

LIVSLÄNGD OCH STATUSBEDÖMNING AV FJÄRRVÄRMENÄT

RAPPORT 2017:420



 FJÄRRSYN



Livslängd och statusbedömning av fjärrvärmenät

Konventionella- och högpresterande rör

BIJAN ADL ZARRABI

AXEL BERGE

PETER LIDEN

FREDRIK DOMHAGEN

OLLE RAMNÄS

ISBN 978-91-7673-420-9 | © ENERGIFORSK augusti 2017

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Att svara på hur länge ett fjärrvärmerör håller är inte enkelt. Teoretiska beräkningar stämmer inte alltid överens med verkligheten. I detta projekt har både teoretiska beräkningar, fältmätningar och laboratorieförsök använts för att försöka bedöma både livslängden och status på ett fjärrvärmenät. Målet var även att ta fram en ny metod för att bedöma isolerförmåga och status på fjärrvärmerör, vilken även har utvecklats.

Här besvaras ett antal frågor om hur livslängden och status på ett fjärrvärmenät kan bedömas, men mer forskning behövs.

Projektet har genomförts av Bijan Adl-Zarrabi, Axel Berge, Peter Liden, Fredrik Domhagen och Olle Ramnäs från Chalmers Teknisk Högskola. Till projektet har det funnits en referensgrupp bestående av Göran Johansson, Powerpipe System AB; Harald Andersson, E.ON Värme Sverige AB; Lena Olsson Ingvarson, Lennart Hansson, Marie Jernsund, Göteborg Energi AB; Sten Bruce, Tekniska verken i Linköping AB; Thomas Lummi, Energiföretagen Sverige.

Projektet ingår i forskningsprogrammet Fjärrsyn som finansieras av Energiföretagen Sverige och Energimyndigheten. Forskningen inom Fjärrsyn ska stärka fjärrvärme och fjärrkyla, uppmuntra konkurrenskraftig och affärs- och teknikutveckling och skapa resurseffektiva lösningar för framtidens hållbara energisystem till nytta för energibranschen, kunderna, miljön och samhället i stort.

Jan Berglund

Ordförande i Energiföretagen Sveriges teknikråd

Sammanfattning

Fjärrvärmerörets termiska och mekaniska prestanda minskar med tiden. I ett fjärrvärmesystem är det viktigt att den producerade värmen levereras till konsumenterna med minsta möjliga förluster. Detta blir ännu viktigare när byggnader (konsumenterna) blir mer och mer energieffektiva. Många energibolag har behov av att förnya sitt fjärrvärmenät men det finns inga metoder för att fastställa de befintliga fjärrvärmerörens prestanda under användningstiden. Det är också önskvärt att använda mer energieffektiva fjärrvärmerör vid en eventuell förnyelse.

I detta projekt, utreds livslängden och status hos fjärrvärmenätet med hjälp av fältmätningar, laboratorieförsök och teoretiska beräkningar. Målet med projektet är att ta fram ett effektivare fjärrvärmerör med lång livslängd, ta fram en icke-förstörande metod för bestämning av fjärrvärmerörs status under dess livslängd samt att utveckla numeriska modeller för bedömning av fjärrvärmerörs livslängd.

Livslängden för fjärrvärmerör har bestämts för rör från en provanläggning i Hisings Backa. Resultaten visar att efter cirka 30 år har dessa fjärrvärmerör fortfarande goda mekaniska och termiska prestanda. Rörens värmeisolering förändrades med cirka 10 % och de mekaniska egenskaperna uppfyller kraven enligt SS-EN253. För att bättre kunna beräkna rörens termiska livslängd med hjälp av teoretiska modeller skall modellen kompletteras med indata om den omgivande markens förhållanden.

Hybridisolering av fjärrvärmerör minskar värmeförlusterna med nästan 50 % för ett singelrör och med runt 30 % för ett dubbelrör. Mätresultaten från fem fältstationer har analyserats. Prestanda för hybridisolerade fjärrvärmerör med vakuumpaneler har endast förändrats marginellt efter nära 5 år i bruk.

En icke-förstörande metod baserad på avsvälning har utvecklats och testats på Chalmers fjärrvärmenät. För att mäta temperaturer i fjärrvärmerören i fält används resistansen i den befintliga koppartråden. Undersökningen visar att nästa steg för den icke-förstörande metoden bör vara tester i fält.

Det finns behov av ytterligare forskning. -Mätresultaten från mätstationen i Hisings Backa har gett värdefull ny information. Det är av stort intresse att hålla mätstationen igång. Framtida mätningar kan leda till att modellerna (gasdiffusion, nedbrytningsprocesser) kan förbättras. -På samma sätt samlas fortsatta mätresultat i fältmätstationerna för hybridisolerade fjärrvärmerör. För hybridisolerade rör skulle det också vara av intresse att genomföra en större mätstudie där lovande panelkonfigurationer ställs mot varandra. -Icke förstörande metoden behöver undersökas på längre sträckor och i fält för att utvärdera dess potential som mätmetod.

Summary

Thermal and mechanical performance of district heating pipes decreases throughout its lifetime. In a district heating system it is important that the produced heat is delivered to consumers with the least possible heat losses. Many energy companies face renewal of district heating networks, but there are no methods for determining the performance of existing pipes. It is also desirable to use more energy efficient district heating pipes for any type renewal.

In this project, the status of the district heating network is investigated using field measurements, laboratory tests and theoretical calculations. The outcome of the project is a, a non-destructive method for determining the status of pipes and modification of the theoretical model concerning lifetime assessment. Furthermore performance of the energy efficient district heating pipe is assessed.

The lifetime of district heating pipes is investigated using naturally aged pipes located at a test facility in Hisings Backa. The results indicate that after about 30 years, the pipes have good mechanical and thermal performance. Thermal conductivity of the pipes decreased by 10% and the mechanical properties meet the requirements of SS-EN253. In order to increase the accuracy of the lifetime estimation, the theoretical models must be complemented with input data related to the surrounding soil condition.

Hybrid insulation of district heating pipes reduces heat losses by almost 50% for a single pipe and around 30% for a twin pipe. The results from five field stations have been analyzed. The thermal performance of hybrid-insulated district heating pipes with vacuum panels has changed marginally after almost 5 years.

A non-destructive method based on a 'cooling method' has been developed and tested on Chalmers district heating network. To measure temperatures inside the district heating pipe, the existing copper wire can be used. The results of the investigation indicate that the developed non-destructive method has large potential to be tested in field measurements.

Further research is needed. 1) The results from the field station in Hisings Backa have provided valuable new information. It is of great interest to keep the measurement station running. Future measurements can lead to improved models. 2) In the same way, the field measurements are essential for further development of hybrid-insulated pipes. For this type of pipes, it would also be of interest to conduct a large field study where panel configurations are used. 3) The non-destructive method needs to be investigated on longer distances and in the field to evaluate its potential as a measurement method for assessing the status of the pipes.

Innehåll

1	Bakgrund till projektet	8
1.1	Projektets mål	8
2	Rapportens struktur och Publikationer	10
2.1	Bifogade delrapporter	10
2.2	Vetenskapliga Publikationer	11
3	Validering av livslängdsuppskattning med hjälp av naturligt åldrade fjärrvärmerör vid normal drift	12
3.1	Cellgasinnehåll	12
3.2	Värmekonduktivitet	14
3.2.1	Inverkan av oxidationen på värmekonduktiviteten.	14
3.3	Numeriska Beräkningar av Fjärrvärmerörets Termiska Prestanda	15
3.3.1	Kort beskrivning av utvecklad EkoDim-modell	15
3.3.2	Kort beskrivning av Finita Differensmetoden	16
3.3.3	Validering av numeriska metoder	16
3.3.4	Slutsats	18
3.4	Axiell skjuvhållfasthet, radiell tryckhållfasthet	18
4	Högpresterande fjärrvärmerör och deras livslängd	20
4.1	Fältmätningar	21
4.2	Laboratoriemätningar	26
4.2.1	Långtidsmätningar vid konstant maxtemperaturbelastning	27
4.3	Simuleringar	28
4.4	Sammanfattning Hybridisolerade Fjärrvärmerör	29
5	Statusbedömning av fjärrvärmerör genom en icke förstörande metod	31
5.1	TCR-metoden	31
5.2	Avsvlningsmetoden	32
6	Slutsatser	33
7	Framtida forskning	34

1 Bakgrund till projektet

Fjärrvärmerörets isolerings- och mekaniska prestanda minskar under dess livslängd. I ett fjärrvärmesystem är det viktigt att den producerade värmen levereras till konsumenterna med minsta möjliga förluster. Detta blir ännu viktigare när byggnader (konsumenterna) blir mer och mer energieffektiva.

Ett föråldrat fjärrvärmenät leder till större förluster. Livslängden för ett fjärrvärmerör skall i enlighet med SS-EN253 vara mer än 50 år vid en kontinuerlig driftstemperatur lägre än 115 °C. Kravet på fjärrvärmerörets livslängd kommer troligen att skruvas upp vid införande av lågtemperaturssystem som exempelvis fjärde generationens fjärrvärmeteknik.

Många energibolag har behov av att förnya sitt fjärrvärmenät men det finns inga metoder för att fastställa de befintliga förisolerade fjärrvärmerörens prestanda under användningstiden. Det är också önskvärt att använda mer energieffektiva fjärrvärmerör vid en eventuell förnyelse. Sverige var det första landet där man forskade om användning av högpresterande isoleringsmaterial för fjärrvärmerör. Under 2010-2013 har Fjärrsyn-programmet finansierat två projekt vid Chalmers Tekniska Högskola angående effektivisering av fjärrvärmenät. Resultaten av projekten visade att hybridisolerade fjärrvärmerör kan reducera värmeförlusterna i fjärrvärmenätet med 20 till 30 %. Idag finns testanläggningar med hybridisolerade fjärrvärmerör i fjärrvärmenät hos Varberg Energi, Göteborg Energi och Tekniska verken i Linköping. Danmark är det första landet där man använder högpresterande fjärrvärmerör i stor skala.

I detta projekt (projektet 38587-1/Energimyndighet & projekt 3133 Fjärrsyn) har fältmätningar, laboratorieförsök och teoretiska beräkningar genomförts för att studera livslängden och statusen hos fjärrvärmenät. Projektets utfall är ett effektivare fjärrvärmerör med lång livslängd, en icke-förstörande metod för bestämning av fjärrvärmerörs status under deras användningstid och modifiering av en modell för livslängdsbedömning.

1.1 PROJEKTETS MÅL

Projektet har tre huvudmål:

- Validering av *livslängdsuppskattning* med hjälp av naturligt åldrade fjärrvärmerör vid normal drift. (Kapitel 3)
- Att skapa tillräckligt med underlag för att kunna använda *hybridisolerade (högpresterande) fjärrvärmerör* i stor skala. (Kapitel 4)
- Utveckling av en *icke-förstörande metod* för att bestämma statusen hos fjärrvärmenät. (Kapitel 5)

En kort beskrivning om huvudmålen:

Livslängdsuppskattning: En mätstation för fjärrvärmerör initierades 1988 i Göteborg, Hisingsbacka. Mätdata på rörens prestanda finns tillgängligt från tre tillfällen: 1988, 1992 och 1996. Dessa befintliga mätdata och de nya mätningar som har utförts inom ramen för detta projekt ger ett unikt tillfälle för att förfina

modellerna för gasdiffusion och rörens termiska prestanda. Även oxidationen av polyuretanskummet har kunnat studeras för rör som använts under mycket lång tid.

Hybridisolerade fjärrvärmerör: Under 2010-2013 har Fjärrsyn-programmet finansierat två projekt om effektivisering av fjärrvärmenätet (Fjärrsyn rapport 2012:16 och 2013:13). Resultaten av projekten visade att hybridisolerade fjärrvärmerör med högpresterande isoleringsmaterial kan reducera värmeförlusterna med 30 %. Aktiviteter relaterade till högpresterande fjärrvärmerör i detta projekt kan räknas som en fortsättning av ovan nämnda projekt.

Icke-förstörande metod: En metod skall utvecklas för att kunna bestämma fjärrvärmenätets termiska och mekaniska prestanda under dess användningstid. Metoderna skall så långt som möjligt vara icke-förstörande.

2 Rapportens struktur och Publikationer

Rapporten innehåller en huvudrapport, denna rapport, och åtta delrapporter. I delrapporterna refereras till vetenskapliga artiklar.

Huvudrapporten ger en sammanfattad bild av uppnådda resultat från detta projekt och delrapporterna ger en fördjupad bild av bakgrunden till resultaten presenterade i huvudrapport.

Projektet har även lett till ett antal vetenskapliga publikationer som publicerats i vetenskapliga tidskrifter och på konferenser. Referenser till dessa presenteras nedan.

2.1 BIFOGADE DELRAPPORTER

De bifogade rapporterna ger mer tekniska detaljer om respektive teknikområden.

Delrapport 1: Hisings Backa mätresultat

Författare: Adl-Zarrabi B., Ramnäs O. & Lilliestierna A,

Delrapport 2: Oxidations inverkan på långvågig värmestrålning

Författare: Fredrik Domhagen, Bijan Adl-Zarrabi

Delrapport 3: Numeriska Beräkningar av Fjärrvärmerörets Termiska Prestanda

Författare: Fredrik Domhagen, Bijan Adl-Zarrabi

Delrapport 4: Mekaniska tester

Författare: Sven-Erik Sällberg, SP Technical Research Institute of Sweden

Delrapport 5: Långsiktig prestanda hos hybridisolerade fjärrvärmerör

Författare: Axel Berge

Delrapport 6: Icke förstörande metoder

Författare: Peter Liden

Delrapport 7: Possible measuring methods

Författare: Kakavand A. & Adl-Zarrabi B.

Delrapport 8: Evaluation-RFID

Författare: Roland Britz R. (2016) *Evaluation of sensors for monitoring temperatures in district heating pipes.*

2.2 VETENSKAPLIGA PUBLIKATIONER

De vetenskapliga publikationerna presenteras nedan:

- Berge, A., Adl-Zarrabi, B., Hagentoft, C.-E., (2015). *Assessing the Thermal Performance of District Heating Twin Pipes with Vacuum Insulation Panels*. Energy Procedia 78, 382–387. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.678
- Berge, A., (2016). *Assessment of novel applications for nano-porous thermal insulation in district heating pipes and building walls*. Göteborg : Chalmers University of Technology (Doktorsavhandlingar vid Chalmers tekniska högskola. Ny serie, nr: 4024).
- Berge, A., Hagentoft, C.-E., Adl-Zarrabi, B., (2016). *Field measurements on a district heating pipe with vacuum insulation panels*. Renew. Energy 87, 1130–1138. doi:10.1016/j.renene.2015.08.056
- Berge, A., Adl-Zarrabi, B., (2016). *Long term performance of vacuum insulation panels in hybrid insulation district heating pipes*. The 15th international symposium on district heating and cooling, Seoul, South Korea.
- Domhagen, F., & Adl-Zarrabi, B., (2017). *Influence of oxidation on radiative heat transfer in polyurethane insulation used for district heating pipes*. The 11th Nordic Symposium on Building Physics, Trondheim, Norway.
- Lidén, P., & Adl-Zarrabi, B. (2016). *Non-destructive methods for assessment of district heating pipes: a pre study for selection of proper method*. The 15th International Symposium on District Heating and Cooling, Seoul, South Korea.

3 Validering av livslängdsuppskattning med hjälp av naturligt åldrade fjärrvärmerör vid normal drift

Normalt bestäms livslängden, termisk och mekanisk, för ett fjärrvärmerör med hjälp av teoretiska beräkningar eller tester vid förhöjd temperatur ("accelererade tester") i laboratorium. Som exempel kan nämnas beräkningsprogrammet EkoDim som används för att beräkna isolerförmågan efter en viss tid. Resultaten från teoretiska modeller och accelererade tester beror på hur väl man kan återspegla de verkliga förhållandena för ett fjärrvärmerör i drift. Det säkraste data om livslängdsprestanda uppnås med hjälp av mätningar på "naturligt" åldrade fjärrvärmerör, dvs. rör som varit i drift under kända förhållanden under viss tid. Nackdelen är att dessa mätningar är punktvis och representerar inte prestanda för en lång rörsträcka. Mätningar på naturligt åldrade fjärrvärmerör kan dock användas för validering av teoretiska modeller och accelererade tester.

I detta projekt hade projektgruppen tillgång till mätdata från en provanläggning i Hisings Backa norr om Göteborg. Anläggningen initierades 1988 i samband med aktiviteter rörande avveckling av freonbläst (CFC-11-blås) isolering i fjärrvärmerör. I anläggningen testades tre rör med diametrarna 280/170 mm (mantel/medierör) med CFC-11 och koldioxid som blåsgaser i PUR-isoleringen. Fram- och returledningens medeltemperatur är cirka 80 och 45 °C respektive.

År 2015 grävdes två fjärrvärmerör (båda 6 m långa, ett rör med CFC-11-bläst polyuretanskum och ett rör med koldioxidbläst skum) upp från provanläggningen och ersattes med högpresterande fjärrvärmerör. Materialegenskaper (cellgasinnehåll, värmeledningsförmåga, axiell skjuvhållfasthet, radiell tryckhållfasthet, andel slutna celler) för de uppgrävda rören bestämdes i laboratorium. Resultaten av dessa mätningar presenteras i Delrapport 1: Hisings Backa mätresultat.

Mätresultaten har använts för att analysera gasdiffusionen, termisk livslängd, värmeledningsförmåga, inverkan av oxidation och evaluering av beräkningsmodeller.

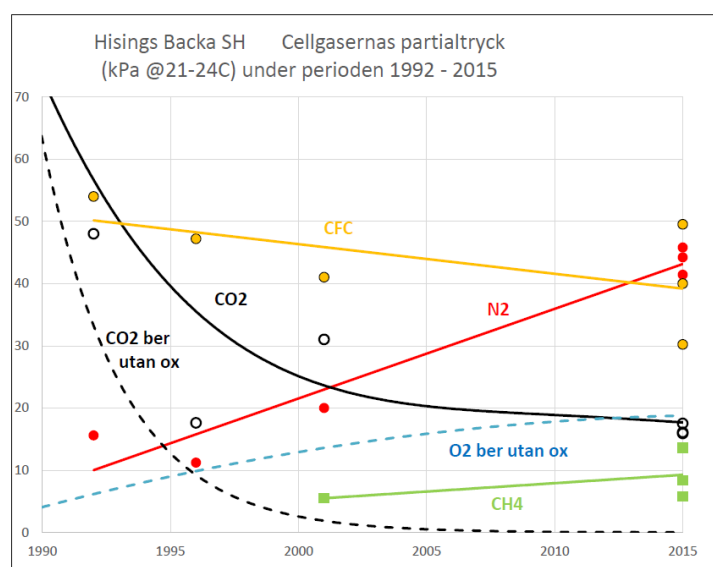
3.1 CELLGASINNEHÅLL

Polyuretanskummets isolerförmåga försämras med tiden, främst på grund av att gaser med lägre värmekonduktivitet diffunderar ut ur och att gaser med högre värmekonduktivitet diffunderar in i skummet. Diffusionen av gaser är tids- och temperaturberoende. Detta betyder att den värmetekniska livslängden för ett rör som används vid hög temperatur är kortare än för ett rör som används vid låg temperatur. Med kunskap om hur cellgasinnehållet varierar med tiden, kan värmekonduktiviteten för polyuretanisoleringens beräknas.

Figur 3.1 visar ett exempel på uppmätta data under 1992-2105. De uppmätta partialtrycken för O₂ var låga (<2 kPa) och har inte ritats ut i figuren.

Diffusionskoefficienter för de olika gaserna har räknas fram via kurvanpassning till de uppmätta partialtrycken. För mer information se *Delrapport 1: Hisings Backa mätresultat*.

Polyuretanskum oxideras av syre. Oxidationshastigheten ökar exponentiellt med temperaturen. Oxidationen påverkar partialtrycket för både syre (som blir lägre) och koldioxid (oxidationens slutprodukt, som blir högre än utan oxidation). Oxidationen påverkar även de mekaniska egenskaperna. Det finns många olika typer av polyuretan som sannolikt har olika benägenhet för att oxideras. Oxidation sker troligen i olika delsteg innan oxidationen har gått så långt att det börjar bildas koldioxid.



Figur 3.1: Partialtryck för enskilda gaser i PUR-isoleringen för rör av typen SH-1 (CFC-11-blåst). Cellgasanalys har genomförts vid 4 tillfällen, 1992, 1996, 2001 samt 2015. Alla prover togs mitt i skummet utom för år 2015 då prover även togs mycket nära stålröret resp. mantelröret. De uppmätta partialtrycken för O₂ var låga (0,6 - 1,8 kPa) och har inte ritats ut i figuren.

De streckade linjerna visar hur partialtrycket för CO₂ respektive O₂ sannolikt hade minskat respektive ökat om man inte hade tagit hänsyn till oxidationen av PUR.

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

3.2 VÄRMEKONDUKTIVITET

Termisk konduktivitet för fjärrvärmerör har mätts med hjälp av Guarded Hot Pipe-metoden. Enligt EN 253-2009 får den termiska konduktiviteten vid 50 °C (λ_{50}) inte överskrida 0,029 W·m⁻¹·K⁻¹ för nyproducerade rör.

Resultaten från mätningarna presenteras i Tabell 3.1:

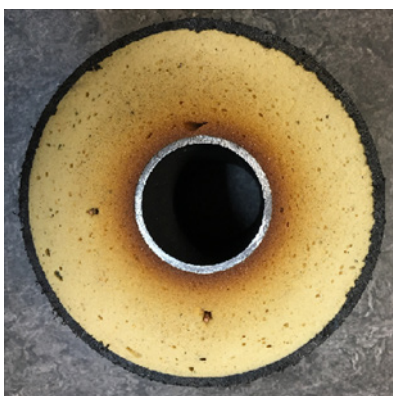
Tabell 3.1: Termisk konduktivitet (λ_{50}) för PP-2 (CO₂) och SH-1(CFC 11) uppmätt vid 50 °C. Ökningen jämfört med första mättillfället anges inom parentes. Mätningarna från 1988 och 1992 är tagna från Jarfelt 1997.

Rör	1988 W/(m·K)	1992 W/(m·K)	2015 W/(m·K)
PP-2 (CO ₂)	0,0316	0,0329 (+4,1 %)	0,0352 (+11,4 %)
SH-1(CFC11)	0,0260	0,0274 (+5,4 %)	0,0285 (+9,6 %)

Fram- och returlednings medeltemperatur i provanläggningen är cirka 80 och 45 °C respektive, med en maximum temperatur runt 110 °C. Resultaten i Tabell 3.1 indikerar att värmekonduktivitets förändring vid ovan nämnda temperaturnivåer efter 27 år ligger runt 10 %, det vill säga 10 % högre värmeförluster i fjärrvärmenätet.

3.2.1 Inverkan av oxidationen på värmekonduktiviteten.

Ett vanligt antagande när man räknar på hur konduktiviteten för PUR-isoleringen förändras över tid är att värmetransport på grund av ledning i den fasta polymeren samt värmetransport genom strålning är konstant. Oxidation i cellernas väggar kan leda till strålningen förändras på grund av att flera funktionella grupper införs i den kemiska strukturen. För att undersöka hur värmestrålningen genom PUR-isoleringen förändras över tid mättes extinktionskoefficienten för ett antal PUR-prover utsatta för olika nivåer av oxidation och därefter beräknades den långvågiga värmetransporten.



Figur 3.2: Fotografi på tvärsnittet för ett åldrat fjärrvärmerör.

Mätningar och analyser relaterad till inverkan av oxidation på den långvågiga värmestrålningen är presenterats i *Delrapport 2: Oxidationens inverkan på långvågig värmeöverföring*.

Analyser och mätresultaten visar att den totala förändringen på grund av oxidation över PUR-isoleringens hela livslängd kan vara en ökning av storleksordning 1,8 %. Eftersom oxidation innebär att mängden syre minskar (konduktivitet, $\lambda_{50} = 28,51 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) och koldioxid ökar (konduktivitet $\lambda_{50} = 18,68 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), har detta en gynnsam effekt på isolerförmågan. Det kommer att vara svårt att särskilja bidraget från respektive fenomen, dvs konduktiviteten ökar på grund av ändrad kemisk struktur och minskar på grund av ändrad gassammansättning.

3.3 NUMERISKA BERÄKNINGAR AV FJÄRRVÄRMERÖRETS TERMISKA PRESTANDA

För att uppskatta termiska livslängden för ett fjärrvärmerör har olika teoretiska modeller för att uppskatta värmekonduktiviteten i PUR-isoleringen använts. Modellerna kräver indata om de initiala gaskoncentrationerna i PUR-isoleringen samt uppgifter om dimensioner, densitet och temperaturhistorik i fjärrvärmesystemet. Olika modeller har använts med varierande grad av komplexitet för att ta hänsyn till fenomen som påverkar gas-diffusionen. Det är vidare svårt att beräkna värmekonduktiviteten för en gasblandning även då avancerade modeller används. Detta beror på otillräckliga kunskaper om ett antal parametrar som att det saknas ett tillförlitligt värde på konduktiviteten för vissa gaser och hur olika gaser interfererar i en gasblandning. Man måste också känna till de initiala cellgaskoncentrationerna i PUR-skummet. För de flesta gamla rör känner man inte till dessa utan får anta ett rimligt värde. För mer information se '*Delrapport 3: Numeriska Beräkningar av Fjärrvärmerörets Termiska Prestanda*'.

Syftet med detta delprojekt är att jämföra resultaten från en enklare beräkningsmodell liknande den som används i programmet EkoDim med en mer avancerad modell som tar hänsyn till gaskoncentrationernas samt temperaturens variation över PUR-isoleringens tvärsnitt. I den mer avancerade modellen görs även ett försök att ta hänsyn till oxidationens påverkan på koldioxid- och syrekoncentrationer i PUR-isoleringen.

3.3.1 Kort beskrivning av utvecklad EkoDim-modell

Metoden som använts är densamma som används i EkoDim. Beräkningarna utförs i Microsoft Excel för bättre kontroll över indata samt resultat. Detta är även anledningen till varför modellen i detta arbete refereras till som "Utvecklad EkoDim-modell". Vid beräkning av gasdiffusionen beräknas endast en koncentration för varje gas vid varje tidssteg och för hela isoleringen. För kväve, syre och koldioxid antas allt diffusionsmotstånd ligga i mantelröret. För CFC-11 antas allt motstånd ligga i PUR-isoleringen. Värmekonduktiviteten samt diffusionskoefficienternas temperaturberoende beaktas endast genom att anta att de följer medeltemperaturen över PUR-isoleringen. Vid beräkning av PUR-isoleringens konduktivitet används Wassiljevas ekvation för beräkning av

cellgasens konduktivitet och till detta adderas ett konstant bidrag från strålning och ledning i den fasta polymeren.

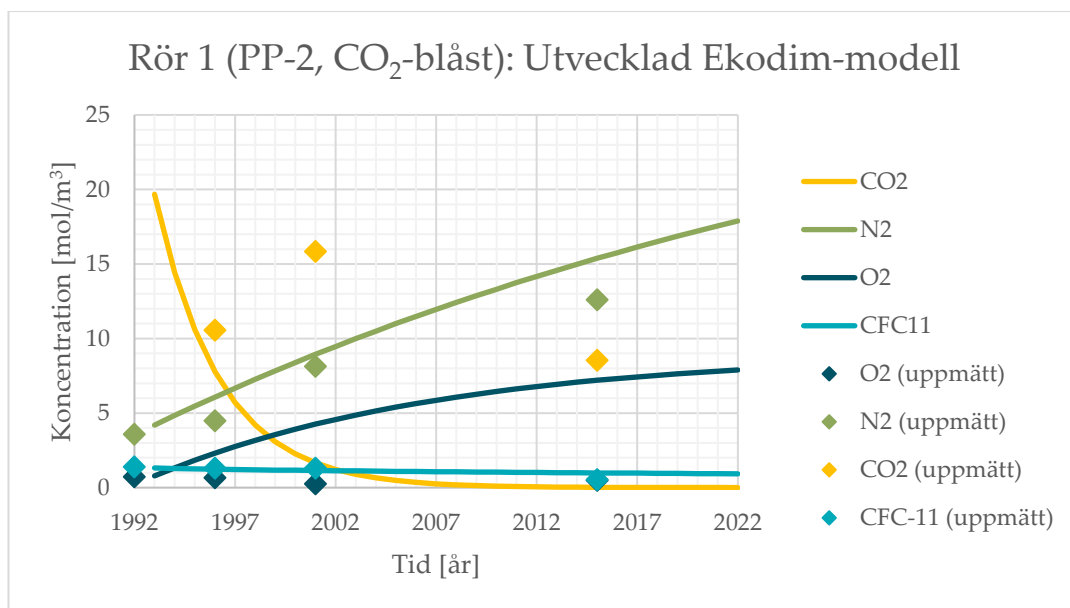
3.3.2 Kort beskrivning av Finita Differensmetoden

För noggrannare beräkning av gasdiffusionen i isoleringen tillämpas explicita finita differensmetoden och därutöver tas även hänsyn till oxidationen enligt en mycket enkel metod. Den numeriska modellen skrivs objektorienterat i Matlab vilket underlättar för implementering i andra programmeringsspråk. Detta innebär även att programmet är flexibelt och lätt att komplettera med ytterligare metoder som till exempel möjlighet att göra beräkningar på dubbelrör. Denna metod tar hänsyn (till skillnad från den utvecklade EkoDom-modellen) till gaskoncentrationernas samt temperaturens variation över PUR-isoleringens tvärsnitt.

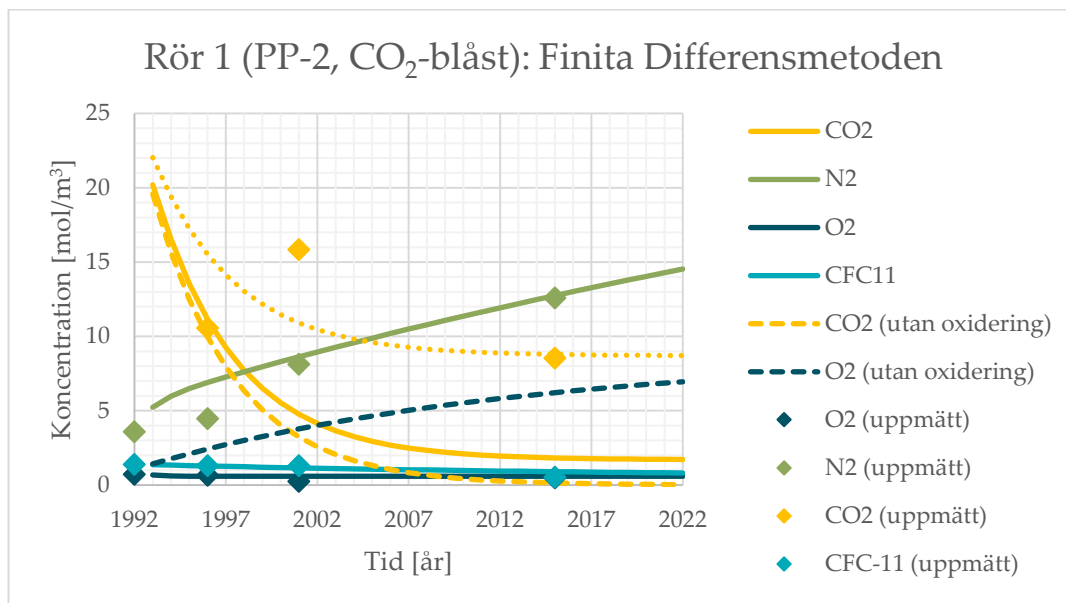
3.3.3 Validering av numeriska metoder

De båda beräkningsmodellerna valideras mot mätvärden för fyra olika rör. I modellerna antas att gaskoncentrationerna som omger röret är desamma som för luften nära marknivå ($\text{CO}_2 = 0\%$, $\text{N}_2 = 78\%$, $\text{O}_2 = 22\%$). Dock har (H. Enoch, 1971) visat att höga halter av CO_2 kan förekomma i marken i halter över 40 % (volymprocent) på djup ner till 47,5 cm. Förklaringen till de förhöjda halterna är bland annat hög mikrobiologisk aktivitet. Förhöjda koldioxidhalter i marken kan eventuellt förklara varför modellerna i flera av fallen underskattar mängden koldioxid i PUR-isoleringen.

Figur 3.3 och Figur 3.4 visar resultaten från beräkningar med de båda modellerna tillsammans med uppmätta värden för ett av rören.



Figur 3.3: Resultat från beräkning med den utvecklade EkoDim-modellen för rör 1 (uppmätt mängd syre och CFC-11 ligger i samma punkt 2015).



Figur 3.4: Resultat från beräkning med Finita Differensmetoden för rör 1 (uppmätt mängd syre och CFC-11 ligger i samma punkt 2015).

Beräkningen på röret med finita differensmetoden hamnar närmare uppmätta värden för samtliga gaser jämfört med den utvecklade EkoDim-modellen. Hänsyn till oxidation gör även att mängden syre hamnar nära uppmätta värden och att mängden koldioxid närmar sig uppmätta värden. Däremot tycks båda modeller underskatta mängden koldioxid. Vid höjning av koldioxidhalten i marken från 0 % till 15 % (7 mol/m³) erhålls med finita differensmodellen och med hänsyn till oxidation mycket bra överensstämmelse mellan modellens beräknade värden och den sista mätpunkten.

I Tabell 3.2 jämförs beräknad värmekonduktivitet enligt de båda modellerna och uppmätt värmekonduktivitet. Värmekonduktiviteten är beräknad utifrån de gaskoncentrationer som finns presenterade i Figur 3.3 och Figur 3.4 (för finita differensmetoden tas hänsyn till både oxidation och förhöjda koldioxidhalter i marken) samt tillskott från värmeledning i den fasta polymeren och strålning. Skillnader i värmekonduktivitet mellan de båda modellerna beror därför på att den utvecklade EkoDim-modellen endast beräknar värmekonduktiviteten baserad på en medelkoncentration av gaserna och för en temperatur på 50 °C. I finita differensmetoden kan däremot värmekonduktiviteten bestämmas för varje cell och den ekvivalenta värmekonduktiviteten beräknas.

Tabell 3.2: Beräknade samt uppmätta värmekonduktiviteter för rör 1, år 2015.

	Uppmätt [mW/m·K]	Utvecklad EkoDim-modell [mW/m·K]	Finita Differensmetoden [mW/m·K]
Rör 1 (CO ₂)	35,2	32,9	34,4

Skillnader mellan beräknade och uppmätta värden på värmekonduktivitet kan bero på: felaktiga mätdata på vilka de beräknade värmekonduktiviteter är baserade enligt bl.a. Wassiljevas ekvation, osäkra parametrar som används i denna

ekvation eller variationer i värmetransport genom strålning och ledning i fast polymer vilket kan variera mellan olika PUR-skum. För mer information se *'Delrapport 3: Numeriska Beräkningar av Fjärrvärmerörets Termiska Prestanda'*.

3.3.4 Slutsats

Med avseende på gaskoncentrationens förändring över tid presterar inte oväntat modellen baserad på finita differensmetoden bättre än den utvecklade EkoDim-modellen. Inte oväntat gäller detta särskilt för rör med låga koncentrationer av CFC-11. För rör med höga initiala koncentrationer av CFC-11 underskattas däremot koncentrationen av CFC-11. För att öka noggrannheten krävs mätningar av diffusionskoefficienten samt löslighetskoefficienten för CFC-11 vid olika koncentrationer samt olika temperaturer. För mer information se *'Delrapport 3: Numeriska Beräkningar av Fjärrvärmerörets Termiska Prestanda'*. För beräkningar med finita differensmetoden introduceras även en metod för att ta hänsyn till oxidationens påverkan på syre- och koldioxidkoncentrationer. Metoden bidrar till att beräknade värden för syre och koldioxid hamnar närmre uppmätta värden. Syrekoncentrationerna hamnar för de flesta fall mycket nära uppmätta värden, däremot underskattas mängden koldioxid för flera av fallen.

En möjlig anledning till att koldioxidhalterna underskattas för två av rören kan förklaras av förhöjda halter av koldioxid i marken (dvs. koldioxidhalterna i marken är högre än i luften). Detta bekräftas av beräkningar då koldioxidhalten i marken höjs för två av rören till 11 % och 15 % respektive.

3.4 AXIELL SKJUVHÅLLFASTHET, RADIELL TRYCKHÅLLFASTHET

SP, Sveriges Tekniska Forskningsinstitut genomförde mekaniska tester (Axiell skjuvhållfasthet och radiell tryckhållfasthet) på rör av typ PP-2 (CO₂ blåst) och SH-1 (CFC blåst). Resultaten från testerna är presenterade i Tabell 3.3 och Tabell 3.4. Resultaten visar att rören från Hisings Backa uppfyller standardkraven efter 32 år i drift. Mer information är tillgängligt i *Delrapport 1: Hisings Backa mätresultat och Delrapport 4: mekaniska test SP*.

Tabell 3.3: Resultat från tester av skjuvhållfasthet på rör av typ PP-2 (CO₂) och SH-1 (CFC11), dimension DN150/280

Beteckning	Uppmätt värde vid +23°C, Mpa	Förskjutning vid brott, mm	Plats för brott	Krav, MPa
PP2A	0,20	4,8	Medierör	≥ 0,12
PP2B	0,16	3,8	Medierör	
PP1C	0,16	4,2	Medierör	
Medelvärde	0,17			
SH1A	0,21	4,3	Medierör	≥ 0,12
SH1B	0,22	5,5	Mantelrör	
SH2C	0,01	3,7	Mantelrör	
Medelvärde	0,15			

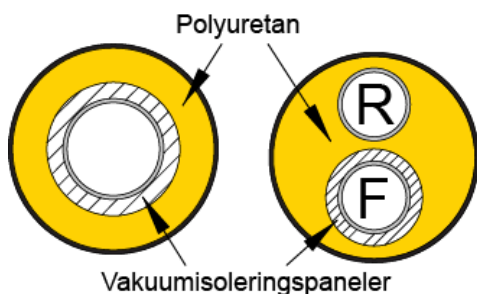
Tabell 3.4: Resultat från tester av radiell tryckhållfasthet på rör av typ PP-2 och SH-1.

Beteckning	Uppmätt värde, Mpa	Krav
PP1E-1	0,42	≥ 0,30
PP1E-2	0,44	
PP1E-3	0,43	
Medelvärde	0,43	
PP2D-1	0,38	≥ 0,30
PP2D-2	0,37	
PP2D-3	0,35	
Medelvärde	0,37	
SH1D-1	0,64	≥ 0,30
SH1D-2	0,66	
SH1D-3	0,69	
Medelvärde	0,66	
SH2E-1	0,57	≥ 0,30
SH2E-2	0,56	
SH2E-3	0,64	
Medelvärde	0,59	

4 Högpresterande fjärrvärmerör och deras livslängd

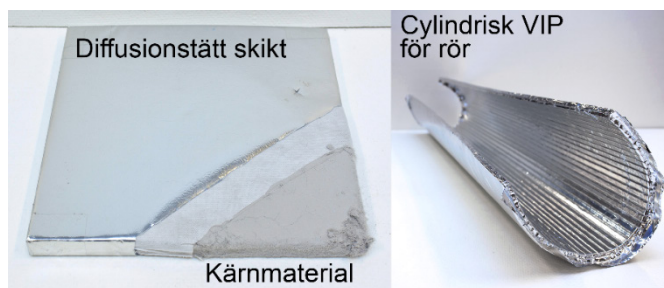
Beslut om förnyelse och utveckling av fjärrvärmenät måste grundas på kunskap om rörens status vad gäller termiska prestanda och mekaniska egenskaper. Detta gör det intressant att titta på möjligheter att förbättra fjärrvärmerörens prestanda.

Med start i projekten *Högpresterande fjärrvärmerör* och *Hybridisolerade fjärrvärmerör* har ett koncept för hybridisolerade fjärrvärmerör utvecklats. Isoleringen närmare det inre röret har större effekt per volymenhet material än isoleringen längre ut från centrum. Det ger incitament att byta ut den innersta isoleringen mot högpresterande isolering, som vilket illustreras i Figur 4.1.



Figur 4.1: Koncept för hybridisolerade fjärrvärmerör

Tidigt i arbetet valdes vakuumisoleringspaneler ut som högpresterande isoleringsslayer. Dessa omsluts av en konventionell polyuretanisolering. Vakuumisoleringspaneler består av ett öppenporigt kärnmaterial omslutet av en lågdiffusionsfilm, som visat till vänster i Figur 4.2. Kärnan töms på luft i en vakuumkammare varefter omslutningen tätas. Detta leder till en värmeledningsförmåga runt $5 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ vid 20°C vilket kan jämföras med polyuretanskum med en värmeledningsförmåga runt $20 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ vid samma temperatur (runt $25 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ vid 50°C).

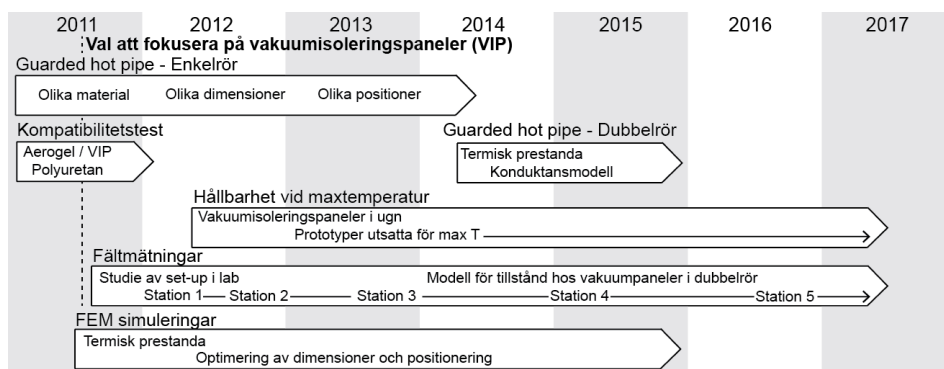


Figur 4.2: Vakuumisoleringspaneler som skiva till höger och anpassad till rör till vänster.

Vakuumpanelerna medför dock två stora utmaningar, båda kopplade till lågdiffusionshöljet. För att höljet ska vara så tätt som möjligt används tunna skikt av aluminium. Aluminiumet skapar en köldbrygga genom höljet som försämrar den termiska prestandan. Men minskar man aluminiummängden kommer luft att

snabbare diffundera in genom höljet och över tid försämra den låga värmeledningsförmågan.

Forskningen började med enkla mätningar med Guarded Hot Pipe för att utvärdera den potentiella förtjänsten. De tidiga mätningarna har kompletterats med mätningar i fält och på laboratorium för att uppskatta livslängden och för att utvärdera gränserna för vid vilka temperaturer panelerna kan användas. Mätningarna har kombinerats med simuleringar för att försöka modellera effekten av köldbryggorna som bildas i lågdiffusionshöljet. Arbetet har följt tidslinjen som presenteras i Figur 4.3.



Figur 4.3: Beskrivning av tidsplan för den sammanlagda forskningen på hybridisolerade fjärrvärmerör.

I det här projektet följer vi upp arbetet med hybridisolerade fjärrvärmerör. Vi har fortsatt följa våra initierade långtidsmätningar, både i fält och i laboratorium, för att få underlag att säga något om livslängden. Vi har även tittat på möjligheter att genomföra accelererade livslängdstester men det har visat sig svårt.

Arbetet med de hybridisolerade rören har varit en iterativ process. De tidiga lärdomarna har låtit oss förbättra senare prototyper. Det innebär att nyare mätningar har en något annorlunda vakuumisoleringspanel mer anpassade för användning i hybridisolerade fjärrvärmerör. Det har även medfört att vi fått uppdatera våra tidigare resultat med nya mätningar och simuleringar.

Med nya vakuumisoleringspaneler har det också varit av intresse att initiera nya mätstationer för att kunna följa upp de nya panelernas prestanda. Det har medfört att två mätstationer har startats men för vilka mätperioden är för kort för någon mer djupgående analys.

Arbetet med rören presenteras i sin helhet i Delrapport 5: Långsiktig prestanda hos hybridisolerade fjärrvärmerör.

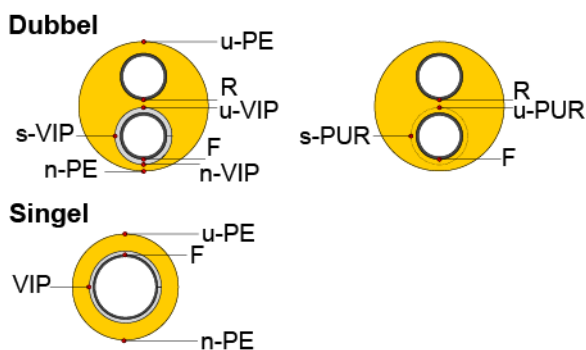
4.1 FÄLTMÄTNINGAR

I dagsläget finns fem stycken fältstationer där det görs kontinuerliga mätningar på hybridisolerade fjärrvärmerör. Två mätstationer är placerade i Varberg, två mätstationer i Göteborg och en mätstation i Linköping, listade i Tabell 4.1.

Tabell 4.1: mätstationer för fältmätningar

#	Stad	Namn	Startår	Dimensioner
1	Varberg	Susvindsvägen	2012	DN 2*80/250
2	Varberg	Brunnsberg	2012	DN 2*25/140
3	Göteborg	Torslanda	2013	DN 2*40/160
4	Göteborg	Hising Backa	2015	DN 150/280
5	Linköping	Glyttinge	2016	DN 50/140

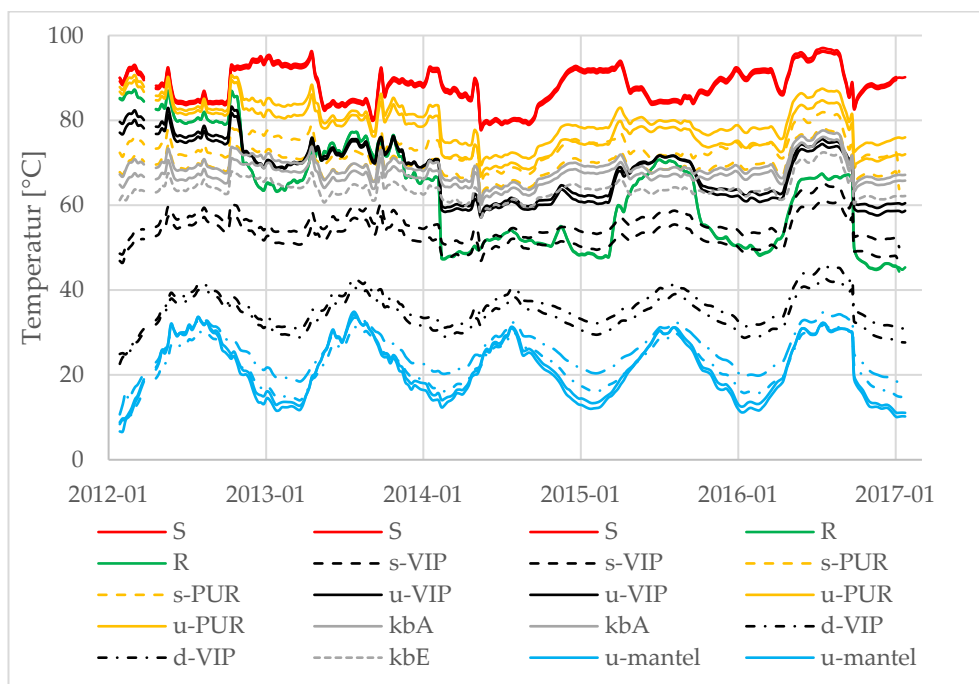
Den termiska prestandan är mätt med termoelement placerade på olika positioner i rörgeometrin. Termoelementens placering är namngiven i enlighet med Figur 4.4. Benämningen VIP beskriver termoelement placerade på baksidan av vakuumisoleringspanelerna och benämningen PUR beskriver termoelement placerade i en referensdel med bara polyuretanskum på samma avstånd från framledningsröret som vakuumisoleringspanelernas tjocklek. I dubbelrör blir geometrin viktig och termoelementplaceringen benämns även med dess relativa position: u för uppåt, s för sidan och n för nedåt.



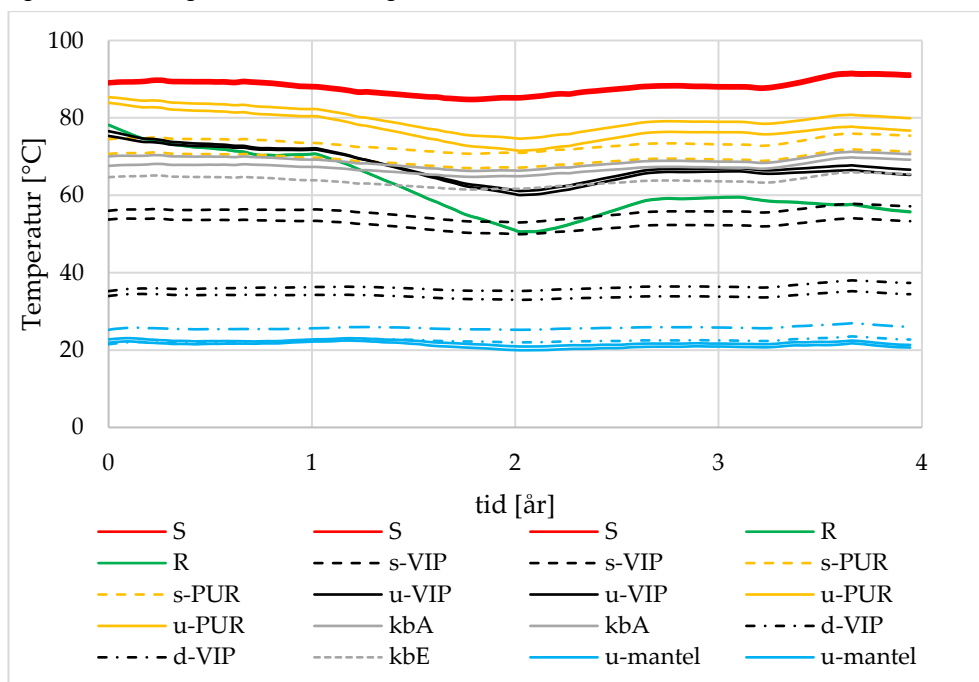
Figur 4.4 Termoelementplacering för fältmätningrör.

Som exempel på resultaten från fältmätningarna visas temperaturerna för mätning 1-Susvindsvägen i Figur 4.5. Man ser tydlig växling mellan årstiderna i temperaturmätningarna på mantelröret. Framlednings- och returledningstemperaturerna har dock varierat något med höga temperaturer året om för framledningen och sjunkande temperatur över flera år för returledningen. Detta indikerar att energiuttaget har ökat vilket kan bero på fler anslutna byggnader till ledningen. Det medför dock att mätningarna blir svårare att analysera.

Detta syns tydligare i Figur 4.6 som visar det flytande årsmedelvärdet för 1-Susvindsvägen. Mantelrörstemperaturen och framledningstemperaturen framstår som mer eller mindre konstanta medan returtemperaturen sjunker över tid men verkar stabilisera sig mot de två sista åren. Temperaturerna på vakuumpanelerna ser ut att följa variationerna i resten av systemet med betydligt lägre temperaturer än referensmätningar i polyuretan vilket indikerar att inga stora förändringar skett med vakuumisoleringspanelernas prestanda. För att se någon mindre försämring över tid behöver dock resultaten undersökas mer noggrant.



Figur 4.5 Fältmätstationsstation 1-Susvindsvägen.



Figur 4.6 Fältmätstationsstation 1-Susvindsvägen, flytande årsmedelvärde.

En metod för att utvärdera långtidsprestandan i dubbelrör med vakuumisoleringspaneler har utvecklats, presenterad i detalj i Berge et al (2016). Metoden utgår från antagandet att temperaturfältet i röret kan beskrivas som en superposition av två fall: ett fall där framledning och returledning har samma temperatur och ett fall där returledningen har samma temperatur som

omgivningen. Om man antar att rörets egenskaper är oberoende av temperaturen kan temperaturen i en godtycklig punkt beskrivas med Ekvation (4.1):

$$T(x, y) = A(x, y) \cdot \left(\frac{T_s + T_r}{2} - T_a \right) + B(x, y) \cdot \frac{T_s - T_r}{2} + T_a \quad (4.1)$$

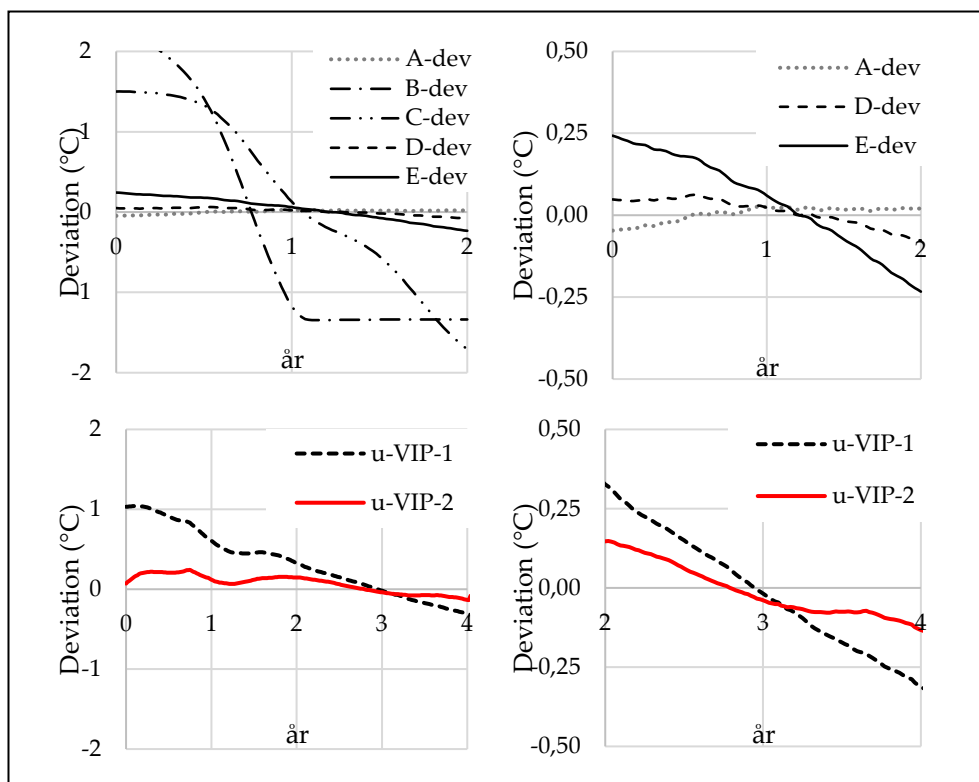
där T är temperaturen i en punkt (°C),

Då metoden inte tar hänsyn till förändringar i tiden kan man använda den för att upptäcka förändringar i tiden. Konstanterna A och B kan uppskattas med hjälp av linjärregression på mätvärden. Konstanterna kan sedan användas för att beräkna temperaturen i punkten. Beräkningarna kan sedan ställas mot mätvärden och om skillnaden mellan dessa ändras kan det leda till slutsatser om förändringar i prestandan hos omliggande material.

Mätningarna jämfördes med beräkningar gjorda för ett antal simuleringsfall där vakuumisoleringspanelerna försämras i olika snabb grad och resultaten för mätstation 1-Susvindsvägen visas i Figur 4.7. De fem simuleringsfallen är:

- A. Konstant $\lambda = 4,5 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ hos VIPen (referensfall).
- B. 1 år $\lambda = 4,5 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ sedan $\lambda = 13,5 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$
- C. 1 år $\lambda = 4,5 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ sedan $\lambda = 4,5 \cdot t_{\text{år}} \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$
- D. 10 % försämring i λ över 3 år ($\lambda = 4,5 \cdot (1+0,033 \cdot t_{\text{år}}) \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$)
- E. $\lambda = 4,5 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Returtemperaturen sjunker 10 % per år.

Resultaten indikerar att värmeisoleringsförmågan försämras med tiden men förändringen är långsam. Panel VIP-1 verkar försämras snabbare än VIP-2. Resultaten döljs till viss mån av en sjunkande returvattentemperatur. Men försämringen ser ut att vara något sämre än fall D med 3,3 % försämring per år, vilket är baserat på försök på byggnader.



Figur 4.7 Analys av resultaten från mätstation 1-susvindsvägen.

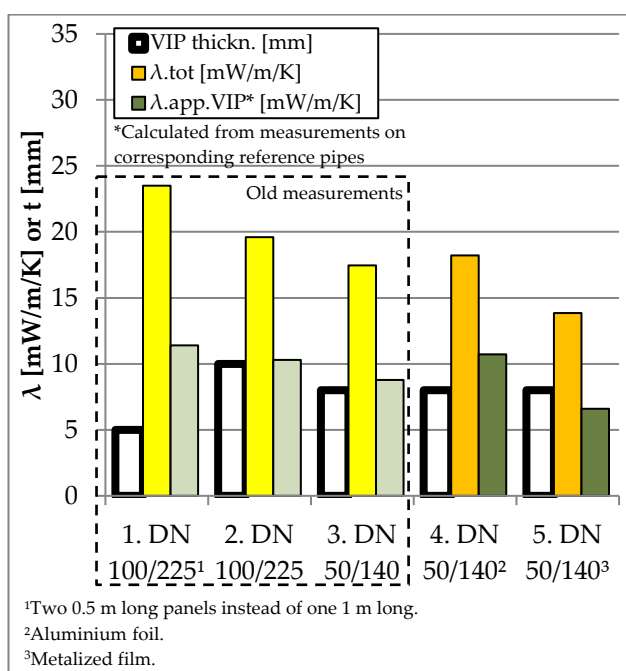
Då de olika fältmätstationsstatinerna varit igång olika tidsperioder tar analyserna något olika uttryck. Men några kommentarer om övriga mätstationer:

- Mätstation 2-Brunnsberg fortsätter med stadig regelbundenhet och resultaten ser bra ut.
- För mätstation 3 har mätutrustningen krånglat under början av mätningarna vilket medfört att resultaten inte hunnit bli så omfattande så att de kan analyseras djupare, trots att mätstationen varit igång sedan 2013. Men översiktligt kan man inte se några problem med mätningarna
- Mätstation 4-HissingsBacka har haft en del problem. Dels finns indikationer på att två paneler var trasiga redan när mätningen satte igång. Det är inte känt om det skedde under produktion eller vid installation i fält. Resterande två paneler verkar försämrats i oroväckande hastighet.
- Den senast initierade stationen 5-Glyttinge har startat fint. Mätresultaten ser väldigt bra ut och resultaten stämmer överens med mätningar från Guarded Hot Pipe. Röret kopplar dock till en badanläggning så under vintern har värmeuttaget varit lågt. Då mätstationen innehåller en ny typ av vakuumpaneler anpassad för högre temperaturer kommer det bli intressant att se hur panelerna klarar sommaren.

4.2 LABORATORIEMÄTNINGAR

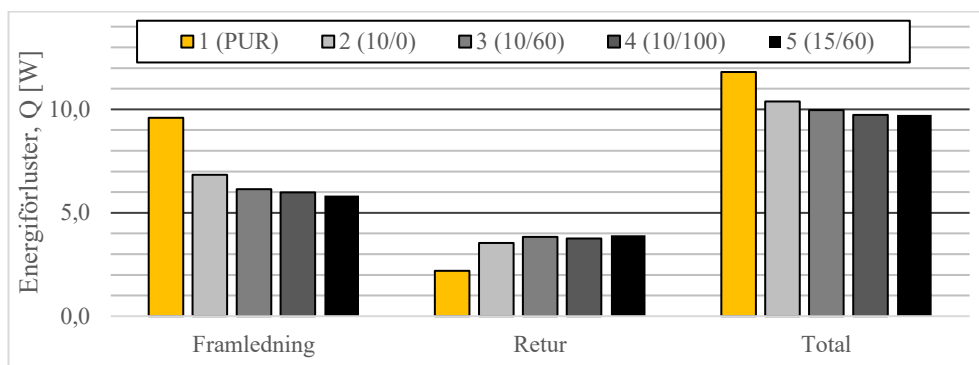
Ett antal prototyper har uppmätts i laboratorium. Dels för att uppskatta den värmeisoleringens prestanda i hybrid rören. Dels för att mäta långtidsprestandan under mer kontrollerade former.

Mätningar på singelrör har främst gjorts i de tidigare projekten men när panelerna ändrades och anpassades för fjärrvärmerörstillverkning har ny prototyper framställts och mätningar har genomförts. Resultat från mätningarna visas i Figur 4.8. Rör 4 och 5 i Figur 4.8 är på nya rör med olika höljen runt vakuumisoleringspanelerna, aluminiumfolie och metalliserade plastfilmer respektive. Metalliserade plastfilmer ger betydligt mindre köldbryggeffekter till priset av något högre luftdiffusion.



Figur 4.8: Guarded hot pipe mätningar på hybridisolerade rör.

Vakuumisoleringspanelerna framstår som mest lämpade för användning i dubbelrör. Dubbelrörsgemetrin medför dock att panelens orientering påverkar på de termiska egenskaperna. Detta har undersökts genom att göra mätningar med två stycken värmerör för Guarded Hot Pipe mätningar. Metoden har presenterats i detalj i Berge et al. (2015). Effekten i värmestavarna har justerats tills stålrören uppnått temperaturen $55 \pm 0,5^\circ\text{C}$ eller $80 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Detta ledde till tre fall: 58°C i båda rören, 58°C i retur men 80°C i framledning och 80°C i båda rören. Resultaten från mätningarna visas i Figur 4.9.



Figur 4.9: Energiförlusten från framledningsrör, returrör och den totala energiförlusten från mätning med olika rörtemperaturer. (tjocklek på vakuumisoleringspanelerna [mm]/ längd på överlapp [mm]).

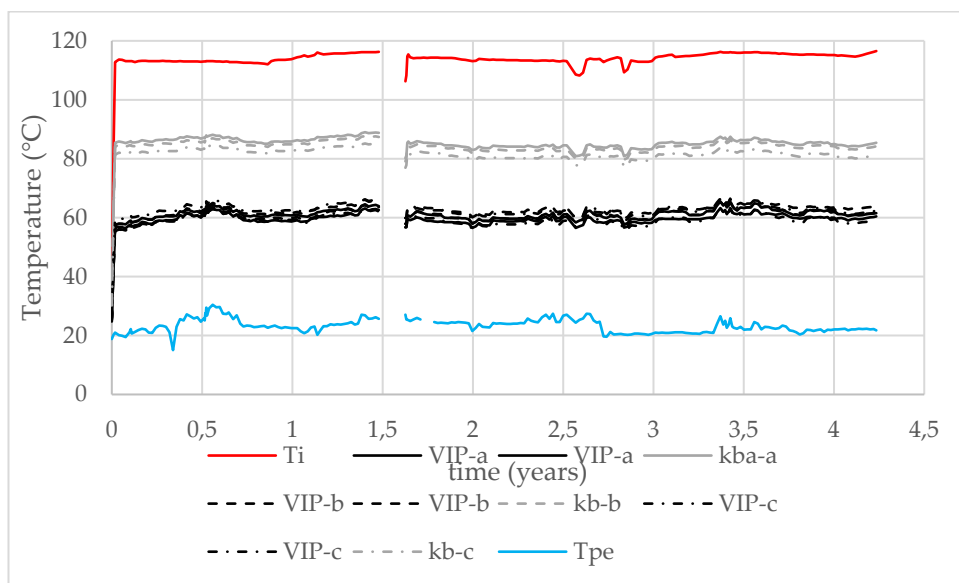
De symmetriska fallen (där båda rören hade samma temperatur) användes för att testa om det går att använda mätningarna i en konduktansmodell där flödesmotståndet från framledningsrör och returrör kan mätas var för sig. Det förutsätter dock att temperaturberoendet i isoleringen är försumbart. Resultaten visar att det var en skillnad på 9 % i beräknade konduktanser när 80°C användes jämfört med 58°C. Om ett medelvärde användes mellan de uppmätta konduktanserna kunde det dock användas för att beräkna totalförlusterna med ett fel under 2 %. Det betyder dock att det krävs god kunskap om tillämpningsfallet när konduktansmätningar planeras, vilket till viss del motverkar syftet med metoden.

4.2.1 Långtidsmätningar vid konstant maxtemperaturbelastning

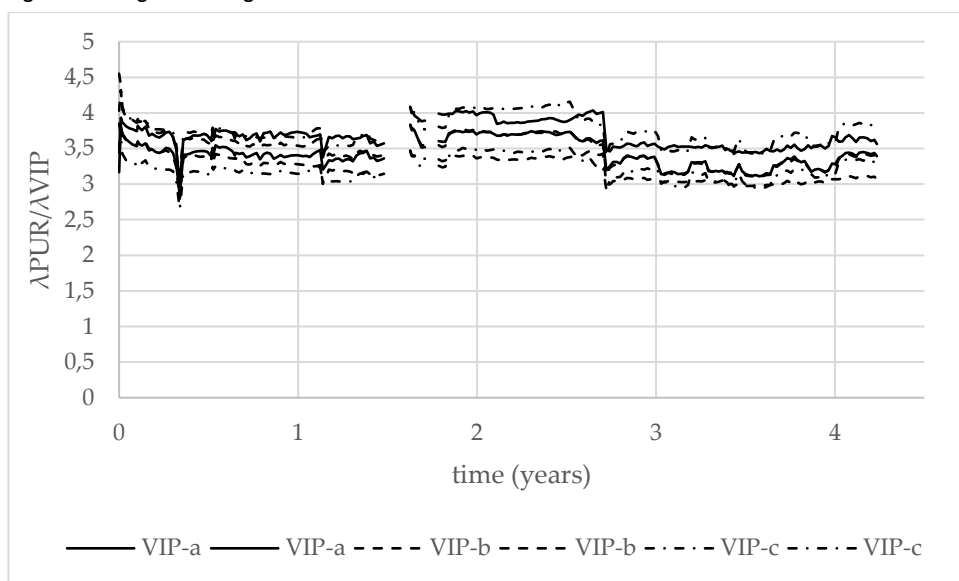
Samtidigt som det har gjorts mätningar på hybridisolerade fjärrvärmerör i fält har det gjorts långtidsmätningar på ett hybridisolerat rör i laboratorium. Röret har haft en konstant temperatur på 115°C i medieröret i över fyra år. Experimentet startade med tre rör med olika temperatur. Ett rör med 125°C gick sönder efter några dagar och med 135°C gick det sönder direkt. Vid 115°C är röret intakt ännu efter 4 år. Prestandan i vakuumisoleringspanelen har beräknats som kvoten mellan polyuretanskummets värmekonduktivitet och vakuumisoleringspanelens värmekonduktivitet enligt Ekvation (4.2):

$$\frac{\lambda_{PUR}}{\lambda_{VIP}} = \frac{\Delta T_{VIP}}{\Delta T_{PUR}} \cdot \frac{\ln(\Delta r_{PUR}/r_{0,PUR} + 1)}{\ln(\Delta r_{VIP}/r_{0,VIP} + 1)} \quad (4.2)$$

Resultaten visas i Figur 4.11. Efter 4 år är förändringen i värmekonduktiviteten marginell. Konduktiviteten är mellan 3 och 4 gånger större än den hos polyuretanet. Medeltemperaturen i vakuumpanelen är då runt 85°C jämfört med 40°C i polyuretanet.



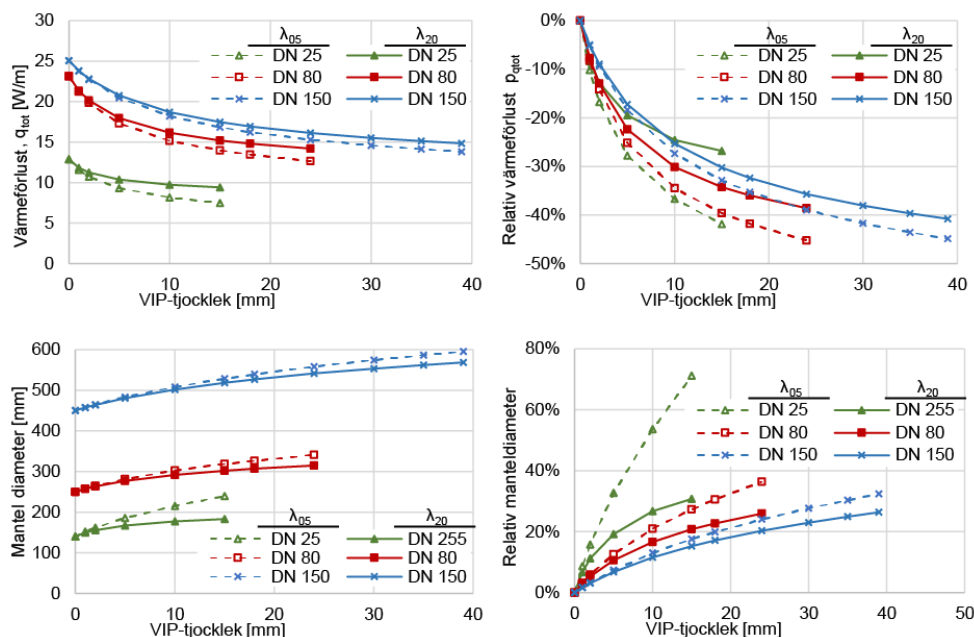
Figur 4.10: Långtidsmätningar i laboratorium.



Figur 4.11: Värmekonduktivetsknot för långtidsmätningar i laboratorium.

4.3 SIMULERINGAR

Simuleringar har gjorts med finita element metoden för att utvärdera inverkan av olika designval såsom VIP-tjocklek och överlappets placering. Figur 4.12 visar inverkan av VIP-tjocklek för paneler med två olika värden på höljets värmeledningsförmåga, $\lambda_{20} = 20 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ och $\lambda_{05} = 0,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Uppe till vänster visas absoluta värden och uppe till höger visas värden relativa ett fjärrvärmerör med samma mantelrörsdiameter men utan vakuumisoleringspanel. Det syns tydligt att de första millimetrarna vakuumpanel spelar störst roll och när panelen blir tjockare avtar effekten.



Figur 4.12: VIP-tjockleken inverkan på värmeförlusten.

I stället för att tillföra vakuumisoleringspaneler kan man alltid göra mantelröret större för att få samma effekt. Grafen nere till vänster i Figur 4.12 visar vilken mantelrörsdiameter som skulle behövas för att få samma värmeförlust som det vakuumisolerade röret och figuren till höger visar den relativa mantelrörsökningen.

Simuleringarna på överlappet visar att den optimala positionen styrs av värmekonduktiviteten i höljet. Med ett litet överlapp där inte isoleringstjockleken ökar vid överlappet kan man dock sluta sig till att prestandan blir bäst om köldbryggan riktas upp mot returröret. Det kan dock vara av intresse att utvärdera om ett dubbellager kan användas strategiskt för att ytterligare minska energiförlusterna.

4.4 SAMMANFATTNING HYBRIDISOLERADE FJÄRRVÄRMERÖR

I tidigare projekt har vi visat att man med en vakuumpanel på 8-10 mm kan minska energiförlusterna med nästan 50 % från ett singelrör eller runt 30 % för ett dubbelrör med medierör i storleksordningen DN 50-100. Storleken på vinsten beror så klart på dimension på vakuumisoleringspanelen, medierör och mantelrör. Med större mantelrör blir inverkan av en panel mindre.

Hybridisoleringens värde ökar om man värderar förluster från framledningen som värre än förluster från returledningen då en välisolerad framledning sänker temperaturen runt returen och på så vis ökar förlusterna därifrån. Fältmätningarna och laboriemätningarna visar samstämmigt att försämringen av panelernas prestanda är långsam så länge som man håller temperaturen under den brytpunkt då vakuumpanelens hölje kollapsar. Efter nära 5 års mätningar är effekten på temperaturerna, och därmed även värmekonduktiviteten, marginell.

De tidigare resultaten har medfört att paneltillverkare har börjat arbetet med att anpassa sin produkt mot fjärrvärmerör. De mätningar som sattes igång tidigast har därför en betydligt sämre panel än de som monterats i senare konstruktioner.

Resultaten visar dock även att det är viktigt med försiktighet både vid produktion och installation, annars finns en risk att skada panelerna som därmed inte får den förväntade prestandan.

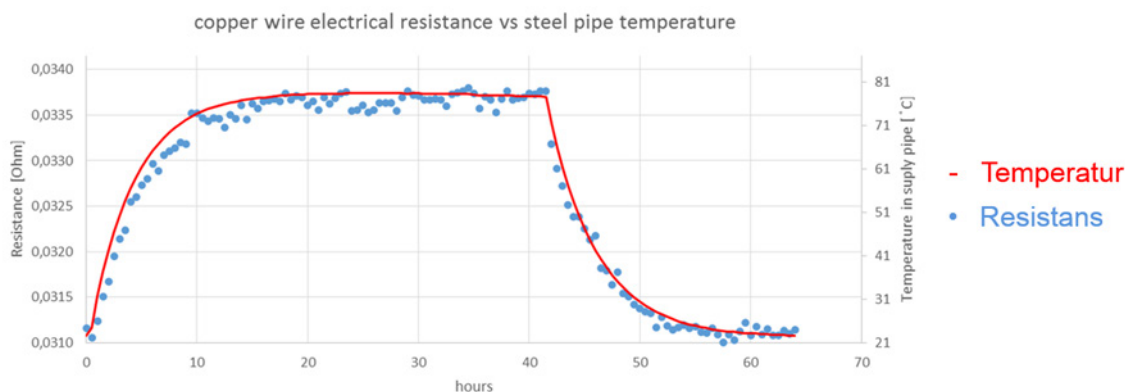
5 Statusbedömning av fjärrvärmerör genom en icke förstörande metod

Det svenska Fjärrvärmenätet är på många platser föråldrat. Det behöver dock inte betyda att det är undermåligt. Det finns därför ett stort behov av att just kunna bedöma statusen på dessa rör. Detta delprojekt syftar till att utveckla en icke förstörande metod som möjliggör en termisk statusbedömning av dessa rör. Projektet har initialt utförts som en litteraturstudie genom att undersöka om det finns några potentiella metoder för andra applikationer som kan tillämpas eller modifieras för användning på fjärrvärmerör, se *'Delrapport 7: Possible measuring methods'*. Denna litteraturstudie pekade ut flertalet icke förstörande metoder för befintliga rör men ingen som i dagsläget ansågs tillräckligt bra för att vidareutveckla. För ny rörläggning finns det betydligt större potential eftersom det då är möjligt att placera ut olika varianter av sensorer, t.ex. fiberoptiska kablar eller sensorer som kan fjärravläsas, *'Delrapport 8: Evaluation-RFID'*.

För befintliga rör har ett tydligt fokus legat på att försöka utveckla en icke förstörande metod, där statusen kan bedömas utifrån rörens befintliga egenskaper utan att på något sätt behöva gräva fram rören. Därför har vi valt att gå vidare med två andra metoder som vi benämner TCR-metoden (Thermal Coefficient of Resistance) och avsvalnings-metoden, tidigare testad på flexrör av (Reidhav, 2010).

5.1 TCR-METODEN

TCR-metoden bygger på att utnyttja sambandet mellan elektrisk resistans och temperatur. I äldre och nyproducerade rör är det vanligt förekommande med koppartråd i polyuretanisoleringen som genom resistansmätningar kan indikera på fuktläckage. I denna metod kommer koppartråden användas som temperatursensor vid resistansmätningar. Inom projektet har tester genomförts för att visa på sambandet mellan resistans och temperatur i rörets koppartråd, se Figur 5.1.

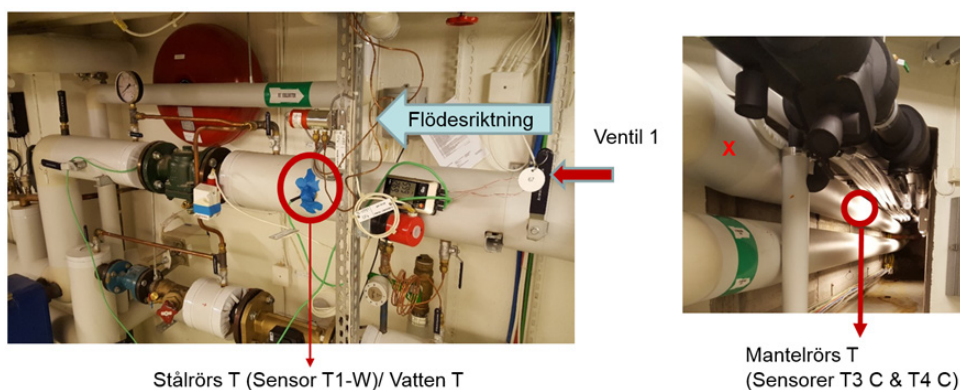


Figur 5.1: Resultat vid jämförelse av stälrörstemperatur (vattentemperatur) och elektrisk resistans. Grafen visar på ett tydligt samband mellan temperaturen i rött och resistansen i blått.

Ett tydligt samband visas mellan stålrohrstemperatur och elektrisk resistans i koppartråden. Detta betyder att det är möjligt att mäta temperaturen i polyuretan-isolering i nivå med koppartrådens position.

5.2 AVSVALNINGSMETODEN

Avsvalningsmetoden bygger på att en driftsatt rörsträcka temporärt stängs av under några timmar, för att studera den energimängd som försvinner under avsvalningsperioden. Med hjälp av temperatursensorer (t.ex. koppartråden) studeras avsvalningsförloppet. Därifrån går det bestämma den termiska statusen av fjärrvärmeröret. Metoderna har testats individuellt i laboratoriemiljö och på Chalmers egna rör med goda resultat.



Figur 5.2. Försöksupställning vid test av avsvalningsmetoden på Chalmers rör.

Vid testet av avsvalningsmetoden på Chalmers fjärrvärmerör system visade resultatet att det mineralullsiserade rörets totala värmeledningsförmåga (λ) vara 43,6 (mW/m·K), något som kunde bekräftas genom en känslighetsanalys då samtliga köldbryggor analyserades. Dessa rör saknade koppartråd och därför kunde inte TCR-metoden testas. För mer information se 'Delrapport 6: Icke förstörande metod'.

Förhoppningen är att TCR-metoden och avsvalningsmetoden går att kombinera vid framtida fältmätningar och bli en metod som kan användas av fjärrvärmenätens ägare. Eftersom avsvalningsmetoden kräver någon form av temperatursensor, planeras TCR-metoden att testas vid ett kommande fältförsök som en temperatursensor. TCR-metoden kommer att utvecklas ytterligare för att kunna ge tillförlitliga temperaturer. Lämpliga teststräckor kommer att lokaliseras och förbereds för fältmätningar. Ytterligare information om ovan nämnda metoder går att finna i 'Delrapport 6: Icke förstörande metod'.

6 Slutsatser

Mätningar har gjorts ett antal gånger på rör i en långtidsmätstation kopplad till ett aktivt fjärrvärmenät. Rören i mätstationen har analyserats med jämna intervall undersökts. Guarded hot pipe mätningar har visat att värmeledningsförmågan för två testade rör båda har ökat med ungefär 10 % över 27 år (ett rör med koldioxid-blåst PUR och ett CFC- 11 blåst PUR). Cellgasanalyser visar att polyuretanskummet har oxiderats. Syrenivåerna är lägre än förväntat och koldioxidnivåerna är för höga.

Ytterligare analys av oxidationens konsekvenser visar att cellväggarna skulle kunna ha förändrats så att strålningens bidrag står för ungefär 2 % av ökningen av värmekonduktiviteten under cirka 30 år.

Resultaten från cellgasanalyserna har kunnat användas för att uppdatera den beräkningsmodell som använts i EKODIM för att bättre stämma överens med mätningar.

I projektet har vi visat att vakuumisoleringspaneler går att använda i fjärrvärmerör för att minska värmeförlusterna. Efter 5 års kontinuerliga mätningar i fält och 4 års kontinuerliga mätningar vid hög temperatur i laboratorium påvisas en diffusion av gas in i panelerna som sakta höjer deras värmekonduktivitet. I kortare mätningar kan försämringen inte ses. Förändringen har inte varit dramatisk. Arbetet har lett till utveckling av nya vakuumisoleringspaneler, bättre anpassade för fjärrvärmerör. Dessa har börjat undersökas men har ännu inte kunnat ge några konkreta resultat beträffande livslängd.

Mätningarna på avsvälningen i ett fjärrvärmerör visar att metoden skulle kunna användas för att skatta den termiska prestandan i ett fjärrvärmerör i fält. En utmaning där blir dock att mäta de temperaturer som man behöver veta för att kunna göra beräkningar. En icke-förstörande mätmetod baserad på relationen mellan temperatur och elektrisk resistans i koppartrådar har undersökts.

Undersökningen visar att metoden kan ge en indikation på temperaturförändringar i de koppartrådar som i dag används för att hitta läckage i fjärrvärmerör. Mätningen skulle då ge en medeltemperatur längs koppartråden. Temperaturen skulle kunna användas i samband med en avsvälning för att mäta värmeförlusterna.

7 Framtida forskning

Mätresultaten från mätstationen i Hisings Backa har gett värdefull ny information om de processer som sker när fjärrvärmerör åldras. Det är av stort intresse att hålla mätstationen igång då rören fortsätter att åldras. Framtida mätningar kan leda till att modellerna för gasdiffusion och nedbrytningsprocesser kan fortsätta att förbättras.

På samma sätt samlas fortsatta mätresultat passivt i fältmätstationerna för hybridisolerade fjärrvärmerör. Kontinuerligt skapas resultat för längre tidsperiod vilket ger möjlighet till mer noggranna analyser. För hybridisolerade rör skulle det också vara av intresse att genomföra en större mätstudie där lovande panelkonfigurationer ställs mot varandra. Det finns även indikationer på att beräkningarna av den termiska prestandan skulle kunna förenklas. Något som dock skulle kräva omfattande valideringsarbete.

TCR-metoden för temperaturmätningar behöver undersökas på längre sträckor och i fält för att utvärdera dess potential som mätmetod. Hur den skulle kunna kombineras med en avsvalningsmetod skulle också behöva undersökas. Alternativa metoder för att mäta temperaturer för vid en avsvalningsmätning skulle också vara av intresse att studera.

LIVSLÄNGD OCH STATUSBEDÖMNING AV FJÄRRVÄRMENÄT

Fjärrvärmerörets termiska och mekaniska prestanda minskar med tiden och många energibolag har behov av att förnya sitt fjärrvärmenät. Men det finns ingen metod för att fastställa rörens prestanda under användningstiden.

Här har fältmätningar, laboratorieförsök och teoretiska beräkningar gjorts för att ta fram ett effektivare fjärrvärmerör med lång livslängd och en icke-förstörande metod för att bestämma statusen på ett rör. En modell för att bedömma fjärrvärmerörs livslängd har också utvecklats.

Resultaten visar att efter cirka 30 år har fjärrvärmerören i en provanläggning vid Hisings Backa fortfarande goda mekaniska och termiska prestanda. Rörens värmeisolering förändrades med cirka 10 procent och de mekaniska egenskaperna uppfyller kraven enligt SS-EN253. Hybridisolering av fjärrvärmerör minskar värmeförlusterna med nästan 50 procent för ett singelrör och med runt 30 procent för ett dubbelrör

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk