Forskning och Utveckling

FOU 2002:67

FUKTTRANSPORT I SKARVSKUM

Gunnar Bergström, SP
Stefan Nilsson, SP
Sven-Erik Sällberg, SP

FJÄRRVÄRME

FUKTTRANSPORT I SKARVSKUM

Gunnar Bergström, SP
Stefan Nilsson, SP
Sven-Erik Sällberg, SP

ISSN 1402-5191

I rapportserien publicerar projektledaren resultaten från sitt projekt. Publiceringen innebär inte att Svenska Fjärrvärmeföreningens Service AB tagit ställning till slutsatserna och resultaten.

© 2002 Svenska Fjärrvärmeföreningens Service AB

Sammanfattning

Erfarenheten visar att fuktskador i fjärrvärmenät företrädesvis uppträder vid ledningsnätens rörskarvar. Det är också naturligt att risken för fuktskador ökar på sträckor där ledningen går genom mark med högt grundvatten. I ett tidigare projekt har vi redovisat hur hålrum i en otät rörskarv kan vattenfyllas genom en andningseffekt orsakad av temperaturvariationerna i ledningsnätet. I det nu genomförda projektet har vi både experimentellt och teoretiskt studerat risken för att spalter eller hålrum skall uppstå i skarvarna. Vi har även studerat med vilken hastighet inträngande fukt kan transporteras genom den gängse rörisoleringen av PUR-cellplast med slutna celler (PUR-skum).

Eftersom PUR-skummets isoleringsförmåga är beroende av vilka gaser som skummets celler innehåller har omfattande studier genomförts för att klarlägga diffusionshastigheten hos de gaser som normalt förekommer i cellerna d.v.s. koldioxid, luft och cyklopentan. Det visar sig att vattenånga transporteras 1000 – 100 000 gånger snabbare än PUR-skummets "vanliga" cellgaser. Detta innebär att om det finns en otäthet i en skarv kan fuktinnehållet i skummet efter förhållandevis kort tid uppnå jämvikt med fukttillståndet i den omgivande marken. Så länge medieröret har hög temperatur blir dock den relativa fuktigheten även då så låg att någon korrosionsrisk inte synes föreligga. Normalt räknar man med att stål inte rostar vid relativa fuktigheter under ca. 60 %. Fält- och laboratorieförsök med rör förlagda utan PEH-mantel bekräftar att fuktupptagningen i PUR-skummet efter en provningstid av ca. 9 månader fortfarande är mycket liten och att endast det kalla skummet längst ut blir uppfuktat.

Krympningstendensen hos PUR-materialet i skummets cellväggar är i sig så låg att den normalt saknar betydelse. Däremot kan en skumvolym som helhet uppvisa en avsevärd krympning om trycket i skummets celler blir lägre än omgivningstrycket. Ett skarvskum kan ha ett förhållandevis högt initiellt koldioxidtryck som genom diffusion sjunker under drifttiden. Mätningar har visat att cellgastrycket i skarvskummet kan sjunka till så låga nivåer som 0,3 bar (0,7 bar undertryck). Då föreligger en risk att skarvskummet krymper i de fall skummet inte ansluter direkt till omgivande ytor utan omges av spalter eller hålrum med högre tryck. Mätningarna visar dock att vidhäftningen mellan skarvskum och rörände i normala fall är så god att det är osannolikt att några luftspalter skall bildas. Emellertid är cellstrukturen i gränsskiktet mellan skarvskum och rörskum betydligt grövre än normalt och en osäkerhet kvarstår om detta medför en större andel öppna celler och därmed en spalt med annat tryck och en möjlig fukttransportväg.

Summary

Experience shows that moisture damage in district heating networks occur mainly at the pipe joints. The risk for moisture damage increases in areas with high groundwater table. In a previous project, it has been studied how air-gaps in a leaking pipe joint may fill up with water from a breathing effect caused by temperature variations in the district heating network. In the current project, the risk for air-gaps and voids to arise in the joints has been investigated experimentally and theoretically. In addition, the transport of moisture through the closed-cell PUR foam insulation has been studied.

Since the thermal insulation capacity of the PUR foam depends on the gas content of the cells, comprehensive studies have been made to determine the diffusion rates of the regular cell gases, i.e., carbon dioxide, air and cyclopentane. It is seen that the transport rate for water vapour is about 1000 – 100 000 times greater than for the "ordinary" cell gases. This means that if a leak is present in a joint, the moisture content in the foam will after relatively short time reach an equilibrium with the moisture content of the surrounding soil. However, as long as the medium pipe is hot, the relative humidity will remain low and there will be no risk for steel pipe corrosion. Usually, there is no risk for corrosion in steel at relative humidities below approximately 60 %. Field and laboratory experiments with pipes laid without polyethylene casing confirm that the moisture ingression after a test time of approximately 9 months is small, and that only the cold foam farthest from the steel pipe becomes wet.

The solid PUR material's tendency to shrink is so small that it may normally be neglected. A foam volume as a whole can, on the other hand, exhibit significant shrinkage if the cell gas pressure decreases to levels below the surrounding pressure. A joint foam may initially have a high carbon dioxide pressure which decreases by cell gas diffusion during the service life. Measurement show that the cell gas pressure in joint foam may drop to levels as low as 0.3 bar. A risk for the joint foam to shrink arises if it is surrounded by air-gaps with higher pressure. Measurements show that the adhesion between the joint foam and the pipe ends is so strong that the opening of air-gaps normally is unlikely. However, the cell structure in the interface between the joint foam and the pipe end is normally significantly coarser than in regular foam. It remains to be clarified whether this leads to a more permeable foam structure in the interface which may act as an air-gap with a higher pressure and a possible way for moisture transport.

Innehållsförteckning

1 Bakgrund 1

2 Aktuell forskning kring skarvar, konstruktionslösningar och material 2

3 Luftspalter i skarvar 4

3.1 Dimensionsförändringar hos skummet till följd av cellgasdiffusion 4

3.1.1 Mätningar 4

3.1.1.1 Resultat – cellgasinnehåll 6

3.1.1.2 Resultat – treaxliga försök 6

3.1.1.3 Resultat – rörprover 7

3.1.2 Beräkningar – cellgasdiffusion 8

3.2 Vidhäftningshållfasthet mellan skarvskum och rörskum 11

3.2.1 Mätningar 11

3.2.1.1 Kontroll av skarvar före och efter åldring 12

3.2.1.2 Vidhäftningshållfasthet 13

3.2.1.3 Gränsskiktet mellan skarvskum och rörande 15

4 Fukttransport i homogent PUR-skum 17

4.1 Mätningar 17

4.1.1 Bestämning av diffusionsegenskaper 17

4.1.2 Bestämning av skumegenskaper 18

4.1.3 Resultat 18

4.2 Beräkningar 20

4.3 Egenskaper hos 12 år gammalt skarvskum 22

4.4 rör utan PEH-mantel 23

4.4.1 Rör utan mantel förlagda i mark 24

4.4.2 Laboratorieförsök på rör utan mantel 25

5 Diskussion och slutsatser 27

5.1 Luftspalter i skarvar 27

5.2 Fukttransport i homogent PUR-skum 27

6 Referenser 29

Bilaga A – Fotografier av gränsskikt 31

Bilaga B – Allmänt om diffusion 39

Bilaga C – Beräkning av cellgasdiffusion vid åldring i värmeskåp 43

Bilaga D – Bestämning av andel slutna celler 45

1 Bakgrund

Erfarenhetsmässigt uppträder fuktskador i fjärrvärmenät företrädesvis i rörskarvarna. Hur markvatten kan tränga in i en otät skarv har tidigare studerats i del 1 i denna projektserie, *Vattenläckage genom otät mantelrörsskarv* (Bergström, m.fl. 2001a). Där konstaterades att temperaturvariationer i ledningsnätet ger upphov till en andningseffekt i eventuella hålrum i skarvskummet så att markvatten kan sugas in genom en otäthet i mantelrörsskarven. Hålrum kan uppstå om skummet inte fyller ut skarven helt vid skumningen eller om skummet krymper.

I denna del 2 av projektet har syftet varit att studera dels risken för att hålrum ska uppstå mellan skarvskum och rörskum dels med vilken hastighet fukt kan transporteras genom skummet. Hålrum kan bl.a. uppstå som en konsekvens av att skummet krymper när cellgaserna diffunderar ut. Avsikten har således varit att belysa under vilka förutsättningar fukt kan tränga in genom en otäthet och vart fukten tar vägen. Resultaten är avsedda att fördjupa förståelsen för hur fuktskador uppstår och därmed ge vägledning vid utveckling av funktionssäkrare skarvutformningar.

Projektet som finansierats av Fjärrvärmeföreningen, är initierat av SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, enheten för Mekanik, Göteborg. Teoretiska studier, försök och mätningar är utförda av SP och har genomförts i samråd med den för projektet utsedda referensgruppen med följande sammansättning,

Göran Johansson, Powerpipe Systems AB
Ture Nordenswan, Svenska Fjärrvärmeföreningen
Karl-Erik Johansson, Göteborg Energi AB.

2 Aktuell forskning kring skarvar, konstruktionslösningar och material

I rapporten *Vattenläckage genom otät mantelrörsskarv* (Bergström m.fl. 2001a) konstaterades att markvatten snabbt kan tränga in i en skarv om en otäthet genom mantelrörsförbandet står i förbindelse med ett hålrum eller en luftspalt i skarven. Detta sker genom en andningseffekt orsakad av temperaturvariationer i ledningsnätet. Då temperaturen faller sjunker trycket i hålrummet markvatten kan sugas in genom otätheten. En studie av förekomsten av hålrum till följd av britsfällig skumning utfördes av Blomqvist och Ljungqvist (1986). Man studerade främst inverkan av omgivnings- och medierörstemperatur på skumkvaliteten. Det konstaterades att även under gynnsamma förhållanden är risken stor att luftkanaler utbildas mellan mantelrör och stålrör vid anslutningen till rörskummet.

Den standardmetod som idag används för utvärdering av skarvar diskuteras i rapporter från DTI (Smidt 2000) och IMA (Just och Nitsche 2000). Där diskuteras begränsningar och osäkerheter vid provning enligt den europeiska metodstandarden SS-EN 489. Metoden som den är utformad idag föreskriver 100 förskjutningar hos ett skarvat rör förlagt i en sandbox med en efterföljande täthetskontroll och ger i huvudsak ett mått på skarvens styrka och täthet som ny.

Utgångspunkten i de refererade rapporterna är att skarvarna skall uppfylla ställda krav under hela den förväntade livslängden och är därför fokuserade på undersökningar kopplade till åldring. Rapporterna utmynnar i förslag på ett antal metodförändringar, bland annat föreslås att skarvarna skall åldras före sandlådeprovet. I en senare studie, genomförd 2001, jämfördes resultaten av standardprovningar utförda i olika kringfyllningsmaterial och av olika laboratorier (Smidt 2001). Resultaten visade att friktionskrafterna mot skarvmuffen blir större i finkornigare kringfyllningsmaterial.

Mantelrörsförbandets styrka och täthet vid ledningsförläggning i grov kringfyllning, upp till 63 mm kornstorlek, studerades speciellt i rapporten *Täthet hos skarvar vid återfyllning med befintliga massor* (Bergström m.fl. 2001b). Med hjälp av en modifierad sandlådeprovning enligt SS-EN 489 konstaterades att högst säkerhet ger elektrosvetsade skarvhylsor eller någon form av utvändigt skydd kring skarven.

Möjligheterna att reparera skadade fjärrvärmerörsskarvar utan uppgrävning studerades av Nilsson och Gudmundsson (1998). En metod som innebär att det fuktiga skummet i felstället blästras bort och ersätts med nytt provades praktiskt och bedömdes ha vissa möjligheter.

Vad gäller nya konstruktionslösningar för skarvar, har bland annat ändgavlar av HDPE monterade på de befintliga rörändarna undersökts (Bergström och Nilsson 1999). Ändgavlarna skyddar PUR-skummet och kan eventuellt minska isocyanatemissionerna vid svetsning av stålrören, samtidigt som de vid lagring utomhus skyddar rören mot inträngande fukt. Ändgavlarna kan även ge bättre vidhäftning mot skarvskummet då de är lättare att rengöra vid skarvmontage. Möjligheterna med en integrerad tätning inuti skarven baserad på material som sväller och tätar vid kontakt med vatten har studerats av Bjurström m.fl. (2001). Bedömningen var att skulle vara möjligheter att utveckla

framför allt en axiell spärr som förhindrar spridning av vatten från en skadad skarv i rörets längsled.

En inventering av tänkbara nya material för fjärrvärmerör i allmänhet genomfördes av Ahlgren m.fl. (1998). I rapporten redovisas studier kring nya material som skulle innebära en traditionell uppbyggnad av rören med medierör, isolering och mantelrör av olika material, samt nya material som skulle innebära helt nya konstruktionslösningar. När det gäller det senare alternativet nämns möjligheten att isolering och mantel skulle kunna utgöras av samma material. Ett exempel kan vara ett medierör av stål belagt med skumblåst polyetentereftalat (PET) som då skulle fungera som både isolering och mantel. PET är idag en spillprodukt från förpackningsindustrin. Resultatet av studien pekar dock mot att när det gäller isoleringen så är det svårt att finna något material som skulle kunna ersätta PUR-skum. Ett gummiliknande material, Procoat, nämns som ett eventuellt alternativ vid reparationer av läckande skarvar.

3 Luftspalter i skarvar

3.1 DIMENSIONSFÖRÄNDRINGAR HOS SKUMMET TILL FÖLJD AV CELLGASDIFFUSION

När PUR-skum åldras diffunderar de cellgaser som fyller cellerna efter skumningen, exempelvis koldioxid och cyklopentan, ut ur skummet och ersätts med luft, dvs. huvudsakligen syrgas och kvävgas. Totaltrycket i cellerna, som är summan av de olika gasernas partialtryck, beror av hur mycket av de ursprungliga gaserna som finns kvar och hur mycket luft som kommit in. Totaltrycket kommer således att variera med tiden som en följd av gasutbytet. Efter lång tid har de ursprungliga gaserna diffunderat bort helt och hållet och ersatts med luft och totaltrycket i cellerna är lika med atmosfärstrycket, ca. 100 kPa.

Om trycket mot någon eller några av skummets yttre begränsningsytor inte följer cellgastrycket exempelvis genom att skummet gränsar till en spalt eller ett hålrum med atmosfärstryck kommer en tryckdifferens att medföra dimensionsförändringar hos skummet. Om totaltrycket i cellerna minskar trycks skummet samman och om cellgastrycket ökar expanderar skummet. Om skummet inte gränsar till områden med annat tryck än i cellerna uppstår inga andra påkänningar i skummet än inre begränsade spänningar till följd av de inre tryckgradienter som uppstår till följd av diffusionsförloppen. Om gränsskiktet mellan skarvskum och rörskum har andra diffusionsegenskaper än skummet i övrigt kan dock tryckgradienterna lokalt bli så stora att dragpåkänningarna kan medverka till att skapa luftspalter mellan skarvskum och rörskum.

3.1.1 Mätningar

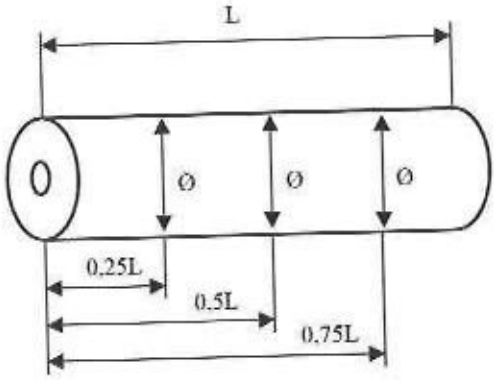
Dimensionsförändringar till följd av cellgasdiffusion studerades genom att både hela rörsektioner och kubformade provstycken åldrades vid förhöjd temperatur. Under försöken uppmättes diametrar och sidlängder vid utvalda tidpunkter. PUR-skum från fjärrvärmerör DN 25/110 samt skum från prefabricerade isolerskålar av samma dimension användes. Åldringstemperaturerna var 45 °C, 70 °C och 90 °C.

Rörproverna utgjordes av rörstycken som förseglats med metallfolie i ändarna för att förhindra gasdiffusion genom skummet i rörens längdriktning. För att studera om vidhäftningen mot mantelröret har betydelse för att motverka en krympningstendens hos skummet, studerades följande provkroppsvarianter:

- "Vanligt rör" skummat mot coronabehandlad mantel med god vidhäftning mellan skum och mantelrör. Som mätstorhet valdes *mantelrörets* medelytterdiameter.
- Rör med lös mantel, dvs. utan vidhäftning mellan skum och mantelrör. Som mätstorhet valdes *skummets* medelytterdiameter.

- Rör utan mantel, dvs. enbart skum. Som mätstorhet valdes *skummets* medelytterdiameter.
- Sammanlimmade prefabricerade isolerskålar utan mantel och utan stålrör. Som mätstorhet valdes *de hoplimmade skålarnas* medelytterdiameter.

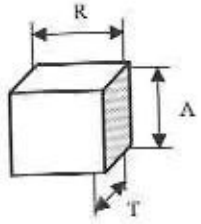
Motsvarande mätningar genomfördes även på mantelröret enbart för att få en uppfattning om polyetenmaterialets egenkrympning under åldringen.



Figur 3.1 Rörprov DN 25/110 för dimensionsförändringsförsök.
Pipe specimen DN 25/110 for measurements of changes in dimension.

Rörprovernas diametrar uppmättes med diametermåttband (cirkometer) på tre ställen utmed rörets längd, Figur 3.1. Mätningarna utfördes vid rumstemperatur, dvs. proverna tilläts svalna innan de mättes. Detta för att isolera inverkan av förändringar i cellgastryck och eliminera effekten av temperaturutvidgning. Ett rörprov för respektive mantelrörsalternativ och temperaturnivå användes, förutom för varianten med lös mantel. Här måste ändtätningarna brytas och mantelröret dras av för att skummets diameter skulle kunna mätas. För att möjliggöra flera mättillfällen tillverkades därför tre rörprover till varje temperaturnivå.

För att studera hur dimensionsförändringarna varierar med riktningen genom skummet genomfördes treaxliga dimensionsmätningar på kubformade provstycken som sågats ur såväl rörskum som prefabricerat skum. Kuberna hade kantlängden 30 mm och sågades ut så att ytorna var parallella med rörets eller prefabskålens radiella, axiella respektive tangentiella riktning. Måtten på de kubformade provbitarna uppmättes med skjutmått genom att mäta i mitten och utmed var kant för respektive längd, bredd och höjd enligt Figur 3.2. Tre provstycken användes till respektive skumtyp och åldringstemperatur.



Figur 3.2 Treaxligt provstycke för dimensionsförändringsförsök.
Tri-axial test specimen for measurements of changes in dimension.

Analyser av cellgassammansättningen gjordes före åldringen på rörskum och prefabskum och efter åldring vid 90 °C på prefabskum och på rör med mantel. Gasanalyserna genomfördes vid Institutionen för Kemisk miljövetenskap, Chalmers.

Åldringen pågick i ca. 5000 timmar.

3.1.1.1 Resultat – cellgasinnehåll

Det uppmätta cellgasinnehållet i rörskum och prefabskum redovisas i Tabell 3.1. Totaltrycken är från början förhållandevis låga, vilket huvudsakligen beror på en låg koldioxidhalt. Efter åldring har i princip all koldioxid diffunderat ut och ca. 50 kPa luft har diffunderat in, vilket gör att totaltrycken är högre efter åldring. För ett nytillverkat skarvskum är koldioxidtrycket från början normalt betydligt högre, jämför med Tabell 3.2, sidan 13, och åldringen kommer att leda till en sänkning av totaltrycket. Cyklopentaninnehållet är i det närmaste oförändrat efter åldringsperioden och ligger omkring mättnadstrycket vid rumstemperatur (Svanström 1997). Detta tyder på att det funnits ett överskott av kondenserat cyklopentan i cellerna.

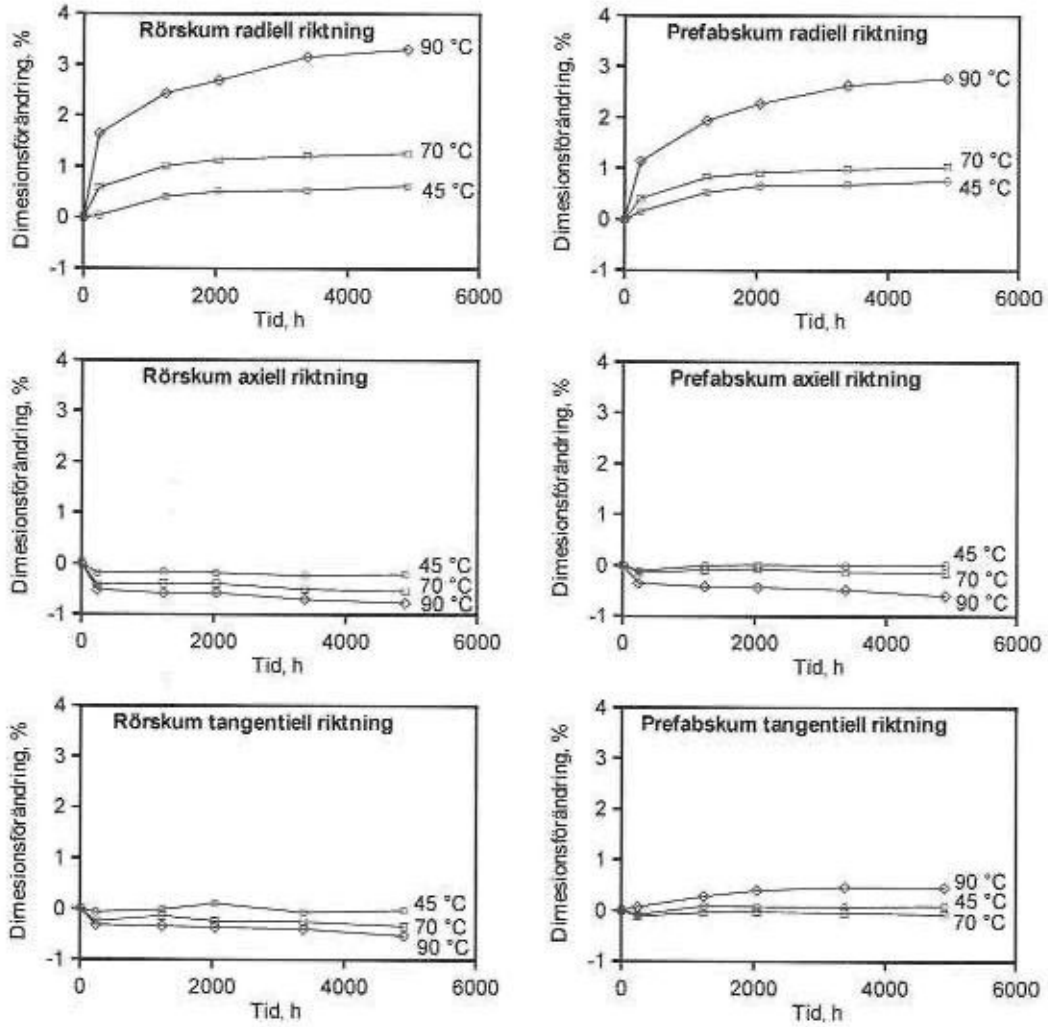
Tabell 3.1 Uppmätta cellgastryck för rör- och prefabskum före respektive efter åldring i +90 °C under 5000 timmar.
Measured cell gas pressures in pipe and joint foams before and after ageing at +90 °C during 5000 hours.

	Partialtryck, kPa			
	Rör med mantel DN 25/110		*Prefab-skålar DN 25/110*	
	Före åldring	*Efter åldring*	*Före åldring*	*Efter åldring*
Kvävgas	3	44	9	52
Syrgas	1	5	3	11
Cyklopentan	29	36	37	25
Koldioxid	40	1	16	0
Vattenånga	1	1	2	2
Övrigt	2	3	4	5
Totaltryck	76	90	71	95

3.1.1.2 Resultat – treaxliga försök

Som en följd av att cellgastrycket ökade under åldringsförsöken uppstår en tryckskillnad som vill expandera skummet. Dimensionsmätningarna visade att de kubformade provstyckena expanderade mest i radiell riktning, ca. 3 % för såväl rörskum som prefabskum, Figur 3.3. Detta tyder på att skummets styvhet är lägre i riktning in mot rörcentrum än i rörets längdled och omkretsled. Sådana riktningseffekter (anisotropi) beror på att cellerna i skummet är olika utdragna i olika riktningar och är en konsekvens av skumningstekniken. Liknande observationer har rapporterats tidigare (Bergström och Karlsson 1996, Molin m.fl. 1997).

Deformationerna blir större med ökande temperatur. Detta beror delvis på att luft diffunderar in i skummet snabbare och det cellgastryck som gör att skummet expanderar ökar hastigare vid högre temperatur. Skummet blir dessutom mer flexibelt vid ökande temperatur och deformeras mer av en given tryckförändring.

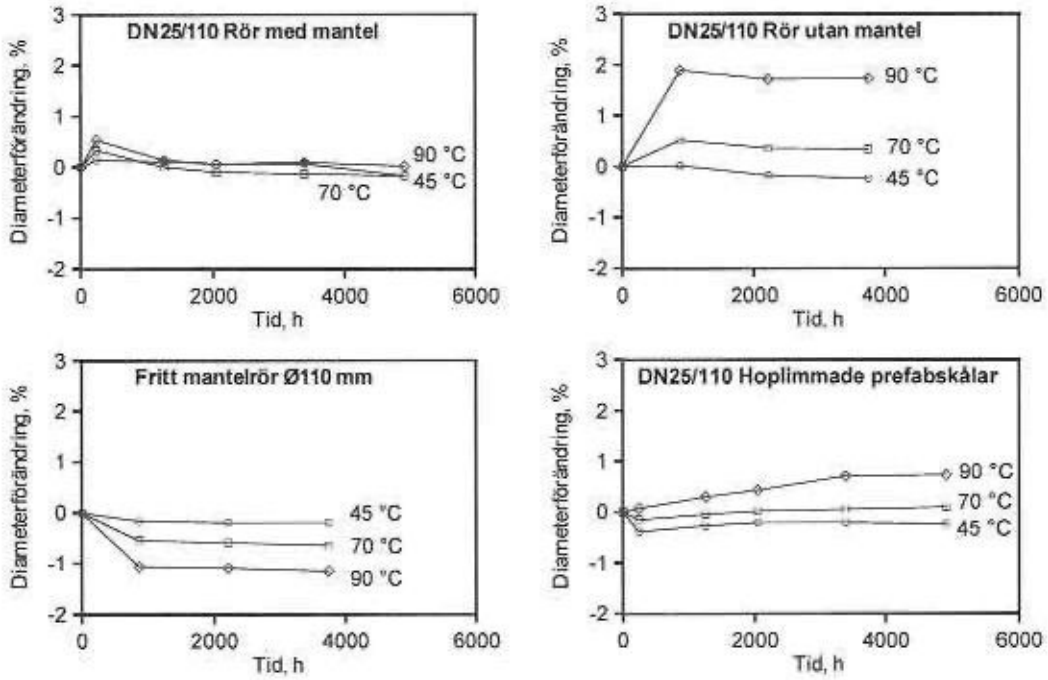


Figur 3.3 Dimensionsförändringar hos treaxliga provstycken under åldring.
Dimension changes of tri-axial test specimens during ageing.

3.1.1.3 Resultat – rörprover

Det mantelfria röret uppvisade en maximal diameterökning på ca. 2 % efter åldring i 90 °C, Figur 3.4, dvs. något mindre än den radiella expansionen för motsvarande kubformiga provstycke. För de hoplimmade prefabskålarna var deformationen ungefär hälften så stor, dvs. maximalt ca. 1 %. Prefabskålarna är dock fria att även expandera inåt och någon uppmätning av innerdiametern utfördes inte.

För det "vanliga" mantelklädda röret balanseras skummets expansion uppenbarligen så gott som helt av mantelrörets krympning.

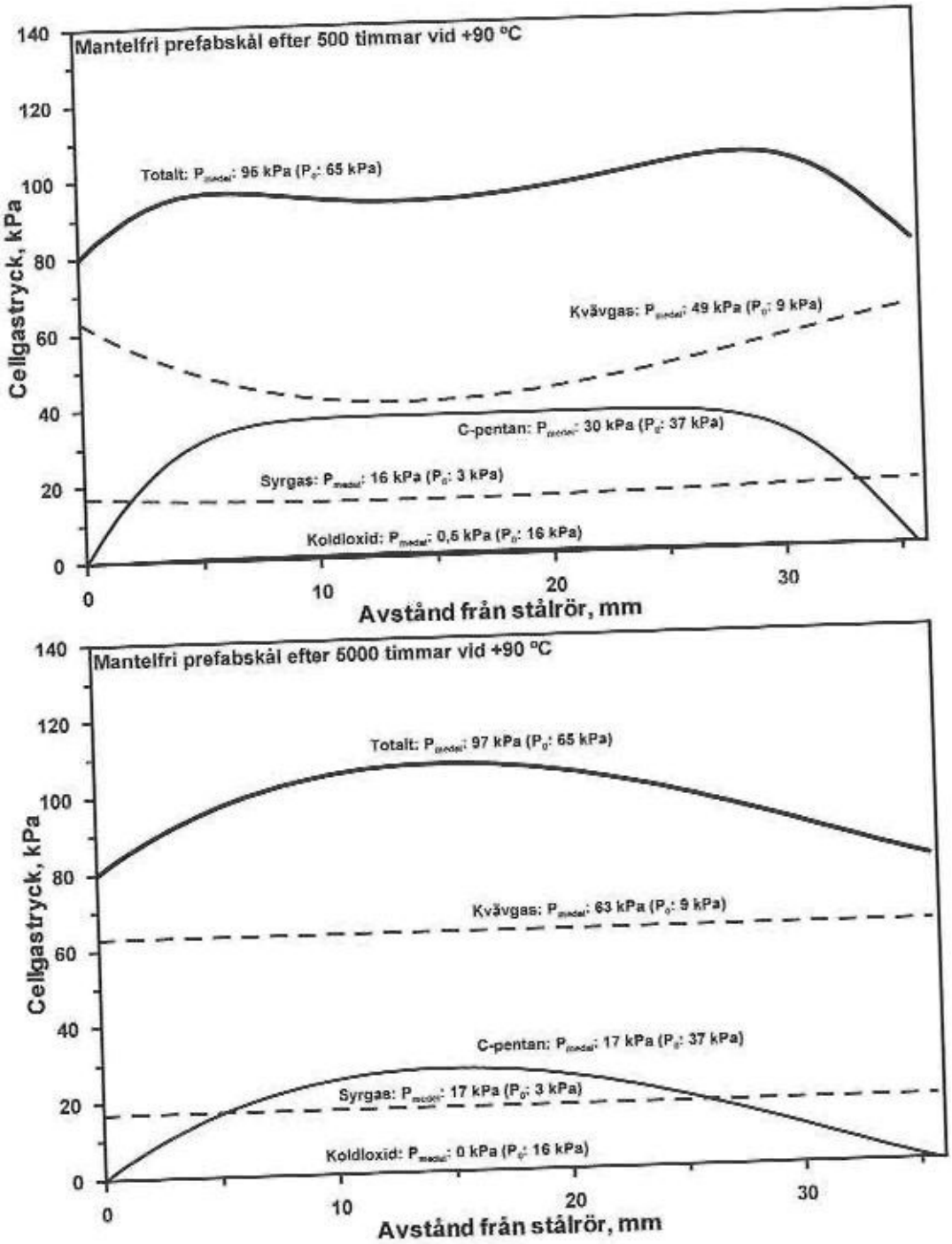


Figur 3.4 Diameterförändringar hos rör under åldring.
Diameter changes of pipes during ageing.

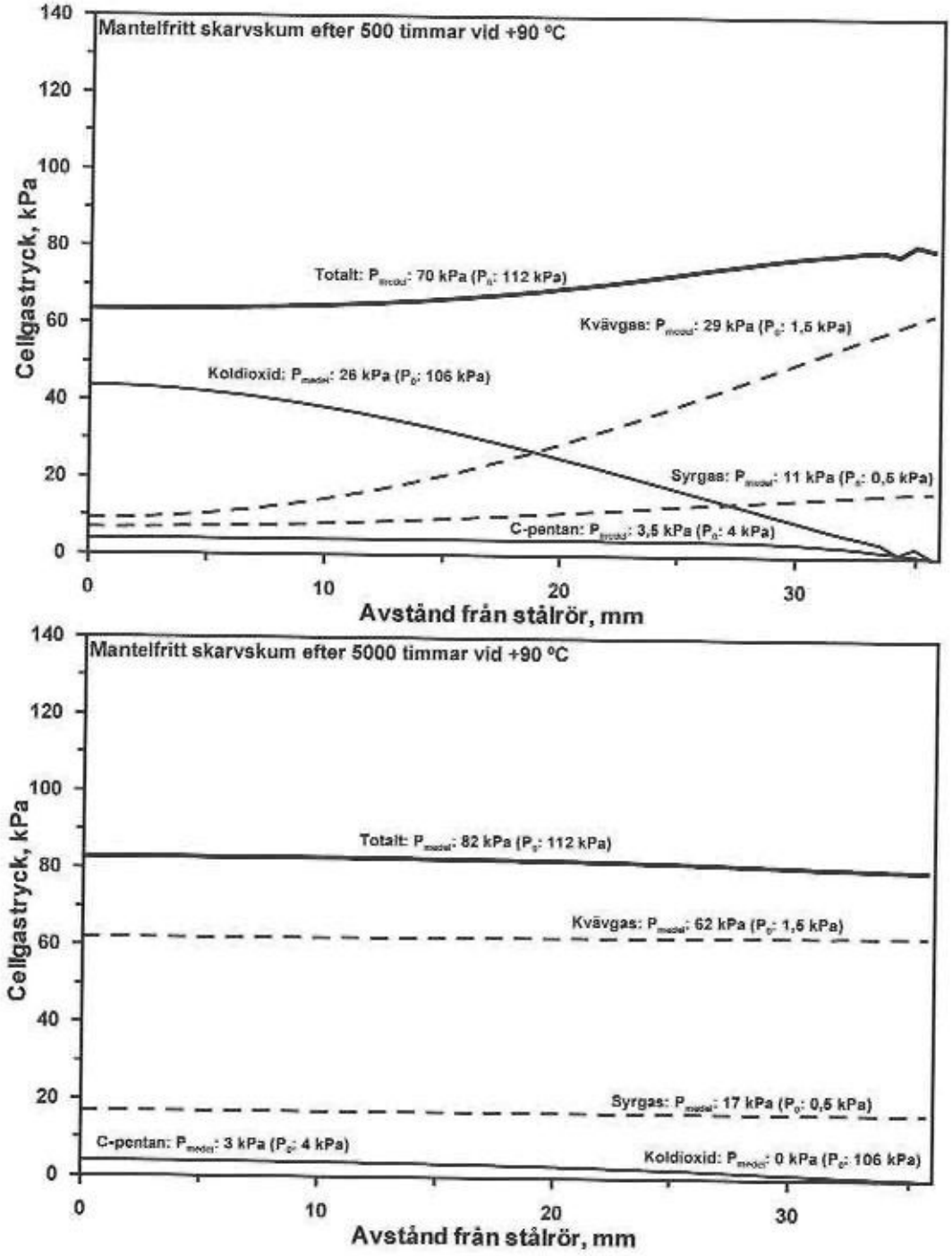
3.1.2 Beräkningar – cellgasdiffusion

En beräkning av diffusionsförloppet i ett mantelfritt rör har genomförts baserad på det temperaturberoende hos diffusionskoefficienterna för de olika cellgaserna som rapporterats av Olsson (2001). De olika cellgaserna antogs vara jämnt fördelade genom skummets tjocklek vid beräkningens början med partialtryck enligt genomförda gasanalyser före åldring på rörskum, prefabskum (Tabell 3.1, sidan 6) och skarvskum (Tabell 3.2, sidan 13). Beräkningen har utförts för konstant temperatur, motsvarande förhållandet under de åldringsförsök som redovisats ovan. Beräkningarna genomfördes numeriskt med finit differensapproximation så som redovisas i Bilaga C.

Koldioxid är den cellgas som diffunderar snabbast i PUR-skummet. Efter skumningen diffunderar således i första hand koldioxiden ut ur skummet och ersätts, i långsammare takt, med luft, dvs. kvävgas och syrgas. Hur totaltrycket i skummet varierar under åldringen styrs därför i hög grad av koldioxidtrycket vid åldringens början. I Figur 3.5 visas en beräknad partialtrycksfördelning genom skummet för en prefabskål dimension DN 25/110 efter åldring i 500 respektive 5000 timmar i 90 °C. Som synes är totaltrycket efter 5000 timmar betydligt högre än vad det var från början trots att i princip all koldioxid försvunnit. Detta beror på att luft kommit in, vilket resulterat i en nettohöjning av totaltrycket. För ett nytillverkat skarvskum är situationen normalt annorlunda och illustreras av Figur 3.6. Lika mycket luft diffunderar in, men samtidigt har i normalfallet ca. 100 kPa koldioxid diffunderat ut. Detta resulterar då i en nettosänkning av totaltrycket.

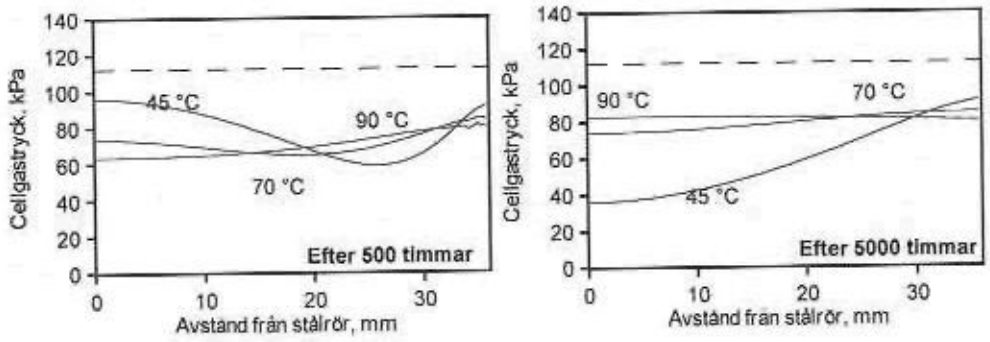


Figur 3.5 Beräknad cellgastryckfördelning genom mantelfri prefabskål DN 25/110 efter åldring vid +90 °C under 500 respektive 5000 timmar.
Calculated cell gas pressure distribution through casing free prefabricated foam shell DN 25/110 after ageing in +90 °C during 500 hours and 5000 hours respectively.



Figur 3.6 Beräknad cellgastryckfördelning genom mantelfritt skarvskum DN 25/110 efter åldring vid +90 °C under 500 respektive 5000 timmar.
Calculated cell gas pressure distribution through casing free joint foam DN 25/110 after ageing in +90 °C during 500 hours and 5000 hours respectively.

Diffusionen går snabbare vid högre temperatur och temperaturberoendet är något olika för de olika cellgaserna. I Figur 3.7 visas beräknade totaltrycksprofiler genom skummet i en mantelfri skarv för de olika åldringstemperaturerna. Efter 5000 timmar är tryckförhållandena i skummet både vid 90 °C och 70 °C i nära jämvikt med omgivningen.



Figur 3.7 Beräknad totaltryckfördelning i mantelfritt skarvskum DN 25/110 efter åldring vid olika temperaturer under 500 respektive 5000 timmar. Streckade linjer visar ursprunglig totaltrycksnivå.
Calculated total pressure distribution in casing free joint foam DN 25/110 after ageing in various temperatures during 500 hours and 5000 hours respectively. Dashed lines indicate original total pressure.

3.2 VIDHÄFTNINGSHÅLLFASTHET MELLAN SKARVSKUM OCH RÖRSKUM

Om vidhäftningen mellan skarvskum och rörskum är svag ökar risken för att luftspalter skall öppnas i gränsskiktet. Detta kan ske antingen till följd av lokala tryckgradienter eller till följd av att skarvhylsan vid ledningens rörelser i marken förskjuts relativt mantelröret och drar med sig skarvskummet. Med god vidhäftning och ett homogent skum kan utifrån inträngande vatten inte nå in till stålröret. Vidhäftningen mellan rörskum och skarvskum försämras även om fett eller smuts vid skumningen gjuts in i fogen mellan materialen. Vidhäftningen skulle även kunna försämras om skummet i röränden brutits ned genom längre tids exponering för väder och vind. Normalt vid skarvning av fjärrvärmerör är dock att man skarvskummar direkt mot skummet i röränderna.

3.2.1 Mätningar

Vidhäftningen mellan skarvskum och befintligt rörskum studerades för fyra olika alternativ avseende förbehandling av röränderna, jämför Figur 3.8:

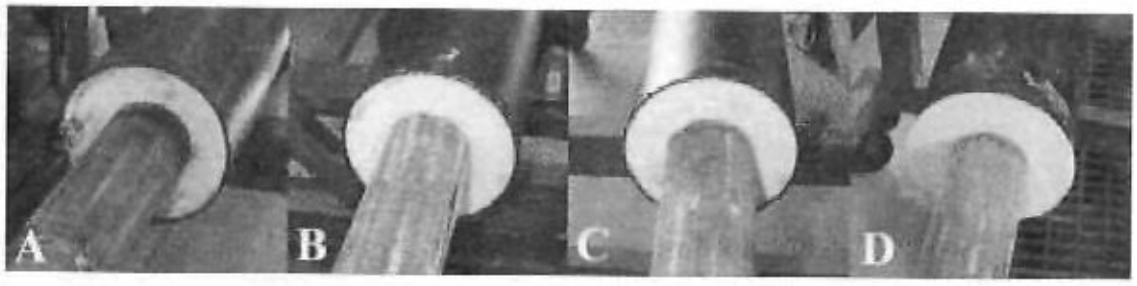
A. Normallagrat rörskum. Rören lagrades i 6 veckor hos tillverkaren och därefter 12 veckor i ouppvärmt utrymme före skarvmontaget.

B. Renskalat rörskum. Före skarvskumningen avlägsnades några centimeter av mantelrör och rörskum så att skarvskummet kom att ansluta mot rörskum som inte utsatts för klimatpåverkan.

C. Renskalat rörskum med släppmedel. Som B men med släppmedel applicerat på det renskalade rörskummet.

D. Ändgavel av GAP. Mot den renskalade röränden limmades en 2 mm tjock ändgavel av högtemperaturtålig glasfiberarmerad polyester.

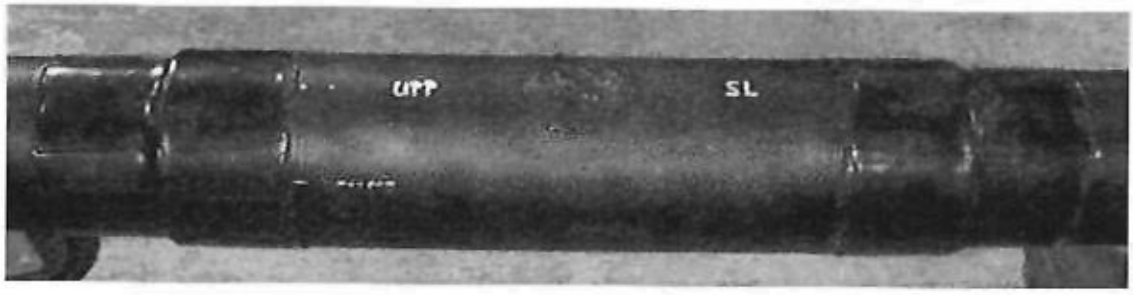
Utöver dessa alternativ åldrades även en skarv isolerad med prefabskålar.



Figur 3.8 Rörändealternativ: A) normallagrat ändskum, B) renskalat ändskum, C) ändskum med släppmedel, D) GAP-ändgavel.
Pipe end alternatives: A) pipe from stock, B) end foam peeled off, C) pipe end with mould release agent, D) end seal of glass-fibre reinforced polyester (GRP).

För undersökningen tillverkades tre skarvar av varje alternativ A – D, Figur 3.9. Samtliga rör hade dimension DN 65/160. Skarvmuffarna var av enkeltätande typ, bestående av en skjuthylsa som i ändarna tätades med krympslang. Montaget utfördes av en auktoriserad skarvmontör.

Skarvarna kontrollerades med avseende på cellgassammansättning, förekomst av luftspalter och hålrum samt vidhäftningen i nytillverkat skick och efter åldring.



Figur 3.9 Skarv för vidhäftningsprov.
Joint for adhesion test.

Temperaturåldring av skarvarna utfördes i princip enligt metod beskriven i SS-EN 253 (1995) genom att temperaturen på medierören hölls vid +170 °C under 2000 timmar*. För att kunna studera om vidhäftningen och uppkomsten av luftspalter påverkas av om skarven är otät, borrades fyra st. hål, ∅ 5 mm, genom krympslang och skarvhylsa i ändarna på en av var skarv A – D. Efter temperaturåldringen genomfördes sandlådeprov av skarvarna i enlighet med SS-EN 489 (1995), dock utan förhöjd temperatur på medieröret och utan efterföljande vattentäthetsprov.

3.2.1.1 Kontroll av skarvar före och efter åldring

Ingen av skarvarna uppvisade några allvarliga brister vad gäller skumutfyllnad. Inte heller några luftspalter kunde upptäckas, vare sig före eller efter åldring. Hos en av de åldrade skarvarna, med skumning mot renskalad ändyta, släppte ena krympförbandet

* I SS-EN 253 specificeras att åldringen vid +170 °C skall fortgå i 1450 timmar, vilket beräkningsmässigt motsvarar temperaturbelastningen vid en kontinuerlig drifttemperatur på +120 °C under 30 år.

och skarvhylsan flyttades ca. 18 cm i rörets längdled under sandlådeprovet. Skarvskummet under hylsan var dock intakt.

Cellgasen i skarvskummet bestod i huvudsak av koldioxid, som under åldringen diffunderade ut och till viss del ersattes med luft, Tabell 3.2. Ett något större gasutbyte skedde i de otäta skarvarna. Totaltrycket i skarvskummet var vid mättillfället mycket lågt: från ursprungliga 115 kPa sjönk trycket till 35 kPa i en tät skarv och till 30 kPa i en otät. Undertrycket i skarvskummet relativt ytterluften var alltså ca. 0,7 bar.

Tabell 3.2 Uppmätta cellgastryck för skarvskum. Nytillverkat respektive åldrat enligt metod i SS-EN 253 vid +170 °C under 2000 timmar.
Measured cell gas pressures in joint foam. Freshly made and aged according to EN 253 at +170 °C during 2000 hours.

	Partialtryck, kPa		
	Före åldring	*Efter åldring*	
		Tät skarv	*Otät skarv*
Kvävgas	1,5	4	10
Syrgas	0,5	4	8
Koldioxid	106	23	8
Vattenånga	3	1	1
Pentan + övrigt	4	3	3
Totaltryck	115	35	30

3.2.1.2 Vidhäftningshållfasthet

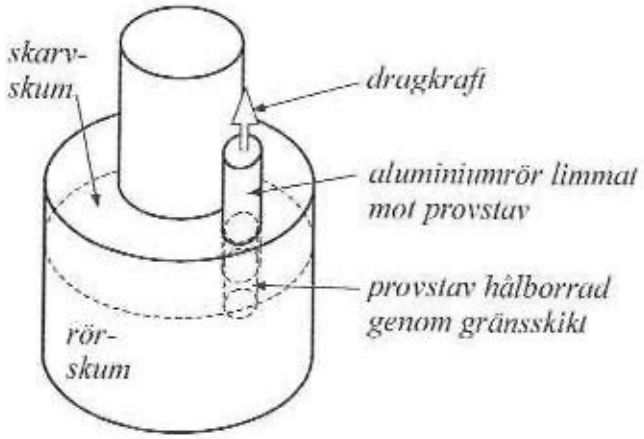
Vidhäftningen uppmättes genom dragprov enligt uppställningen i Figur 3.10. Från varje skarv sågades en bit rör ut innehållande ett par decimeter rörskum och ca. 5 cm skarvskum. Genom skarvskummet borrades med hålborr till ett djup strax under gränsytan mellan skarvskum och rörskum. Borrkärnan fick sitta kvar i rörskummet och ett aluminiumrör träddes över borrkärnan och limmades fast. I en provningsmaskin belastades därefter aluminiumröret med en dragkraft i längdriktningen till dess brott uppstod i rörskummet, skarvskummet eller gränsskiktet. Något vidhäftningsprov genomfördes av naturliga skäl inte på skarven isolerad med prefabskålar.

Resultaten framgår av Figur 4.11. Högst vidhäftning efter åldring, ca. 470 kPa, uppmättes för alternativen med skumning mot en renskalad ändyta och med skumning mot GAP-gavel. För dessa två alternativ förbättrades vidhäftningen under åldringen. Vid skumning mot normallagrad ändyta uppmättes en vidhäftning av ca. 340 kPa före och 300 kPa efter åldring. På de provkroppar som för skumningen beströks med släppmedel uppmättes ingen vidhäftning alls.

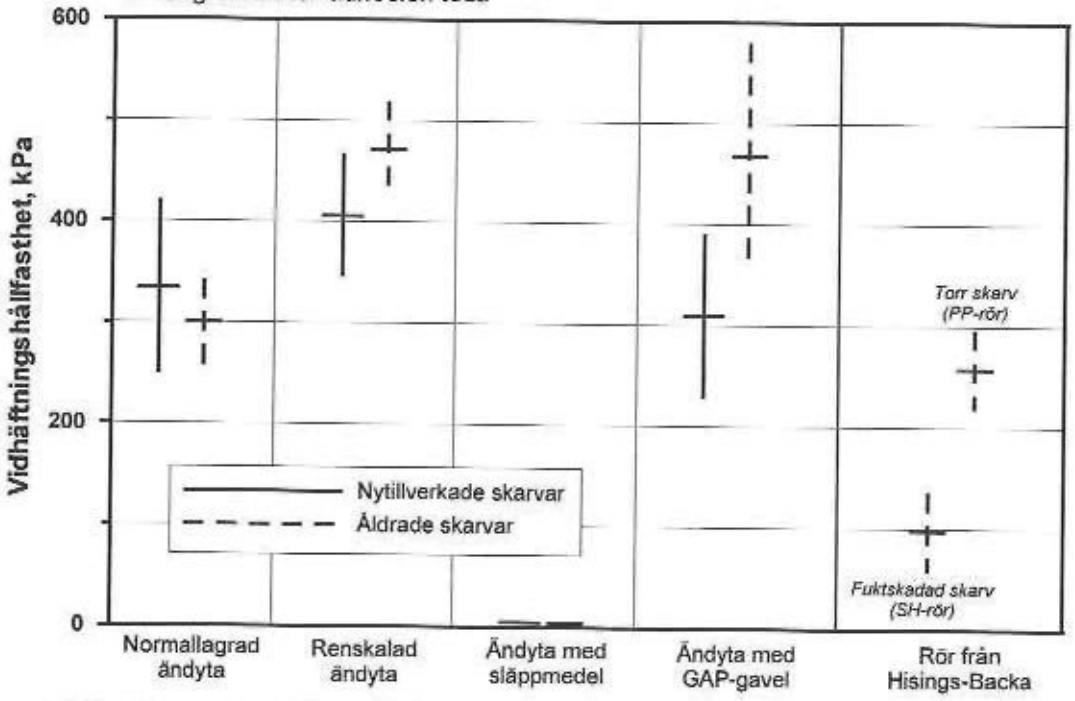
Vidhäftningen uppmättes även på skarvar som uttagits från provledningen i Hisings-Backa, se avsnitt 4.3. Vidhäftningen mellan skarvskum och rörskum i skarven från PP-röret var omkring 260 kPa, dvs. något sämre än för alternativet med skumning mot normallagrad ändyta för de nytillverkade rören. Skarvskummet i SH-röret, med låg skumkvalitet och mycket stort vatteninnehåll, uppvisade en klart sämre vidhäftning mot rörskummet, ca 100 kPa.

Eventuella spänningar i skummet orsakade av förändringar i cellgastrycket är kopplade till skillnader mellan cellgastryck och omgivande tryck. Teoretiskt kan därmed

dragspänningarna i skummet inte bli större än ca. 100 kPa, dvs. klart mindre än den uppmätta vidhäftningshållfastheten i normalfallet.



Figur 3.10 Uppställning för provning av vidhäftningshållfasthet.
Arrangement for adhesion test.

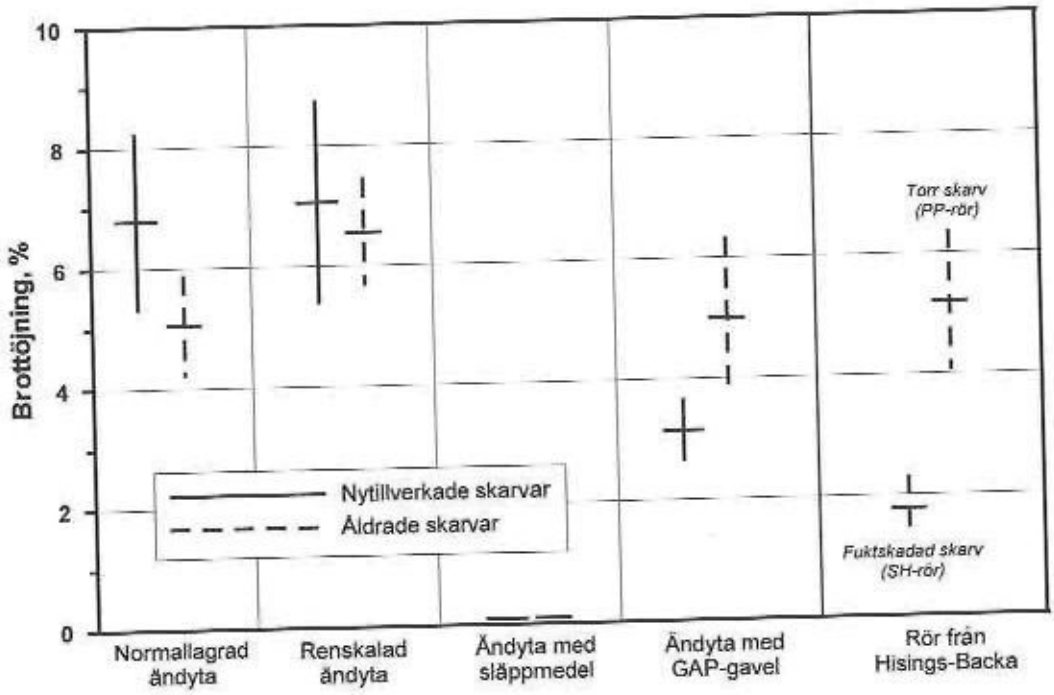


Figur 3.11 Mätresultat från vidhäftningshållfasthetsprov. Staplarna visar ett skattat 95 %-igt konfidensintervall för medelvärdet vid respektive prov[*].
Measured results from adhesion test. The bars show an estimated 95 % confidence interval for the mean value.

---

[*] Under antagande att de enskilda uppmätta vidhäftningshållfastheterna för ett ändytealternativ är normalfördelade kan ett 95 %-igt konfidensintervall för medelvärdet skattas ur $\pm t_{0,95;n-1}\, s/\sqrt{n}$, där $t_{0,95;n-1}$ är täckningsfaktorn ur Students t-fördelning med $n-1$ frihetsgrader, s är stickprovets standardavvikelse och n är antalet prov.

Brottöjningen, dvs. provstavarnas förlängning vid brott, uppgick till mellan 5 och 7 % procent vid skumning mot normallagrad och renskalad ändyta och mellan 3 och 5 % vid skumning mot GAP-gavel, Figur 3.12. I samklang med den lägre hållfastheten noterades även en lägre brottöjning, ca 2 %, för det fuktiga skarvskummet från Hisings-Backa.



Figur 3.12 Uppmätta brottöjningar vid vidhäftningshållfasthetsprov. Staplarna visar ett skattat 95 %-igt konfidensintervall för medelvärdet vid respektive prov. Measured fracture strain from adhesion tests. The bars show an estimated 95 % confidence interval for the mean value.

3.2.1.3 Gränsskiktet mellan skarvskum och rörände

När det gäller skarvar isolerade med prefabskålar måste man generellt räkna med att skarvisoleringen och rörisoleringen inte ansluter helt tätt utan att en viss luftspalt kan uppstå. I vårt fall är detta också fallet som visas i bilden på sidan 36.

För de skummade skarvarna visade sig den mekaniska vidhäftningen visat sig vara god i de flesta studerade fall. Emellertid kan gränsskiktet mellan skarvskum och rörskum ha avvikande egenskaper som påverkar skarvens funktion på sikt. Skarvskummets cellstruktur visade sig vara betydligt grövre i skiktet där skummet ansluter mot befintligt rörskum, med en celldiameter 3 á 4 gånger större är normalt. Detta illustreras av fotografier i Bilaga A (normallagrat ändskum sidan 32, renskalat ändskum sidan 33 samt ändskum med släppmedel sidan 35). Vid skumning mot den släta GAP-ändgaveln erhölls huvudsakligen fincelligt skum ända in till gavelväggen med fläckvisa förekomster av en grövre struktur (fotografier på sidan 34). Den grövre cellstrukturen i gränsskiktet kan bestå av en betydligt mindre andel slutna celler än normalt skum, och skulle i så fall utgöra en möjlig transportväg för vatten. En detaljerad studie av orsakerna till och konsekvenserna av en inhomogen cellstruktur har inte ingått i

föreliggande projekt. Detta bör emellertid utredas för att så långt möjligt kunna säkerställa en "vattentät" skumutfyllnad i skarvarna.

Fotografierna av de uppsågade åldrade rören i Bilaga A uppvisar helt olika färger på skummet, trots att samtliga rörskum och skarvskum, med undantag för prefabskålarna, varit av samma typ. Detta är sannolikt en konsekvens av att skummen i olika hög grad oxiderats under åldringen. Brunfärgningen av PUR-skummet är en process som går hastigare vid högre temperatur och som kräver tillgång till syre. En relativt kraftig oxidation ses vid den normallagrade röränden (sidan 32) och i prefabskålarna (sidan 36). Dessa har lagrats före montage och luft (syrgas) har kunnat diffundera in i skummet och påskyndat oxidationsprocessen under åldringen. I det normallagrade fallet har luft kunnat diffundera från ändskummet i röret till skarvskummet. Minst påverkan kan ses för det renskalade alternativet (sidan 33). Här har skarvningen skett på en renskalad bit långt in på röret, dvs. långt från änden, och syrgashalten i rörskummet kan därmed förväntas vara låg. I fallet med GAP-ändgavel (sidan 34) har skarvskummet samma utseende som i det renskalade fallet. Däremot är rörskummet i anslutning till ändgaveln kraftigt oxiderat, troligtvis en påverkan från det silikonlim som använts för att fästa ändgaveln mot rörskummet. En liknande effekt, med kraftig oxidation i anslutning till gränsskiktet, ses för fallet med renskalad ändyta med släppmedel (sidan 35) där oxidationen sannolikt påskyndats av släppmedlet.

4 Fukttransport i homogent PUR-skum

En kortfattad genomgång av den grundläggande teorin för gasdiffusion ges i Bilaga B.

4.1 MÄTNINGAR

Med avsikt att klarlägga sambandet mellan ånggenomsläppligheten och övriga egenskaper hos ett PUR-skum har egenskaperna för ett antal skum med olika ålder och framställningssätt studerats. Mätningarna har sålunda omfattat dels ånggenomsläppligheten och dels skummets densitet, andel slutna celler, cellstorlek samt vattenabsorption – egenskaper som normalt anges för att karakterisera ett PUR-skum.

Följande olika nytillverkade PUR-skum har analyserats:

- Rörskum från ett fjärrvärmerör DN 25/110
- Skum från prefabricerade skarvskålar DN 25/110
- Maskinskummat skarvskum från skarv DN 65/160
- Egentillverkat handblandat skum

Dessutom genomfördes mätningar på ett skum från försöksanläggningen i Hisings-Backa.

- Fuktskadat skum från skarv tillverkad 1988

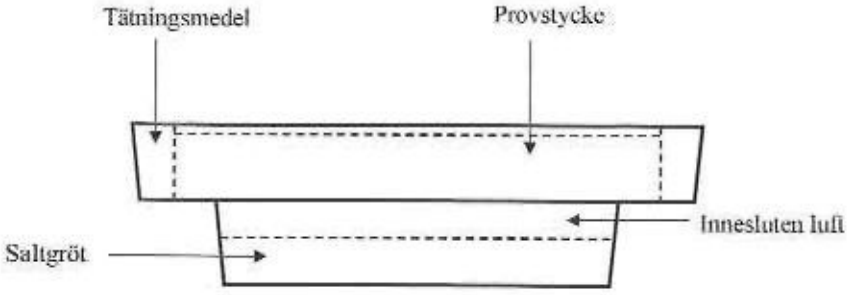
4.1.1 Bestämning av diffusionsegenskaper

PUR-skummens ånggenomsläpplighet uppmättes enligt standardmetod beskriven i svensk standard SS 02 15 82 (1980). Metoden innebär att skivor av PUR-skum placeras som tätande lock över ett kärl innehållande en mättad saltlösning som ger en konstant relativ fuktighet inuti kärlet. Kärlet placeras i en klimatkammare med en relativ fuktighet som är mindre än den inuti kärlet varvid vattenånga diffunderar ut genom PUR-skivan. Fuktflödet uppmäts genom att kärlet vägs med jämna mellanrum och ånggenomgångskoefficienten δ_v kan beräknas ur ekvation (4.1):

$$\delta_v = \frac{d}{\Delta v} g = \frac{d}{\Delta v} \frac{\Delta m}{A \Delta t} \tag{4.1}$$

där Δm är viktförlusten mellan två vägningstillfällen (kg), Δt är tiden som förflutit mellan vägningarna (s) och d är provskivans tjocklek (m).

Provskivorna var formade som cirkulära plattor med 84 mm diameter och 17 mm tjocklek, Figur 4.1. Anslutningen till provkärlet tätades med bivax och kärlet fylldes till ungefär hälften med en saltgröt som bestod av 50 % mättad koksaltlösning och 50 % koksalt. Denna saltlösning ger en relativ luftfuktighet i kärlet på ca. 75 %.



Figur 4.1 Schematisk bild av preparerad provkopp.
Schematic view of prepared test cup.

Samtliga försök genomfördes vid ca. 40 °C och med medelvärdet av luftfuktigheterna i kärlet och i klimatkammaren i intervallet 45 – 70 %.

4.1.2 Bestämning av skumegenskaper

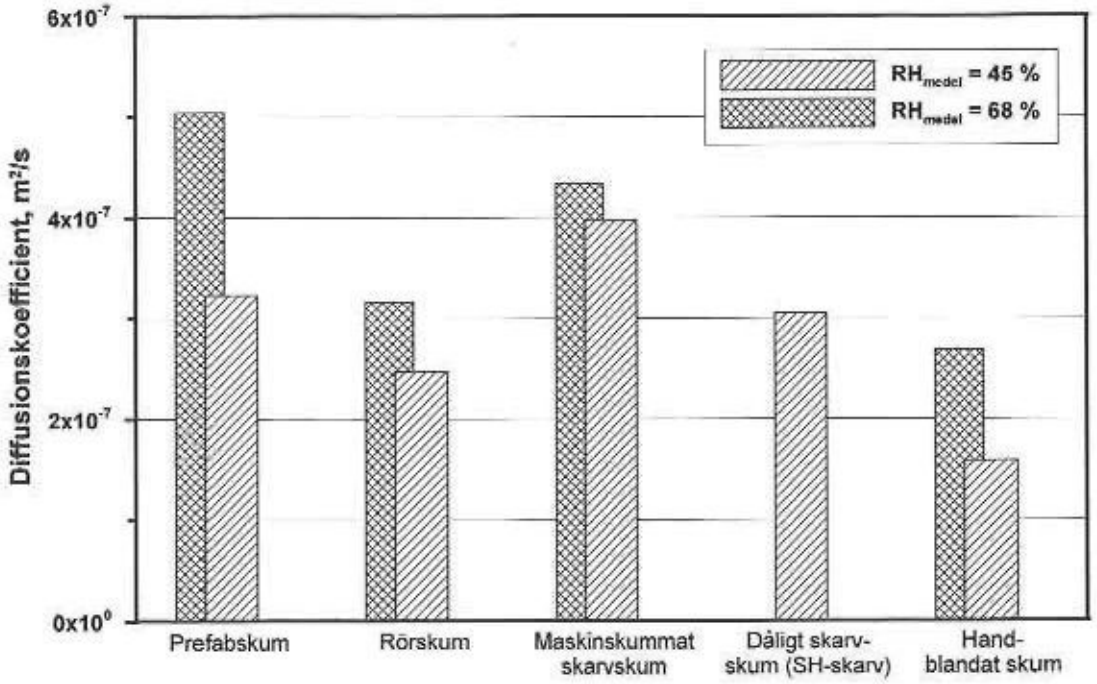
Analyserna av cellstorlek, densitet och vattenabsorption utfördes enligt metoder angivna i SS-EN 253 (1995). Andelen slutna celler bestämdes i princip enligt SS-EN ISO 4590 (1995), med ett beräkningsmässigt förfarande som beskrivs i bilaga D.

4.1.3 Resultat

Resultaten från mätningarna avseende diffusionsegenskaper och karakteristiska skumegenskaper redovisas i Tabell 4.1. Alla skum uppvisar en ånggenomsläpplighet i intervallet $2 - 5 \times 10^{-7}$ m^2/s. Motsvarande värde för skivmaterial av PUR-skum med densiteten 40 kg/m^3 anges av Oberbach (1998) till ca. $4{,}9 \times 10^{-7}$ m^2/s. Detta kan jämföras med diffusionskoefficienten för de "vanliga" cellgaserna koldioxid, luft och cyklopentan, som är i storleksordningarna 1000, 10 000 respektive 100 000 gånger mindre (Olsson 2001). Vattenånga transporteras således mycket snabbare än cellgaserna genom PUR-skummet. De uppmätta diffusionskoefficienterna är för övrigt jämförbara med tabellerade värden för material som exempelvis trä och cementbruk (Hagentoft 2001).

Tabell 4.1 Mätresultat – diffusionsegenskaper och karakteristiska skumegenskaper.
Measured results – diffusion properties and characteristic foam properties.

Skum	*Egenskaper provade enligt SS-EN 253:*				*Ånggenom-släpplig-hetskoef-ficient*	*Genom-snittlig relativ fuktighet*
	Vatten-absorp-tion (vol-%)	*Andel slutna celler** (vol-%)	*Densitet* (kg/m^3)	*Cell-storlek* (mm)	(m^2/s)	(%)
Rörskum	5,0	97	76	0,3	$2,5 \times 10^{-7}$	46
					$3,0 \times 10^{-7}$	68
					$3,3 \times 10^{-7}$	71
Prefabskum	4,2	99	84	0,3	$3,2 \times 10^{-7}$	46
					$5,0 \times 10^{-7}$	68
Maskinskummat skarvskum	6,1	97	82	0,3	$4,0 \times 10^{-7}$	45
					$4,3 \times 10^{-7}$	68
					$4,4 \times 10^{-7}$	69
"Dåligt" skarvskum (SH-skarv)	6,9	90	62	0,8	$3,1 \times 10^{-7}$	45
Handblandat skum	8,2	93	66	1,0	$1,6 \times 10^{-7}$	46
					$2,5 \times 10^{-7}$	68
					$2,9 \times 10^{-7}$	71



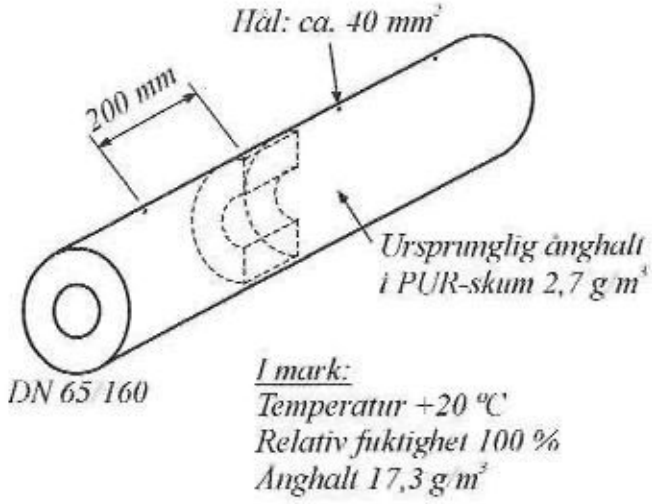
Figur 4.2 Uppmätta diffusionskoefficienter för de olika skumtyperna.
Measured diffusion coefficients for the different foam types.

* Bestämningen av andelen slutna celler är gjord enligt Bilaga D, ekvation (D.6), sidan 46.

I diagrammet i Figur 4.2 är skumtyperna i princip ordnade efter kvalitet, med "bättre" skum åt vänster. Något överraskande är genomsläppligheten större för "bättre" skum. De "sämre" skummen, med lägre densitet och större celler är således de tätaste. Detta kan beror på att den solida polymeren i de dåligt blandade skummen är tätare med avseende på vattenångdiffusion eller att fördelningen av PUR-materialet i skummens cellstruktur är olika.

4.2 BERÄKNINGAR

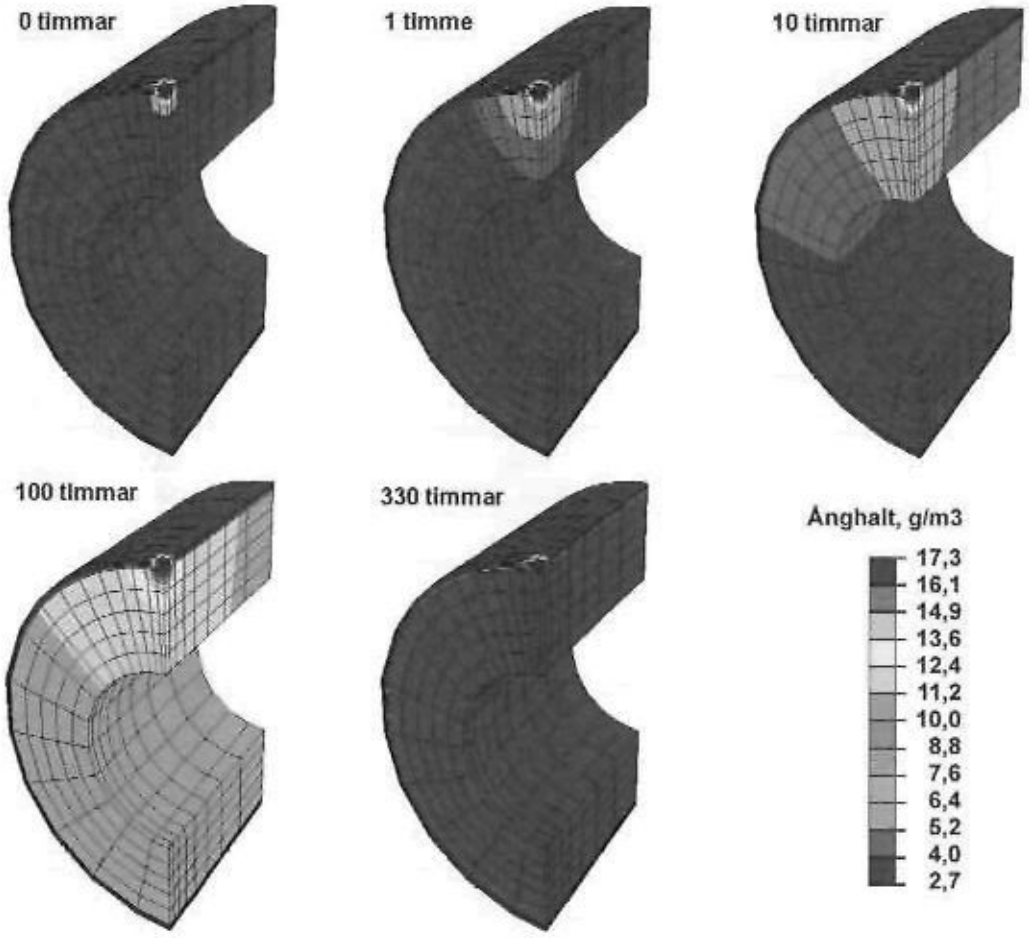
För att illustrera den snabba vattenångtransporten i ett PUR-skum har en simuleringsberäkning genomförts. Därvid studerades en situation där ett fjärrvärmerör av dimension DN 65/160 med från början torrt PUR-skum utsätts för markfukt genom ett litet hål i mantelröret, Figur 4.3. Utanför röret antas temperaturen vara +20 °C och marken vara våt, dvs. den relativa fuktigheten är 100 % (motsvarande en ånghalt av ca. 17,3 g/m^3). Vid beräkningens början antas PUR-skummet stå i jämvikt med luft som håller +10 °C och 30 % relativ fuktighet, motsvarande en ånghalt på ca. 2,7 g/m^3. Ånggenomsläppligheten (diffusionskoefficienten för vattenånga) i PUR-skummet har satts till 3×10^{-7} m^2/s och mantelröret betraktas som ångtätt. Beräkningarna genomfördes med FEM-systemet Abaqus 6.1, utan hänsyn tagen till eventuellt temperatur- eller fuktighetsberoende hos skummets ånggenomsläpplighet.



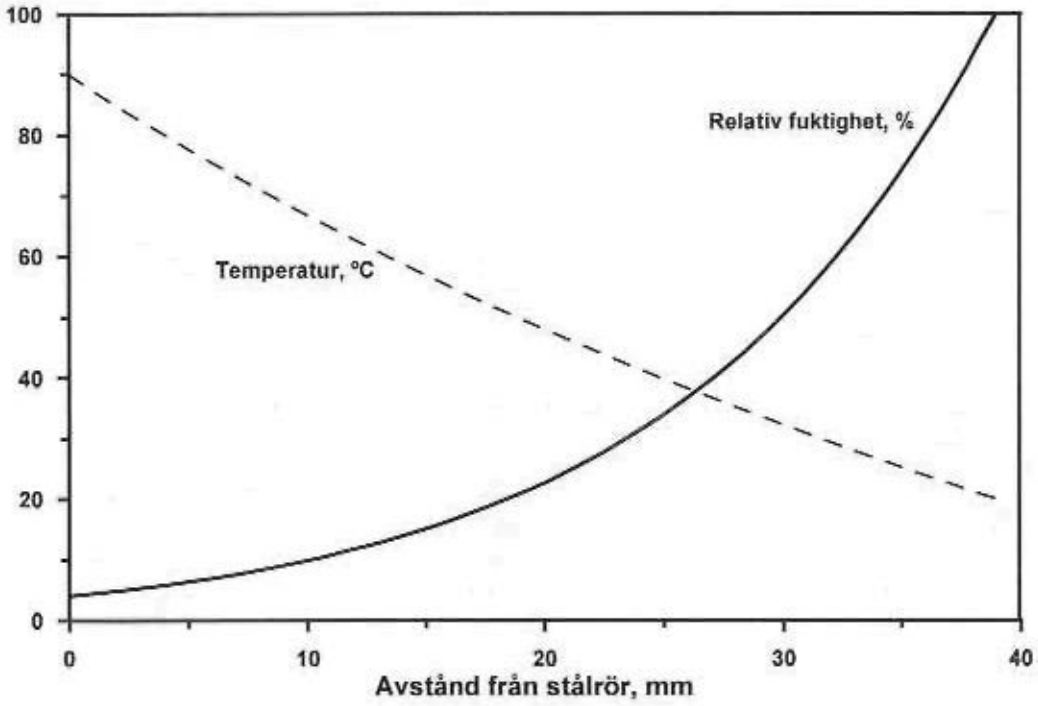
Figur 4.3 Beräkningsmodell. Streckade linjer visar utsnittet i Figur 4.4.
Computational model. Dashed lines show the section in Figure 4.4. In the ground, the temperature is +20 °C and the relative humidity is 100 % corresponding to a moisture content of 17.3 g/m^3. The initial moisture content of the PUR foam is 2.7 g/m^3.

Så länge ånghalten är högre i marken än i PUR-skummet diffunderar vattenånga in genom hålet i mantelröret. När jämvikt uppnåtts är således ångtrycket 17,3 g/m^3 i hela skumvolymen. Detta visar sig inträffa efter ca. 330 timmar d.v.s. efter knappt två veckor, Figur 4.4. Att ångtrycket i hela skumvolymen har ökat till den omgivande markens mättnadsångtryck innebär dock inte att skummet i hela volymen har hög fuktighet. Intill stålröret gör den höga temperaturen att den relativa fuktigheten blir mycket låg. Om cellerna i PUR-skummet antas vara fyllda med luft och temperaturen på

stålröret är +90 °C, blir den relativa fuktigheten invid stålröret endast ca. 3 %, Figur 4.5. Då man normalt räknar med att stål inte rostar vid luftfuktigheter under ca. 60 % (Wallin 1973) kan indiffusion av markfukt under de skisserade förutsättningarna inte medföra någon risk för stålrörskorrosion.



Figur 4.4 Ånghalt i PUR-skummet vid olika tidsintervall. Jämvikt har ställt in sig efter ca. 330 timmar till en ånghalt på 17,3 g/m³.
Moisture content in the PUR foam at different times. Equilibrium is reached after approximately 330 hours at a moisture content of 17.3 g/m³.



Figur 4.5 Beräknad fuktprofil genom PUR-skum vid ångtrycksjämvikt.
Calculated moisture profile through PUR foam at vapour pressure equilibrium.

4.3 EGENSKAPER HOS 12 ÅR GAMMALT SKARVSKUM

Sedan 1988 finns i Hisings Backa i Göteborg en försöksanläggning med tre fjärrvärmeledningar i dimension DN 150/280 anslutna till fjärrvärmenätet. Ledningen etablerades i ett samarbete mellan Chalmers tekniska högskola och Göteborg Energi AB. Det huvudsakliga syftet var att studera förändringar i värmeisoleringsförmåga för olika typer av PUR-skum. De tre ledningarna är därför isolerade med olika skumtyper, freonblåst skum (PP)*, skum med reducerad freonhalt (BA)† och koldioxidblåst skum (SH)‡. Prover har vid olika tillfällen tagits ut och undersökts (Jarfelt 1997). Under de senaste åren har anläggningen dock varit avstängd och rören därmed varit kalla under lång tid innan nuvarande studier företogs.

Tre skarvar på försöksledningarna frilades för att undersökas med avseende på skarvskummets vidhäftning till rörskummet eller förekomsten av luftspalter mellan skarv- och rörskum. Ca 1,8 m långa ledningsstycken, inkluderande en skarv, kapades loss både från ledningssträckan med freonblåst skum och från ledningssträckan med koldioxidblåst skum. En skarv på den tredje ledningen öppnades och undersöktes på plats, varefter den åter förseglades. De båda borttagna ledningsstyckena ersattes med mantelfria rör, så som redovisas i avsnitt 4.4.

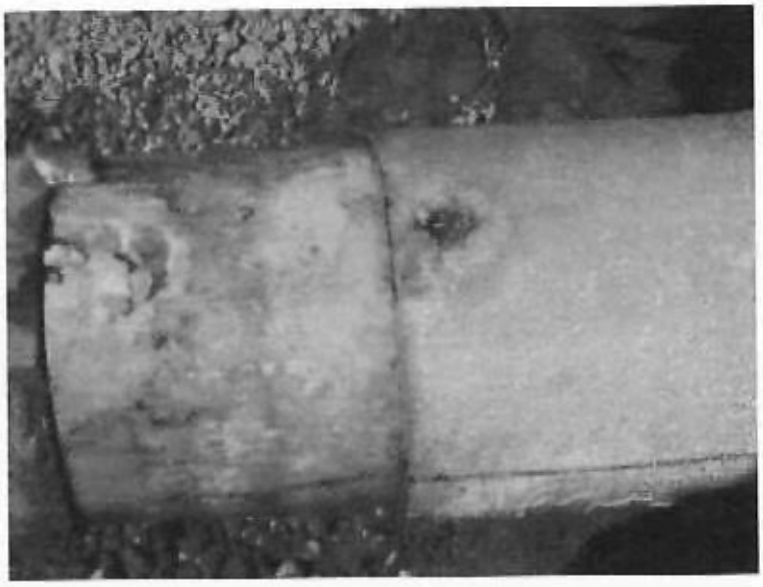
---

* Powerpipe Systems standardskum vid tiden för installationen. Benämns i det följande "PP".

† Tillverkat av Bayer. Benämns i det följande "BA".

‡ Tillverkat av Shell. Benämns i det följande "SH".

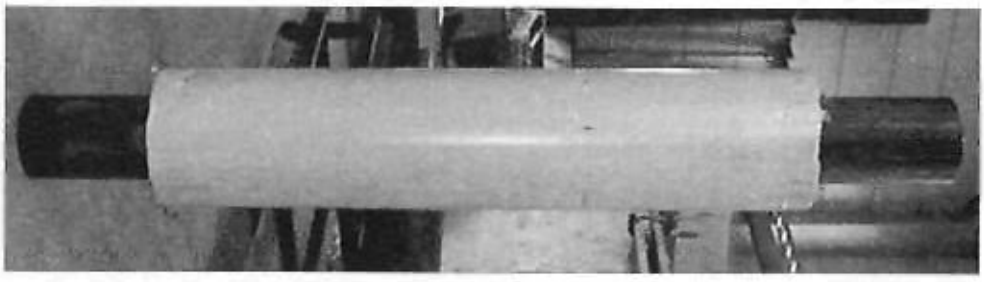
Ingen av de undersökta skarvarna uppvisade några luftspalter eller defekter avseende skumutfyllnad. Skummen i skarvarna på BA- och SH-rören var emellertid av låg kvalitet med hänsyn till densitet, cellstorlek och andel slutna celler (se Tabell 4.1 sidan 19 och Bilaga A, sidan 37) och vidhäftningen mot mantelröret var låg. Dessa skarvar var dessutom mycket fuktiga. I SH-skarven uppmättes fuktinnehållet vid rörets botten till 96 vikt-% eller ca. 6 volym-%. I rörskummet intill skarven var fuktinnehållet nära 1000 vikt-% eller ca. 79 volym-%. Någon fukthaltsbestämning utfördes inte på BA-skarven, men fuktinnehållet uppskattas även i denna ha varit mycket högt, Figur 4.6. Ingenting tydde dock på att de undersökta skarvarnas tätningar mot mantelröret läckt. Helt allmänt var emellertid ledningarna i dåligt skick, med flera andra bristfälligt tätade skarvar där skumprover tidigare tagits ut. Det fanns således flera möjliga läckageställen där markvatten kunnat ta sig in och spridas längs ledningarna.



Figur 4.6 Rör- och skarvskum vid öppnad BA-skarv.
Pipe and joint foam at opened BA joint.

4.4 RÖR UTAN PEH-MANTEL

För att ytterligare klarlägga PUR-skummets förmåga att skydda mot inträngande vatten har både fältförsök och laboratorieprov utförts med fjärrvärmerör utan polyetenmantel. Rören, av dimension DN 150/280, specialtillverkades av Powerpipe i längder om 1,8 m, Figur 4.7. För att ge en extra goda möjligheter att övervaka eventuell fuktinträngning försågs rören med fyra larmtrådar i stället för normala två.

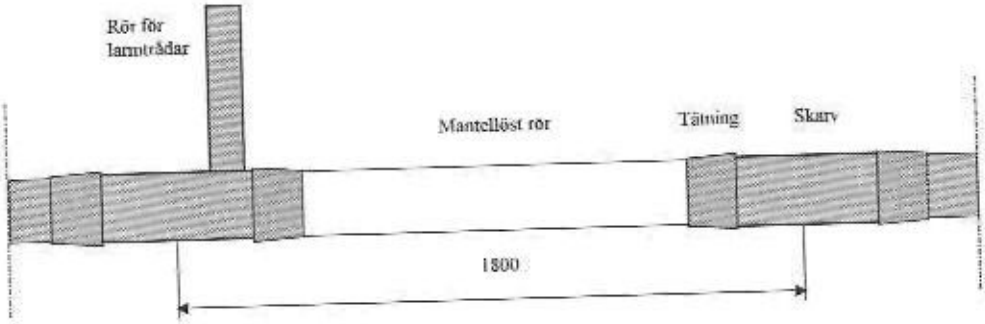


Figur 4.7 Fjärrvärmerör utan PEH-mantel.
District heating pipe without PEH casing.

4.4.1 Rör utan mantel förlagda i mark

De båda rörstyckena som tagits ut för undersökning från försöksanläggningen i Hisings-Backa (avsnitt 4.3), ersattes med mantelfria rör, Figur 4.8. Dessa skarvades in i ledningen på vanligt sätt och krympmanschetterna på skarvmuffarna krymptes ned direkt mot skumytan, Figur 4.9. De vertikala rören på skarvmuffarna användes för att dra upp larmtrådarna till marknivå.

Figur 4.8 Mantelfria rör installerade i Hisings-Backa.
Casing free pipes installed in Hisings-Backa.



Figur 4.9 Principskiss över mantelfritt rör.
Schematic view of casing free pipe.

De mantelfria rören lades ned och kringfylldes i början av juni 2001. Omedelbart efter nedläggningen och vid ett antal tillfällen därefter har motståndsmätningar utförts mellan larmtrådarna och stålröret. Fram till mars 2002 fanns inga indikationer på någon fuktinträngning. Resistansmätningarna visade endast värden överstigande 50 MΩ för alla larmtrådar. Efter en period med mycket fuktiga markförhållanden och en grundvattenyta nära marknivå har dock en lägre resistansnivå uppmätts, omkring 5 MΩ, mellan två av larmtrådarna i det ena röret. Det bör noteras att ledningarna även i normala fall i princip ligger under vatten.

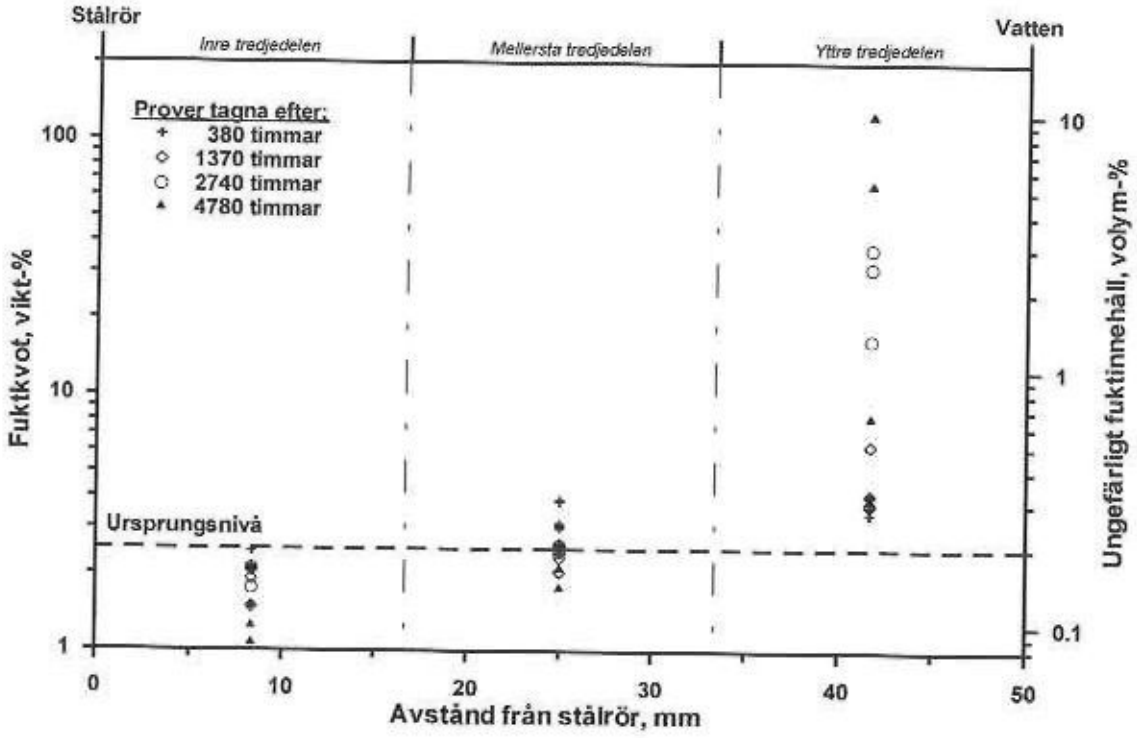
Några avgörande resultat från de nedlagda mantelfria rören har inte förväntats inom det föreliggande projektets tidsram. Det bedömdes dock för framtiden vara värdefullt att i försöksanläggningen ha tillgång till denna typ av rör Om det kan påvisas att skummet fungerar som en fuktspärr som är tillräcklig för att förhindra uppkomsten av korrosionsskador på stålröret är detta självfallet mycket värdefullt.

4.4.2 Laboratorieförsök på rör utan mantel

Samma typ av mantelfritt rör som installerades i försöksanläggningen i Hisings Backa användes i ett laboratorieförsök. Röret förlades i ett kar med vatten och genom ett system med cirkulerande varmvatten hölls medierörets temperatur på +90 °C. Vattnet i karet höll en temperatur på ca. +23 °C och vattenytan låg ca. 15 cm över rörhjässan.

Larmtrådsresistansen uppmättes på samma sätt som på rören förlagda i Hisings-Backa. Dessutom togs under försökets gång prover för fuktkvotsbestämning. Provkropparna togs ut som borrkärnor i radiell riktning. Fuktkvoten bestämdes genom vägning av provkropparna före och efter uttorkning.. Stavarna delades i tre delar och fuktkvoten bestämdes för var och en av dessa. Varje enskild mätpunkt i Figur 4.10 representerar således den genomsnittliga fuktkvoten för en tredjedel av skumtjockleken.

Mätresultaten visar att det inte sker någon nettotransport av vatten in till stålröret. Istället har skummet i den inre tredjedelen torkat ut något från sitt ursprungstillstånd. Endast i den yttre tredjedelen har skummets fuktinnehåll ökat. Med hänvisning till resultaten av den beräkning som redovisades i avsnitt 4.2 är förklaringen att temperaturen är hög vid stålröret och att en ångtrycksjämvikt, med konstant vattenångtryck genom hela skummet därmed ger en mycket låg relativ fuktighet vid stålröret. Jämför mätningarna i Figur 4.10 med beräkningarna i Figur 4.5, sidan 22.



Figur 4.10 Uppmätt fuktkvotsprofil genom PUR-skummet för mantelfritt rör förlagt i vatten.
Measured moisture ratio profile through PUR foam for casing free pipe laid in water.

5 Diskussion och slutsatser

5.1 LUFTSPALTER I SKARVAR

Mätningar av skummets dimensionsförändringar visade att skummet expanderar i storleksordningen ett par procent efter 5000 timmar i +90 °C med en totaltrycksökning om ca. 15 – 20 kPa. I ett skarvskum, som vid inskumningen innehåller mycket stor halt koldioxid, kommer trycknivån istället att sjunka vilket innebär risk för att skummet krymper. Mätningar av gasinnehållet före och efter åldring av nytillverkade skarvar visade att cellgastrycket kan sjunka med så mycket som ca. 80 kPa. Skummet i en skarv är dock inte exponerat mot atmosfärstryck på samma sätt som de provkroppar på vilka dimensionsförändringarna uppmätts och vid kontroll av de åldrade skarvarna hade inga luftspalter bildats.

Vidhäftningen mellan skarvskum och rörskum visade sig vara undermålig endast då släppmedel strukits på rörskummet omedelbart före skumningen. Bäst vidhäftning, med en draghållfasthet på ca. 450 kPa, erhölls vid skumning mot renskalat rörskum.

Under förutsättning att gränsskiktet mellan skarvskum och rörskum inte har väsentligt lägre diffusionsmotstånd än skummet i övrigt bedöms den goda vidhäftning som normalt uppnås mellan skarv- och rörskum innebära att risken för att spalter skall uppstå under ledningens livslängd som liten. Om cellstrukturen i gränsskiktet mellan skarvskum och rörskum blir mycket grov och med låg andel slutna celler och låg hållfasthet skulle detta kunna medföra betydligt förhöjd risk för spalt- eller hålrumsbildning. Det är därför väsentligt att ett skarvskum har föreskrivna egenskaper även där det gränsar till rörskummet.

5.2 FUKTTRANSPORT I HOMOGENT PUR-SKUM

Mätningarna har visat att vattenånga, jämfört med "vanliga" cellgaser, transporteras mycket snabbt genom homogent PUR-skum. Vid en otäthet i en skarv kan därmed fuktförhållandena i skumvolymen efter förhållandevis kort tid ställa in sig i jämvikt med markens fuktinnehåll. Så länge stålröret är varmt innebär detta dock knappast någon haveririsk, då den relativa fuktigheten invid stålröret blir så låg att någon korrosion inte kan uppstå.

Försöken med mantelfria rör visar inte heller på någon ökning av fuktinnehållet i PUR skummet vid stålröret. Vid laboratorieförsöket har endast skummet närmast den kalla ytan blivit fuktig medan skummet invid stålröret torkat ut. Vid resistansmätningarna på larmtrådarna vid fältförsöket har efter sex månader inga indikationer på fukt erhållits.

Det är emellertid inte klarlagt vilka konsekvenser kraftiga temperaturvariationer i ledningsnätet kan få om skummet har "fyllts" med vattenånga. När temperaturen sjunker stiger den relativa fuktigheten i skummet och risken för kondensation och korrosion ökar. Om ledningen tas ned till omgivningstemperatur, exempelvis vid ett längre driftsstopp, kan fuktigheten i skummet omfördelas. Om temperaturen sedan åter stiger

snabbt kan kondenserat vatten förångas med höga ångtryck som följd vilket hypotetiskt skulle kunna skada skummet.

6 Referenser

1. AHLGREN, J., m.fl. (1998). *Nya material för fjärrvärmerör – Förstudie/litteraturstudie*, Fjärrvärmeföreningen FoU 1998:30.
2. BERGSTRÖM, G. och KARLSSON, J. (1996). *Termomekaniska egenskaper hos kulvertisolering av PUR-cellplast*, Hetvattenteknik 583, Stiftelsen för värmeteknisk forskning.
3. BERGSTRÖM, G. och NILSSON, S. (1999). *Ändgavlar på fjärrvärmerör*, Fjärrvärmeföreningen FoU 1999:38.
4. BERGSTRÖM, G., NILSSON, S. och SÄLLBERG, S.-E. (2001). *Vattenläckage genom otät mantelrörsskarv*, Fjärrvärmeföreningen FoU 2001:51.
5. BERGSTROM, G., NILSSON, S. OCH SÄLLBERG, S.-E. (2001). *Täthet hos skarvar vid återfyllning med befintliga massor*, Fjärrvärmeföreningen FoU 2001:58.
6. BLOMQVIST, L. och LJUNGQVIST, J. (1986). *Skumfyllnad i kulvertskarvar*, Hetvattenteknik 226, Stiftelsen för värmeteknisk forskning.
7. BJURSTRÖM, H., KALBANTNER, P. och CRONHOLM, L.-Å. (2001). *Skarvtätning baserad på svällande material*, Fjärrvärmeföreningen FoU 2001:57.
8. HAGENTOFT, C.-E. (2001). *Introduction to building physics*, Studentlitteratur, Lund.
9. JARFELT, U. (1997). *Utvärdering av fuktinträngning och gasdiffusion hos gamla kulvertrör "Hisings-Backa"*, Fjärrvärmeföreningen FoU 1997:16.
10. JUST, M. och NITSCHE, S. (2000). *Untersuchungen zum langzeitverhalten von muffenverbindungen für kunststoffmantelrohre in fernwärmeleitungen, Prüfung von kunststoffmantelrohrmuffen im sandkastenprüfstand*, IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH, Berichts-nr. B89/8, Auftrags-nr. 14.320.
11. MOLIN, J., BERGSTRÖM, G. och NILSSON, S. (1997). *Kulvertförläggning med befintliga massor*, Fjärrvärmeföreningen FoU 1997:17.
12. NILSSON, J. och GUDMUNDSSON, T. (1998). *Reparation utan uppgrävning av skarvar på fjärrvärmerör*, Fjärrvärmeföreningen FoU 1998:26.
13. OLSSON, M. (2001). *Long-Term Thermal Performance of Polyurethane-Insulated District Heating Pipes*, doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.
14. OBERBACH, K. (1998). *Saechtling Kunststoff Taschenbuch, 27. Ausgabe*, Carl Hanser Verlag, München, s. 672.
15. SMIDT, H. D. (2000). *Strength and tightness of joints on pre-insulated district heating pipes*, Danish Technological Institute, Aarhus.
16. SMIDT, H. D. (2001). *Intercomparison of sandboxes used for tseting joints for district heating pipes – Nordtest Project No. 1554-01*, Danish Technological Institute, Aarhus.
17. SVANSTRÖM, M. (1997). *Blowing agents in rigid polyurethane foam*, doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Göteborg.

18. WALLIN, L. (1973). *Rostskydd för stålkonstruktioner*, Stålbyggnadsinstitutet, publikation 35.

19. Svensk Standard SS 02 15 82 (1980). *Byggmaterial – Provning – Vattengenomgångsmotstånd.*

20. Svensk standard SS-EN 253 (1995). *Fjärrvärmesystem – Förisolerade rörsystem med fast förband mellan värmeisolering och medierör respektive mantelrör för markförlagd distribution av hetvatten – Rörenhet bestående av raka medierör av stål, värmeisolering av hård uretancellplast (PUR-skum) och mantelrör av etenplast (PE).*

21. Svensk Standard SS-EN 489 (1995) *Fjärrvärmesystem – Förisolerade rörsystem med fastförband mellan värmeisolering och medierör respektive mantelrör för markförlagd distribution av hetvatten – Skarvar för rörenheter med medierör av stål, värmeisolering av hård uretancellplast (PUR-skum) och mantelrör av etenplast (PE).*

22. Svensk Standard SS-EN ISO 4590 (1995). *Cellplast – Bestämning av andel öppna och slutna celler i hårda material.*

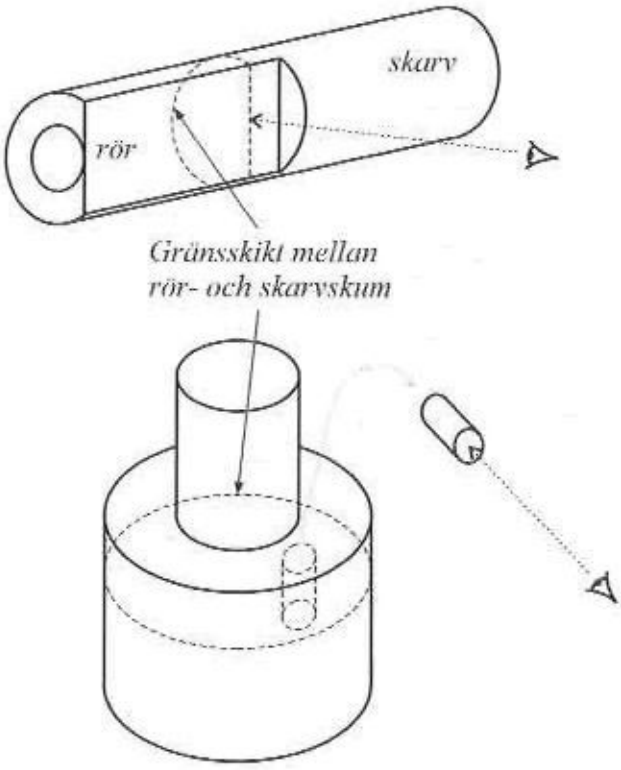
Bilaga A – Fotografier av gränsskikt

På följande sidor visas fotografier över gränsskikten mellan rörskum och skarvskum för de provade skarvtyperna.

Bilderna visar dels snitt genom gränsskikten från sidan, där ett segment ur rör och skarv sågats ur, och dels gränsskikten sedda från ytan såsom de frilagts efter vidhäftningshållfasthetsproven (avsnitt 3.1.2).

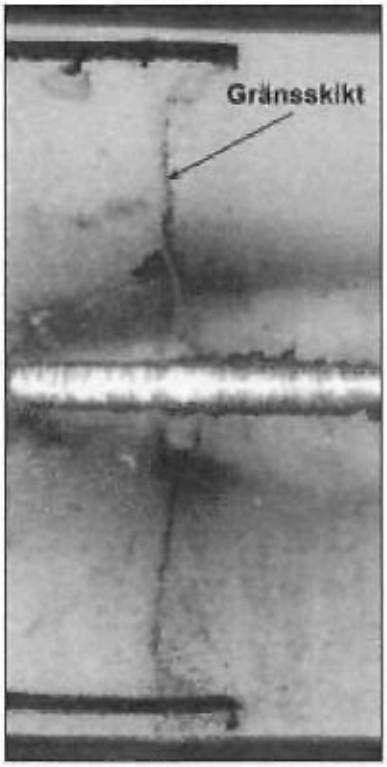
De olika skarvtyperna återfinns på följande sidor:

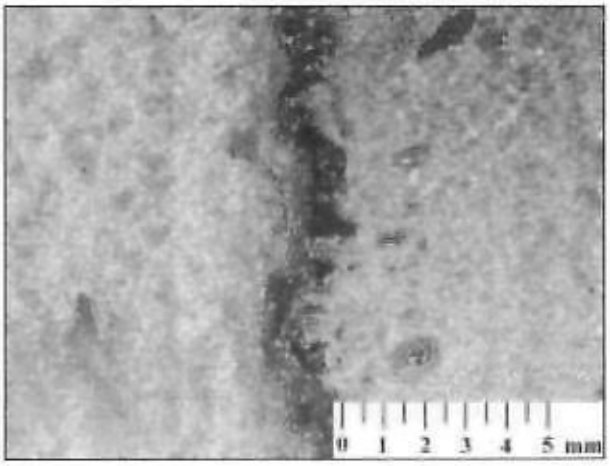
S. 32 skumning mot normallagrad ändyta
S. 33 skumning mot nyskalad ändyta
S. 34 skumning mot GAP-ändgavel
S. 35 skumning mot ändyta med släppmedel
S. 36 prefabricerade skumhalvor
S. 37 gamla skarvar uppgrävda i Hisings-Backa



SKUMNING MOT NORMALLAGRAD ÄNDYTA

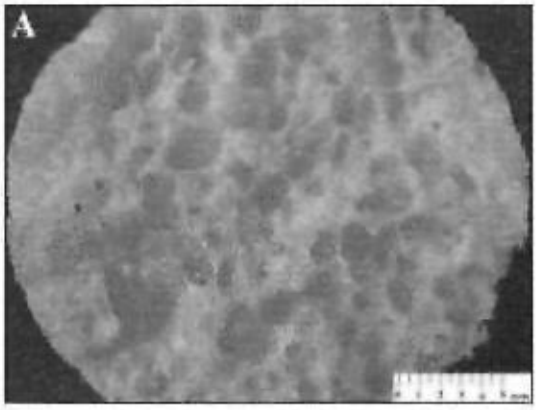
FOAMING AGAINST STORED PIPE END

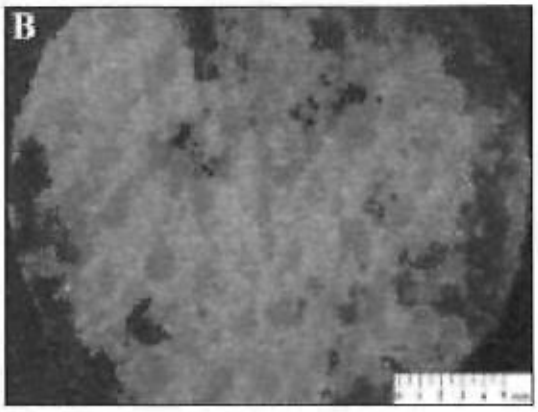




Snitt genom rör samt närbild över gränsskikt mellan rörskum (åt vänster) och skarvskum (åt höger) efter åldring med stålrörstemperatur +170 °C under 2000 timmar.

Section through pipe and close-up of interface between pipe foam (to the left) and joint foam (to the right) after ageing with steel pipe temperature +170 °C during 2000 hours.



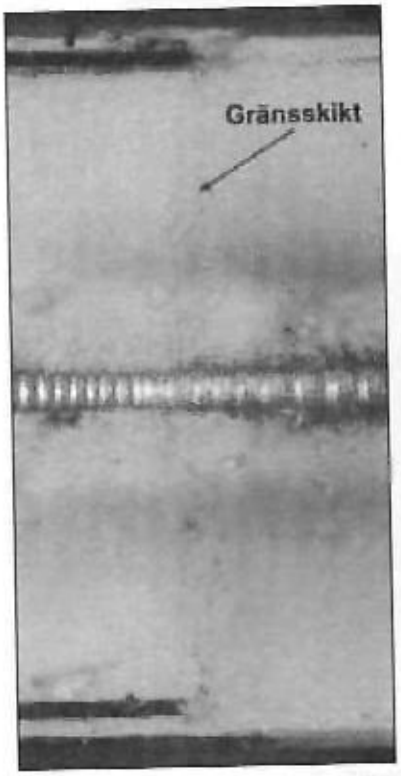


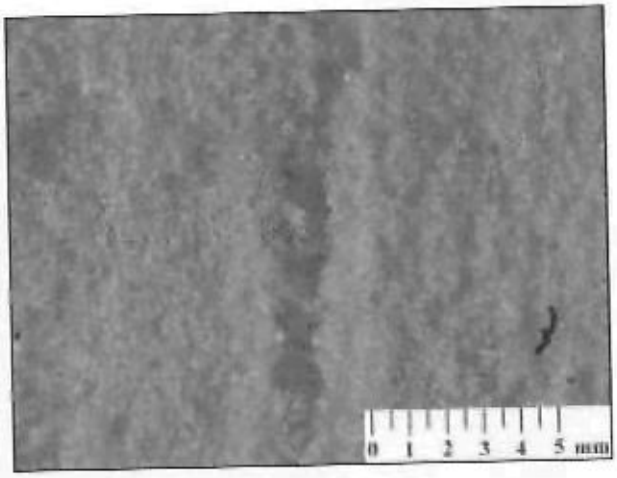
Skarvskum vid gränsskikt före (A) och efter (B) åldring.

Joint foam at interface before (A) and after (B) ageing.

SKUMNING MOT NYSKALAD ÄNDYTA

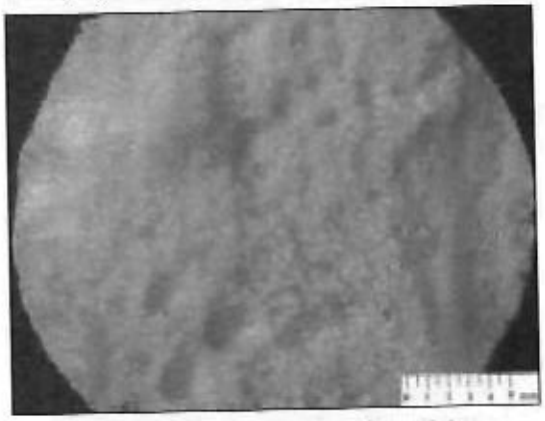
FOAMING AGAINST FRESH PIPE END





Snitt genom rör samt närbild över gränsskikt mellan rörskum (åt vänster) och skarvskum (åt höger) efter åldring med stålrörstemperatur +170 °C under 2000 timmar.

Section through pipe and close-up of interface between pipe foam (to the left) and joint foam (to the right) after ageing with steel pipe temperature +170 °C during 2000 hours.

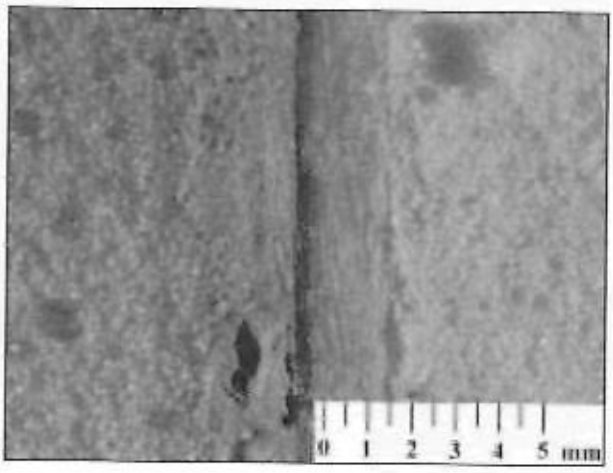


Skarvskum vid gränsskikt efter åldring.

Joint foam at interface after ageing.

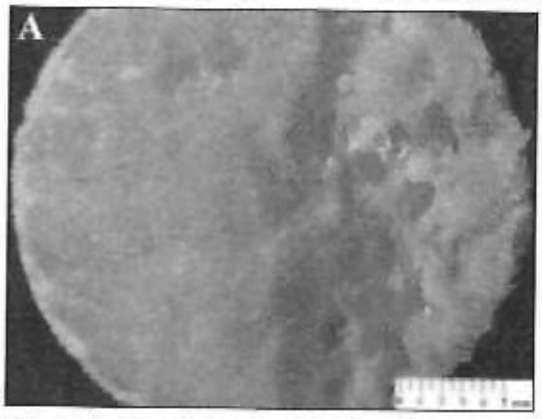
SKUMNING MOT ÄNDGAVEL AV GLASFIBERARMERAD POLYESTER

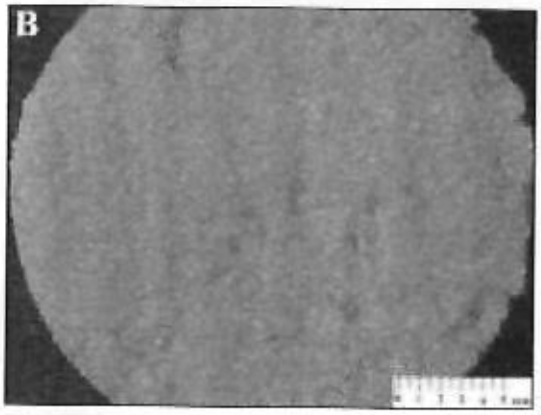
FOAMING AGAINST END SEAL OF GLASS-FIBRE REINFORCED POLYESTER



Snitt genom rör samt närbild över gränsskikt mellan rörskum (åt vänster) och skarvskum (åt höger) efter åldring med stålrörstemperatur +170 °C under 2000 timmar.

Section through pipe and close-up of interface between pipe foam (to the left) and joint foam (to the right) after ageing with steel pipe temperature +170 °C during 2000 hours.



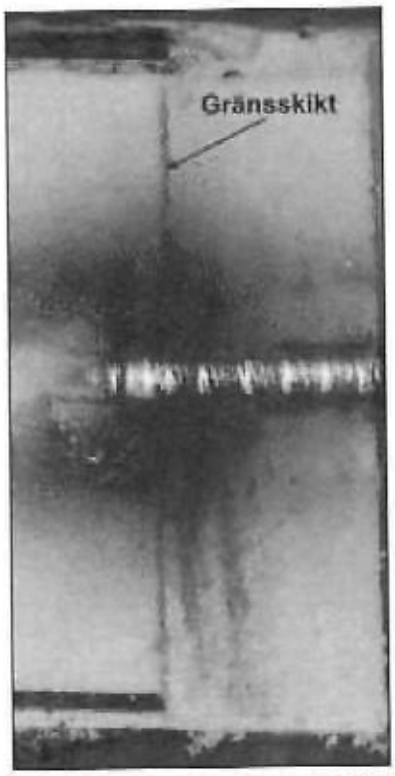


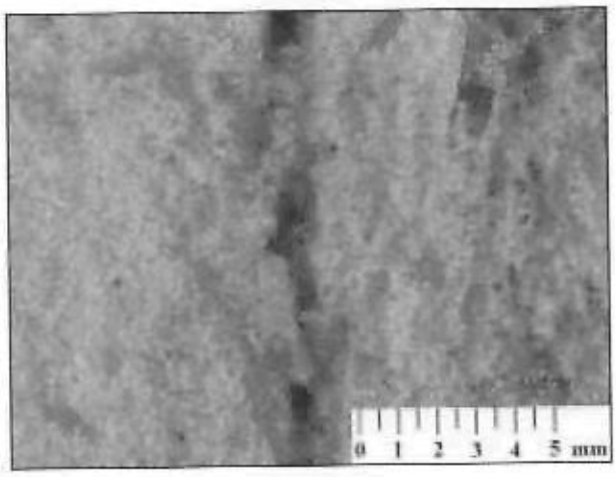
Skarvskum vid gränsskikt före (A) och efter (B) åldring.

Joint foam at interface before (A) and after (B) ageing.

SKUMNING MOT ÄNDYTA MED SLÄPPMEDEL

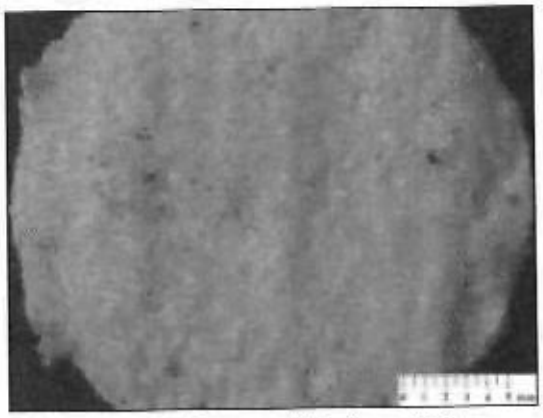
FOAMING AGAINST PIPE END WITH MOULD RELEASE AGENT





Snitt genom rör samt närbild över gränsskikt mellan rörskum (åt vänster) och skarvskum (åt höger) efter åldring med stålrörstemperatur +170 °C under 2000 timmar.

Section through pipe and close-up of interface between pipe foam (to the left) and joint foam (to the right) after ageing with steel pipe temperature +170 °C during 2000 hours.

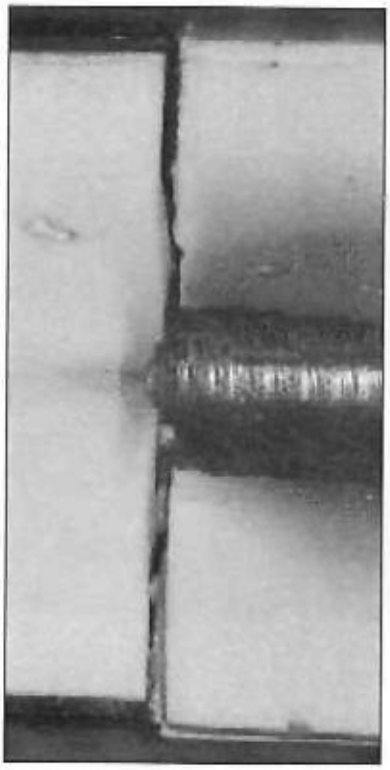


Skarvskum vid gränsskikt före åldring.

Joint foam at interface before ageing.

PREFABRICERADE SKUMHALVOR

PREFABRICATED FOAM SHELLS

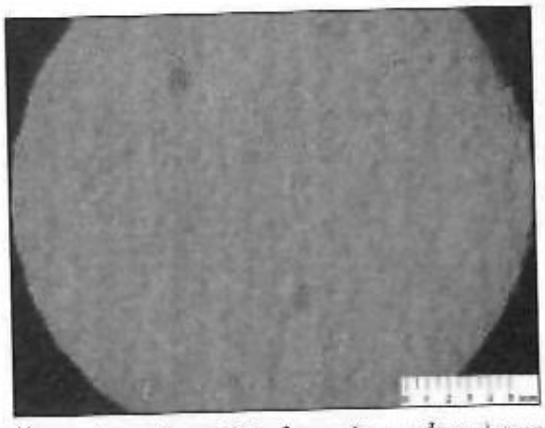


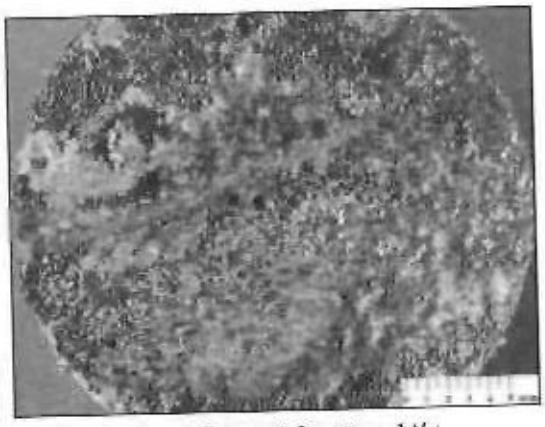
Snitt genom rör över gränsskikt mellan rörskum (åt vänster) och skarvskum (åt höger) efter åldring med stålrörstemperatur +170 °C under 2000 timmar.

Section through pipe of interface between pipe foam (to the left) and joint foam (to the right) after ageing with steel pipe temperature +170 °C during 2000 hours.

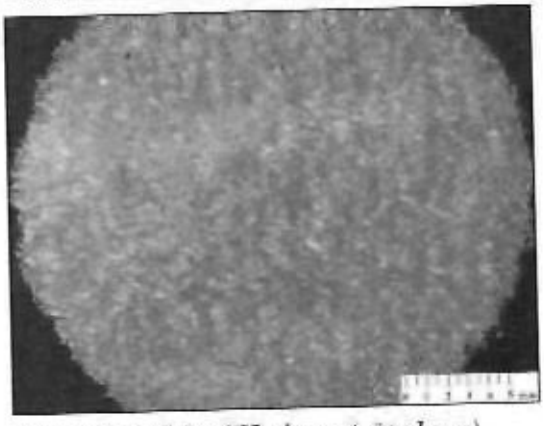
SKUM FRÅN SKARVAR UPPGRÄVDA I HISINGS-BACKA

FOAMS FROM JOINTS EXCAVATED IN HISINGS-BACKA





Skarvskum från PP-skarv (torr skarv) samt vy över skarvskum vid gränsskikt.
Joint foam from PP joint (dry joint) and view over joint foam at interface.



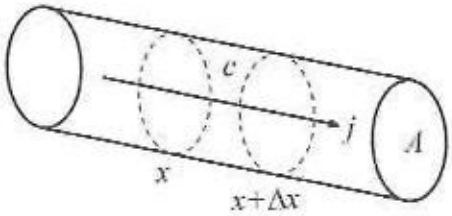
Skarvskum från SH-skarv (våt skarv).
Joint foam from SH joint (wet joint).

Bilaga B – Allmänt om diffusion

Diffusion är en transportprocess som har sin orsak i molekylrörelser och som resulterar i att koncentrationsskillnader utjämnas. En enskild molekyl i en gas eller vätska rör sig hela tiden oregelbundet och slumpmässigt åt olika riktningar*. För två områden med hög respektive låg koncentration är sannolikheten större att en molekyl rör sig från den höga koncentrationen till den låga än tvärtom. Detta på grund av att det finns fler molekyler att tillgå i den höga koncentrationen. För ett stort antal molekyler resulterar detta i ett nettoflöde från områden med hög koncentration till områden med låg. Storleken hos molekylflödet har på empirisk väg funnits vara proportionell mot koncentrationsgradienten, vilket kan formuleras med *Ficks lag*:

$$j = -D\frac{dc}{dx} \tag{B.1}$$

där j är flödestätheten (mol/m^{2}s), c är koncentrationen (mol/m^3) och D är diffusionskoefficienten (m^2/s).



Figur B.1 Endimensionell diffusion genom tunt rör.
One dimensional diffusion through narrow tube.

Vid diffusion under icke-stationära förhållanden, dvs. då molekylflödet gör att koncentrationsnivåerna förändras över tiden, krävs att nettoflödet in i en liten volym är lika med den mängd gas som lagras upp i samma volym. Detta brukar kallas för *lagen om massans bevarande* och är en grundläggande konserveringsprincip som innebär att inga molekyler "lämnar systemet". Betrakta diffusion av en gas genom ett tunt rör med tvärsnittsarean A, se Figur B.1. Den mängd gas, M_L, som lagras upp i volymen mellan x och Δx under tiden Δt kan tecknas

$$M_L = [c(t+\Delta t) - c(t)]A\Delta x$$

Flödet in till respektive ut ur samma volym under samma tid är

$$M_{in} = j(x)A\Delta t$$

$$M_{ut} = j(x+\Delta x)A\Delta t$$

Villkoret om massans bevarande kräver nu att

$$M_L = M_{in} - M_{ut} \Leftrightarrow$$

$$[c(t+\Delta t) - c(t)]A\Delta x = [j(x) - j(x+\Delta x)]A\Delta t \Leftrightarrow$$

* Den sk. *Brownska rörelsen*, efter Robert Brown 1827.

$$\frac{c(t+\Delta t)-c(t)}{\Delta t}=-\frac{j(x+\Delta x)-j(x)}{\Delta x}$$

Konserveringsprincipen är giltig endast för mycket korta tider och mycket små volymer. Om man låter Δt och Δx gå mot noll ger detta kontinuitetsekvationen

$$\frac{dc}{dt}=-\frac{dj}{dx} \tag{B.2}$$

Om man nu kombinerar (B.2) med Ficks lag (B.1), erhålls diffusionsekvationen

$$\frac{dc}{dt}=D\frac{d^2c}{dx^2} \tag{B.3}$$

Vid diffusion i flera dimensioner kan (B.3) mer allmänt skrivas

$$\frac{d}{dt}c(x,y,z)=D\,\mathrm{div}(\mathrm{grad}\,c(x,y,z))=D\nabla^2c(x,y,z) \tag{B.4}$$

Vid högre temperaturer är molekylrörligheten större och diffusionsprocessen går snabbare. Detta brukar karakteriseras med en diffusionskoefficient som är temperaturberoende enligt ett så kallat Arrheniussamband:

$$D(T)=D_0e^{-\frac{Q}{RT}} \tag{B.5}$$

där Q är aktiveringsenergin (J/mol), R är gaskonstanten (8,314 J/mol K) och T är absoluta temperaturen (K).

Under icke-isoterma förhållanden, det vill säga då temperaturen varierar, kan diffusionsflödet påverkas även av en temperaturpotential. Små och lätta molekyler, såsom vatten, tenderar att knuffas mot varmare områden, medan tyngre luftmolekyler dras mot kallare områden. Detta kallas för termodiffusion. Vid diffusion i material med mycket små porer kommer molekylernas kollisioner med porväggarna att resultera i ett flöde mot varmare områden. Detta kallas för effusion. Termodiffusionen och effusionen är emellertid normalt mycket mindre än den vanliga koncentrationsdrivna diffusionen.

Diffusionsekvationen är en så kallad partiell differentialekvation (PDE) som normalt inte kan lösas analytiskt. För enkla geometrier och randvillkor kan lösningar tas fram med hjälp av Fourierserier eller någon annan typ av egenfunktionsutveckling. I allmänhet är man dock hänvisad till någon numerisk lösningsmetod, som tex. finita differensmetoden (FDM).

I praktiska tillämpningar vill man ofta använda andra mått på koncentrationen än molkoncentrationen c. När man talar om vattenånga brukar man använda sig av ånghalten v (kg/m^3) eller ångtrycket p_v (Pa). Dessa storheter är sammankopplade med molkoncentrationen via allmänna gaslagen:

$$\begin{cases} p_v = cRT \\ v = cM \end{cases} \tag{B.6}$$

där R är gaskonstanten (8,314 J/mol K), T är absoluta temperaturen (K) och M är molekylvikten för vatten (0,018 kg/mol).

Då man talar om fuktdiffusion i byggnadsmaterialsammanhang brukar man kalla diffusionskoefficienten för ånggenomsläpplighetskoefficienten och beteckna den δ_v. Istället för molekylflödestätheten j (mol/m^{2}s) brukar man tala om massflödestätheten g (kg/m^{2}s). Vid diffusion genom ett plant materialskikt under konstanta förhållanden, dvs. med en given fuktighet på ena sidan materialet och en annan fuktighet på andra sidan, fås

$$g = \delta_v \frac{\Delta v}{d} \tag{B.7}$$

där Δc och Δv är skillnaden i molkoncentration respektive ånghalt över materialskiktet och d är dess tjocklek. Ekvation (B.7) utnyttjas vid bestämning av ånggenomsläpplighetskoefficienten med så kallade koppförsök, se avsnitt 4.1.1, sidan 17.

Bilaga C – Beräkning av cellgasdiffusion vid åldring i värmeskåp

Diffusionskoefficienter

För cellgasernas diffusionskoefficienter samt parametrar för Arrheniusanpassningar till deras temperaturberoende används värden publicerade av Olsson (2001).

$$D(T) = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}} \tag{C.1}$$

där D är diffusionskoefficienten (m^2/s), R är gaskonstanten (8,314 J/mol K), T är absoluta temperaturen (K) och D_0 och Q är Arrheniusanpassningens parametrar enligt tabell nedan.

Tabell C.1 Arrheniusparametrar för cellgasernas diffusionskoefficienter (Olsson 2001).
Arrhenius parameters for the diffusion coefficients of the cell gases (Olsson 2001).

Cellgas	D_0 (m^2/s)	Q (kJ/mol)
Kvävgas	$2{,}52 \times 10^{-4}$	45
Syrgas	$3{,}3 \times 10^{-6}$	30
Koldioxid	$1{,}78 \times 10^{-7}$	20
Cyklopentan	$1{,}81 \times 10^{-3}$	60

Begynnelse- och randvillkor

Som begynnelsevillkor ansätts gaskoncentrationerna i skummet motsvarande de uppmätta partialtrycken i avsnitt 3.1.1.1.

$$c_0 = \frac{p}{RT_{analys}} \tag{C.2}$$

där c_0 är begynnelsekoncentrationen av gasen i skummet (mol/m^3), p är uppmätt partialtryck av gasen i skummet och T_{analys} är temperaturen vid vilken gashaltsanalysen genomfördes (~ 293 K).

Randvillkoret vid skummets ytteryta är gaskoncentrationen i atmosfären motsvarande åldringstemperaturen.

$$c_b = \frac{p}{RT_a} \tag{C.3}$$

där c_b är randkoncentrationen vid skummets ytteryta (mol/m^3), p är gasens partialtryck i atmosfären (78 kPa för kvävgas, 21 kPa för syrgas och 0 kPa för övriga gaser) och T_a är åldringstemperaturen.

Partialtryck vid rumstemperatur

För att de beräknade gaskoncentrationerna skall kunna jämföras med gjorda gasanalyser redovisas de som partialtryck vid rumstemperatur:

$$p = cR \times 293\,\mathrm{K} \tag{C.4}$$

där p är partialtrycket vid rumstemperatur (Pa).

Finit differensformulering

För ett rotationssymmetriskt cylindriskt fall kan diffusionsekvationen (B.4) formuleras

$$\frac{dc}{dt} = D\frac{1}{r}\left[\frac{d}{dr}\left(r\frac{dc}{dr}\right)\right] = D\left(\frac{1}{r}\frac{dc}{dr} + \frac{d^2c}{dr^2}\right) \tag{C.5}$$

där r är den radiella koordinaten, dvs. avståndet från rörcentrum.

Differentialekvationen (C.5) diskretiseras till en differensekvation enligt Crank-Nicholsons metod:

$$\begin{aligned}\frac{c_i^{j+1} - c_i^j}{\Delta t} &= \frac{D}{2}\left(\frac{1}{r_i}\frac{c_{i+1}^j - c_{i-1}^j}{2\Delta r} + \frac{c_{i+1}^j - 2c_i^j + c_{i-1}^j}{\Delta r^2}\right) + \\ &+ \frac{D}{2}\left(\frac{1}{r_i}\frac{c_{i+1}^{j+1} - c_{i-1}^{j+1}}{2\Delta r} + \frac{c_{i+1}^{j+1} - 2c_i^{j+1} + c_{i-1}^{j+1}}{\Delta r^2}\right);\ c_i^j = c(r_i, t_j)\end{aligned} \tag{C.6}$$

Vilket ger det linjära ekvationssystemet $Ac^{(j+1)} = Bc^{(j)}$:

$$\begin{aligned}&(\rho_i - \lambda)c_{i-1}^{j+1} + (1 + 2\lambda)c_i^{j+1} + (-\rho_i - \lambda)c_{i+1}^{j+1} = \\ &= (-\rho_i + \lambda)c_{i-1}^j + (1 - 2\lambda)c_i^j + (\rho_i + \lambda)c_{i+1}^j\end{aligned} \tag{C.7}$$

där $\rho_i = D\Delta t / 4\Delta r r_i$ och $\lambda = D\Delta t / 2\Delta r^2$.

Bilaga D – Bestämning av andel slutna celler

Vid bestämning av andel slutna celler i PUR-skummet enligt SS-EN 253 (1995) hänvisas till metodik beskriven i SS-EN ISO 4590 (1995), men med en förenkling som innebär att endast en provkropp i form av en kub med kantlängden 25 mm används. Kravet i standarden är att den med pyknometer uppmätta andelen slutna celler vid ett sådant prov skall överstiga 88 %.

Den fullständiga metodiken i SS-EN ISO 4590 går ut på att bestämningen alltid ger ett falskt värde, beroende på att provkroppens omslutningsarea skär igenom celler som egentligen skulle vara slutna och andelen öppna celler överskattas således. Felbestämningen är proportionell mot kvoten mellan provkroppens omslutningsarea, A, och volym, V. Det sanna värdet på volymandelen *öppna* celler, ω_0, fås genom bestämningar av den skenbara andelen öppna celler ω_r vid olika kvoter A/V och bakåtextrapolering med linjär regression till punkten där $A/V = 0$. Den skenbara andelen öppna celler kan alltså uttryckas

$$\omega_r = \omega_0 + k\frac{A}{V} \tag{D.1}$$

Med kännedom om proportionalitetskonstanten k kan de sanna andelarna öppna och slutna celler bestämmas med en enda mätning. k kommer emellertid att variera beroende på skummets egenskaper. En större andel slutna celler gör att fler celler störs av snittytorna, och k blir större. Dessutom gör en större celldiameter att tillskottsvolymen som öppnas upp av snittytorna blir större, och k växer även av denna anledning.

Provkroppens totala omslutningsarea, A, skär igenom n st. celler. n beror på cellstorleken enligt

$$n = \frac{A}{A_{cell}} \tag{D.2}$$

där A_{cell} är cellernas genomsnittliga genomskurna area.

Den extra tillgängliga gasvolym som öppnas upp när cellerna skärs sönder blir

$$\Delta V = \psi n V_{cell} \tag{D.3}$$

där ψ är den faktiska andelen slutna celler och V_{cell} är den i provkroppen genomsnittliga återstående volymen hos en sönderskuren cell.

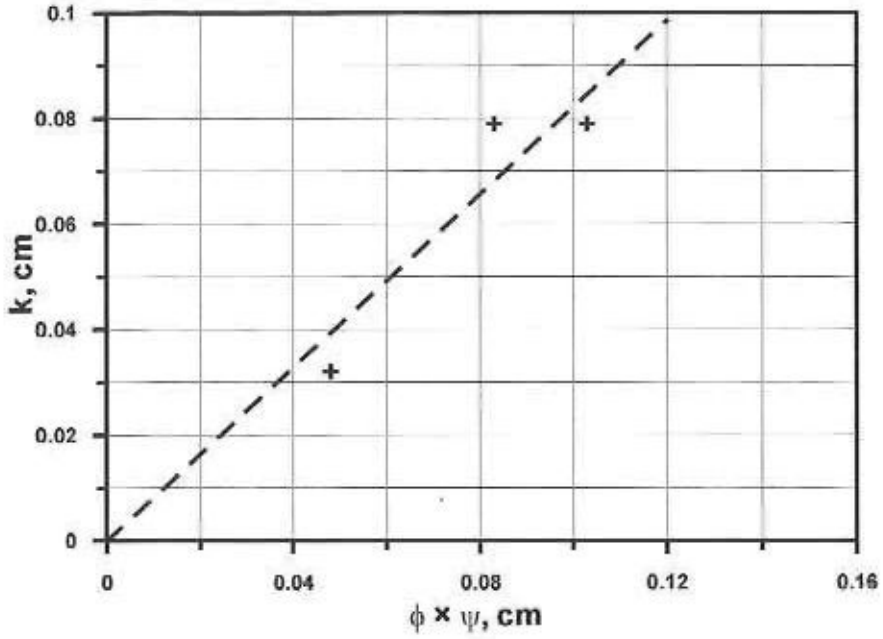
Den skenbara andel öppna celler, ω_r, som mäts upp med pyknometern består av den faktiska andelen öppna celler och volymtillskottet från de sönderskurna cellerna:

$$\omega_r = \omega_0 + \frac{\Delta V}{V} = \omega_0 + \psi\frac{V_{cell}}{A_{cell}}\frac{A}{V} \tag{D.4}$$

där V är provkroppens geometriska volym.

Om A_{cell} och V_{cell} antas vara proportionella mot kvadraten respektive kuben på cellstorleken ϕ fås:

$$\omega_r = \omega_0 + F\psi\phi\frac{A}{V} \tag{D.5}$$



Figur D.1 Samband mellan proportionalitetskonstanten k och produkten mellan celldiameter ϕ och verklig andel slutna celler ψ.
Relationship between the proportionality constant k and product of cell diameter ϕ and true closed cell content ψ.

Proportionalitetskonstanten k i (A.1) kan således i sig förväntas vara proportionell mot såväl den sanna andelen slutna celler som celldiametern. Genom noggranna trepunktsmätningar på tre olika skum, Figur A.1, bestämdes faktorn F till 0,821. Den sanna andelen slutna celler kan nu lösas ur (D.5) och sambandet $\omega_0 = 1 - \psi$:

$$\psi = \frac{\omega_r - 1}{0{,}821\phi\frac{A}{V} - 1} \tag{D.6}$$

Med kännedom om cellstorleken kan således den sanna andelen slutna celler ψ bestämmas med en enda mätning av den skenbara andelen öppna celler ω_r.

Rapportförteckning

Samtliga rapporter kan beställas hos Fjärrvärmeföreningens Förlagsservice.
Telefon: 026 – 24 90 24, Telefax: 026 - 24 90 10

Nr	*Titel*	*Författare*	*Publicerad*
	FORSKNING OCH UTVECKLING - RAPPORTER		
1	Inventering av skador på befintliga skarvar med CFC-blåsta respektive CFC-fria fogskum	Hans Torstensson	maj-96
2	Tryckväxlare - Status hösten 1995	Bror-Arne Gustafson Lena Olsson	maj-96
3	Bevakning av internationell fjärrvärmeforskning	Sture Andersson Gunnar Nilsson	maj-96
4	Epoxirelining av fjärrvärmerör	Jarl Nilsson	sep-96
5	Effektivisering av konventionella fjärrvärmecentraler (abonnentcentraler)	Lena Råberger Håkan Walletun	okt-96
6	Auktorisation av montörer för montage av skarvhylsor och isolering Former och utvärdering	Lars-Åke Cronholm	okt-96
7	Direkt markförlagda böjar i fjärrvärmeledningar	Jan Molin Gunnar Bergström	dec-96
8	Medierör av plast i fjärrvärmesystem	Håkan Walletun Heimo Zinko	dec-96
9	Metodutveckling för mätning av värmekonduktiviteten i kulvertisolering av polyuretanskum	Lars-Åke Cronholm Hans Torstensson	dec-96
10	Dynamiska värmelaster från fiktiva värmebehov	Sven Werner	mars-97
11	Torkning av tvätt i fastighetstvättstugor med fjärrvärme	H. Andersson J. Ahlgren	maj-99
12	Omgivningsförhållandenas betydelse vid val av strategi för ombyggnad och underhåll av fjärrvärmenät. Insamlingsfasen	Sture Andersson Jan Molin Carmen Pletikos	dec-97
13	Svensk statlig fjärrvärmeforskning 1981-1996	Mikael Henriksson Sven Werner	dec-97
14	Korrosionsrisker vid användning av stål- och plaströr i fjärrvärmesystem - en litteraturstudie	Peeter Tarkpea	dec-97
15	Värme- och masstransport i mantelrör till ledningar för fjärrkyla och fjärrvärme	Daniel Eriksson Bengt Sundén	dec-97
16	Utvärdering av fuktinträngning och gasdiffusion hos gamla kulvertrör "Hisings-Backa"	Ulf Jarfelt	dec-97
17	Kulvertförläggning med befintliga massor	Jan Molin Gunnar Bergström Stefan Nilsson	dec-97
18	Värmeåtervinning och produktion av frikyla - två sätt att öka marknaden för fjärrvärmedrivna absorptionskylmaskiner	Peter Margen	dec-97
19	Projekt och Resultat 1994-1997	Anders Tvärne	mars-98

Nr	*Titel*	*Författare*	*Publicerad*
20	Analys av befintliga fjärrkylakunders kylbehov	Stefan Aronsson Per-Erik Nilsson	mars-98
21	Statusrapport Trycklösa Hetvattenackumulatorer	Mats Lindberg Leif Breitholtz	maj-98
22	Round Robin test av isolerförmågan hos fjärrvärmerör	Ulf Jarfelt	maj-98
23	Mätvärdesinsamling från inspektionsbrunnar i fjärrvärmesystem	Håkan Walletun	juni-98
24	Fjärrvärmerörens isoleretekniska långtidsegenskaper	Ulf Jarfelt Olle Ramnäs	juni-98
25	Termisk undersökning av koppling av köldbärarkretsar till fjärrkylanät	Erik Jonson	juni-98
26	Reparation utan uppgrävning av skarvar på fjärrvärmerör	Jarl Nilsson Tommy Gudmundson	juni-98
27	Effektivisering av fjärrvärmecentraler – metodik, nyckeltal och användning av driftövervakningssystem	Håkan Walletun	apr-99
28	Fjärrkyla. Teknik och kunskapsläge 1998	Paul Westin	juli-98
29	Fjärrkyla – systemstudie	Martin Forsén Per-Åke Franck Mari Gustafsson Per-Erik Nilsson	juli-98
30	Nya material för fjärrvärmerör. Förstudie/litteraturstudie	Jan Ahlgren Linda Berlin Morgan Fröling Magdalena Svanström	dec-98
31	Optimalt val av värmemätarens flödesgivare	Janusz Wollerstrand	maj-99
32	Miljöanpassning/återanvändning av polyuretanisolerade fjärrvärmerör	Morgan Fröling	dec-98
33	Övervakning av fjärrvärmenät med fiberoptik	Marja Englund	maj-99
34	Undersökning av golvvärmesystem med PEX-rör	Lars Ehrlén	apr-99
35	Undersökning av funktionen hos tillsatser för fjärrvärmevatten	Tuija Kaunisto Leena Carpén	maj-99
36	Kartläggning av utvecklingsläget för ultraljudsflödesmätare	Jerker Delsing	nov-99
37	Förbättring av fjärrvärmecentraler med sekundärnät	Lennart Eriksson Håkan Walletun	maj-99
38	Ändgavlar på fjärrvärmerör	Gunnar Bergström Stefan Nilsson	sept-99
39	Användning av lågtemperaturfjärrvärme	Lennart Eriksson Jochen Dahm Heimo Zinko	sept-99
40	Tätning av skarvar i fjärrvärmerör med hjälp av material som sväller i kontakt med vatten	Rolf Sjöblom Henrik Bjurström Lars-Åke Cronholm	nov-99

Nr	*Titel*	*Författare*	*Publicerad*
41	Underlag för riskbedömning och val av strategi för underhåll och förnyelse av fjärrvärmeledningar	Sture Andersson Jan Molin Carmen Pletikos	dec-99
42	Metoder att nå lägre returtemperatur med värmeväxlardimensionering och injusteringsmetoder. Tillämpning på två fastigheter i Borås.	Stefan Petersson	mars-00
43	Vidhäftning mellan PUR-isolering och medierör. Har blästring av medieröret någon effekt?	Ulf Jarfelt	juni-00
44	Mindre lokala produktionscentraler för kyla med optimal värmeåtervinningsgrad i fjärrvärmesystemen	Peter Margen	juni-00
45	Fullskaleförsök med friktionsminskande additiv i Herning, Danmark	Flemming Hammer Martin Hellsten	feb-01
46	Nedbrytningen av syrereducerande medel i fjärrvärmenät	Henrik Bjurström	okt-00
47	Energimarknad i förändring Utveckling, aktörer och strategier	Fredrik Lagergren	nov-00
48	Strömförsörjning till värmemätare	Henrik Bjurström	nov-00
49	Tensider i fjärrkylenät - Förstudie	Marcus Lager	nov-00
50	Svensk sammanfattning av AGFWs slutrapport "Neuartige Wärmeverteilung"	Heimo Zinko	jan-01
51	Vattenläckage genom otät mantelrörsskarv	Gunnar Bergström Stefan Nilsson Sven-Erik Sällberg	jan-01
52	Direktförlagda böjar i fjärrvärmeledningar Påkänningar och skadegränser	Gunnar Bergström Stefan Nilsson	jan-01
53	Korrosionsmätningar i PEX-system i Landskrona och Enköping	Anders Thorén	feb-01
54	Sammanlagring och värmeförluster i närvärmenät	Jochen Dahm Jan-Olof Dalenbäck	feb-01
55	Tryckväxlare för fjärrkyla	Lars Eliasson	mars-01
56	Beslutsunderlag i svenska energiföretag	Peter Svahn	sept-01
57	Skarvtätning baserad på svällande material	Henrik Bjurström Pal Kalbantner Lars-Åke Cronholm	okt-01
58	Täthet hos skarvar vid återfyllning med befintliga massor	Gunnar Bergström Stefan Nilsson Sven-Erik Sällberg	okt-01
59	Analys av trerörssystem för kombinerad distribution av fjärrvärme och fjärrkyla	Guaxiao Yao	dec-01
60	Miljöbelastning från läggning av fjärrvärmerör	Morgan Fröling Magdalena Svanström	jan-02
61	Korrosionsskydd av en trycklös varmvattenackumulator med kvävgasteknik – fjärrvärmeverket i Falkenberg	Leif Nilsson	jan-02
62	Tappvarmvattenreglering i P-märkta fjärrvärmecentraler för villor – Utvärdering och förslag till förbättring	Tommy Persson	jan-02

Nr	*Titel*	*Författare*	*Publicerad*
63	Experimentell undersökning av böjar vid kallförläggning av fjärrvärme-rör	Sture Andersson Nils Olsson	jan-02
64	Förändring av fjärrvärmenäts flödesbehov	Håkan Walletun Daniel Lundh	jan-02
65	Framtemperatur vid värmegles fjärrvärme	Tord Sivertsson Sven Werner	mars-02
66	Fjärravläsning med signaler genom rörnät – förstudie	Lars Ljung Rolf Sjöblom	mars-02
67	Fukttransport i skarvskum	Gunnar Bergström Stefan Nilsson Sven-Erik Sällberg	april-02

FORSKNING OCH UTVECKLING – ORIENTERING

1	Fjärrkyla: Behov av forskning och utveckling	Sven Werner	jan-98
2	Utvärdering av fjärrkyla i Västerås. Uppföljning av Värmeforsk rapport nr 534. Mätvärdesinsamling för perioden 23/5 – 30/9 1996.	Lars Lindgren Conny Nikolaisen	jan-98
3	Symposium om Fjärrvärmeforskning på Ullinge Wärdshus i Eksjö kommun, 10-11 december 1996	Lennart Thörnqvist	jan-98
4	Utvärdering av fjärrkyla i Västerås. Uppföljning av Värmeforsk rapport nr 534. Mätvärdesinsamling för period 2. 1/1 – 31/12 1997.	Conny Nikolaisen	juli-98
5	Metodutveckling för mätning av värmekonduktiviteten i kulvertisole-ring av polyuretanskum	Lars-Åke Cronholm Hans Torstensson	sept-99

Svenska Fjärrvärmeföreningens Service AB och Statens Energimyndighet bedriver forskningsprogram inom området fjärrvärme hetvattenteknik och fjärrkyla.

SVENSKA FJÄRRVÄRMEFÖRENINGENS SERVICE AB
101 53 STOCKHOLM
Besöksadress: Olof Palmes gata 31, 6 tr
Telefon 08 - 677 25 50, Telefax 08 - 677 25 55

Förlagsservice, beställning av trycksaker:
Telefon 026 - 24 90 24, Telefax 026 - 24 90 10