



Forskning och
Utveckling

FOU 1998:24

FJÄRRVÄRMERÖRENS ISOLERTEKNISKA LÅNGTIDSEGENSKAPER

Studium av gasdiffusion genom mantelröret hos koldioxid-
och cyklopentanblåsta polyuretanisolerade fjärrvärmerör

Ulf Jarfelt, Chalmers Tekniska Högskola
Olle Ramnäs, Chalmers Tekniska Högskola

FJÄRRVÄRMERÖRENS ISOLERTEKNISKA LÅNGTIDSEGENSKAPER

Studium av gasdiffusion genom mantelröret hos koldioxid-
och cyklopentanblåsta polyuretanisolerade fjärrvärmerör

Ulf Jarfelt, Chalmers Tekniska Högskola
Olle Ramnäs, Chalmers Tekniska Högskola

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

Innehållsförteckning

Sida

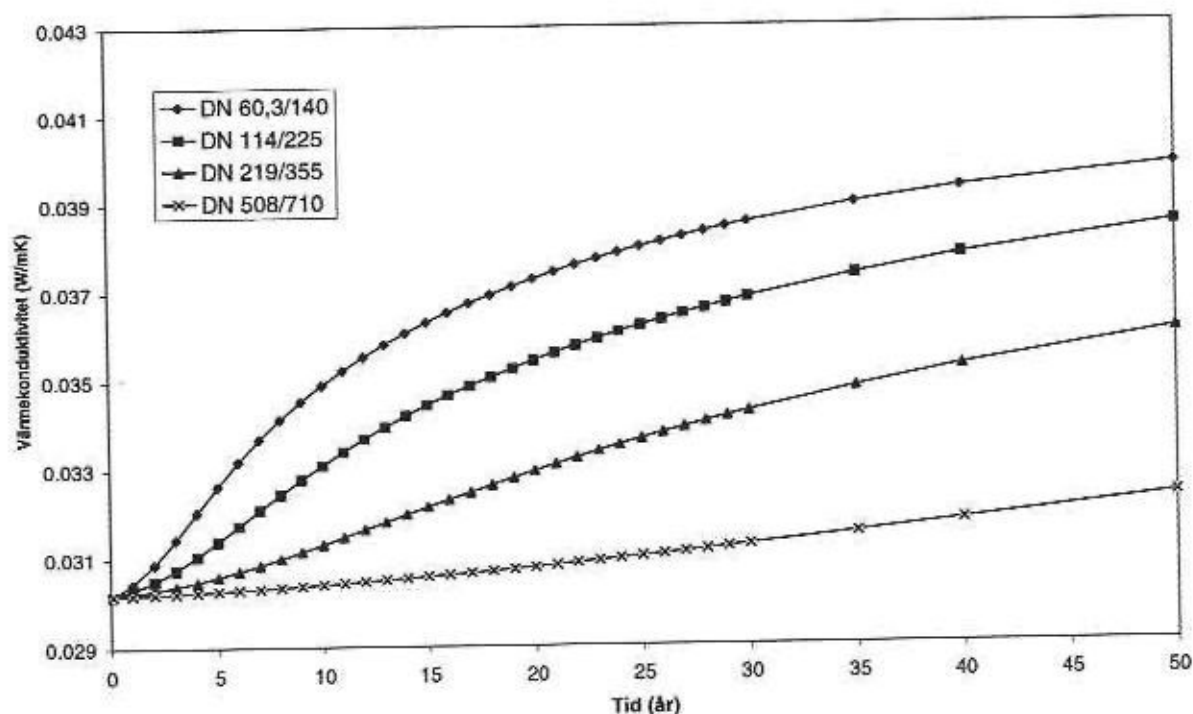
Sammanfattning	ii
Summary	v
1. Inledning	1
2. Bestämning av diffusion i polyuretanisolering och polyetenrör	2
3. Bestämning av utdiffusion genom polyetenröret	9
4. Fältförsök – Bestämning av diffusionen i fjärrvärmerör i drift	11
5. Accelererad diffusionsåldring genom förhöjd temperatur	17
6. Referenser	23
APPENDIX	
I Allmänt om gaser	A-1
II Gasanalys	A-4
III Diffusion	A-8

Sammanfattning

Projektet har syftat till att bestämma gasdiffusionen i fjärrvärmerör med polyuretanisolering. Projektet har fokuserats på de idag aktuella isolergaserna koldioxid och cyklopentan. Värmekonduktivitets förändring med tiden har beräknats med hjälp av de inom projektet uppmätta materialparametrarna, som beskriver isolergasernas diffusion i polyuretan och polyeten.

Utgående från resultaten i detta projekt har fjärrvärmerör med koldioxidblåst och cyklopentanblåst polyuretanisolering jämförts. Beräkningar har gjorts för fjärrvärmerör med olika dimensioner: DN 60,3 mm/140 mm, DN 114 mm/225 mm, DN 219 mm/355 mm och DN 508 mm/710 mm. Tjocklekarna på mantelröret är 3,0 mm, 3,5 mm, 5,6 mm och 11,1 mm (enligt EN 253).

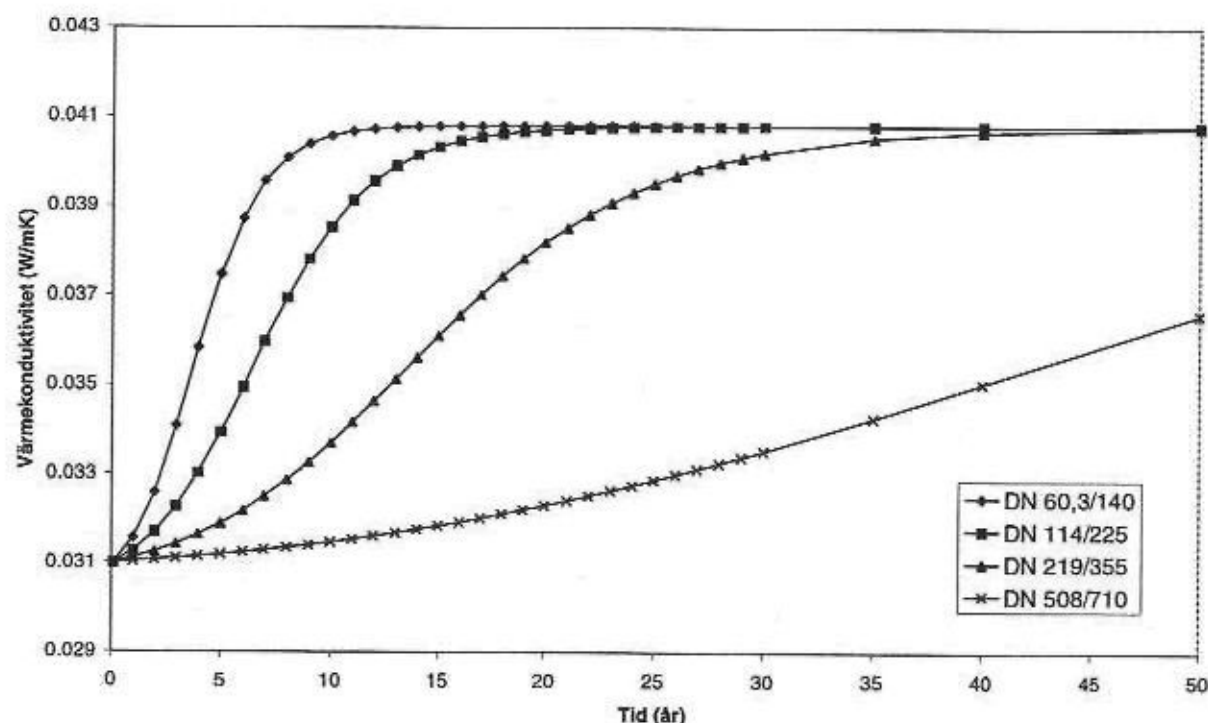
Vid beräkning av värmekonduktiviteten har hänsyn tagits till **ledning i den gasblandning** som finns i polyuretanisoleringens celler och som successivt förändras med tiden, samt till **strålning** mellan cellerna och till **ledning** i det fasta polymera materialet. I fig. (I) och (II) redovisas förändringen av värmekonduktiviteten med tiden för två polyuretanskum med olika isolergaser.



Figur I.

Värmekonduktivitets förändring med tiden för ett fjärrvärmerör med cyklopentanblåst polyuretanisolering. Ursprunglig cellgassammansättning: 40 volyms-% cyklopentan och 60 volyms-% koldioxid.

The change in thermal conductivity over time for a district heating pipe with cyclopentane-blown polyurethane insulation. Original cell gas composition: 40 % (by volume) cyclopentane and 60 % (by volume) carbon dioxide.



Figur II. Värmeledningsförmågens förändring med tiden för ett fjärrvärmerör med koldioxidblåst polyuretanisolerings. Ursprunglig cellgassammansättning: 100 volym-% koldioxid.

The change in thermal conductivity over time for a district heating pipe with carbon dioxide-blown polyurethane insulation. Original cell gas composition: 100 % (by volume) carbon dioxide.

Av figurerna framgår att förändringen av värmeledningsförmågan är störst för små dimensioner, vilket beror på den ringa godstjockleken hos polyetenröret. På grund av koldioxidens höga diffusionsförmåga, cirka 50 gånger högre än för cyklopentan, kommer isolerförmågan att försämrast snabbare än för motsvarande dimension med cyklopentanblåst polyuretan. Värmeledningsförmågan kan variera mellan olika polyuretanskum även om gasblandningen är identisk, eftersom strålnings- och ledningsbidraget beror på cellstorleken, densiteten och fördelningen av polymeren inom cellstrukturen (fönster/skelett).

För fjärrvärmerör med mantelrör av polyeten kan man vid studium av koldioxidens utdiffusion som en första approximation anta att allt diffusionsmotstånd finns i mantelröret. För luft (syre och kväve) och för kolväteföreningar (t.ex. cyklopentan) måste även polyuretanisoleringsens diffusionsmotstånd beaktas. För vissa skum har syrekonsentrationen i cellgasen visat sig vara oväntat låg, vilket kan tyda på att syre förbrukas vid oxidation av polymeren. En betydande del av den totala cyklopentanamängden är löst i polymeren. Denna lösta cyklopentan kommer med tiden att övergå till gasfas, vilket medför att cyklopentankonsentrationen i cellgasen endast minskar långsamt.

Inom projektet har fyra metoder för studium av gasdiffusion i fjärrvärmerör använts och jämförts. Den metod, där man dels bestämmer cellgassammansättningen i polyuretanisoleringsen och dels diffusionen genom polyetenröret, har visat sig vara bäst och mest

allmängiltig (se avsnitt 2). Provkroppar från polyuretanisoleringen användes för bestämning av den effektiva diffusionskoefficienten. Permeabiliteten hos polyetenröret bestämdes med en för ändamålet utvecklad utrustning. Med hjälp av de nämnda materialparametrarna kan gassammansättningen bestämmas som funktion av tiden. Denna metod rekommenderas för användning vid framtida studier av värmekonduktivitetens förändring i fjärrvärmerör.

En metod för att direkt mäta utdiffusionen genom fjärrvärmerörets mantelyta har även utvecklats (se avsnitt 3). Resultat från mätningar på olika fjärrvärmerör har visat att utdiffusionen av koldioxid var cirka 50 gånger större än för cyklopentan. Det kunde även konstateras att utdiffusionen av koldioxid varierade mellan olika rör. Polyetenrörets motstånd mot gasdiffusion kan påverkas av graden av kristallinitet i materialet. Med denna metod kan endast utdiffusionen av gaser bestämmas, men då detta är en viktig del i utvecklingen mot mindre diffusionsbenägna konstruktioner, kommer metoden, som är enkel att använda och ger säkra resultat, att få stor användning.

Att bestämma värmekonduktiviteten för hela fjärrvärmeröret samt gasinnehållet i polyuretanisoleringen ger ett säkert mätresultat för aktuellt rör efter en viss drifttid (se avsnitt 4). Den ursprungliga cellgassammansättningen vid rörets tillverkning måste vara känd för att säkra beräkningar enligt denna metod skall erhållas. Metoden är mycket användbar då mätresultaten visar aktuell status på fjärrvärmeröret och kan fungera som referens vid utarbetande av prognosmodeller.

Genom att höja temperaturen kan diffusionsprocessen accelereras (se avsnitt 5). Denna metod, vid vilken hela fjärrvärmeröret exponeras för olika temperaturer, har studerats tillsammans med Dansk Teknologisk Institut i Århus. Diffusionen av koldioxid och kväve var 6 gånger snabbare vid $+80^{\circ}\text{C}$ jämfört med $+23^{\circ}\text{C}$. För cyklopentan och syre finns inget liknande klart samband mellan diffusion och temperatur då cyklopentanens löslighet och partialtryck förändras starkt med förhöjd temperatur och då syre åtgår vid oxidation av polyuretanisoleringen. Metoden synes för tillfället inte användbar, då en höjning av temperaturen är svår att koppla till verkliga driftsförhållanden. Sålunda påverkas lösligheten av cyklopentan i polymeren starkt av temperaturen.

Summary

The purpose of this project is to determine diffusion of gases in polyurethane preinsulated district heating pipes. The project has been focused on the insulating gases of current interest, namely carbon dioxide and cyclopentane. Material parameters describing diffusion have been measured for polyurethane and polyethylene. The parameters have been used to calculate the change in thermal conductivity over time.

The results have been used to compare district heating pipes with carbon dioxide- respectively cyclopentane-blown polyurethane insulation. Calculations have been performed for district heating pipes with different dimensions: DN 60.3 mm/140 mm, DN 114 mm/225 mm, DN 219 mm/355 mm and DN 508 mm/710 mm. The thickness of the outer polyethylene casing is 3.0 mm, 3.5 mm, 5.6 mm and 11.1 mm (according to EN 253).

When calculating the thermal conductivity, **conduction in the gas mixture** of the cells of the polyurethane insulation, **radiation** between cell walls and **conduction through the solid polymer** was considered. The composition of the cell gases and consequently conduction in the gas mixture changes over time. In figure (I) and (II), the change in thermal conductivity over time is shown for two polyurethane foams with different insulating gases.

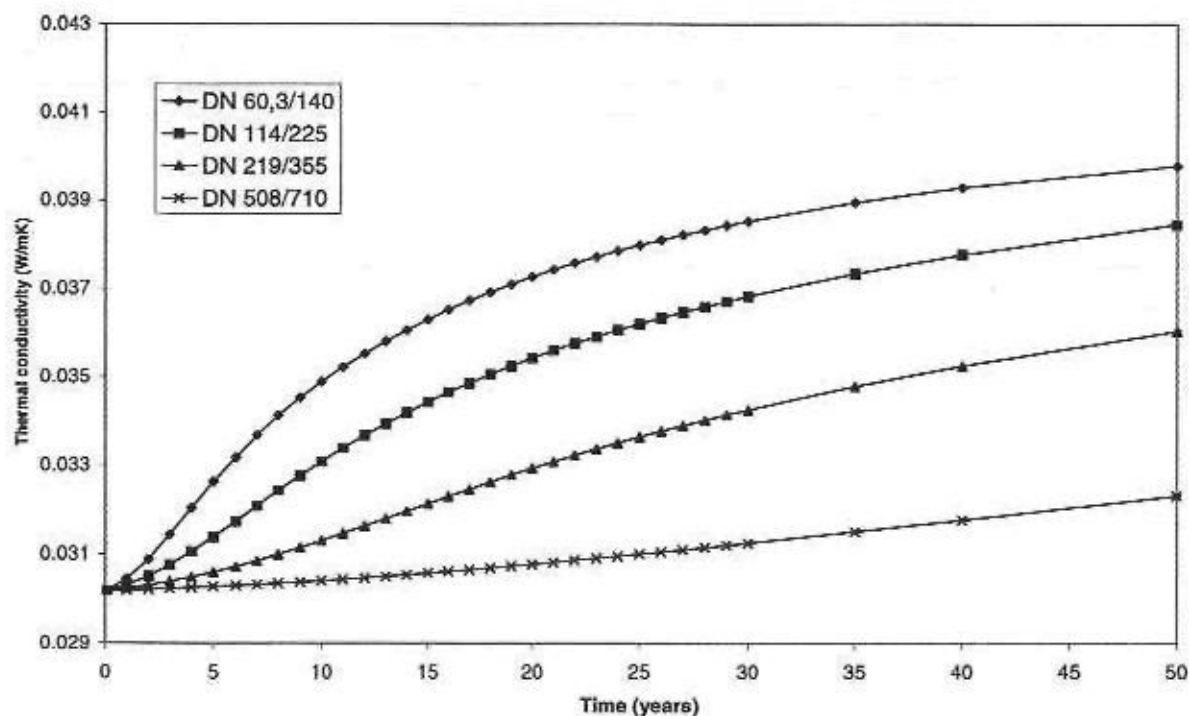


Figure I. The change in thermal conductivity over time for a district heating pipe with cyclopentane-blown polyurethane insulation. Original cell gas composition: 40 % (by volume) cyclopentane and 60 % (by volume) carbon dioxide.

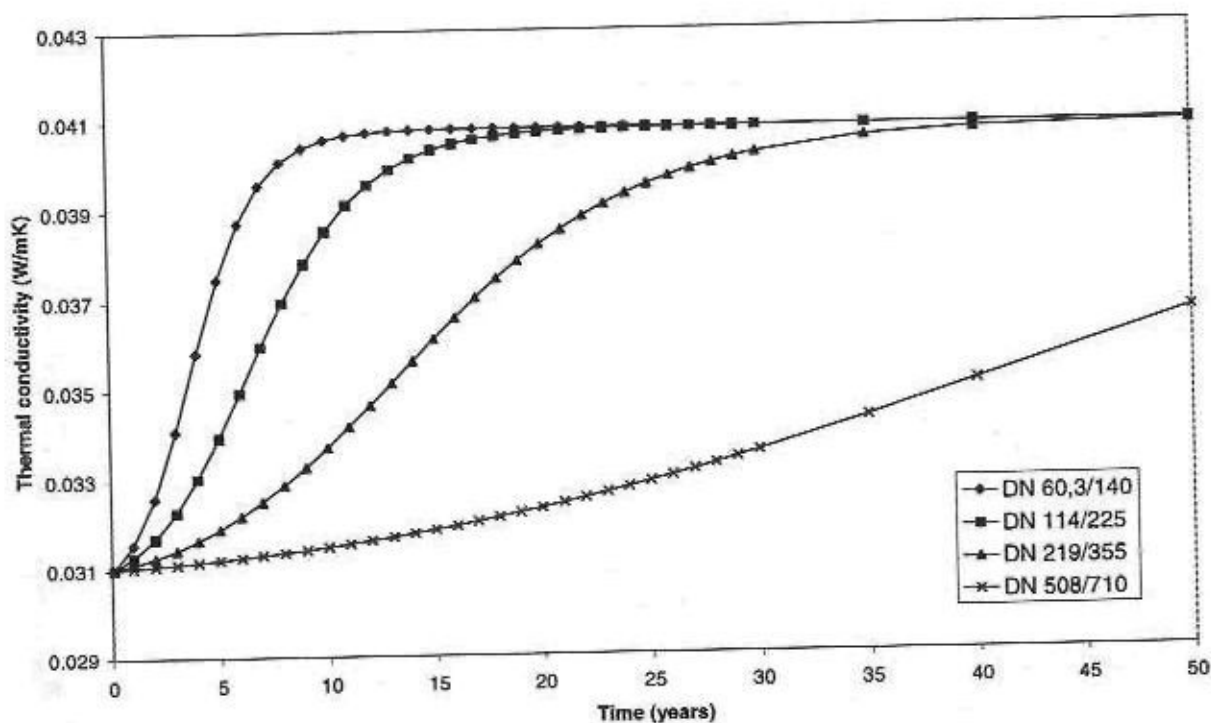


Figure II. The change in thermal conductivity over time for a district heating pipe with carbon dioxide-blown polyurethane insulation. Original cell gas composition: 100 % (by volume) carbon dioxide.

The figures demonstrate that the change in thermal conductivity is largest for district heating pipes with small dimensions due to a thin polyethylene casing. The thermal conductivity deteriorates faster for a pipe with carbon dioxide-blown insulation than for a pipe with cyclopentane-blown insulation with the same dimensions because of the much higher diffusion rate for carbon dioxide (about 50 times higher than for cyclopentane). The thermal conductivity may vary between different polyurethane foams even if the cell gas compositions are identical, since the contribution from radiation and polymer conduction depends on cell size, density and the material distribution in the cell structure (walls/struts).

For district heating pipes with a polyethylene casing, it can be assumed, as a first approximation, that all the diffusion resistance to carbon dioxide is in the casing. For air (oxygen and nitrogen) and for hydrocarbons (e.g. cyclopentane) the resistance to diffusion in the polyurethane insulation must also be considered. In some foams, the concentration of oxygen has shown to be unexpectedly low, which may indicate that oxygen is consumed in polymer oxidation reactions. A significant amount of the total cyclopentane amount in a foam is dissolved in the polymer. As cyclopentane diffuses out of the foam, some of the dissolved cyclopentane will enter the gas phase, leading to a slow decrease in the concentration of cyclopentane in the cell gas.

Within the project, four different methods, for the study of diffusion of gases in district heating pipes, have been used and compared. The method which have proven to be the best and the most universal is the one where the cell gas composition of the polyurethane insulation and the diffusion through the polyethylene casing are determined separately (see section 2). In this method, cylindrical samples from the polyurethane insulation were used for determination of the effective diffusion coefficient. The permeability of the polyethylene

casing was determined with equipment developed specifically for this purpose. Using the mentioned material parameters, the change in cell gas composition over time can be determined. This method is recommended for future studies of the change in thermal conductivity of district heating pipes.

A method for direct measurement of the diffusion out of the casing of the district heating pipe has also been developed (see section 3). Results from measurements on different district heating pipes has shown that the diffusion rate is about 50 times higher for carbon dioxide than for cyclopentane. It was also concluded that the diffusion rate for carbon dioxide varies for different polyethylene casings. The resistance to diffusion of the polyethylene casing is influenced by the degree of crystallinity. The method is reliable and easy to use but only diffusion out of the casing can be determined. Since this is an important issue in the development of new constructions with low diffusion rates, the method will be of great use in the future.

Determination of the thermal conductivity of the pipe assembly and of the gas content of the polyurethane insulation gives reliable results for the pipe at any time (see section 4). However, to make accurate calculations according to this method, the original cell gas composition of the foam must be known. The method is very useful, since the results of the measurements show the present status and can be used as references in the development of calculation models.

By elevating the temperature, the diffusion process can be accelerated (see section 5). This method, in which the pipe assemblies are subjected to different temperatures, has been studied together with the Danish Technological Institute in Århus, Denmark. The diffusion rates for carbon dioxide and nitrogen were six times higher at $+80^{\circ}\text{C}$ than at $+23^{\circ}\text{C}$. For cyclopentane and for oxygen no similar relation was found. For the time being, the method does not appear to be useful since a temperature increase will not reflect actual operational conditions. As an example, the solubility of cyclopentane in the polymer depends on the temperature.

1. Inledning

Projektet, U5-004: *Fjärrvärmerörens isolertekniska långtidsegenskaper - Studium av gasdiffusion genom mantelröret hos koldioxid- och cyklopentanblåsta polyuretanisolerade fjärrvärmerör*, har utförts vid Chalmers tekniska högskola, institutionerna för Byggnadsfysik och Kemisk Miljövetenskap. Projektet har finansierats av Svenska Fjärrvärmeföreningen, NUTEK, Göteborg Energi AB och Stockholm Energi AB.

Projektet har genomförts i samverkan med Powerpipe AB, Hisings-Kärra, Lagomat AB, Angered. I det avsnittet som behandlar Accelererad diffusionsåldring genom förhöjd temperatur (avsnitt 5) har samarbete med Dansk Teknologisk Institut (DTI), Århus skett. Fjärrvärmerör för laborativa provningar har levererats av Powerpipe AB, polyuretanmaterial med aktuella drivgaser har tillverkats av Lagomat AB och rör för accelererad diffusionsåldring har levererats av DTI, som även utfört värmekonduktivitmätningar. Dessa kontakter har varit av utomordentlig betydelse för projektet och bidragit till att projektet kunnat genomföras med den aktuella omfattningen.

Följande personer har varit delaktiga i projektet

Ulf Jarfelt	Projektleddare, ansvarig för utvärderingen
Olle Ramnäs	Ansvarig för det kemiska arbetet
Maria Olsson	Gasanalyser, diffusionsbestämningar
Magdalena Svanström	Gasanalyser, diffusionsbestämningar
Morgan Fröling	Gasanalyser

Projektet har utförts under perioden 1995-10-01--1997-10-31

2. Bestämning av diffusion i polyuretanisolering och polyetenrör

Diffusion i polyuretanisolering

I ett nytillverkat polyuretanskum innehåller de slutna cellerna endast drivgas, koldioxid, en mindre mängd luft och vattenånga. På grund av diffusion kommer gasblandningen att förändras med tiden. Hur snabbt denna diffusion sker beror på partialtryck och diffusionskoefficient för de aktuella gaserna. Den effektiva diffusionskoefficienten bestäms av gasens egenskaper och geometrisk struktur hos polymeren och den är dessutom temperaturberoende. Molekyler av drivgas och koldioxid diffunderar ut ur medan luftens olika komponenter diffunderar in i skummet. Dessa processer påverkar värmekonduktiviteten och leder i allmänhet till att isolerförmågan försämras.

Om den effektiva diffusionskoefficienten är känd, för de olika gaserna, kan polyuretanisoleringens värmekonduktivitet bestämmas vid en viss tidpunkt. Förändringen av isoleringsförmågan kan studeras genom att prover tas på polyuretanskummet vid olika tidpunkter under ordinarie driftsförhållanden. Detta är en mycket tidskrävande process och därför opraktisk, eftersom förändringen av värmekonduktiviteten pågår under lång tid. En utvärdering av ett materials framtida värmekonduktivitet bör kunna göras inom några månader.

För att påskynda diffusionsprocessen och därmed kunna bestämma den effektiva diffusionskoefficienten på kort tid, inom 100 timmar, har provkroppar från polyuretanisoleringen, i form av cylindrar, skurits ut ur fjärrvärmerörens isolering med hjälp av en särskild provtagare. Diffusionsvägen för isolergasen ut ur polyuretanisoleringen har därmed förkortats och tidsåtgången för att erhålla mätbara förändringar i cellgasblandningen har minskat. Cylinderformade provkroppar är enkla att förvara och har rätt form och storlek för att direkt passa i den provutrustning som utvecklats för gasanalyser.

Partialtrycket i cellerna kommer att förändras med tiden tills dess att det råder lika förhållanden inne i cellerna som utanför i den omgivande atmosfären. Diffusionskoefficienten styr denna förändring och antas vara koncentrationsoberoende. De olika gaserna antas inte samverka. Fick's lag beskriver diffusionsprocessen.

$$\frac{dp_i}{dt} = D_{eff,i} \frac{d^2 p_i}{dx^2} \quad (1)$$

där	p_i	= partialtryck för gas i	(kPa)
	t	= tid	(s)
	x	= position	(m)
	$D_{eff,i}$	= effektiva diffusionskoefficienten för gas i	($m^2 \cdot s^{-1}$)

Lösningen av ekvationen då provkroppen är en cylinder med förseglade ändtor, dvs endast radiell diffusionsriktning kan förekomma, framgår av ekv. (2).

$$p_i(r,t) = \frac{2p_{0i}}{a} \sum_{j=1}^{\infty} \frac{J_0(\beta_{0j} \cdot r) \cdot \exp(-\beta_{0j}^2 \cdot D_{eff} \cdot t)}{\beta_{0j} \cdot J_1(\beta_{0j} \cdot a)} \quad (2)$$

där

a	= cylinderns radie	(m)
r	= distans från centrumaxel	(m)
J_0 och J_1	= Besselfunktion	
$\beta_{0j} \cdot a$	= rötter till Besselfunktionen	

Vid bestämning av partialtrycket erhålles medeltrycket i provcylindern

$$\bar{p}_i(t) = \int_0^a p_i \cdot \frac{2\pi \cdot r}{a^2 \cdot \pi} dr = p_0 \sum_{j=1}^{\infty} \frac{4 \cdot \exp(-\beta_{0j}^2 \cdot D_{eff} \cdot t)}{(\beta_{0j} \cdot a)^2} \quad (3)$$

Om bestämningstiden är tillräckligt lång kan den effektiva diffusionskoefficienten beräknas ur sambandet

$$D_{eff,i} = - \frac{a^2}{2.4048^2} \cdot \frac{d(\ln(\bar{p}_i))}{dt} \quad (4)$$

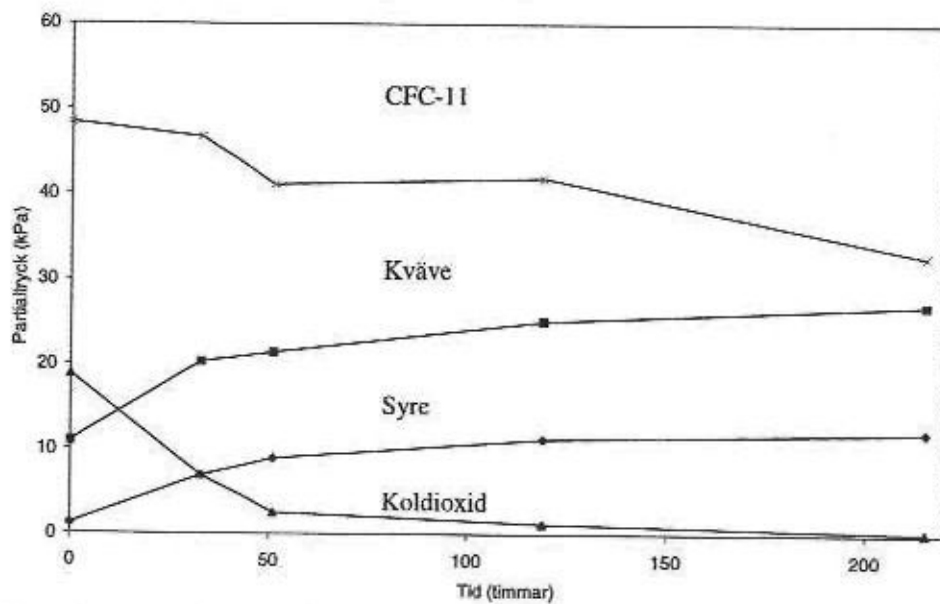
där 2,4048 = första roten i Besselfunktionen

Experimentellt

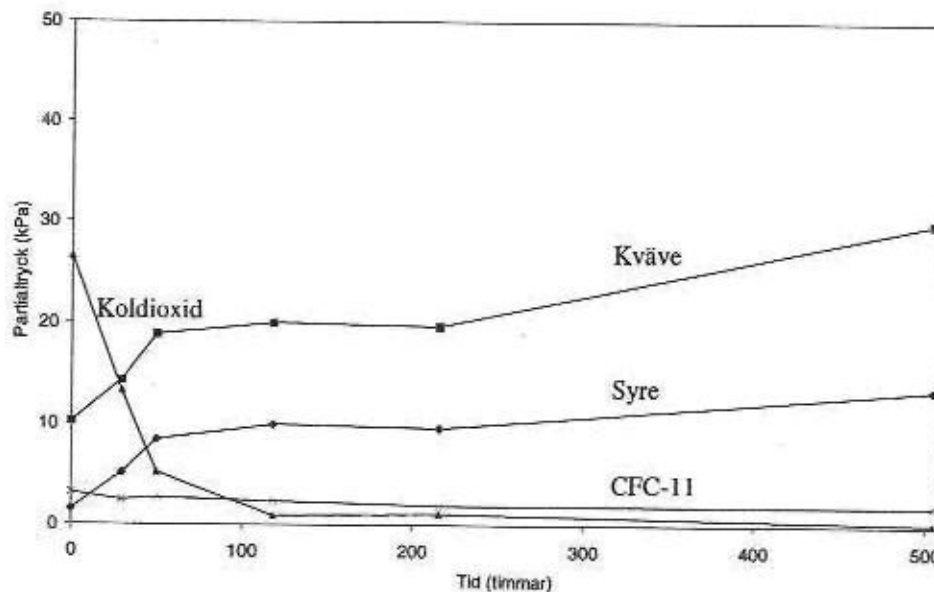
Polyuretanmaterialet i fyra fjärrvärmerör, ett med CFC-blåst polyuretan och övriga med koldioxidblåst polyuretan har studerats närmare. Ett stort antal cylindrar med diameter 20 mm har tagits ur de aktuella fjärrvärmerörens isoleringar och har under olika lång tid lagrats i rumstemperatur, för att därefter analyseras på sitt cellgasinnehåll. Analyserna har genomförts i enlighet med tidigare beskriven metod [4]. Utifrån dessa cellgasanalyser har gasernas effektiva diffusionskoefficienter i polyuretanisoleringen beräknats.

Ändytorna förseglades innan åldringsfasen påbörjades. Inför gasanalysen togs förseglingen bort.

Resultaten av cellgasanalyserna för två av de studerade polyuretanskummen återfinns i fig. (1) och (2) där förändringen av gasernas partialtryck med tiden presenteras.



Figur 1. Cellgasanalys av provcylindrar av CFC-11-blåst polyuretanisolering som förvarats vid rumstemperatur under olika tider (0-220 tim.). Provcylindrarna togs från fjärrvärmerör som varit utsatta för normala driftförhållanden i 8 år.
Cell gas analysis of cylindrical samples of CFC-blown polyurethane foam which were kept at room temperature during 0-220 hours. The cylindrical samples were taken from pipes used under normal operating conditions for 8 years.



Figur 2. Cellgasanalys av provcylindrar av koldioxidblåst polyuretanisolering som förvarats vid rumstemperatur under olika tider (0-220 tim.). Provcylindrarna togs från fjärrvärmerör som varit utsatta för normala driftförhållanden i 8 år.
Cell gas analysis of cylindrical samples of carbon dioxide blown polyurethane foam which were kept at room temperature during 0-220 hours. The cylindrical samples were taken from pipes used under normal operating conditions for 8 years.

Bestämning av effektiva diffusionskoefficienten för fyra olika fjärrvärmerör redovisas i tab. (1).

Tabell 1. Effektiva diffusionskoefficienten (D_{eff}) bestämd vid rumstemperatur för polyuretanisolering i pre-fabricerade fjärrvärmerör.
The effective diffusion coefficient (D_{eff}) for polyurethane foam insulation in district heating pipes at room temperature.

Blåsgas	Effektiva diffusionskoefficienten D_{eff} ($m^2 \cdot s^{-1}$)			
	Syre	Kväve	Koldioxid	CFC-11
CFC-11	180×10^{-13}	28×10^{-13}	1000×10^{-13}	20×10^{-13}
Koldioxid	130×10^{-13}	10×10^{-13}	700×10^{-13}	---
Koldioxid	100×10^{-13}	40×10^{-13}	750×10^{-13}	---
Koldioxid	80×10^{-13}	15×10^{-13}	500×10^{-13}	---

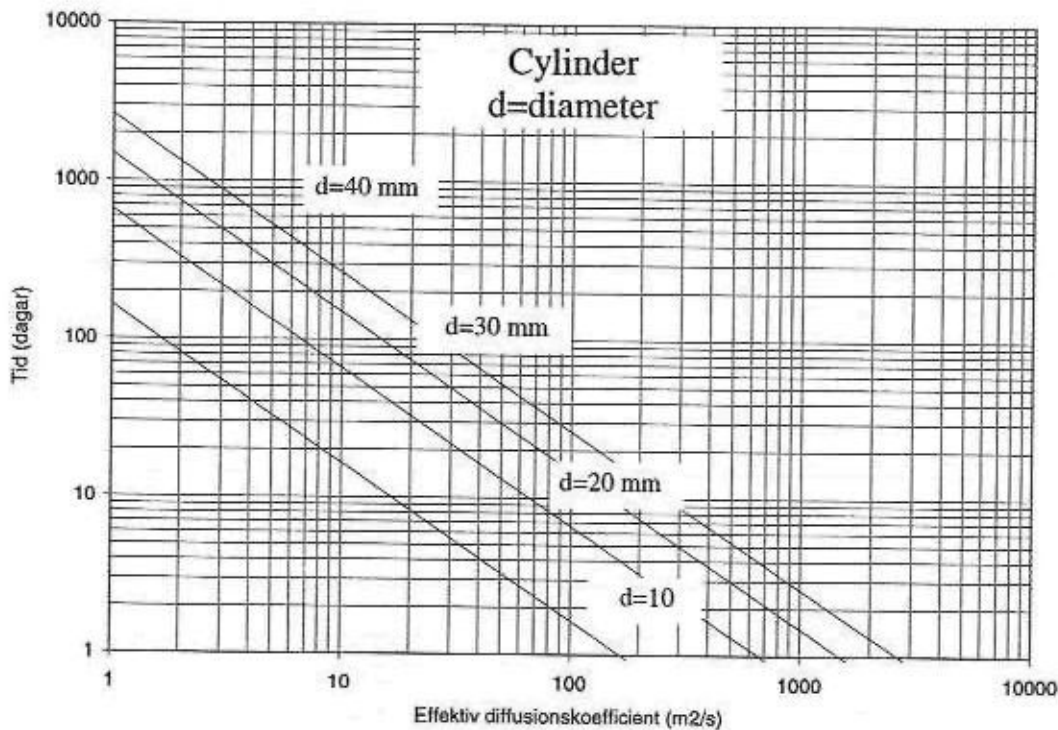
Diffusionskoefficienten är mycket olika för de ingående gaserna. Litteraturstudier [8] tillsammans med laborativa studier [5, 6] visar att en faktor 1000 kan skilja mellan diffusionskoefficienterna för koldioxid och för olika kolväteföreningar.

Då skillnaden i diffusionshastighet mellan de ingående gaserna är stor, måste provningsgenomförandet anpassas så att man för varje gas skapar bästa möjliga förutsättningar att kunna bestämma diffusionskoefficienten. Valet av dimension på provcylindrar är viktigt för att få så stor mät noggrannhet som möjligt. För att få god säkerhet krävs 4-5 separata cellgasanalyser. För att erhålla resultat inom högst 100 dagar måste provdiameter enligt nedan väljas:

För långsamt diffunderande gaser ($D_{eff} \cong 1-10 \times 10^{-13} m^2 \cdot s^{-1}$) väljs diameter 10 mm.

För medelsnabbt diffunderande gaser ($D_{eff} \cong 10-500 \times 10^{-13} m^2 \cdot s^{-1}$) väljs diameter 20-30 mm.

För snabbt diffunderande gaser ($D_{eff} \cong 500-1000 \times 10^{-13} m^2 \cdot s^{-1}$) väljs diameter 30-40 mm.



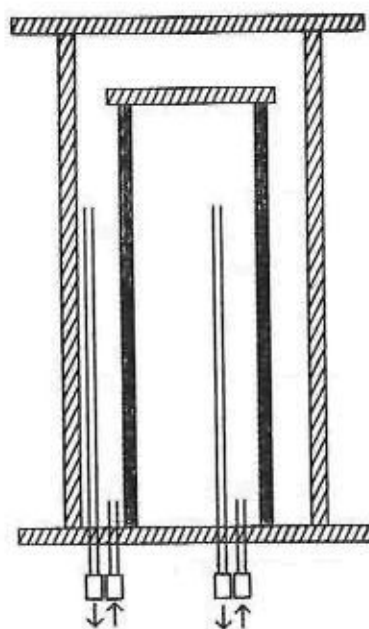
Figur 3. Sambandet mellan effektiva diffusionskoefficienten och tiden det tar att nå en 50 %-ig reduktion av partialtrycket.
Effective diffusion coefficient vs time to reduce the partial pressure to 50%.

Permeabilitet hos polyetenröret

För att bestämma polyetenrörets permeabilitet, P_b , utan inverkan av polyuretanisoleringen har en provningsutrustning utvecklats. Ett polyetenrör, diameter 125 mm, längd 430 mm och tjocklek 3,0 mm, har centriskt placerats inuti ett stålrör, diameter 190 mm, längd 500 mm. Se fig. (4). Stålrörets öppningar var förslutna med hjälp av stålplattor. Även polyetenrörets öppningar var förslutna med stålplattor, som med hjälp av lim och tryck hölls på plats. Härigenom erhöles två till volymen ungefär lika stora kammare, en på insidan och en på utsidan av polyetenröret.

Två utrustningar av denna typ användes för att bestämma masstransporten av gas genom polyetenröret vid rumstemperatur. Utrustningarnas täthet provades med övertryck. Den inre kammaren fylldes med koldioxid och den yttre med luft. Successiva gasanalyser av innehållet i respektive kammare möjliggjorde bestämning av masstransporten av koldioxid, syre och kväve. Från dessa försök föreligger endast ett fåtal resultat. Endast en rörtyp provades, vilket innebär att eventuella skillnader mellan olika polyetenfabrikat inte går att spåra.

Trots det ringa antalet mätningar framstår dock metoden som en möjlighet att bestämma masstransporten av gaser genom polyetenhöljet. Metoden ger möjlighet att studera olika gaser vid olika temperaturnivåer.



Figur 4. Mätapparat för bestämning av permeabiliteten för koldioxid, kväve och syre genom polyetenröret.
Experimental set-up for determination of the out-gassing of carbon dioxide, nitrogen and oxygen through the polyethylene casing.

I tab. (2) redovisas resultat från försöket.

Tabell 2. Permeabilitetskoefficient för koldioxid, kväve och syre för polyeten. Polyetenrör med diameter 125 mm och tjocklek 3,0 mm.
Permeability coefficient of carbon dioxide, nitrogen and oxygen of the polyethylene casing. Pipe diameter 125 mm, thickness 3.0 mm.

Gas	Permeabilitetskoefficient ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)
Koldioxid	$6,3 \times 10^{-16}$
Kväve	$6,6 \times 10^{-16}$
Syre	$8,1 \times 10^{-16}$

För att bestämma relationen mellan diffusionsmotståndet i polyuretanskummet och polyetenröret kan Biot's tal (B_i) användas. Se APPENDIX ekv. (A6).

$$Bi = \frac{D_{p,b}}{L_b} \cdot \frac{L_f}{D_{p,f}} \quad (6)$$

där L_b = polyetenrörets (barriärens) tjocklek (m)
 L_f = polyuretanisoleringens tjocklek (m)
 $D_{p,f}$ = diffusionskoefficient för polyuretanisoleringen ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)
 $D_{p,b}$ = diffusionskoefficient för polyetenröret ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)

Med hjälp av värdena som hämtats från tab. (1) och (2) har permeabiliteten och Biot's tal beräknats för ett fjärrvärmerör. Se tab. (3).

Tabell 3. Permeabilitetskoefficienter för koldioxid, kväve och syre i polyuretanisoleringen och i polyetenröret. Biot's tal har beräknats för ett fjärrvärmerör med ytterdiameter 180 mm, medierörsdiameter 88,9 mm och polyetenrörstjocklek 3,5 mm

Permeability coefficients of carbon dioxide, nitrogen and oxygen in polyurethane foam insulation and polyethylene casing. Calculation of Biot's number has been made on a district heating pipe with steel pipe diameter 88.9 mm, casing pipe diameter 180 mm and casing thickness 3.5 mm.

Gas	Permeabilitetskoefficient ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)		Biot's tal Bi
	Polyuretan	Polyeten	
Koldioxid	290×10^{-16}	$6,3 \times 10^{-16}$	0,26
Kväve	10×10^{-16}	$6,6 \times 10^{-16}$	6,5
Syre	49×10^{-16}	$8,1 \times 10^{-16}$	2,0

Diskussion

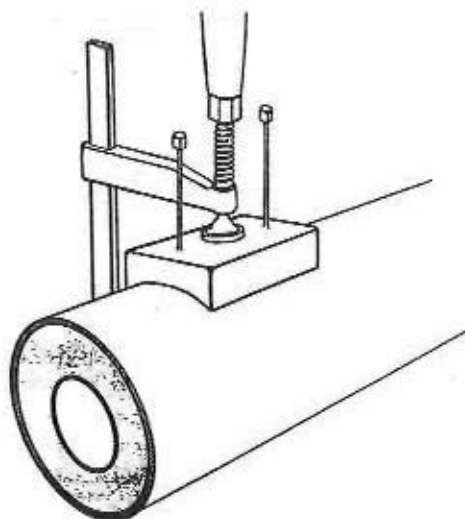
Det faktum att Biot's tal är litet ($Bi = 0,26$) visar att diffusionsmotståndet för koldioxid i huvudsak finns i mantelröret. Eftersom Biot's tal är högt för syre och kväve, $Bi = 2,0$ resp. 6,5 innebär detta att en stor del av diffusionsmotståndet för dessa gaser finns i polyuretanisoleringen. Detta medför att man vid beräkningen av partialtrycket i polyuretanisoleringen måste ta hänsyn till diffusionen både i isoleringsmaterialet och i mantelröret.

För cyklopentan finns inga siffervärden på permeabiliteten genom polyetenröret bestämt enligt ovan beskrivna metod. Resultat från bestämningar enligt annan metod, avsnitt 3, visar att Biot's tal är av storleksordningen 1 till 5, vilket tyder på att det huvudsakliga motståndet mot diffusion finns i polyuretanmaterialet. Framtida forskningsarbete förväntas klarlägga om detta är riktigt.

3. Bestämning av utdiffusion genom polyetenröret

Vid denna metod analyseras gasen i det slutna rum som bildas, då en låda av metall med hjälp av en skruvtving pressas mot polyetenröret på ett fjärrvärmerör. Se fig. (5). Varje låda täcker en yta av ca 150 cm^2 och har en volym av ca 350 cm^3 . För att tätningen, metall – polyeten, skall bli fullgod, stryks ett lager av epoxylim på lådans kanter före appliceringen. Tätningen kontrolleras genom att lägga på ett övertryck i lådan.

Före varje mätperiod genomspolas lådan med syntetisk (koldioxidfri) luft. Efter mindre än 1 dygn har vanligen så mycket koldioxid eller annan blåsgas diffunderat ut genom polyetenröret, att det går att bestämma koncentrationen i luftvolymen i lådan med hjälp av gaskromatografi. Samma gaskromatograf, som används för cellgasanalysen, utnyttjas i detta fall. Provtagningen i luftvolymen i lådan görs med hjälp av en gastät spruta och gasprovet överförs sedan direkt till kromatografens gasprovtagnings slinga för injicering och analys.



Figur 5. Utrustning för studium av utdiffusion av koldioxid och cyklopentan från fjärrvärmerör.

Experimental set-up for determination of the out-gassing of carbon dioxide and cyclopentane from district heating pipes.

Vid mätningarna användes fyra olika fjärrvärmerör (A, B, C och D) med ytterdiameter 180 mm och innerdiameter 89 mm. Två olika lådor placerades på varje rör. Prover togs efter olika tider, vanligen mellan 1 dag - 1 vecka.

De rör som användes var:

Rör A: Koldioxidblåst
Rör B: Koldioxidblåst
Rör C: Cyklopentanblåst
Rör D: Koldioxidblåst

Polyetenrörets tjocklek = 4,0 mm
Polyetenrörets tjocklek = 3,9 mm
Polyetenrörets tjocklek = 3,4 mm
Polyetenrörets tjocklek = 3,2 mm

Resultat

Diffusionen av koldioxid och cyklopentan genom polyetenröret redovisas i tab. (4). Resultatet redovisas som en permeabilitetskoefficient, som inkluderar diffusionsmotståndet från såväl polyuretanisolering som polyetenrör. Hur stor andel av diffusionsmotståndet som finns i polyetenröret jämfört med polyuretanisoleringen beskrivs av Biot's tal. Vid bestämning av diffusionen med hjälp av plåtlådorna går det inte att avgöra om diffusionsmotståndet huvudsakligen finns i polyetenröret eller i polyuretanisoleringen. Vad som framgår är den aktuella utdiffusionen från hela konstruktionen, dvs fjärrvärmeröret. Det redovisade måttet skall tolkas som en permeabilitetskoefficient för hela konstruktionen.

Tabell 4. Bestämning av permeabilitetskoefficienten för koldioxid och cyklopentan för ett polyetenrör under antagande att allt motstånd återfinns i polyetenröret.

Permeability coefficient (P_{eff}) for carbon dioxide and cyclopentane for the polyethylene casing under the assumption that all diffusion resistance is within the polyethylene material.

Rör	Permeabilitetskoefficient ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)	
	Koldioxid	Cyklopentan
A1	$4,1 \times 10^{-16}$	$0,33 \times 10^{-16}$
A2	$3,1 \times 10^{-16}$	
B1	13×10^{-16}	
B2	13×10^{-16}	
C1	15×10^{-16}	
C2	13×10^{-16}	
D1	10×10^{-16}	
D2	11×10^{-16}	

Diskussion

Permeabilitetskoefficienten för koldioxid och cyklopentan framgår av tab. (4). Att permeabiliteten för koldioxid och cyklopentan är olika, beror dels på molekylernas olika storlek och dels på att cyklopentan har hög löslighet i polyeten. Vid rumstemperatur är permeabilitetskoefficienten ca 10-50 gånger högre för koldioxid än för cyklopentan.

Att man dessutom erhåller olika värden för koldioxid beror på att polyetenmaterialen inte är helt lika. Olika grad av kristallinitet ger sannolikt olika diffusionsmotstånd. Kristalliniteten påverkas av faktorer som densitet och hur polyetenmaterialet bearbetats. Högre grad av kristallinitet minskar diffusionen.

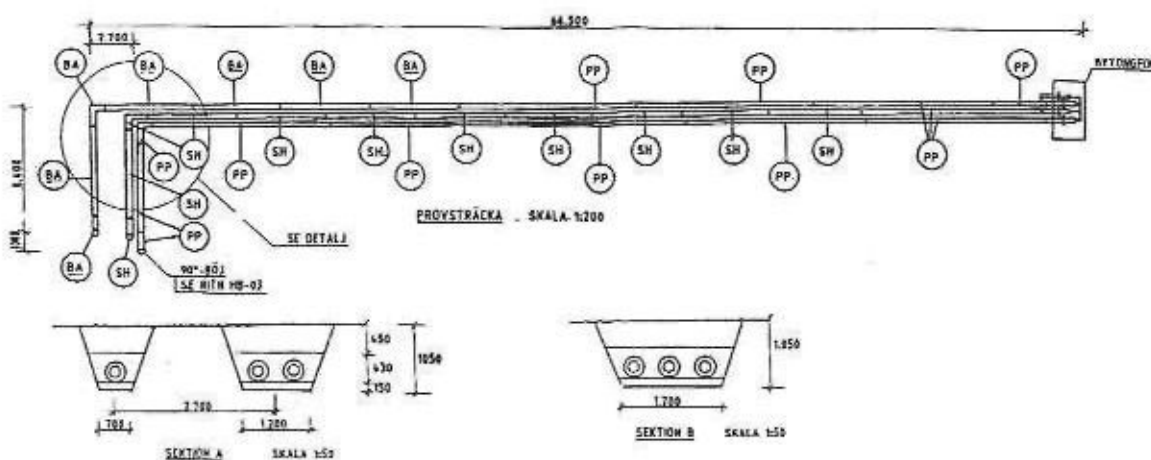
4. Fältförsök – Bestämning av diffusionen i fjärrvärmerör i drift

Studium av fjärrvärmerör utsatta för verkliga driftförhållanden ger en möjlighet att bedöma den isoleringsmässiga förändringen. Värmeledningsförmågan kan bestämmas i laboratorium, likaså gasinnehållet i polyuretanisoleringen. Visserligen erhålls bara ett enskilt värde för fjärrvärmerörets isoleringsförmåga just vid provtagningsstillfället, men det ger möjlighet att validera den modell som skall kunna beskriva det totala diffusionsförloppet och därigenom också beskriva isoleringsförmågans förändring under fjärrvärmerörens tekniska livslängd.

Provanläggning

Provanläggningen är belägen i Hisings-Backa ca 20 km norr om Göteborg invid E6. Fjärrvärmerören är anslutna till det lokala värmeverket och förses med ordinarie utgående hetvatten. Fjärrvärmerörens dimensioner är 168 mm (stålrör) och 280 mm (polyetenrör). Polyetenrörets tjocklek är 4,4 mm. Rören är förlagda i ett grönområde, dvs utan trafiklast. Markmaterialet är matjord med underliggande lera. Rören har kringfyllts med sand enligt lägningsföreskrifterna. Terrängen är flack och marken fungerar som avrinningsområde till Göta älv vilket medför att grundvattennivån stundtals är hög. Under vissa perioder kan det förekomma vatten över rörens hjässa.

Provanläggningen består av tre fjärrvärmerör, förlagda i samma rörgrav. Plan över provanläggningen visas i fig. (6). En raksträcka med längden 66,5 m åtföljt av en böj och en skänkel på ca 8 m utgör rörsträckningen. Bortre änden av raksträcken är försedd med en betongfix. Under ett tidigt skede, hösten 1989, genomfördes fältmätningar av böjens lägesförändringar orsakade av de temperaturskillnader som påfördes medieröret ($\Delta T \approx 55^\circ\text{C}$).



Figur 6. Provanläggning: Hisings-Backa
Test site: Hisings-Backa

I den fortsatta beskrivningen av projektet används följande beteckningar för rören:

Rör E: Koldioxid blåst polyuretanisolering.

Rör F: CFC11 blåst polyuretanisolering. Standardrör fram till 1991, då förbud mot användning av CFC infördes

Provningsresultat

Analys av cellgasen i polyuretanisoleringen har utförts vid två tillfällen, dels 1992 och dels 1996. Vid det första tillfället demonterades hela rörbitar, längd ca 2 m, från provanläggningen. Vid detta tillfälle genomfördes både värmekonduktivitetsbestämning och gasanalys. Vid provtillfället 1996 demonterades endast polyuretanisoleringen motsvarande en längd av 0,5 m på vilken gasanalyser genomfördes.

Tabell 5. Cellgasanalys: Rör E (Koldioxidblåst skum)
Cell gas analysis: Pipe E (Carbon dioxide blown foam)

Gas	Cellgasanalys (vol%)	
	1992	1996
Syre	2,3	3,7
Kväve	11	25
Koldioxid	82	62
CFC11	4,3	7,5
Vattenånga	0,2	1,7
Cellgastryck (kPa)	80	42
Densitet (kg/m ³)	78	78

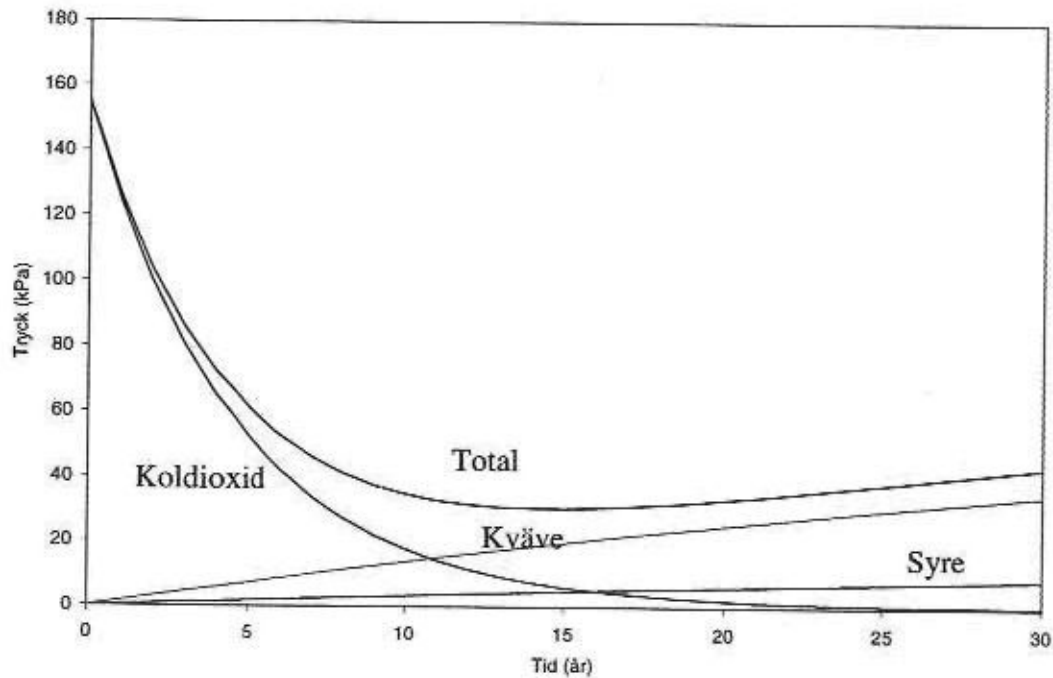
Tabell 6. Cellgasanalys: Rör F (CFC11-blåst skum)
Cell gas analysis: Pipe F (CFC11 blown foam)

Gas	Cellgasanalys (volym-%)	
	1992	1996
Syre	1,9	1,8
Kväve	13	14
Koldioxid	40	22
CFC11	45	59
Vattenånga	0,3	3,7
Cellgastryck (kPa)	120	80
Densitet (kg/m ³)	73	70

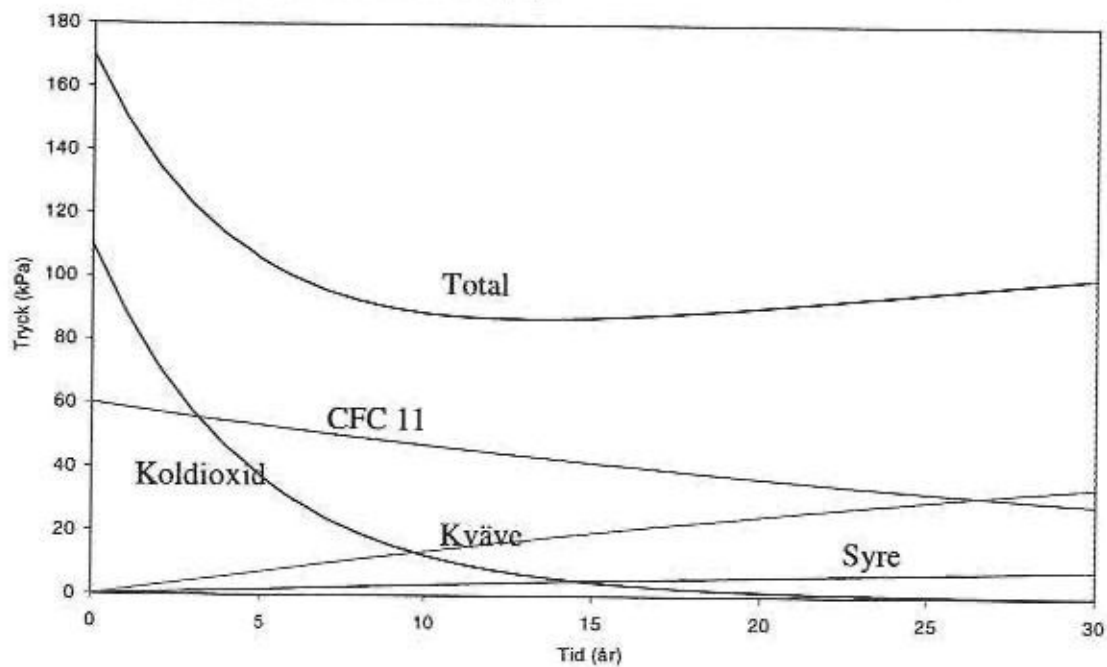
Från värdena redovisade i tab. (5) och (6) har permeabiliteten för respektive cellgas beräknats. Se tab. (7). Dessa värden har senare använts vid beräkning av partialtryck i polyuretanisoleringen som funktion av tiden. Se fig. (7) och (8).

Tabell 7. Materialparametrar använda i beräkningarna.
Material parameters used in the calculations.

Gas	P_{eff} (mol·m ⁻¹ ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹)
Syre	$0,41 \times 10^{-16}$
Kväve	$0,53 \times 10^{-16}$
Koldioxid	$5,5 \times 10^{-16}$
CFC 11	$0,62 \times 10^{-16}$



Figur 7. Cellgastryck i polyuretanisoleringen hos rör E som funktion av tiden. Beräkningen har gjorts med hjälp av materialparametrar enligt tab. (7).
Cell gas pressure in the polyurethane for Pipe E as a function of time. Calculation based on tab. (7).

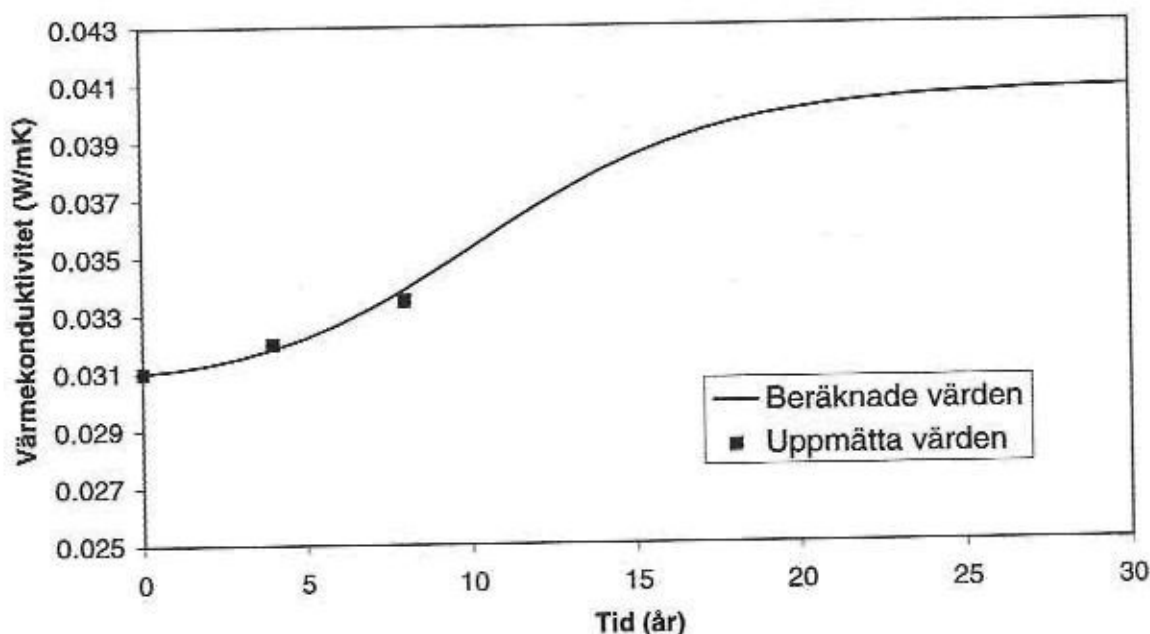


Figur 8. Cellgastryck i polyuretanisoleringen hos rör F som funktion av tiden. Beräkningen har gjorts med hjälp av materialparametrar enligt tab. (7).
Cell gas pressure in the polyurethane for Pipe F as a function of time. Calculation based on tab. (7).

Värmekonduktivitet

Provbitar av fjärrvärmeröret har testats med avseende på värmekonduktivitet dels före provanläggningens iordningställande och dels efter 4,5 års drift. Under perioden 1991 och framåt har forsknings- och utvecklingsarbete bedrivits på Chalmers, vilket successivt givit kunskap om polyuretanisoleringens värmekonduktivitet och cellgasernas betydelse för densamma. Härigenom har kunskap erhållits så att man med tillfredsställande säkerhet kan beräkna värmekonduktiviteten utgående från kännedom om gassammansättningen i cellerna, dvs man har kunnat reducera provningsinsatserna till att enbart studera gassammansättningen. Cellgasens sammansättning har bestämts vid 3 tillfällen 1990, 1992 och 1996.

Beräkningen av den framtida värmekonduktiviteten har genomförts utgående från cellgasanalyserna och beräknade permeabilitetsdata för polyetenmaterialet. Med hjälp av Wassiljewa's ekvation [2] har gasblandningens värmekonduktivitet beräknats.



Figur 9. Värmekonduktiviteten för fjärrvärmerör E (koldioxid) beräknad för 30 års drift.
Calculated thermal conductivity of pipe E (carbon dioxide) over 30 years.

Tabell 8. Värmeledningsförmågan uppmätt i Guarded Hot Pipe-utrustning [1] för år 1988 och 1992 samt beräknat för år 1996.
Thermal conductivity measured in Guarded Hot Pipe apparatus [1] 1988 and 1992 and calculated for 1996.

Rör	Värmeledningsförmåga, λ_{total} ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)		
	1988	1992	1996
E	0,0316	0,0329	0,0339
F	---	0,0274	0,0265

Diskussion

De aktuella mätningarna i kombination med gasanalyser från andra åldrade fjärrvärmerör ger belägg för att vissa förenklingar av diffusionbetraktelsen kan göras. Diffusionen av koldioxid kan betraktas som helt styrd av polyetenrörets diffusionsmotstånd

För CFC-11 utgör diffusionsmotståndet i polyuretanisoleringen en inte oansenlig del av det totala diffusionsmotståndet för fjärrvärmeröret.

5. Accelererad diffusionsåldring genom förhöjd temperatur

På grund av att blåsgas diffunderar in i och luft diffunderar ut ur cellerna i polyuretanisoleringen förändras cellgasens sammansättning och därmed värmekonduktiviteten för hela fjärrvärmeröret. Hastigheten med vilket detta sker påverkas av temperaturen. Hög temperatur påskyndar förloppet genom att gasmolekylenas hastighet ökar, permeabiliteten genom cellväggarna ökar och att lösligheten i polymeren minskar.

En studie av fjärrvärmerörens diffusionsåldring, då rören har lagrats vid förhöjd temperatur, har genomförts i samarbete mellan Chalmers och Dansk Teknologisk Institut (DTI) i Århus. Rören tillverkades av Løgstør Rør A/S och värmekonduktivitetmätningarna genomfördes av DTI, Århus [7]. Provbitar med längden 0,3 m skickades till Chalmers, från DTI, för lagring vid olika temperaturer och för gasanalyser.

Två försöksserier genomfördes. Den första tog sikte på att studera koldioxidblåsta fjärrvärmerör och hur gasinnehåll och värmekonduktivitet förändrades med tiden, då rören lagrats vid temperaturerna 60°C, 80°C och 100°C (Provserie DTI I).

En andra försöksserie genomfördes på kulvertrör med cyklopentanblåst polyuretanskum. Med ledning av erfarenheter från den första försöksserien gjordes vissa modifikationer, bland annat sänktes temperaturen till 40°C, 60°C respektive 80°C. Den viktigaste förändringen var troligtvis att provkropparna fick diffusionstätare ändförslutningar för att minimera läckage av gaser. (Provserie DTI II)

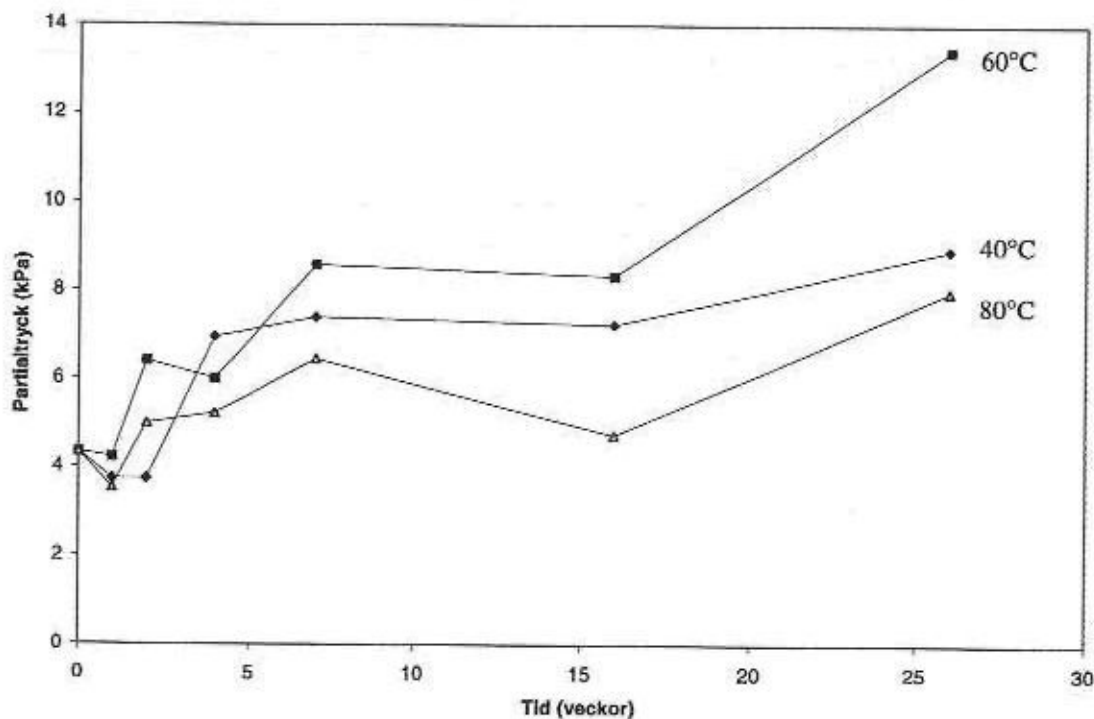
Vid utvärderingen av gasanalyserna från den första försöksserien, DTI I, framgick tydligt att ändförslutningarna på de 0,3 m långa provkropparna var otillfredsställande utförda. Gasanalyser utförda i rörets längsled visade att drivgasens koncentration minskade mot provbitens ändtyr samtidigt som syre- och kvävekoncentrationen ökade i närheten av ändförslutningarna. Detta, orsakat av ett oönskat axiellt läckflöde, påverkade gasinnehållet i polyuretanisoleringen på icke försumbart sätt, varför resultat av försöksserie, DTI I, inte tagits med i denna rapport.

Försöksutförande DTI II

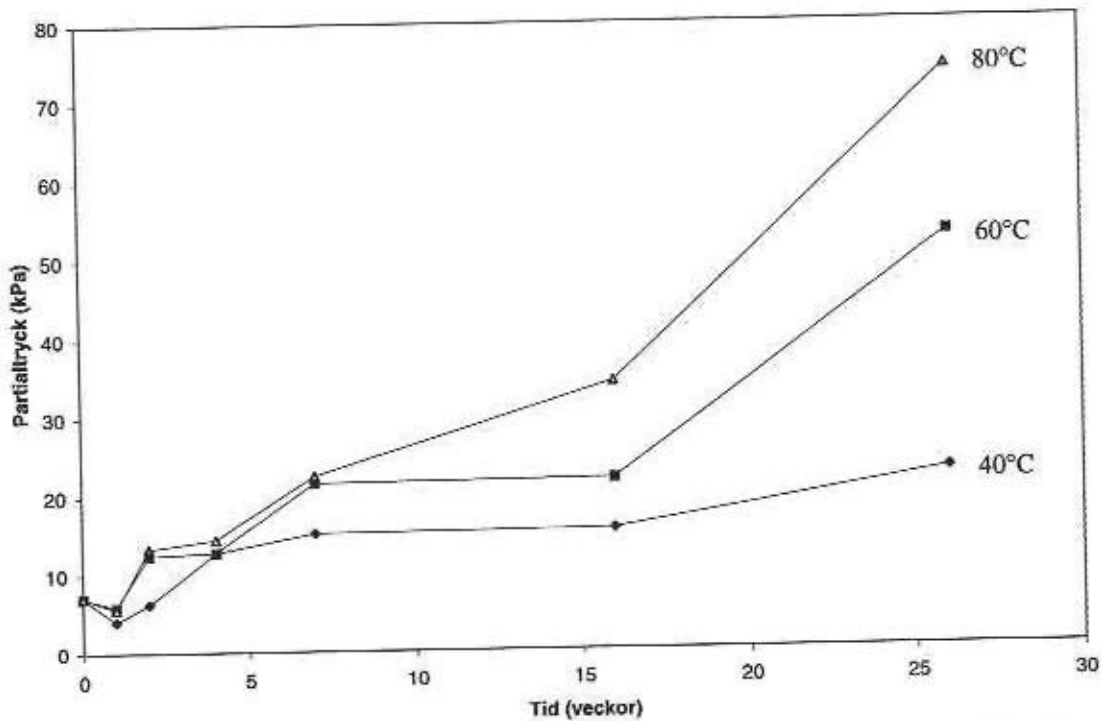
Provbitarna var tagna ur normalt producerade fjärrvärmerör. Provbitarnas ändar förseglades med aluminiserad plastfolie. Dessa provbitar exponerades sedan för konstant temperatur (40°C, 60°C och 80°C) under olika långa tidsperioder (1, 2, 4, 7, 16, 26 veckor).

Diffusionen av luft och isolergaser studerades genom att cellgasinnehållet i provbitarnas isolering bestämdes. Endast prover från mittdelen av provbitarna analyserades. Inverkan av eventuell gasdiffusion och otätheter vid provbitens ändförslutning minimerades genom detta förfarande.

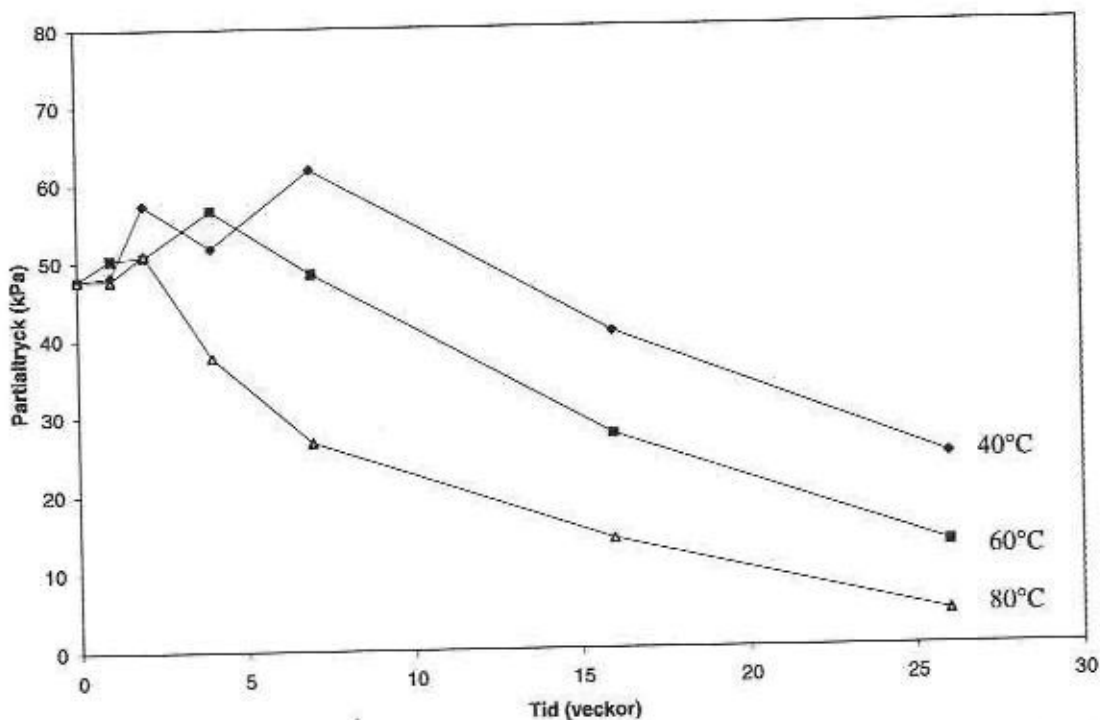
Förändringen av partialtrycken för syre, kväve, koldioxid och cyklopentan framgår av fig. (10)-(13).



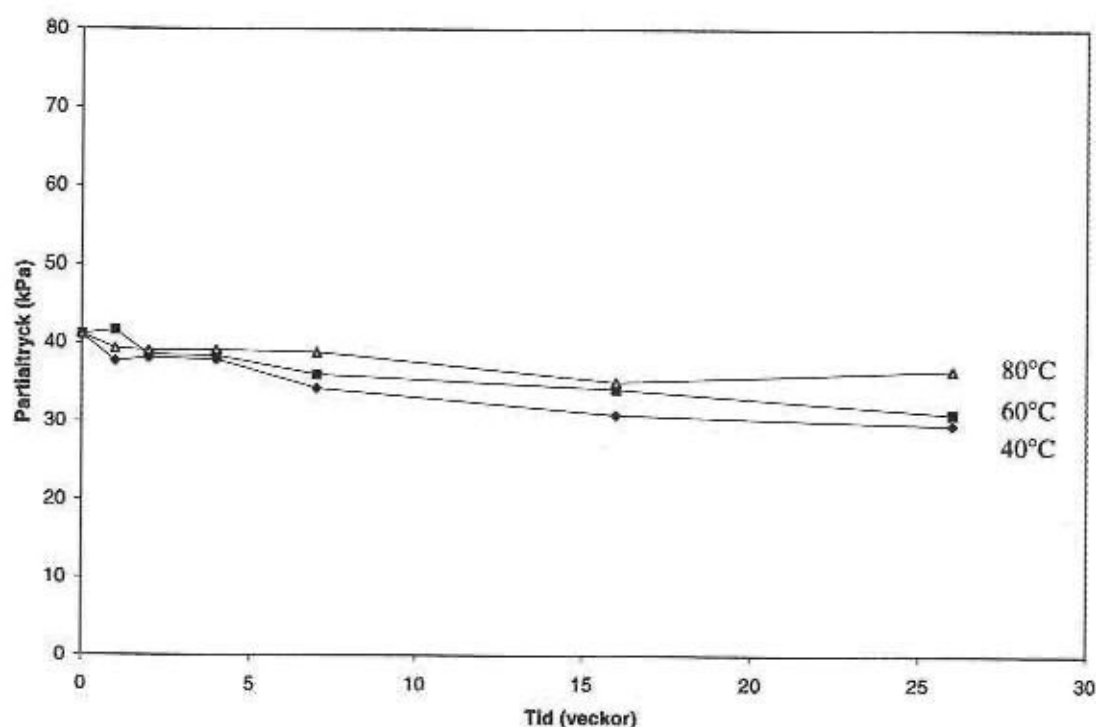
Figur 10. Partialtrycket för syre som funktion av tiden. Diagrammet gäller för provbitar som förvarats vid 40°C, 60°C respektive 80°C.
Partial pressure of oxygen as a function of time. Samples stored in 40°C, 60°C and 80°C respectively.



Figur 11. Partialtrycket för kväve som funktion av tiden. Diagrammet gäller för provbitar som förvarats vid 40°C, 60°C respektive 80°C.
Partial pressure of nitrogen as a function of time. Samples stored in 40°C, 60°C and 80°C respectively.



Figur 12. Partialtrycket för koldioxid som funktion av tiden. Diagrammet gäller för provbitar som förvarats vid 40°C, 60°C respektive 80°C.
Partial pressure of carbon dioxide as a function of time. Samples stored in 40°C, 60°C and 80°C respectively.



Figur 13. Partialtrycket för cyklopentan som funktion av tiden. Diagrammet gäller för provbitar som förvarats vid 40°C, 60°C respektive 80°C.
Partial pressure of cyklopentan as a function of time. Samples stored in 40°C, 60°C and 80°C respectively.

I fig. (10) redovisas partialtrycket för syre. Någon entydig tolkning om diffusionens temperaturberoende går inte att göra. Vid den högsta temperaturen är syrekoncentrationen lägst. Mycket tyder på att syre förbrukas i någon kemisk reaktion, dvs oxidation av polyuretanskummet.

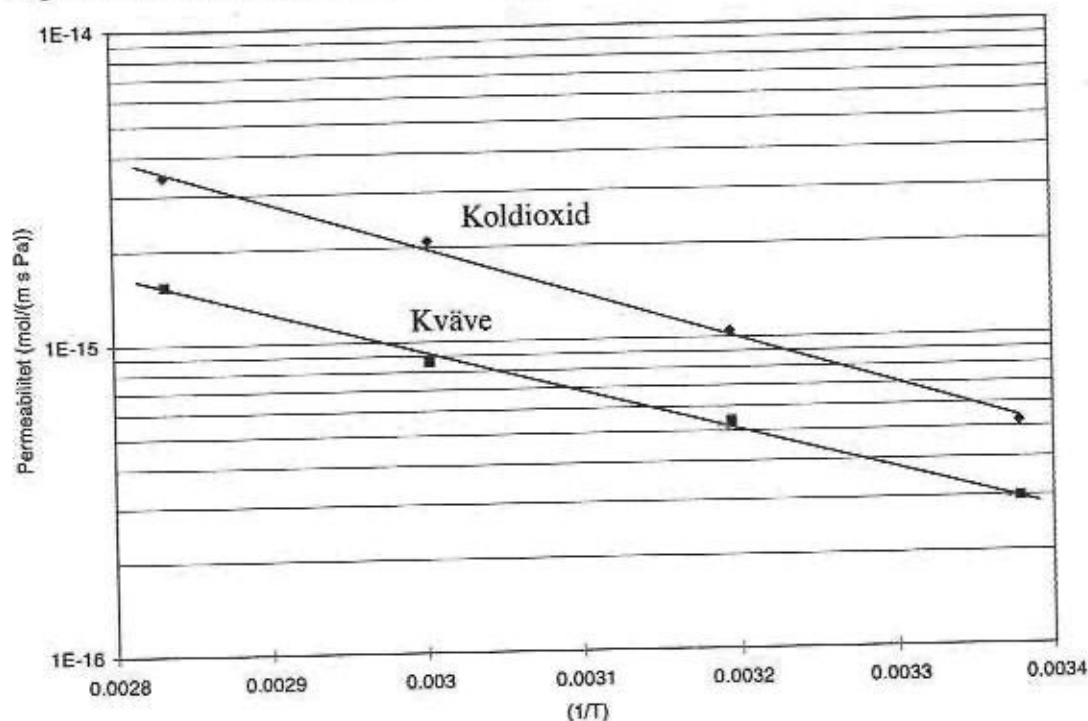
I fig. (11) åskådliggörs partialtrycket för kväve och ett klart samband mellan temperatur och partialtryckets förändring med avseende på tiden kan observeras.

Av fig. (12) framgår att partialtrycket för koldioxid ökar under en tid av 1 till 5 veckor beroende på temperaturnivå. Orsaken till att partialtrycket ökar beror troligtvis på att polyuretanskummet genomgår någon form av efterhärdning genom reaktion mellan isocyanat och vatten. Erfarenheter från gasanalyser gjorda på andra polyuretanskum har visat samma tendens. Det är därför svårt att fastställa en egentlig startpunkt då utdiffusionen börjar i den bemärkelse att en minskning av partialtrycket kan iakttagas.

För kolväten med hög löslighet i polymeren finns osäkerhet i utvärderingen av cellgasinnehållet. Fig. (13) redovisar visserligen en svag minskning av partialtrycket för cyklopentan men temperaturberoendet synes vara av samma storleksordning som provningsmetodens mätnoggrannhet.

Beräkning av polyetenrörets diffusionsegenskaper (permeabilitet)

Permeabiliteten för polyetenröret har beräknats med ledning av gasanalyserna och hypotesen att allt väsentligt diffusionsmotstånd finns i polyetenröret. Utifrån dessa antaganden erhålles permeabiliteter för koldioxid, syre, kväve och cyklopentan för polyetenröret vid olika temperaturer. Resultaten redovisas i tab. (9).



Figur 14. Permeabilitetskoefficienten för koldioxid och kväve i fjärrvärmeröret. (Beräknat för polyetenröret).
Permeability coefficient for carbon dioxide and nitrogen for the district heating pipe. (Calculation based on casing pipe).

Tabell 9. Beräknade permeabiliteter P_{eff} för polyetenröret.
Calculated permeability of the casing pipe.

Gas	Permeabilitet ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)			
	+23°C	+40°C	+60°C	+80°C
Koldioxid	$5,2 \times 10^{-16}$	$10,4 \times 10^{-16}$	$20,9 \times 10^{-16}$	$34,3 \times 10^{-16}$
Syre	$4,4 \times 10^{-16}$	$4,1 \times 10^{-16}$	$9,1 \times 10^{-16}$	$2,8 \times 10^{-16}$
Kväve	$3,0 \times 10^{-16}$	$5,4 \times 10^{-16}$	$8,6 \times 10^{-16}$	$1,4 \times 10^{-16}$
Cyklopentan	$4,3 \times 10^{-16}$	$4,3 \times 10^{-16}$	$3,4 \times 10^{-16}$	$1,3 \times 10^{-16}$

Permeabiliteten för kväve och koldioxid varierar med temperaturen som man kan förvänta sig. Se fig. (14). För syre och cyklopentan minskar permeabiliteten med ökad temperatur enligt tabellvärdena. Detta är med största sannolikhet inte korrekt eftersom den framräknade permeabiliteten inte tar hänsyn till hur mycket syre som åtgår i åldringsprocessen, oxidation av polyuretan, och inte heller hur cyklopentanens löslighet och partialtryck förändras med förhöjd temperatur.

Permeabilitetskoefficienten för gaserna ökar med ökad temperatur. I försöksserierna där temperaturen under kulvertrörets lagring varit 80°C har permeabilitetskoefficienten ökat med en faktor 6.

6. Referenser

- [1] Jarfelt, U. 1986. Test Apparatus for Pipe Insulation. Doktorsavhandling, CTH, Göteborg.
- [2] Wan, P., Vamling, L. 1992. Thermal Conductivity of Gaseous Mixtures in Foams. CTH, Göteborg.
- [3] Brodt, K. H. 1995. Thermal Insulation: CFC-alternatives and Vacuum Insulation. Doktorsavhandling. Technical University of Delft, Holland.
- [4] Svanström, M, Ramnäs, O. 1995. A Method for Analysing the Gas Phase in Polyurethane Foam. *Journal of Cellular Plastics* 31, Volume 31, July 1995 pp 375-388.
- [5] Svanström, M., Ramnäs, O., Olsson, M., Jarfelt, U. Determination of Effective Diffusion Coefficients in Rigid Polyurethane Foam. *Cellular Polymers*, Volume 16, No. 3, 1997, pp 187-193.
- [6] Svanström, M., Ramnäs, O., Olsson, M., Jarfelt, U. 1996. Mass Transfer of Carbon Dioxide through the Polyethylene Casing of District Heating Pipes. *Journal of Thermal Insulation and Building Envelopes*, Volume 21, October 1997, pp 171-184.
- [7] Smidt, H. 1996. Celleplasters langtidsisoleringssevne. Dansk Teknologisk Institut, Århus.
- [8] Svanström, M. 1997. Blowing Agents in rigid Polyurethane Foam, Doktorsavhandling, CTH, Göteborg.

APPENDIX

I. Allmänt om gaser

För en ideal gas gäller allmänna gaslagen

$$p V = n R T \quad (A1)$$

p	= tryck	(Pa)
V	= volym	(m ³)
n	= antal mol	(mol)
R	= gaskonstanten = 8,314 41	(Pa·m ³ ·K ⁻¹ ·mol ⁻¹)
T	= temperatur	(K)

En ideal gas har en volym, som endast beror på antal mol av gasen samt gasens tryck och temperatur. Vid 100 kPa och 0°C är volymen för 1 mol av en ideal gas cirka 22,71 liter. En ideal gas kan förenklat definieras som "en tänkt gas utan krafter mellan molekylerna". I verkligheten finns inga helt ideala gaser och allmänna gaslagen gäller därför inte helt exakt för verkliga gaser. För noggrannare beräkningar för verkliga gaser kan man använda utökade ekvationer, t ex

$$(p + a n^2 / V^2) (V - n b) = n R T \quad (\text{van der Waals ekvation})$$

där a och b är konstanter (van der Waals konstanter), som finns tabellerade för de flesta vanliga gaser.

En annan ekvation för noggrannare beräkningar kan skrivas som

$$p V_m = R T (1 + B / V_m + C / V_m^2 + \dots) \quad (\text{Virial ekvation eller Kammerlingh Onnes ekvation})$$

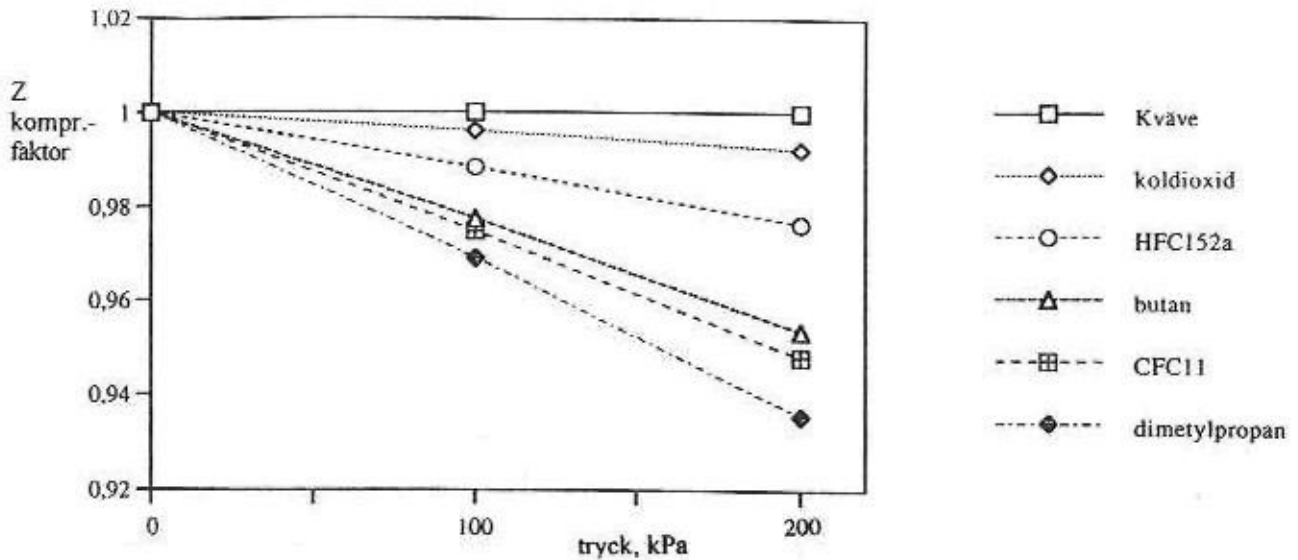
där	V_m	= V / n = volymen av 1 mol gas	(m ³ ·mol ⁻¹)
	B, C ...	= andra, tredje etc viriala koefficienten, som finns tabellerade för de flesta vanliga gaser.	

Kompressibilitetsfaktorn, Z, som anger förhållandet mellan den verkliga volymen av en gas och volymen av en ideal gas vid ett visst tryck och en viss temperatur, kan användas som ett mått på hur "ideal" en verklig gas är.

$$Z = p V_m / R T$$

där	Z	= kompressibilitetsfaktor
-----	---	---------------------------

Vid mycket låga tryck är $Z = 1$ för alla gaser, dvs vid mycket låga tryck uppträder alla gaser som om de vore ideala. Av fig. (A1) framgår hur kompressibilitetsfaktorn varierar med trycket för några olika gaser.



Figur A1. Kompressibilitetsfaktorn (Z) för några olika gaser vid 50°C och vid olika tryck.
Data: *Encyclopedie des Gaz, L'Air Liquide, Elsevier, 1976.*

I denna rapport har antagits, att alla gaser är ideala och att allmänna gaslagen gäller. Så länge man inte arbetar vid extrema tryck och temperaturer och inte ändrar trycket och temperaturen alltför mycket, blir avvikelserna från allmänna gaslagen små.

Om man har en blandning av olika gaser (1, 2, 3 . .), kan varje gas sägas svara för en viss andel av det totala trycket

$$p_{\text{tot}} = p_1 + p_2 + p_3 + \dots = \sum p_i \quad (\text{A2})$$

där p_{tot} = totala trycket (Pa)
 p_i = partialtrycket för gasen i (Pa)

Partialtrycket för en viss gas i i en gasblandning kan beräknas, om man känner till hur mycket det finns av de olika gaserna i blandningen

$$p_i = n_i \cdot p / n = x_i \cdot p \quad (\text{A3})$$

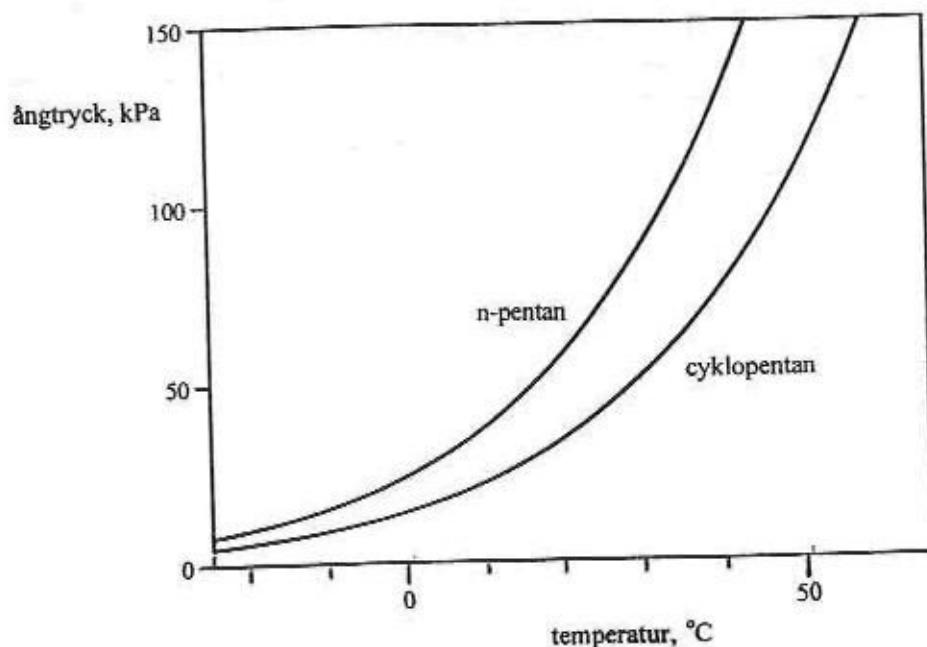
där n_i = antal mol av gasen i (mol)
 n = totala antalet mol gas (mol)
 x_i = n_i / n = molbråket av gasen i

För blandningar av ideala gaser gäller att
 $100 \cdot x_i = \text{vol\% av gasen } i.$

Om totaltrycket är 100 kPa (dvs normalt atmosfärstryck) och partialtrycket anges i kPa, gäller följande lättöverskådliga samband

$$p_i = \text{vol\% av gasen } i \quad (\text{OBS! partialtrycket anges här i kPa})$$

Ovanför ytan av varje vätskeformigt ämne finns det alltid molekyler, som har avdunstat och övergått till gasformigt tillstånd. I ett slutet system kommer det att inställa sig en jämvikt mellan ämnets vätske- och gasfas. Ämnets partialtryck i gasfasen vid jämvikt kallas ämnets ångtryck. Ångtrycket varierar med temperaturen. Alla ångtryckskurvor ser likartade ut, se fig. (A2). Vid ett ämnets kokpunkt är ångtrycket för ämnet lika stort som atmosfärstrycket, dvs cirka 100 kPa.



Figur A2. Ångtrycket för cyklopentan resp *n*-pentan som funktion av temperaturen.
 Data: B. D. Smith and R. Srivastava, *Physical science data 25, Thermodynamic data for pure compounds. Part A: Hydrocarbons and ketones*, Elsevier, 1986.

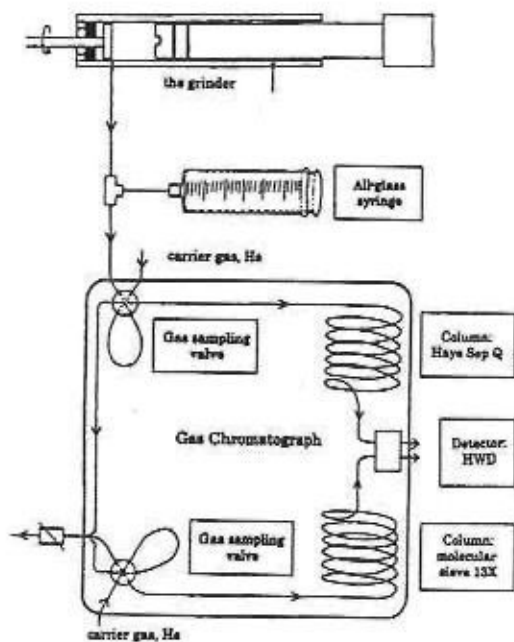
Om man försöker att överskrida ångtrycket, kommer en del av ämnet att kondensera ut som vätska. Av kurvorna i fig. (A2) kan man t ex utläsa, att ångtrycket för cyklopentan vid 20°C är ca 34 kPa. Detta betyder att det högst kan bli ca 34 vol% cyklopentan i gasfas vid 20°C om totaltrycket är 100 kPa. Om man ökar totaltrycket till 200 kPa, kan det högst bli ca 17 vol% cyklopentan i gasfasen vid 20°C.

II. Cellgasanalys

I projektet användes en vid Kemisk Miljövetenskap, Chalmers tekniska högskola, utvecklad metod för bestämning av cellgasens sammansättning och medeltrycket inuti cellerna i en skumplast.

Med hjälp av en provtagare utformad som ett tunt rör med en vass ände (ungefär som en äppelurkärnare) tas ett för skummet representativt cylindriskt prov (diameter = 20mm, längd = 60mm).

Provet fästs med trästickor vid änden av en metallkolv och skjuts in i ett rör, vars andra ände är tillsluten. Se fig. (A3). Provet befinner sig nu i ett slutet rum (volym = V_R), som under ca 10 minuter genomspolas med lustgas. Genomspolningen görs för att få bort all luft, som finns i volymen V_R och i de celler i ytskiktet, som har förstörts vid provtagningen. Om luft påvisas vid den senare kromatografiska analysen, måste den ha kommit från cellerna. Med kännedom om volymen V_R och volymen av den lustgas (V_L), som kommer att omge provet, är det möjligt att beräkna provets verkliga volym (V_P), alltså volymen av provcylindern minus det skadade yttersta cellskiktet.



Figur A3. Utrustning för cellgasanalys [4].

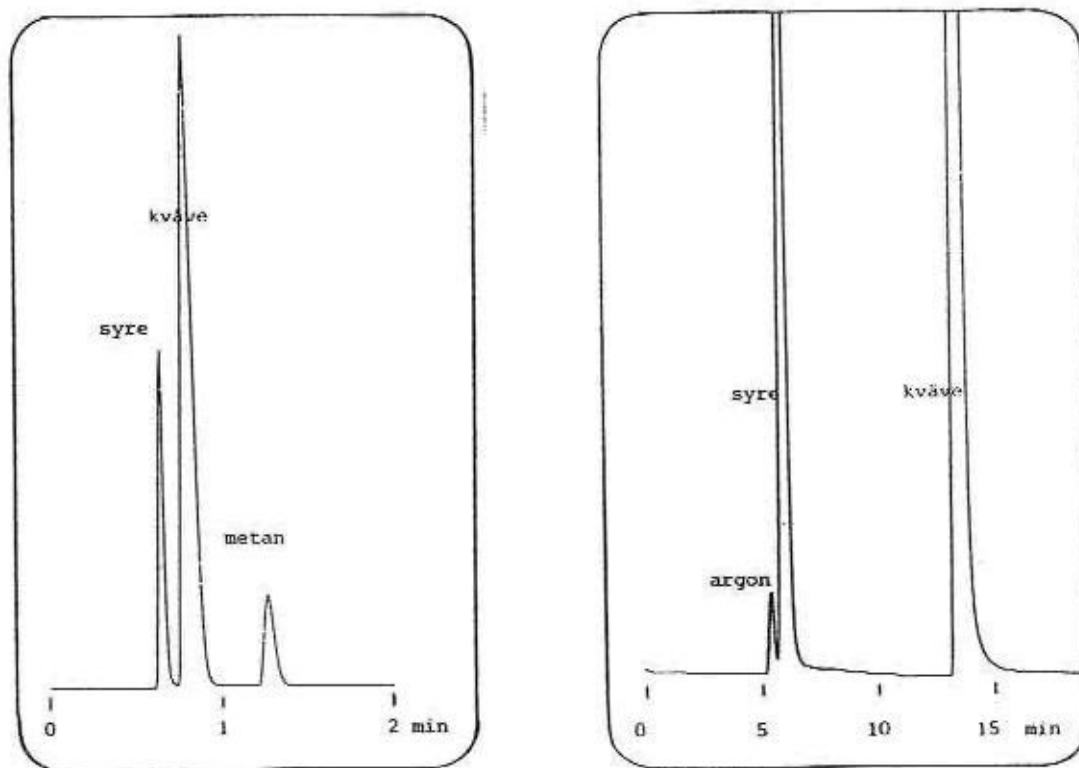
Efter avslutad genomspolning trycks provet med hjälp av metallkolven in i röret och pressas mot ett roterande svarvstål i rörets andra ände. Svarvstålet maler ner skummet till ett pulver. Den gas, som finns i cellerna, frigörs därvid och pressas ut i en glasspruta med en lätttrörlig kolv. När provet är helt nermålet, kan volymen av den frigjorda gasen avläsas i sprutan (= V_{SP}). Medeltrycket (P_{CELL}) inuti cellerna kan nu beräknas som

$$P_{CELL} = P_{ATM} \cdot V_{SP} / (V_R - V_L)$$

där P_{ATM} = atmosfärstrycket (kPa)

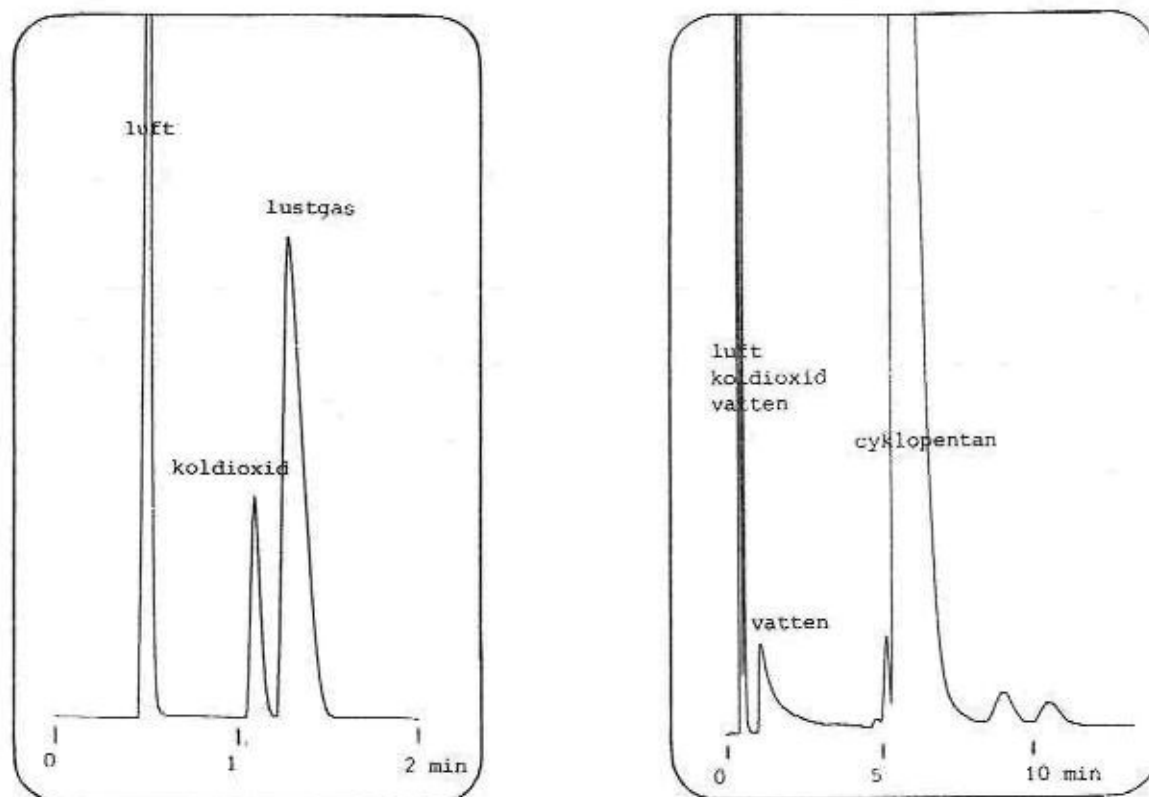
Det är viktigt att provet inte utsätts för förhöjt tryck eller förhöjd temperatur under provtagningen eller under nermalningen. Ändrat tryck och temperatur kan påverka blåsgasens löslighet i den fasta polymeren, vilket i sin tur påverkar cellgasens sammansättning.

Den gas, som finns i glassprutan, injiceras på en gaskromatograf med gasprovtagningsventil och värmeledningsförmågedetektor. Syre och kväve separeras på en gaskromatografikolonn med molekylsikt (molecular sieve 13X) vid 80°C. Ibland kan det även finnas låga halter av metan i cellgasen, vilket också kan bestämmas på denna kolonn. Genom att göra analysen vid mycket låg temperatur (ca -80°C) är det även möjligt att analysera argon. Se kromatogram i fig. (A4).



Figur A4. Det vänstra kromatogrammet visar separation av syre, kväve och metan. Det högra kromatogrammet visar separation av argon (0,9 vol%), syre och kväve i luft. Kolonn: Molekylsikt 13X, detektor TCD, bärgas: Helium. Kolonnntemperatur: 80°C (vänstra kromatogrammet), -80°C i 5 minuter, sedan +7°C/minut (högra kromatogrammet)

De övriga gaserna separeras på en kolonn med en porös polymer (HayeSep Q) vid 80°C (lustgas och koldioxid) eller 180°C (pentan, cyklopentan m fl blåsgaser). För vissa andra blåsgaser kan det vara lämpligare med lägre temperatur. I fig. (A5) visas några typiska kromatogram.



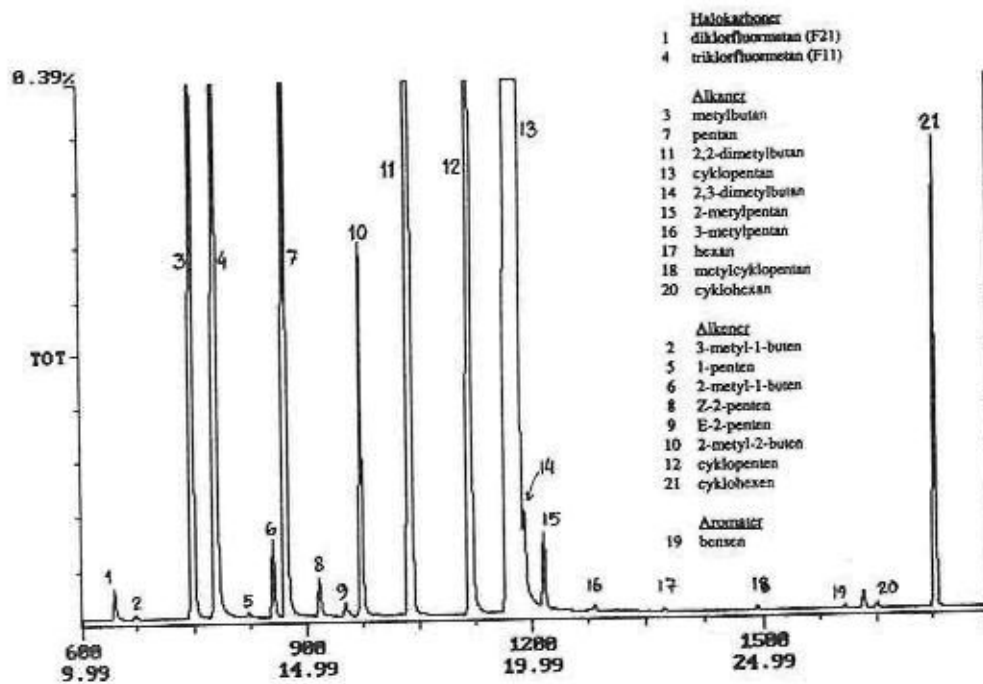
Figur A5. Det vänstra kromatogrammet visar separation av luft, koldioxid och lustgas. Det högra kromatogrammet visar analys av cyklopentan inkl. föroreningar. Kolonn: Molekylsikt 13X, temperatur: 80°C (koldioxid och lustgas) resp. 180°C (cyklopentan), detektor TCD, bärgas: Helium

De båda kolonnerna är kopplade till detektorns bärgas- resp referensgasingång. När man gör en viss analys, behöver man bara tänka på att detektorns polaritet är rätt inställd. Se även fig. (A3), som ger en schematisk bild av hela analyssystemet.

Analyssystemet kalibreras genom att gasprovtagningsslingorna fylls med enbart aktuell gas (100%). För de blåsmedel, som är vätskor vid rumstemperatur (t ex cyklopentan), görs referensgasblandningar genom invägning i en liten gastub.

För varje prov måste summan av alla koncentrationer (angivna som vol%) alltid bli 100%. Man får därför alltid en automatisk kontroll av analysens riktighet. I regel ligger de sammanlagda koncentrationerna inom 100 +/- 1%.

Ämnena identifieras genom sin retentionstid på kolonnen, dvs den tid det tar för ett visst ämne att vandra genom kolonnen vid en viss temperatur. När det gäller nya blåsmedel eller föroreningar i blåsmedel, används gaskromatografi/masspektrometri för identifieringen. Med hjälp av denna metod kan även mycket låga halter av olika cellgaskomponenter bestämmas. Kromatogrammet i fig. (A6) visar förekomsten av olika föroreningar i cellgasen i ett cyklopentanblåst skum.



Figur A6. Analys av cyklopentan inklusive föroreningar i ett polyuretanskum. Analys med hjälp av gaskromatografi/masspektrometri. Koncentrationen av föroreningarna är på ppm-nivå.

III. Diffusion

De gaser, som finns inuti en cell i en skumplast, kommer med tiden att diffundera ut genom cellväggen till den omgivande atmosfären samtidigt som luft, dvs syre och kväve, diffunderar in genom cellväggen till cellen. Denna transportprocess kommer att fortsätta tills partialtrycken för gaserna inuti cellen är lika stora som partialtrycken för gaserna i den omgivande atmosfären. Detta betyder vanligen att transportprocesserna fortgår tills det enbart finns luft inuti cellerna.

Transportprocessen kan beskrivas av Fick's lag

$$\frac{\partial p}{\partial t} = D_c \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (\text{A4})$$

där

$$D_c = D_p \cdot R \cdot T \quad (\text{A5})$$

där	t	= tid	(s)
	R	= gaskonstanten = 8,31441	(Pa·m ³ ·K ⁻¹ ·mol ⁻¹)
	M	= molmassa	(kg·mol ⁻¹)
	D _c	= diffusionskoefficient (map koncentration)	(m ² ·s ⁻¹)
	D _p	= diffusionskoefficient (map partialtryck)	(mol·m ⁻¹ ·s ⁻¹ ·Pa ⁻¹)
	p	= partialtryck	(Pa)
	x	= avstånd	(m)
	T	= temperatur	(K)

I denna studie har D_p angivits i sorten (mol·m⁻¹·s⁻¹·Pa⁻¹), dvs antalet molekyler per tidsenhet och ytenhet vid en viss tryckskillnad. Alternativt skulle D_p kunna ha angivits i sorten (kg·m⁻¹·s⁻¹·Pa⁻¹), dvs massa per tidsenhet och ytenhet vid en viss tryckskillnad. När man gör jämförelser av diffusionen för gaser med olika molmassor, kan det vara särskilt överskådligt att använda den förstnämnda sorten baserad på mol.

Diffusionsprocessen i en skumplast av PUR inkluderar diffusion i gasen inuti cellerna och diffusion genom cellväggarna av fast polymer. I ekvationen (A4) betraktas polyuretan-skummet emellertid som ett homogent material och diffusionskoefficienten D_c motsvarar då den effektiva diffusionskoefficienten D_{eff}.

$$D_c = D_{eff}$$

Där D_{eff} = effektiva diffusionskoefficienten (m²·s⁻¹)

I ett fjärrvärmerör påverkas diffusionen eller masstransporten av gasmolekyler dels av aktuella **material**, polyuretanisoleringen och av omgivande polyetenrör, dels av vilken gas vi

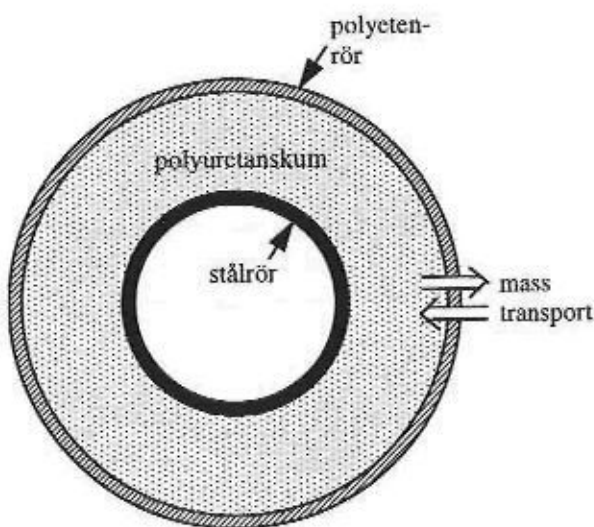
har att göra med och skillnaden i **partialtryck** inuti skummet och ute i luften, samt vilken **temperatur** som råder.

Biot's tal (Bi) kan ses som ett mått på relationen mellan diffusionsmotstånden för gaser i polyuretanisoleringen och polyetenröret. Om $Bi > 1$ innebär detta att skummets diffusionsmotstånd är större än mantelrörets och om $Bi < 1$ är mantelrörets diffusionsmotstånd större.

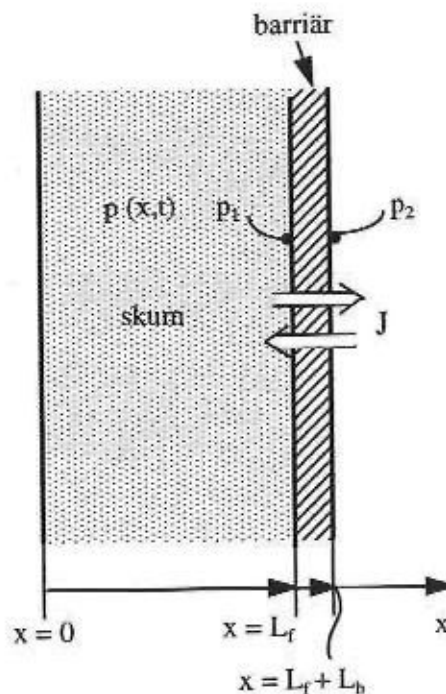
$$Bi = \frac{D_{p,b}}{L_b} \cdot \frac{L_f}{D_{p,f}} = \text{Biot's tal} \quad (A6)$$

där	L_b	= polyetenrörets (barriärens) tjocklek	(m)
	L_f	= polyuretanskummets tjocklek	(m)
	$D_{p,f}$	= diffusionskoefficient för polyuretanskummet	($\text{mol} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)
	$D_{p,b}$	= diffusionskoefficient för polyetenröret	($\text{mol} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$)

Fjärrvärmerör



En-dimensionell modell



Figur A7. En en-dimensionell modell av masstransporten genom ett polyetenrör.

Barriärens diffusionsmotstånd är stort ($Bi < 1$)

Om Biot's tal (Bi) är litet, $Bi < 1$, kan man uppfatta polyetenrörets diffusionsmotstånd som helt dominerande. Om så är fallet, kan kulvertrörets isolering betraktas som en volym av gas omsluten av en diffusionsbarriär. Alla koncentrationsförändringar i denna volym antas ske omedelbart och följaktligen är partialtrycket lika i alla delar av isolerskummet. Partialtrycket i skumvolymen vid en viss tid kan då tecknas

$$\frac{p(t) - p_2}{p_0 - p_2} = e^{-\left(\frac{t}{t_c}\right)} \quad (A7)$$

där

$$t_c = \frac{L_b \cdot V}{D_{p,b} \cdot A \cdot R \cdot T} \quad (A8)$$

där

$p(t)$	= partialtrycket vid tiden t	(s)
p_0	= partialtryck i PUR-skummet vid tiden $t=0$	(s)
p_2	= partialtrycket vid PE-rörets (barriärens) utsida	(Pa)
A	= area	(m ²)
V	= volym	(m ³)

Barriärens diffusionsmotstånd är litet ($Bi > 1$)

I det fall polyetenrörets diffusionsmotstånd inte dominerar, måste hänsyn tas till diffusion i polyuretanmaterial. I fig. (A7) visas en principbild av en en-dimensionell modell som beskriver diffusionen i polyuretan och polyeten. Tryckfördelningen i polyuretanskummet kan då tecknas:

$$\frac{p(x,t) - p_2}{p_0 - p_2} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2 \sin \lambda_k}{\lambda_k + \cos \lambda_k \sin \lambda_k} \cdot \cos\left(\frac{\lambda_k x}{L}\right) \exp\left(-\lambda_k^2 \cdot \frac{D_{eff} t}{L^2}\right) \quad (A9)$$

där

$$\lambda_k \cdot \tan \lambda_k = Bi \quad (A10)$$

Medeltrycket för cellgasen i polyuretanisoleringen kan tecknas

$$\frac{p - p_2}{p_0 - p_2} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2 \sin^2 \lambda_k}{\lambda_k + \cos \lambda_k \sin \lambda_k} \cdot \frac{1}{\lambda_k} \cdot \exp\left(-\lambda_k^2 \frac{D_{eff} t}{L^2}\right) \quad (A11)$$

RAPPORTFÖRTECKNING

Samtliga rapporter kan beställas hos Energikontorets Förlagsservice.
Telefon: 08 - 677 26 00, Telefax: 08 - 677 26 05

<i>Nr</i>	<i>Titel</i>	<i>Författare</i>	<i>Publicerad</i>
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 Råbgerger 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	Ökat värmeunderlag i fjärrvärmevärmade byggnader	Harald Andersson	
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 kulvertor "Hisings-Backa"	Ulf Jarfelt	dec-97
17	Kulvertförläggning med befintliga massor	Jan Molin Gunnar Bergström Stefan Nilsson	dec-97

<i>Nr</i>	<i>Titel</i>	<i>Författare</i>	<i>Publicerad</i>
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
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 Wallentun	juni-98
24	Fjärrvärmerörens isolertekniska långtidsegenskaper	Ulf Jarfelt Olle Ramnäs	juni-98

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 Wårdshus i Eksjö kommun, 10-11 december 1996	Lennart Thörnqvist	jan-98

Förteckning över tidigare publicerade rapporter från Värmeforsk Hetvattenteknik som kan beställas hos Energikontorets Förlagsservice.

DISTRIBUTIONSTEKNIK

540	Expansionskuddar för direktförlagda fjärrvärmeledningar - med huvudinriktning på mineralullsprodukter	Sture Andersson Bjarni Jansson	jun-95
525	Rundgångars ekonomiska betydelse för fjärrvärmenäten Investerings-, drift- och underhållskostnader	Peter Herbert	feb-95
463	Sänkt drifttemperatur i fjärrvärmenät - fältmätningar och bestämningar av fysikaliska egenskaper för cellbetong	Jan Molin Ronny Nilsson	dec-92
450	Utveckling av metoder för kvalitetssäkring av mantelrörsskarvar	Lars-Åke Cronholm Rolf Westin	jul-92
446	Bärförmåga hos CFC-fri kulvertisolering vid drifttemperatur Del 1: Provningsmetod för bestämning av axiell skjuvhållfasthet hos kulvertrör Del 2: Krypning vid radiell tryckbelastning	Ulf Jarfelt Gunnar Bergström Jonas Karlsson	jul-92
445	Dircktläggning av fjärrvärmerör	Jan Fallsvik Alf Lindmark Eva Pettersson	jul-92

<i>Nr</i>	<i>Titel</i>	<i>Författare</i>	<i>Publicerad</i>
429	Freonfria isolermaterial för fjärrvärmekulvertar. Vacuumpulverisolering och CO2-blåst polyuretanskum	Bert Oddving Heimo Zinko	maj-92
412	Läcksökning i fjärrvärmekulvertar	Heinz Thurner	dec-91
364	Underhållsstrategi för distributionsnät. Förstudie	Lennart Strömwall Leif Lemmeke	mar-90
340	Corona-behandlingens betydelse för mantelrör till fjärrvärmeledningar samt metod och krav för kvalitetskontroll	Lars-Eric Jansson	maj-89
335	Anvisningar för schaktning och andra arbeten i närheten av direktskummande PUR-kulvertar	Håkan Carlsson Jan Molin	apr-89
318	Sänkt drifttemperatur i fjärrvärmenät - konsekvenser i distributionsnät	Jan Molin Ronny Nilsson Helge Bergström	okt-88
315	Skumkvalitet vid låga omgivningstemperaturer och varierande medeltemperaturer	Johan Ljungqvist	okt-88
286	Larmsystem - Kompatibilitet	Christer Bodin John Ljungqvist Tor Rundström	dec-87
260	Skumkvalitet vid låga omgivningstemperaturer	Lars Blomqvist John Ljungqvist	mar-87
259	Kvalitetsprovning av PUR-skumisolering	John Ljungqvist Rolf Westin	mar-87
258	Spänningsanalys av fjärrvärmeledningar Del 3. Dimensionerings- anvisningar och dimensioneringsprogram för T-stycken	Sture Andersson Håkan Carlsson Jan Molin	mar-87
257	Skador på mantelrörskarvar	John Ljungqvist Bert Oddving Rolf Westin	mar-87
256	Markförlagda fjärrvärmeledningars temperaturhöjande effekt för intilliggande ledningar	Håkan Carlsson Jan Molin	mar-87
249	Metod för röntgenradiografering av isolerskikt i kulvertar för fjärrvärmeledningar	Stig Dahn	feb-87
237	Underhållsplanering av fjärrvärmenät	Thomas Asp Anders Eriksson Håkan Danielsson Stig Hård Bertil Wiktorén	aug-86
226	Skumutfyllnad i kulvertskarvar	Lars Blomqvist John Ljungqvist	maj-86

<i>Nr</i>	<i>Titel</i>	<i>Författare</i>	<i>Publicerad</i>
201	Friktionsfixerade fjärrvärmeledningar. Fältmätningar i Lund. Del 2	Dan Olofsson Jan Molin Kurt Bergendorff	aug-85
FJÄRRVÄRMECENTRALTEKNIK			
556	VÄRMEVÄXLARRENOVERING - Materialpåverkan vid kemisk rengöring av värmeväxlare	Lars-Åke Crönholm	dec-95
546	Försmutsningsförlopp i plattvärmeväxlare för fjärrvärmeabonnentcentraler	Janusz Wollerstrand Svend Frederiksen	aug-95
545	Funktions- och kvalitetsprovning av abonnentcentraler i fjärrvärmesystem	Håkan Walletun Peter Gummérus	aug-95
505	Prestandabestämning och förbättring av abonnentcentraler < 50 kW	Lena Råberger Peter Gummérus Håkan Walletun	apr-94
413	Skadinverntering, Abonnentcentraler	Bo Östlund	dec-91
411	Inverkan på returtemperaturen vid ackumulering av tappvarmvatten i abonnentcentraler	Sture Sikström	dec-91
365	Dynamisk provning av värmeväxlare med hjälp av processidentifiering	Håkan Walletun Bengt-Göran Bergdahl Bert Oddving	mar-90
360	Laboratorieprovning av villaabonnentcentraler	Johan Winberg	dec-89
355	Fjärranalys av undercentraler	Joakim Marklund	okt-89
321	Undercentralers reglering	Michael Thiede	okt-88
302	Diagnostikutrustning för 2-stegskopplade abonnentcentraler	Ulf Jansson	apr-88
272	Avkylning av fjärrvärmevatten i befintliga abonnentcentraler	Annika Winberg Sven Werner	aug-87
267	Undercentraler - Litteraturstudie av tidigare arbeten	Raija Leppänen	maj-87
255	Inkoppling av varmvattenberedare vid installation av värmepump	Göran Dahlén	mar-87
MÄTTEKNIK			
547	Jämförelsemätningar av flödes hastighet mellan ultraljudsmätare av Clamp-On typ och debiteringsmätare i fjärrvärmeabonnentcentraler	Jerker Delsing Bernt Svensson	aug-95
SYSTEMTEKNIK			
534	Utvärdering av fjärrkyla i Västerås	Lars Lindgren Urban Eklund	feb-95

<i>Nr</i>	<i>Titel</i>	<i>Författare</i>	<i>Publicerad</i>
527	Friktionsnedsättande tillsatserns inverkan på miljön - Del I	Henrik Bjurström Staffan Grönholm Bengt-Åke Nystrand	feb-95
512	Friktionsnedsättning i fjärrvärmenät genom tillsats av tensider- En teknisk och ekonomisk bedömning	Henrik Bjurström Lars-Åke Cronholm	jul-94
481	Tryckväxlare - en anordning för effektivisering av fjärrvärmesystem	Bror-Arne Gustafson	sep-93
363	Leveranssäkerhet i fjärrvärmesystem	Sture Andersson Carl Mattsson	dec-89
320	Leveranssäkerhet vid värmedistribution	Lennart Josefsson Hans Åkesson	okt-88
298	Inventering av datorprogram för simulering och optimering av fjärrvärmesystem	Hans Gransell Anders Östergren	mar-88

RAPPORTER FRÅN ANDRA FORSKNINGS- GRUPPER

483	Korrosion hos emaljerade ytor i varmvattensystem	Britt-Marie Svensson	sep-95
380	Korrosionsstudier av emaljerade varmvattenberedare	Britt-Marie Svensson	nov-90
343	Färgämne för läckageindikering i fjärrvärmesystem	Torsten Bauer Björn Carlsson Folke Persson	jul-89
294	Akkumulatorsystem för driftutjämning	Bertil Köhler	mar-88
221	Säkerhet vid elpannedrift	Bertil Köhler	apr-86

Svenska Fjärrvärmeföreningens Service AB och Statens Energi-
myndighet bedriver ett kollektivforskningsprogram inom området
hetvattenteknik. Forsknings- och utvecklingsprogrammet fokuseras
på distributionsteknik, fjärrvärmecentralteknik och systemteknik.

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 08 - 677 26 00, Telefax 08 - 677 26 05