



Forskning och  
Utveckling

FOU 2002:73

# FUKTDIFFUSION I PLASTRÖRSYSTEM

*Heimo Zinko, ZW Energiteknik*

*Gunnar Bergström och Stefan Nilsson, SP*

*Ulf Jarfelt, Chalmers Tekniska Högskola, Inst för Byggnadsfysik*



# FUKTDIFFUSION I PLASTRÖRSYSTEM

*Heimo Zinko, ZW Energiteknik*

*Gunnar Bergström och Stefan Nilsson, SP*

*Ulf Jarfelt, Chalmers Tekniska Högskola, Inst för Byggnadsfysik*

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

## Sammanfattning

Plaströrsystem anses ha vissa fördelar i mindre system, när förutsättningar tillåter lägre tryck och temperatur än vad som är fallet inom den konventionella fjärrvärmetekniken. Framför allt den enklare rörinstallationen resulterar under gynnsamma förutsättningar i lägre totalkostnader /1/. De företag som tillverkar plaströrsystem har nu utvecklat tillförlitliga tekniker, som gör att livstiden på plaströr anses vara minst lika lång som för konventionella rörsystem, om vissa förutsättningar avseende driftbegränsningar för temperatur (90°C) och tryck (6 Bar) är uppfyllda. Framförallt har dessa system också fått barriärer mot syrediffusion vilket gör att den tidigare (på åttiotalet) befarade korrosionsrisken inte längre utgör ett problem.

Ett annat problem, som dock fortfarande ger lite huvudbry, är fuktvandring (permeation av fukt), såväl från värmemediet genom medieröret som från utsidan genom manteln, och dess eventuella ackumulering i isoleringen. Fukten gör - tillsammans med utdiffusionen av skumgaserna - att värmeledningen i isoleringen försämras med tiden. Beroende på permeationskoefficienterna i medieröret och i manteln kan fukten mer eller mindre ackumuleras i isoleringen, i värsta fall kan isoleringen blötläggas.

Hittills saknas säkra erfarenheter från fältet beträffande fuktinverkan. Ibland har man hittat spår på kondens innanför manteln, men inga bevis på försämrad isoleringsförmåga har rapporterats i Sverige. Författarna fick därför ett uppdrag av Svenska Fjärrvärmeföreningen att undersöka kunskapsläget på området fuktdiffusion i rör.

Det uppdraget vi fick från Svenska Fjärrvärmeföreningen var tredelat, nämligen att

- a) kartlägga kunskapsläget angående fuktdiffusion i plaströrsystem resp i rörisolering i allmänhet
- b) att undersöka om det finns beräkningsmodeller som kan användas för att simulera fukttransporten och dess inverkan på isoleringsförmågan i rörsystem
- c) att föreslå ett program för framtida forskningsarbeten på området.

Från tidigare arbeten visste vi att undersökningar på området pågick i första hand i Danmark och Tyskland. Vi besökte således IMA i Dresden och FFI i Hannover för att uppdatera kunskapsläget. Innan dess hade vi haft kontakt med Lögstör Rör A/S i Danmark.

Det visade sig att ett omfattande laboratoriemättningsprogram har genomförts i Tyskland, men att det trots detta återstod en hel del frågetecken beträffande fuktackumuleringen och förändringen av värmeisoleringsförmågan med tiden. Huvudresultatet var framför allt att skumgaserna diffunderade överraskande snabbt ur isoleringen och att fukthalten ökade kontinuerligt under en utvärderingstid av ett år. Vidare visade det sig att skummet i flexibla plaströrsystem i alla avseenden är sämre än referensskummet som används i isoleringsblock (och som liknar det som används i stålrörsystem).

Från Lögstör Rör A/S fick vi del av forskningsresultat som dock visade att fuktproblemet i Lögstörs fjärrvärmerör av plast är litet på 30 års sikt. Värmeisolereringen av plaströr försämras på grund av fuktvandring (fuktpermeation) med 3-6 % och sämst ca 10 %, om ledningstemperaturen ligger lägre än 80°C (men under några 100 timmar per år så hög som 95°C). Resultaten har verifierats i fältförsök.

Beträffande beräkningsmodeller så är det tydligt, att det finns lämpliga program för diffusionsberäkningar i utlandet och att dessa kan användas för simuleringar av plast- och stålrörssystem. Teorin är väl utarbetad och tillämpad i Danmark och Tyskland. I avsnitt 10 demonstrerar Stefan Nilsson att en beräkningsmodell - med några förenklingar baserade på den danska modellen - väl kan beskriva de danska resultaten. Modellen kan självklart förfinas och vidareutvecklas för att åstadkomma ett designverktyg för skräddarsydda plaströrssystem. Genom undersökningen av kunskapsläget blev det dock också klart, att en finare modell inte lönar sig förrän många av materialparametrarna, såsom permabiliteskoefficienter för PEX- och PE-material och sorptionskoefficienter för PUR-skum, har uppmätts med bättre noggrannhet än vad som är fallet idag.

Som huvudresultat kan nämnas att beräkningarna för fjärrvärmerör visar att diffusion av vattenånga i plaströrssystem med skum med slutna celler (PUR) är ett mindre problem. Visserligen ökar värmeledningen med tiden, men i praktisk drift kan det röra sig om ca 10% på 30 års och 20% försämring på 50 års driftid.

Beträffande kylrör med isolering med slutna celler visar beräkningarna, att omvänd diffusion från mark in i isoleringen kan förekomma. Processen är dock mycket långsam pga av de låga involverade temperaturerna. I plaströrssystem som används för kyldistribution är effekten försumbar. I stålrörssystem, å andra sidan, kan korrosion förekommer, eftersom vattenångan kondenserar på stålrörets utsida, och kan bidra till att begränsade mängder rost bildas.

Slutligen diskuteras det framtida forskningsbehovet. Framtagning av en förfinad beräkningsmodell och verifiering genom laboriemätningar av de väsentliga materialkonstanterna står högst på förslagslistan. När detta är gjort kan detaljlösningar undersökas, såsom tillämpning av optimala designlösningar för värme- och kylsystem eller för skräddarsydda plaströr för värmeglesa områden, t ex med speciella fuktbarriärer, för att nämna några exempel.

## **Tack**

Författarna vill härmed tacka alla som har bidragit till genomförandet av detta uppdrag:

- Svenska Fjärrvärmeföreningen och Statens Energimyndighet STEM för finansiering av projektet.
- Forskningsinstitutionerna "IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH" i Dresden samt "FFI Fernwärme - Forschungsinstitut in Hannover e. V." i Tyskland för att de delat med sig av sina resultat.
- Företaget Lögstör Rör A/S i Danmark samt Leif Amby, Amby-Konsult för att de förklarat sina beräkningar och resultat från fältförsöken.

## Summary

Plastic pipe systems are considered to have certain advantages in small distribution systems when the conditions allow lower pressures and temperatures than in the case with conventional district heating technique. Above all the simplest pipe installation will at the best assumption result in lower total costs /1/. The manufacturers of plastic pipe systems have now developed reliable techniques making the life-time of plastic pipes considered at least as long as for conventional pipe systems provided that certain conditions as regards restrictions for temperature (90°C) and pressure (6 bar) are fulfilled. Above all, those systems also have got barriers against diffusion of oxygen meaning that there is no longer a problem with the earlier (in the 1980-ies) feared risk of corrosion.

However, another problem still causing some trouble is permeation of humidity - from the heating medium through the medium pipe as well as from outside through the jacket and a possible accumulation in the insulation. Together with the out-diffusion of the foam gases the humidity will deteriorate the heat conduction in the insulation as time goes by. The humidity might be more or less accumulated in the insulation depending on the coefficient of permeability; in the worst case the insulation could be soaked.

So far, there are no certain experiences from the field regarding the influence of humidity. Sometimes signs of condensation were found within the jacket, but in Sweden no proofs of deteriorated insulation capacity were reported. Therefore, the Swedish District Heating Association asked the authors to investigate the state of knowledge within the field of diffusion of humidity in plastic pipes.

The task was in three parts, thus to

- a) make a survey of the state of knowledge as regards diffusion of humidity in plastic pipe systems as well as in insulation of tubes in general,
- b) investigate, if there are data programs, which can be used use for simulation of the transport of humidity and its influence on the capability of insulation in pipe systems
- c) suggest a program for future studies in the field.

From previous works, we knew that in Denmark and Germany there were studies in progress in this field. We thus visited IMA in Dresden and FFI in Hannover in order to bring the state of knowledge up to date. Previously, we had been in contact with Lögstör Rör A/S in Denmark.

It turned out that in Germany a laboratory program had been carried out in large scale, but in spite of that there were quite a lot of questions open concerning accumulation of humidity and change of capacity of heat insulation as time goes by. The main result was above all that the foam gases were found to diffuse surprisingly quickly out of the insulation and that the degree of humidity increased continuously during a time of evaluation of one year. Furthermore, it was found that the foam in flexible plastic pipes in all respects is worse than the reference foam used in blocks of insulation (similar to what is used in steel pipe systems).

From Lögstör Rör A/S in Denmark we have been informed of results of studies showing, however, that the problem with humidity in the Lögstör culvert is small when considering a period of 30 years. The heat insulation of plastic pipes due to permeation of water vapour is deteriorated with 3 - 6 % and at the worse with 10 %, if the supply temperatures are lower

than 80°C (but during a couple of 100 hours a year as high as 95°C). The results have been verified in tests in the field.

Concerning models of calculation it is obvious that there are suitable programs abroad for calculation of diffusion and that they can be used for simulation of pipe systems of plastic and steel. The theory is carefully worked out and applied in Denmark and Germany. In Chapt. 10 Stefan Nilsson demonstrates that a diffusion model - with some simplifications based on the danish model - can very well describe the Danish results. Of course, the model can be refined and developed further to bring about a design tool just tailor-made for plastic pipes systems. However, from the analysis of the state of knowledge it was also clear that a more accurate model is only worthwhile when many of the material parameters such as coefficients of permeability for PEX and PE material and coefficients of sorption for PUR foam have been determined with a better accuracy than today.

A principal result from the calculations for district heating pipes is that diffusion of water vapour is a minor problem in plastic pipe systems insulated with closed cellular foam (PUR). In practical applications, the thermal conductivity increases slowly in time with a typical amount of about 10 % in 30 years and 20 % in 50 years, respectively.

Regarding chill distribution pipes with closed cellular foam, the calculation show that diffusion from surroundings towards the medium pipe takes place. But the process is very slow because of the low temperatures involved. Its effect in plastic pipe systems is negligible. However, in steel pipe systems, the result will be water condensation on the outside of the steel pipe, which in turn will result in a limited formation of rust.

At last, the future need for research is discussed. A refined model for calculation and verification by means of measurements in a laboratory of the main costs for material are at the top of the list of suggestions. Investigation of more detailed solutions comes next, such as application of optimal solutions of design for heating and cooling systems or for plastic pipes specially designed for areas with low heat density, for instance with special humidity barriers of, to mention some examples.

## **Thanks**

The authors would like to thank all those who have contributed to the implementation of this project:

- The Swedish District Heating Association and the Swedish Energy Agency STEM for financing.
- The research institutions "IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH" in Dresden and "FFI Fernwärme - Forschungsinstitut in Hannover e. V." in Germany for informing us of their results.
- The company Lögstör Rör A/S i Danmark and Leif Amby, Amby-Konsult for explaining their calculations and results from tests in the field.

## Innehåll

Sammanfattning.....	2
Summary .....	4
Innehåll .....	6
1. Bakgrund .....	8
2. Problemformulering.....	9
3. Teori för värmetransport i rörisolering .....	10
3.1. Värmeledning .....	10
3.2. Diffusion av vattenånga i fjärrvärmerör .....	11
4. Beräkningsexempel .....	13
4.1. Fuktbildning i isoleringen.....	13
4.2. Lögstörs beräkningsmodell.....	16
5. Materialparametrar .....	18
6. Laboratiemätningar .....	20
6.1. Provningar på isoleringsmaterial (IMA).....	20
6.2. Provningar på plastmedierörssystem (FFI) .....	20
6.3. Sammanfattning av mätresultat från Tyskland.....	22
6.3.1 Skumegenskaper (IMA) .....	22
6.3.2 Fuktinverkan på mekaniska egenskaper (IMA).....	22
6.3.3 Värmeledningsförmåga (IMA) .....	22
6.3.4 Fuktinverkan på värmeledningsförmågan (IMA).....	22
6.3.5 Fuktmätningar på rörssystem (FFI).....	23
6.3.6 Värmeledning på rörssystem (FFI) .....	24
6.3.7 Elektronisk fuktmätning .....	25
6.3.8 Axial fuktspridning vid läckage .....	26
6.4. Laboratiemätningar hos Lögstör Rör A/S, Danmark .....	26
6.4.1 Fuktdiffusion .....	26
6.4.2 Permeabilitetsparametrar .....	27
6.4.3 Diskussion av resultaten från Lögstörs laboratiemätningarna .....	27
7. Fältförsök.....	29
8. Dagsläget .....	30
8.1. Tyskland .....	30
8.1.1 Sammanfattning av tyska resultaten .....	30
8.2. Danmark .....	30
8.2.1 Sammanfattning av danska resultaten .....	31
9. Sammanfattande värdering av mätningarna i Tyskland och Danmark.....	32
10. Simuleringar av fukttransport i plastmedierörssystem.....	34
10.1. Fukttransport i plastmedierörssystem .....	34
10.2. Beräkningsmetodik.....	36
10.2.1 Vad krävs av beräkningsmodellen?.....	37
10.3. Enkel beräkningsmodell för vattenackumulering.....	38
10.3.1 Approximationer.....	38
10.3.2 Beteckningar.....	39



10.3.3	Fysikaliska data .....	40
10.3.4	Teoretisk bakgrund .....	40
10.3.5	Kondensationsvillkor .....	42
10.3.6	Vattenackumulering .....	43
10.3.7	Jämviktstillstånd .....	43
10.4.	Beräkningsexempel Fjärrvärmerör .....	44
10.4.1	Kondensationsvillkor .....	44
10.4.2	Vattenackumulering .....	44
10.4.3	Fuktens inverkan på värmeförlusterna .....	46
10.5.	Beräkningsexempel Kylrör .....	47
10.6.	Slutsatser avseende ångdiffusion i rörisolering .....	48
11.	Förslag till fördjupade studier av plastmedierörssystem .....	50
11.1.	Generell beräkningsmodell .....	50
11.2.	Isoleringsförmågans försämring med tiden .....	50
11.2.1	Diffusionsegenskaperna hos mantel- och medierör .....	50
11.2.2	Sorptionssegenskaperna hos PUR-skum .....	50
11.2.3	Verifieriande mätningar .....	50
11.3.	Alternativa barriärmaterial .....	50
11.4.	Rörssystem för områden med låg värmetetätet .....	51
11.5.	Alternativa plaströrssystem .....	51
11.6.	Kylrör .....	51
	Referenser	52
	APPENDIX 6.1 .....	53

# Fuktdiffusion i plaströrsystem

## 1. Bakgrund

1999 publicerades inom IEA DH&C Annex V en manual över plaströrsystem för fjärrvärme, /1/. I denna handbok konstaterades att en av de obesvarade frågorna rörande driftsäkerhet med plaströrsystem är vattendiffusionen genom medierörets plastmaterial ut till isoleringen. Det rapporterades då även om pågående undersökningar /5/ hos Fjärrvärmeforskningsinstitutet FFI, Hannover, Tyskland, samt om analyser som genomfördes hos Lögstör Rör A/S i Danmark /2,3,4/.

De tyska försöken genomfördes på en rad olika rörfabrikat och visade att vattenackumuleringen berodde på hela systemets utförande, dvs. samverkan av diffusion genom medierörets väggar till isoleringen och därifrån vidare genom mantelns väggar till den omgivande marken. Processen beror på de olika involverade plastmaterialens temperaturavhängiga permeabilitet och innebär att plaströrsystemens isoleringsförmåga kan påverkas av fukten, beroende på materialegenskaperna i och konstruktionen av respektive system. Resultaten är dock inte helt entydiga, bl a varierar de med skummets beskaffenhet, densitet och drivgas. Av den anledningen påbörjades även nya försök i Tyskland.

De danska analyserna avsåg i första hand utveckling och verifiering av en teoretisk modell som tar hänsyn till den temperaturberoende ångdiffusionen från medieröret till isoleringen. Det framkom med tydlighet i dessa studier att temperaturen och temperaturgradienten spelar en viktig roll för vattenackumuleringen. Framförallt blev det klart att manteln måste vara relativt diffusions-öppen i förhållande till vattendiffusionen från medieröret så att fuktackumulering kan undvikas. I en fortsättningsstudie /3/ gjorde samma Lögstör-grupp en analys av ett fjärrvärmerörsystem i Naestved, Danmark. Det visade sig för Lögstör-röret att inverkan av vattenackumuleringen på isoleringsförmågan var låg, men ej försumbar.

Hur som helst förefaller det som om man i dessa båda länder, som hanterar de största mängderna plaströrsystem, anser att fuktdiffusionsprocessen är en av de återstående osäkerhetsfaktorer, som måste klaras ut för att fjärrvärmerör med medierör av plast ska få den tillförlitlighetsstämpel man förutsätter att de borde ha med hänsyn till plaströrens övriga fördelar.

Således genererades med stöd av Fjärrvärmeföreningen det här projektet i syfte att sammanställa dagens kunskapsläge vad gäller fuktackumulering i plaströrsystem och att generera eventuella studier för att lösa några av de återstående problemen.

## 2. Problemformulering

Plaströrssystem för fjärrvärmedistribution skiljer sig från vanliga mantelrörssystem med stålmedierör genom att plastmedieröret, som i de flesta fall är ett PEX-rör, uppvisar viss genomsläpplighet för vatten. Detta medför att man under fjärrvärmerörets drifttid måste räkna med en viss halt av vattenånga - eller ännu sämre – kondensat i isoleringen. Eftersom fjärrvärmerörets mantel normalt också är av plast, i allmänhet även permeabel lågdensitets- eller mediumdensitets-polyetylen, så är kvantiteten på fuktansamlingen i isoleringen beroende på differensen *mellan in- och utdiffusion av fukt*. Fukthalten påverkar i sin tur följande egenskaper/funktioner av plastmedierörssystemet:

- Värmeledning
- Hållfasthet (särskilt tryck- och skjuvhållfasthet)
- Nedbrytning (livstid)

De ovannämnda egenskaperna bestämmer i mångt och mycket fjärrvärmerörets tekniska livslängd och inte minst genom värmeförlusterna driftekonomin för plaströrsnät. Pga ökat intresse för mindre och enklare nät med lägre tryck- och temperaturstandard (se SVENSKA FJÄRRVÄRMEDIFÖRENINGEN –Tekniska bestämmelser för PEX-rör med kopplingar i fjärrvärmesystem /12/ ) är det därför angeläget att sammanställa de erfarenheter och undersökningar som finns från plastmedie-rörssystem. Källorna för dessa erfarenheter kommer i första hand från Tyskland och Danmark.

Utgående från denna kunskapsöversikt visas sedan i avsnitt 3 att det går att beräkna fuktens inverkan på ledningsförmågan på ett förhållandevis enkelt sätt jmf med den mera utförliga teorin som man använder i Danmark och med tillräcklig precision så länge värdena på de ingående materialparametrarna är relativt osäkra.

Till slut sammanställs de områden som vi anser är otillräckligt utforskade och skisseras förslag till ett forskningsprogram på området fukt i rörisolering.

### 3. Teori för värmetransport i rörisolering

#### 3.1. VÄRMELEDNING

I motsats till syrediffusionen där syre diffunderar från omgivningen genom medieröret in i värmemediet diffunderar vattenånga i motsatt riktning. Vattenmolekylerna absorberas på medierörets innersida och tar sig därigenom in i isoleringen. I PUR-skummet kan den diffunderande vattenånga kondenseras till vatten på grund av den radiella temperaturgradienten och därmed minska skummets isolerande verkan. Vattentransporten inne i cellen är beroende av cellstorleken och antalet slutna celler och kan ske genom kapillärkraft, gravitationskraft eller diffusion. I väl utvecklade skum med mer än 90% slutna celler sker vattentransporten i praktiken enbart genom diffusion. Diffusionshastigheten är beroende av antalet porer och cellernas storlek. Många porer och små celler innebär låg diffusionshastighet.

I fuktigt skum överförs värme också i den vattenfilm som belägger cellväggarna. En cells värmeledningskoefficient  $\lambda_{PUR}$  blir alltså enligt Ekvation 3.1:

$$\lambda_{PUR} = \lambda_{vägg} + \lambda_{gas} + \lambda_{rad} + \lambda_{vf} + \lambda_{diff} \quad (3.1)$$

De olika  $\lambda$  står för de bidrag som cellväggen, gasen och strålningen lämnar till totalvärmeledningen. Till dessa kommer vattenfilmens bidrag  $\lambda_{vf}$  och ett bidrag pga diffusion av energitransport förorsakad av ångdiffusion från en varmare vägg till en kallare vägg. Temperaturgradienten spelar självklart en viktig roll. På cellens varmaste sida är vattnets partialtryck högre än på den kalla sidan. Diffusionen av vattenånga sker från den varma cellväggen till den kalla. Med diffusionsströmmen  $\dot{m}_{diff}$  transporteras en värmemängd  $\dot{Q}_{diff}$  som motsvarar en förångningsentalpi  $h_v$  från den varma till den kalla cellväggen enligt  $\dot{Q}_{diff} = \dot{m}_{diff} \cdot h_v$ .

Enligt Krischner /9/ kan man av detta härleda en ekvivalent värmeledningsförmåga  $\lambda_{diff}$

$$\lambda_{diff} = \frac{D}{R_D T} \frac{P}{p - p_D''} \frac{dp_D''}{d\vartheta} h_v \quad [\text{W/mK}] \quad (3.2)$$

med:

D:	diffusionskoefficient för ånga i luft [ $\text{m}^2/\text{s}$ ],
$R_D$ :	gaskonstant för ånga [ $\text{J}/(\text{kgK})$ ],
p:	absolut tryck [ $\text{Pa}$ ],
$p_D''$ :	mättnadstryck [ $\text{Pa}$ ]
$\vartheta$ :	absolut temperatur [ $\text{K}$ ] och
$h_v$ :	spec. ångentalpi [ $\text{J}/\text{kg}$ ].

Det är dock på grund av de komplexa sammanhangen inte möjligt att exakt beräkna den verkliga värmeförlusten. Diffusionen, som förorsakar fukten i cellerna, och värmeledningen påverkar varandra. Den ånga som diffunderar i isoleringen inverkar bara på värmeledningen om koncentrationen överstiger mättnadstrycket. I detta fall överförs värme med den kondenserade massaströmmen och den vattenfilm som bildas ökar värmeledningen. Detta har till följd att temperaturen i rörisoleringen ändras med tiden tills det blir jämvikt mellan koncentration och temperatur. Det är dock svårt att mäta korrekt temperatur inne i skummet utan att påverka diffusionen.

Isoleringen ger i allmänhet mycket litet diffusionsmotstånd så att vattenmolekylerna kan penetrera snabbare genom isoleringen än genom de väsentligt tätare medie- och mantelrören.

### 3.2. DIFFUSION AV VATTENÅNGA I FJÄRRVÄRMERÖR

I ett värmeisolerat medierör som är nedlagt i marken sker transport av värme och vattenånga till den omgivande jorden i radiell riktning från medieröret via PUR-isoleringen och PE-mantelröret.

Ekvationen för beräkning av värmeförlusten och ångtransporten är analogt uppbyggd.

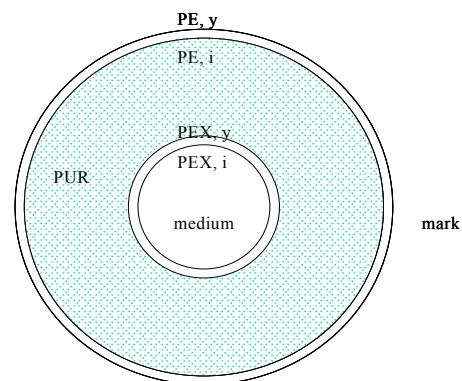
För stationära driftförhållanden gäller följande ekvationer:

$$\dot{Q} = \frac{2\pi(\vartheta_{med} - \vartheta_{mark}) \cdot L}{\frac{1}{\lambda_{PEX}} \ln \frac{d_{PEX,y}}{d_{PEX,i}} + \frac{1}{\lambda_{PUR}} \ln \frac{d_{PE,i}}{d_{PEX,y}} + \frac{1}{\lambda_{PE}} \ln \frac{d_{PE,y}}{d_{PE,i}} + R_{mark}} \quad (3.3)$$

$$W = \frac{2\pi(p_{med} - p_{mark}) \cdot L}{\frac{1}{P_{PEX}} \ln \frac{d_{PEX,y}}{d_{PEX,i}} + \frac{1}{P_{PUR}} \ln \frac{d_{PE,i}}{d_{PEX,y}} + \frac{1}{P_{PE}} \ln \frac{d_{PE,y}}{d_{PE,i}} + \frac{1}{P_{mark}} \operatorname{arccosh} \frac{h}{d_{PE,y}}} \quad (3.4)$$

med följande parametrar:

$\dot{Q}$	= värmeförlust i plaströrssystemet (Watt)
W	= mängd vattenånga som transporteras i radial riktning i plaströrssystemet (g/s)
p	= partialtryck (bar)
d	= diameter (i inner, y ytter) (m)
L	= rörlängd (m)
P	= permeabilitet för vattenånga (g/s cm bar)
$\vartheta$	= temperatur (°C)
$\lambda$	= värmeledningsförmåga (W/(mK))
$R_{mark}$	= värmetransportmotstånd i jorden
h	= rörssystemets övertäckningshöjd (m).



Figur 3.1: Rörgeometri  
Pipe geometry

I Ekvation 3.4 kan PUR-isoleringens och jordens deldiffusionsmotstånd i allmänhet försummas.

För att man ska kunna svara på frågan om det är möjligt att ångan kondenseras i plaströrssystem måste temperatur och ångtryck beräknas. Särskilt intressant är då temperatur och ångtryck i PUR-skummet närmast PE-mantelröret, dvs i plaströrssystemets kalla område. Villkoren för en oförändrad ångtransport - dvs utan kondensvatten - genom plaströrssystemet är:

$$P_{\text{mättn}}(\vartheta_{PE,i}) > P_{PE,i} \approx P_{PEX,y} \quad (3.5)$$

Det ångmättnadstryck som motsvarar temperaturen  $\vartheta_{PE,i}$  måste därför vara högre än ångtrycket i gränsoområdet för skum/PE-mantelrör. Detta är ekvivalent med villkoret att daggpunkten  $\vartheta(S)_{PE,i}$  ligger under den i gränsoområdet mellan PUR-skummet och PE-mantelröret förekommande temperaturen:

$$\vartheta(S)_{PE,i} < \vartheta_{PE,i} \quad (3.6)$$

Med hjälp av ekvationerna (3.7) och (3.8) kan temperaturen respektive ångtrycket i plaströrssystemet intill gränssytan mellan skum och PE-mantelrör beräknas:

$$\vartheta_{PE,i} = \vartheta_{\text{med}} - \frac{Q}{2\pi} \left[ \frac{1}{\lambda_{PEX}} \ln \frac{d_{PEX,y}}{d_{PEX,i}} + \frac{1}{\lambda_{PUR}} \ln \frac{d_{PE,i}}{d_{PEX,y}} \right] \quad (3.7)$$

$$p_{PE,i} \approx p_{PEX,y} = p_{\text{med}} - \frac{W}{2\pi P_{PEX}} \ln \frac{d_{PEX,y}}{d_{PEX,i}} = p_{\text{med}} - \frac{(p_{\text{med}} - p_{\text{jord}}) \ln \frac{d_{PE,i}}{d_{PE,y}}}{\ln \frac{d_{PEX,y}}{d_{PEX,i}} + \frac{P_{PEX}}{P_{PE}} \ln \frac{d_{PE,y}}{d_{PE,i}}} \quad (3.8)$$

Det är tydligt att såväl temperaturen som ångtrycket, dvs daggpunkten, påverkas av ett flertal parametrar. Temperaturen intill manteln påverkas framför allt av värmetransportmotståndet hos PUR-isoleringen (skiktets tjocklek, värmeledningsförmåga) samt värmemediets och omgivande markens temperatur. Ångtrycket bestäms i första hand av PEX-medierörets och PE-mantelrörets permeabilitet samt av ångmättnadstrycket i medieröret och jordens daggpunkt.

Då ångdiffusionsprocessen sker långsamt baseras de diffusionstekniska beräkningarna på genomsnittstemperaturer och inte på extremtemperaturer på utsidan av systemet.

## 4. Beräkningsexempel

### 4.1. FUKTBILDNING I ISOLERINGEN

I ref /7/ används teorin för att göra en uppskattning av under vilka förhållanden fukt-kondensation i isoleringen förekommer. För detta ändamål varierades permabilitetsvärden för PEX och PE inom vida gränser:

$$\frac{P_{PEX}}{P_{PE}} = 1, \dots, 100.$$

Exemplet gäller för dimensionerna 32/77 respektive 32/90 med följande värden:

*Geometri:*

$d_{PEX,i}$	= 26,2 mm
$d_{PEX,y}$	= 32,0 mm
$d_{PE,i}$	= 73,86 mm
$d_{PE,y}$	= 77,90 mm
H	= 1000 mm

*Temperaturer:*

$\vartheta_{med}$	= 95 °C, 80 °C
$\vartheta_{jord}$	= 0 °C, ....., 20 °C

*Ångtryck:*

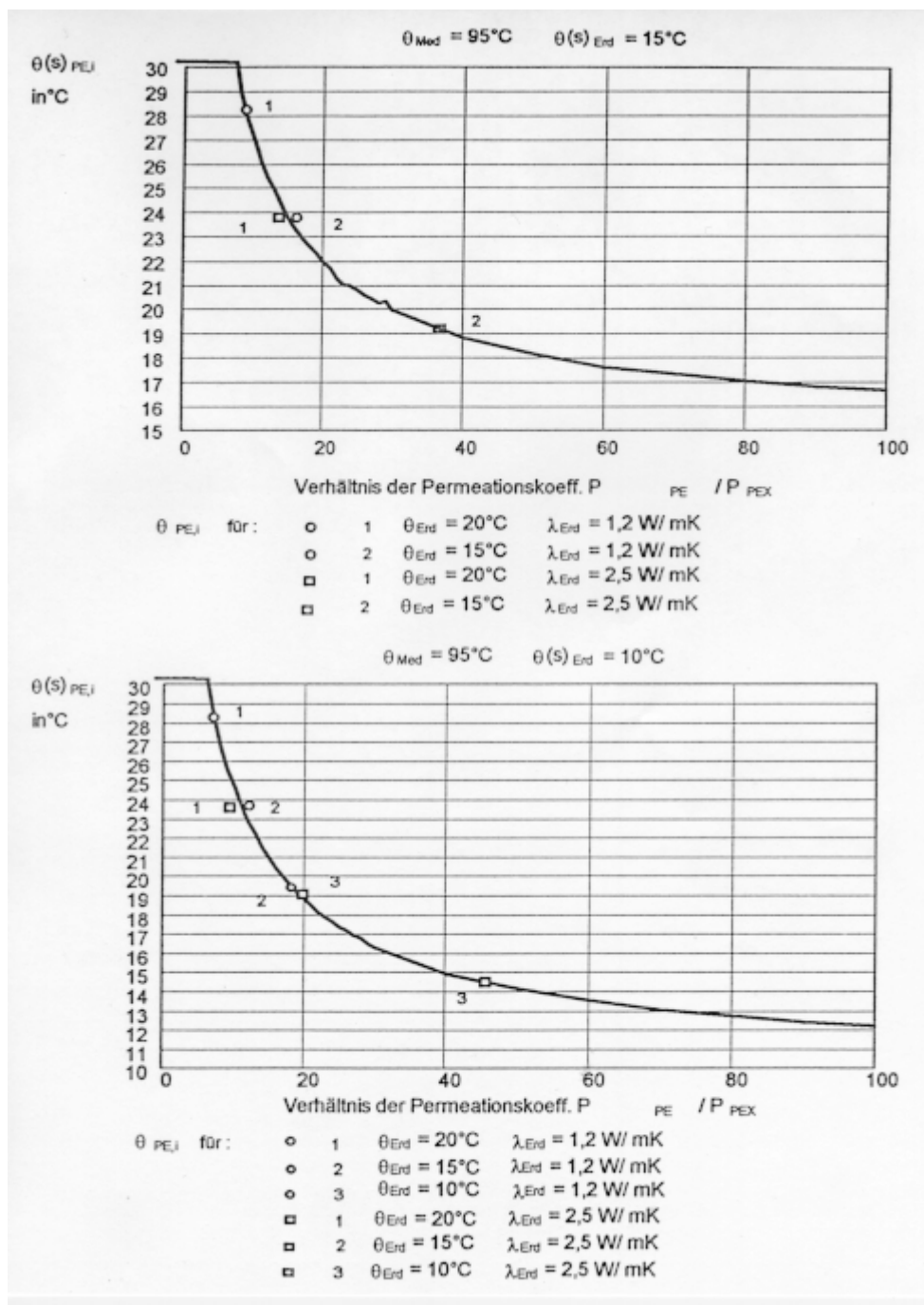
$p_{med}$	= 0,8452 bar (95 °C); 0,472 bar (80 °C)
$p_{mark}$	= 0,01228 bar ( $\vartheta(S)_{mark} = 10$ °C); 0,01705 bar ( $\vartheta(S)_{mark} = 15$ °C)

*Material:*

$\lambda_{PUR}$	= 0,035 W/mK; 0,040 W/mK
$\lambda_{PEX} = \lambda_{PE}$	= 0,4 W/mK

Risken att vattenånga kondenseras i plaströrsystem beror till stor del på relationen av permeabiliteten hos PEX-röret och PE-mantelröret. Som villkor för att kondensation ska uppträda gäller att daggpunkttemperaturen på insidan av manteln måste vara lägre än den då rådande temperaturen. Särskilt kritiskt för kondensation är hög medietemperatur och god isoleringsförmåga av isoleringen. Detta i kombination med lågt värmemotstånd mellan fjärrvärmerör och omgivande mark och hög daggpunktstemperatur i marken, t.ex. när systemet ligger i grundvatten, kan leda till kondensation i isoleringen. Plaströrsystem med större isoleringstjocklek eller ett PUR-skum med jämförelsevis låg värmeledningsförmåga är alltså särskilt utsatta med avseende på kondensbildning.

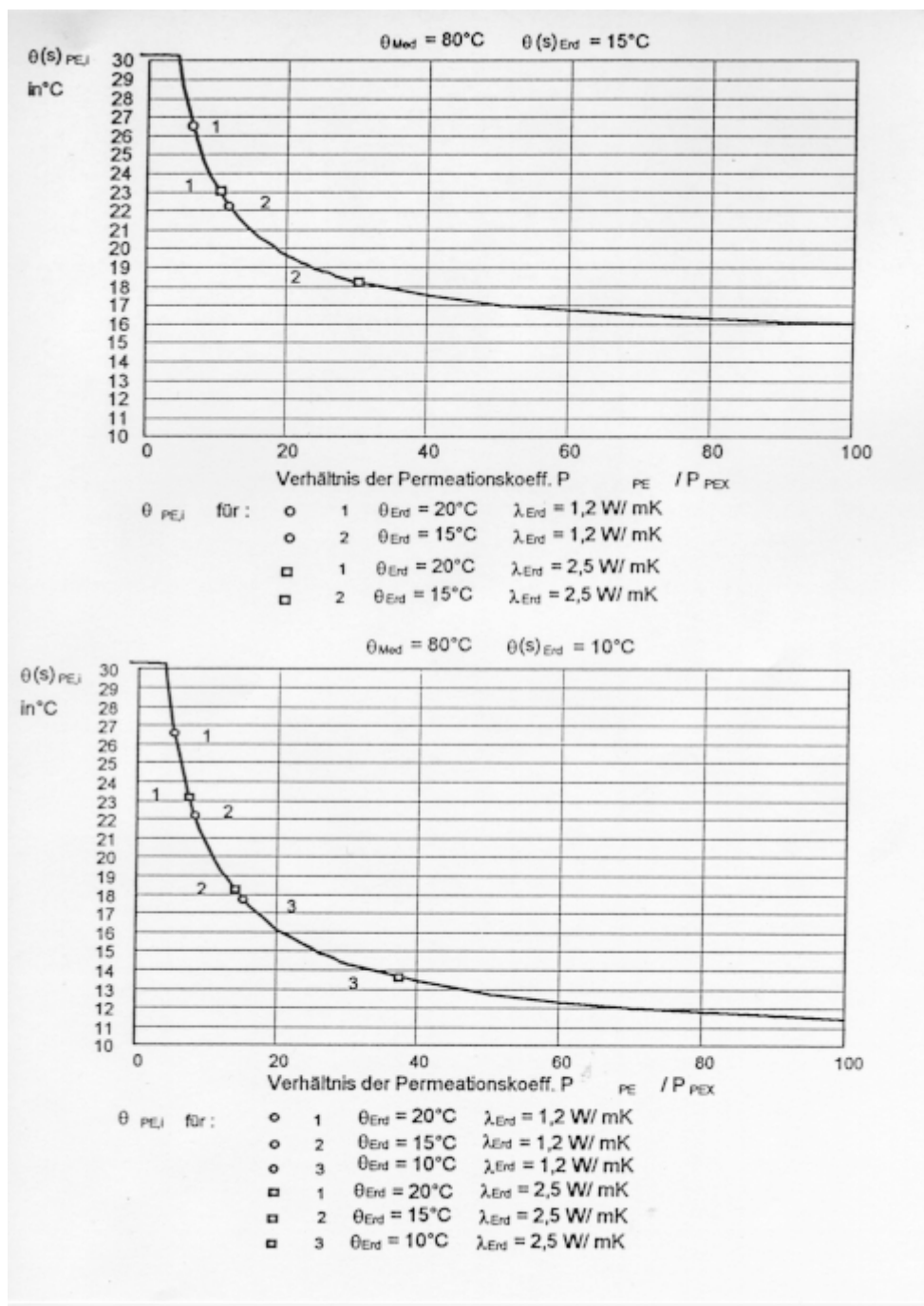
Av Figur 4.1 framgår att permeabiliteten hos PE-mantelröret för driftbetingelserna  $\vartheta_{med} = 95$  °C,  $\vartheta_{jord} = 15$  °C,  $\vartheta(S)_{jord} = 15$  °C,  $\lambda_{jord} = 2,5$  W/mK måste vara en faktor  $\geq 38$  större än PEX-rörets, om man ska kunna undvika kondensbildning i plaströrsystemet. För medierörtemperaturer  $\vartheta_{med} = 80$  °C visas å andra sidan att det inte uppstår någon kondensationsrisk (Figur 4.2).



Figur 4.1: Jämförelse av skumtemperatur  $\theta_{PE,i}$  med daggpunkttemperaturen  $\theta(S)_{PE,i}$  för utvalda driftbetingelser och som funktion av förhållandet  $P_{PE}/P_{PEX}$  för att undvika kondensation i skummet. Subskriptet "Erd" står för jord. Mediumtemperatur  $95^{\circ}\text{C}$ . Marktemperaturer 10, 15 resp  $20^{\circ}\text{C}$ . Daggpunktstemperatur i jorden 10 resp  $15^{\circ}\text{C}$ . Bilden visar att förhållandet  $P_{PE}/P_{PEX}$  måste vara minst 38 för att undvika kondensation vid jordtemperaturer på  $15^{\circ}\text{C}$  och rördimension 32/77.

Comparison of foam temperature  $\theta_{PE,i}$  with dewpoint temperature  $\theta(S)_{PE,i}$  for selected operation conditions as a function of relation  $P_{PE}/P_{PEX}$  in order to avoid condensation. ("Erd" designates ground). Medium temperature  $95^{\circ}\text{C}$ . Ground temperature 10, 15 and  $20^{\circ}\text{C}$ , respectively. Dew point of the ground: 10 and  $15^{\circ}\text{C}$ , respectively. The figure shows that  $P_{PE}/P_{PEX}$  must be at least 38 for avoiding condensation at ground temperature  $15^{\circ}\text{C}$ ; (pipe dimension 32/77 mm).





Figur 4.2: Jämförelse av skumtemperatur  $\theta_{PE,i}$  med daggpunkttemperaturen  $\theta(S)_{PE,i}$  för utvalda driftbetingelser och som funktion av förhållandet  $P_{PE}/P_{PEX}$  för att undvika kondensation i skummet. Subskriptet "Erd" står för jord. Mediumtemperatur  $80^{\circ}\text{C}$ . Marktemperaturer  $10$ ,  $15$  resp  $20^{\circ}\text{C}$ . Daggpunktstemperatur i jorden  $10$  resp  $15^{\circ}\text{C}$ . Rördimension  $32/77$ . Ingen kondensation förekommer.

Comparison of foam temperature  $\theta_{PE,i}$  with dewpoint temperature  $\theta(S)_{PE,i}$  for selected operation conditions as a function of relation  $P_{PE}/P_{PEX}$  in order to avoid condensation. ("Erd" designates ground). Medium temperature  $80^{\circ}\text{C}$ . Ground temperature  $10$ ,  $15$  and  $20^{\circ}\text{C}$ , respectively. Dew point of the ground:  $10$  and  $15^{\circ}\text{C}$ , respectively. No condensation occurs.

Enligt /4/ varierar permeabilitetsrelationen för  $P_{PE}/P_{PEX}$  mellan 1,1 till 12,7; enligt /11/ varierar relationen för  $P_{PE}/P_{PEX}$  från 0,49 till 18,4. Förhållandena  $P_{PE}/P_{PEX} \approx 1$  ger med säkerhet kondensvatten i systemet, vid ogynnsamma driftvillkor måste man även räkna med kondensbildning vid  $P_{PE}/P_{PEX} \approx 20$ . Helst bör man sträva efter  $P_{PE}/P_{PEX} \geq 100$ .

Om kondens skulle bildas i ett system, på grund av olyckliga driftförhållanden eller dåligt materialval i PEX- och PE-mantelrören, fylls först det skumskikt som ligger närmast PE-mantelröret med vatten. Värmeledningsförmågan hos detta skikt ökas på grund därav. Därmed höjs skumtemperaturen i denna zon, vilket medför minskad kondensbildning och om driftvillkoren därefter skulle bli bättre kan en tillfällig torkningsprocess sätta igång. Vid ogynnsamma villkor under längre tid ökas emellertid PUR-isoleringens fuktiga zon ytterligare, så att man måste räkna med en större värmeförlust, med en minskning av hållfasthetsparametrarna och eventuellt långvarig hydrolytisk nedbrytning av PUR-isoleringen.

Diffusion och kondensbildning medför dock trots allt endast en obetydlig vattenmängd i plaströrsystemets isoleringsskikt. Av t.ex. ekvation 3.4 följer att det i ett 1 m långt rörsegment i plaströrsystem 32/77 med  $P_{PEX} = 8 \cdot 10^{-10}$  g/s cm bar och  $P_{PE} = 80 \cdot 10^{-10}$  g/s cm bar och  $\vartheta_{med} = 95^\circ\text{C}$ ,  $\vartheta(S)_{jord} = 10^\circ\text{C}$  under 24 timmar bildas 0,17 g diffunderad ånga. En kännbar fuktinverkan visar sig därför först efter en längre tid.

## 4.2. LÖGSTÖRS BERÄKNINGSMODELL

Teorin enligt avsnitt 3 förfinades något av Lögstör Rör A/S genom att definiera markens värmemotstånd och genom att ta hänsyn till att returledningen ligger utmed framledningen vilket kräver viss korrektur för värmeflödet mellan rören. I grova drag kan markens värmemotstånd räknas ut till:

$$R_H = \frac{1}{4\pi\lambda_{mark}} \ln \sqrt{1 + \left(\frac{2H}{C}\right)^2} \quad (4.1)$$

med

$H = h + R_0 \cdot \lambda$  och  $R_0 = 0,0685 \text{ m}^2\text{K/W}$

$h =$  läggningsdjup (mm)

och  $C =$  ledningarnas ömsesidiga centrumavstånd i mm.

Ett annat viktigt samband gäller för den temperaturberoende *permeabiliteten*  $P_T$ :

Den kan nämligen för plastmaterial beskrivas genom en aktiveringsenergi  $E_p$ :

$$P_T \equiv P(T) = P_0 \cdot e^{-\frac{E_p}{RT}} \quad (4.2)$$

Där  $P_0$  kallas för *permeabilitetsfaktorn* (eller den permeabilitet som gäller vid oändligt hög temperatur).

Mot denna bakgrund och under användning av de i avsnitt 5 beskrivna materialparametrarna etablerades den i Tabell 4.1 återgivna beräkningsmodellen för fuktdiffusion i plaströrsystem som även tar hänsyn till kondensation i isoleringen (enligt /3/, Appendix 2). Baserat på modellen har Lögstör Rör A/S utvecklat ett dataprogram vilket används för fältberäkningar.

Tabell 4.1: Lögstör Rör A/Ss beräkningsmodell för fuktdiffusion i plaströrssystem.

The calculation model of Lögstör Rör A/S for diffusion simulations in plastic pipe systems.

1	<b>Indata:</b> Rördimensioner och godstjocklek för medie- och mantelrör Permeabilitetsfaktorer och aktiveringsenergies för medie- och mantelrör Värmeledningskoefficienter för medie- och mantelrör, vått och torrt skum, omgiv. jord Läggningsdjup och centrumavstånd fram- /returledning Drifttemperatur fram- /returledning, jordtemperatur.
2	<b>Beräkning av värmeförlusten från framledningen</b> Ekvation 3.3.
3	<b>Beräkning av väggtemperaturer</b> för PEX,y ; PE,i och PE,y genom modifiering av ekvation 3.7.
4	<b>Beräkning av partialtryck för vatten</b> vid de olika väggarna samt i den omgivande jorden.
5	<b>Beräkning av permeabiliteten</b> för medierör, skum och mantel.
6	<b>Beräkning av vattendiffusion och eventuell kondensering</b> med hjälp av modifierad ekvation 3.8.
7	<b>Beräkning av kondensatackumulering</b> genom fortsatt beräkning av vattenbalansen i skummet.

## 5. Materialparametrar

Kvaliteten av fukttransportberäkningar i plaströr är beroende på permeabilitetskoefficienter för vattenmolekyler genom PE resp genom PEX.. Det nämndes i avsnitt 4 att förhållandet  $P_{PE}/P_{PEX}$  bör vara ganska så stort, typiskt  $>100$ , för att kondensation av vattenånga i rörisoleringen kan undvikas vid alla tillämpningar.

Uppgifter angående Permeabilitetskoefficienter finns såväl från Tyskland som från Danmark. De danska mätningarna för PEX-rör har genomförts av Wirsbo i samarbete med Lögstör Rör A/S. Vem som gjorde mätningarna för PE-mantelrör i Danmark sägs inte uttryckligen, men det verkar som de genomfördes hos DTI på av Lögstör Rör A/S tillhandahållt material. För båda materialtyperna redovisas detaljerade mätresultat för permeabiliteten i ref /3/. Av Tabell 5.1 framgår de resultat som Lögstör Rör A/S redovisar för sitt plaströrssystem.

Tabell 5.1: *materialegenskaper (uppmätta värden) för PE, PEX och PUR-skum som används i Lögstör plaströrssystem (Ref /3/). ( $P_{20}$  och  $P_{80}$  anger permeabilitetsvärden vid den indikerade temperaturen).*

*Material properties (measured values) for PE, PEX and PUR materials used in the Lögstör system (ref /3/). ( $P_{20}$  and  $P_{80}$  means permeability at the indicated temperature).*

	$P_0$	$E_p$	$P_{20}$	$P_{80}$	$\lambda$
	g/(cm s bar)	kJ/mol	g/(cm s bar)	g/(cm s bar)	W/(mK)
PEX	$9,0 \cdot 10^{-7}$	20	2,45854E-10	9,91039E-10	0,3
PE	$3,85 \cdot 10^{-4}$	33,13	4,81298E-10	4,84487E-09	0,38
PUR-skum torrt					0,033
PUR-skum vått					0,35

Angående mätningar av permeabiliteten i Tyskland hänvisas till referenserna /4/ och /11/. Referens /4/ är en rapport signerad L. Amby från DTI (1992) och anger följande värden för

$$\text{PEX: } P_{80} = 7,9 \dots 8,4 \cdot 10^{-10} \text{ g/(cm s bar)}$$

$$\text{PE: } P_{20} = 9,3 \dots 101 \cdot 10^{-10} \text{ g/(cm s bar)}.$$

Från separata mätningar i det tyska förbundsprojektet /11/ citeras följande permeabilitetsvärden:

$$\text{PEX (80 °C): } 0,01 \dots 0,11 \text{ g/md} \rightarrow P_{80} = 0,8 \dots 8,6 \cdot 10^{-10} \text{ g/(cm s bar)} \text{ (för } d_{PEX,a} / d_{PEX,i} = 32/26,2)$$

$$\text{PE (20 °C) } 0,01 \dots 0,035 \text{ g/md} \rightarrow P_{20} = 4,2 \dots 14,7 \cdot 10^{-10} \text{ g/(cm s bar)} \text{ (för } d_{PE,a} / d_{PE,i} = 77/73).$$

De olika värdena ovan kan hänföras till olika produkter. Vad som framgår av ovan är att för ett fall där mediumröret ligger på 80°C och manteln på 20°C kan kvotienten  $P_{PE}/P_{PEX}$  variera mellan ca. 0,5 och 18, och i det danska fallet enligt Tabell 5.1 är  $P_{PE}/P_{PEX} \sim 2$ .

Med alla dessa uppgivna värden är det alltså stor risk för kondensation av vattenånga i plaströrssystem.

*PUR-skummets* permeabilitet för vattenånga antas i /3/ vara *temperaturoberoende* pga den porösa strukturen och uppmättes till  $8,33 \cdot 10^{-5} \text{ g}/(\text{cm s bar})$ .

## 6. Laboratoriemätningar

Laboratoriemätningar på material resp på rörsystem gjordes såväl i Tyskland som i Danmark. I Tyskland genomfördes och pågår försök hos ”IMA Materialforschung und Anwendungstechnik GmbH” i Dresden samt hos ”FFI Fernwärme - Forschungsinstitut in Hannover e. V.” nära Hannover. Några år tidigare gjordes helt oberoende mätningar på plaströrsystem hos TÜV Bayern Sachsen i München /11/. Arbetsdelningen mellan IMA och FFI är den att IMA i första hand mäter materialegenskaper hos materialprov och FFI gör mätningar på kompletta system (ref /5/ - /8/).

Andra mätningar som rapporteras här är gjorda i Danmark hos DTI och Lögstör Rör A/S. (En av nyckelfigurerna för plaströrsystem i Danmark var L. Amby som tidigare jobbade hos DTI för att 1995 övergå till Lögstör Rör A/S. Han arbetar idag som egen konsult).

### 6.1. PROVNINGAR PÅ ISOLERINGSMATERIAL (IMA)

Provningar gjordes dels på plattor (50 x 50 x 25 mm) av själva skummaterialen från Shell Chemicals resp Elastogran Polyurethane. Försöken gjordes med prov som är blåsta med CO<sub>2</sub> resp med c-Pentan. Dels gjordes även undersökningar på skumprovbitar (25 x 25 x 15mm) tagna ur plaströrsystem från tre olika rörtillverkare (samma system som provades vid FFI).

Provningsen avsåg vissa materialegenskaper vid olika fuktnivåer i isoleringsmaterialen som befuktades antingen i en klimatkammare eller med hjälp av en speciell befuktare som tillåter bildandet av kondensat i skummet med hjälp av en temperaturgradient (45/5°C).

#### *Typ av provningar*

- Densitet enligt DIN 53420
- Värmeledningsförmåga enligt DIN 52616 vid  $T_{medel} = 20^{\circ}\text{C}$  och  $\Delta T = 20 \text{ K}$ .
- Vattenupptagning (EN 253)
- Antal slutna celler (EN 253)
- Tryckhållfasthet (DIN 53291)
- Skjuvhållfasthet (EN 253)

***Det bör noteras att isoleringsskummen skiljer sig mellan provplattorna och skummet från rörsystem pga olika tillverkningsmetoder. Det är oklart om det över huvud taget kan göras en meningsfull jämförelse av mätningarna från båda institutionerna.***

### 6.2. PROVNINGAR PÅ PLASTMEDIERÖRSYSTEM (FFI)

FFI undersökte de tekniska egenskaperna från kompletta rörsystem under extrema driftvillkor i syfte att jämföra egenskaper hos det rena isoleringsmaterialen med egenskaper hos skummet i plastmedierörsystemet. De undersökta proverna avser system från I.C, Möller, Panisovit och Tarco, dock utan att resultaten från de enstaka produkterna identifieras.

#### *Fysikaliska parameter:*

- Densitet enligt (EN 253)
- Värmeledningsförmåga enligt DIN 52613 för att bestämma  $\lambda_{50}$  enligt trepunktsprincipen (3-m rör).
- Vattenupptagning (EN 253)

- Cellstorlek (EN 253)
- Antal slutna celler (EN 253)
- Tryckhållfasthet (EN 253), ISO 844
- Axiell skjuvhållfasthet (EN 253) (200 mm rörsegment).

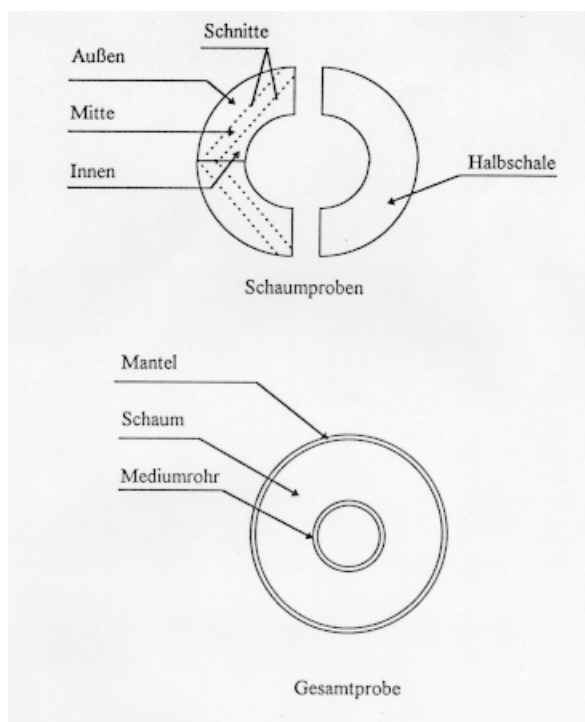
*Bestämning av vattenhalten:*

- Långtidsförsök vid  $T = 90^{\circ}\text{C}$  vattentemperatur.  
Ledningen är förlagd i luft vid laborietemperatur.
- Ledningar upplindade med mantel i vattenbad resp laborietemperatur.  
Vattentemperatur cyklas periodiskt i 6-h cykel mellan  $90^{\circ}\text{C}$  och  $20^{\circ}\text{C}$ .

*Diffusionmätningar:*

Vattendiffusionen är en grundläggande parameter i alla försök. Den mäts på två olika sätt.

- Förändring av den relativa fukthalten*  
Mätning sker med kombinerade fukt-/temperaturmätgivare med kontinuerlig registrering.
- Gravimetrisk mätning av vattenmängd i isoleringen*  
Ur ett 1m långt provsegment skärs 70 mm långa provbitar. Vattenmängden vägs i delar med tre olika geometriska utföranden enligt Figur 6.1:
  - Kompletta rörsegment (med mantel och medierör)
  - Skumprov i form av ett halvska
  - Skumprov från ett kvartsska uppskuret i tre avsnitt enligt Figur 6.1.



*Figur 6.1: Provgeometrier för diffusionstest hos FFI*

*Testing geometry for insulation from pipe samples at FFI.*

Mätning av dessa prover sker genom precisionsvägning direkt efter urtagning resp efter uttorkning under 24 h i värmeskåp vid 95°C. Med hjälp av vägning av ett komplett provstycke kan man härleda, om det samlas vatten längs manteln (vilket försvinner vid renskurna provbitar).

### **6.3. SAMMANFATTNING AV MÄTRESULTAT FRÅN TYSKLAND**

#### **6.3.1 Skumegenskaper (IMA)**

Allmänt kan sägas att skummen från olika tillverkare skiljer sig sinsemellan och att egenskaperna är annorlunda för skum som tillverkades för provblock och isoleringsskum i plastmedierörssystem. Genomgående visar skummet i rörssystem lägre hållfasthet än skummet från provplattorna. Tillverkningsprocessen gör helt enkelt skummet mjukare och mera elastiskt. Andelen slutna celler är dock i båda fallen ganska lika, 95 % för plattorna och minst 92 % för rörssystem. (Det bör dock sägas att ett rörssystem visade lägre kvalitet, dvs lägre hållfasthet, mindre antal slutna celler och högre vattenupptagning än de övriga rörsystemen. Dessutom visade det sig att skummet lossnade från medieröret redan innan provningen startades).

#### **6.3.2 Fuktinverkan på mekaniska egenskaper (IMA)**

Provstycken utsattes hos IMA för fuktinverkan genom exponering under sju dagar och 50°C till 98 % luftfuktighet och därefter i 150 dagar vid 50°C till 100 % luftfuktighet. Några resultat visas i Appendix 6.1. Det framgår med tydlighet att vattenupptagningen i fuktig luft är relativt begränsad, maximalt 10 % och för det mesta under 8 %. Det visar sig dock också tydligt att hållfastheten minskar med 25-40 % efter 150 dagars fuktinverkan med undantag av ett av CO<sub>2</sub>-skumproverna. CO<sub>2</sub>-skummet tålde i allmänhet behandlingen något bättre än c-Pentanskummet, särskilt hos ett fabrikat. I motsvarande grad minskar även elasticitetsmodulen. Fukten verkar således som en mjukgörare.

I en annan försöksserie befuktades skummet i en befuktare för att uppnå högre vattenhalt. Detta resulterade också då i lägre hållfasthetsvärden (25-40 % lägre) jmf med det torra skummet. *Det som är förvånansvärt är att fukthalten mellan 2 och 100 viktprocent har ganska liten betydelse för de mekaniska egenskaperna.*

#### **6.3.3 Värmeledningsförmåga (IMA)**

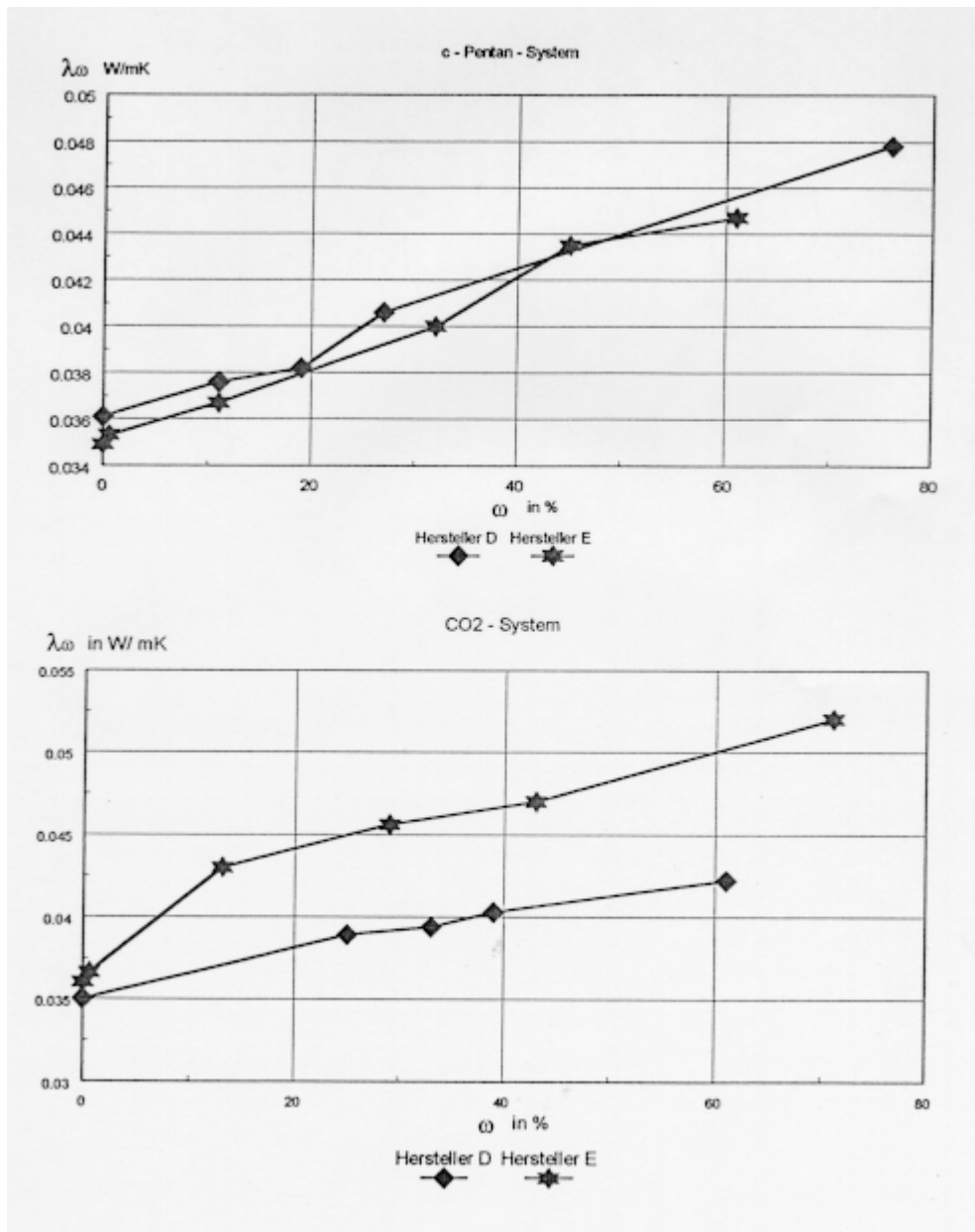
Alla provbitar lagrades antingen i normalklimat eller utsattes för en tvångsventilation med luft av 70°C under en period upp till 75 dagar. Det visade sig till skillnad från tidigare experiment med hårdskum att värmeledningen redan efter ett par dagar vid 70°C resp efter 1 - 2 veckor i normalt rumsklimat ökade från ett lågt utgångsläge till slutvärdet (från  $\lambda = 0,028$  W/mK till ca 0,037 W/mK för c-Pentan-skum resp från  $\lambda = 0,026$  W/mK till ca 0,035 W/mK för CO<sub>2</sub> skum). De höga gränsvärdena motsvarar värden för luftfyllda celler. Det finns dock skillnader för de olika kvaliteterna från olika producenter se Figur 6.2 a,b. Observera det höga utgångsvärde. Dvs genom den föregående lagringsproceduren har skummets drivgas troligtvis redan ersatts med luft.

#### **6.3.4 Fuktinverkan på värmeledningsförmågan (IMA)**

Värmeledningen i de prov som utsattes för fuktpåverkan i normalklimat eller vid 50°C och 98% luftfuktighet påverkades knappast av vattenhalten, eftersom fukthalten som mest ökade med endast 2%. För att en märkbar effekt skulle inträffa, befuktades proverna i befuktningss-



apparaten genom att utsätta dem för en ångtrycksgradient. Fukttupptagningen kunde då bli upp till 70 % (vikt) och  $\lambda$  - värdena ökade till 0,048 W/mK (c-P) resp 0,052 W/mK(CO<sub>2</sub>).



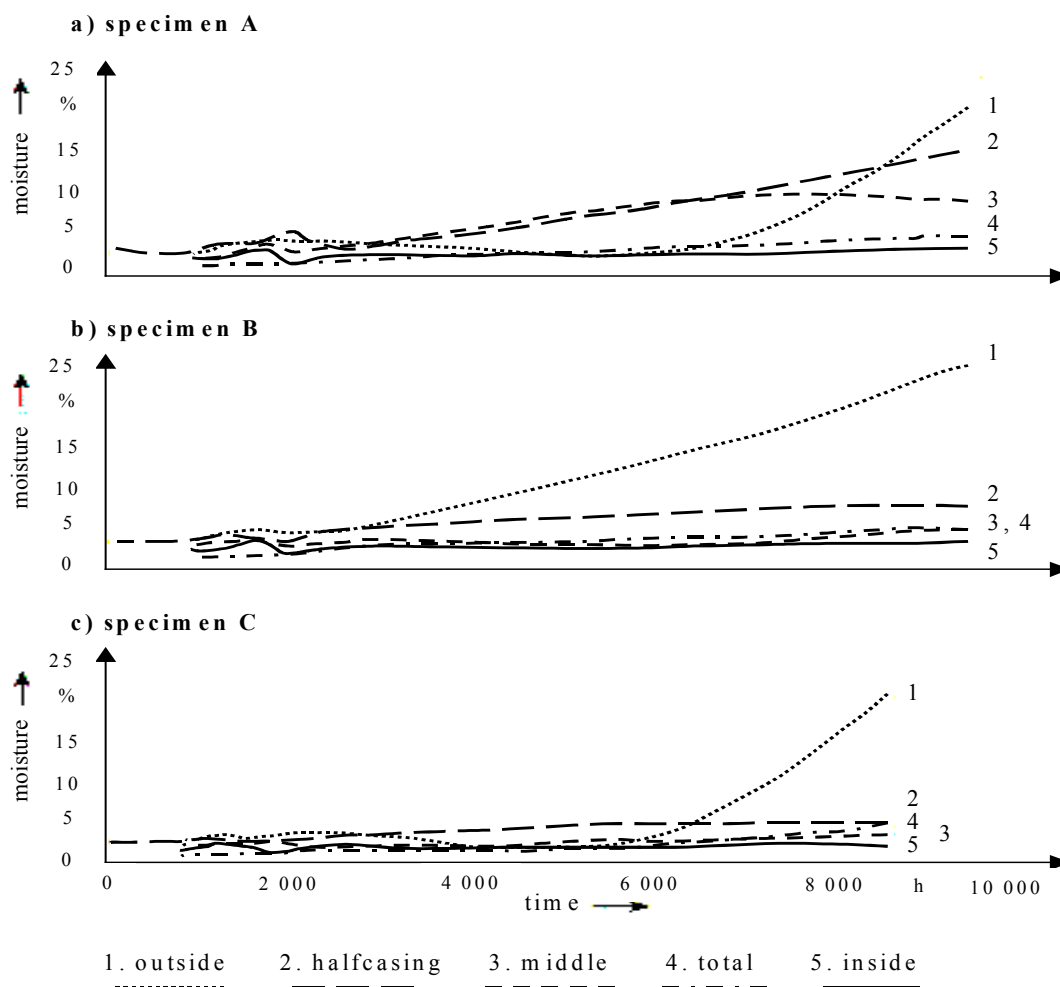
Figur 6.2 a,b: Värmeledningskoefficient som funktion av fukthalt i CO<sub>2</sub>-drivna resp c-Pentan-drivna skum.

*Thermal conductivity as function of humidity content in CO<sub>2</sub>-blown and c-Pentan-blown PUR-foam.*

### 6.3.5 Fuktmätningar på rörsystem (FFI)

Mätningarna på rörsystem genomfördes och genomförs vid FFI. Vid slutet av 1997 rapporterades resultat från 2500 drifttimmar i /7/. Försöken har dock fortsatt därefter och efter ca 10000 h laborieredrift har de sammanställts i en rapport /8/ som vi dock inte har fått ta del av. Resultaten har emellertid rapporterats översiktligt i /5/ och /6/, vars huvudresultat efter 8000 h försökstid sammanfattas nedan.

Fukthalten ökade under hela försöksperioden (Figur 6.3). Något jämviktstillstånd avseende fukthalten noterades inte. Försöksanläggningen drevs därför vidare för att göra det möjligt att följa fuktutvecklingen när det gäller gränsvärden eller insatt hydrolyys. T ex visade provstyckena från ovan nämnda AiF-försök 10591 B efter 855 dagars drift en genomsnittlig total fuktandel av 12,3 viktprocent. Fukten i skummet i den yttersta isoleringen ligger i snitt på 83,3 viktprocents fukthalt. Nya provstyckena som har kommit till i dessa försök har varit i drift i 300 dagar. Den totala fuktandelen i dem uppgår i genomsnitt till 5,3%. Fukten i skummet i ytterområdet är dock i genomsnitt 25,0%.



Figur 6.3: Fuktökning i tre olika fjärrvärmerör i plast i försöksserien hos FFI.  
Increase of humidity in three different pipe systems measured at FFI.

Fukthalten i manteln ökade under försöket och indikerar att diffusionsprocessen pågår. Resultaten påverkades i hög grad av fuktiga skumrester som fastnat på delar av manteln. De angivna mätvärdena visar därför bara tendenser. I ett provstycke har hydrolytiskt förstörda celler med en storlek av 0,5 till 3,0 cm<sup>2</sup> observerats i det yttre skumskiktet.

### 6.3.6 Värmeledning på rörsystem (FFI)

Värmeledningen mättes på rörsystem efter 2400 h lagring i rumsklimat (20 – 23°C) resp på system som efter lagring belastades under 2100 h med en konstant medierörtemperatur av 90°C (3 rör à 3 m). Värdena är sammanställda i Tabell 6.1 för tre olika rörsystem A, B C.

Tabell 6.1: Värmeledning i plastmedierör - mätresultat.

A och B avser c-Pentan system och C betecknar ett CO<sub>2</sub> – blåst system.

Thermal conductivity in plastic medium pipe systems. A and B designates c-Pentan systems and C designates one CO<sub>2</sub> driven foam system.

	$\lambda_{50}^{*1, PUR+PE}$	$\lambda_{50}^{*2, PUR+PE}$	Zunahme
Rohrtyp	[W×m <sup>-1</sup> ×K <sup>-1</sup> ]	[W×m <sup>-1</sup> ×K <sup>-1</sup> ]	[%]
A	0,0447	0,0490	9,65
B	0,0462	0,0537	16,17
C	0,0491	0,0533	8,50
	$\lambda_{50}^{*1, PUR}$	$\lambda_{50}^{*2, PUR}$	Zunahme
Rohrtyp	[W×m <sup>-1</sup> ×K <sup>-1</sup> ]	[W×m <sup>-1</sup> ×K <sup>-1</sup> ]	[%]
A	0,0375	0,0457	21,83
B	0,0381	0,0498	30,59
C	0,0406	0,0495	21,94

- \*: Messung der Temperaturen am Stahlmediumrohr außen und am Mantel außen, bzw. äußerer Wellrohrdurchmesser in Anlehnung an DIN 52613 und ISO 8497
- \*1: 2400h bei RT gelagert, abgeklebte Stimseiten  
3m- und 2,25m- und 1,65m- (außer C) Püflinge mit jeweils 3-Punktmessung,
- \*2: 2100h bei konst. = 90 °C-VL betrieben  
3m-Püflinge mit jeweils 3-Punktmessung,
- \*3: Berechnet aus  $\lambda_{50, PUR+PE}$

De första tre raderna för A B C i tabell 6.1 avser den totala värmeledningen inkl PE manteln. Det framgår av tabellen att den totala värmeledningen ökar med ca 8-10% för c-Pentan systemen A,C och ca 16% för rörsystem B (CO<sub>2</sub>).

Om man renodlar mätvärden för att endast gälla PUR-skummet så erhåller man de värden som redovisas i Tabellens nedre del för rörsystem A B C. Det kan åter konstateras att utgångsvärdena för  $\lambda_{PUR}$  är höga och att de ytterligare ökar med ca 20 – 30%.

Ökningen av värmeledningen tros kunna hänföras till såväl ökad fukthalt i isoleringen som indiffusion av luft. Efter värmeledningsmätningen uppmättes fukthalten till ca 4,8 % för A, 4,5 % för B och 3,7 % för C. System C hade en mantel som var mera diffusionöppen än PE mantlarna hos A och B, vilket förklarar det något högre utgångs-  $\lambda$ -värde.

### 6.3.7 Elektronisk fuktmätning

En ej förstörande metod för att bestämma fukthalten hos PUR-skum i plaströr undersöktes också. Det rör sig om dielektrisk fuktmätning, varvid fjärrvärmeröret fungerar som cylinderkondensator (värmemediet tillsammans med ett skikt aluminiumfolie lindat runt manteln tjänar som elektroder). Genom de olika dielektricitetskonstanterna för vatten och PUR skulle ett samband till fukthalten härledas. De uppmätta kapaciteterna jämfördes med den fukthalt som uppmättes med hjälp av gravimetriska mätningar.

Ytterligare en fråga att besvara med försöket var om den fukt som samlats i skummet skulle kunna mätas med ett larmtrådssystem. Det visade sig att så är fallet, om larmtrådarna är placerade direkt under PE-manteln. I så fall kan läget för fuktdiffusion (-kondensation) lokaliseras.

### **6.3.8**      *Axial fuktspridning vid läckage*

Vid yttre skador som uppkommit i plaströrsystemet på grund av felaktig hantering eller dåligt bäddmaterial uppstår frågor om läckageförekomst. Under vilka förhållanden kan vatten tränga in i systemet utifrån och hur fort kan det sprida sig längs isoleringen? För att undersöka om läckage förekom tillsattes vatten med ett fluorescerande medel under ett tryck av 65 mbar till en definierad läcka i plaströrets mantel. Genom att dela provröret i skivor kunde därefter fuktfördelningen och vattnets spridningshastighet i plaströrsystemet bestämmas. Därav kan man sluta sig till hur lång tid det tar från det att skadan uppstått tills man lägger märke till den, utan att man måste ta reda på exakt var den är belägen. Detta är särskilt viktigt, då det med installationslängder på upp till 200 m i ett stycke kan bli dyrbara reparationsarbeten på det skadade avsnittet.

Undersökning av läckageförekomst i plaströrsystem under sex veckor visar att systemet är okänsligt för yttre skador på mantelröret. Fuktspridningsintensiteten i axial riktning i plaströrsystemet beror mest på hanteringen vid montering, transport och lagring. Man måste räkna med en starkt reducerad fukttäthet i axial riktning, om isoleringen sitter lös vid manteln, t.ex. i böjar.

## **6.4. LABORATORIEMÄTNINGAR HOS LÖGSTÖR RÖR A/S, DANMARK**

### **6.4.1**      *Fuktdiffusion*

För att bekräfta den teoretiska fuktvandningsmodellen som utvecklades av Lögstör Rör A/S företogs ett antal laboratiemätningar under kontrollerade förhållanden, vilket ger de bästa möjligheterna att jämföra resultaten med de beräknade värdena. Mätningarna genomfördes under tiden september 1996 till juni 1998 hos Lögstör Rör A/S i Danmark.

Man utförde tre försök för att kunna simulera olika drifts- och installationsförhållanden. Provstycken med en medietemperatur av 65°C och en omgivningstemperatur av 30°C placerade i en klimatkammare. (Relativ luftfuktighet 27 %, daggpunkt 10°C.)  
Provstycken med en medietemperatur av 80°C och en omgivningstemperatur av 30°C placerade i en klimatkammare. (Relativ luftfuktighet 27 %, daggpunkt 10°C.)  
Provstycken (fabriksisolerade plaströr) med en medietemperatur av 80°C och en omgivningstemperatur av 30°C i vattenbad.

Under testperioden togs fyra prov från alla tre försöken efter 2, 5, 11 och 22 månader. För att fastställa vattenhalten vägdes proven omedelbart efter varje provuttag.

Resultaten av mätningarna är sammanställda och jämförda med teoretiska resultat i Tabell 6.2.

Tabell 6.2: Fukthalt i Lögstör rörsystem 77/32 mm

Humidity content in Lögstör plastic pipe systems 77/32 mm.

Typ	Temperatur °C			Fukthalt g/m		Avvikelse %
	Medierör	Mantel	Daggpunkt	beräknat	uppmätt	
<b>Efter 63,3 dygn</b>						
A	66	30	10	1,53	1,60	4,2
B	82	36	10	5,17	5,44	4,9
C	82	30	30	7,52	8,05	6,6
<b>Efter 168 dygn</b>						
A	65	30	7	3,96	4,21	6,0
B	82	36	7	13,60	13,32	-2,1
C	82	30	30	19,99	20,68	3,3
<b>Efter 411 dygn</b>						
A	65	30	10	9,84	9,41	-4,6
B	80	36	10	33,43	33,76	1,0
C	82	30	30	48,85	53,93	9,4
<b>Efter 625 dygn</b>						
A						
B	80	36	10	47,92	53,59	10,6
C	80	30	30	71,26	73,76	3,4

Mätvärden och beräknade resultat för fukthalten stämmer mycket väl överens, den största avvikelsen är 10,6 %. Man får ha i åtanke att godstjockleken lätt kan variera några tiondels millimeter.

#### 6.4.2 Permeabilitetsparametrar

Mot bakgrund av det teoretiska förarbetet kunde man konstatera att materialegenskaperna har väsentligt inflytande på ångdiffusionen i fabriksisolerade plaströr. De påverkas särskilt av permeabiliteten hos medie- och mantelrör.

Permeabiliteten hos medierören (PEX-rör) mättes hos Wirsbo Bruk i Sverige. Då man ville genomföra försöken direkt på provstyckena utvecklades en ny testutrustning. LDPE-mantelrörets permeabilitet mättes på blåsta provstycken hos DTI.

Vidare fastställdes genom försök att processparametern bara hade liten betydelse för permeabiliteten hos PEX-rör. För sammanfattning av mätresultaten se Tabell 5.1, avsnitt 5.

#### 6.4.3 Diskussion av resultaten från Lögstörs laboriemätningarna

Mätningarna visar att fukten i marken inte spelar så stor roll för vattenansamling i isoleringen, som man ursprungligen trodde. Dessutom visar beräkningarna att normala förhållanden kan beskrivas med ledning av några enkla observationer vilket ger en tillräckligt bra bild för bedömning av problemens karaktär. Dessa enstaka observationer kan vara en kombination av en given drifttemperatur i medieröret och markfukten, t.ex. 100%.

Den största inverkan på själva permeationen av vattenånga genom medieröret och in i isoleringen kommer från värmemediets temperatur, eftersom såväl permeabiliteten som ångtryck ökar starkt med temperaturen. En beräkning med en antagen temperatur på 95 °C under 100 h per år och 80 °C under övriga tiden resulterar för ett 77/32 mm rörsystem med PUR-isolering för en drifttid av 30 år till en ökning av värmeförlusten från 0,24 W/(mK) till 0,30 W/(mK).

Undersökningarna gav dock ingen bild av de verkliga förhållandena i ett fabriksisolerat plaströr som legat i marken under många år. En undersökning av verkliga driftförhållanden var därför nästa logiska steg.

## 7. Fältförsök

Under tiden april 1999 till augusti 2000 har ett lokalt nät med i genomsnitt 10-års drifttid i Naestved i Danmark undersökts. Undersökningarna avsåg drifttemperatur under tiden, markens fuktighet och aktuell fukthalt i isoleringen. Det visade sig nödvändigt att ha kännedom om de lokala drifttemperaturerna och deras varaktighet under året, för att kunna dra slutsatser om fukthalten. Vidare behövdes kännedom om jordens temperaturfördelning i djupled under året.

Från värmeverket kunde de utgående drifttemperaturerna för en 10-års-period erhållas. Det visade sig snabbt att fuktberäkningar på dessa medeltemperaturer inte återger de uppmätta fuktighetsnivåerna. Av den anledningen installerades temperaturgivare i ett antal serviser för att mäta de lokala temperaturerna. Beroende på driftmönstret får man större eller mindre avvikelser från verkets framledningstemperatur, bl.a. som funktion av årstiden och utomhus-temperatur. I allmänhet var de lokala temperaturerna lägre än förväntat. Temperaturkorrektioner fick således genomföras för de enstaka nätsektionerna. De lokala framledningstemperaturerna kunde avvika med upp till 4-5 °C från den vid värmeverket uppmätta temperaturen (vilket återspeglar betydelsen av värmeförluster).

Vidare grävde man upp ett antal plaströr för att mäta deras vattenhalt. Vattenhalten bestämdes gravimetriskt som medelvärde av 10 provbitar från ett 1 m långt segment.

Resultatet för mätningarna och analyserna framgår av följande Tabell 7.1.

Tabell 7.1: Analysresultat från fältförsöken i Naestved.

*Results of the field analyses in Naestved.*

Adress	Drifttid	Dimension	Genomsnittstemperatur	Uppmätt fukthalt	Beräknad fukthalt (driftperiod)	Beräknad fukthalt (30 år)	Ändring i värmeledning pga fukt (30 år)
	år	mm/mm	°C	g/m	g/m	g/m	%
Havnegade 8	10	28/77	60	85	81	241	2,7
Birgittevej 11	12	22/63	67	171	135	337	6,2
Danavej 41	5	22/63	66	59	53	320	5,4
Nygårdsvej 11	6	28/77	70	72	71	356	4,2
Rolighetsvej 9	6	28/77	-	476	*)	-	-
Odinsvej 9-13	2,3	28/77	66	67	55	708	10,6
Ved Grönlandsvej	14	40/90	61	151	151	323	3,6

\*) utgår pga av skadad fjärrvärmerör

Som framgår av tabell 7.1 så är den största förväntade ökningen av den fuktbetingade värmeledningen under 30 års drift ca 10%. Beräkningarna är verifierade med fjärrvärmerör som har varit i drift upp till 14 år. **Det som förvånar mest hos de danska resultaten är att det i motsats till de tyska mätningarna inte finns några indikationer på en sådan ökning av värmeledningen som måste tillskrivas utdiffusion av drivgasen c-pentan ur isoleringen.**

## 8. Dagsläget

### 8.1. TYSKLAND

De här rapporterade undersökningarna har pågått i första hand på 1990-talet. Det började med TÜV Bayerns mätningar inom förbundsprojektet "Ny Fjärrvärmedistribution" /11/ och fortsatte med två projektserier genomförda hos IMA och FFI på uppdrag av "Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen e.V." /7, 8/. Undersökningarna avslutades 1999 och är rapporterade /5, 6/.

2001 startade man dock ett nytt förbundsprojekt med syfte att studera åldring av hela rörsystem. Planerat slut för projektet är 2003. IMA svarar för själva åldringsegenskaperna för skummet och FFI för värmeledningsmätningar på 3 m långa rörsektioner som åldrats i såväl luft som jordkanal. Vad gäller IMAs mätningar är parametrarna i första hand temperatur och fukthalt. Vid värmeledningsmätningar hos FFI skiljer man inte på effekter från fukt- eller från pentandiffusion, utan mäter bara totalförändringen. Detta innebär att det blir svårt att simulera resultaten.

De provade systemen är från Rehau, Polyterm, Lögstör, alla med PUR-isolering. Man studerar hårda skum (som används i vanliga mantelrör) och mjukare, flexibla skum som används i plaströr och flexrör.

*Resultat för fuktdiffusion i rörsystem med annan isolering än PUR-skum föreligger ej i Tyskland.*

Parallellt med detta projekt pågår ett annat beträffande diffusion av Pentan ut från (och luft in i) PUR-skum. IMA åldrar skummet och mäter värmeledningen. Det verkar som om Pentan också diffunderar ganska fort ur skummet (liknande CO<sub>2</sub>-blåsta skum).

#### 8.1.1 Sammanfattning av tyska resultaten

*Experimenten visar att, om förhållandena är ogynnsamma när systemet monteras, kan med tiden en ständigt ökande genomfuktning av PUR-skummet ske. Dessutom diffunderar - i motsats till den hårdare PUR-isoleringen i styva mantelrör - cellgasen c-Pentan relativt snabbt genom den mjukare PUR-isoleringen.*

*Båda effekterna innebär en tydlig höjning av värmeledningsförmågan hos plaströrssystemets PUR-skum. Fuktpåverkan kan också inverka menligt på livslängden hos plaströrssystem. Montering av plaströrssystem under kritiska förhållanden, som t ex i grundvatten, rekommenderas därför inte. Vid vidareutveckling av plaströrssystem borde tyngdpunkten läggas på att minska respektive undvika diffusion.*

### 8.2. DANMARK

I Danmark har särskilt Lögstör Rör A/S under 1990-talet gjort en stor insats för att utreda fuktspridningsmekanismen i deras plastmedierörssystem. Detta inte minst med hänsyn till de pågående tyska försöken och utmanande resultat därifrån. Inledande försök gjordes hos DTI /4/ men fortsatte fr o m 1995 i Lögstör Rör A/Ss egen regi med Leif Amby som ansvarig /2, 3/. Inom projektet utvecklades en detaljerad numerisk beräkningsmodell baserad på den i avsnitten 3.1 och 3.2 beskrivna teorin. Därefter gjordes laboratiemätningar för att verifiera



teorin och få grepp om de för vattendiffusionen mest väsentliga parametrarna. Vidare genomfördes simuleringar för att uppskatta Lögstörssystemets potentiella vattenupptagning som funktion av driftförutsättningar och drifttid.

Det visade sig att överensstämmelsen mellan teori och laboratorieförsök var ganska så god, men att den blev sämre, när man försökte förklara fukthalten i ledningar som har varit installerade i marken under flera år. I fältundersökningar som pågick 1999 och 2000 i Naestved framkom först stora skillnader mellan teoretisk och verklig fukthalt som inte kunde förklaras. Det visade sig att resultaten är mycket beroende på en detaljerad temperaturinformation för alla ledningssegment och inte kan valideras med endast de temperaturer (fram-, retur-) som mäts vid verket.

### **8.2.1 Sammanfattning av danska resultaten**

*Med hjälp av detaljerade mätningar resp temperaturuppskattningar från kundserviser och energileveranser kom man så småningom fram till en modell som man nu anser är tillfredsställande validerad. Extrapolerat till 30 års drifttid och vid en distributionstemperatur som för det mesta ligger under 80°C, men som under 5% av drifttiden tillåts öka till 95°C kan man räkna fram att försämringen av värmeledningen i Lögstörs plastmedierörssystem varierar mellan ca 3 % och 6 %, med 10 % som möjliga toppvärden i vissa fall.*

## 9. Sammanfattande värdering av mätningarna i Tyskland och Danmark

Om man jämför de erhållna resultaten från Tyskland och Danmark är det svårt att få en enhetlig bild av fuktdiffusionens betydelse i plaströrssystem. Med all respekt till de vanligtvis grundliga och påkostade mätprogram som genomförs i Tyskland, så lämnar deras resultat fler öppnar frågor än de besvarar.

För det första genomför man hos IMA-Dresden mätningar på hårda PUR-skum (blåsta med CO<sub>2</sub> resp c-pentan) som enligt deras egen interpretation inte är relevanta för det mjukare skummet som används i de mera böjliga plaströrssystemen. Resultatet blir att värmeledningen i det materialet är något lägre än det som uppmäts hos FFI-Hannover på verkliga rörssystem. Vidare förvarades respektive förbehandlades det hos IMA undersökta PUR-materialet på ett sätt som gör att drivgasen CO<sub>2</sub> resp c-pentan har lämnat skummet efter ca 8 dagar, varpå det uppmätta  $\lambda$ -värdet från ursprungligen 0,026 W/(mK) ökade till 0,037 W/(mK), dvs värdet för luft i PUR-skum. I den efterföljande befuktningssprocessen uppmätte man därefter inom loppet av ett par månader en ökning av  $\lambda$  till ca 0,044 W/(mK). Vid mätningar på segment av kompletta rörssystem hos FFI som lagrades ca 2400 h före försöken så utgår man också från ett  $\lambda$ -värde för luft av 0,038 W/(mK) och slutar efter 2100 h laborieredrift vid 90°C på ca 0,045 till 0,05 W/(mK). Dvs man ger varken skumproven eller rörssystemen en chans att utgå ifrån de lägre  $\lambda$ -värden som drivgasen CO<sub>2</sub> resp c-Pentan förväntas ha.

Det verkar alltså som slutsatserna av de tyska resultaten är att det *i praktiken inte går att uppnå* de för CO<sub>2</sub> respektive c-Pentan-blåsta skummen låga  $\lambda$ -värden.

Detta står i motsats till de i Danmark uppnådda hos Lögstör konstaterade fakta. Såväl-labororiemätningar som fältmätningar med fjärrvärmerör i drift så länge som 14 år visar att ökningen av  $\lambda$ -värdet i kompletta rörssystem är endast måttlig, med *värsta fall 10 % på 30 år*.

Resultaten från de danska projekten bekräftar den teoretiska modellen för sambandet mellan ångdiffusion, vattenackumulering i isoleringen och ökning av värmeledningsförmågan pga av fuktackumulering. Om man bortser från ett skadad fjärrvärmerör, beskriver mätningarna väl det teoretiska förloppet, om hänsyn tas till verkliga drifttemperaturer. Vidare konfirmerar mätningarna också andra materialegenskaper såsom permeabilitetsfaktorn och värmeledningskoefficienter för PE- och PEX-materialet. Som framgår av Tabell 7.1, så medför även en kännbar fuktackumulering endast en maximalt 10-%ig försämring av värmeledningsförmågan som kan tillskrivas fuktdiffusion.

Det är således den initiala utdiffusionen av cellgas som är en bidragande orsak till de i Tyskland uppmätta väsentligt högre utgångs- och slutvärdena för värmeledningskoefficienten. Bidragande orsak för det snabba diffusionsförloppet i Tyskland är troligtvis den höga drifttemperaturen (90 -95°C) jmf med de relativt låga temperaturerna i de danska fältförsöken (ca 65° - 70 °C med korta varaktigheter på 90°C).

Till skillnad från vad som sägs i de tyska rapporterna, fanns det i de danska fältstudierna inte heller några tecken på åldring och destruktion av skummet vilket också kan hänföras till de lägre temperaturnivåerna vid de danska försöken.

Sammanfattningsvis kan man således säga att det nuvarande kunskapsläget om fuktdiffusion i plastmedierör inte ger ett klart besked huruvida fuktdiffusion är ett problem eller ej. Detta är märkligt efter ett ca 10-årigt mätprogram som har pågått i Tyskland. De danska mätningarna ger då ett mera positivt besked, men man bör inte glömma att de väsentliga arbeten är gjorda av Lögstör Rör A/S på deras egna rör.

Man kan tillägga att den nu hos IMA och FFI påbörjade försöksserien inkluderar även Lögstörs plastmedierörssystem (förutom Polyterm och Rehau). Det blir intressant att se om de nya undersökningarna kan leda till en jämförbar och gemensam interpretation av alla mätresultaten.

## 10. Simuleringar av fukttransport i plastmedierörsystem

### 10.1. FUKTTRANSPORT I PLASTMEDIERÖRSYSTEM

Anledningen till att fukt kan kondensera i isoleringen i plastörssystem är att medieröret i viss utsträckning är genomsläppligt för vattenånga som transporteras från det varma fjärrvärmevattnet och kondenserar i den kallare isoleringen. Ångtransporten ut genom medieröret har sin grund i att det på insidan finns fler vattenångmolekyler per volymsenhet än på utsidan. Molekylernas slumpmässiga rörelser resulterar i ett nettoflöde från områden med hög vattenångkoncentration till områden med låg, dvs. från insidan och ut. En sådan transportprocess kallas för diffusion och brukar karakteriseras matematiskt med Ficks lag, som säger att transportflödet är proportionellt mot koncentrationsskillnaden. Genom medieröret blir ångflödet

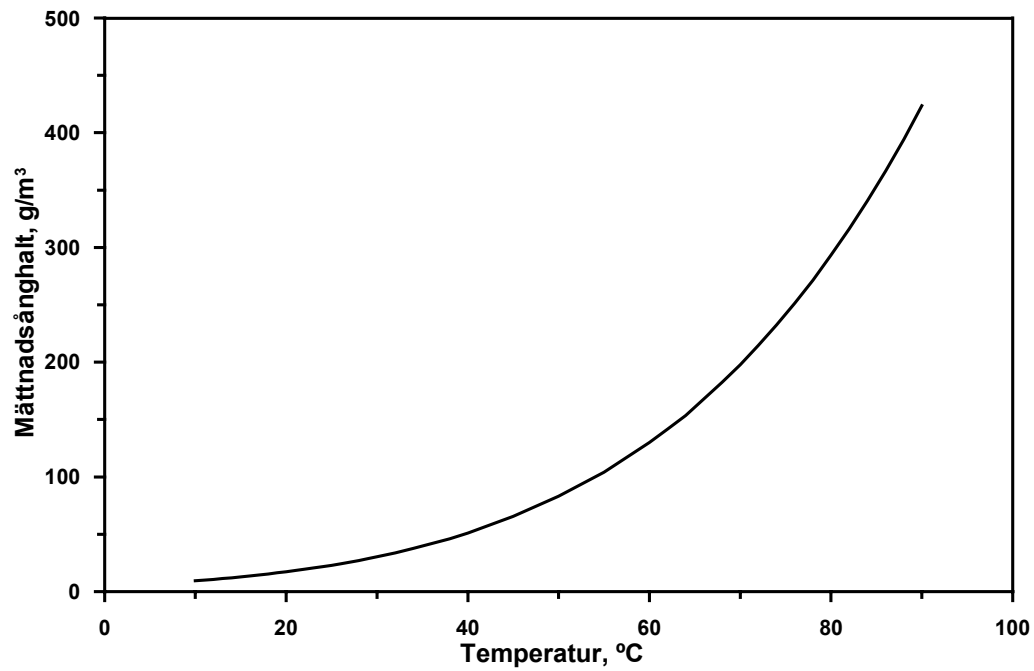
$$G = \frac{v_i - v_u}{Z_m} \quad (10.1)$$

där  $G$  är ångflödet per meter rörlängd ( $\text{kg/ms}$ ),  $v_i$  och  $v_u$  är ånghalterna på rörets insida respektive utsida ( $\text{kg/m}^3$ ) och  $Z_m$  är rörets ånggenomgångsmotstånd ( $\text{s/m}^2$ ) som bestäms av rörmaterialets diffusionsegenskaper samt av rörets vägg tjocklek och diameter.

När vattenången passerat medieröret transporteras den vidare genom isoleringsskummet och mantelröret och vidare ut i omgivningen. Den potential som driver hela transportprocessen är skillnaden i ånghalt mellan fjärrvärmevattnet,  $v_m$ , och den omgivande kringfyllningen,  $v_s$ . Ånghalten i rörkonstruktionen avtar ju längre ut man kommer, i princip såsom visas i Figur 10.2. Ångan kan kondensera ut till vatten i vätskefas i isoleringen om ånghalten någonstans blir lika stor som mättnadsånghalten. Mättnadsånghalten, dvs. luftens maximalt möjliga ångkoncentration, avtar hastigt med sjunkande temperatur som visas i Figur 10.1. Temperaturen i isoleringsskummet avtar snabbt med avståndet från medieröret och därmed också mättnadsånghalten. För att kondens i isoleringen skall undvikas måste ånghaltsskurvan enligt Figur 10.2 överallt ligga på nivåer under mättnadsånghalten vid aktuell temperatur.

Om ångflödet genom medieröret är större än ångflödet genom mantelröret kommer vatten att lagras upp i isoleringen. I förhållande till plaströren är isoleringsskummet mycket genomsläppligt för vattenånga och vatten som lagras upp i isoleringen kommer att ansamlas i kondenserad form mot mantelröret. Normalt är ånggenomgångsmotstånden ungefär desamma för medie- och mantelrören. Under ordinära driftförhållanden fås emellertid kondensation av vatten i isoleringen och ånghalten i skummet "tvingas ned" till mättnadsånghalten motsvarande mantelrörets temperatur, se Figur 10.2. Detta får till följd att ånghaltsskillnaden över medierörväggen blir mycket större än ånghaltsskillnaden över mantelörväggen. Enligt Ficks lag (10.1) blir ångflödet genom medieröret större på motsvarande vis och en gradvis ackumulering av vatten i isoleringen blir följden.

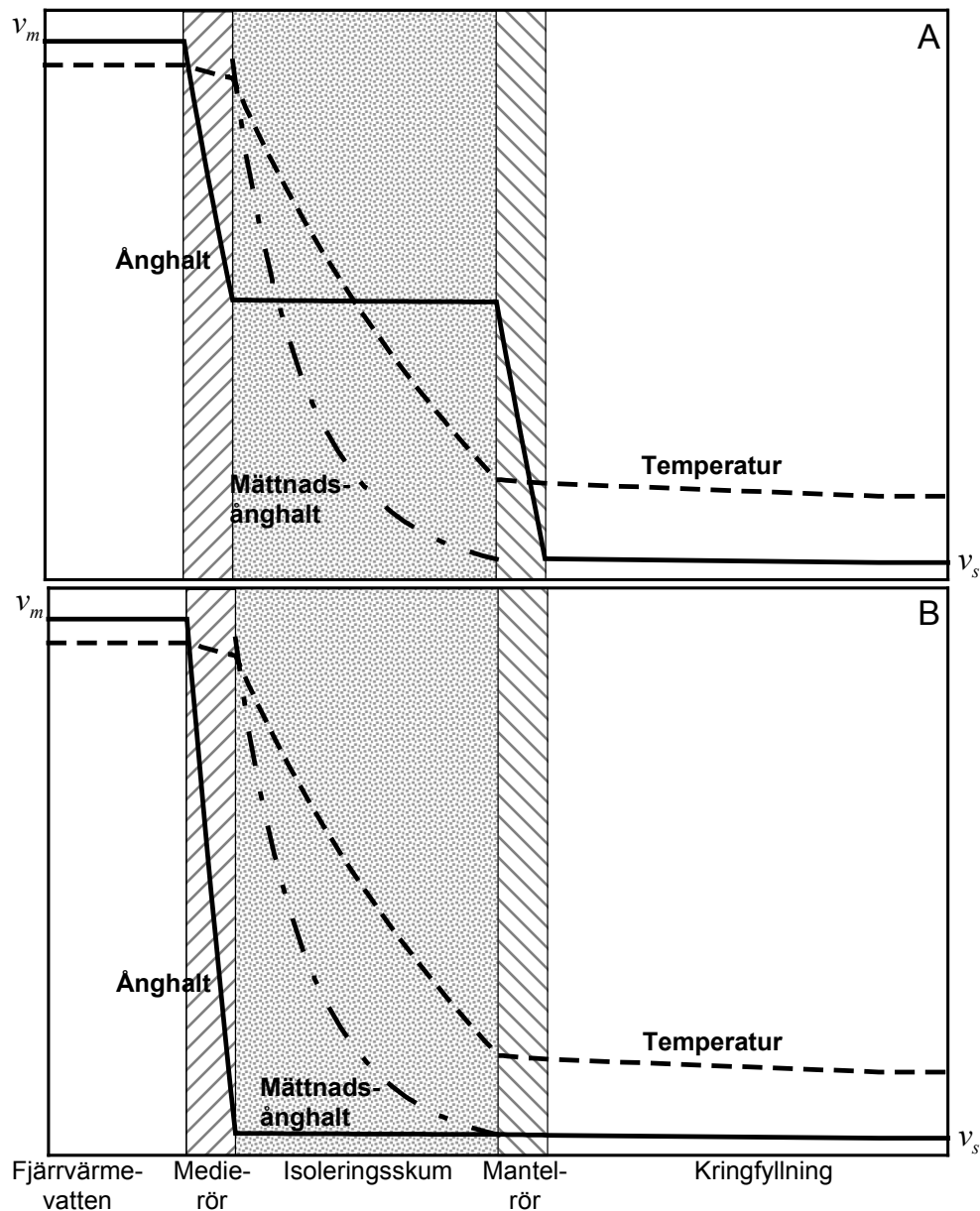
I takt med att vatten i vätskefas samlas i isoleringen försämras dess värmeisolerande förmåga och temperaturfördelningen genom röret förändras. Därmed påverkas mättnadsånghalten och, som en följd härav, även diffusionsvillkoren. I takt med att kondensfronten flyttas in i isoleringsmaterialet stiger mättnadsånghalten i kondensationspunkten och ångflödet genom medieröret minskar. Samtidigt ökar ångflödet ut genom mantelröret något på grund av att temperaturen stiger och ånggenomsläppligheten för polyetenmaterialet ökar. Vid någon



Figur 10.1: Mättnadsånghalt för fuktig luft som funktion av temperaturen.

*Vapour concentration at saturation for humid air as function of temperature.*

tidpunkt och någon tjocklek hos det vattenfyllda isoleringslagret kan en balans uppstå mellan ångflödena genom medieröret och mantelröret. Vid denna tidpunkt avstannar vattenackumuleringen och röret har nått sitt sluttillstånd avseende vatteninnehåll.



Figur 10.2: Principiell illustration av ånghalts- och temperaturfördelning genom rör-systemet. A) Ånghaltsfördelning beräknad utan hänsyn till mättnadsånghalt. B) Ånghaltsfördelning styrd av kondensationspunkt på mantelrörets insida.

Schematic illustration of vapour concentration and temperature distributions through the pipe system. A) Vapour concentration calculated without consideration of saturation. B) Vapour concentration restrained by condensation at the inside of the casing pipe wall.

## 10.2. BERÄKNINGSMETODIK

Allmänna diffusions- och värmeledningsproblem där tidsberoende effekter beaktas beskrivs matematiskt med s.k. andra ordningens partiella differentialekvationer. Sådana är, förutom i speciella fall, omöjliga att lösa analytiskt med "penna och papper". I det allmänna fallet tvingas man därför använda sig av någon typ av numerisk beräkningsmetod såsom finit elementmetod (FEM) eller finit differensmetod (FDM).

Det finns ett antal kommersiellt tillgängliga mjukvarusystem för generella tekniska beräkningar som kan hantera diffusion och värmeledning. Några av de största på marknaden är Abaqus, Ansys, Fluent och I-Deas (ref /16 – 19/). Den här typen av beräkningssystem är emellertid dyra. De är dessutom inte speciellt anpassade för den typ av kopplade värme- och fuktproblem som vi behandlar här och beräkningarna genomförs därför inte med lätthet.

Kondensation av fukt i isoleringsmaterial är ett välkänt problem inom byggnadsfysiken, som behandlar värme- och fuktproblem i byggnadsdelar såsom väggar, tak, etc. En genomgång av tillgänglig programvara har dock inte visat på några beräkningsprogram som kan hantera den här typen av kondensationsproblem i cylindrisk rögeometri.

En beräkningsmässig analys av fuktproblematiken i plaströrssystem kan emellertid förenklas så att förhållandevis lätthanterliga beräkningar ger resultat med fullt tillräcklig noggrannhet. Wegerdt m.fl. /15/ har, utan att närmare kvantitativt studera vattenackumuleringen, ställt upp vissa balansvillkor vad gäller diffusionsegenskaperna hos medie- och mantelrör och därigenom gjort en uppskattning av risken för kondensationsproblem under olika förutsättningar.

### **10.2.1 Vad krävs av beräkningsmodellen?**

En rörledning är en tredimensionell konstruktion och en fullständig analys av diffusionsprocesserna skulle kräva en tredimensionell beräkningsmodell. Så länge omgivningsförutsättningarna avseende exempelvis omgivningstemperatur etc. inte förändras avsevärt utefter röret kommer emellertid endast mycket små mängder fukt att diffundera i riktning längs med röret. Det är då möjligt att reducera problemet och endast räkna med diffusionsflöden i tvärsnittsplanet. Om man dessutom bortser från temperaturvariationer utefter röromkretsen, t.ex. orsakade av värmeflöden mellan fram- och returledning, får man en rotationssymmetrisk plan geometri som beräkningsmässigt kan hanteras som ett endimensionellt fall i polära koordinater. En sådan reduktion av problemets dimensionalitet medför inga större fel i beräkningsresultaten såvida man inte beaktar isoleringsmaterial som är genomsläppliga för flytande vatten, t.ex. öppencelliga skummaterial. I sådana fall kommer kondenserat vatten att samlas vid rörets botten och i lågpunkter längs ledningen och en endimensionell beräkning kan inte längre användas.

Vid stationära förhållanden, då man har samma fuktflöde från fjärrvärmevattnet in till medieröret som från medieröret in till kondensationspunkten i PUR-isoleringen, behöver man inte ta hänsyn till någon upplagring av fukt i medieröret eller i den torra isoleringen. Man behöver då inte ta ”omvägen” via partiella differentialekvationer utan fuktflödena kan beräknas direkt ur Ficks lag (10.1). Detta förhållande gäller egentligen aldrig för ett rörsystem där fuktackumulering pågår, vilket i sin tur gör att fuktflödena kontinuerligt ändras med tiden. Emellertid kan samma beräkningsmässiga förenkling göras om förändringarna i fuktflöde sker tillräckligt snabbt i förhållande till hela fuktackumuleringens tidsskala. En sådan ”kvasi-stationär” beräkningsmodell har utvecklats av Pedersen och Daugaard /2/ som ger resultat i god överensstämmelse med laboratoriemätningar.

För att en beräkningsmodell skall kunna simulera fuktackumuleringsförloppet krävs god kännedom om ånggenomsläpplighetskoefficienterna för i första hand medieröret och mantelröret. Även isoleringsskummets diffusionsegenskaper har viss betydelse, men denna kan betraktas som underordnad. Ånggenomsläpplighetskoefficienten för PUR-skum för fasta rörsystem har redovisats bl.a. av Bergström m.fl. /13/ och ligger kring nivåer jämförbara med exempelvis trä och cementbruk. PUR-skum är således ett inte särskilt ångtätt material till skillnad från polyeten, som normalt används som barriärmaterial för vattenånga. Mätningar av

vattenångpermeabilitet hos PEX-rör och PE-rör redovisade av Pedersen och Daugaard /2/ visar att ånggenomgångsmotståndet för medierör och mantelrör är i storleksordningen 25 000 gånger större än ånggenomgångsmotståndet för den torra PUR-isoleringen. PUR-skummets diffusionsmotstånd kan således med god noggrannhet försummas.

Ånggenomsläpplighetskoefficienten för polyeten är i viss utsträckning beroende av temperaturen så att ångtransporten sker snabbare vid högre temperatur. Detta påverkar vattenackumuleringsförloppet genom att temperaturen på mantelröret stiger i takt med att kondensvatten fyller upp isoleringsskummet. Denna effekt blir dock påtaglig först när en betydande del av isoleringen vattenfylld. Den beräkningsmässiga konsekvensen av att försumma temperaturberoendet blir en felkattning av rörets sluttillstånd, dvs. vattenfyllnadsgraden vid ångflödesjämvikt.

Förutom ångdiffusionen måste även värmeflöden och temperaturer beräknas. Dessa beräkningar är i många stycken analoga och kräver kännedom om värmeledningsförmågan för de ingående materialen och värmemotståndet för kringfyllningen. Detta är huvudsakligen välkända fysikaliska data, möjligen med undantag för värmeledningsförmågan för uppfuktat PUR-skum.

Om målet med beräkningen är en noggrann bestämning av fördelningen av fukt och vattenånga i isoleringsskummet krävs goda kunskaper om framför allt isoleringens fukttekniska egenskaper, såsom sorptionssambandet mellan relativ luftfuktighet och porvatteninnehåll och hur värmeledningsförmåga och ånggenomsläpplighet förändras med vatteninnehåll. Detta är data som i dagsläget inte finns tillgängliga men som kan mätas fram med standardmässiga metoder om behovet skulle uppstå. Om beräkningen endast avser uppskatta mängden ansamlat vatten kan detta genomföras på ett förhållandevis enkelt sätt, såsom visas i följande avsnitt.

### **10.3. ENKEL BERÄKNINGSMODELL FÖR VATTENACKUMULERING**

Beräkningsmodellen som härleds i det följande följer huvudsakligen Pedersen och Daugaards modell redovisad i /2/. Ytterligare approximationer är införda för att så långt möjligt förenkla beräkningsarbetet utan någon väsentlig förlust i beräkningsprecision. Behandlingen har tagits några steg längre än i /3/ vad gäller villkor för att kondens skall uppträda (avsnitt 10.3.5) samt rörets sluttillstånd vad gäller mängden ackumulerat vatten och hur lång tid som krävs innan det uppnås (avsnitt 10.3.7).

#### **10.3.1 Approximationer**

Följande approximationer infördes av Pedersen och Daugaard:

- En rotationssymmetrisk plan (dvs. endimensionell) geometri används.
- Den ”kvasi-stationära” approximationen vad gäller ångflödena (se diskussion på sidan 37, avsnitt 10.2.1) utnyttjas.
- Diffusionsmotståndet för vattenånga i kringfyllningen försummas.
- Konstanta värden används för PUR-isoleringens ånggenomsläpplighetskoefficient samt värmeledningsförmåga i torrt respektive vått tillstånd.

I föreliggande modell har utöver ovanstående följande ytterligare approximationer införts:



- PUR-skummets diffusionsmotstånd för vattenånga försummas.
- Ånggenomsläpplighetskoefficienternas temperaturberoende för medie- och mantelrören försummas.

En ytterligare skillnad är att Pedersen och Daugaard har beaktat värmeutbytet mellan fram- och returledning vid beräkning av temperaturer. Detta har inte gjorts i föreliggande modell, delvis på grund av att inverkan tycks vara liten men även för att det överensstämmer dåligt med ett rotationssymmetriskt antagande vad gäller temperaturfördelningen i röret.

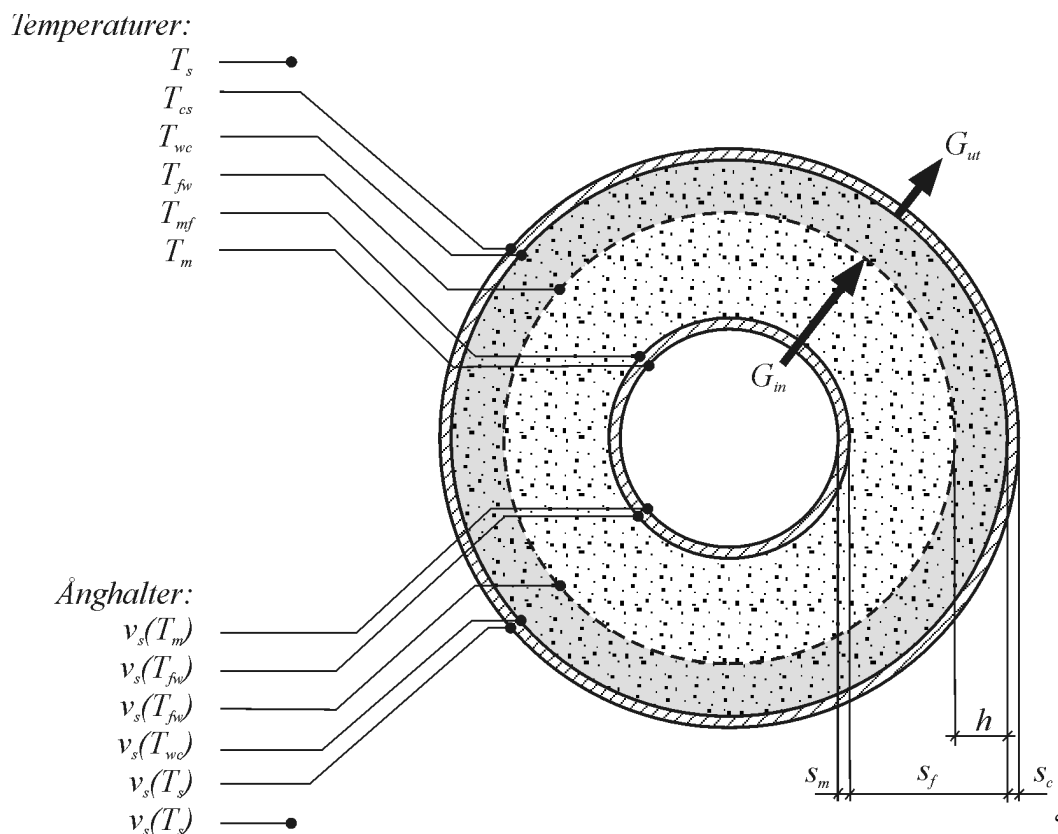
### 10.3.2 Beteckningar

För de fysikaliska storheter som används i behandlingen nedan används beteckningar enligt följande tabell och Figur 10.3 nedan.

$D$	Diameter	[m]
$G_{in}$	Fuktkflöde genom medieröret	[kg/ms]
$G_{ut}$	Fuktkflöde ut genom mantelröret	[kg/ms]
$H$	Lägningsdjup	[m]
$h$	Tjocklek hos vattenfyllt isoleringsskikt	[m]
$h_{jv}$	Tjocklek hos vattenfyllt isoleringsskikt vid jämviktstillstånd	[m]
$M$	Mängd ackumulerad fukt i isoleringen	[kg/m]
$M_w$	Molekylvikten för vatten	[0,018 kg/mol]
$P$	Permeabilitet	[kg/msPa]
$Q$	Aktiveringsenergi	[J/mol]
$R$	Värmemotstånd	[mK/W]
$R_0$	Värmeövergångsmotstånd vid markytan	[mK/W]
$R_g$	Gaskonstanten	[8,314 J/molK]
$s$	Tjocklek	[m]
$T$	Temperatur	[K]
$v$	Ånghalt	[kg/m <sup>3</sup> ]
$v_{sat}$	Mättnadsånghalt	[kg/m <sup>3</sup> ]
$Z$	Ånggenomgångsmotstånd	[s/m <sup>2</sup> ]
$\delta$	Ånggenomsläpplighetskoefficient	[m <sup>2</sup> /s]
$\lambda$	Värmeledningstal	[W/mK]
$\phi$	Porositeten hos PUR-skummet	[-]
$\rho_w$	Densiteten för vatten	[1000 kg/m <sup>3</sup> ]

### Index

$c$	Mantelrör
$f$	Torrt skum
$m$	Medierör
$s$	Kringfyllning
$w$	Vått skum



Figur 10.3 Tolkning av ånghalter, temperaturer, etc., i beräkningsmodellen.  
Interpretation of vapour concentrations, temperatures, etc., in the model.

### 10.3.3 Fysikaliska data

Numeriska värden på fysikaliska data för rörmaterialen har hämtats från Pedersen och Daugaard /2/.

Medierörets ånggenomsläplighetskoefficient:	$\delta_m = 1,7 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$
Mantelrörets ånggenomsläplighetskoefficient:	$\delta_c = 1,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$
Medierörets värmeledningsförmåga:	$\lambda_m = 0,3 \text{ W/mK}$
Mantelrörets värmeledningsförmåga:	$\lambda_c = 0,38 \text{ W/mK}$
Torrt PUR-skums värmeledningsförmåga:	$\lambda_f = 0,033 \text{ W/mK}$
Vått PUR-skums värmeledningsförmåga:	$\lambda_w = 0,35 \text{ W/mK}$
Värmeövergångskoefficient vid markytan:	$R_0 = 0,0685 \text{ m}^2\text{K/W}$

### 10.3.4 Teoretisk bakgrund

All fukt som diffunderar in i isoleringen genom medieröret och inte släpps ut genom mantelröret antas kondensera och samlas i ett fuktigt skumlager innanför mantelrörets yta. Mängden ackumulerat vatten per tidsenhet är således

$$\dot{M} = G_{in} - G_{ut} \quad (10.2)$$

Tjockleken hos det vattenfyllda skumskiktet är

$$h(M) = \frac{D_c - 2s_c}{2} + \sqrt{\frac{(D_c - 2s_c)^2}{4} - \frac{4M}{\pi\rho_w\phi}} \quad (10.3)$$

PUR-skummet antas vara fullständigt genomsläppligt för vattenånga, vilket innebär att ånghalten mellan medierör och PUR-skum är densamma som ånghalten invid den fuktiga isoleringen. Ångtransporten in i isoleringen blir

$$G_{in} = \frac{v_{sat}(T_m) - v_{sat}(T_{fw})}{Z_m} \quad (10.4)$$

På samma sätt antas marken vara fullt genomsläpplig och ånghalten utanför mantelröret bestäms av mätnadsånghalten i omgivningen, som därvid antas ha en relativ fuktighet på 100 %. Ångtransporten ut ur isoleringen blir

$$G_{ut} = \frac{v_{sat}(T_{wc}) - v_{sat}(T_s)}{Z_c} \quad (10.5)$$

Ånggenomgångsmotstånden för medie- respektive mantelrör är

$$Z_m = \frac{1}{2\pi\delta_m} \ln \frac{D_m}{D_m - 2s_m} \quad (10.6)$$

$$Z_c = \frac{1}{2\pi\delta_c} \ln \frac{D_c}{D_c - 2s_c} \quad (10.7)$$

Om diffusionsegenskaperna för polyetenmaterialen är givna som permeabilitetskoefficienter, kan dessa räknas om till ånggenomsläpplighetskoefficienter enligt

$$\delta = \frac{PR_g T}{M_w} \quad (10.8)$$

Temperaturfördelningen genom rörkonstruktionen beror av tjockleken  $h$ . I (10.4) och (10.5) är således  $T_{fw}$  och  $T_{wc}$  funktioner av  $h$ . För att bestämma ångflödena måste således temperaturfördelningen genom det delvis uppfuktade röret först beräknas. Temperaturerna i de olika skiktgränserna fås ur

$$\left. \begin{aligned} T_{mf}(h) &= \frac{R_m T_s + (R_f(h) + R_w(h) + R_c + R_s) T_m}{R_{tot}(h)} \\ T_{fw}(h) &= \frac{(R_m + R_f(h)) T_s + (R_w(h) + R_c + R_s) T_m}{R_{tot}(h)} \\ T_{wc}(h) &= \frac{(R_m + R_f(h) + R_w(h)) T_s + (R_c + R_s) T_m}{R_{tot}(h)} \\ T_{cs}(h) &= \frac{(R_m + R_f(h) + R_w(h) + R_c) T_s + R_s T_m}{R_{tot}(h)} \end{aligned} \right\} \quad (10.9)$$

där värmemotstånden för de olika skikten ges av

$$\left. \begin{aligned}
R_m &= \frac{1}{2\pi\lambda_m} \ln\left(\frac{D_m}{D_m - 2s_m}\right) \\
R_f(h) &= \frac{1}{2\pi\lambda_f} \ln\left(\frac{D_c - 2s_c - 2h}{D_m}\right) \\
R_w(h) &= \frac{1}{2\pi\lambda_w} \ln\left(\frac{D_c - 2s_c}{D_c - 2s_c - 2h}\right) \\
R_c &= \frac{1}{2\pi\lambda_c} \ln\left(\frac{D_c}{D_c - 2s_c}\right) \\
R_s &= \frac{1}{2\pi\lambda_s} \ln\left(\frac{4(H + R_0\lambda_s)}{D_c}\right)
\end{aligned} \right\} \quad (10.10)$$

$R_{tot}$  är summamotståndet för samtliga skikt, dvs

$$R_{tot}(h) = R_m + R_f(h) + R_w(h) + R_c + R_s \quad (10.11)$$

### 10.3.5 Kondensationsvillkor

För att kondensation av vattenånga inte skall ske i PUR-skummet krävs att ånghalten på insidan av mantelröret inte överskrider mätnadsånghalten vid den aktuella temperaturen:

$$v_{wc} < v_s(T_{wc}) \quad (10.12)$$

För att villkoret ovan skall kunna uppfyllas krävs att ångtransporten ut genom mantelröret är större än eller lika med ångtransporten in genom medieröret:

$$G_{ut} = \frac{v_s(T_{wc}) - v_s(T_s)}{Z_c} \geq \frac{v_s(T_m) - v_s(T_{wc})}{Z_m} = G_{in} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{Z_m}{Z_c} \geq \frac{v_s(T_m) - v_s(T_{wc})}{v_s(T_{wc}) - v_s(T_s)} \quad (10.13)$$

Risken för kondens bestäms således av kvoten mellan medie- och mantelrörens ånggenomgångsmotstånd. Ur (10.6) och (10.7) fås

$$\frac{Z_m}{Z_c} = \frac{\ln\frac{D_m}{D_m - 2s_m} \delta_c}{\ln\frac{D_c}{D_c - 2s_c} \delta_m} = \frac{-\ln\frac{D_m - 2s_m}{D_m} \delta_c}{-\ln\frac{D_c - 2s_c}{D_c} \delta_m} = \frac{\ln\left(1 - \frac{2s_m}{D_m}\right) \delta_c}{\ln\left(1 - \frac{2s_c}{D_c}\right) \delta_m} \quad (10.14)$$

Logaritmerna i (10.14) kan förenklas genom Taylorutveckling:

$$\ln(1-x) = -x - \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} - \dots, \quad -1 \leq x < 1 \quad (10.15)$$

Såväl medie- som mantelrör kan betraktas som tunnväggiga, dvs. kvoten  $s/D$  är liten och högre potenser i (10.15) försummas:

$$\ln\left(1 - \frac{2s}{D}\right) \approx -\frac{2s}{D} \quad (10.16)$$

Insättning av (10.16) i (10.14) ger

$$\frac{Z_m}{Z_c} \approx \frac{-2s_m/D_m}{-2s_c/D_c} = \frac{s_m}{s_c} \frac{D_c}{D_m} \frac{\delta_c}{\delta_m} \quad (10.17)$$

Om (10.17) kombineras med (10.13) fås ett ”icke-kondensskriterium” avseende förhållandet mellan mantel- och medierörens ånggenomsläplighetskoefficienter för given röргеometri:

$$\Rightarrow \frac{\delta_c}{\delta_m} \geq \frac{s_c}{s_m} \frac{D_m}{D_c} \frac{v_s(T_m) - v_s(T_{wc})}{v_s(T_{wc}) - v_s(T_s)} \quad (10.18)$$

### 10.3.6 Vattenackumulering

För att beräkna mängden ackumulerat vatten i isoleringen som funktion av tiden sätts (10.4) och (10.5) in i (10.2), vilket ger den ”kvasi-stationära” differentialekvationen

$$\dot{M} = \frac{v_s(T_m) - v_s(T_{fw}(h(M)))}{Z_m} - \frac{v_s(T_{wc}(h(M))) - v_s(T_s)}{Z_c} \quad (10.19)$$

med begynnelsevillkoret

$$M|_{t=0} = 0.$$

Ekv (10.19) är en ordinär differentialekvation av första ordningen som lätt integreras numeriskt med god precision, exempelvis med Runge-Kuttas metod.

### 10.3.7 Jämviktstillstånd

Om kondensation och vattenackumulering sker kommer isoleringsskummet gradvis att fyllas upp med vatten utifrån. Detta gör att rörets värmeisolerande förmåga försämras och att temperaturfördelningen genom rörkonstruktionen förändras. Speciellt förändras temperaturerna  $T_{mf}$  utanför medieröret och  $T_{wc}$  innanför mantelröret. Följden blir att mättnadsånghalterna i ekvationerna (10.4) och (10.5) och skillnaden mellan fuktflödena  $G_{in}$  och  $G_{ut}$  minskar. I vissa fall kan diffusionsegenskaper och geometri hos rörsystemet göra att det finns vattenskiktjocklek  $h_{jv}$  vid vilken  $G_{in}$  och  $G_{ut}$  är lika stora och:

$$\frac{v_s(T_m) - v_s(T_{fw}(h_{jv}))}{Z_m} = \frac{v_s(T_{wc}(h_{jv})) - v_s(T_s)}{Z_c} \quad (10.20)$$

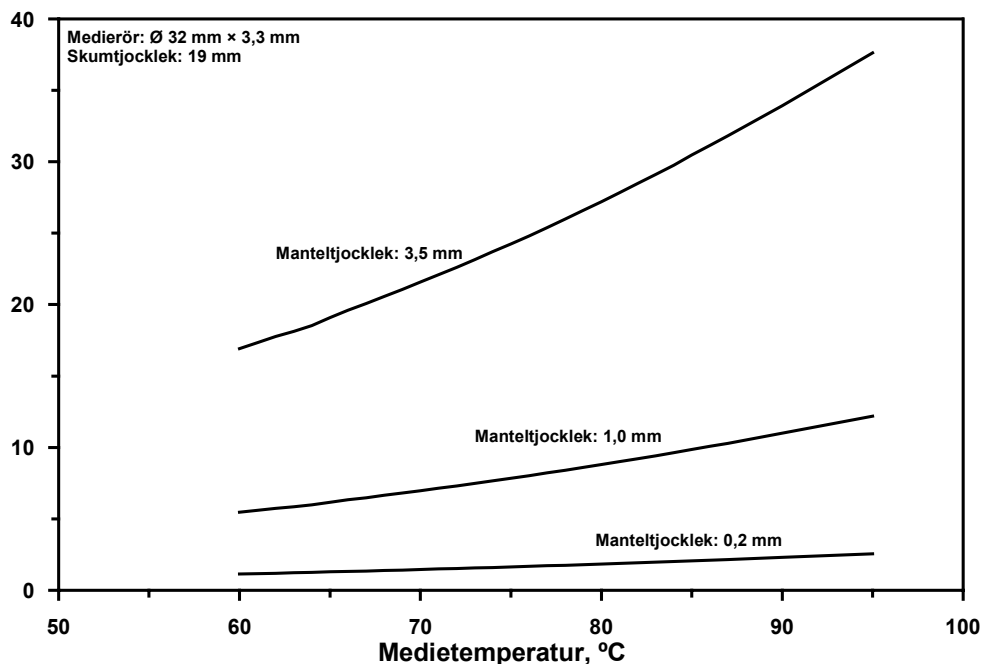
När flödesjämvikten enligt (10.20) är uppnådd avstannar vattenackumuleringen enligt ekv. (10.2):

$$\dot{M}\Big|_{h=h_{jv}} = 0 \quad (10.21)$$

I detta skede har röret nått sitt sluttillstånd avseende uppfuktning och ingen ytterligare nettoansamling av vatten sker, såvida inte temperaturförhållanden, etc., ändras.

## 10.4. BERÄKNINGSEXEMPEL FJÄRRVÄRMERÖR

### 10.4.1 Kondensationsvillkor



Figur 10.4 Minsta värde på kvoten  $\delta_c/\delta_m$  för att kondens inte skall uppträda som funktion av medietemperaturen. Beräknat med ekv. (10.18).

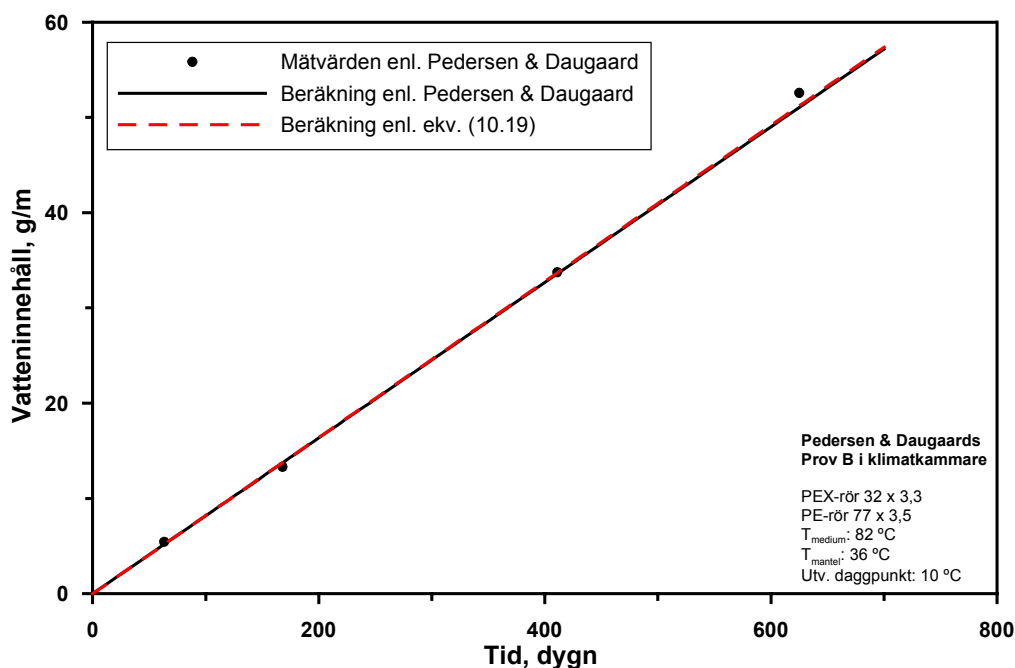
*Least ratio  $\delta_c/\delta_m$  in order for condensation not to occur with different casing pipe thicknesses. Calculated with eq. (10.18).*

Ur ekvation (10.18) ses att för ett standardmässigt rörsystem, med 32 mm medierör och 77 mm mantelrör, krävs att ånggenomsläpplighetskoefficienten för HDPE-materialet är omkring 20 – 30 gånger större än för PEX-materialet om kondens inte skall uppträda, Figur 10.4. För HDPE- och PEX-material utan särskilda barriäregenskaper vad gäller vattenångdiffusion är emellertid kvoten  $\delta_c/\delta_m \approx 1$ . Med sådana material måste istället förhållandet mellan medie- och mantelrörens tjocklekar vara mellan 20 – 30 för att isoleringen skall hållas torr. En liknande studie genomfördes av Wegerdt m.fl. /15/, där man kom fram till liknande resultat (se avsnitt 4.1).

### 10.4.2 Vattenackumulering

Den beräknade vattenackumuleringen enligt ekv. (10.19) har jämförts mot mätningar och beräkningar enligt Pedersen och Daugaard /2/, Figur 10.5. Mätningar gjordes på ett plaströrsystem som lagrades i klimatkammare med konstant temperatur och daggpunkt. Som synes är överensstämmelsen mellan mätningar och beräkningar mycket god och skillnaden

mellan Pedersen och Daugaards modell och den förenklade varianten är försumbar. Det bör dock noteras att röret kommit en mycket kort bit på väg i sin uppfuktningshistoria. Den vattenmängd på omkring 50 g/m som uppmätts efter 2 år motsvarar ett vattenfyllt skikt om ca. 0,5 mm.

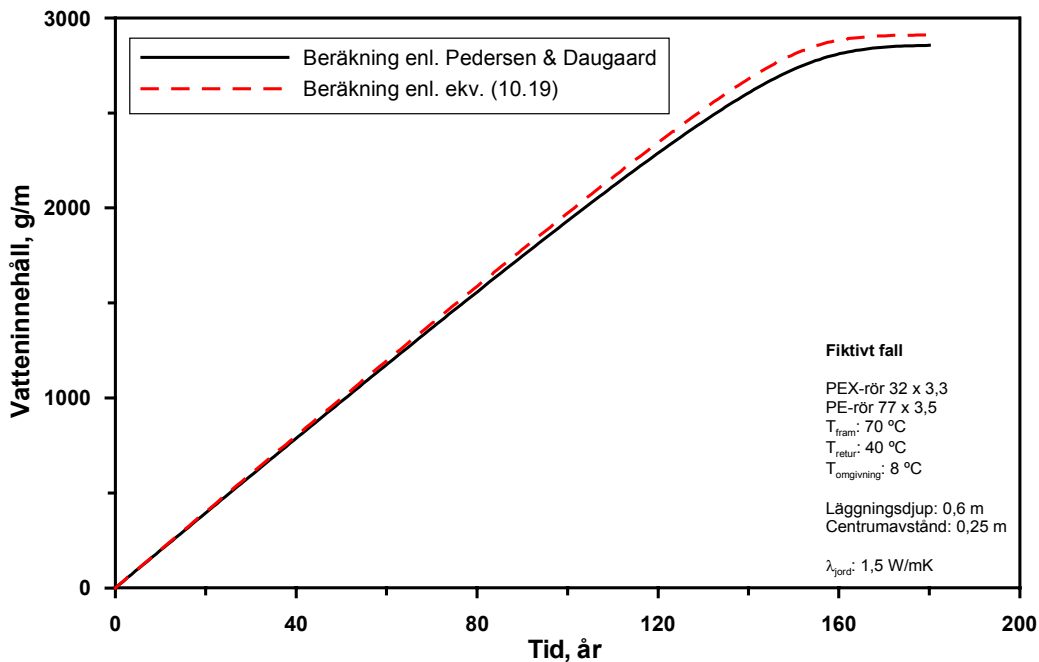


Figur 10.5 Vattenackumulering i rörsystem lagrat i klimatkammare. Jämförelse mellan mätningar från /2/ och beräkningar enligt olika metoder.

*Water accumulation in pipe system stored in climate chamber. Comparison of measurements from /2/ and calculations according to different methods.*

I /3/ jämförs beräkningar enligt Pedersen och Daugaards modell mot uppmätt vatteninnehåll i plaströrsledningar som varit i drift under ett antal år. Med hänsyn till osäkerheter i drift- och omgivningstemperaturer, etc., är överensstämmelsen god. I Figur 10.6 visas beräkningsresultat för en fiktiv markförlagd plaströrsledning. Observera att skalan på abskissan nu anges i år istället för dygn. Vattenackumuleringen fortgår med oförändrad hastighet i omkring 50 år och efter så lång tid som 100 år har röret ännu inte nått sitt sluttillstånd. Vattenackumuleringen är således en mycket långsam process.

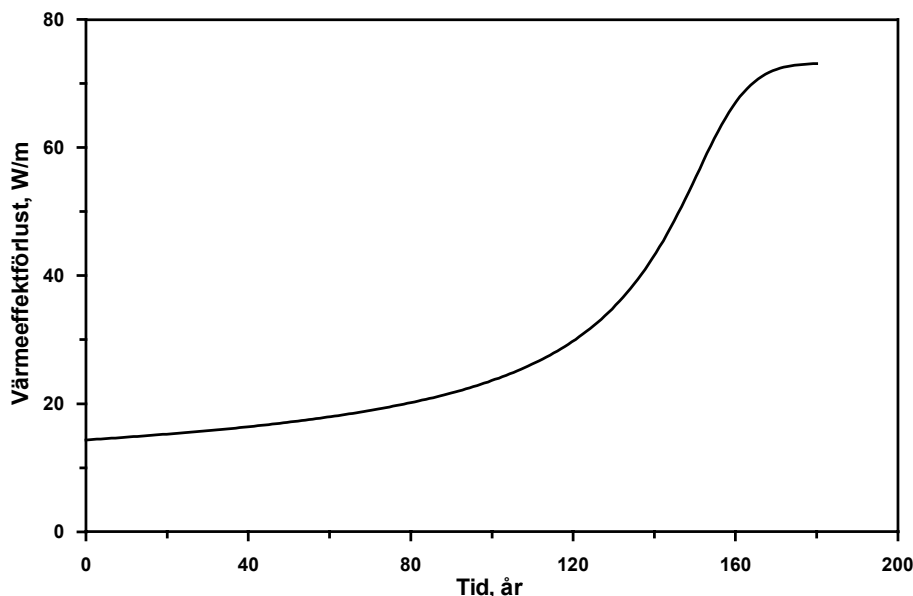
Skillnaden i resultaten från de två olika beräkningsmodellerna är knappt urskiljbar för tider kortare än omkring 50 år. Skillnaden manifesteras främst i det olinjära området då vattenfyllnadsgraden närmar sig sluttillståndet. Den har sin grund i att den förenklade modellen bortser från att ånggenomsläppligheten hos mantelröret ökar något med tiden och därigenom något överskattar mängden vatten vid jämvikt.



Figur 10.6 Vattenackumulering hos markförlagd rörledning beräknat enligt olika metoder.  
Water accumulation in buried pipeline calculated according to different methods.

#### 10.4.3 Fuktens inverkan på värmeförlusterna

I takt med att PUR-isoleringen fylls upp med kondensvatten minskar dess värmeisolerande förmåga och rörledningens värmeförluster ökar. Figur 10.7 visar hur värmeeffektörlusterna utvecklas med tiden för samma beräkningsfall som redovisas i Figur 10.6. Resultaten beror starkt av det något osäkra värdet på det våta PUR-skummets värmeledningsförmåga, men det råder inga tvivel om att värmeförlusterna ökar kraftigt då isoleringen vattenfylls. Med beräkningsdata enligt avsnitt 10.3.3 försämras rörets isoleringsförmåga med ca. 20 % efter 50 års drifttid. Detta kan jämföras med motsvarande försämring orsakad av utdiffusion av blåsgaser som cyklopentan och koldioxid som av Olsson /14/ anges till omkring 30 %.



Figur 10.7 Värmeeffektörlust som funktion av drifttid för beräkningsfallet i Figur 10.6.  
Energy loss as function of service time for the calculation example in figure 10.6.



## 10.5. BERÄKNINGSEXEMPEL KYLRÖR

I ett kylrör kommer diffusionsprocessen huvudsakligen att gå åt andra hållet, dvs. markfukt diffunderar in i röret genom manteln. Orsaken till detta är den omvända temperaturgradienten. När den omgivande marken är fuktig och varmare än medieröret kommer ånghalten att vara högre än i röret vilket leder till en ångtransport inåt.

Fukttransporten in i rörisoleringen blir dock betydligt mindre än för en värmeledning med plastmedierör. Anledningen till detta är att ånghalten, som driver diffusionsprocessen, är så mycket mindre även i mycket fuktig mark än i hett fjärrvärmevatten. Ånghalten i fuktig mark vid +10°C är omkring 10 g/m<sup>3</sup> och för fjärrvärmevatten vid +90°C ca. 420 g/m<sup>3</sup>. Ångtransporten in i isoleringen kan således förväntas gå många gånger långsammare i ett kylrörsfall.

När ånga kondenserar till vatten i isoleringen samlas detta mot det kalla medieröret. Om medieröret är av plast kommer en viss diffusion av vattenånga *in* i medieröret att ske. Storleken hos detta flöde bestäms av skillnaden i mätnadsånghalt för temperaturerna på in- respektive utsidan av medierörväggen. Vid de låga temperaturnivåer som är aktuella för ett kylrör är denna skillnad liten och flödet blir således också litet. Faktum är att den inverkan som diffusionen genom medierörväggen har på vattenackumuleringen är i stort försumbar. Vad gäller mängden vatten som ansamlas i isoleringen kan således plaströrs- och stålrörssystem betraktas som ekvivalenta.

Tiden som krävs för att den relativa fuktigheten invid medierörsväggen ska nå 100 % och vattenånga börjar kondensera kan uppskattas med följande resonemang. Beteckningar enligt avsnitt 10.3.2 används. Fuktflödet in genom mantelröret kan skrivas

$$G_{in}(t) = \frac{v_s - v(t)}{Z_c} \quad (10.22)$$

Där  $v(t)$  är ångkoncentrationen på insidan av mantelröret. Om isoleringen antas vara helt ånggenomsläpplig, ökar ångkoncentrationen i isoleringen med följande hastighet:

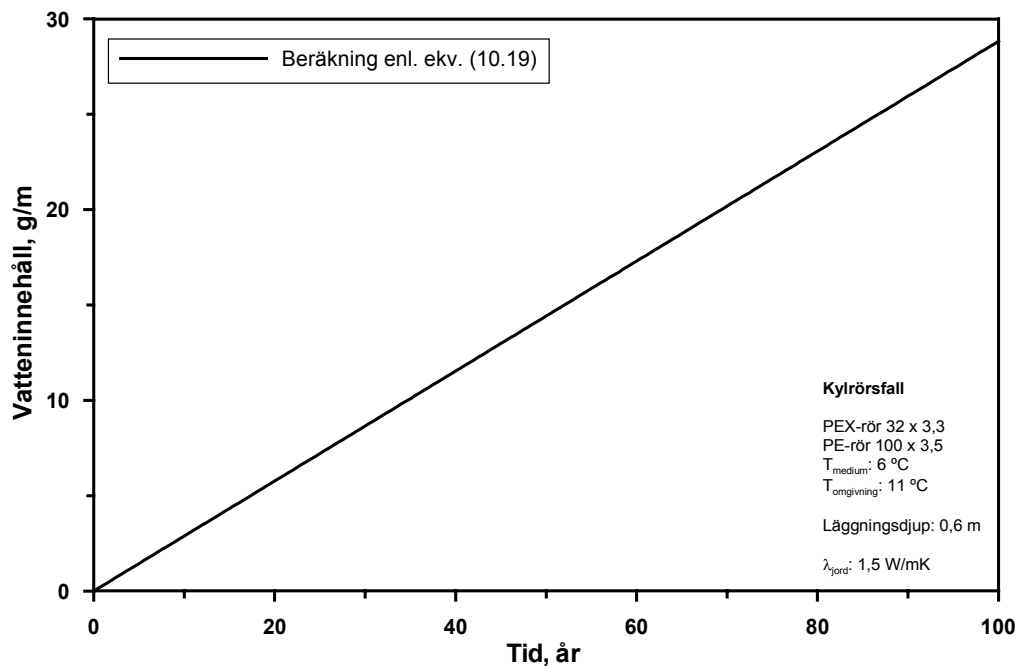
$$\dot{v}(t) = \frac{G_{in}(t)}{A} \quad (10.23)$$

Där  $A$  är isoleringens tvärsnittsarea. Om (10.22) sätts in i (10.23) fås en differentialekvation med lösningen

$$v(t) = v_s - (v_s - v_0)e^{-\frac{1}{AZ_c}t} \quad (10.24)$$

Där  $v_0$  är den ursprungliga ångkoncentrationen i isoleringsskummet.

Ur (10.24) kan tiden som krävs för att uppnå en viss ångkoncentration beräknas. Med förutsättningar enligt figur 10.8 fås att det tar ca. 25 dygn innan ånghalten i isoleringen blir så hög att vatten börjar kondensera mot medierörväggen.



Figur 10.8: Beräknad vattenackumulering i kylrörsystem.

Calculated water accumulation in cooling pipe system.

En enkel simulering av ett kylrör av dimension 32/100 mm genomfördes med den beräkningsmodell som beskrivs i avsnitt 10.3. Det ackumulerade vatteninnehållet som funktion av tiden åskådliggörs i Figur 10.8. Som synes är processen betydligt långsammare än för motsvarande värmerörsfall, jämför Figur 10.6, och efter 100 år har ca. 29 g vatten per löpmeter ledning kondenserat mot medieröret. Detta motsvarar ett vattenfyllt isoleringslager på ca. 0,3 mm och inverkan på rörets isoleringsförmåga är således försumbar. För ett plaströrsystem medför inte heller fukten på medieröret några korrosionsproblem. För motsvarande stålrörsystem är däremot risken för korrosion uppenbar.

## 10.6. SLUTSATSER AVSEENDE ÅNGDIFFUSION I RÖRISOLERING

De av oss genomförda förenklade beräkningarna för fjärrvärme- och kylrör visar att diffusion av **vattenånga i plaströrsystem med skum med slutna celler** (PUR) är ett mindre problem. Visserligen ökar värmeledningen med tiden, men i praktisk drift kan det röra sig om ca 10% på 30 års och 20% försämring på 50 års drifttid. Detta kan jämföras med försämringen pga utdiffusion av blåsgaserna som kan försämma isoleringsförmågan med 30% på även kortare tid.

Vad gäller **skum med öppna celler** så skiljer sig ångtransporten genom att gravimetriska effekter tillkommer i diffusionsprocessen. Detta påverkar fördelningen av kondensvatten runt medieröret och isoleringen. Kondensvatten tenderar att samlas i rörets botten. Även mekanismen för axiell ångtransport skiljer sig, vilket har betydelse i fall av att vattenläckage förekommer. Det finns dock inga beräkningsmodeller för denna isoleringstyp tillgängliga.

Beträffande **kylrör med isolering med slutna celler** så visar våra beräkningar, att omvänd diffusion från mark in i isoleringen kan förekomma. Processen är dock mycket långsam pga

av de låga involverade temperaturerna. I **plaströrssystem** som används för kyldistribution är effekten försumbar. I **stålrörssystem**, å andra sidan, kan korrosion förekommer, eftersom vattenången kondenserar på stålrörets utsida, och kan bidra till att begränsade mängder rost bildas på 50 års sikt. I de fall där annan isolering används för kylrör av stål, t ex minerallull, kan dock diffusionsprocessen leda till lokalt svåra korrosionsangrepp.

Sammanfattningsvis kan konstateras att mängden ackumulerat vatten kan beräknas med förhållandevis enkla metoder om man känner ånggenomsläpplighetskoefficienterna för plaströren. Om en mycket noggrann beräkning är önskvärd, eller om transport av flytande vatten ska beaktas, måste beräkningsmodellens komplexitetsgrad ökas flera storleksordningar för att goda resultat skall kunna erhållas. Dessutom krävs fysikaliska data, framför allt avseende PUR-skummets fukttekniska egenskaper, som inte finns tillgängliga i dagsläget.

## 11. Förslag till fördjupade studier av plastmedierörssystem

### 11.1. GENERELL BERÄKNINGSMODELL

Ett exempel på en förenklad beräkningsgång för både fuktackumuleringen och den ökning av värmeförlusterna som den medför har redovisats i avsnitt 10. Genom att såväl antaganden som använda materialdata kan ifrågasättas är dock relevansen hos beräkningsresultaten osäker. För att pålitligt kunna utvärdera och jämföra olika konstruktioner och materialval krävs en generell beräkningsmodell som kan hantera långtidsförloppen både vad gäller temperatur- och fuktfördelningarna i isoleringen. Dessutom krävs data för de ingående materialens fuktdiffusionsegenskaper.

### 11.2. ISOLERINGSFÖRMÅGANS FÖRSÄMRING MED TIDEN

För att kunna validera en generell beräkningsmodell måste även pålitliga mätningar av isoleringsegenskaperna hos rör med fuktigt isolerskum genomföras. För att möjliggöra en isoleringsberäkning för ledningens livstid behövs därför kompletterande underlag i följande avseenden:

#### 11.2.1 *Diffusionsegenskaperna hos mantel- och medierör*

PUR-skummets isoleringsförmåga är både starkt beroende av cellgasens innehåll av isolergas och luft och av vattenånga. Då såväl medierör som mantelrör består av polymera material kan ett gasutbyte ske både inåt genom medieröret med mediet och utåt genom mantelröret mot omgivande luft. För att kunna beräkna isoleringsförmågans förändring med tiden krävs därför säkra uppgifter om rörmaterialens diffusionsegenskaper för både isolergaser, luft och vattenånga inom aktuella temperaturintervall.

#### 11.2.2 *Sorptionsegenskaperna hos PUR-skum*

Hur PUR-isoleringens jämviktsfukthalt beror av ånghalten i omgivningen behöver klargöras. Detta innebär att sorptionskurvor för PUR-skummet måste tas fram för både ökande och minskande ånghalt.

#### 11.2.3 *Verifierande mätningar*

De mättekniska svårigheterna har medfört att endast sporadiska mätningar av isoleringsförmågan hos fuktigt PUR-skum har utförts, och en osäkerhet om noggrannheten föreligger. För att validera en teoretisk beräkningsmodell behövs ett antal pålitliga mätningar av isoleringsförmågan hos PUR-skum med kända fukthalter.

### 11.3. ALTERNATIVA BARRIÄRMATERIAL

Det står klart att fuktackumuleringen i skummet kan förhindras om förhållandet mellan medierörets och mantelrörets diffusionsmotstånd är ca 30 eller större. Detta kan åstadkommas antingen genom ett högt diffusionsmotstånd hos medieröret eller genom ett lågt diffusionsmotstånd hos mantelröret.

Polymera barriärskikt på medieröret för att i möjligaste mån eliminera syrediffusionen är sedan länge kända och använda. Barriärskikt för att hindra fuktdiffusion är väl kända från förpackningsområdet men inte tillämpade för fjärrvärmerör. Barriärskikt av aluminium har funnit användning både vid mantelrör och medierör. Beständighets- och diffusions-egenskaperna vid olika temperaturer behöver dock klargöras för flera av de tänkbara

barriärmaterialen. Även möjligheten att hindra fuktackumulering genom att välja ett material i mantelröret med utpräglat lågt diffusionsmotstånd bör undersökas.

#### **11.4. RÖRSYSTEM FÖR OMRÅDEN MED LÅG VÄRMETÄTHET**

Problemet är släkt med problemet enligt pkt 11.2. För områden med låg värmtäthet är det viktigt att uppnå så låga värmeförluster som möjligt. Plaströrsystem har installationstekniska fördelar, men ska vara helst lika effektiva eller effektivare än metallrörsystem. Värmeledningsförmågan bör vara så låg som möjligt och isoleringen helst tjockare än normalt (motvarande serie 3 eller större). Fuktdiffusion bör helst undvikas totalt med hjälp av en fuktbarriär på medieröret.

Med hjälp av den generella beräkningsmodellen enligt pkt 11.1 bör det vara möjligt att modellera ett lämpligt utförande av plaströrsystem för värmeglesa områden.

#### **11.5. ALTERNATIVA PLASTRÖRSYSTEM**

För rörkoncept som inte bygger på släta medie- och mantelrör och isoleringskum med slutna celler måste en modifiering av beräkningsmodellen ske. Detta gäller exempelvis om beräkningar av framtid värmeförluster skall kunna utföras på rör av exempelvis *Ecoflex*-typ. Detta rör har ett korrugerat mantelrör av polyeten och en isolering av flexibelt skum med öppna celler. Modellen måste kunna beräkna fuktdiffusion i såväl radiala som axiala riktning.

#### **11.6. KYLRÖR**

Vid kylrör kan ett omvänt diffusionsproblem uppstå. När marktemperaturen ligger högre än kylmediets temperatur kan markfukt diffundera inåt genom manteln och isoleringen mot medieröret. I de fall där medieröret är av stål har det visat sig att korrosionsproblem kan uppstå. Genom modellering med hjälp av diffusionsberäkningsprogrammet kan man designa rörsystemet på ett sätt att så korrosion kan undvikas.

## Referenser

- /1/ M. Klöpsch, H. Zinko. *Plastic Pipe Systems for District Heating, Handbook for safe and economic application*. Novem, 1999:T6
- /2/ B. Pedersen och J. Daugaard, *Vanddampdiffusions indflydelse på præisolerede plastrør*, Energiministeriets Forskningsudvalg for produktions og fordeling af el og varme, 1998.
- /3/ L. Amby, B. Pedersen och J. Daugaard, *Vanddampdiffusions indflydelse på præisolerede plastrør, del 2*, Energiministeriets Forskningsudvalg for produktions og fordeling af el og varme, 2000.
- /4/ L. Amby. *Undersøgelse af diffusionsforhold i præisolerede fjernvarmerør af plast*. Dansk Teknologisk Institut. Oktober 1991.
- /5/ E. Greiss, M. Kraaz. *Problems of diffusion with plastic medium pipes*. Euroheat & Power – FI 7/1998.
- /6/ M. Just, T. May. *Diffusion und Feuchte bei flexiblen Fernwärmeleitungen mit einem Kunststoffmediumrohr*. 3R International (39) Heft 11/2000.
- /7/ M. Just, M. Kraaz und E. Geiss.. *Kunststoffrohre - Ermittlung zum Lebensdauerverhalten und zum Diffusionsverhalten (Sauerstoff und Wasserdampf) im Hinblick auf eine breitere Anwendbarkeit in Fern- und Nahwärmenetzen*. Bericht AiF 10591, 1997.
- /8/ M. Just, T. May: *Verbundisolierte flexible Rohrsysteme mit einem Mediumrohr aus Polyethylen – Ermittlungen zum Feuchteeintrag, zur elektrischen Leitfähigkeit, zum Längswasserverhalten (Leckage) und zur Änderung der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Zeit bei Betriebsanforderungen*. Abschlussbericht der IMA-GmbH Dresden och des FFI Hannover zum AiF Forschungsvorhaben 11643 B, 1999.
- /9/ O. Krischner, W. Kast. *Trocknungstechnik*, 3. Edition. Verlag Springer, Berlin, 1995.
- /10/ M. Ifwarson. *Långtidsegenskaper hos syretätade plaströr och isolering för GRUDISKulvertar*. R19:1987, Byggeforskningsrådet, Stockholm 1987.
- /11/ H. Steinmetz. (Editor): *Neuartige Verlegetechniken flexibler Fernwärmeleitungssysteme mit Kunststoffmediumrohren*. Band 1 und 2. FVS Völklingen, 1997.
- /12/ *Tekniska bestämmelser för PEX-rör med kopplingar i fjärrvärmesystem*; Svenska Fjärrvärmeföreningen, 2001.
- /13/ G. Bergström, S. Nilsson och S.-E. Sällberg, *Fukttransport i skarvskum*, Fjärrvärmeföreningen FoU 2002:67.
- /14/ M. Olsson, *Long term thermal performance of polyurethane-insulated district heating pipes*, Chalmers tekniska högskola, doktorsavhandling, 2001.
- /15/ C. Wegerdt M. FL., *Kunststoffmediumrohre – Ermittlung zum Lebensdauerverhalten und zum Diffusionsverhalten (Sauerstoff und Wasserdampf) im Hinblick auf eine breitere Anwendbarkeit in Fern- und Nahwärmenetzen*, Bericht AiF 10591, 1997.
- /16/ ABAQUS. Web-sida, <http://www.hks.com>.
- /17/ ANSYS. Web-sida, <http://www.ansys.com>.
- /18/ FLUENT. Web-sida, <http://www.fluent.com>.
- /19/ I-DEAS. Web-sida, <http://www.eds.com/products/plm/>

## APPENDIX 6.1

Inverkan av fukt på skumegenskaperna för de i Tyskland undersökta PUR-skum typerna.

Effect of humidity on PUR foam properties for different foam products investigated in Germany.

Hersteller	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	Ausgangswerte/ Vergleichsproben		nach 7 Tagen Lagerung bei 50°C/98%rel. Feuchte im Klimaprüfschrank			nach 150 Tagen Lagerung bei 50°C/100%rel. Feuchte im Exsikkator			
		$\sigma_D$	$E_D$	$\omega^1)$	$\sigma_D$	$E_D$	$\omega$	$\sigma_D$	$E_D$	
		MPa	MPa	%	MPa	MPa	%	MPa	MPa	
<b>Treibgas: 100 % CO<sub>2</sub></b>										
D	$\bar{x}$	59,6	0,417	10,4	2,0	0,407	9,4	8,6	0,401	10,1
	$x_{max}$	62,0	0,461	11,4		0,461	11,0		0,415	10,6
	$x_{min}$	56,7	0,370	7,5		0,374	7,7		0,376	9,5
	V %	3,5	7,7	7,5		-	-		-	-
	n	15	15			3			3	
E	$\bar{x}$	83,8	0,273	7,1	3,3	0,250	5,3	10,0	0,217	4,5
	$x_{max}$	85,7	0,300	7,5		0,264	5,8		0,225	4,8
	$x_{min}$	82,6	0,246	6,4		0,238	4,1		0,209	4,2
	V %	1,1	6,6	4,7		3,9	12,6		3,5	4,9
	n	9	9			5			5	
<b>Treibgas: c-Pentan</b>										
D	$\bar{x}$	69,5	0,472	11,9	2,5	0,435	10,9	8,0	0,336	8,4
	$x_{max}$	71,1	0,522	13,9		0,445	11,2		0,382	9,6
	$x_{min}$	68,1	0,389	10,1		0,418	10,5		0,288	7,2
	V %	1,5	6,8	9,5		-	-		-	-
	n	15	15			3			3	
E	$\bar{x}$	82,1	0,458	12,5	2,7	0,432	10,8	7,2	0,359	8,3
	$x_{max}$	84,9	0,502	13,8		0,450	11,9		0,384	9,6
	$x_{min}$	80,5	0,413	10,6		0,398	9,7		0,341	7,4
	V %	1,6	5,4	8,8		5,6	9,5		6,2	10,9
	n	9	9			6			5	

### Förklaringar:

$\rho$	densitet	$\bar{x}$	medelvärde
$\sigma_D$	tryckhållfasthet	$x_{max}, x_{min}$	extremvärden
$E_D$	elasticitetsmodul	n	antal prover
$\omega$	vattenupptagning (vikt %)	V	variationskoefficient
geschlossene Zellen: andel slutna celler			

**I** Utgångsvärden

**II** Efter 7 dagars lagring i klimatkammare vid 50°C/98 % rel luftfuktighet.

**III** Efter 150 dagars lagring i befuktare vid 50°C/100 % rel luftfuktighet.

# Rapportförteckning

Samtliga rapporter kan beställas hos Fjärrvärmeföreningens Förlagsservice.  
Telefon: 026 – 24 90 24, Telefax: 026 - 24 90 10, [www.fjarrvarme.org](http://www.fjarrvarme.org)

<i>Nr</i>	<i>Titel</i>	<i>Författare</i>	<i>Publicerad</i>
<b>FORSKNING OCH UTVECKLING - RAPPORTER</b>			
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 (abonmentcentraler)	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 fuktinträning och gasdiffusion hos gamla kulvertor ”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



<i>Nr</i>	<i>Titel</i>	<i>Författare</i>	<i>Publicerad</i>
20	Analys av befintliga fjärrkylakunders kylbehov	Stefan Aronsson Per-Erik Nilsson	mars-98
21	Statusrapport Trycklösa Hetvattenackumulatörer	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 isolertekniska 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

<i>Nr</i>	<i>Titel</i>	<i>Författare</i>	<i>Publicerad</i>
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 blåstring 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 fjärrkylennät - 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 kvävgas-teknik – fjärrvärmeverket i Falkenberg	Leif Nilsson	jan-02
62	Tappvarmvattenreglering i P-märkta fjärrvärmecentraler för villor – Utvärdering och förslag till förbättring	Tommy Persson	jan-02

<i>Nr</i>	<i>Titel</i>	<i>Författare</i>	<i>Publicerad</i>
63	Experimentell undersökning av böjar vid kallförläggning av fjärrvärmerör	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
68	Round Robin test II av isolerförmågan hos fjärrvärmerör	Ture Nordenswan	april-02
69	EkoDim – beräkningsprogram	Ulf Jarfelt	juni-02
70	Felidentifiering i FC med ”flygfoton” – Förstudie	Patrik Selinder Håkan Walletun	juni-02
71	Digitala läckdetekteringssystem	Jan Andersson	aug-02
72	Utvändigt skydd hos fjärrvärmerörsskarvar	Gunnar Bergström Stefan Nilsson Sven-Erik Sällberg	sept-02
73	Fuktdiffusion i plaströrsystem	Heimo Zinko Gunnar Bergström Stefan Nilsson Ulf Jarfelt	sept-02
74	Nuläge värmegles fjärrvärme	Lennart Larsson Sofie Andersson Sven Werner	sept-02
75	Tappvarmvattensystem – egenskaper, dimensionering och komfort	Janusz Wollerstrand	sept-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 Wårdshus 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 kulvertisolerad ring av polyuretanskum	Lars-Åke Cronholm Hans Torstensson	sept-99

Svenska Fjärrvärmeföreningens Service AB och Statens Energi-  
myndighet bedriver forskningsprogram inom området fjärrvärme  
hetvattenteknik och fjärrkyla.

**SVENSKA FJÄRRVÄRMEOFÖRENINGENS 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