.3	Mätning av betongens pH-värde	25
4.4.4	Betongens tryckhållfasthet.....	25
5	Resultat	26
5.1	Korrosionstillstånd hos tätplåt.....	26
5.2	Undersökning av betongkärnor	26
5.2.1	Strukturanalys av betong.....	26
5.2.2	Bestämning av betongens pH-värde	30
5.2.3	Bestämning av betongens tryckhållfasthet	31
6	Diskussion av resultat	32
6.1	Korrosionstillstånd hos tätplåt.....	32
6.2	Undersökning av betongkärnor	33
6.2.1	Fuktpåverkan	33
6.2.2	Karbonatisering av cementpasta och pH	33
6.2.3	Urlakning av cementpasta.....	34
6.2.4	Sprickor i betongen.....	34
6.2.5	Bindemedlets homogenitet.....	35
6.2.6	Utfällning av järnföreningar på betongytan	35
6.3	Slutsatser	36
7	Referenser	37

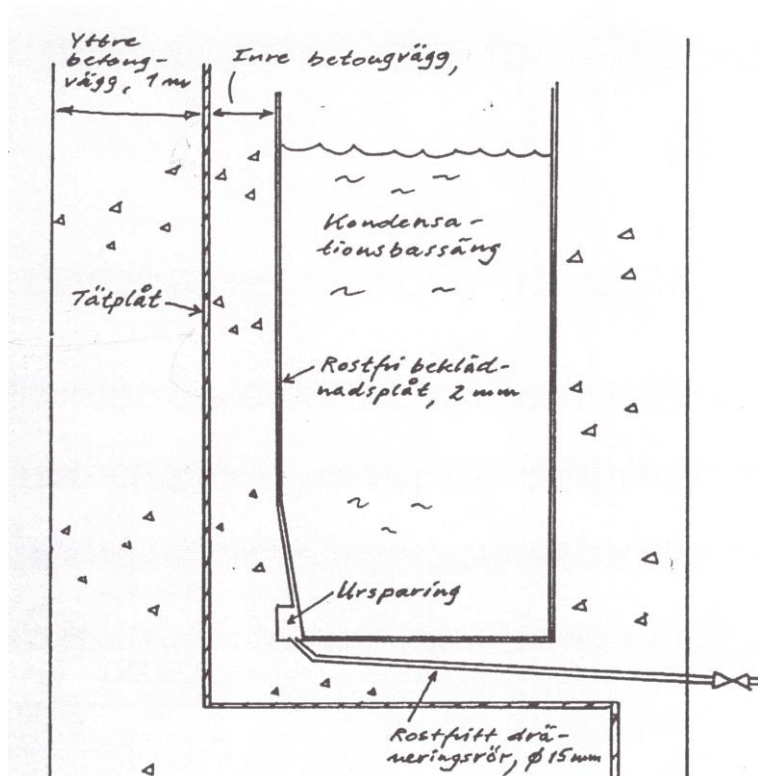
1 Bakgrund

Swerea KIMAB tillsammans med Cement och Betonginstitutet (CBI) driver forskningsprojektet "Studie av vattenlinjekorrosion på ingjuten tätplåt i cylindervägg" som finansieras av ELFORSK. Denna rapport avslutar den första etappen i projektet.

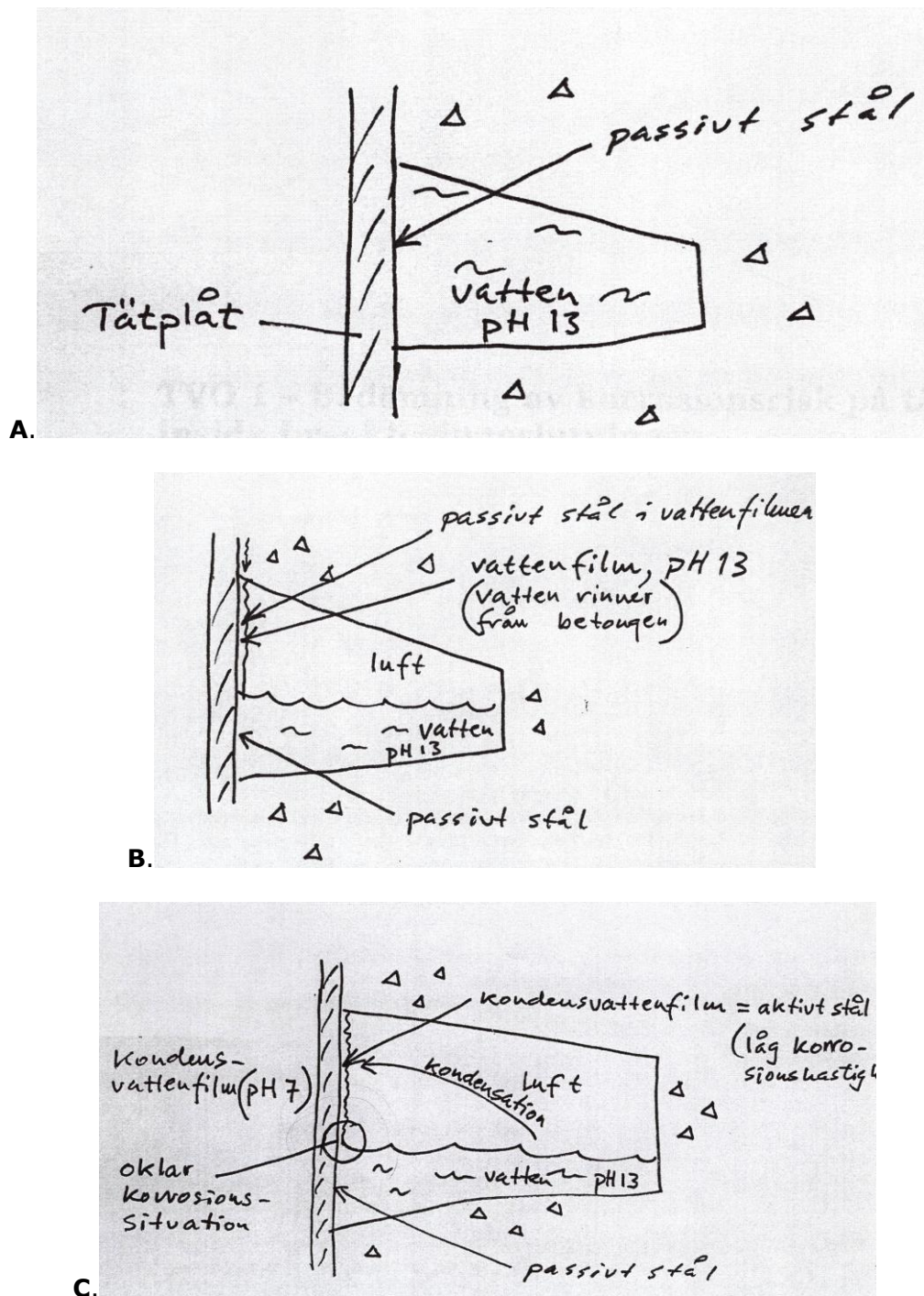
Kondensationsbassängen vid svenska kärnkraftverk av BWR-typ består av en inre cylindrisk behållare av rostfritt stål omgiven av betong. En tätningsplåt av kolstål är ingjuten i betongväggen ca 300 mm från den rostfria behållaren.

Konstruktionen av kondensationsbassängen med tätplåten visas schematiskt i Figur 1.

Från den inre, rostfria behållaren kan vatten läcka ut till betonginneslutningen. Läget för gränsen mellan vattenmättad och inte helt vattenmättad betong vid tätplåten påverkas av bland annat bassängens vattennivå, utläkningsförhållanden och vattentransport i betongen och avdunstning från betongen, Figur 2.



Figur 1 Skiss av kondensationsbassäng med tätplåt (G Camitz & B Sederholm, Presentation av projekt, nov 2007,(1)



Figur 2 a – c: Tankbara förhållanden i hålrum (void) i bruket intill tätningsplåt. (a) helt fyllt hålrum, (b) delvis fyllt hålrum, alkalisk elektrolyt = pressgjutningsvatten eller vatten från betongen; (c) delvis fyllt hålrum, temperaturvariationer, elektrolyt = kondensvatten. (G Camitz & B Sederholm, Presentation av projekt, nov 2007 (1))

2 Syfte

Det övergripande syftet med projektet är att fastställa:

- Om miljön kring vattenlinjen i en spalt mellan stål och betong är särskilt korrosiv.
- Tätplåtens korrosionstillstånd i nivån för vattenståndet i kondensationsbassängen.

Om korrosion vid vattenlinjen förväntas och, påvisats i undersökningen, ska korrosionsmekanismer kartläggas och korrosionshastigheter modelleras.

3 Litteraturstudie

Följande avsnitt är en sammanställning av litteraturuppgifter rörande vattenlinjekorrosion och inverkan av helt eller delvis vätskefyllda hålrum vid en ingjuten stålyta.

Hållbarhet och nedbrytning av armerade betongkonstruktioner allmänt i kärnkraftanläggningar har nyligen behandlats i två utmärkta och omfattande översikter:

- Mats Ullberg 2005 (3) med tyngdpunkt på korrosion av armeringen (2)
- Naus och Graves 2007 (3) med tyngdpunkt på nedbrytning av betongen

Vid en gränsyta mellan vätska och atmosfär (vattenlinje) kan luftningsceller och andra koncentrationsceller bildas som följd av lokala skillnader i miljön, och leda till att korrosionsangrepp inträffar och koncentreras till ett begränsat område ('vattenlinjekorrosion'). Sådana vattenlinjeförhållanden är tänkbara vid tätplåten dels omkring den vattenlinje som utläckande vatten bildar i betongen, dels inuti delvis fyllda hålrum.

Hålrum uppstår genom spalter i konstruktionen, defekter i bruket (porer, hålrum, voids) och eventuella uppbörningar efter gjutningen. I hålrummen blir större eller mindre ytor på tätplåten utan täckning av vidhäftande betong.

Initialt innehåller håligheterna sannolikt pressgjutningsvatten från betongen. Som framgår ovan kan vatten från bassängen tränga in. Beroende på läge, läckvattennivån i betongen, vattentransporten och upptorkningsförhållanden kan hålrummen under olika perioder vara mer eller mindre vätskefyllda (Figur 2).

Vid hålrummen finns det sannolikt ökad risk för korrosion. Korrosionsskador på ingjutna spännkablar i betongbroar har till övervägande del inträffat på ytor som inte varit helt täckta av betong eller injekteringsbruk. I samband med kontroll av tätplåten i en reaktorinneslutning konstaterades flera allvarliga korrosionsangrepp och en genomfrätning vid ofullständigt utfyllda håligheter i betongen intill metallen (28).

3.1 Vattentransport och vattenlinje i betong

Korrosion av stål i betong förutsätter tillräcklig fuktighet och närvaro av syre. För att korrosion ska inträffa på ingjutet stål, som normalt är passivt i betong på grund av det höga pH-värdet i miljön, krävs i regel vidare en (lokal) pH-sänkning eller kloridhalt över en viss kritisk koncentration eller båda.

pH-värdet sjunker framför allt genom karbonatisering av betongen när CO₂ tränger in.

Normalt anses att vid en relativ fuktighet under 80% i betongen korroderar inte stål i betong. Värdet på relativ fuktighet i betong är inte helt jämförbara med relativ fuktighet i luft, där man brukar ange 50-60 % RH som gräns.

När vatten, salter och luft förflyttas i en betongkonstruktion finns stor sannolikhet att områden med olika relativ fuktighet, syrehalt och även karbonatisering bildas. Vid en ingjuten metallyta kan det gynna korrosion genom att olika koncentrationsceller som luftningsceller, kloridkoncentrationsceller osv. utbildas. Skillnaderna kan driva korrosionsreaktioner på samma sätt som galvaniska celler mellan olika metaller. Gränsen mellan atmosfär och vätska, 'vattenlinjen', i betong blir inte så skarpt markerad som i en fri elektrolyt, utan snarare en gränzon där vattenmättad betong övergår till torrt bruk, men skillnaderna kan ändå bidra till korrosion.

Transport av gaser som luft (syre, koldioxid) i betong sker främst genom diffusion i porer. Transport av vätska är mer komplicerad. Vatten transporteras genom en betongvägg som står i kontakt med vatten genom flera olika processer, bland annat (Figur 3):

- diffusion genom porer
- kapillärsugning av vatten
- strömning av vatten orsakad av olika vattenstånd (= tryck)

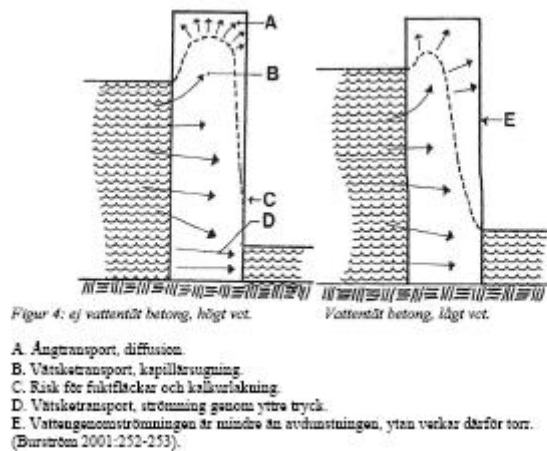
I betong som inte är helt nersänkt i vatten motverkas vattentransporten in till betongen av avdunstning mot luft.

Sprickor, porer och andra hålrum i betongen har stor inverkan på transport av både gaser och vätska.

Luft (syre och CO₂) diffunderar snabbare genom luftfyllda porer (torr betong), medan klorider och andra joner transporteras snabbare i vätskefas (=våt betong, vattenfyllda porer).

Porer bildas i betong bland annat genom att vatten i blandningsmassan avskiljs. När pressgjutningsvattnet sedan helt eller delvis åter tas upp i betongmassan lämnar det ett hålrum eller por (void). Porernas diameter kan variera från 0,1 µm till storleksordningen några mm.

Betongkvaliteter med låga W/C-tal är vattentätare, och utbildar färre porer vid blandningen än kvaliteter med höga W/C-tal. Gränsen för någorlunda vattentät betong brukar sättas vid ett W/C-tal under ca 0,5.



Figur 3 Vattentransport och vattenfront i betongkonstruktion. Vattentät betong t h, ej vattentät betong t v. (Johansson, J: Vattens påverkan på betongdammar. Examensarbete, SLU, Landskapsingenjörsprogrammet, 2006:16)

Koncentrationsceller med en påtaglig separation av anod- och katodyta betecknas också makroceller. Anod och katod kan vara separerade med upp till flera meter. Korrosionshastigheten minskar dock i regel med avståndet mellan anod och katod eftersom det elektriska motståndet mellan polerna ökar med avstånd (Figur 8).

På betong som delvis är i kontakt med en saltlösning, till exempel havsvatten, kan områden med mycket hög salthalt eller till och med saltutfällningar uppstå, när saltlösning sugas in i betongen och vatten sedan avdunstar till atmosfären ('wick action').

För korrosionen på tätplåten är det av intresse

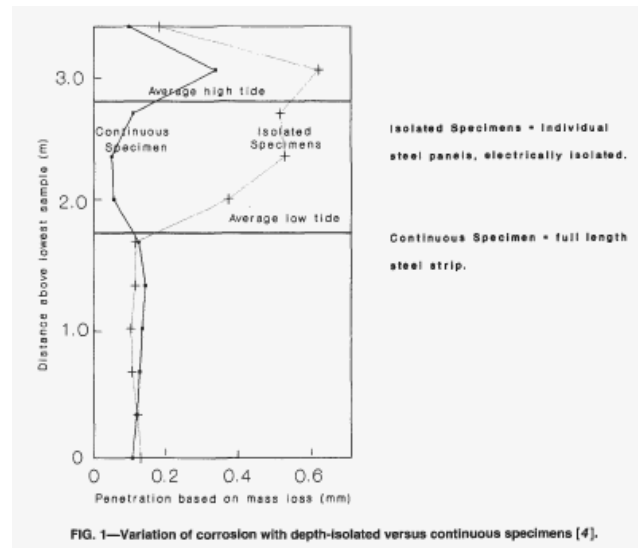
- hur hög den relativa fuktigheten blir i betongen vid tätplåten med olika vattenstånd i kondensationsbassängen och olika typer av utläckage
- hur den relativa fuktigheten (och andra egenskaper som syrehalt, pH, eventuell kloridhalt och halt av andra salter) varierar lokalt på olika delar av tätplåten
- hur stora de lokala skillnaderna är, och hur länge de består
- hur stor yta som fungerar som katod i kontakt med anodytan

3.2 Korrosion vid vattenlinje

Vid en naturlig vattenlinje (strandlinje) varierar korrosionshastigheten i olika zoner i förhållande till avstånd från vattenytan. Det kan iakttagas till exempel på stålspons vid en kajanläggning: atmosfärszon, ytzon eller vattenlinje, eventuellt tidvattenzon eller skvalpzona, djupzon. Den högsta korrosionshastigheten återfinns i regel strax ovanför eller i vattenlinjen (tidvatten- och stänkzonerna). (Figur 4).

Korrosionshastigheten påverkas dels av tillgången på syre totalt, dels av koncentrationsceller som bildas genom skillnader i miljövariabler. Inverkan av

olika syretillgång leder till att luftningsceller med anod- och katodytor utbildas på metallytan. Skillnaderna blir mest märkbara omkring vattenlinjen.

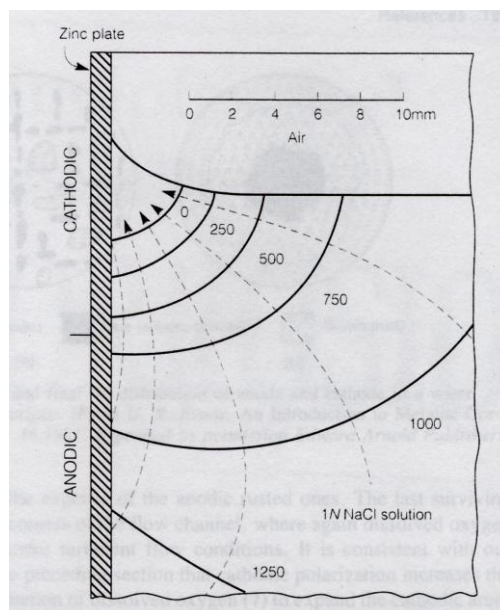


Figur 4 Korrosionshastighet för stål på olika djup vid strandlinje, dels på kontinuerlig provplåt som går genom samtliga zoner, dels på isolerade provplåtar i de enskilda zonerna. (ASTM MNL 20, 2nd ed, kap 66, Jenkins, JF: Marine: piers and docks. ASTM, 2005)

Normalt är korrosionshastigheten för stål högre i miljöer med god syretillgång. I en luftningscell korroderar emellertid ytan med lägre syrehalt i första hand. En koncentrationscell bildas i Figur 4 på den kontinuerliga provplåten genom skillnaden i potential mellan metallytan med god syretillgång i vattenytan (katod) och metallytan med mindre god syretillgång under ytan (anod). Figur 5 visar potentialen på olika avstånd från vätskeytan på en zinkplåt. På den kontinuerliga provplåten i Figur 4 leder luftningscellen till en minskning av korrosionshastigheten på katodytan i tidvattenzonen, och en ökning av korrosion under vattenytan jämfört med de elektriskt isolerade provplåtarna i samma zoner. Korrosionsangreppen strax under vattenytan blir inte bara kraftigare (i förhållande till isolerade prover) utan dessutom också mer tydligt lokala, vilket innebär att risken för lokala genomfrätningar ökar.

I håligheter som delvis fylls med vätska finns också förutsättningar för olika slag av korrosionsceller att bildas genom att de elektrokemiska förhållanden på metallytan i och omkring håligheten skiljer sig åt genom:

- lokala syrekonzentrationsceller som bildas omkring vätskemenisken i håligheten
- större syrekonzentrationsceller mellan metallytan i hålrummet med låg syretillgång och metallyta med bättre syretillgång utanför; i det aktuella fallet med tätningsplåten kan det t ex vara stålet nära cylinderns topp eller vid sprickor i betongen
- saltkonzentrationsceller: områden med olika halter av salter kan uppstå genom temperaturvariationer och avdunstning från lösningen i håligheten, eller genom olika transport av joner i betongen. Både lokala och större celler kan uppstå.



Figur 5 Potentialfördelning och anod- och katodytor på zink vid en vattenyta (Jones, D: Principles and prevention of corrosion, 1992, Fig 6.26. (7))

När betongen torkar kan porlösningen indunsta så att saltavlagringar till sist täcker hållighetens väggar; om fukthalten åter ökar kan salterna lösas till starkt koncentrerade lösningar (Figur 9).

3.2.1 Vattenlinjekorrosion och koncentrationsceller

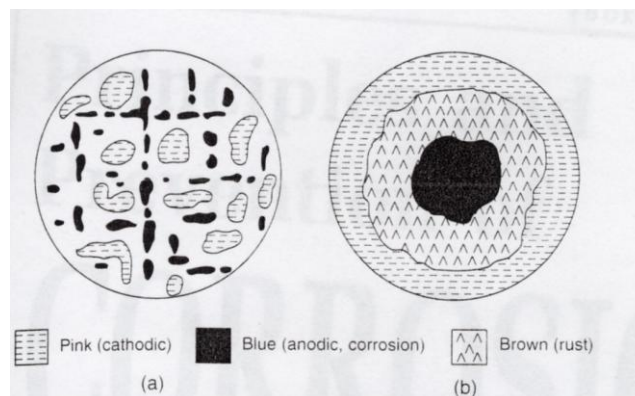
Vattenlinjekorrosion har studerats i laboratorieförsök och beskrivits bland andra av Evans (5;6). I det klassiska fallet av vattenlinjekorrosion är korrosionen kraftigast något under vattenytan, som följd av att en syrekonzentrationscell bildas mellan metallytan i vattenlinjen där syretillgången är hög (kort transportväg från luftskiktet, även omrörning genom ytans rörelse) och metallytan längre ner med sämre syretillgång. Metallytan med högre syretillgång fungerar som katod (lägre korrosionshastighet). På samma sätt förklaras korrosionsfördelningen under en vattendroppe på en stålyta, där ytan i mitten av droppen har sämre syretillgång (blir anod och korroderar) i förhållande till kanterna av droppen med god syretillgång (Figur 6).

En förutsättning för den högre korrosionshastigheten i området med låg syretillgång i luftningscellen är att en korrosionscell kan utbildas mellan detta och ett närliggande område med god syretillgång genom att det finns elektrisk kontakt mellan stålytorna, till exempel genom fuktig betong. Om stålytorna med olika syretillgång inte står i elektrisk förbindelse med varandra, kommer stålet i den bättre syresatta miljön normalt att korrodera mer.

Lokala skillnader i andra miljöparametrar än luftning kan driva korrosionsreaktioner genom att koncentrationsceller bildas. För metaller ingjutna i betong kan det vara fråga om skillnader i koncentration av olika

salter (i första hand klorider), pH, CO₂-halt och karbonatisering, och även armeringsstålets ytbehandling (22 - 25).

Olika koncentrationscellerna kan vara aktiva samtidigt och förstärka eller motverka varandra. Ett anodområde i luftningscellen kan till exempel vara katodiskt i en saltkoncentrationscell.



Figur 6 Utveckling av en typisk syrekonzentrationscell under en vattendroppe på en stålyta. När det från början lösta, jämnt fördelade syret förbrukats genom korrosion (vänstra bilden) kommer det starkaste korrosionsangreppet att koncentreras till den syrefattigaste ytan under droppens mitt (högra bilden), som blir anod i luftningscellen (Evans, UR: Metallic corrosion, passivity and protection, Arnold, London, 1937. (5))

3.2.2 Lokalisering och omfattning av korrosionsangrepp i vattenlinje

Exakt var 'vattenlinjeangreppet' äger rum i förhållande till vätskeytan blev föremål för diskussioner och experiment då fenomenet först beskrevs. Försök där ingen ökad korrosion kunde observeras vid vattenlinjen rapporterades, liksom försök där korrosionen snarast kunde bli reducerad. Korrosionshastighet och lokalisering av angreppen påverkas i regel av många faktorer utöver syretillgången.

Vid experimentell bestämning av korrosionshastighet på delvis nedsänkta provplåtar är det dessutom en definitionsfråga i vilken (hur bred) zon vattenlinjekorrosionen skall anses föreligga och mätas jämfört med hela provplåten.

Det är emellertid klart att en ökning och omlokalisering av korrosionsangrepp oftast föreligger i området vid en vätskelinje på grund av skillnader främst i syretillgång men också ifråga om andra faktorer. Skillnaderna leder till bildning av korrosionsceller, där anoden (delen där angrepp inträffar) i regel kommer att finnas något under vätskelinjen om syrecell dominerar. På kolstål beskrivs angreppen oftast som band av lokala avfrätningar, som liknar frätgropar.

Ju längre tid vätskelinjen ligger i en viss nivå desto tydligare blir angreppen. En åtminstone tillfällig åtgärd för att minska risken för genomfrätningar på grund av vattenlinjekorrosion, som föreslagits för tankar med kärnkraftavfall, har varit att låta läget för vattenlinjen variera, dvs att fördela eventuella angrepp över en större yta.

3.2.3 'Vattenlinjekorrosion' i förvaringstankar för kärnbränsle

Termen vattenlinjekorrosion, waterline corrosion, har aktualiserats i samband med inspektioner av förvaringstankar för förbrukade radioaktiva lösningar. I flera fall har påtagliga angrepp noterats i ett band vid vätskelinjen. Förhållandena i vätskelinjen kan ses som en kombination av olika slags koncentrationsceller: syrekonzentrationscell (luftningscell), och saltkoncentrationsceller. De senare uppstår genom indunstning av elektrolyt omkring vätskelinjen. I förvaringstankarna som innehåller relativt koncentrerade saltlösningar med temperaturer initialt upp till över 100°C blir indunstningseffekten påtaglig. Osäkerhet rörande hastighet och omfattning av angrepp vid vätskelinjen har varit en återkommande fråga i samband med inspektion av tankar under de senaste 5-10 åren.

Jensen 1999 (16) diskuterar t ex vattenlinjekorrosion och bildning av koncentrationsceller som en av möjliga korrosionsformer i samband med inspektion och bedömning av förvaringstankar i Hanford. Enligt Jensen har tidigare konstaterats att om pH i lösningen i tanken ligger över 9,5 har inga angrepp påvisats (hänvisning till Zapp 1992). Tanklösningarna innehöll i regel nitrit som fungerade som korrosionsinhibitor; vid försök noterades korrosion i vätskelinjen endast i fallen utan nitrit (hänvisning till försök av Anantatmula & Danielson 1996). Vid undersökningen av 6 tankar noterades inga vattenlinjeangrepp.

När en 4 m³ tank i Hanford inspekterades 2003 (14) konstaterades dock allvarliga angrepp i ett band där vätskelinjen legat under ca 17 år då tanken använts för uppsamling av radioaktiva lösningar. Väggtjockleken var enligt ultraljudsmätningar ställvis reducerad med 10 – 25 % av den ursprungligen 12,5 mm (0,5 inches) tjocka plåten. Lösningen var alkalisk (pH minst 12), och skulle innehålla nitriter som korrosionsinhibitorer. Under perioden då aktiva lösningar fylldes på kunde temperaturen tidvis vara över 100° C.

3.2.4 Korrosionshastighet i vattenlinje: laboratorieförsök

Wang m fl 1998, (12) redovisar korrosionshastigheter som uppmätts för kolstålsprover nersänkta i vätska, i gränsområdet vätska/atmosfär ('vattenlinje') och i atmosfären ovanför vätskeytan vid 60° resp 90° C och pH ca 9,2 – 9,9.

Korrosionen på vattenlinje-proverna av kolstål (1,2 % Mn) och kolstål A516 (0,5 % Mn) samt stål 387 (2,5 % Cr) var 2-6 gånger högre än för helt nedsänkta prover. Korrosionsangreppen under lösningsytan för vattenlinjeprover beskrevs också som kraftigare ('more severe') än för de helt nedsänkta proverna, med de allvarligaste angreppen omedelbart under vätskelinjen. Korrosionen på den del av vattenlinjeproverna som låg över vätskeytan var jämförbar med prover exponerade helt i atmosfär.

Provlösningarna bestod i princip av vatten motsvarande lokalt grundvatten som koncentrerats 10 resp 1000 gånger, samt pH-justerats till ca 9,2 – 9,9 med vätekarbonat (se Tabell 1 nedan, lösningar SDW respektive SCW).

Tabell 1 Lösningar använda vid undersökning av vattenlinjekorrosion (Wang m fl: Long-term corrosion study of waste package candidate material for the YMP; initial results. Corrosion/98, NACE, Houston, 1998. (12))

Table 6-1. Target Chemical Compositions of the Electrolyte Solutions (mg/L) Employed in the Long-Term Weight Loss Measurement.

Ion	Concentration (mg/L)		
	Simulated Dilute Water (SDW)	Simulated Concentrated Water (SCW)	Simulated Acidified Water (SAW)
	60 & 90 °C	60 & 90 °C	60 & 90 °C
K	34	3400	3400
Na	409	40,900	37,690
Mg	1	<1	1000
Ca	0.5	<1	1000
F	14	1400	0
Cl	67	6700	24,250
NO ₃	64	6400	23,000
SO ₄	167	16,700	38,600
HCO ₃	947	70,000	0
Si (aq)	27 (60 °C) 49 (90 °C)	27 (60 °C) 49 (90 °C)	27 (60 °C) 49 (90 °C)
pH	9.8 – 10.2	9.8 – 10.2	2.7

Source: DTN LL000320405924.146

3.2.5 Ökar korrosionen vid en vattenlinje?

Sammanfattningsvis kan sägas att även när den sammanlagda korrosionshastigheten för ett delvis nedsänkt föremål inte förändras nämnvärt genom förekomsten av en vattenlinje, utgör vattenlinjekorrosion en potentiellt ökad risk genom att

- korrosionen, sett på hela ytan, omfördelas och koncentreras. Vissa ytor blir kraftigare angripna, även om andra t o m kan skyddas,
- lokala korrosionsformer kan gynnas
- differentiaförhållandena av olika slag omkring en elektrolytmenisk stimulerar allmänt initiering av angrepp genom att mikroanoder och - katoder bildas på ytan.

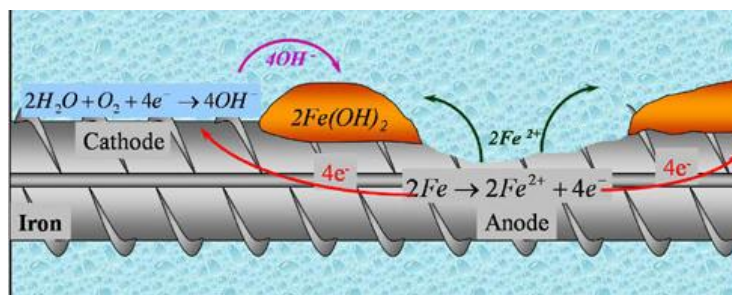
3.3 Inverkan av hålrum och vattenlinje på korrosion av ingjutet stål

3.3.1 Korrosion i hålrum i betong vid metallplåt

Korrosion av stål i betong

Stål är passivt, och skyddat mot korrosion, vid pH-värden $> 11 - 12$, som till exempel är fallet i kontakt med porvatten i okarbonatiserad betong.

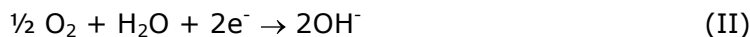
Passiviteten hävs, och korrosion kan ske, främst genom att pH sjunker vid metallytan eller att passivskiktet förstörs av kloridjoner.



Figur 7 Anod- och katodreaktioner vid korrosion av stål i betong.

När järn korroderar i betong oxideras det först till Fe^{2+} vid anoden
 $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ (I)

Syre reduceras vid anoden

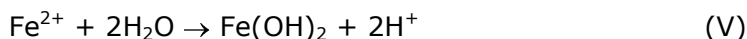


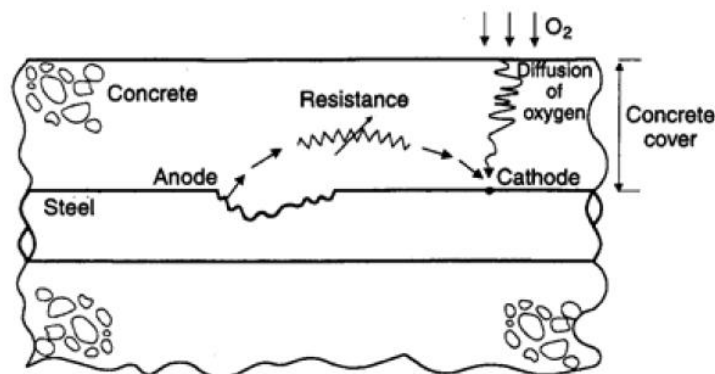
Järnjonerna bildar sedan hydroxider och oxider som till exempel



Mättad $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -lösning brukar användas som modellelektrolyt för att efterlikna porlösningen i betong vid korrosionsförsök. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -lösningen har ett pH omkring 12,6 medan pH i den faktiska porlösningen i okarbonatiserad betong på grund av alkaliska Na- och K-föreningar är ännu något högre, något över 13.

Där metallytan aktiveras och korrosion sker, sjunker pH lokalt i områden med liten syretillgång genom hydrolys av Fe^{2+} -joner.





Figur 11: Två faktorer som begränsar korrosionshastigheten hos stål i betong, resistansen respektive diffusionsmotståndet i betongen. (Bentur, Diamond och Berke, 1997)

Figur 8 Makrocell på armeringsyta vid betonghålrum. (Khaled, Z. m fl: Corrosion performance of epoxy-coated reinforcement – Macrocell tests. University of Texas, Austin, 1998. (13))

Korrosion i hålrum

Håligheter i betong eller bruk vid stålytan anses i sig utgöra en korrosionsrisk. Även om elektrolyten på metallytan i hålrummet har samma pH som betongens porlösning, korroderar stål som inte är täckt med betong lättare än under väl vidhäftande betong. Det har bland annat förklarats med att på den bara metallytan bortfaller den pH-buffrande verkan som kristaller av $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ger i betongaggregaten (2, 19, 27).

I tidvis vattenmättad betong påverkas korrosionen i eventuella hålrum – som kan bli helt eller delvis vätskefyllda, beroende på vätskelinjen i betongen – vid metallytan av koncentrationsceller som kan utbildas omkring en vätskelinje i hålrummet. När syret i hålrummet förbrukats av initiala korrosionsreaktioner kan dessutom hela hålrummet fungera som anod i förhållande till metallyta med bättre syretillgång, till exempel i inte helt vattenmättad betong där syre (luft) diffunderar in snabbare.

En omfattande och allsidig litteraturoversikt av elektrokemiska förutsättningar för korrosion på spännarmering i reaktorinneslutningar publicerades 2005 av Ullberg (2).

Förekomsten av hålrum i betongen, där metallens passivitet bryts och korrosion sedan äga rum, är enligt Ullberg uppfattning den största korrosionsrisken för spännarmeringen i reaktorinneslutningarna. Detta stämmer också med erfarenheter av skadefall på spännarmering.

Stålytor som i hålrum inte är i direkt kontakt med vidhäftande betong, kan förlora sin passivitet. I hålrummet förbrukas då eventuellt syre genom korrosion av metallen. Tillförsel av nytt syre (luft) genom fuktig betong är liten vilket i och för sig bör leda till sänkt korrosionshastighet. Om ledningsförmågan (konduktiviteten) i betongen samtidigt är god kan

emellertid en makrocell uppstå mellan den aktiva metallen i hålrummet med låg syrehalt och passiv metall i områden med bättre syretillgång.

Ullberg diskuterar en eventuell kritisk storlek för hålrummen och andra förhållanden i hålrummet som kan påverka korrosionen. Man kan skilja på större hålrum, t ex som följd av otillräcklig injektering av bruk i spännkablar foderrör eller senare genomföringar och borrhinar, och mindre hålrum ('voids', porer) som bildas i bruket vid otillräcklig kompaktering.

pH på metallytan förändras gradvis med avståndet från gränsytan metall/betong i hålrummet. I "tillräckligt små" hålrum blir avstånd från hålrummets vägg och därmed pH-sänkning och skillnad som skulle kunna driva en differentialcell, liten. Porerna som bildas vid betongens stelning kan ofta från början vara helt eller delvis fyllda med alkaliskt pressgjutningsvatten. Det kan också förutsättas att alkaliska beståndsdelar i betongen delvis löses i vattnet i hålrummet och håller uppe pH. En alkalisk vattenlösning ger emellertid sämre skydd för stålytan än vidhäftande cementbruk med motsvarande pH (hänvisning till försök av Yonezawa, se avsnitt 0). Enligt de refererade undersökningarna kan även mycket små hålrum (luftblåsor) vid en metallyta underlätta korrosionsangrepp, framför allt i närvaro av klorid. Sådana luftblåsor i betong skulle också kunna vara en av förklaringarna till de varierande tröskelvärden för kloridinducerad korrosion, där värden mellan 0,2 – 2,5 vikts% klorid rapporterats.

Enligt Ullberg är hålrum intill stålytorna den enda potentiellt allvarliga korrosionsrisken i reaktorinneslutningar där armering med spännkablar använts. Korrosionsskador på kablar i kaviteter i ofullständigt injekterade foderrör är kända från undersökningar av broar med förspänd armering. Skadefall har inträffat särskilt när kloridhaltigt vatten trängt in utifrån. I reaktorinneslutningarna antas eventuellt vatten och fukt i hålrummen främst komma från blandvattnet i injekteringsbruk och betong. I så fall avtar vätskemängd och fuktighet med tiden när betongen torkar. Ullberg konstaterar att det bekräftas av mätningar efter en tids drift, då fukthalten sjunkit så att korrosionshastigheten vid spännkablar kan beräknas vara åtminstone en storleksordning mindre än i inledningsskedet. Förutsättningen är alltså att nytt vatten inte tillförs utifrån.

Sammanfattningsvis leder enligt Ullberg både små och stora hålrum till ökad korrosionsrisk. I små hålrum dominerar oxidfilmens ökade känslighet för kloridinducerad korrosion. I större hålrum blir den minskade buffertverkan från kalciumhydroxiden i betongen märkbar. Även i kloridfri betong skulle i det senare fallet korrosion kunna inträffa genom att metalljoner hydrolyseras vid ytan vilket leder till en pH-sänkning tillräcklig för att aktivera metallen.

Ullberg anser att en eventuell kritisk storlek på hålrum (porer) bör undersökas närmare, liksom sambandet mellan fukthalten i betong och korrosionsrisk.

3.3.2 Undersökningar av inverkan av hålrum på korrosion av stål i betong

Initiering av korrosion i hålrum: kritisk storlek, kloridhalt

Enligt Yonezawa 1988 (19) skyddar (passiverar) väl vidhäftande cementbruk eller betong stål effektivare än vattenlösningar med motsvarande alkaliskt pH.

Yonezawa undersökte olika porlösningar samt gränsvärden för kloridinducerad korrosion. En förklaring till skillnaden anges vara buffertverkan från kalciumhydroxid-kristaller vid gränsen stål / bruk. Bufferteffekten och passiveringen fungerar emellertid endast om det finns kontinuerlig vidhäftning mellan metall och cement. Korrosion initieras lättare vid defekter som hålrum i gränsytan. Tröskelvärdet för kloridinducerad korrosion blir därför inte bara en funktion av porlösningens sammansättning (förhållandet $\text{Cl}^- / \text{OH}^-$), utan är också beroende av fysiska parametrar som vidhäftning och porositet i gränsytan metall/bruk.

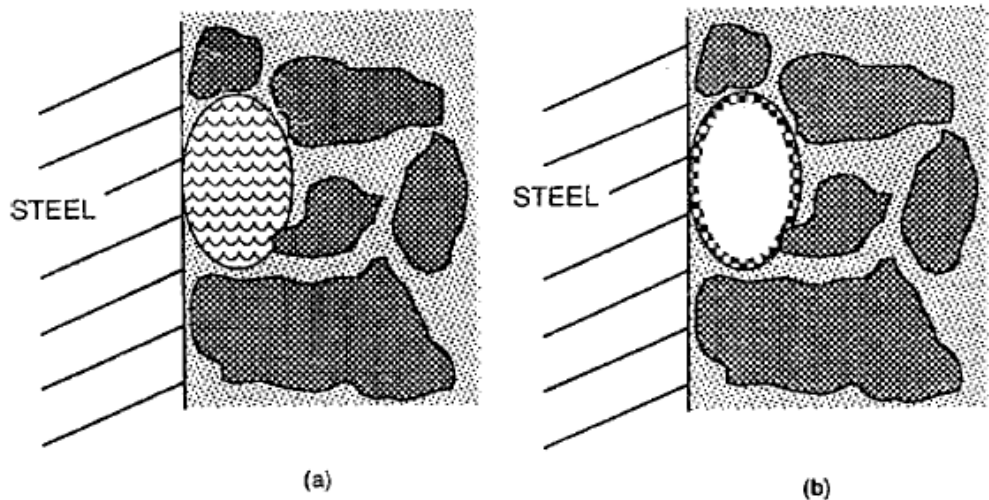
Glass anser dels att $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i en vidhäftande cementmassa motverkar pH-sänkning, dels att lokal utlösning i porer av kloridjoner, som normalt är delvis bundna till cementaggregat, leder till initiering av korrosionsangrepp i hålrummen. Enligt Glass & Reddy (27) kan dessutom även andra faser utöver $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i cementmassan frigöra hydroxyljoner som i sin tur motverkar en lokal pH-sänkning och hindrar initiering av korrosionsangrepp. Den lokala utlösningen av kloridjoner kan leda till korrosion vid halter omkring 0,2 % klorid (cementvikt) och lägre i betongmassan.

Soylev & Francois (2005 (20)) har undersökt inverkan av olika typer av defekter i betong vid metallytan. Man fann att mikrodefekter (definierade som defekter som inte kunde observeras enbart visuellt) inte hade någon direkt mätbar effekt på korrosion. Makrodefekter däremot – definierade som defekter som gav upphov till synliga spalter i gränsytan – påverkade korrosionen. Man fann också att hela betongskiktets porositet, som definierades som en 'intrinsic' defekt, hade större inverkan på korrosionen än makrodefekter i gränsytan metall/betong. Porositeten påverkar bland annat syretransport och kloriddiffusion.

Inverkan av hålrum på epoxibelagd armering

Kahhaleh m fl. 1998 (13), påpekar i en undersökning av inverkan av makroceller på korrosion av epoxibelagda armeringsjärn att kvaliteten på vidhäftningen mellan betong och armeringsyta visade sig ha en påtaglig inverkan även på korrosion av ytbelagda armeringsjärn.

Kahhaleh fann att genom den gjutningsmetod och material som användes bildades mindre hålrum företrädesvis på undersidan av de vertikalt ingjutna armeringsjärnen. Vid en granskning av gränsytan cementbruk/armeringsjärn befanns den på undersidan, vid hålrummen, vara av klart annan färg och porösare än på ovansidan. Man fann senare vid undersökning av exponerade prover klart mer korrosionsangrepp på undersidan än på översidan av armeringsjärnen. Kahhaleh diskuterar bildning av makroceller genom skillnader i syretransport och syreförbrukning, vidare ansamling av klorider. Även upptorknings/vätningsscykler i hålrummen och möjliga resulterande saltkoncentrationsceller (se Figur 9 nedan) tas upp som förklaring till den ökade korrosionen.



(a) Void adjacent to steel containing a solution of low concentration of salts and oxygen;

(b) concentration of salts on walls of void during drying cycle.

Figure 3.28 Voids promoting steel corrosion in concrete.

Figur 9 Saltlösning i hålrum vid armeringsyta under upptorkningscykel (Khaled Z. m fl: Corrosion performance of epoxy-coated reinforcement – Macrocell tests. University of Texas, Austin, 1998. (13))

Pressgjutningsvatten i hålrum

Blicker & Schokker (18) undersökte korrosion i pressgjutningsvatten (bleed water) från några olika typer av injektionsbruk. Skillnader i korrosivitet fanns mellan olika pressgjutningsvatten men det hade mindre betydelse än brukets benägenhet att avskilja pressgjutningsvatten och bilda hålrum. Den viktigaste skyddsåtgärden ansågs vara att använda ett bruk med liten vattenutskiljningsbenägenhet.

Spännkablar korroderade påtagligt i gjutvatten, även då gjutvattnet initialt hade högt pH-värde och låga kloridhalter, och proverna inte påverkades av galvaniska celler. Författarna föreslår en korrosionsmekanism som involverar lokal karbonatisering: begränsade områden med lågt pH bildas vid ytan av pressgjutningsvattnet varvid stålets passivering bryts lokalt.

Modellförsök: korrosion i delvis fyllda hålrum

Vid undersökningar av korrosion på spännarmering på broar i Florida fanns en hög frekvens av korrosionsskadorna i samband med hålrum och defekter i betong vid metallytan.

Sagues, Wang & Powers (10) noterar att korrosionsskador på spännarmering oftast initieras vid hålrum i bruket vid metallytor. Stålet skyddas där inte genom en direkt kontakt med bruk (se ovan). Anrikning av klorider kan vidare ske genom temperaturvariationer med avdunstning och kondensation av vatten i lösningarna i hålrummen. Därvid kan också makroceller mellan små aktiva områden och större passiva ytor bildas. Tillgången på syre genom transport av syre genom bruket bedömdes som en nyckelfaktor för korrosion.

I ett mer avancerat modellförsök med spännkablar i simulerade hålrum i betong (11; 9; försöksuppställning se Figur 10) undersöktes bland annat effekter av periodisk inträngning av vatten (rent vatten respektive

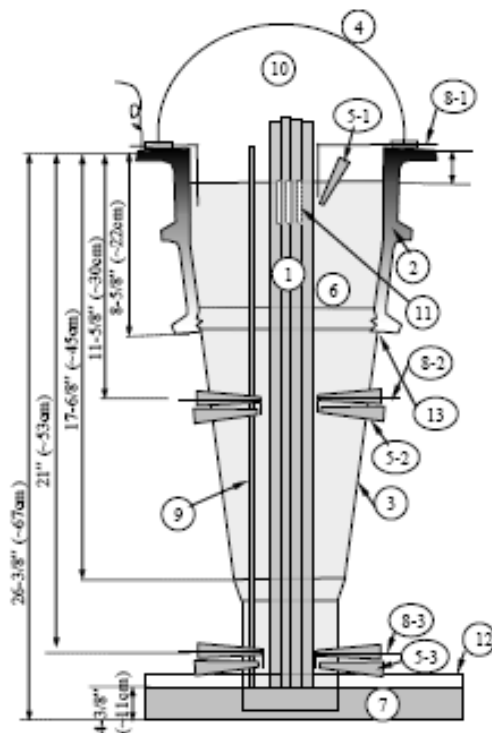


Figure 3a. Schematic of anchor test assembly.
1. 7 PT strands bundle; 2. Cast-Iron anchor; 3. HDPE trumpet; 4. Glass cover;
5-1,2,3. Potential ports at top, middle, and bottom, respectively; 6. Grout; 7.
Cement paste base; 8-1,2,3. Ti wire reference electrodes at top, middle, and
bottom, respectively; 9. Ti Counter electrode; 10. Void; 11. Inter-strands void
if present; 12. Plastic pan; 13. Plastic trumpet - anchor joint.

Figur 10 Wangs & Sagues' försöksuppställning för undersökning av inverkan av hålrum i cementbruk på korrosion av spännkablar. 1 – kablar; 2- infästning (ankarbult) av gjutjärn – modellhålrum; 6 – cementbruk; 11 – ev hålrum mellan kablar. Delarna framgår också av texten i figuren ovan. (Wang, H & Sagues, A A: Corrosion of post-tensioning strands. Report no. BC353-33. Florida, 2005. (11))

kloridhaltigt vatten) i hålrummen. Depassivering av spännkablar inträffade redan vid måttlig karbonatisering, och episoder med inträngande rent vatten ledde till korrosion fastän cementbrukens kloridinnehåll var lågt (< 600 ppm).

Korrosion beräknades kunna leda till en minskning med mellan 0,4 och 12 % av spännkablarernas tvärsnittsytan inom 9 månader. Korrosionsangreppen i form av frätgropar var samlade i ett tämligen begränsat band vid vätskelinjen. Korrosionsrisken bedöms som särskilt stor om vatten läcker in i hålrummen utifrån.

3.4 Sammanfattning och slutsatser av litteraturstudie

En 'vattenlinje' i betong blir sannolikt inte så tydligt markerad som gränsen atmosfär/vätska i en fri elektrolyt, men utläckage av vatten från bassängen kommer ändå att ge ett gränsszon mellan vattenmättad betong och torrare bruk utanför vattenfronten. Diffusion av joner som klorid sker snabbare i vätskemättade porer och sprickor (våt betong), medan transport av gaser som syre och koldioxid försiggår mycket snabbare i gasfas, dvs genom torr betong.

Vid olika vätning av betongen vid tätplåten kan de nämnda faktorerna bidra till att makroceller mellan olika områden på tätplåten med lokala skillnader i miljön bildas.

Särskilt i gränsytan mellan vattenmättad och omättad betong, och i delvis fyllda hålrum i gränsytan metall/betong kan skillnaderna leda till olika typer av koncentrationsceller, som luftningsceller och saltkoncentrationsceller.

Vid den vanligaste vattenlinjekorrosionen, som domineras av luftningsceller, ökar korrosionen i regel på ytor med mindre syretillförsel (i praktiken något under en vattenlinje). Dessa blir anodiska i förhållande till ytor med bättre syretillförsel (där korrosionen minskar något).

Förutsättningen för luftningsceller (och andra differentialceller) som driver korrosionen är att anod- och katodyta på metallen står i elektrisk förbindelse med varandra, till exempel genom fuktig betong.

Vattenlinjekorrosion genom luftningsceller eller andra koncentrationsceller innebär en ökad risk för en konstruktion, även om den sammanlagda korrosionshastigheten inte ökar, genom att angreppen koncentreras till ett mindre område och får en mer lokal karaktär.

Närvaro av hålrum i betongen vid metallytan anses i sig öka korrosionsrisken, då metallytan i hålrum lättare depassiveras. Även små porer, som t ex bildas vid otillräcklig kompaktering av betongen vid gjutningen har visats kunna leda till ökad korrosion.

Enligt Thierry m fl ger korrosion i en sluten spalt kraftigare och mer lokaliserade angrepp än i en öppen spalt, bland annat genom den längre upptorkningstiden och faktorer som gynnar bildning av koncentrationsceller i den slutna spalten(26).

Vidare är det möjligt att pH sjunker lokalt på metallytan i hålrummet genom hydrolys av Fe-joner. Även om det bara är tillfälligt och endast på en del av ytan, kan det underlätta initiering av korrosion.

Hålrum vid metallytan kan dessutom vara en indikator för en allmän tendens för bildning av porer i bruket. I en porig betong underlättas bland annat transport av luft fram till metallytan.

I fråga om större hålrum har flera undersökningar visat att korrosionsskador på spännkablar i broar företrädesvis inträffat i defekter i ingjutningen, dvs håligheter som av någon anledning inte fyllts med injektionsbruk.

Genom skillnader i miljön i och utanför hållrummet kan olika slags koncentrationsceller verka när betongen har tillräckligt god ledningsförmåga (är fuktig, innehåller joner / lösta salter).

Även inne i ett hållrum finns förutsättningar för koncentrationsceller, om hållrummet endast är delvis vätskefyllt : omkring vätskelinjen (menisken) kan syre- och saltkoncentrationsceller utbildas.

Vid modellförsök har man funnit att korrosionen ökar särskilt om vatten tidvis tillförs utifrån. Det gäller även om vattnet inte är kloridhaltigt.

På en stålkonstruktion som är delvis nersänkt i vatten varierar korrosionshastigheten med avståndet från vattenytan, och styrs generellt av syretillgången, med den högsta korrosionshastigheten strax ovanför eller i vattenytan, där tillgång till både elektrolyt och syre är god. Omkring själva vätskeytan (vattenlinjen) kan fördelningen av korrosionsangrepp modifieras av koncentrationsceller, så kallad vattenlinjekorrosion.

Den specifika vattenlinjekorrosionen drivs av skillnader i olika miljöfaktorer, framför allt syretillgång men också koncentration av till exempel salter som klorider.

Såväl porer och andra håligheter i betongen som förekomsten av en vätskelinje ökar risken för korrosion. Många olika faktorer inverkar emellertid, och med utgångspunkt från teoretiska överväganden är det svårt att kvantifiera effekten på korrosionen i ett enskilt fall.

I fallet med vatten som läcker ut till betong där tätplåten är ingjuten kan följande noteras:

Vattenlinje i betong

- vid tätplåten kan *de/s* en större vattenlinje eller vattenfront bildas i betongen med ett läge som beror på vattenståndet i och utläckning från kondensationsbassängen, *de/s* mindre, lokala vattenlinjer i delvis vätskefyllda håligheter och defekter
- i betong utbildas inte en lika skarp vattenlinje som i fri elektrolyt, men förhållandena vid den mera diffusa vattenfronten är jämförbara med en fri vattenlinje ur korrosionssynpunkt

Korrosion vid vattenlinje

- vid vattenlinjen kan luftningssyreceller och andra koncentrationsceller utvecklas som följd av lokala skillnader i korrosionsmiljön
- vid vattenlinjekorrosion som följd av luftningsceller (syrekonzentrationsceller) koncentreras korrosionsangreppen till en syrefattigare anodisk zon under vattenytan
- korrosionsangreppen i anodzonen kan dessutom bli av mer lokal karaktär, vilket innebär större risk för genomfrätningar
- luftningscellen fungerar bara om det finns elektrisk kontakt mellan den syrefattiga anodytan och ett katodområde med god syretillgång.

Korrosion i porer och håligheter

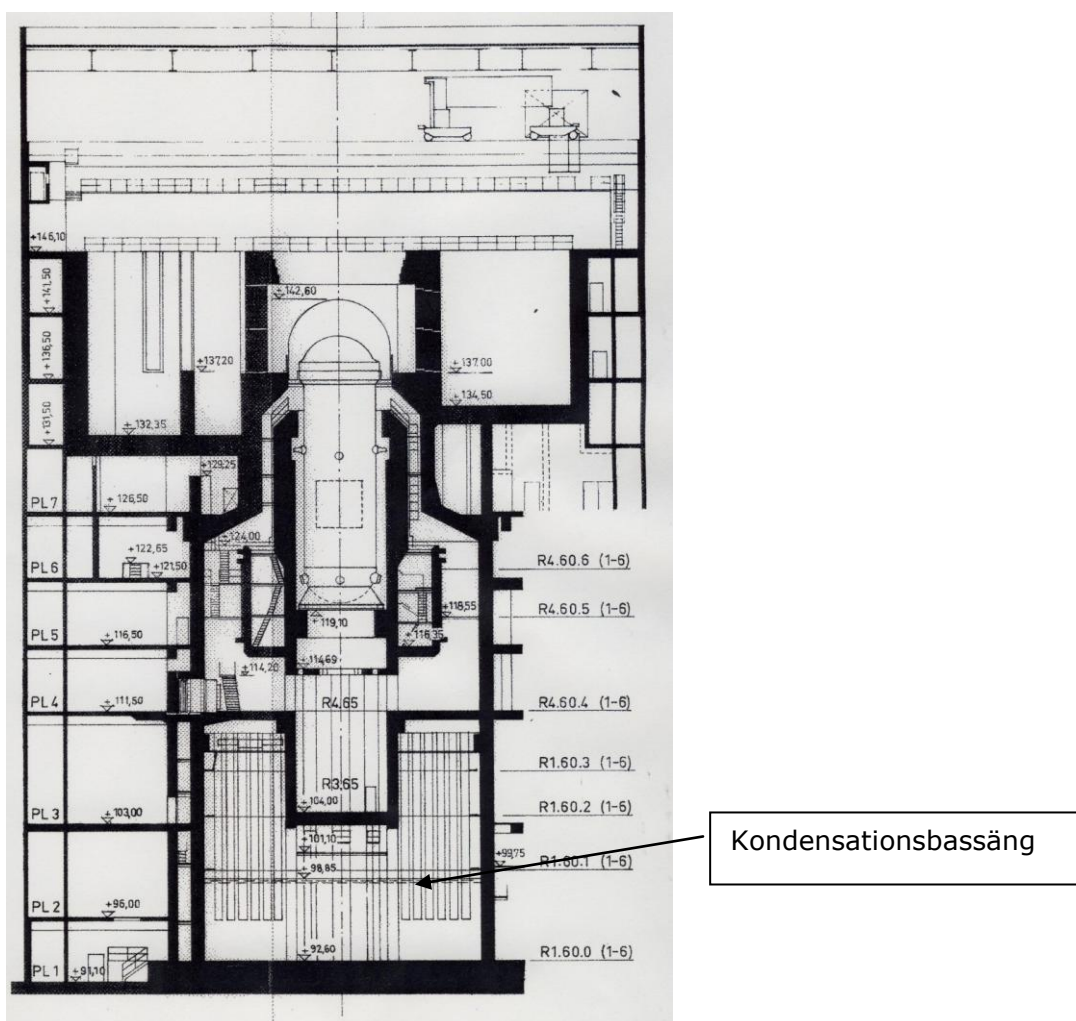
- undersökningar har visat att korrosionsskador på bland annat spännkablar i broar företrädesvis uppstått vid hålrum i cementbruket
- lokala vattenlinjer och luftningsceller inuti delvis fyllda hålrum vid metallytan kan bidra till att initiera korrosionsangrepp, även om de genom förändringar i vattenståndet endast finns periodvis
- korrosion på bara (inte betongtäckta) stålytor, som i håligheter, kan initieras även vid mycket låga kloridhalter och högt pH i omgivande betong.

4 Experimentellt arbete

4.1 Barsebäckverket I

Barsebäcksverket I, som stängdes i november 1999, är beläget invid Öresund i Skåne. När verket var i drift hade verket en effekt av 590 MW. Verket konstruerades av ABB Atom och byggdes under perioden 1970-75. Huvudentreprenör var Skanska och projekteringen utfördes av VBB.

Reaktorinneslutningens principiella konstruktion framgår av Figur 11.



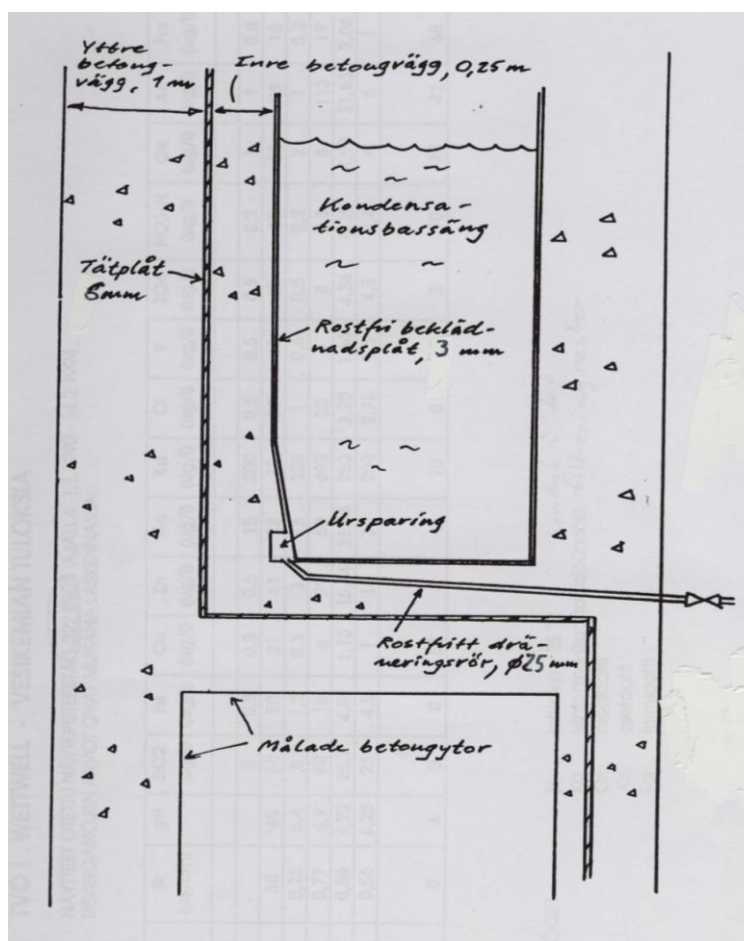
Figur 11 Reaktorinneslutning hos Barsebäckverket I.

Reaktorinneslutningen utgörs av 6 mm tjock tätplåt av kolstål mot vilken betong har gjutits på båda sidor. Tjockleken hos den invändiga betongväggen är ca 0,25-0,28 m och hos den utvändiga betongväggen ca 1 meter.

Kondensationsbassängens väggar är täckta av en rostfri beklädnadsplåt (godstjocklek 3 mm). Beklädnadsplåten är monterad direkt an mot den i

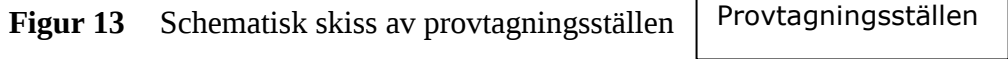
förväg gjutna reaktorinneslutningens inre betongvägg. Mellan beklädnadsplåten och betongväggen finns en spalt som kan uppskattas vara på sin höjd en eller ett par millimeter bred. I spalten vid bassängens yttre underkant finns en ursparing i betongen som löper runt om hela bassängen, se Figur 12. Kondensationsbassängen är i drift fylld med avjoniserat vatten med en temperatur av 25-30 °C.

Vid varje avställning har man sedan Barsebäckverket I togs i drift tappat ur vatten ur dräneringsrören från spalten mellan beklädnadsplåten och betongväggen. Vattnet anses komma från en eller flera otätheter i beklädnadsplåten. Otätheternas storlek och belägenhet har inte kunnat identifieras. Det antas dock att reaktorinneslutningens inre betongvägg med tiden kan ha blivit vattenmättad ända ut till tätplåten av det utläckande bassängvattnet. Kondensationsbassängen har varit tömd sedan början av 2000.



Figur 12 Schematisk skiss av en mindre del av kondensationsbassäng (1)

I maj 2008 uttogs betongkärnor av diametern 100 mm från väggen i kondensationsbassängen i Barsebäckverket I. Före uttaget av betongkärnorna avlägsnades delar av den rostfria beklädnadsplåten. Betongkärnor togs ut vid tre olika platser på väggen i kondensationsbassängen, se Figur 13. Vid varje plats på väggen togs 3 till 6 betongkärnor ut. Totalt uttogs 14 betongkärnor för undersökning. De uttagna betongkärnornas avstånd från kondensationsbassängens golvyta varierade från 5,89 till 6,59 meter, se Tabell 2. En referensbetongkärna togs dock ca 1,3 m över kondensationsbassängens golvyta. Det framgick av utseendet hos den rostfria beklädnadsplåten att vattenlinjen hade legat på ett avstånd från golvet i kondensationsbassängen av ca 6,39 m.



Tabell 2 Placering av betongbörkärna och tätplåtens tjocklek.
Värden inom parentes anger standardavvikelsen.

Betongkärna (nr.)	Höjd över golvyta (meter)	Tätplåtens tjocklek (medelvärde från tre mätvärden) (mm)
1:1	6,39-6,49	6,3(0,1)
1:2	6,29-6,39	6,4(0,2)
1:3	6,19-6,29	6,5(0,3)
1:4	6,09-6,19	6,4(0,3)
1:5	5,99-6,09	6,4(0,1)
1:6	5,89-5,99	6,5(0,4)
2:1	6,39-6,49	6,3(0,2)
2:2	6,29-6,39	6,1(0,1)
2:3	6,19-6,29	6,3(0,2)
3:0	6,49-6,59	6,2(0,1)
3:1	6,39-6,49	6,2(0,1)
3:2	6,29-6,39	6,2(0,2)
3:3	6,19-6,29	6,4(0,2)
4	1,30-1,40	6,4(0,2)

Vattenlinjens avstånd från golvyta är 6,39 meter.

4.3 Undersökning av korrosionstillstånd hos tätplåt

Efter att betongbörkärnan avlägsnats från kondensationsbassängens vägg undersöktes tätplåtens korrosionsutseende okulärt med fiberoptik. Den utrustning som användes har beteckningen Everest XLG3 Videoprobe System. Tätplåtens utseende fotograferades både med fiberoptik och med en vanlig digitalkamera. Tätplåtens tjocklek mättes med en ultraljudsmätare. Tre mätningar utfördes i varje borrhål, dvs. totalt erhöles 39 mätvärden av tätplåtens godstjocklek vid olika höjd från kondensationsbassängens golvyta.

4.4 Undersökning av betongkärnor

4.4.1 Strukturanalys av betong

Betongens yta och polerade sågsnitt vinkelräta mot betongens yta undersöktes med hjälp av stereolupp (förstoring upp till 40 gånger). Utvärderingen av tunnslip gjordes med hjälp av polarisationsmikroskop (förstoring upp till 400 gånger). Tunnslip tillverkades av betong impregnerad med fluorescerande epoxi. Tunnslipen omfattar områden i proverna som är 25 mm breda och 45 mm djupa.

4.4.2 Betongens karbonatiseringsdjup

Karbonatiseringsdjupet i betongen analyserades enligt svensk standard SS 13 72 42. Vid bestämningen appliceras en indikatorvätska bestående av 3 mass-% fenolftalein löst i 95 mass-% etanol på ett nyligen frilagt tvärsnitt i betongen. I basisk miljö ($\text{pH} > 9,2$) färgas indikatorvätskan röd; den blir ofärgad vid lägre pH-värden. Karbonatiserad betong förblir således ofärgad, medan icke karbonatiserad betong rödfärgas.

4.4.3 Mätning av betongens pH-värdet

pH-värden hos vatten i kontakt med betongens cementpasta mättes i två djupområden, 0-4 och 6-10 mm. Från varje djupområde sågades en 4 mm tjock skiva. Från de utsågade skivorna togs ut betongbitar som mortlades ned. Av det mortlade materialet togs 5 g och spädades med 10 ml vatten i ett provrör. D_{max} hos materialet som togs för analys var ca 2 mm. Efter utspädning skakades proverna för hand i provröret och fick sedan sedimentera några minuter. Därefter utfördes pH-analysen. pH-värden bestämdes titrimetriskt genom att titrera med 0,01 M HCl med fenolftalein som indikator.

4.4.4 Betongens tryckhållfasthet

Tryckhållfastheten hos betongprover provades enligt standardmetod SS-EN 12390-3:2001.

5 Resultat

5.1 Korrosionstillstånd hos tätplåt

I bilaga 1-2 visas korrosionsutseendet hos tätplåten vid olika höjd från golvytan. Det framgår av bilagorna 1 och 2 att tätplåten är täckt av ett tunt skikt av både korrosionsprodukter och betongrester. I borrhål 2:2 är tätplåten helt täckt av betongrester, bilaga 1.

Korrosionsprodukterna är röda, gråa och svartfärgade och består troligen av järnoxidhydroxid (FeOOH), hematit (Fe_2O_3) respektive magnetit (Fe_3O_4). Rödrosten ovanför vattenlinjen var mer klart rödfärgad jämfört med den rödrost som förekommer på tätplåten under vattenlinjen. Under vattenlinjen är magnetiten den dominerande korrosionsprodukten.

5.2 Undersökning av betongkärnor

5.2.1 Strukturanalys av betong

I tabeller 3-5 redovisas resultat från undersökning av betongens mikrostruktur med tunnslipsteknik. I bilagor 3-5 finns bilder som visar strukturer i de undersökta betongproverna.

Förklaringar till tabeller 3-5:

Ettringit/ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i luftporer

Avser betongens ytskikt (djup i betongen: 0-9 mm). Uppskattad, ungefärlig mängd av ettringit, indelad i mängdområden: 10, 25, 50, 75 och 100 %.

Mikrosprickfrekvens

Låg mikrosprickfrekvens – befintliga mikrosprickor bedöms inte påverka betongens egenskaper. Hög mikrosprickfrekvens – sprickor bildar ett nätverk, vilket underlättar för fukt och skadliga ämnen att tränga in i betongen. Hög mikrosprickfrekvens påverkar betongens beständighet negativt. Mkt hög mikrosprickfrekvens – sprickor bildar ett tätt nätverk, vilket har negativ inverkan på betongens beständighet och hållfasthet.

Homogenitet hos cementpasta

Mikroseparation hos cementpasta innebär att det finns lokala (mm-stora) variationer i förhållandet mellan vatten- och cementhalten i betongens bindemedel (olika vatten/cementtal, vct). Detta syns i tunnslip som relativt ljusa och mörka områden i betongens bindemedel.

Tabell 3 Resultat från undersökning av borrhärnor med tunnslipeteknik.

Borrhärna nr.	1:1	1:2	1:3	1:4
Karbonatiseringsdjup	1,0 mm (lokalt till 2 mm)	1,0 mm (lokalt till 2 mm)	1,0 mm (lokalt till 2 mm)	1,0-1,5 mm (lokalt till 2 mm)
Urlakning av cementpasta	0,3 mm	0,5 mm	0,3 mm	1,0 mm
Ettringit/$\text{Ca}(\text{OH})_2$ i luftporer	Helt fyllda: ca 30 % Delvis fyllda ca 30 %	Helt fyllda: ca 30 % Delvis fyllda ca 30 %	Helt fyllda: ca 30 % Delvis fyllda ca 30 %	Helt fyllda: ca 5 % Delvis fyllda ca 60 %
Mikrosprick-frekvens	0-1 mm: mkt hög >1 mm: låg	0-1 mm: mkt hög >1 mm: låg	0-1 mm: mkt hög >1 mm: låg	0-2 mm: hög >2 mm: låg
Homogenitet hos cementpasta	Ganska god, viss mikroseparation	Ganska god, viss mikroseparation	Ganska god, viss mikroseparation	Ganska god, viss mikroseparation
Vidhäftning ballast/cementpasta	God	God	God	God
Kompaktering	God	God	God	God
Uppskattat lufthalt i ytskiktet	1-2 %	1-2 %	1-2 %	1-2 %
Fördelning av luftporer	Jämn	Jämn	Jämn	Jämn
Ettringit på betongens yta	Ja (rel. liten mängd)	Ja	Ja	Nej
Järnhydroxid (rost) på betongens yta	Nej	Ja	Nej	Nej

Tabell 4 Resultat från undersökning av borrkärnor med tunnslipsteknik.

Borrkärna nr.	1:5	1:6	2:1	2:2	2:3
Karbonatiseringsdjup	1,0-2,0 mm (lokalt till 3 mm)	1,0 mm	1,0 mm	1,0-2,0 mm	1,0-2,0 mm
Urlakning av cementpasta	1,0 mm	1,0 mm	0,5 mm	0,5 mm	1,0 mm
Ettringit/$\text{Ca}(\text{OH})_2$ i luftporer	Helt fyllda: ca 5 % Delvis fyllda: ca 60 %	Helt fyllda: ca 30 % Delvis fyllda, ca 60 %	Helt fyllda: ca 30 % Delvis fyllda, ca 30 %	Helt fyllda: ca 30 % Delvis fyllda, ca 30 %	Helt fyllda, ca 30 % Delvis fyllda, ca 30 %
Mikrosprick-frekvens	0-11 mm: hög >11 mm: låg	0-1 mm: mkt hög >1 mm: låg	0-1 mm: mkt hög >1 mm: låg	0-1 mm: mkt hög >1 mm: låg	0-1 mm: mkt hög >1 mm: låg
Homogenitet hos cementpasta	God	Dålig, kraftig mikroseparation	God	Ganska god, viss mikroseparation	Dålig, kraftig mikroseparation
Vidhäftning ballast/cementpasta	God	God	God	God	God
Kompaktering	God	God	God	God	God
Uppskattat lufthalt i ytskiktet	1-2 %	1-2 %	1-2 %	1-2 %	1-2 %
Fördelning av luftporer	Jämn	Jämn	Jämn	Jämn	Jämn
Ettringit på betongens yta	Ja (rel. stor mängd)	Ja	Ja	Ja	Ja
Järnhydroxid (rost) på betongens yta	Nej	Nej	Nej	Ja	Ja

Tabell 5 Resultat från undersökning av borrkärnor med tunnslipsteknik.

Borrkärna nr.	3:0	3:1	3:2	3:3	4
Karbonatiseringsdjup	2,0 mm	1,0 mm	1,0 mm	2,0 mm	2,5 mm
Urlakning av cementpasta	1,0 mm	0 mm	0,5-1,0 mm	1,0 mm	2,0 mm
Ettringit/$\text{Ca}(\text{OH})_2$ i luftporer	Helt fyllda: ca 5 % Delvis fyllda, ca 30 %	Helt fyllda, ca 30 % Delvis fyllda, ca 60 %	Helt fyllda, ca 30 % Delvis fyllda, ca 60 %	Helt fyllda: ca 10 % Delvis fyllda: ca 50 %	Helt fyllda: ca 50 % Delvis fyllda, ca 30 %
Mikrosprick-frekvens	0-1 mm: mkt hög >1 mm: låg	Låg	0-0,5 mm: mkt hög >0,5 mm: låg	0-4 mm: hög >4 mm: låg	0-2 mm: hög >2 mm: låg
Homogenitet hos cementpasta	Ganska god, viss mikroseparation	Dålig, kraftig mikroseparation	Ganska god, viss mikroseparation	Dålig, kraftig mikroseparation	Dålig, kraftig mikroseparation
Vidhäftning ballast/cementpasta	God	God	God	God	God
Kompaktering	God	God	God	God	God
Uppskattat lufthalt i ytskiktet	1-2 %	1-2 %	1-2 %	1-2 %	1-2 %
Fördelning av luftporer	Jämn	Jämn	Jämn	Jämn	Jämn
Ettringit på betongens yta	Nej	Nej	Ja (rel. liten mängd)	Ja	Nej
Järnhydroxid (rost) på betongens yta	Ja	Nej	Ja	Ja	Nej

5.2.2 Bestämning av betongens pH-värde

I tabell 6 redovisas resultat från mätningar av uttagna borrkärnors pH-värde.

Tabell 6 Resultat från mätningar av betongens pH-värde.

Djup i betongen	0-4 mm	6-10 mm
Borrkärna nr.	pH-värde	pH-värde
1:1	12,5	12,6
1:2	12,6	12,6
1:3	12,5	12,6
1:4	12,5	12,6
1:5	12,5	12,5
1:6	12,5	12,5
2:1	12,5	12,5
2:2	12,5	12,6
2:3	12,4	12,5
3:0	12,5	12,6
3:1	12,6	12,6
3:2	12,5	12,6
3:3	12,5	12,6
4	12,5	12,5

5.2.3 Bestämning av betongens tryckhållfasthet

I tabell 7 visas resultat från mätningar av betongkärnornas tryckhållfasthet. Som framgår av resultaten i tabell 7 motsvarar de uppmätta tryckhållfasthetsvärdena de krav på tryckhållfastheten som ställs för en betong av hållfasthetsklass K80 eller högre.

Tabell 7 Resultat från mätningar av betongens tryckhållfasthet.

Borr-kärna nr.	Tryck-hållfasthet f_c (MPa)	Densitet (kg/m ³)	Höjd H (mm)	Diameter d (mm)	h/d	Omräknings-faktor		Massa (g)	Brottlast F (kN)
						β_3	β_4		
1:1	77,5	2420	100,2	99,0	1,01	0,996	1	1869,6	595,5
1:2	72,0	2450	99,7	99,0	1,01	0,996	1	1879,7	553,8
1:3	63,0	2430	101,1	99,1	1,02	0,992	1	1897,7	481,3
1:4	66,0	2430	100,8	99,1	1,02	0,992	1	1887,0	505,9
1:5	63,0	2500	100,8	99,1	1,02	0,992	1	1940,5	480,9
1:6	65,5	2490	100,5	99,0	1,02	0,992	1	1923,3	501,2
2:1	66,0	2410	100,3	99,1	1,01	0,996	1	1863,7	505,4
2:2	66,0	2430	100,1	99,1	1,01	0,996	1	1873,6	508,2
2:3	62,5	2470	100,3	99,2	1,01	0,996	1	1913,7	480,4
3:0	68,5	2440	100,6	99,3	1,01	0,996	1	1900,7	529,3
3:1	90,5	2600	101,0	99,2	1,02	0,992	1	2029,1	694,8
3:2	70,0	2470	101,1	99,0	1,02	0,992	1	1925,9	533,4
3:3	80,5	2450	99,8	99,1	1,01	0,996	1	1885,2	618,2
4:0	78,5	2420	100,3	98,9	1,01	0,996	1	1863,9	599,6

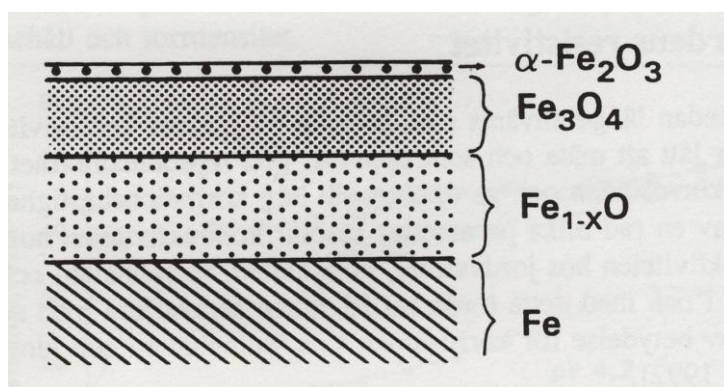
Anmärkning:

Några av betongcylindrar som användes till provning av tryckhållfastheten innehöll armeringsjärn enligt följande: prov nr 1:5 – 1 st armeringsjärn med diameter 12 mm, prov nr 3:0 – 1 st med diameter 10 mm, 3:1 – 1 st med diameter 12 mm och 1 st med diameter 16 mm, 3:2 – 1 st med diameter 16 mm.

6 Diskussion av resultat

6.1 Korrosionstillstånd hos tätplåt

En nytillverkad tätplåt består av ett varmvalsat kolstål med ett glödskalet som uppkommit på metallytan som följd av varmvalsningsprocessen. Glödskalet består av olika järnoxider och generellt kan tre olika skikt urskiljas, se figur 14.



Figur 14 Sammansättning hos glödskalet på varmvalsat kolstål (29)

Närmast metallytan finns wüstit (Fe_{1-x}O), därefter följer magnetit (Fe_3O_4) och ytterst består glödskalet av hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Vad gäller wüstit så uppges x variera mellan 0,05 vid gränsytan järn/wüstit och upp till 0,15 vid gränsytan wüstit/magnetit. Tjockleken och sammansättningen hos glödskalet bestäms av flera faktorer: typ och storlek hos stålet, valsningstemperatur och kylningshastighet. Ett typiskt glödskalet, utbildat på 9,5 mm tjock plåt under normala varmvalsningsförhållanden är ca 50 μm tjockt samt består av ungefär 70 % wüstit, 20 % magnetit och 10 % hematit (29).

Vid ingjutning av tätplåten i en alkalisk betong (pH 12,5) sker en passivering av tätplåtens yta genom bildning av hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$). Det bildade passivskiktet sänker tätplåtens korrosionshastighet till $< 1\mu\text{m}/\text{år}$. Om det passiverbara skiktet skulle brytas ned genom t ex tillsats av klorider eller genom en sänkning av betongens pH-värde (karbonatisering) kan korrosionshastigheten öka kraftigt hos tätplåten. Vid förekomst av höga halter av klorider finns risken för kraftig gropfrätning. Vid karbonatisering av betongen finns också risk för korrosion, som då blir mera, jämn på stålytan

Som framgår av resultaten från de okulära undersökningarna av korrosionstillståndet hos tätplåten så har enbart ytliga korrosionsangrepp konstaterats. Anledningen till detta är att inga klorider förekommer i betongen och att betongen varit vattenmättad (låg syrehalt) under en lång tid och att betongens pH-värde intill tätplåten har legat kring 12,5 under större delen av sin livslängd. Karbonatisering av betongens yttersta skikt (0-2 mm) har dock konstaterats. Troligtvis har karbonatiseringen skett efter det att kondensationsbassängen tömdes år 2000.

Korrosionsprodukterna är röda, gråa och svartfärgade och består troligen av järnoxidhydroxid (FeOOH), hematit (Fe_2O_3) respektive magnetit (Fe_3O_4). Rödrosten ovanför vattenlinjen var mer klart rödfärgad jämfört med den rödrost som förekommer på tätplåten under vattenlinjen. Under vattenlinjen är magnetiten den dominerande korrosionsprodukten.

Att det förekommer rödrost under vattenlinjen beror sannolikt av att kondensationsbassängen varit tömd sedan 2000, vilket inneburit att syre kunnat transporteras till tätplåtens yta. Bildning av magnetit på stålytan innebär att syrehalten har varit mycket låg vid tätplåten vilket innebär en låg korrosionshastighet hos tätplåten. Vid bildning av rödrost är tillgången på syre hög, vilket torde innebära en något högre korrosionshastighet.

6.2 Undersökning av betongkärnor

6.2.1 Fuktpåverkan

Riklig utfällning av sekundärt bildad ettringit (kemisk formel: $(\text{CaO})_6(\text{Al}_2\text{O}_3)(\text{SO}_3)_3 \times 32\text{H}_2\text{O}$) observerades i betongens luftporer. Termen "sekundär bildning" avser här kristallisation efter huvudskedet av hydratisering av cementklinker och tillstyvnad av betongen. Utfällning av sekundär ettringit i luftporerna tyder på att det har skett fuktvandring genom betongen. Bildning av sekundär ettringit är orsakad av omfördelning av sulfater i betongens bindemedel. Ett annat tecken på att betongen varit utsatt för fukt är omkristallisation av ettringit i cementpastan. Denna syns i tunnslip genomlyst av planpolariserat ljus som brunaktiga "suddiga" fläckar i cementpastan. Dessa fläckar finns i betongens bindemedel på djup från 0 till 45 mm, dvs genom tunnslipets hela tjocklek. Den mängden av sekundär ettringit som har observerats i betongproverna bedöms inte ha någon betydande inverkan på betongens egenskaper. Bildning av sekundär ettringit är normalt för betong som har utsatts för fuktbelastning under en längre tid. Ungefärlig mängd av sekundär ettringit i betongens luftporer anges i tabellerna 3-5.

Sekundärt bildad ettringit har också observerats på betongytan i prover nr 1:5, 1:6, 2:1, 2:2, 2:3, 3:2 och 3:3. Förekomst av kristallaggregat av sekundär ettringit på betongytan indikerar att det har funnits en spalt mellan betongen och plåten. Storleken hos mellanrummet går dock inte att uppskatta utifrån observationer gjorda i tunnslip.

6.2.2 Karbonatisering av cementpasta och pH

Betongens ytskikt är karbonatiserat. Karbonatiseringens djup varierar något mellan proverna, se i tabeller 1-5, men är generellt ca 2 mm. De i tunnslip uppmätta karbonatiseringsdjupen bör korrigeras på grund av att betongproverna har efter utbörningen förvarats torra under en 4 månader lång tid för att klara kraven i avseende på radioaktiv strålning. Karbonatiseringen som skedde under denna tid är 0,5 mm. Detta värde är baserat på mätning av karbonatiseringsdjup från cylinderyta på borrhärnan som gjordes

i tunnslip tillverkat av betong från provet nr 4:0. Karbonatiseringsdjupen för de olika proverna som presenteras i tabellerna 3-5 bör alltså korrigeras ner med 0,5 mm. Karbonatisering av betongens bindemedel som har skett innan utbörningen av betongproverna har således ett djup på 0,5 till 2,0 mm.

Provning med pH-indikatorvätska stödjer observationer gjorda i tunnslip och visar karbonatiserade (pH <9,2) yttre skikt hos betongproverna. De karbonatiserade skikten kan ses i bilaga 3 där betong som inte är karbonatiserad är rödfärgad av pH-indikatorvätskan.

Mätning av pH genom titrering av vatten som är i kontakt med cementpasta från djupområden 0-4 mm och 6-10 mm visar pH-värden som är normala för inte karbonatiserad betong, dvs ca 12,5, tabell 6. Områden med en tjocklek på 4 mm (minsta praktiskt möjliga tjockleken på utsågade betongskivor) har visat sig inte ge en tillräckligt bra "upplösning" för att markera den skillnad i pH-värdet som bör uppkomma genom att de yttersta 1-2,5 mm av betongen är karbonatiserade.

6.2.3 Urlakning av cementpasta

Partiell urlakning av cementpasta observerades i betongens ytskikt. Den urlakade zonens tjocklek är max 2 mm. Tjockleken hos den urlakade zonen i de olika proverna anges i Tabeller 1-5. Urlakningen är orsakad av fukttransport från betongen och ut mot plåten. Urlakning av cementpasta innebär ökad porositet i betongens bindemedel, vilket underlättar fortsatt fuktangrepp. Det är troligt att urlakningen även har haft negativ inverkan på betongytans hållfasthet. Den relativt höga porositeten hos urlakad cementpasta i betongens yttre skikt kan ses i bilder i bilaga 4 där den uppträder med en ljusare färgton än cementpasta på större djup i betongen.

6.2.4 Sprickor i betongen

Sprickor i betongen har två generella orienteringar. En är vinkelrätt mot betongens yta och en är parallell med ytan. De parallella sprickorna utgörs huvudsakligen av mikrosprickor (dvs inte synliga med obeväpnat öga) och är betydligt fler än de vinkelrätta. De vinkelrätta sprickorna omfattar både mikro- och makrosprickor. Längden hos makrosprickor som observerades på polerade sågsnitt är mellan 1 och 6 mm. Mängden av vinkelrätta makrosprickor i de olika proverna kan ses i bilder i bilaga 5. Provet nr 1:2 och 4:0 ser ut att ha störst mängd av vinkelrätta makrosprickor i ytskiktet.

Betongens ytskikt uppvisar hög till mycket hög mikrosprickfrekvens (se bilagor 3 och 4). Ytskiktet med hög till mycket hög mikrosprickfrekvens har ett maximalt djup på 2 mm i alla prover utom 1:5 (11 mm) och 3:3 (4 mm). Hög till mycket hög mikrosprickfrekvens innebär enligt våra kriterier att sprickor bildar ett nätverk. Hög mikrosprickfrekvens underlättar fukttransport genom betongen och påverkar därför betongens beständighet negativt. Bilden tagen i tunnslip gjort av betong från provet nr 1:6 visar relativt stora, till

formen oregelbundna hålrum i betongens ytskikt. Dessa har tillkommit under prepareringen av tunnslip och indikerar att betongens yttre skikt har mycket hög frekvens av sprickor som har påverkat betongens hållfasthet negativt. Samma sak fast i mindre grad och omfattning gäller för prover nr 3:0 och 3:2.

Betong på större djup än 4 mm uppvisar låg sprickfrekvens i avseende på både makro- och mikrosprickor. Låg sprickfrekvens i betongen betyder att det förekommer enstaka sprickor som bedöms inte påverka betongens egenskaper i någon betydande grad. Låg sprickfrekvens kan betraktas som normalt för betong.

6.2.5 Bindemedlets homogenitet

Betongen uppvisar olika god homogenitet hos cementpasta i de olika proverna, vilket avspeglar lokala variationer i betongen. I proverna nr 1:6, 2:3, 3:1, 3:3 och 4:0 är homogeniteten hos bindemedlet dålig. Den dåliga homogeniteten är orsakad av mikroseparation som har skett i färskt betong. Mikroseparationen av vatten har medfört att det bildades områden i cementpastan som har olika vatten/cementtal (vct). Områden med höga vct uppträder i tunnslip genomlysta av UV ljus med ljusare färgton än områden med lägre vct. Högt vct innebär hög kapillärporositet i cementpastan och förekomst av sådana områden underlättar fuktvandring genom betongkonstruktionen.

6.2.6 Utfällning av järnföreningar på betongytan

Betongytan är ställvis täckt med ett tunt och tät skikt av finkornig utfällning. Mängden av utfällning på betongytan varierar mellan proverna (se bilaga 4). Denna utfällning består sannolikt av järnföreningar, till exempel järnhydroxider. I tunnslip uppträder järnföreningarna med mörka färgtoner av brunt och svart med röda reflexer. Utfällning av järnföreningar förekommer även i slutna luftporer mycket nära betongens yta (avstånd till ytan <0,1 mm) och fyller mikrosprickor som har förbindelse till ytan. Dessa observationer indikerar att järnföreningarna bildades genom *in situ* utfällning från vattenlösning och inte genom transport och avsättning av ämnen bildade till exempel på stålets yta.

6.3 Slutsatser

Från resultaten av undersökningarna, dels av korrosionstillståndet hos tätplåten och dels av uttagna betongprover, från kondensationsbassängen i Barsebäckverket I kan följande slutsatser dras:

- Okulära undersökningar av tätplåtens korrosionstillstånd visade att tätplåten enbart har ytliga korrosionsangrepp. Tätplåten har inte varit utsatt för vattenlinjekorrosion.
- Korrosionsprodukternas utseende på tätplåten varierade med tillgången av syre. Röda, gråa och svartfärgade korrosionsprodukter förekom, sannolikt järnoxidhydroxid (FeOOH), hematit (Fe_2O_3) respektive magnetit (Fe_3O_4).
- De ytliga korrosionsangrepp som förekommer på tätplåten beror troligtvis på att kondensationsbassängen varit tömd sedan 2000, vilket lokalt förändrat miljön i kontaktytan mellan betong och stål: upptorkning, större syretillgång.
- Betongen i de undersökta borrhärnorna är överlag i bra kondition.
- Sprickfrekvensen i betongen är låg, utom i betongens yttre skikt (0-2 mm). Yttre skikt hos betongproverna där mikrosprickfrekvensen är hög till mycket hög har ett maximalt djup på 2 mm i alla prover utom 1:5 (hög sprickfrekvens till ett djup av 11 mm) och 3:3 (hög sprickfrekvens till ett djup av 4 mm).
- pH-värdet i vatten som är i kontakt med betongens bindemedel är ca 12,5.
- Betongens yttre skikt (djup i betongen: 0-2 mm) är karbonatiserat och visar tecken på fuktangrepp i form av partiell urlakning av cementpasta.
- Fuktbelastning på betongen har medfört bildning av sekundär ettringit i betongens luftporer. Denna bildning har inte någon betydande inverkan på betongens egenskaper.

7 Referenser

1. Sederholm, B: Studie av vattenlinjekorrosion på ingjuten tätplåt i cylinderväggen. Powerpoint-presentation, nov 2007, 10 s.
2. Ullberg, M: Elektrokemiska aspekter på korrosion i svenska reaktorinneslutningar. SKI Rapport 2007:13. SKI, 2006. 58 s.
3. Naus, DJ & Graves, IL: Primer on durability of nuclear plant reinforced concrete structures. A review of pertinent factors. NUREG/CR-6927 (ORNL/TM-2006/529). 2006. 128 s. 229 referenser. US Nuclear Regulatory Commission, www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/contract/cr6927/cr-6927.pdf
4. Ghorbanpoor, A & Benish, N: Non-destructive testing of Wisconsin highway bridges. Final report. Wisconsin Department of Transportation, Madison, 2003. 102 s. www.dot.wisconsin.gov/library/research/docs/finalreports/00-15nondestructivetesting-f.pdf
5. Evans, UR: Metallic corrosion, passivity and protection, Arnold, London, 1937; S 173 – 192 (Partially immersed vertical specimens; Corrosion by stagnant liquids); s 296 – 298 (Cause of waterline attack); s 361 – 363 (Water-line corrosion of zinc and other metals)
6. Evans, U R: The corrosion and oxidation of metals. Arnold, London, 1960. S 147- 151, Water-line attack in presence of inhibitors
7. Jones, D A: Principles and prevention of corrosion. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1992. S 192 – 195, Partial immersion cells – Waterline corrosion; Full-immersion cells.
8. Shaw, P & Xu, Aimin: Assessment of the deterioration of concrete in NPP – Causes, effects and investigative methods. NDTnet 1998, vol 3, nr 2. 9 s.
9. Wang, H & Sagues, A A & Powers, R: Corrosion of the strand-anchorage system in post-tensioned grouted assemblies. CORROSION 2005, föredrag nr 266. NACE, Houston, 2005. 20 s, 17 ref
10. Sagues, A A & Powers, R & Wang, H: Mechanism of corrosion in steel strands in post-tensioned grouted assemblies, Corrosion 2003, föredrag 312. NACE, Houston, 2003. 15 s.
11. Wang, H & Sagues, A A: Corrosion of post-tensioning strands. Final report to Florida Department of Transportation. Report no. BC353-33. Florida, 2005, 48 s. www.dot.state.fl.us/research-center/Completed_Proj/Summary_SMO/FDOT_BC353_33_rpt.pdf
12. Wang, Gdowski, Estill, Gordon, Doughty, King & McCright: Long-term corrosion study of waste package candidate material for the YMP; initial results. Corrosion98, föredrag 161. NACE, Houston, 1998. 9 s.

13. . Khaled Z. Kakhaleh, Enrique Vaca-Cortés, James O. Jirsa, . Harovel G. Wheat, and Ramón L. Carrasquillo: Corrosion performance of epoxy-coated reinforcement – Macrocell tests. Research report no. 1265-3, for the Texas Department of Transportation. University of Texas, Austin, 1998. 181 s. – Blåsor och hållrum, se sid 84 – 92.
14. Stewart, C W (red): Independent review of Tank 231-AY-101 fitness for service. Pacific Northwest National Laboratory report PNNL-14176. Pacific Northwest National Laboratory, Richland, 2003.
15. Anantatmula, R P & Schwenk, E B & Danielson, M J: Characterization of the corrosion behavior of the carbon steel liner in Hanford site single-shell tanks. Report WHC-EP-0772. Westinghouse-Hanford Company, Richland, 1994.
16. Jensen, C E: 241-AY Double shell tanks (DST) integrity assessment report. Report no. HNF-4959. Lockheed-Martin-Hanford Co. Richland, 1999.
17. Schennach, R: Electrochemical kinetics of corrosion and passivity. S 33-36: Concentration cells. Graz University of Technology [www.staff.tugraz.at/robert.schennach/Electrochemical Kinetics of Corrosion and Passivity.pdf](http://www.staff.tugraz.at/robert.schennach/Electrochemical_Kinetics_of_Corrosion_and_Passivity.pdf)
18. Bricker, M D & Schokker, A J: Corrosion from bleed water in grouted post-tensioned tendons. Portland Cement Association R & D Bulletin RD137, 2005, 73 s.
19. Yonezawa, T; Ashworth, V; Procter, R P M : Pore Solution Composition and Chloride Effects on the Corrosion of Steel in Concrete. Corrosion. Vol. 44, no. 7, pp. 489-499. July 1988 (Ref)
20. Soylev, T A; Francois, R,: Corrosion of Reinforcement in Relation to Presence of Defects at the Interface between Steel and Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering. Vol. 17, no. 4, pp. 447-455. July-Aug. 2005 (REF)
21. Shreir, L L & Jarman, & Burstein, B T (red): Corrosion, 3e utg, Butterworth, 1994. S 1:156-1:160, Differential aeration.
22. Gouda, V K & Mourad, H M: Galvanic cells encountered in the corrosion of steel reinforcement. I. Differential pH cells. Corrosion Science 1974, vol 14, nr 11-12, s 681-690.
23. Gouda, V K & Mourad, H M: Galvanic cells encountered in the corrosion of steel reinforcement. II. Differential salt concentration cells. Corrosion Science 1975, vol 15, nr 5, s 307-315.
24. Gouda, V K & Mourad, H M: Galvanic cells encountered in the corrosion of steel reinforcement. III. Differential surface condition cells. Corrosion Science 1975, vol 15, nr 5, s 317-328.
25. Gouda, V K & Mourad, H M: Galvanic cells encountered in the corrosion of steel reinforcement. IV. Differential aeration cells. Corrosion Science 1975, vol 15, nr 5, s 329-336.

26. Persson, D & Mikhailov, A & Thierry, D: In situ studies of the corrosion during drying of confined zinc surfaces. *Materials and Corrosion*, 2007, vol 58, nr 6, s 452 – 462
27. Glass, G K & Reddy, B: The influence of the steel concrete interface on the risk of chloride induced corrosion initiation. COST 521 Workshop, Luxembourg, 18-19 Feb 2002. Final reports of single projects 1997-2002, s 227-232.
28. Wegemar, B: Corrosion failure of a BWR embedded reactor containment liner, *Journal de Physique IV*, vol 136, 2006, s 257-262
29. Årebäck, M: Hydrogeological investigations and corrosion monitoring in an urban soil profile in Göteborg, Sweden. Licentiate degree , Chalmers university of technology, Göteborg, 1994.

Bilaga 1

Utseende av tätplåten vid olika höjd från golvyta.

Borrhål 1:1, 6,39-6,49m över golvyta	Borrhål 1:2, 6,29-6,39 m över golvyta	Borrhål 1:3, 6,19-6,29 m över golvyta	Borrhål 1:4, 6,09-6,19 m över golvyta
			
Borrhål 1:5, 5,99-6,09 m över golvyta	Borrhål 1:6, 5,89-5,99 m över golvyta		
			

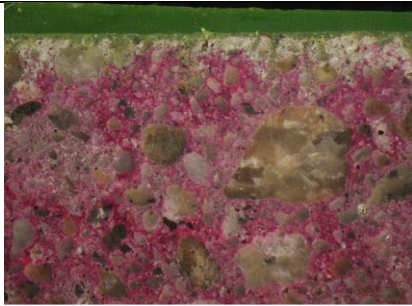
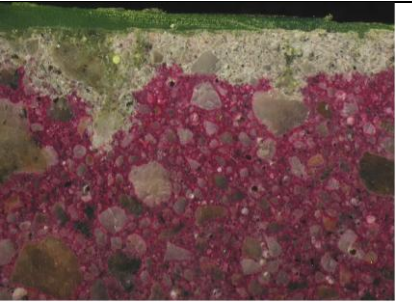
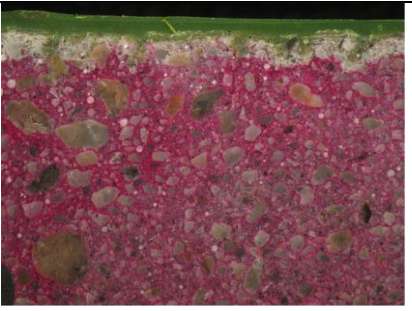
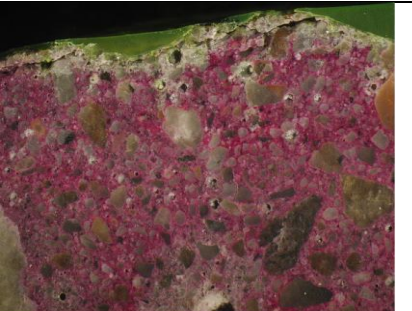
Bilaga 2

Utseende av tätplåten vid olika höjd från golvyta.

Borrhål 2:1, 6,39-6,49 m över golvyta	Borrhål 2:2, 6,29-6,39 m över golvyta	Borrhål 2:3, 6,19-6,29 m över golvyta	Borrhål 3:0, 6,49-6,59 m över golvyta
			
Borrhål 3:1, 6,39-6,49 m över golvyta	Borrhål 3:2, 6,29-6,39 m över golvyta	Borrhål 3:3, 6,19-6,29 m över golvyta	Borrhål 4, 1,30-1,40 m över golvyta
			Bild saknas.

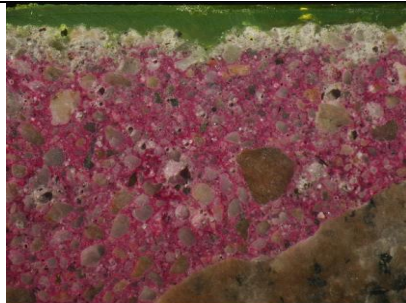
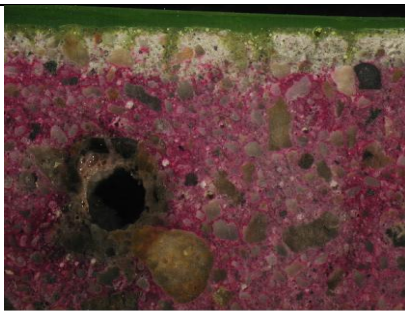
Bilaga 3 (1)

Polerade sågsnitt vinkelrätta mot betongytan. Rödfärgad betong är inte karbonatiserad.

Betongkärna nr 1:1	Betongkärna nr 1:2	Betongkärna nr 1:3	Betongkärna nr 1:4
			
Betongkärna nr 1:5	Betongkärna nr 1:6	Betongkärna nr 2:1	Betongkärna nr 2:2
			

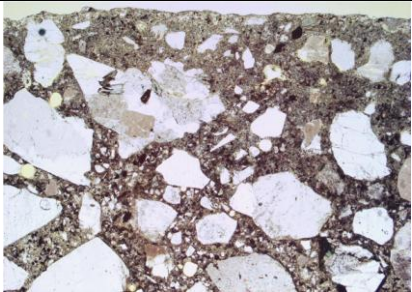
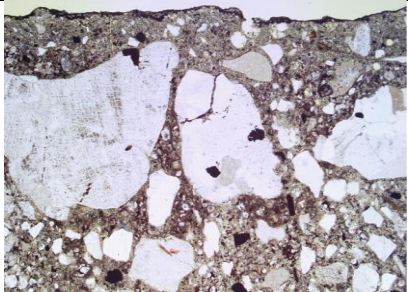
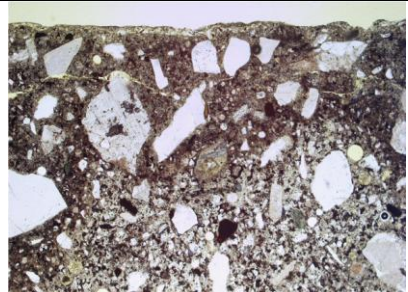
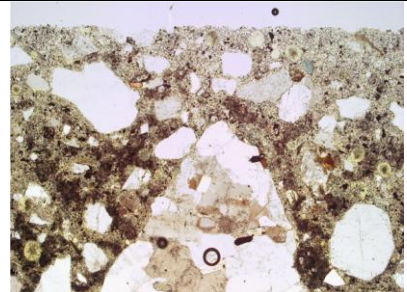
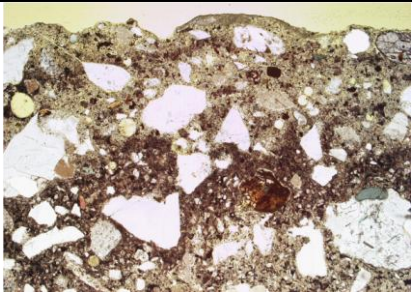
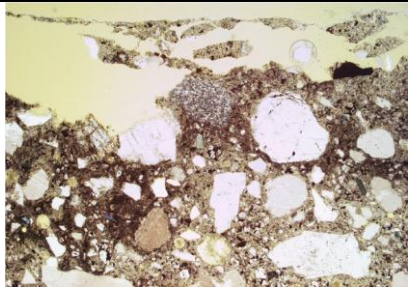
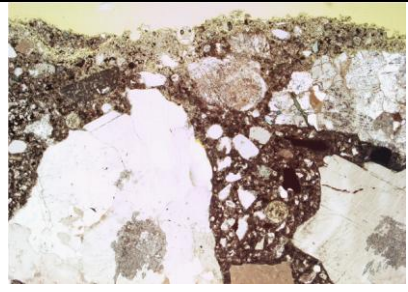
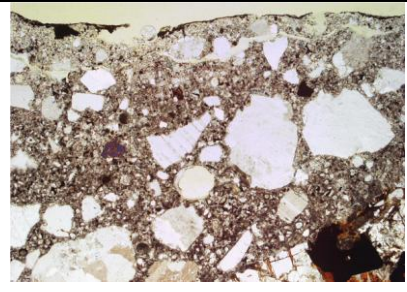
Bilaga 3 (2)

Polerade sågsnitt vinkelrätta mot betongytan. Rödfärgad betong är inte karbonatiserad.

Betongkärna nr 2:3	Betongkärna nr 3:0	Betongkärna nr 3:1	Betongkärna nr 3:2
			
Betongkärna nr 3:3	Betongkärna nr 4		
			

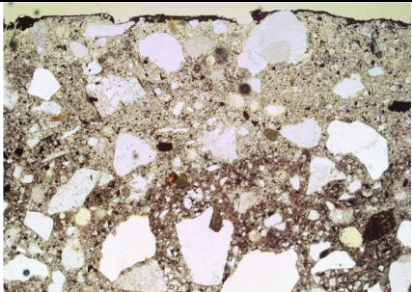
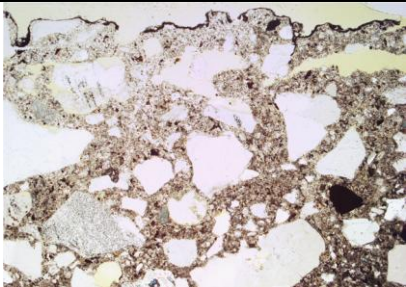
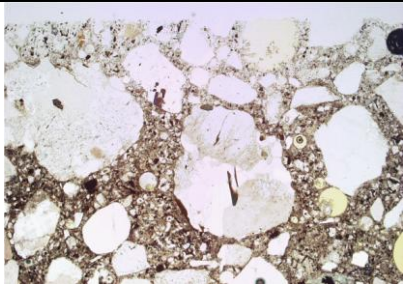
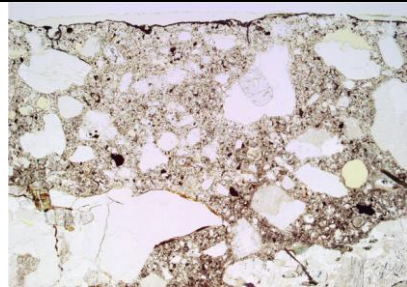
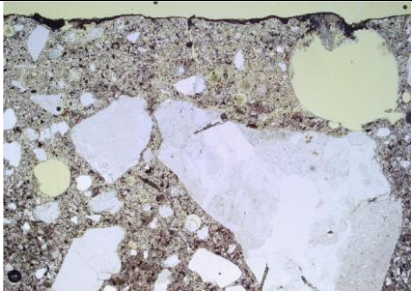
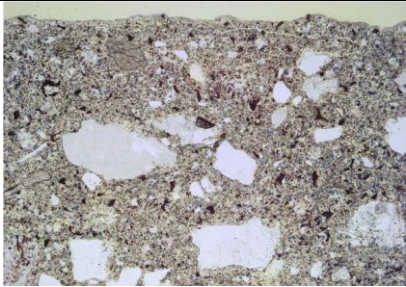
Bilaga 4 (1)

Betongens yttre skikt. Bilder är tagna i tunnslip. Bildernas bredd motsvarar 2,5 mm.

Betongkärna nr 1:1	Betongkärna nr 1:2	Betongkärna nr 1:3	Betongkärna nr 1:4
			
Betongkärna nr 1:5	Betongkärna nr 1:6	Betongkärna nr 2:1	Betongkärna nr 2:2
			

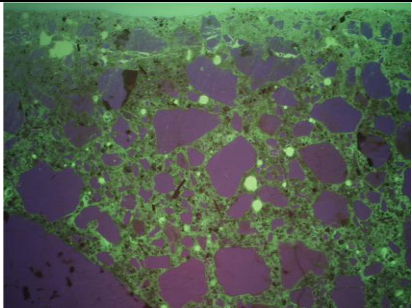
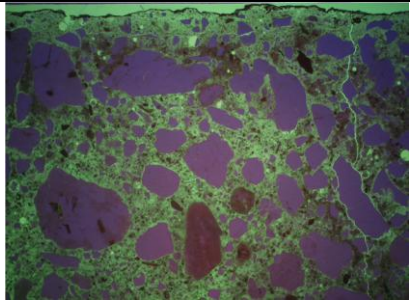
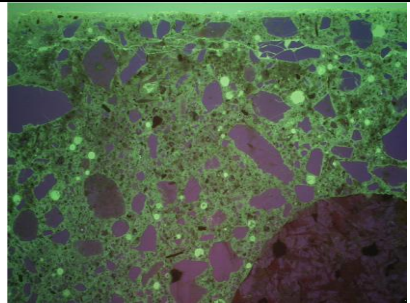
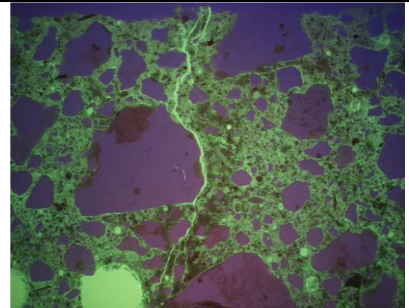
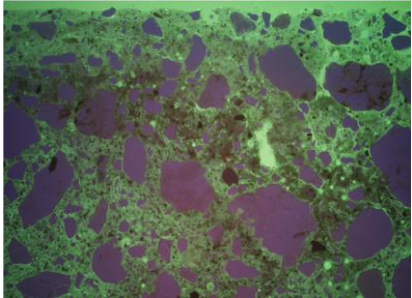
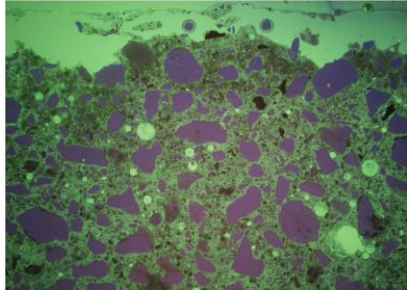
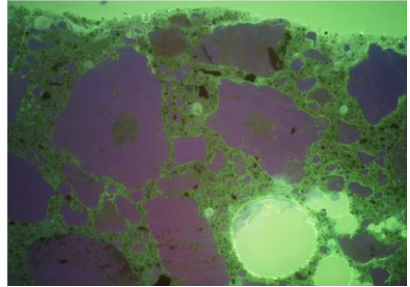
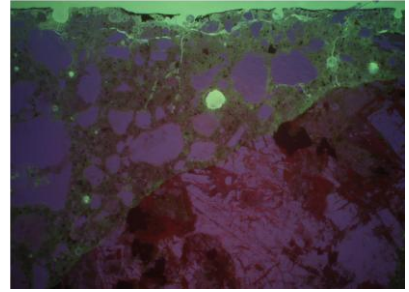
Bilaga 4 (2)

Betongens yttre skikt. Bilder är tagna i tunnslip. Bildernas bredd motsvarar 2,5 mm.

Betongkärna nr 2:3	Betongkärna nr 3:0	Betongkärna nr 3:1	Betongkärna nr 3:2
			
Betongkärna nr 3:3	Betongkärna nr 4		
			

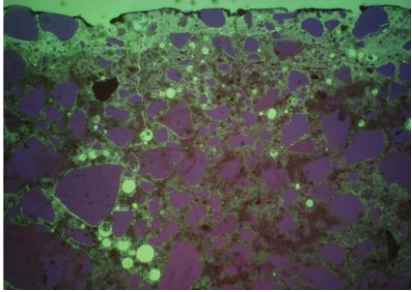
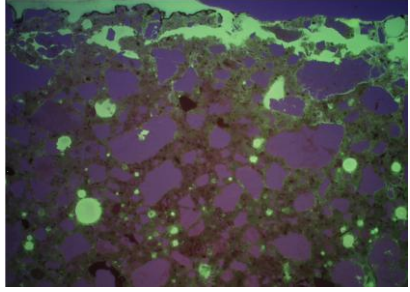
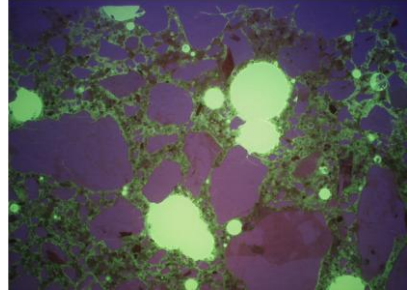
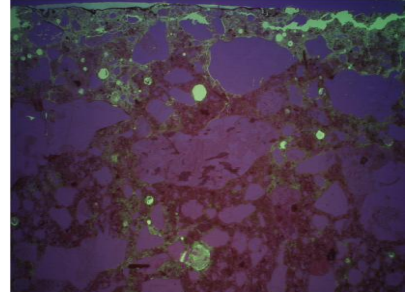
Bilaga 5 (1)

Betongens yttre skikt. Bilder är tagna i tunnslip, UV ljus. Bildernas bredd motsvarar 4,8 mm.

Betongkärna nr 1:1	Betongkärna nr 1:2	Betongkärna nr 1:3	Betongkärna nr 1:4
			
Betongkärna nr 1:5	Betongkärna nr 1:6	Betongkärna nr 2:1	Betongkärna nr 2:2
			

Bilaga 5 (2)

Betongens yttre skikt. Bilder är tagna i tunnslip, UV ljus. Bildernas bredd motsvarar 4,8 mm.

Betongkärna nr 2:3	Betongkärna nr 3:0	Betongkärna nr 3:1	Betongkärna nr 3:2
			
Betongkärna nr 3:3	Betongkärna nr 4		
