

GAMLA FJÄRRVÄRMERÖR (MED CFC-11) HAR FORTFARANDE GOD ISOLERFÖRMÅGA

Mätresultat: Fjärrvärmerör Hisings Backa station

Prepared by

Bijan Adl Zarrabi, Olle Ramnäs & Andreas Lilliestierna

VERSION 2016-05-26

Sammanfattning

Isoleregenskaperna och de mekaniska egenskaperna för två olika typer av rör (CFC-11 resp CFC-11/CO₂-blåsta) som har varit i drift i 27 år vid en testanläggning i Hisings Backa (Göteborg) har studerats. Även andra gamla CFC-11-blåsta rör har ingått i studien. Det äldsta röret hade använts i 32 år och har, liksom övriga rör, fortfarande utmärkta isoleregenskaper. Värmeledningsförmågan för det CFC-11-blåsta röret från Hisings Backa har endast ökat med knappt 10%. Cellgasen i rör som har använts vid hög temperatur har lägre syrgashalter och högre koldioxidhalter än förväntat. Detta kan förklaras genom att polymeren har oxideras. Lägre syrgashalt ger trots en något förhöjd koldioxidhalt lägre värmeledningsförmåga. De mekaniska testerna av rören från Hisings Backa visade att rörisoleringen klarar normerna enligt EN253.

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
2	Cellgasanalys.....	2
2.1	Resultat från cellgasanalys av isoleringen på rören från Hisings Backa	3
2.2	Jämförelsevärden, cellgasanalys.....	6
3	Termisk konduktivitet	9
3.1	Guarded Hot Pipe	9
3.2	Mätning av termisk konduktivitet	9
3.3	Beräknad termisk konduktivitet.....	10
4	Isoleringens densitet	11
4.1	Mätningar utförda på fjärrvärmerören från Hisings Backa.....	11
4.2	Jämförelsevärden.....	11
5	Axiell skjuvhållfasthet.....	12
5.1	Mätningar utförda på fjärrvärmerören från Hisings Backa.....	13
5.2	Jämförelsevärden.....	13
5.2.1	Nyproducerade rör.....	13
5.2.2	Åldrade rör	13
6	Radiell tryckhållfasthet.....	14
6.1	Mätningar utförda på fjärrvärmerören från Hisings Backa.....	15
6.2	Jämförelsevärden, radiell tryckhållfasthet.....	16
6.2.1	Nyproducerade rör.....	16
6.2.2	Åldrade rör	16
7	Cellen	16
7.1	Cellstorlek.....	17
7.2	Andel öppna och slutna celler.....	18
7.2.1	Mätningar utförda på fjärrvärmerören från Hisings Backa.....	19
7.2.2	Jämförelsevärden.....	19
7.3	Andel bubblor och blåsor.....	19
8	Diskussion.....	20
9	Medverkande	22
10	Referenser.....	23

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Med anledning av ett kommunalt beslut taget 1988 om förbud mot nytillverkning av CFC-11-blåst isolering i fjärrvärmerör krävdes nya alternativa isoleringar (Jarfelt, 1997). En provanläggning uppfördes därför i Hisings Backa norr om Göteborg för test av olika lösningar som ett samarbetsprojekt mellan Göteborg Energi och Powerpipe System AB. I anläggningen testades tre rör med diametrarna 280/170 (mantel/medierör) med följande blåsgaser i PUR-isoleringen:

- Traditionell CFC-11, betecknas **SH-1**.
- Utan CFC-11, koldioxidblåst skum, betecknas **PP-2** (men dock med några % CFC-11 från tidigare rörproduktion).
- Reducerad mängd CFC-11, betecknas **BA**.

De tre rören pumpades efter färdigställandet med varmvatten, första året med kontrollerad temperatur och därefter fick det följa fjärrvärmenätets temperatursvängningar (Jarfelt, 1997). Rören och dess isolering har under åren genomgått ett antal analyser av mekaniska egenskaper och isolerande förmåga.

- 1988 – Samma år som anläggningen färdigställdes bestämdes isoleringsförmågan.
- 1992 – Cellgasanalys på isoleringen samt mätning av termisk konduktivitet.
- 1996 – Cellgasanalys samt beräkning av termisk konduktivitet.
- 2001 – Cellgasanalys
- 2015 – Cellgasanalys, termisk konduktivitet samt bestämning av mekaniska egenskaper.

Rörtypen BA, som innehåller en reducerad mängd CFC-11, har inte använts kommersiellt i någon större utsträckning och i rapporten behandlas därför inte denna rörtyp. Fokus läggs på rörtyperna PP-2 och SH-1. Även om SH-1 inte längre produceras eller installeras så finns det fortfarande en ansevärd mängd kvar i systemet varför den fortfarande är intressant.

1.2 Syfte

Rapporten har fyra huvudsyften:

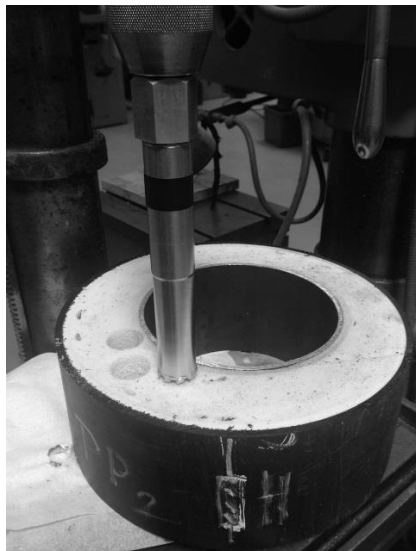
- Genomgång av mätmetoder och krav enligt standarden EN 253.
- Sammanställning av data från mätningar genomförda 1988-2015 på rörbitar från provanläggningen i Hisings Backa.
- Sammanställning av resultat, jämförbara med de från Hisings Backa, från andra studier och mätningar på rör med CFC-11 som blåsgas i isoleringen.
- Jämförelse av den uppmätta och beräknade värmekonduktiviteten för fjärrvärmerören från Hisings Backa under testperioden.

Varje enskild egenskap behandlas i separata kapitel med beskrivning av mätmetod, resultat från Hisings Backa och jämförelsevärden. Följande egenskaper behandlas i rapporten:

- Cellgasinnehåll
- Rörens värmeledningsförmåga
- Isoleringens densitet
- Mekaniska egenskaper
 - Axiell skjuvhållfasthet
 - Radiell tryckhållfastheten i skummet
- Andelen öppna/slutna celler
- Andelen bubblor och blåsor

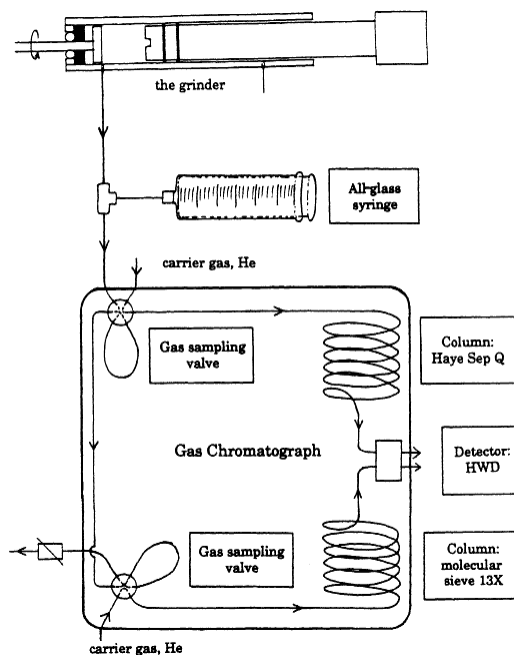
2 Cellgasanalys

Metoden för gasanalys som hänvisas till i standarden EN 253 finns beskriven i Journal of Cellular Plastics volym 31 (Ramnäs & Svanström, 1995). Vid en cellgasanalys bestäms totaltrycket och de enskilda gasernas partialtryck i PUR- isoleringen.



Figur 1. Provcylindrar borrar ut ur fjärrvärmeisoleringen.

Provcylindrar med isolerskum borrar ut från isoleringen, enligt Figur 1, och placeras i en tub där cellerna i skummet krossas av en roterande kniv. Den frigjorda gasen samlas upp i en glascylinder och injiceras sedan i en gaskromatograf där den analyseras och koncentrationen av de olika gaserna bestäms. Med kännedom om det samtidigt bestämda totaltrycket i cellerna kan man beräkna gasernas partialtryck. Figur 2 visar en principiell bild av utrustningen som används vid cellgasanalys.



Figur 2. Principiell bild av utrustning för cellgasanalys, en metod för mätning av de olika gasernas partialtryck i PUR-isoleringen (Ramnäs & Svanström, 1995).

2.1 Resultat från cellgasanalys av isoleringen på rören från Hisings Backa

Vid 4 tillfällen har cellgasanalyser gjorts på PUR-isoleringen i rör av typ PP-2 resp SH-1 från provanläggningen i Hisings Backa. Se Tabell 1 och 2.

Tabell 1. Partialtryck (kPa @21-24°C) för cellgaserna i PUR-isoleringen (koldioxidblåst skum) i rör PP-2. Resultaten från 1992 och 1996 är hämtade från (Jarfelt, 1997) och resultaten från 2001 är opublicerade data (Ramnäs).

Information om rören från analysen 2015-07-07. Mantelrörets tjocklek (mätt i 4 olika positioner): 4,9, 5,0, 5,1 och 5,1mm. Röret var mycket excentriskt och PUR-skiktets tjocklek var: 43,5-60,2mm. Proverna togs där skummet var tjockast.

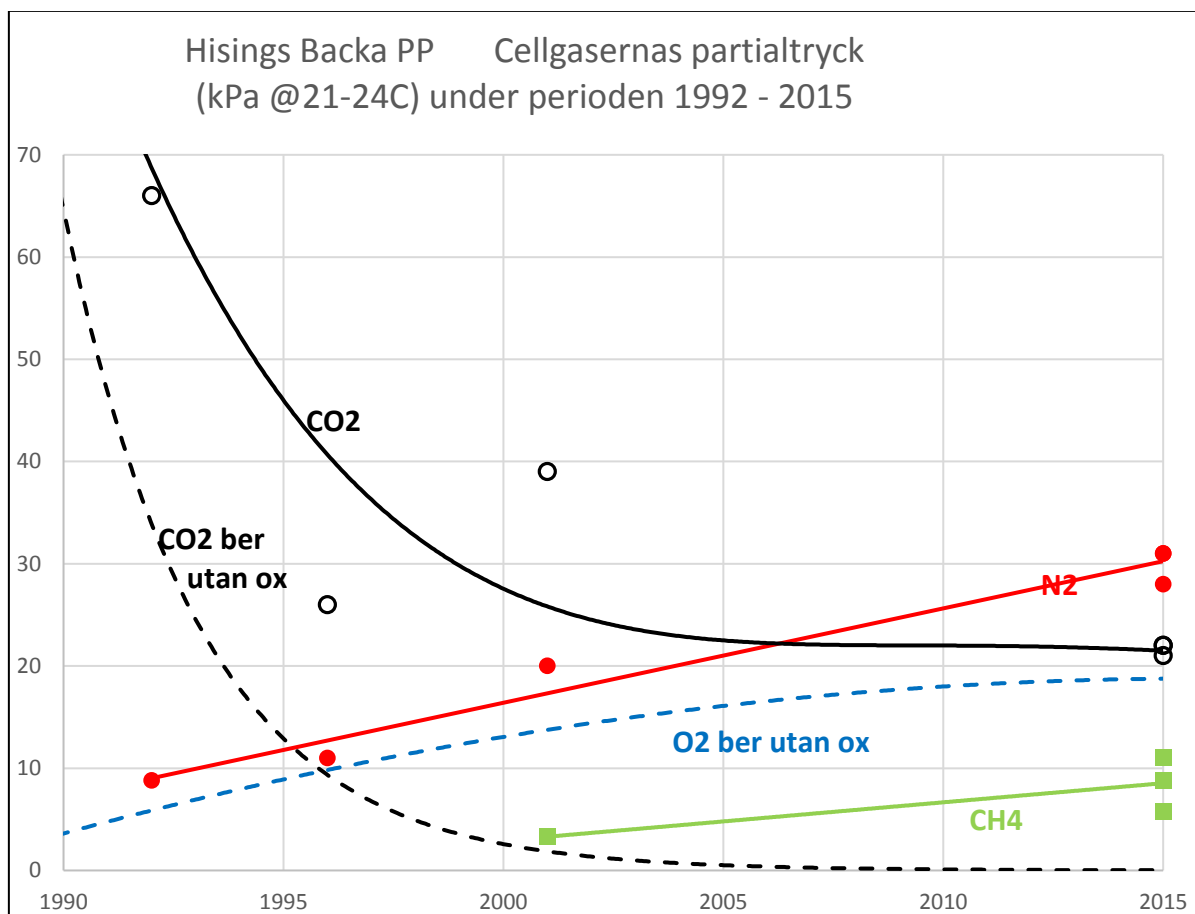
Cellgasanalys PP-2		1992	1996	2001	2015		
					Nära stål	Mitten	Nära mantel
Partialtryck [kPa @21-24°C]	O ₂	1.8	1.6	0.6	0.9	1.2	1.3
	N ₂	8.8	11	20	28	31	31
	CH ₄	-	-	3.3	5.8	8.8	11
	CO ₂	66	26	39	22	21	22
	CFC-11	3.4	3.2	3.2	2.2	1.3	1.0
	H ₂ O	0.2	0.7	2.2	1.0	1.1	1.1
Totalt cellgastryck [kPa]		80	42	68	60	65	68
Densitet [kg/m ³]		78	78	55	85	81	84
Kvot N ₂ /O ₂		4.9	6.9	33	31	26	23

Tabell 2. Partialtryck (kPa @21-24°C) för cellgaserna i PUR-isoleringen (CFC-11-blåst skum) i rör SH-1. Resultaten från 1992 och 1996 är hämtade från (Jarfelt, 1997) och resultaten från 2001 är opublicerade data (Ramnäs).

Information om rören från analysen 2015-07-09. Mantelrörets tjocklek (mätt i 5 olika positioner): 5,3 5,2, 5,1, 4,8 och 5,1mm. PUR-skiktets tjocklek var: 50,6-54,1mm.

Cellgasanalys SH-1		1992	1996	2001	2015		
					Nära stål	Mitten	Nära mantel
Partialtryck [kPa @21-24°C]	O ₂	2.3	1.4	0.7	1.4	1.6	2.1
	N ₂	16	11	20	41	44	46
	CH ₄	-	-	5.5	5.8	8.4	14
	CO ₂	48	18	31	18	16	16
	CFC-11	54	47	41	50	40	30
	H ₂ O	0.4	3.0	2.6	1.7	1.7	1.8
Totalt cellgastryck [kPa]		120	80	101	117	112	109
Densitet [kg/m ³]		73	70	59	65	62	68
Kvot N ₂ /O ₂		7.0	7.9	28	29	28	22

Förändringarna av de enskilda cellgasernas partialtryck för rör PP-2 och SH-1 framgår även av Figur 3 och 4. Beräkningarna har gjorts med samma metodik som Jarfelt använde i en rapport från 1997 men med nya mätdata.



Figur 3. Partialtryck för enskilda gaser i PUR-isoleringen för rör av typ PP-2 (koldioxidblåst). Cellgasanalys har genomförts vid 4 tillfällen, 1992, 1996, 2001 samt 2015. Alla prover togs mitt i skummet utom för år 2015 då prover även togs mycket nära stålroret resp mantelroret. De streckade linjerna visar hur partialtrycket för CO₂ resp O₂ sannolikt hade minskat resp ökat om man inte hade tagit hänsyn till oxidationen av PUR.

De uppmätta partialtrycken för O₂ var låga (0,7 - 2,3 kPa) och har inte ritats ut i figuren.

Vid beräkningarna användes samma metodik som i tidigare rapport (Jarfelt 1997). Följande värden har använts:

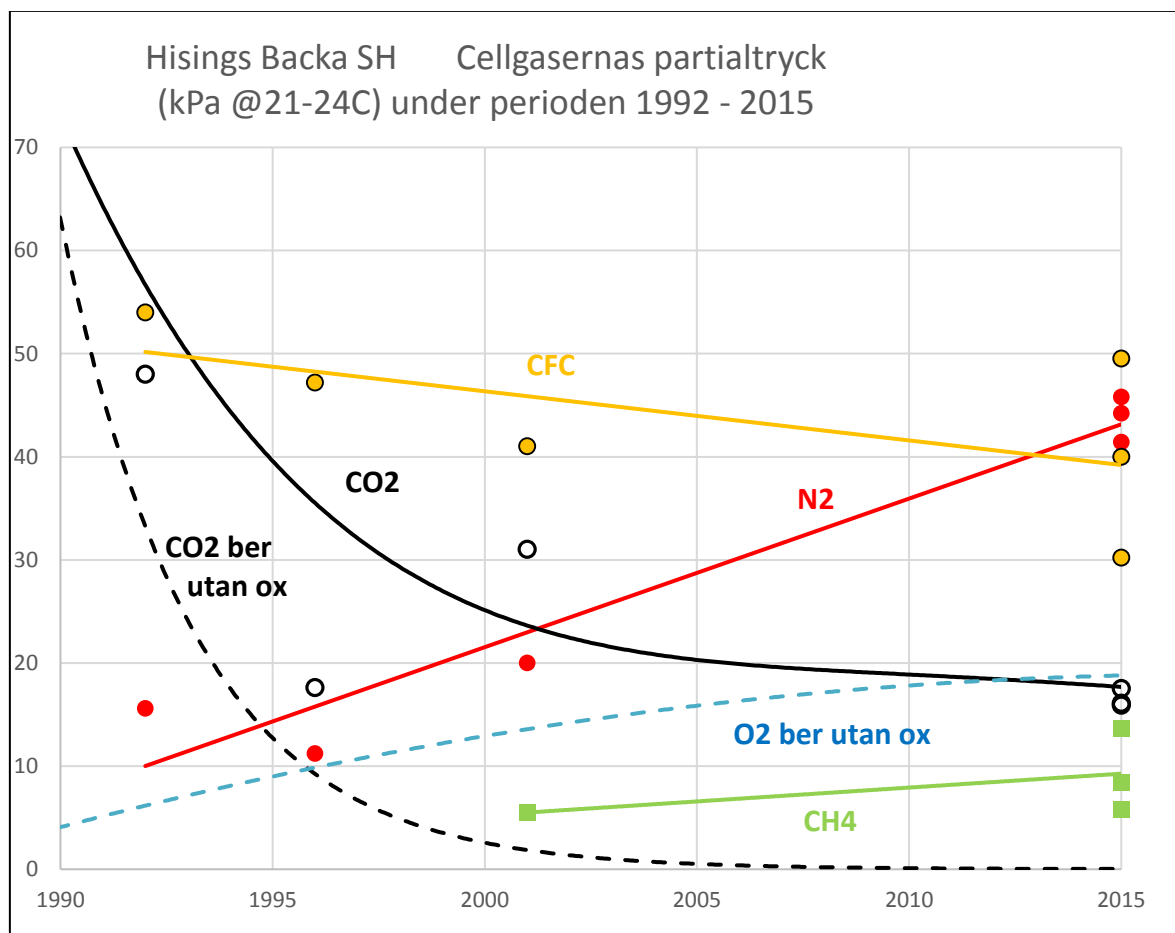
Starttryck: 1 (O₂), 3 (N₂), 120 (CO₂), 3 (CFC-11), 0 (CH₄), 127 (totalt) kPa.

Effektiv permeabilitetskoefficient i PE @20C: 1,9 (O₂ ber utan ox), 0,45 (N₂), 8,6 (CO₂ ber utan oxidation), $1,8 \text{ (CO}_2\text{)} \cdot 10^{-16} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$.

Partialtrycket för CH₄ har ökat linjärt med tiden (t, år): $P_{\text{CH}_4} = 0,3 \cdot t$, kPa

Ytterdiameter för stål rör resp PE-rör: 168 resp 284mm.

PE-rörets tjocklek: 5,0mm.



Figur 4. Partialtryck för enskilda gaser i PUR-isoleringen för rör av typen SH-1 (CFC-11-blåst). Cellgasanalys har genomförts vid 4 tillfällen, 1992, 1996, 2001 samt 2015. Alla prover togs mitt i skummet utom för år 2015 då prover även togs mycket nära stålröret resp mantelröret. De streckade linjerna visar hur partialtrycket för CO₂ resp O₂ sannolikt hade minskat resp ökat om man inte hade tagit hänsyn till oxidationen av PUR.

Vid beräkningarna användes samma metodik som i tidigare rapport (Jarfelt 1997). Följande värden har använts:

Starttryck: 1 (O₂), 3 (N₂), 80 (CO₂), 60 (CFC-11), 0 (CH₄), 144 (totalt) kPa.

Effektiv permeabilitetskoefficient i PE @20C: 1,9 (O₂ ber utan ox), 0,8 (N₂), 8,6 (CO₂ ber utan oxidation), $1,6 \text{ (CO}_2\text{)} \cdot 10^{-16} \text{ mol} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$.

Effektiv diffusionskoefficient för CFC-11 i PUR @50C: $2,8 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Partialtrycket för CH₄ har ökat linjärt med tiden (t, år): $P_{\text{CH}_4} = 0,3 \cdot t$, kPa

Ytterdiameter för stålrör resp PE-rör: 168 resp 284mm.

PE-rörets tjocklek: 5,0mm.

2.2 Jämförelsevärden, cellgasanalys

Cellgasanalyser av skum i gamla rör genomfördes under andra hälften av 2011 på Chalmers. Tabell 3 ger data beträffande de CFC-11-blåsta rör som har analyserats. F innebär framledningsrör och R innebär returrör. Rör GA är ett mindre rör som varit del av en fastighetsanslutning.

Tabell 3. Översikt rör med CFC-11 blåst isolering (Ramnäs & Persson, 2013).

Dimension	Temperatur	Installerad	Plats	Beteckning
DN40/125	75-100	1986	Arvid Lindmans gata 12A, Göteborg	GA
DN300/500	75-100	1987	Hjalmar Brantings gata, Göteborg	GBF
DN300/500	40-70	1987	Hjalmar Brantings gata, Göteborg	GBR
DN250/450	70-105	1991	Jönköping	GCF
DN250/450	40-60	1991	Jönköping	GCR

Tabell 4. Gasanalys (sept 2011) för rör GA, i drift under 25 år.

Gas (H ₂ O ej med i tabellen)	Partialtryck [kPa @21-24C]
O ₂	3.1
N ₂	52
CO ₂	4.8
CFC-11	58
Totalt cellgastryck [kPa]	120
Densitet [kg/m ³]	72
Kvot N ₂ /O ₂	17

Tabell 5. Gasanalys (nov 2011) för rör GBF och GBR, i drift under 24 år.

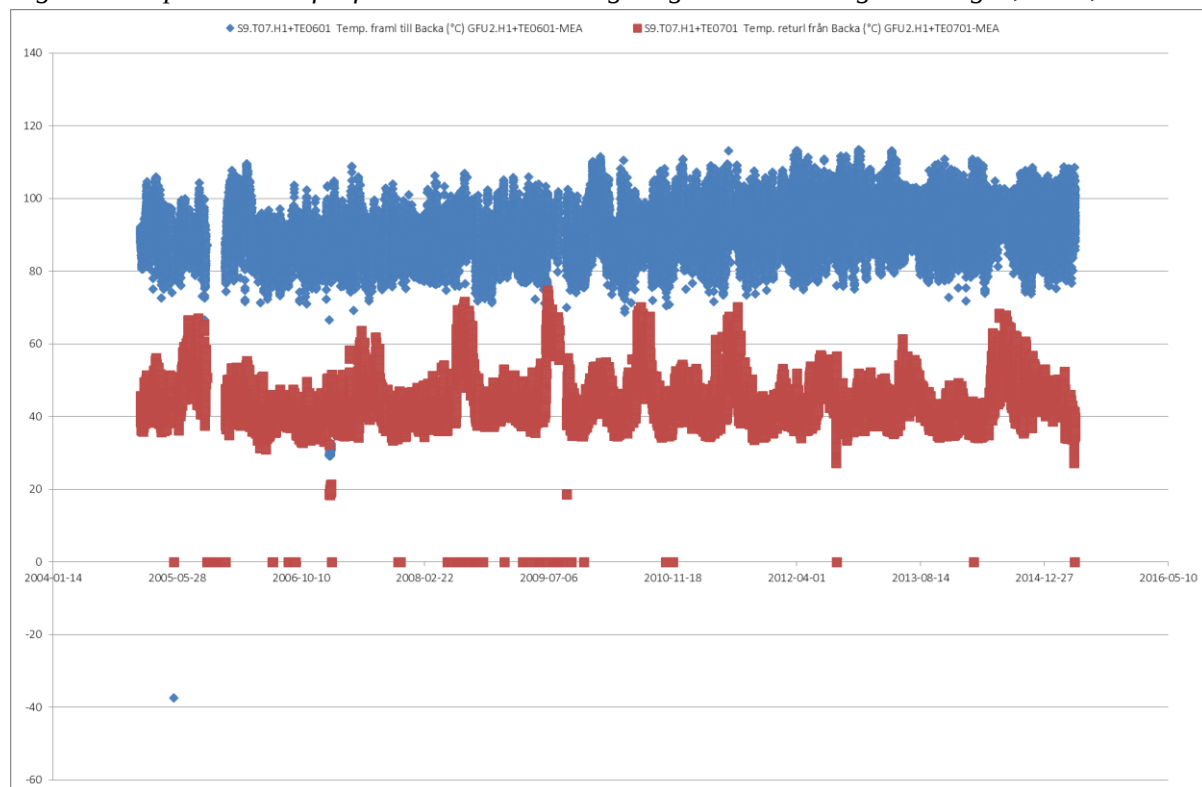
Gas (H ₂ O ej med i tabellen)	Partialtryck [kPa @21-24C]				
	Framledning		Returledning		
	Nära stål	Mitten	Nära stål	Mitten	Nära mantel
O ₂	0.8	1.1	3.2	3.4	3.8
N ₂	12	14	16	16	19
CO ₂	26	25	22	22	23
CFC-11	53	42	35	31	30
Totalt tryck [kPa]	94	83	77	74	76
Densitet [kg/m ³]	71	70	68	66	69
Kvot N ₂ /O ₂	15	13	4.9	4.8	4.9

Tabell 6. Gasanalys (dec 2011) för rör GCF och GCR, i drift under 20 år.

Gas (H ₂ O ej med i tabellen)	Partialtryck [kPa @21-24C]					
	Framledning			Returledning		
	Nära stål	Mitten	Nära mantel	Nära stål	Mitten	Nära mantel
O ₂	2.4	2.9	3.4	12	12	13
N ₂	11	12	16	62	58	63
CO ₂	30	28	30	26	25	27
CFC-11	38	33	31	28	26	24
Totalt tryck [kPa]	83	77	82	130	122	127
Densitet [kg/m ³]	80	78	87	82	81	91
Kvot N ₂ /O ₂	4.4	4.2	4.8	5.0	4.8	4.9

Det är intressant att notera att trots att temperaturen i framledningen sällan har varit över 110°C har en betydande oxidation ägt rum. Temperaturen för fram- och returledningen visas i Figur 5.

Figur 5. Temperaturdata för fram- och returledning Tingstadsmotet/Tingsstadsvägen, Å117, 2005-2015.



Enligt Lennart Kramér (Göteborg Energi) är temperaturerna representativa för såväl rören från Hisings Backa som för rören från Marieholm.

Cellgasanalys har även gjorts på två rör (fram- och returledning) som använts under 32 år i Marieholm (Göteborg). De analyserade rörbitarna hade beteckningen Marieholm Å116. Rören var tillverkat år 1983 av Ecopipe. Rören levererades genom Lennart Kramér (Göteborg Energi). Dimension: DN500 serie 2 (ytterdiameter stålrör: 508 mm, PE-rör: 716mm). PE-rörets tjocklek var (mätt i 3 olika positioner): 15,1, 15,4 och 16,0 mm för framledningen och 14,4, 13,9 och 14,5 mm för returledningen, vilket är ungefär dubbelt så tjockt som föreskrivs i dagens standard för denna dimension (7,2 mm). PUR-skiktet var således ca 88 mm. Temperaturdata finns för perioden 2005 – 2015 och bör ligga ganska nära temperaturen för rören från Hisings Backa.

Tabell 7 Gasanalys (jan 2106) för rör från Marieholm, i drift under 32 år.

Framledning Gas (H ₂ O ej med i tabellen)	Partialtryck @22°C, kPa			
	Nära stålrör 75mm från mantel	Mitten 54mm från mantel	Mitten 35mm från mantel	Nära mantel 15mm från mantel
O ₂	0.5	1.0	1.0	1.1
N ₂	9.6	11	12	12
CO ₂	48	47	48	50
CFC-11	78	74	70	61
Totaltryck [kPa]	138	135	132	126
Densitet [kg/m ³]	86	83	83	84
Kvot N ₂ /O ₂	18	11	12	11

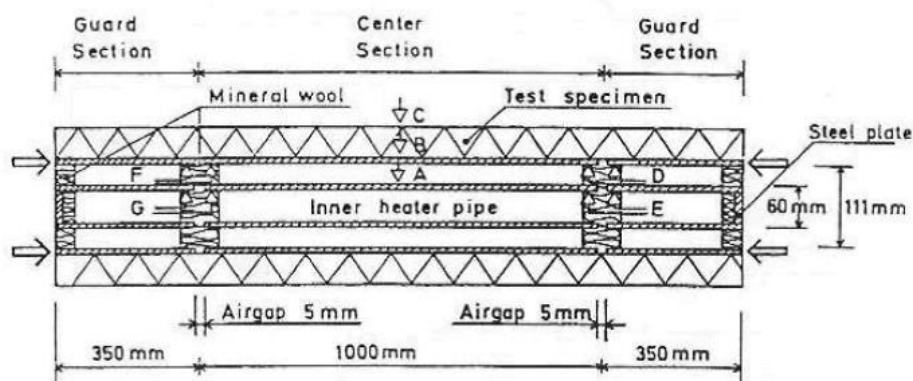
Returledning Gas (H ₂ O ej med i tabellen)	Partialtryck @22°C, kPa		
	Nära stålrör 76mm från mantel	Mitten 45mm från mantel	Nära mantel 16mm från mantel
O ₂	4.2	4.7	5.1
N ₂	26	26	25
CO ₂	42	42	44
CFC-11	59	58	61
Totaltryck [kPa]	133	132	137
Densitet [kg/m ³]	81	81	85
Kvot N ₂ /O ₂	6.3	5.5	4.8

3 Termisk konduktivitet

Termisk konduktivitet för fjärrvärmerör har mätts med hjälp av Guarded Hot Pipe-metoden. Även beräkningar av konduktiviteten baserade på gasanalys av isolerskummet har gjorts. Enligt EN 253-2009 får den termiska konduktiviteten vid 50°C (λ_{50}) inte överskrida 0.029 W·m⁻¹·K⁻¹ för nyproducerade rör.

3.1 Guarded Hot Pipe

För att bestämma termisk konduktivitet för fjärrvärmerör skall kraven i ISO 8497 uppfyllas. Utrustning för ”Guarded Hot Pipe”-metoden har tagits fram vid Avdelningen för Byggnadsfysik, Chalmers. Metoden finns beskriven i (Jarfelt, 1986). Vid ändarna på det rör som skall testas (längd 1m) placeras rörbitar med samma diameter (längd 350mm) för att förhindra värmeförluster. En justerbar värmekälla placeras i röret och konduktiviteten bestäms när en stationär temperatur på 50°C har nåtts vid en viss radie. En schematisk bild över Guarded Hot Pipe kan ses i Figur 6.



Figur 6. Guarded Hot Pipe, metod för bestämning av värmekonduktivitet. (Jarfelt, 1986)

3.2 Mätning av termisk konduktivitet

Tabell 8. Termisk konduktivitet (λ_{50}) för PP-2 och SH-1 uppmätt vid 50°C. Ökningen jämfört med första mättillfället anges inom parentes. Mätningarna från 1988 och 1992 är från Jarfelt 1997.

Rör	1988 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	1992 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	2015 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
PP-2	0.0316	0.0329 (+4.1%)	0,0352 (+11.4%)
SH-1	0.0260	0.0274 (+5.4%)	0.0285 (+9,6%)

3.3 Beräknad termisk konduktivitet

Man kan med varierande noggrannhet beräkna den termiska konduktiviteten utgående från en cellgasanalys av isolerskummet. Man behöver då inte såga ut en nästan 2 meter lång rörbit och därmed skada ett installerat rör. För att kunna beräkna konduktiviteten för hela röret (λ_{total}) och inte bara cellgasens bidrag ($\lambda_{\text{ledning gas}}$) måste man känna till värmeledningen genom polymerskelettet ($\lambda_{\text{ledning polymer}}$) och bidraget från strålningen ($\lambda_{\text{strålning}}$) eftersom $\lambda_{\text{total}} = \lambda_{\text{ledning gas}} + \lambda_{\text{ledning polymer}} + \lambda_{\text{strålning}}$ (Jarfelt, 1997). Medierörets och mantelrörets bidrag till rörets totala konduktivitet är mindre än 1 % (Olsson 2001).

Cellgasens konduktivitet har i denna rapport beräknats med hjälp av Wassiljewas ekvation och Mason och Saxenas modifikation för de olika gasernas samverkan. Det kan dock finnas en betydande osäkerhet i beräkningarna (kanske upp till +/-10%), bl a beroende på osäkra materialdata och vilka approximationer man gör när man antingen använder sig av gasernas viskositeter eller kritiska tryck och temperaturer..

Det är dessvärre svårare och ännu mera osäkert att beräkna ledningen i polymeren och strålningen. Dessa ledningsbidrag beror på cellens geometri, cellväggarnas tjocklek, andelen ”struts” mm. Det är därför enklare att utgå från ett rör med känd konduktivitet och göra en cellgasanalys. Från de uppmätta koncentrationerna kan cellgasens bidrag beräknas. Detta bidrag subtraheras från den för röret uppmätta konduktiviteten och man erhåller då bidraget för ledning i polymer och strålning. Detta bidrag varierar med temperaturen men förändras inte över tiden och anses därför vara konstant (för en viss temperatur) för ett visst rör. För framtida mätningar är det tillräckligt med en cellgasanalys för att kunna beräkna den termiska konduktiviteten för hela röret. Om det händer något oförutsett med röret, t ex att det kommer in vatten i isoleringen påverkar detta naturligtvis resonemanget ovan.

Som framgår av Tabell 9 är bidraget för ledning i polymer och strålning ganska stort och varierar oväntat mycket. Om cellstrukturen varit den samma i alla testade rör, skulle detta bidrag varit konstant.

Tabell 9. Cellgasens bidrag till konduktiviteten beräknad med hjälp av Wassiljewas ekvation (Mason-Saxenas modifikation och viskositeter) och uppmätt konduktivitet för hela rör. För de enskilda gaserna har följande värden på termisk konduktivitet @50C använts: 28.51 (O₂), 27.37 (N₂), 18.68 (CO₂), 9.48 (CFC-11), 37.81 (CH₄) mW·m⁻¹·K⁻¹.

Termisk konduktivitet W·m ⁻¹ ·K ⁻¹	1988	1992	1996	2015
PP-1				
Uppmätt för röret	0.0316	0.0329		0.0352
Beräknat för cellgasen	0.0185*	0.0188	0.0192	0.0235
Skillnad	0.0139	0.0141		0.0117
SH-2				
Uppmätt för röret	0.0260	0.0274		0.0285
Beräknat för cellgasen	0.0134*	0.0135	0.0122	0.0160
Skillnad	0.0126	0.0139		0.0125

* Ingen cellgasanalys gjordes 1988. Vid beräkningen användes de antagna värdena för koncentrationerna som anges i figurexterna för Figur 4 och 5.

4 Isoleringens densitet

Densiteten på fjärrvärmerörens isolering räknas bland annat fram i samband med cellgasanalys. Kravet har tidigare varit att isoleringen ska hålla en högre densitet än 60kg/m^3 men har i den senaste versionen av standarden EN 253 utelämnats.

4.1 Mätningar utförda på fjärrvärmerören från Hisings Backa

Densiteten på rör från provanläggningen vid Hisings Backa av typerna PP-2 och SH-1 har uppmäts vid 4 tillfällen, samtliga i samband med cellgasanalys.

Tabell 10. Densitet [kg/m^3] för isoleringen i rör från Hisings Backa provanläggning av typen PP-2 (koldioxidblåst isolering) och SH-1 (CFC-11 blåst isolering) 1992-2015.

Densitet kg/m^3	1992	1996	2001	2015		
				Nära stålrör	Mitten	Nära mantel
PP-2	78	78	55	85	81	84
SH-1	73	70	59	65	62	68

4.2 Jämförelsevärden

I Tabell 11 visas mätningar av densiteten för skummet (CFC-11-blåst) för ett antal ny tillverkade rör från Powerpipe. Jämförelsevärden för fem åldrade fjärrvärmerör med CFC-11 som blåsgas i isoleringen presenteras i Tabell 12 (Ramnäs & Persson, 2013).

Tabell 11. Densitet för skummet i fem ny tillverkade rör. Mätningarna utförda av Statens Provningsanstalt på beställning av Powerpipe AB i slutet av 1980-talet.

Datum för mätning	Ytterdiameter (stålrör/mantelrör) [mm]	Densitet [kg/m^3]
1987-07-24	230/-	82
1988-01-08	50/140	57
1988-01-08	139/250	58
1988-06-08	42/110	73
1988-06-08	42/110	72

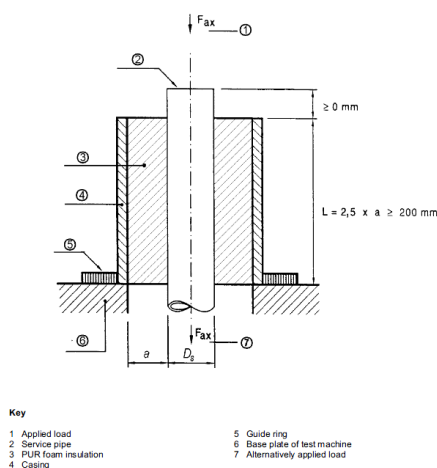
Tabell 12. Densitet hos fem rör, mätningar utförda i slutet av 2011 (Ramnäs & Persson, 2013). Det är samma rör som presenteras i Tabellerna 3-6.

	Dimension	Ålder [år]	Densitet [kg/m^3]		
			Nära stålrör	Mitten	Nära mantel
GA	DN40/125	25	-	72	-
GBF	DN300/500	24	71	70	-
GBR	DN300/500	24	68	66	69
GCF	DN250/450	20	80	78	87
GCR	DN250/450	20	82	81	91

5 Axiell skjuvhållfasthet

Metoden finns beskriven under paragraf 5.4.1 i EN 253. Provbiter av röret ska vara 2.5 gånger så långa som tjockleken på isoleringen och minst 200mm. Fjärrvärmeröret placeras i vertikalt (eller horisontellt) läge och medieröret utsätts för en axiell kraft samtidigt som mantelröret hålls fast av bottenplattan enligt Figur 7. Enligt EN 253 har röret passerat sin tekniska livslängd om skjuvhållfastheten underskrider 0.12 MPa. Figur 8 visar en bild från försöken i SPs provlaboratorium.

En omfattande studie har genomförts i Tyskland där flertalet rör, utsatta för stress ekvivalent till 10-15 års drift i 120° C, underskridit denna gräns (Stadtwerke Leipzig GmbH & GEF Ingenieurgesellschaft für Energietechnik und Fernwärme Chemnitz mbH, 2004). Enligt Sällström et al. anses dock kravet på 0.12 MPa vara väl högt satt, bland annat eftersom det genomfördes beräkningar på ett extremfall. I extremfallet uppgick skjuvspänningen som ett fjärrvärmerör av dimension DN 100/225 utsattes för till 0.0325 MPa, dvs. knappt en tredjedel av kravet (Sällström, et al., 2012).



Figur 7. Principiell bild över test av axiell skjuvhållfasthet. (CEN, 2009)



Figur 8. Bild från provtillfälle för bestämning av axiell skjuvhållfasthet. I det här fallet har skummet släppt i vidhäftningen mot mantelröret.

5.1 Mätningar utförda på fjärrvärmerören från Hisings Backa

SP, Sveriges Tekniska Forskningsinstitut genomförde mekaniska tester på rör av typ PP-2 och SH-1, december 2015, på beställning av Chalmers. Resultaten från tester av skjuvhållfasthet kan ses i Tabell 13.

Tabell 13. Resultat från tester av skjuvhållfasthet på rör av typ PP-2 och SH-1, dimension DN150/280. Försöken är genomförda av SP – Sveriges Tekniska Forskningsinstitut enligt EN 253:2009 clause 5.4.1.4. Osäkerheten i testet är mindre än 2%. Provdatum: 2015-12-15

Beteckning	Uppmätt värde vid +23°C, Mpa	Förskjutning vid brott, mm	Plats för brott	Krav, MPa
PP2A	0.20	4.8	Medierör	≥ 0.12
PP2B	0.16	3.8	Medierör	
PP1C	0.16	4.2	Medierör	
Medelvärde	0.17			
SH1A	0.21	4.3	Medierör	≥ 0.12
SH1B	0.22	5.5	Mantelrör	
SH2C	0.01	3.7	Mantelrör	
Medelvärde	0.15			

5.2 Jämförelsevärden

Värden på skjuvhållfasthet för fjärrvärmerör med CFC-11-blåst isolering ges för både nyproducerade rör och åldrade. De nyproducerade rören har testats av Statens Provningsanstalt, nu SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut på uppdrag av Powerpipe AB. Värden för åldrade fjärrvärmerör är hämtade från en mycket omfattande tysk studie.

5.2.1 Nyproducerade rör

Under en period i slutet av 1980-talet tillverkade Powerpipe AB rör med CFC-11 blåst isolering. Vid ett antal tillfällen utfördes mätningar av bland annat skjuvhållfasthet av Statens Provningsanstalt. Resultaten från testerna av skjuvhållfastheten kan ses i Tabell 14.

Tabell 14. Skjuvhållfasthet för fyra rör med CFC-11 blåst isolering. Mätningarna är beställda av Powerpipe AB och utförda av Statens Provningsanstalt.

Datum	Ytterdiameter (medierör/mantelrör) [mm]	Skjuvhållfasthet [MPa]
1987-05-21	89/180	0.25
1987-07-24	230/-	0.4
1988-06-08	42/110	0.4
1988-06-08	42/110	0.6

5.2.2 Åldrade rör

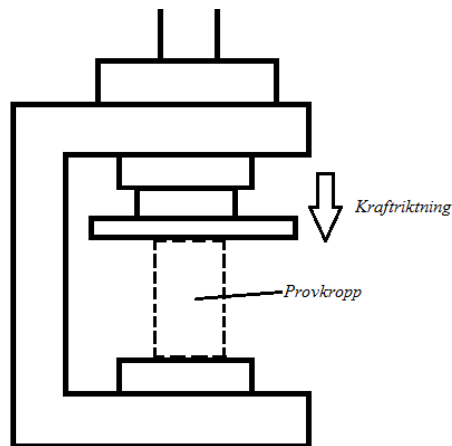
I den tyska studien har även mätningar på skjuvhållfastheten genomförts hos en stor mängd fjärrvärmerör, totalt 110 stycken (Stadtwerke Leipzig GmbH & GEF Ingenieurgesellschaft für Energietechnik und Fernwärme Chemnitz mbH, 2004). Av dessa har gasanalyser presenterats på 77, varav 57 har CFC-11 som blåsgas. Diametern på dessa rör varierar mellan DN20 och DN300. Medelvärdet på skjuvhållfastheten i detta urval är 0.226 MPa, att jämföra med kravet på 0.12 vilket underskrids av 6 rör.

6 Radiell tryckhållfasthet

Mätning av tryckhållfasthet behandlas under paragraf 5.3.3 i EN 253 och ska testas enligt ISO 844. Provkroppar enligt ett av följande två alternativ skall tas ut:

- a. Rätblock om 30 mm x 30 mm x t
- b. Cylinder med diameter 30 mm och höjd

där höjden t är max 20 mm och är begränsad av ett säkerhetsavstånd från medieröret och mantelröret på 3 respektive 5 mm. Medelvärde på tryckhållfastheten från tre tester får ej underskrida 0.3 MPa i radiell riktning vid 10 % relativ deformation. Figur 9 visar principiellt hur provkroppen utsätts för tryck och Figur 10 är en bild tagen på utrustningen vid provtillfället på SP.



Figur 9. *Principiell bild av test för tryckhållfasthet.*



Figur 10. *Utrustning för mätning av radiell tryckhållfasthet. Tryck appliceras vertikalt på rätblocket.*

6.1 Mätningar utförda på fjärrvärmerören från Hisings Backa

SP, Sveriges Tekniska Forskningsinstitut genomförde mekaniska tester på rör av typ PP-2 och SH-1, i december 2015, på beställning av Chalmers. Resultaten från tester av radiell tryckhållfasthet kan ses i Tabell 15.

Tabell 15. Resultat från tester av radiell tryckhållfasthet på rör av typ PP-2 och SH-1. Försöken är genomförda av SP – Sveriges Tekniska Forskningsinstitut enligt EN 253:2009 clause 5.3.3. Osäkerheten i testet är mindre än 2%. Provdatum: 2015-12-15.

Beteckning	Uppmätt värde, Mpa	Krav
PP1E-1	0.42	≥ 0.30
PP1E-2	0.44	
PP1E-3	0.43	
Medelvärde	0.43	
PP2D-1	0.38	≥ 0.30
PP2D-2	0.37	
PP2D-3	0.35	
Medelvärde	0.37	
SH1D-1	0.64	≥ 0.30
SH1D-2	0.66	
SH1D-3	0.69	
Medelvärde	0.66	
SH2E-1	0.57	≥ 0.30
SH2E-2	0.56	
SH2E-3	0.64	
Medelvärde	0.59	

6.2 Jämförelsevärden, radiell tryckhållfasthet

Värden på tryckhållfasthet för fjärrvärmerör med CFC-11-blåst isolering ges för både nyproducerade rör och åldrade. De nyproducerade rören har testats av Statens Provningsanstalt, nu SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, på uppdrag av Powerpipe AB. Värden för åldrade fjärrvärmerör är hämtade från en mycket omfattande tysk studie.

6.2.1 Nyproducerade rör

Under slutet av 1980-talet tillverkade Powerpipe AB rör med CFC-11 blåst isolering. Vid ett antal tillfällen utfördes mätningar av bland annat tryckhållfasthet av Statens Provningsanstalt. Resultaten från testerna av skjuvhållfastheten kan ses i Tabell 16.

Tabell 16. Radiell tryckhållfasthet för sex rör med CFC-11 blåst isolering. Mätningarna är beställda av Powerpipe AB och utförda av Statens Provningsanstalt.

Datum	Ytterdiameter (medierör/mantelrör) [mm]	Tryckhållfasthet [MPa]
1987-05-21	89/180	0.34
1987-07-24	230/-	0.43
1988-01-08	50/140	0.3
1988-01-08	139/250	0.36
1988-06-08	42/110	0.3
1988-06-08	42/110	0.31

6.2.2 Åldrade rör

Tryckhållfastheten för 110 fjärrvärmerör är presenterade i en tysk studie (Stadtwerke Leipzig GmbH & GEF Ingenieurgesellschaft für Energietechnik und Fernwärme Chemnitz mbH, 2004). Endast ett fåtal rör klarade inte kravet att tryckhållfastheten inte ska underskrida 0.3 MPa.

7 Cellen

Cellens egenskaper är av stor betydelse för ett isolerskum. Cellerna skall vara så små som möjligt för att minimera strålningsbidraget. Cellväggarna skall vara tunna för att minska ledningen i polymeren men inte så tunna att cellgaserna lätt kan tränga genom cellväggarna. Vidare måste cellerna vara helt slutna för att kunna hålla kvar cellgaserna. Alltför många stora bubblor eller blåsor får inte förekomma.

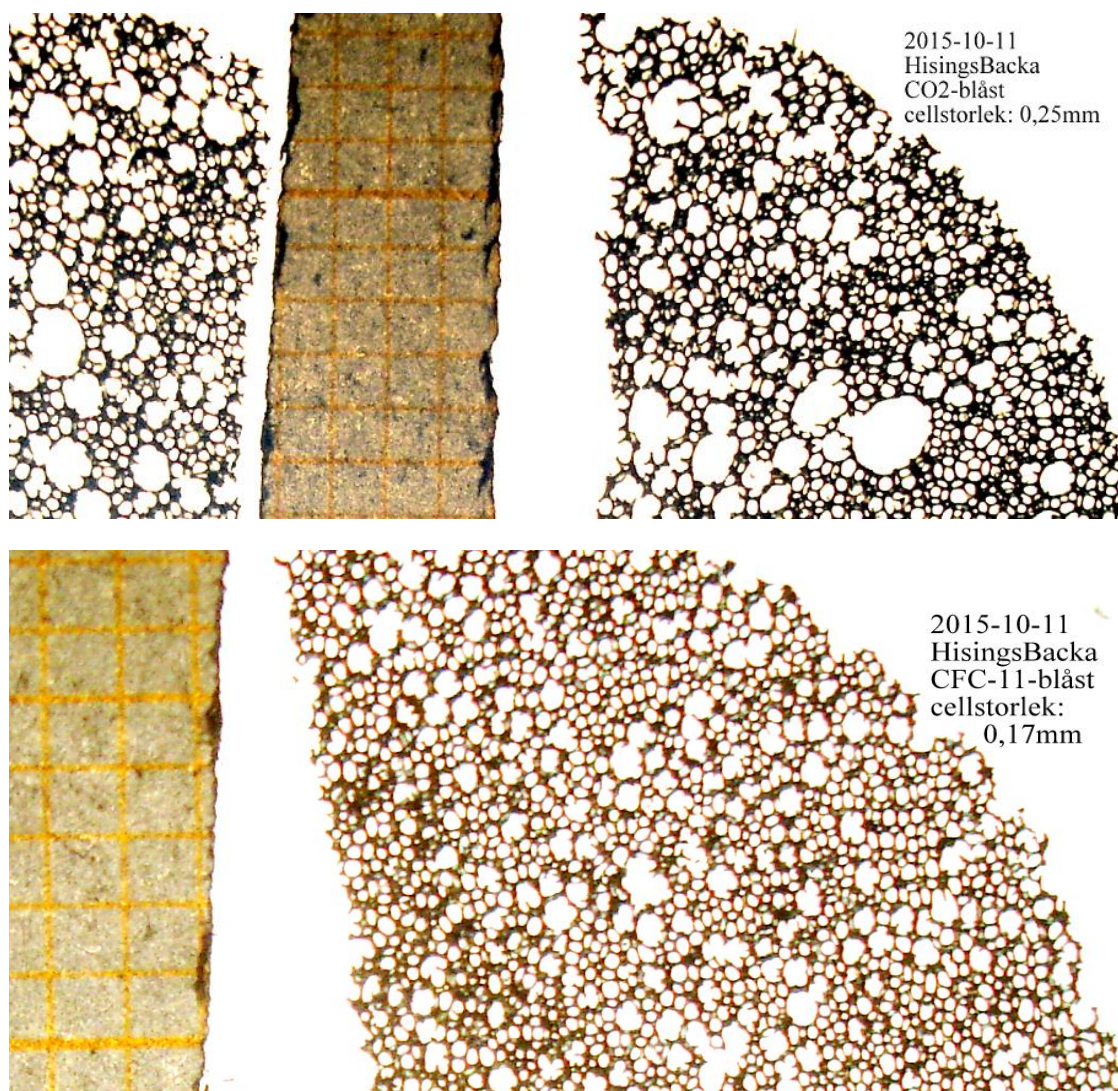
7.1 Cellstorlek

Cellstorleken bestämdes genom att mycket tunna skivor skars ut från skumcylindrarna (samma dimension som användes vid cellgasanalys) med hjälp av rakblad. Skivorna och en liten bit millimeterpapper lades mellan glasen i en diafotoram. Diaramen sattes i en projektor och bilden som visades på projektorduken fotograferades av.

Skum från rör PP-2 (CO₂-blåst): 0,25mm

Skum från rör SH-1 (CFC11-blåst): 0,17mm

Figur 11. Foto av tunna tvärsnitt av PUR-skum från rör PP-2 och SH-1.

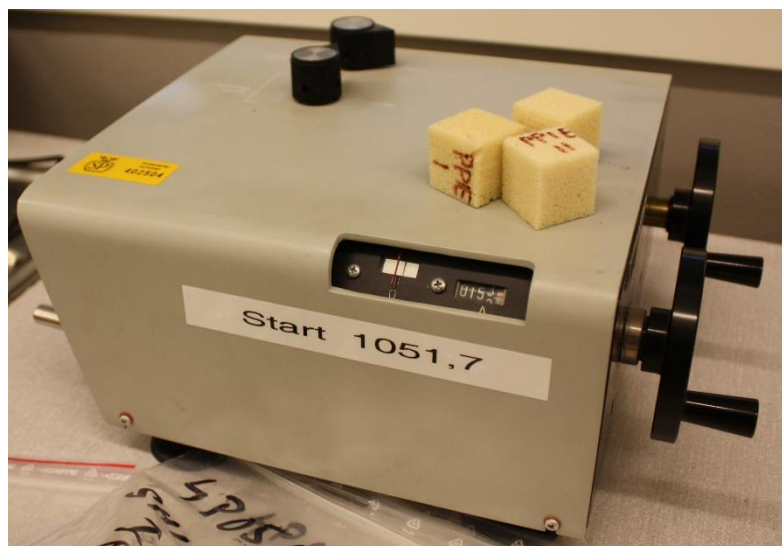


7.2 Andel öppna och slutna celler

Enligt EN 253:2003 skall andelen slutna celler vara större än 88 %. Metoden för att mäta andel öppna och slutna celler finns beskrivit i ISO 4590, ”*Determination of the volume percentage of open cells and closed cells*”. Kuber likt de i Figur 12 med en tjocklek om 25 mm skärs ut ur isolerskummet. Dessa kuber sätts sedan in i maskinen som kan ses i Figur 13 som bestämmer andelen slutna celler. Mer detaljerad beskrivning av mätmetoden finns i ovan nämnda standard.



Figur 12. Kuber för bestämning av slutna celler. Tjockleken är 25 mm och de extraheras från mitten av rörets skum.



Figur 13. Apparatur för bestämning av andel slutna celler.

7.2.1 Mätningar utförda på fjärrvärmerör från Hisings Backa

SP, Sveriges Tekniska Forskningsinstitut genomförde mekaniska tester på rör av typ PP-2 och SH-1, december 2015, på beställning av Chalmers. Resultaten från mätningar av andel bubblor och blåsor kan ses i Tabell 17.

Tabell 17. Resultat från mätningar av andel slutna celler på rör av typ PP-2 och SH-1. Försöken är genomförda av SP – Sveriges Tekniska Forskningsinstitut enligt EN 489 clause 5.4.5.2. Provdatum: 2015-12-03.

Beteckning	Uppmätt värde, %	Krav
PP1E-1	92.5	≥ 88 %
PP1E-2	90.5	
PP1E-3	90.9	
Medelvärde	91.3	
PP2D-1	94.6	≥ 88 %
PP2D-2	91.6	
PP2D-3	88.3	
Medelvärde	91.5	
SH1D-1	95.1	≥ 88 %
SH1D-2	92.4	
SH1D-3	92.5	
Medelvärde	92.3	
SH2E-1	93.3	≥ 88 %
SH2E-2	92.5	
SH2E-3	91.8	
Medelvärde	92.5	

7.2.2 Jämförelsevärden

Den tidigare nämnda tyska studien har även kontrollerat andelen öppna och slutna celler hos samtliga prover (Stadtwerke Leipzig GmbH & GEF Ingenieurgesellschaft für Energietechnik und Fernwärme Chemnitz mbH, 2004). Proverna är åldrade och det visar sig att det är ytterst få som inte klarar kravet på 88 % stängda celler. Bedömningen har gjorts att det i de fallen förmodligen rör sig om produktionsfel eftersom de är så fåtaliga och ligger så tydligt under kravet.

7.3 Andel bubblor och blåsor

Tvärsnittsprover av skummet tas ut och bubblor och blåsor längre än 6 mm åt något håll mäts i två riktningar vinkelrätt mot varandra. Produkten av dessa mått utgör arean för en bubbla. Bubblor som är mindre än 6 mm negligeras helt. Enligt EN 253 skall inte mer än 5 % av den nominella arean utgöras av bubblor och blåsor. Vidare får ingen enskild bubbla eller blåsa göra att tjockleken på resterande del av isoleringen är mindre än en tredjedel av avståndet mellan medieröret och mantelröret.

8. Diskussion

Rören från testanläggningen i Hisings Backa har varit föremål för många olika typer av provtagningar. År 1992 och 2015 sågades hela rörbitar ut från anläggningen medan man 1996 och 2001 enbart sågade i mantelrör och skum (alltså inte i stålroret) så att skumbitar då fick brytas loss från stålroret. Efter varje provtagningstillfälle svetsades rören ihop och/eller mantelroret lagades med en skarv. Resultatet blev inte alltid helt lyckat eftersom vatten vid minst ett tillfälle hade trängde in i röret. Luft kunde naturligtvis även komma in i isoleringen eftersom skummet under några dagar/veckor var exponerat mot omgivande luft innan röret återställdes efter provtagningen.

Densiteten för skummet i samma rörtyp varierade ganska mycket. Eftersom ett förhållandevis litet hål grävdes upp 1996 och 2001 kunde man inte avgöra om provet togs mitt i röret eller ute vid ändarna där densiteten skulle kunna vara lägre. Det finns alltså en del faktorer som gör att man får vara försiktig när man granskar resultaten från åren 1996 och 2001. Åren 1992 och 2015 gällde dock provtagningen hela rör och på betryggande avstånd från ändarna.

Ett mycket oväntat resultat var att det fanns ganska mycket metan i cellgasen i båda rören. Koncentrationen var högst närmast manteln vilket kan tolkas som att metan diffunderar in i skummet från omgivande mark. Detta är dock osannolikt eftersom det i så fall skulle vara mycket metan i marken. Partialtrycket för metan i marken skulle motsvara $>14\text{vol\%}$ i luft. Det finns ingen naturgasledning i närheten. En möjlig förklaring skulle kunna vara att polymeren (eller nedbrytningsprodukt från polymer, isocyanat eller polyol) reagerar med indiffunderande syre och då blir uppbyggd till metan och koldioxid. Inga uppgifter om en sådan reaktion har hittats i litteraturen. Metan har ett högt λ -värde och närvaron av metan är således ogynnsam för isolerförmågan. Det är troligt att metanhalten har ökat hela tiden. Att det ingen metan uppmärksammades i de första proverna kan bero på att halten då var låg och närvaron bara noterades som en liten störande topp vid den kromatografiska analysen.

Kväve deltar inte i några kemiska reaktioner i skummet och partialtrycket ökar stadigt hela tiden. Efter mycket lång tid blir kvävet partialtryck maximalt 78 kPa (dvs samma som i luften). Syre diffunderar snabbare än kväve och skulle, om syre inte deltog i olika oxidationsreaktioner, mycket snabbare än kväve nå sitt maximala partialtryck 21 kPa. I luft är kvoten $\text{vol\%kväve}/\text{vol\%syre} = 78/21 = 3.7$. Av tabellerna framgår att kvoten ökar hela tiden, i alla fall för rör som utsätts för hög temperatur. Detta tyder på att syre förbrukas vid någon reaktion, dvs det tyder på att syre oxiderar polyuretan eller något annat från polymeren. Hastigheten för alla kemiska reaktioner (t ex denna oxidationsprocess) ökar exponentiellt med temperaturen.

Koldioxid är den cellgas som snabbast diffunderar genom polyetenmanteln och koncentrationen kan för vissa fjärrvärmerör vara nästan noll redan efter 10-20 år. Den blir dock aldrig lägre än $0.04\text{vol\%} = 400\text{ppm}$ eftersom detta är halten i omgivningsluften. I en del skum visar det sig att koldioxidhalten är oväntat hög efter lång tid. Detta måste rimligen bero på oxidationen av polyuretan. Vid all oxidation av organiska material är ju slutprodukten vatten och koldioxid.

Eftersom oxidation innebär att mängden syre minskar (högt $\lambda_{50} = 28.51 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) och koldioxid ökar (lägre $\lambda_{50} = 18.68 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), har detta en gynnsam effekt på isolerförmågan. Innebär oxidationen även att någon annan process inträffar som gör att det bildas metan (mycket högt $\lambda_{50} = 37.81 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), kan den gynnsamma effekten försvinna. Observera att den effekt som oxidationen eventuellt skulle kunna ha på mekaniska egenskaper inte har beaktats. Vid de mekaniska testerna har dock hittills ingenting framkommit som tyder på att de mekaniska egenskaperna skulle ha försämrats av oxidationen.

CFC-11 diffunderar mycket långsamt i PUR-skum. Detta kan man bl a se genom att partialtrycket vid rumstemperatur för CFC-11 varierar kraftigt i radiell riktning (på olika avstånd från mantelröret) i många rör. Efter mycket lång tid kommer givetvis partialtrycket för CFC-11 att bli det samma i alla delar av isoleringen. För koldioxid, som diffunderar mycket snabbt, är partialtrycket vid rumstemperatur nästan det samma radiellt (på olika avstånd från mantelröret) eftersom partialtrycket utjämnas snabbt i ett rör som tidigare varit i drift vid hög temperatur. Den långsamma diffusionen och låga λ -värdet gör CFC-11 till en ur teknisk synpunkt ideal isolergas.

Efter 32-års drift är partialtrycket för CFC-11 mitt i isoleringen i ett av Marieholmsrören 74 vol% . Tyvärr finns inga uppgifter angående rörens ursprungliga isolerförmåga. Om man räknar på cellgasens bidrag till isolerförmågan för fram- resp returröret från Marieholm, erhålles $\lambda_{50} = 12.4 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ för framledningen och $\lambda_{50} = 13.9 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ för returen. Det ovanligt tjocka mantelröret har naturligtvis bidragit till att in-diffusionen av luft har blivit ringa, vilket i sin tur bidragit till att den goda isolerförmågan endast minskat obetydligt.

För röret från Hisings Backa med CFC-11-blåst isolering har λ_{50} endast har minskat från 26.0 till 28.5 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, dvs 9.6% under 27 år.

9 Referenser

CEN, 2009. *District heating pipes - Preinsulated bonded pipe systems for directly buried hot water networks - Pipe assembly of steel service pipe, polyurethane thermal insulation and outer casing of polyethylene*, Brussels: EN 253:2009.

Jarfelt, U., 1986. *Test apparatus for pipe insulation : specially designed for determination of the steady-state thermal transmission properties of pre-insulated heating mains*, Göteborg: Chalmers University of Technology.

Jarfelt, U., 1997. *Utvärdering av fuktinträngning och gasdiffusion hos gamla kulvertrör "Hisings-Backa"*, u.o.: Svenska Fjärrvärmeföreningens Service AB.

Olsson, M., 2001. *Long-Term Thermal Performance of Polyurethane-Insulated District Heating Pipes*, Göteborg: Chalmers University of Technology.

Ramnäs, O. & Persson, C., 2013. *Used district heating pipes*, Göteborg: Chalmers University of Technology.

Ramnäs, O. & Svanström, M., 1995. A Method for Analysing the Gas Phase in Polyurethane Foam. *J. Cellular Plastics*, 31(4), pp. 375-388.

Sällström, J. H., Ramnäs, O. & Sällberg, S.-E., 2012. *Statusbedömning av fjärrvärmerörsystem*, Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.

Stadtwerke Leipzig GmbH & GEF Ingenieurgesellschaft für Energietechnik und Fernwärme Chemnitz mbH, 2004. *Zeitstandsverhalten von PUR-Schäumen in praxisgealterten Kunststoffmantelrohren hinsichtlich Wärmedämmung und Festigkeit*, u.o.: Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit und Technologie.

10 Medverkande

Projektledare

Bijan Adl-Zarrabi – Docent, Bygg- och miljöteknik, Byggnadsteknologi - Chalmers

Termisk konduktivitet, guarded hot pipe

Marek Machowski – Tekniker, Bygg- och miljöteknik, Byggnadsteknologi - Chalmers

Gasanalys

Olle Ramnäs – Professor, Bygg- och miljöteknik, Byggnadsteknologi - Chalmers

Mekaniska tester

Jan-Henrik Sällström – SP, Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Mekaniska tester på nya rör

Göran Johansson – Powerpipe System AB