

Delrapport 5:

Långsiktig prestanda hos hybridisolerade fjärrvärmerör

Axel Berge

Contents

1	Introduktion.....	2
1.1	Konceptbeskrivning	2
1.2	Vakuumisoleringspaneler för rör	3
1.3	Tidigare forskning på hybridisolerade rör	4
2	Laboratoriemätningar	4
2.1	Guarded hot pipe.....	4
2.2	Långtidsmätningar vid konstant maxtemperaturbelastning	8
3	Fältmätningar	10
3.1	Metod för analys av vakuumpaneler i dubbelrör	11
3.2	Resultat från fältmätningstationer	12
3.2.1	1-Susvindsvägen.....	12
3.2.2	2-Brunnsberg.....	15
3.2.3	Mätstation 3-Torslanda.....	16
3.2.4	4-HissingsBacka.....	17
3.2.5	5-Glyttinge.....	19
4	Simuleringar	20
4.1	VIP-tjocklek	22
4.2	Överlappsvinklar	23
5	Slutsatser	25
6	Referenser	25

1 Introduktion

Enligt energistatistik från SCB förloras nära 10% av värmeenergin som skickas ut i fjärrvärmenätet på grund av värmeförluster från fjärrvärmerören (Statistics Sweden, 2013). Reidhav och Werner (2008) visar att förlusten kan vara över 40% för delar av nätet där energiuttaget är litet. Ett antal förslag för att förbättra den termiska prestandan i fjärrvärmerör har förts fram av IEA-DHC Annex VIII (Zinko et al., 2008): användning av dubbelrör, centrerat framledningsrör i dubbelrör, äggformat mantelrör kring dubbelrör och introduktion av högpresterande isolering runt framledningsröret.

Centrerat framledningsrör har undersökts av Dalla Rosa et al. (2011) vilket visade en förbättring av energiprestandan med 3.2% jämfört med konventionella symmetriska dubbelrör. Äggformat mantelrör har undersökts av Bøhm and Kristjansson (2005) och gav en minskning i värmeförlusterna med 7% jämfört med symmetriska dubbelrör med samma mantelrörsstorlek. De undersökte även effekten av två framledningsrör i samma isolering där det ena kunde stängas av när uttaget var lågt vilket skulle ge en förbättring med 25% jämfört med dubbelrör.

Det här projektet bygger på de tidigare fjärrsynprojekten *Högpresterande fjärrvärmerör* och *hybridisolerade fjärrvärmerör* (Adl-Zarrabi and Berge, 2012, 2013) där högpresterande värmeisoleringsmaterial har undersökts för användning i fjärrvärmerör.

1.1 Konceptbeskrivning

Värmeförlusterna från ett fjärrvärmerör styrs av temperaturskillnaden mellan fjärrvärmevattnet och den omgivande marken, rörisoleringens värmeledningsförmåga och isoleringens tjocklek. Den termiska prestandan för ett fjärrvärmerör kan alltid förbättras genom att öka på isoleringstjockleken, men större rör medför ökade kostnader för transport och schaktning. Det tillgängliga utrymmet kan på så vis också begränsa den möjliga prestandan.

I en cylindrisk geometri som ett rör finns det även en effekt där isoleringen större inverkan ju närmare cylinderns centrum den befinner sig. Det medför att ju mer isolering du lägger på, desto mer värdefullt blir det att byta ut den innersta isoleringen mot en dyrare isolering med bättre värmeprestanda jämfört med att lägga till isolering ytterst på röret. Värmemotståndet, R , i ett cylindriskt materiallager längs en meter rör kan beskrivas enligt Ekvation (1):

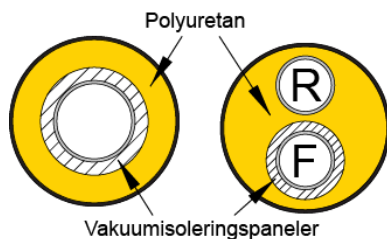
$$R = \frac{\ln(r_1/r_0)}{2\pi\lambda} \left[\frac{m \cdot K}{W} \right] \quad (1)$$

där r_0 och r_1 är respektive inre och yttre radie på materialskiktet [m] och λ är materialets värmeledningsförmåga [W/m·K]. Därifrån kan man härleda uttrycket i Ekvation (2) för materialvolymen, V , som behövs för att uppnå ett visst värmemotstånd som funktion av avståndet från cylinderns mitt. Uttrycket visar att materialvolymen som behövs för att uppnå ett visst värmemotstånd växer med kvadraten på radien.

$$V(r_0) = \pi(\exp(4\pi\lambda \cdot R) - 1) \cdot r_0^2 \left[\frac{m^3}{m} \right] \quad (2)$$

Det har lett till ett koncept för hybridisolerade fjärrvärmerör med vakuumisoleringspaneler och polyuretanskum. Vakuumpanelerna används närmast intill medieröret och de hålls på plats med omgivande polyuretanskum, som på Figur

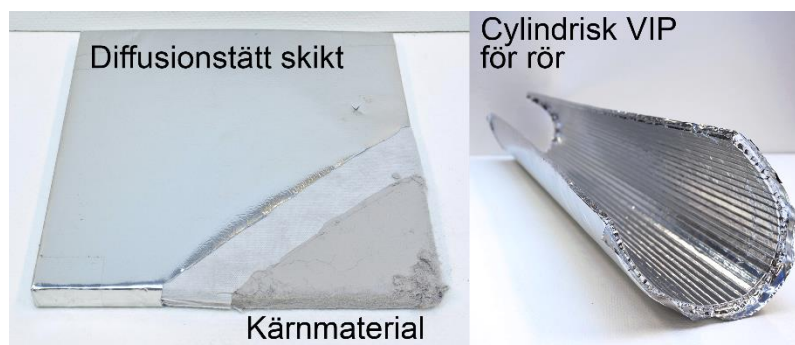
1. För att hantera kraftutbytet mellan medierör och mantelyta antas enkelrören bara ha superisolerings på varannan meter medan krafterna i dubbelrören antas kunna tas upp av polyuretanets förankring i returvattenröret.



Figur 1: Koncept för hybridisolerade fjärrvärmerör med vakuumisoleringspaneler.

1.2 Vakuumisoleringspaneler för rör

Vakuumisoleringspaneler består av ett poröst kärnmateriale som har tömts på luft och sedan förslutits i en lufttät påse, visat i Figur 2. Kärnmaterialets porositet optimeras utifrån balansen mellan värmeledning i den fasta strukturen och värmestrålningen genom isoleringen, men måste också vara så styvt att det kan stå emot en atmosfärs tryck utan att porstrukturen förstörs.



Figur 2: Vakuumisoleringspaneler. (Foto: Nina Zanders)

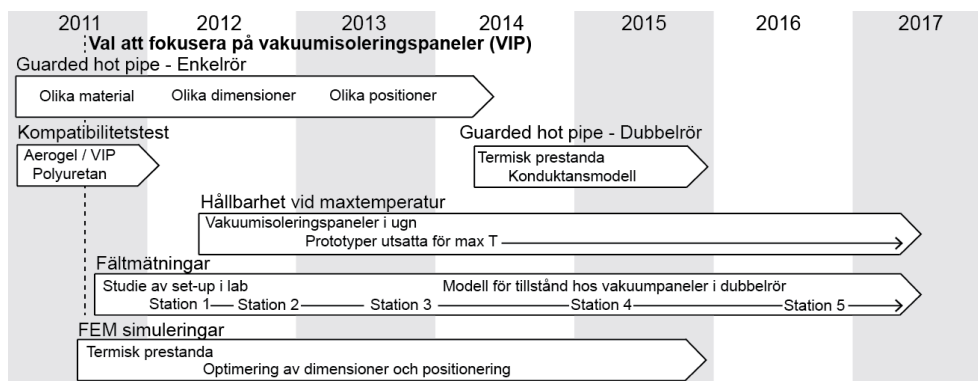
För applikationer med lång förväntad livslängd används vanligtvis pyrogen sillica då det har ett porsystem i nanometerstorlek. I små porer behöver inte vakuumet hålla lika hög kvalitet för att värmeledningsförmågan genom luften ska sänkas, det medför en mindre inverkan från luft som trots allt med tiden diffunderar in genom den lufttäta omslutningen.

Värmeledningsförmågan genom mitten av en ny vakuumisoleringspanel är av storleksordningen $5 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ vid 20°C vilket kan jämföras med polyuretanskum som har en värmeledningsförmåga runt $20 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (storleksordningen är $25 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ vid 50°C). Det medför en förbättring med en faktor 4 eller 25% av värmeledningsförmågan. Med tiden kommer dock panelen sakta fyllas med luft och nå en värmeledningsförmåga av samma storleksordning som polyuretanet.

Den diffusionstäta laminat som omsluter det porösa kärnmaterialet medför dock ett optimeringsproblem mellan termisk prestanda och livslängd. För att göra laminatet tätt används tunna lager av aluminium, skyddade mellan plastlager. Aluminiumet har en väldigt hög värmeledningsförmåga jämfört med kärnmaterialet och även extremt tunna skikt kan skapa en köldbrygga som ger ett relevant tillskott till värmetransporten. Tjockare aluminiumskikt minskar luftinträngningen men ökar samtidigt värmeledningen genom panelen. Det blir viktigt att hitta en bra balans mellan dessa två effekter.

1.3 Tidigare forskning på hybridisolerade rör

Arbetet med hybridisolerade rör påbörjades under 2011 genom projektet *högpresterande fjärrvärmerör* (Adl-Zarrabi and Berge, 2012) som fungerade som en förstudie. Ett antal olika idéer för att sänka värmeförlusterna från fjärrvärmerör testades. Resultaten visade att hybridisolerade rör med vakuumisoleringspaneler var det mest intressanta alternativet att gå vidare med. Arbetet följdes upp genom projektet *hybridisolerade fjärrvärmerör* (Adl-Zarrabi and Berge, 2013) där konceptet undersöks mer i detalj genom simuleringar, laboratiemätningar och fältmätningar. De tidiga mätningarna har även presenterats i Berge and Adl-Zarrabi (2012, 2014).



Figur 3: Tidslinje för arbetet med hybridisolerade fjärrvärmerör.

Delar av de mätningar som presenteras inom det här projektet har initierats i tidigare projekt men då prestandan över lång tid är en central frågeställning har resultaten uppdaterats i och med att mer mätdata har inkommit.

2 Laboratiemätningar

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

2.1 Guarded hot pipe

Mätningar på singelrör har gjorts baserade på standarden SS-EN 253:2009 för rör med homogen isolering. Detta har gett ett representativt λ -värde för den samlade konstruktionen som korrelerar mot energiförlusten från korresponderande dimensioner. Utifrån rörets konduktivitet och med kunskap om polyuretanets egenskaper kan ett representativt λ -värde för lagret VIP beräknas i enlighet med Ekvation (3).

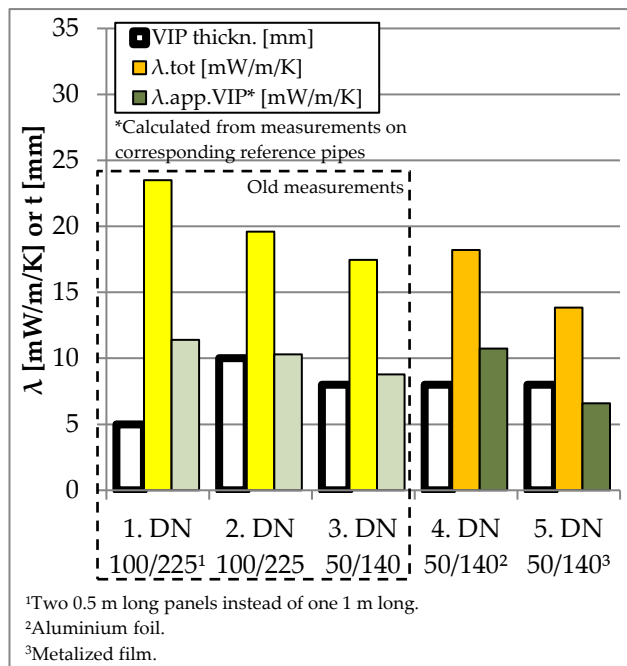
$$\frac{\ln\left(\frac{r_{tot}}{r_0}\right)}{\lambda_{tot}} = \frac{\ln\left(\frac{r_{VIP}}{r_0}\right)}{\lambda_{app.VIP}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{tot}}{r_{VIP}}\right)}{\lambda_{PUR}} \quad (3)$$

där λ_{tot} , $\lambda_{app.VIP}$ och λ_{PUR} är respektive värmekonduktiviteten för den totala rörkonfigurationen, för lagret VIP och för polyuretanskummet ($W/(m \cdot K)$) och r_0 , r_{VIP} och r_{tot} är respektive radien på medieröret, till VIPens baksida och till mantelröret (m).

Resultaten från mätningarna visas i Figur 4. Där mätning 1-3 är gamla mätningar som presenteras i Berge och Adl-Zarrabi (2014). 4 och 5 är nya mätningar som skiljer sig åt genom att ha olika material i vakuumisoleringspanelens hölje: rör 4 har en

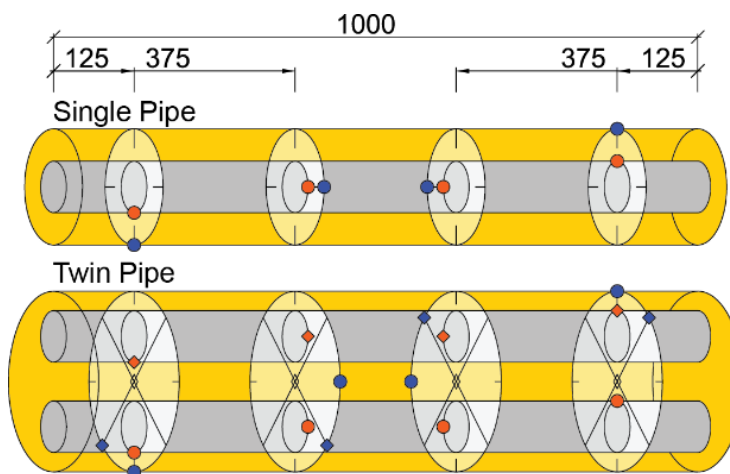
aluminiumfolie och 5 har metalliserade plastfolier. Det medför att rör 4 får större köldbryggor genom höljet vilket indikeras av mätresultaten.

Jämfört med värmekonduktiviteten på polyuretanskum runt 25 mW/(m·K) medför vakuumisoleringspanelerna nästan en halvering av värmeförlusterna för de uppmätta dimensionerna.



Figur 4: Guarded hot pipe mätningar på hybridisolerade rör.

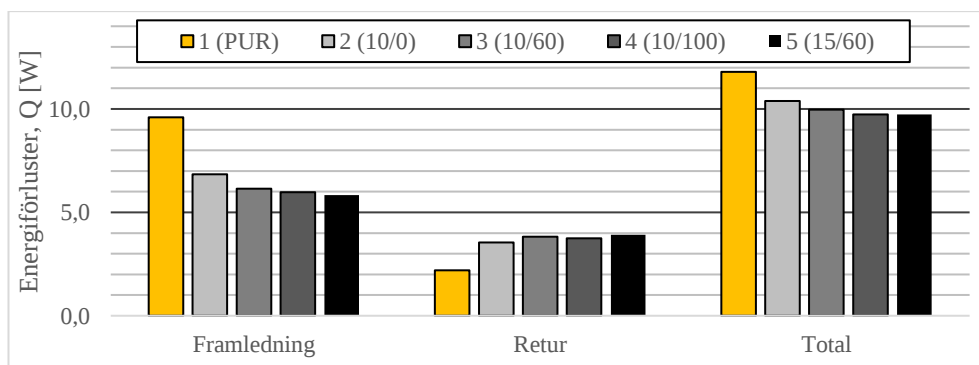
Vakuumisoleringspanelerna framstår som mest lämpade för användning i dubbelrör då panelerna kan täcka hela det varmare framledningsröret medan returledningen tar hand om de mekaniska vidfästningen med omgivande mark. Hybridisolerade dubbelrör har undersökts två stycken värmerör för Guarded Hot Pipe mätningar. Metoden har presenterats i detalj i Berge et al. (2015). Effekten i värmestavarna har justerats tills stålrören uppnått temperaturen $58 \pm 0,5^\circ\text{C}$ eller $80 \pm 0,5^\circ\text{C}$ baserat på samma proportionella temperaturer som tidigare simuleringar (85-55-5). 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. Placering av termoelementen för mätningarna presenteras i Figur 5 där de jämförs med standardplaceringen för mätningar på singelrör.



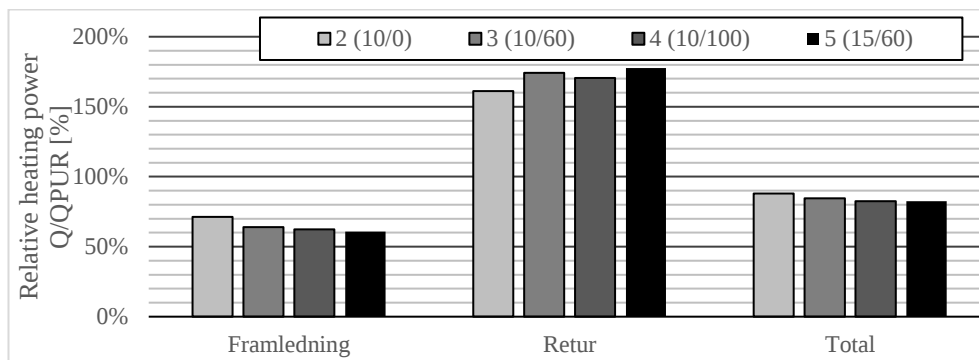
Figur 5: Termoelementplacering för Guarded Hot Pipe mätningar på singelrör överst och för våra dubbelrörsmätningar nederst.

Fem olika fall, varav ett referensfall, undersöktes. Resterande bestod av tre fall med 10 mm vakuumisolering och olika långa överlapp (0/60/100 mm) samt ett fall med 15 mm tjock vakuumisolering (60 mm överlapp). Samtliga rör hade dimensionerna DN 2*80/315 (serie 3 enligt SS-EN 15698-1:2009).

Resultaten från mätningarna visas i Figur 6. Mätningarna är uppdelade i förluster från framledning och returledning för att visa att minskningen av förlusterna från framledningsröret i viss mån motverkas av ökade förluster från returröret då omgivningen runt detta blir kallare. Detta är ännu tydligare i Figur 7 som visar den relativa förlusten om mätningarna på hybridisolerade rör jämförs med referensmätningen med bara polyuretanskum. Medan framledningsförlusterna nästan halveras, dubblas nästan returledningsförlusterna. Det bör nämnas att mätningarna gjorts på rör med tjock polyuretanskums isolering. I mindre mantelrör (serie 1 eller 2 enligt SS-EN 15698-1:2009) skulle den relativa effekten av 10-15 mm VIP bli ännu större.



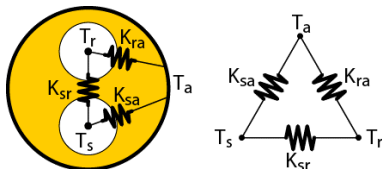
Figur 6: Energiförlusten från framledningsrör, returrör och den totala energiförlusten från mätning med olika rörtemperaturer. (tjocklek på vakuumisoleringspanelerna [mm]/ längd på överlap [mm]).



Figur 7: Relativ energiförlust från framledningsrör, returrör och den totala relativa energiförlusten från mätning med olika rörtemperaturer. (tjocklek på vakuumisoleringspanelerna [mm]/ längd på överlap [mm]).

De symmetriska fallen användes för att kunna utvärdera konduktanserna från rören. När temperaturen är samma i båda rören går inget värmeflöde mellan rören och hela effekten i värmestaven flödar ut mot omgivningen. För ett dubbelrör kan dt termiska problemet delas upp i tre konduktanser i enlighet med Figur 8, där varje konduktans, K (W/K), ligger mellan två temperaturränder, ΔT (°C), och kan användas för att beräkna värmeflödet mellan ränderna, Q (W), enligt Ekvation (4):

$$Q = K \cdot \Delta T \quad (4)$$



Figur 8: Beskrivning av konduktansmodell.

Ett av de i sammanhanget viktigaste antagandet för att modellens konduktanser ska kunna fås från mätningarna är att värmekonduktiviteten är oberoende av temperaturen. I annat fall kan inte de olika konduktanserna superpositioneras.

Resultatet från konduktansberäkningarna presenteras i Tabell 1. Där visar sig att temperaturberoendet har en stor inverkan på konduktanserna. Upp mot en storleksordning på 12%.

I Tabell 2 används konduktanserna för att beräkna energiförlusterna och beräkningarna jämförs med det asymmetriska fallet. Med konduktanserna vid 58°C underskattas värmeförlusten och med konduktanserna vid 80°C överskattas konduktanserna jämfört med det asymmetriska fallet. Medelvärde mellan konduktanserna ger dock en ganska bra uppskattning av totalförlusterna.

Tabell 1: Beräknade konduktanser mellan medierör och omgivning.

Sample	K_{sa58}	K_{sa80}	$K_{sa80}/K_{sa58}-1$	K_{ra58}	K_{ra80}	$K_{ra80}/K_{ra58}-1$
1	0,123	0,134	9%	0,122	0,131	7%
2	0,091	0,102	12%	0,137	0,144	5%
3	0,086	0,091	6%	0,141	0,149	6%
4	0,083	0,089	8%	0,140	0,147	5%

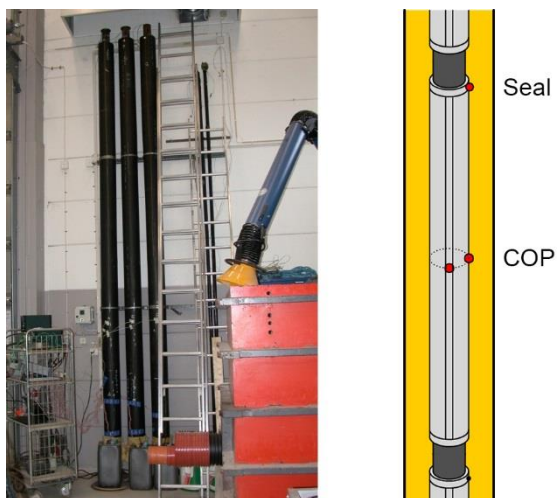
5	0,081	0,086	5%	0,143	0,149	4%
---	-------	-------	----	-------	-------	----

Tabell 2: Analys av värmeförlustberäkningar med konduktanser.

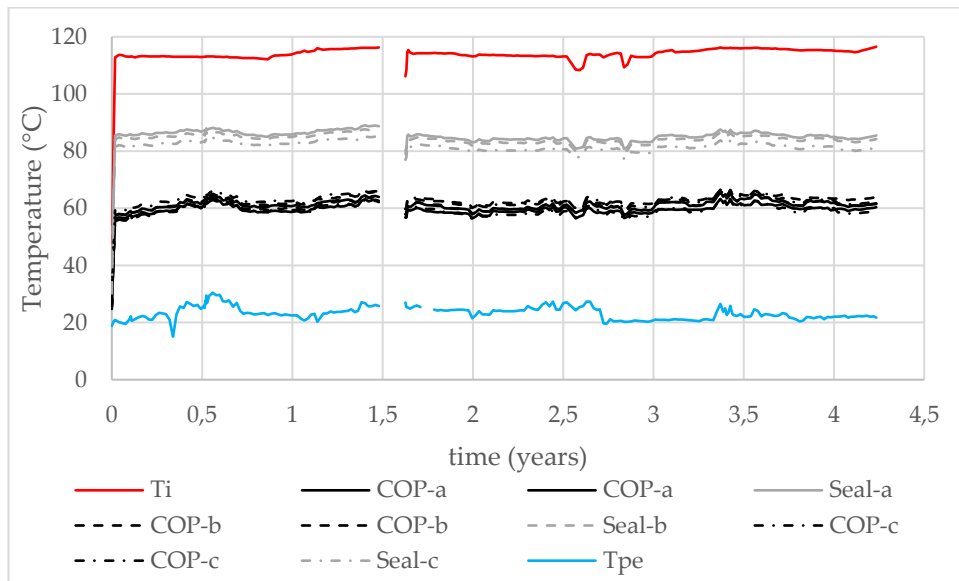
Sample nr	Q [W]	$Q_{@58^{\circ}\text{C}}$ [W]	$Q/Q_{@58^{\circ}\text{C}}$		Q/Q_{avg}		$Q_{\text{tot}}/Q_{@80^{\circ}\text{C}}$	$Q_{@80^{\circ}\text{C}}/Q_{@58^{\circ}\text{C}}$
			-1 [%]	Q_{avg} [W]	-1 [%]	$Q_{@80^{\circ}\text{C}}$ [W]	-1 [%]	-1 [%]
1.	11,80	11,17	6%	11,62	2%	12,07	-2%	8%
2.	10,39	9,81	6%	10,26	1%	10,70	-3%	9%
3.	9,97	9,75	2%	10,03	-1%	10,32	-3%	6%
4.	9,73	9,53	2%	9,83	-1%	10,13	-4%	6%
5.	9,74	9,58	2%	9,81	-1%	10,04	-3%	5%

2.2 Långtidsmätningar vid konstant maxtemperaturbelastning

Långtidsmätningar på ett hybridisolerat rör ha gjorts i laboratorium vilket presenteras i Berge och Adl-Zarrabi (2016). 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. Mätupställningen visas i Figur 9 där mätpunkterna *COP* (Center Of Panel) visar temperaturen på mitten av panelens baksida och *Seal* visar temperaturen i sömmen som bildas när lågdiffusionshöljet försluts. Resultaten från mätningarna visas i Figur 10.



Figur 9: Mätupställning för långtidsmätningar.

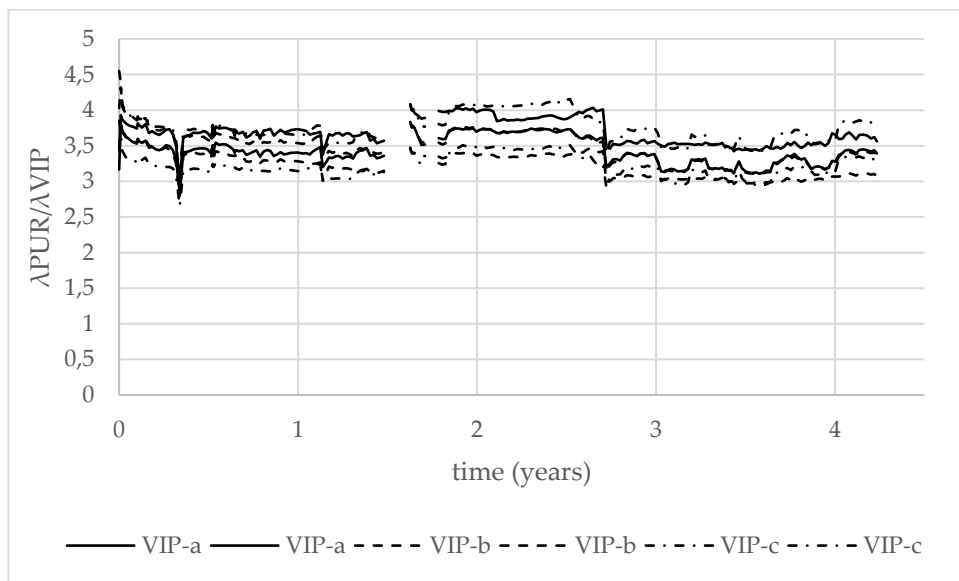


Figur 10: Långtidsmätningar i laboratorium.

Prestandan i vakuumisoleringspanelen har beräknats som kvoten mellan polyuretanskummets värmekonduktivitet och vakuumisoleringspanelens värmekonduktivitet enligt Ekvation (5):

$$\frac{\lambda_{PUR}}{\lambda_{VIP}} = \frac{\Delta T_{VIP}}{\Delta T_{PUR}} \cdot \frac{\ln(\Delta r_{PUR}/r_{0,PUR} + 1)}{\ln(\Delta r_{VIP}/r_{0,VIP} + 1)} \quad (5)$$

Resultaten visas i Figur 11. Efter 4 år är förändringen i värmekonduktiviteten marginell. Konduktiviteten är runt mellan 3 och 4 gånger den hos polyuretanet. Medeltemperaturen i vakuumpanelen är då runt 85°C jämfört med 40°C i polyuretanet. Man kan även se att kvoten beror på randtemperaturerna, något som försvårar noggrannare analys av vakuumpanelens faktiska värmekonduktivitet. Små variationer och inhomogeniteter som lokalt påverkar temperaturen kommer in i Ekvation (5) genom att öka täljaren och minska nämnaren, eller tvärtom. Då effekten går in på båda sidor i divisionen kommer den att blåsas upp. Det betyder att det är en stor osäkerhet kring det exakta relativa värdet på värmekonduktiviteterna men kontinuiteten i mätningarna visar dock att panelerna fortfarande är hela.



Figur 11: Värmeledningskoefficientkvot, $\lambda_{PUR}/\lambda_{VIP}$, för långtidsmätningar.

3 Fältmätningar

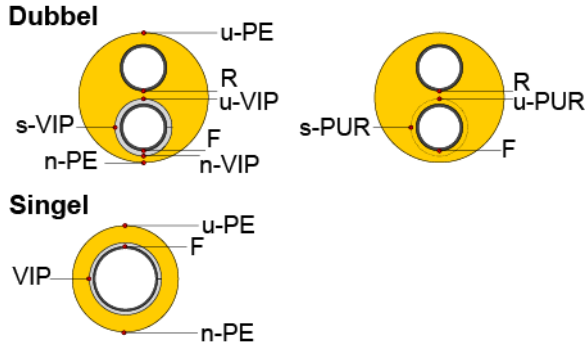
I dagsläget finns fem stycken fältstationer där det görs kontinuerliga mätningar på hybridisolerade fjärrvärmerör. Två mätstationer är placerade i Varberg, två mätstationer i Göteborg och en mätstation i Linköping, listade i Tabell 3.

Tabell 3: 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

För mätstation 3 har mätutrustningen krånglat under början av mätningarna vilket medfört att Resultaten inte hunnit bli så omfattande så att de kan analyseras. Mätningarna från 4 och 5 är så nyligen installerade så att de har för lite data för en avancerad analys. Resultaten från 4 och 5 kan dock ge indikationer på om teknologin fungerar. (Berge et al., 2015)

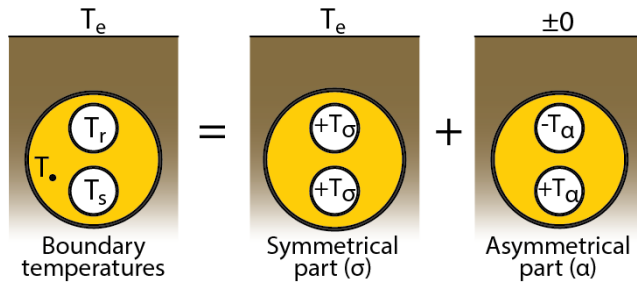
Den termiska prestandan är mätt med termoelement placerade på olika positioner i rörgeometrin. Termoelementens placering är namngiven i enlighet med **Fel! Hittar inte referensskälla..** Benämningen VIP beskriver termoelement placerade på baksidan av vakuumisoleringspanelerna och benämningen PUR beskriver 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 12: Termoelementplacering för fältmättningsrör.

3.1 Metod för analys av vakuumpaneler i dubbelrör

En metod för att analysera temperaturmätningar från dubbelrör har utvecklats och presenteras i detalj i Berge et al. (2016). Temperaturfältet runt ett dubbelrör kan, under antagandet om konstant värmekonduktivitet i hela systemet, beskrivas utifrån två stycken fall: ett symmetriskt och ett asymmetriskt som presenterade i Figur 13. I temperaturfältet kan varje temperatur i en punkt (x,y) beskrivas utifrån en konstant multiplicerad med vardera av gränstemperaturerna T_σ och T_α som i Ekvation (6).



Figur 13: Beskrivning av randvillkor fjärrvärmerör i mark uppdelat i två delfall: ett symmetriskt och ett asymmetriskt.

$$T(x, y) = A(x, y) \cdot T_\sigma + B(x, y) \cdot T_\alpha + T_e \quad (6)$$

där

$$T_\alpha = \frac{T_s - T_r}{2}, \quad (7)$$

$$T_\sigma = \frac{T_s + T_r}{2} - T_e, \quad (8)$$

T_s , T_r och T_e är respektive framledningstemperatur, returledningstemperatur och lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$), T_σ och T_α är respektive temperatur från det symmetriska och de asymmetriska fallet ($^{\circ}\text{C}$), A och B är konstanter som binder temperaturen i punkten (x,y) med de två fallen (-).

Ekvation (6) kan skrivas som linjens ekvation som i Ekvation (9) för att med linjärregression få fram konstanterna A och B .

$$T \frac{T - T_e}{T_\alpha} = A \cdot \frac{T_\sigma}{T_\alpha} + B \quad (9)$$

Ekvationen är baserad på antagandet att systemet inte förändras med tiden. Det medför att en förändring i tiden kan upptäckas genom att jämföra beräkningar enligt Ekvation (6) med indata som användes för att ta fram A och B. Skillnaden mellan beräkning och mätning kommer då att svara mot felet i antagandet om oföränderlighet i tiden. Resultaten har presenterats som en avvikelse (deviation) mellan beräknat och mätt värde.

För att få fram tolkningsunderlag har avvikelsen från mätningar sedan jämförts med motsvarande beräkningar för simuleringar i mjukvaran COMSOL Multiphysics (2015). Fem olika fall har simulerats över 3 år, presenterade i Tabell 4.

Tabell 4: Simuleringsfall för analys av fältmätningar.

Fall	$t < 1$ år	$t \geq 1$ år	Kommentar
A	$\lambda_{VIP} = \lambda_{VIP,0}$		Referensfall
B	$\lambda_{VIP} = \lambda_{VIP,0}$	$\lambda_{VIP} = 3 \cdot \lambda_{VIP,0}$	Snabb kollaps av VIP efter 1 år
C	$\lambda_{VIP} = \lambda_{VIP,0}$	$\lambda_{VIP} = t \cdot \lambda_{VIP,0}$	Långsam kollaps av VIP efter 1 år
D	$\lambda_{VIP} = (1 + 0.033 \cdot t) \cdot \lambda_{VIP,0}$		Långsam diffusion 10% ökning över 3 år
E	$\lambda_{VIP} = \lambda_{VIP,0}$		Sjunkande returtemperatur $T_{eE} = (1 - 0.1 \cdot t) \cdot T_e$

3.2 Resultat från fältmätstationsstationer

Då mätningarna från de olika mätstationerna pågått olika länge varierar resultaten i omfattning. Då vi försöker uppskatta långsamma processer behövs data samlade över lång tid för att se någon förändring i vakuumisoleringspanelerna. Över tid har vi utvecklat våra mätstationer och försökt gå ifrån dubbelrör (fältmätstationsstation 1-3) till de mer lättanalyserade enkelrören (fältmätstationsstation 4-5).

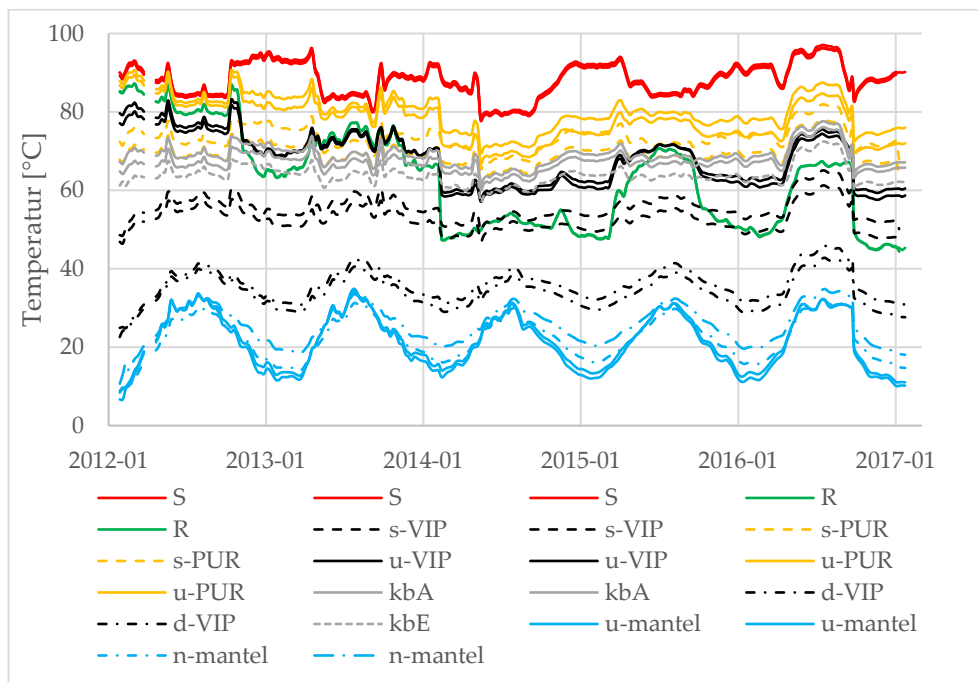
Samtidigt med utvecklingen av mätstationerna har även vakuumisoleringspanelerna utvecklats. Till en början genom tester av nya typer till våra senaste mätningar (fältmätstationsstation 5) där vi använder en panel framtagen för fjärrvärmerörstemperaturer.

Enkelrören har dock bara varit i fält en kortare tidsperiod varför det ändå är av intresse med en djupare analys av våra tidigare dubbelrörmätningar. Det gör det också intressant att fortsätta de tidiga mätningarna.

3.2.1 1-Susvindsvägen

Mätstationen 1-Susvindsvägen har upprättats i samarbete med Varberg Energi på ett industriområde i Varberg och är ansluten till deras fjärrvärmenät. Mätningarna startades i januari 2012 på ett rör med dimensionerna DN 2*80/250 med 10 mm VIP runt framledningsröret.

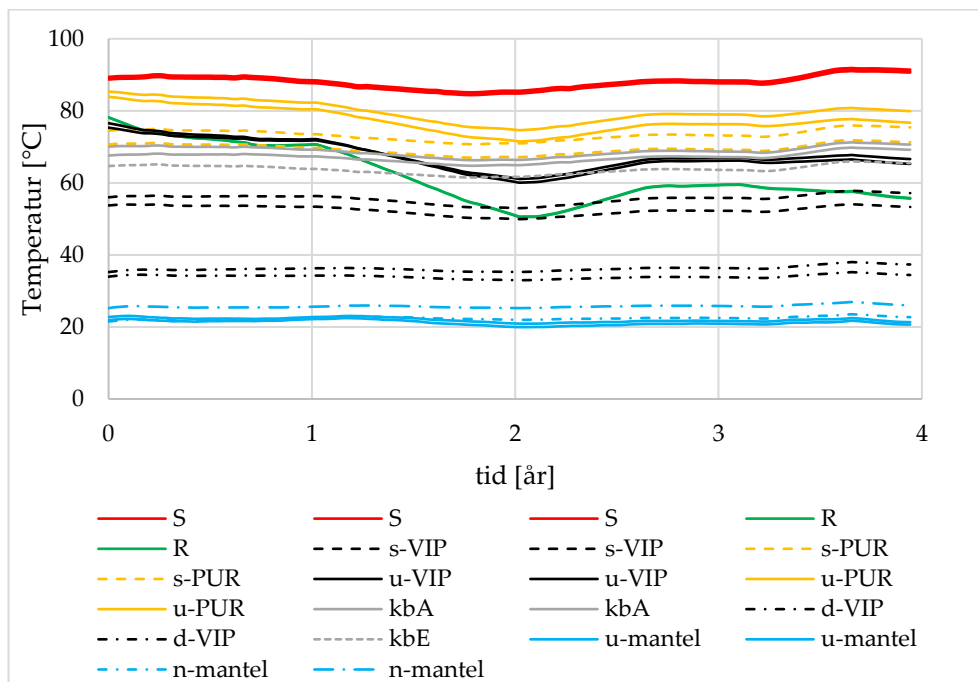
Mätresultaten visas i Figur 14 med veckomedelvärden. Här kan man se temperaturernas variation över året. Manteltemperaturen varierar mycket periodiskt över säsongerna. Man kan även se en viss säsongperiodicitet i framledningstemperatur och returtemperatur. Man kan också se att veckomedelvärdet aldrig överstiger 100°C utan varierar runt 90°C vilket betyder att det är relativt låg temperatur i nätet.



Figur 14: Fältmätstationsstation 1-Susvindsvägen, veckomedelvärden.

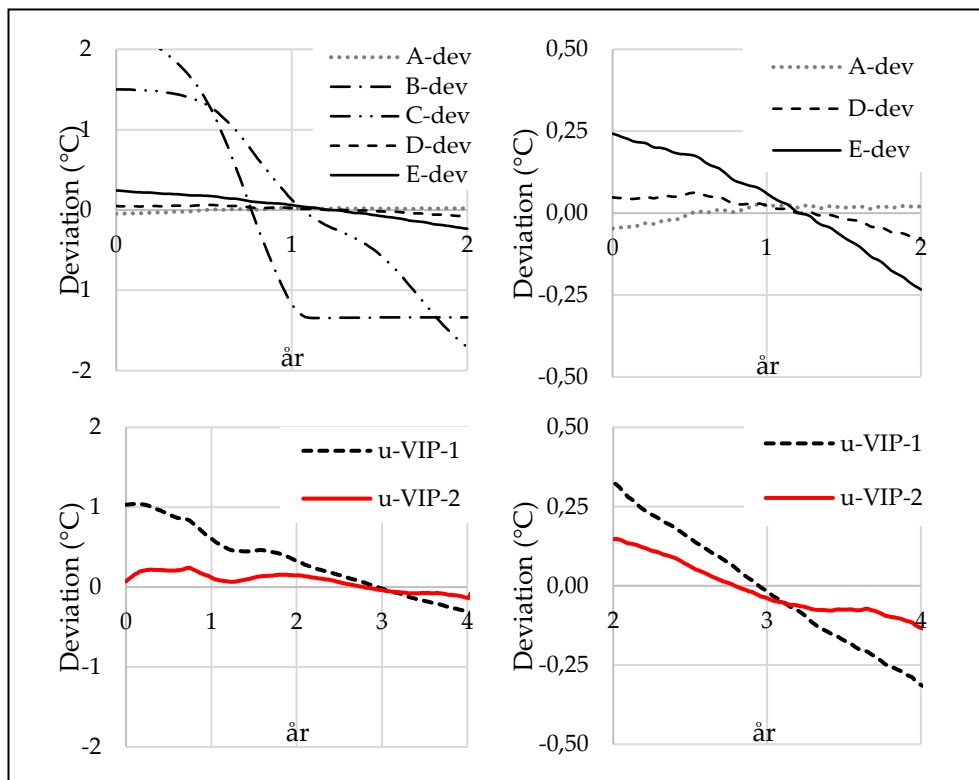
För en första analys avförändringen i vakuumpanelernas värmekonduktivitet visas även mätresultaten som ett rörligt årsmedelvärde i Figur 15. Här kan man se att framledningstemperatur och manteltemperatur planas ut medan returvattentemperaturen tydligt sjunker med tiden. Det skulle kunna bero på att fler hus har anslutits till ledningen över tiden. I början är energiuttaget väldigt litet.

Figur 15 visar även att temperaturerna u-VIP och s-VIP ligger betydligt lägre än motsvarande referenstemperaturer u-PUR och s-PUR. Det ger en första indikation på att panelerna ger en högre prestanda för fjärrvärmerören jämfört med polyuretanskums rör utan VIP med samma dimensioner. När returtemperaturen planar ut kan man också se att temperaturerna u-VIP, s-VIP och d-VIP inte ser ut att stiga vilket skulle indikera en försämring av värmekonduktiviteten.



Figur 15: Fältmätningstation 1-Susvindsvägen, rörliga årsmedelvärden.

Figur 16 visar resultaten analyserade enligt metoden presenterad i Kapitel 3.1. De övre figurerna visa analysen av de 5 simuleringsfallen och de nedre figurerna visa analys av mätningarna. För mätningarna har data från de två sista åren använts för att beräkna konstanterna A och B då returvattentemperaturen har stabiliserats något. De två högre figurerna visar på resultaten skalade så att man ser de två sista åren för mätningarna så att tidsperioden är den samma. u-VIP-2 verkar ha en liknande förändring som för simuleringsfall D med en långsam diffusion som förändrar värmekonduktiviteten på VIPen. För u-VIP-1 är förändringen något snabbare men långt ifrån den effekt som ses vid en kollaps av panelen i fall B eller C. Effekten från en sjunkande returvattentemperatur verkar dock vara större än effekten av en långsam diffusion vilket gör resultaten osäkra.



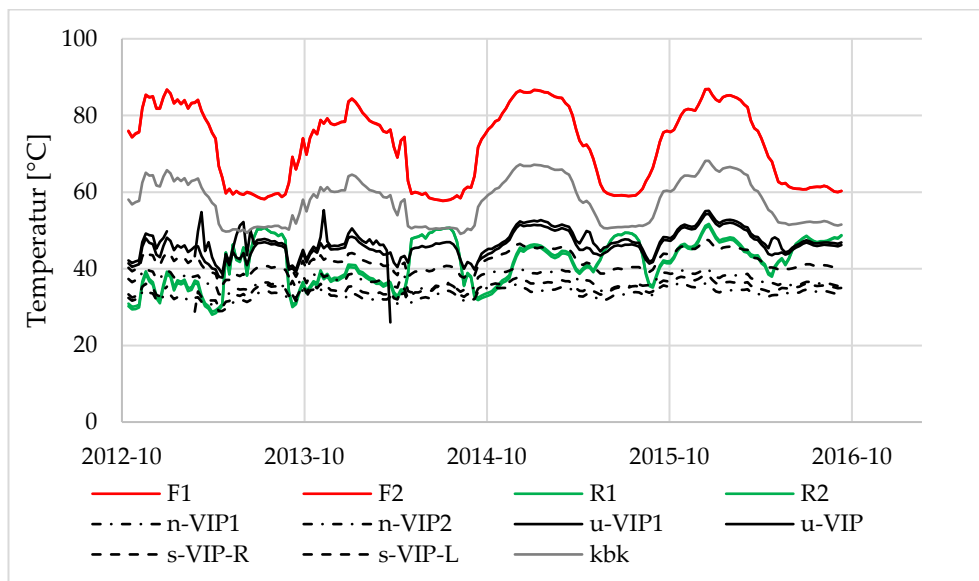
Figur 16: Fältmätstationsstation 1-Susvindsvägen, analys av förändring över tid för vakuumisoleringspanelerna.

3.2.2 2-Brunnsberg

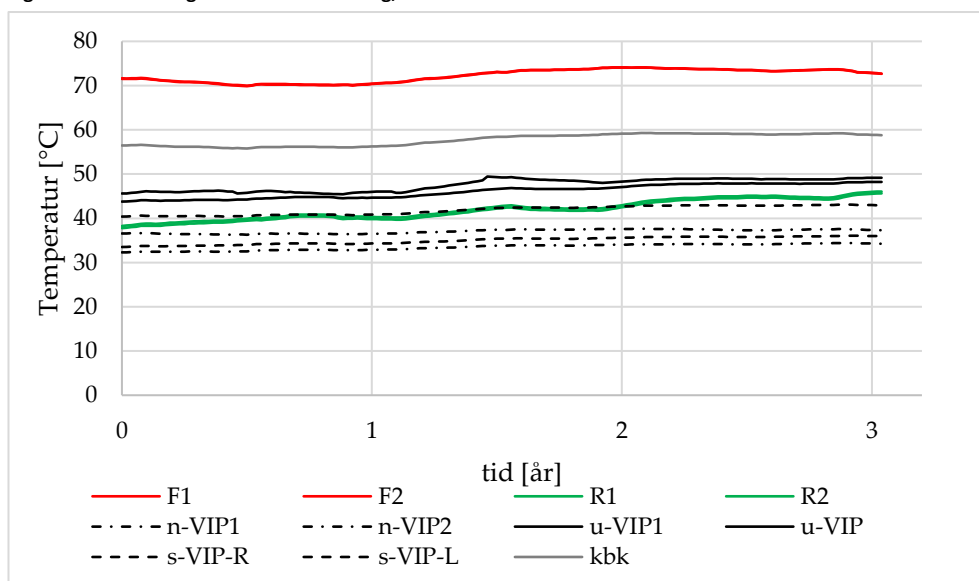
Mätstationen 2-Brunnsberg har upprättats i samarbete med Varberg Energi i ett bostadsområde i Varberg och är ansluten till deras fjärrvärmenät. Mätningarna startades i oktober 2012 på ett rör med dimensionerna DN 2*25/140 med 10 mm VIP runt framledningsröret.

Figur 17 visar veckomedelvärden med väldigt jämn variation på framledningstemperaturen till skillnad från mätstation 1-Susvindsvägen som är uppkopplad på samma fjärrvärmenät. Här är temperaturerna ännu lägre med en variation runt 70°C. Returvattnet visar också på säsongsvariationer där skillnaden mellan framledning och retur kan förväntas följa variationerna i temperatur.

I Figur 18 visas rörligt årsmedel för 2-Brunnsberg. Det kan ses att samtliga temperaturer ökat över åren. Mätstationen innehåller tyvärr inga referensmätningar men temperaturen i u-VIP, som är placerad mellan framledningsrör och returrör, ligger väldigt nära returledningens temperatur. Värmemotståndet mot framledningsröret är därmed betydligt större trots att mätpunkten ligger nästan precis mellan de två rören.



Figur 17: Fältmätstationsstation 2-Brunnsberg, veckomedelvärden.



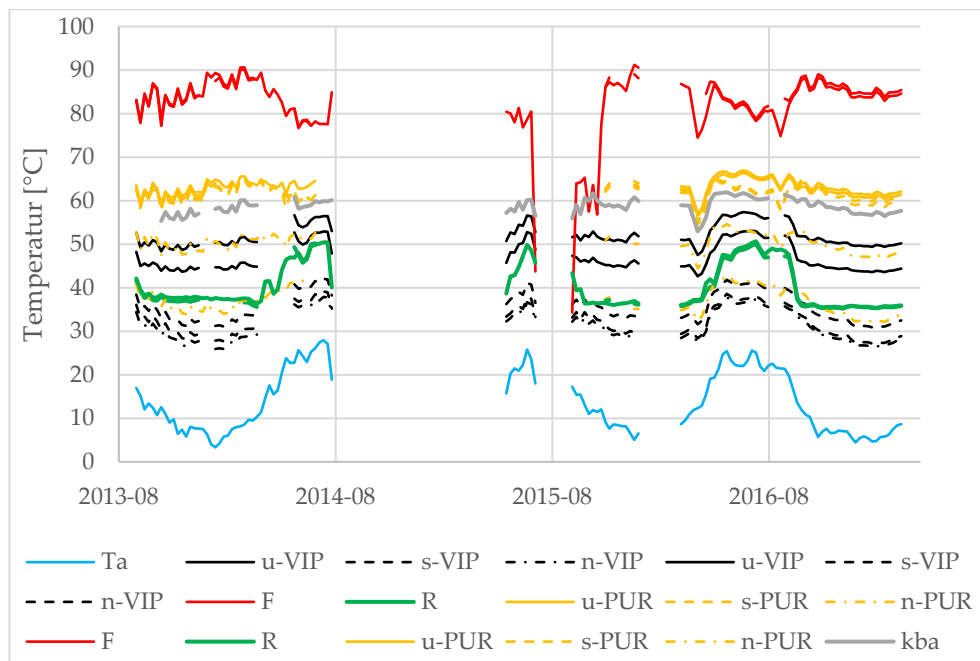
Figur 18: Fältmätstationsstation 2-Brunnsberg, rörligt årsmedel.

3.2.3 Mätstation 3-Torslanda

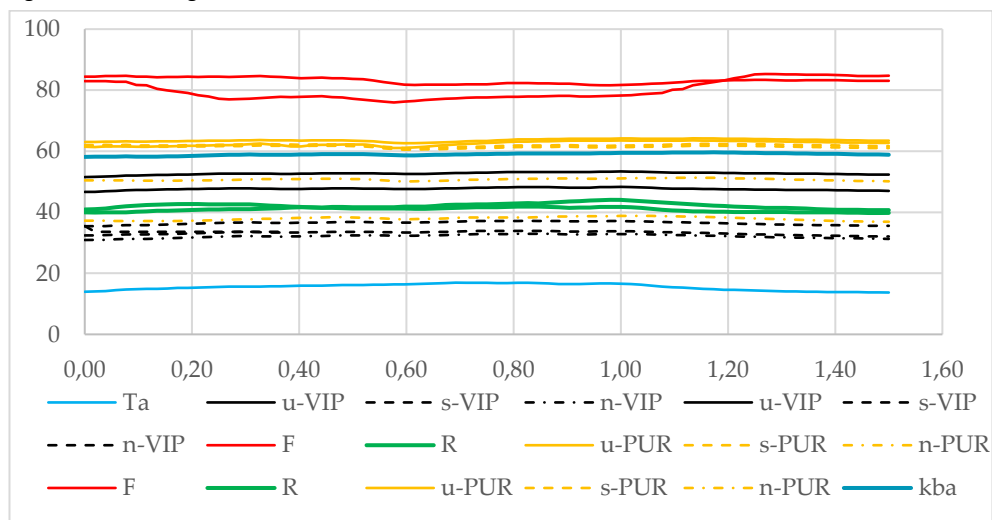
Mätstationen 3-Torslanda har upprättats i samarbete med Göteborg Energi och är ansluten till deras fjärrvärmenät. Mätningarna startades i augusti 2013 på ett rör med dimensionerna DN 2*40/160 med 8 mm VIP runt framledningsröret. På grund av problem med utrustningen saknas mätningar ungefär ett år mellan 2014 och 2015. Det har gjort det svårt att genomföra en noggrannare analys som för föregående mätningar.

Mätningarna presenteras i Figur 19 där man kan se indikationer på periodicitet i både framledning retur och marktemperatur. Materialet innehåller dock en hel del luckor. Det syns även en markerad sänkning i framledningstemperaturen kring en lucka vilken troligtvis inte svarar mot den faktiska framledningstemperaturen.

I Figur 20 visas ett rörligt årsmedel vilket i viss mån kommer påverkas av luckorna i mätningarna. Det kan ses att den dramatiska sänkningen i ena framledningstemperaturmätningen ger en långvarig sänkning av motsvarande rörligt årsmedel. I övrigt förändras medeltemperaturen väldigt lite över den period som kunnat analyseras. Det ser lovande ut för vakuumpanelernas prestanda och med ytterligare något år med kontinuerliga mätningar kommer en mer avancerad analys kunna göras.



Figur 19: Fältmätningsstation 3-Torslanda, veckomedelvärden.



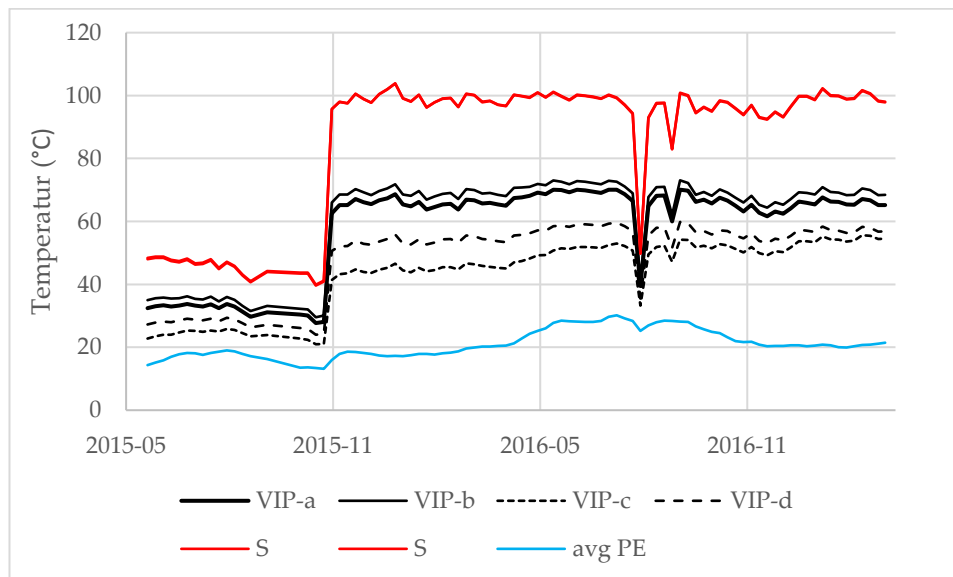
Figur 20: Fältmätningsstation 3-Torslanda, rörligt årsmedel.

3.2.4 4-HissingsBacka

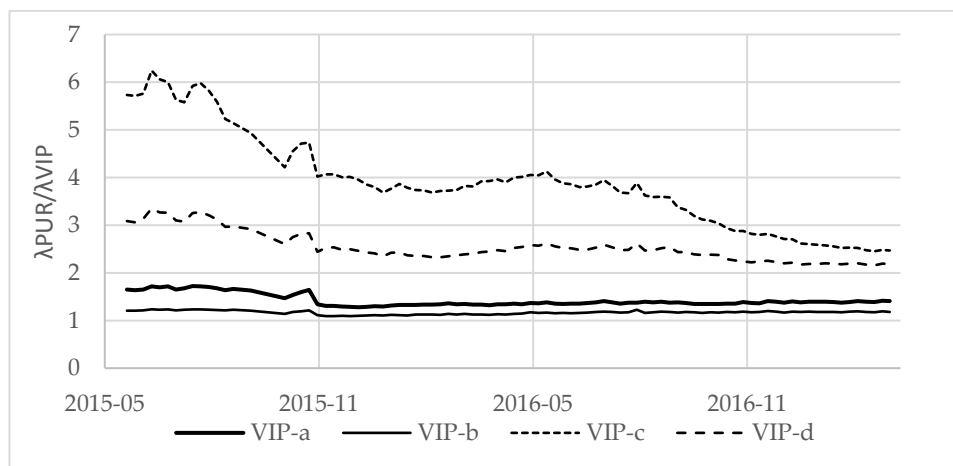
Mätstationen 4-HissingsBacka har upprättats i samarbete med Göteborg Energi och är ansluten till deras fjärrvärmenät. Mätningarna startades i juni 2015 på ett rör med dimensionerna DN 150/280 med 15 mm VIP. Resultaten redovisas i Figur 21 som veckomedelvärden. Under de sex första månaderna var en ventil stängd vilket

föranledde mindre flöden och därmed en låg temperatur i vattnet. Efter att det åtgärdas kan man se en nära konstant vattentemperatur runt 100°C. man kan redan här se att det är stor spridning på temperaturerna på vakuumpanelernas baksidor vilket indikerar att ett antal paneler troligtvis varit trasiga från början.

Fältmätningarna på singelrör kan analyseras med samma metod som för laboriemätningarna enligt Ekvation (5) presenterad i Kapitel 2.2. Det ger ett relativt beskrivning av kvoten mellan polyuretanskummet och vakuumisoleringspanelernas värmekonduktivitet. Resultatet från beräkningarna presenteras i Figur 22. Figuren visar att det finns en stark koppling till temperaturerna i systemet på grund av varierande medeltemperatur i de olika värmeisoleringslagren men det finns också en tydlig indikation på att de sista hela vakuumisoleringspanelerna försämrats i en oroväckande hög hastighet. Panelerna VIP-a och VIP-b, vilka antogs trasiga från start visar ett väldigt konstant mönster med ett enskilt hopp då temperaturen i systemet ändrades drastiskt.



Figur 21: Fältmätningstation 4-HissingsBacka, veckomedelvärden.



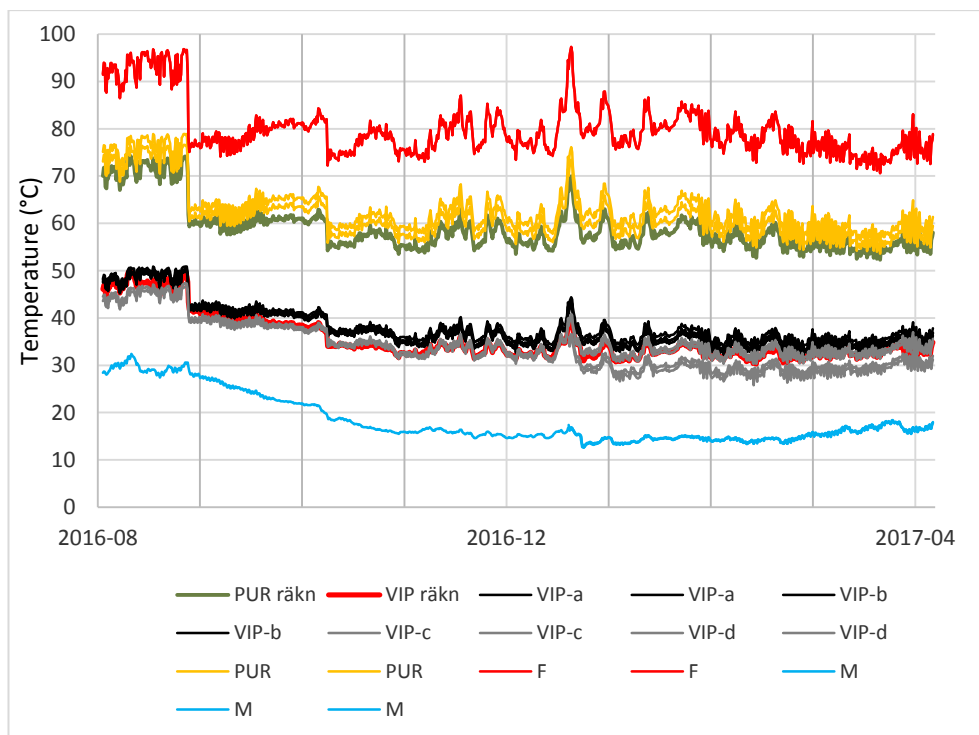
Figur 22: Kvot mellan värmekonduktiviteten för polyuretanskummet och vakuumisoleringen för 4-Torslanda.

3.2.5 5-Glyttinge

Mätstationen 5-Glyttinge har upprättats i samarbete med Tekniska Verken och är ansluten till deras fjärrvärmenät i ett skogsområde i Linköping. Mätningarna startades i augusti 2016 på ett rör med dimensionerna DN 50/140 med 10 mm VIP. Två vardera av två olika typer av paneler monterades på röret. Panelerna VIP-a och VIP-b har en aluminiumfolie i höljet (som rör 4 i Figur 5 i Kapitel 2.1) medan VIP-c och VIP-d har metalliserade plastfolier (som rör 5 i Figur 5 i Kapitel 2.1). Dessa paneler är av en ny typ utvecklade för att kunna utsättas för högre temperaturer.

Resultaten från 5-Glyttinge presenteras i Figur 23 och mätningarna har pågått i 8 månader. Det är fortfarande tidigt i mätningen men resultaten ser redan väldigt lovande ut. Rören är dock kopplade till en utomhusbadanläggning och därmed har temperaturen i varmvattnet varit låg under vintern men ökar förhoppningsvis till sommaren.

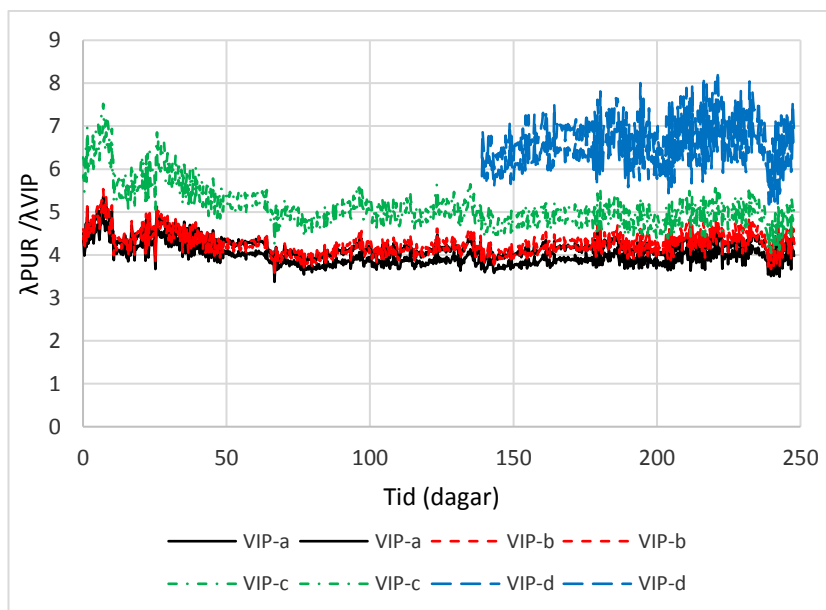
Kurvorna följer väldigt fint beräknade värden på temperaturen på vakuumpanelerna och i referenspositioner som visas av *PUR räkn* och *VIP räkn* i Figur 23. En av loggarna gick inte igång vid första mätningen och därför finns vissa resultat bara för de sista tre månaderna.



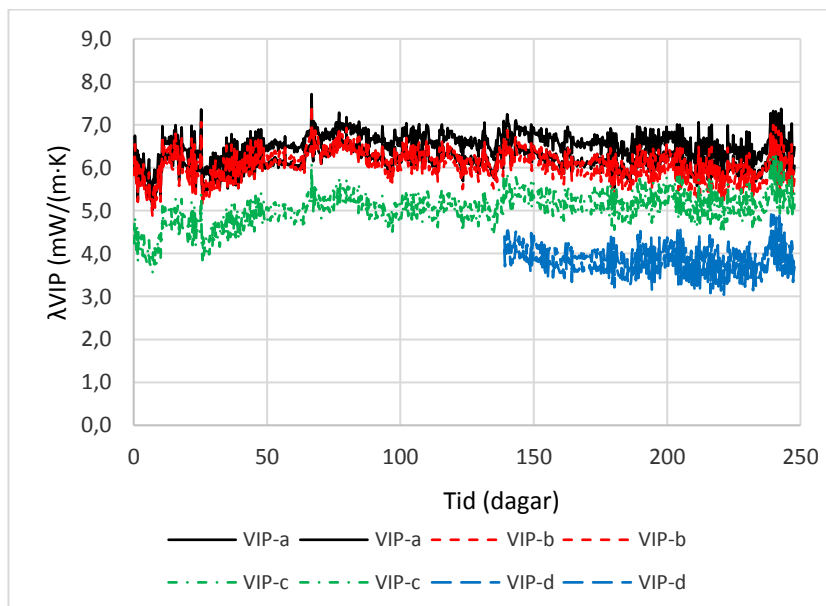
Figur 23: Fältmätstationsstation 5-Glyttinge, mätning var 6:e timme.

I Figur 24 visas kvoten mellan värmekonduktiviteten för polyuretanet och vakuumisoleringspanelen. Man kan åter se att värdet varierar starkt mellan olika paneler. Samtidigt är resultatet betydligt mer konsekvent mellan de två mätpunkterna på vardera panel vilket indikerar att det är en faktisk skillnad som mäts. Resultaten indikerar också att panelerna med metalliserad plastfolie har betydligt bättre värden vilket stämmer överens med mätresultaten från Guarded Hot Pipe i Kapitel 2.1.

Med ett antaget värde på polyuretanskumets värmekonduktivitet på $28 + 0.1 \cdot (T - 50^\circ\text{C}) \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (baserat på mätningar på handgjort skum) kan konduktiviteten på vakuumisoleringen beräknas. Resultatet visas i Figur 25. Resultaten indikerar ett extremt bra värde i mitten av panelen. Beräkningarna utgår dock bara från temperaturen i en punkt och tar således inte hänsyn till de köldbryggeeffekter som uppstår genom panelenshölje.



Figur 24: Kvot mellan värmekonduktiviteten för polyuretanskummet och vakuumisoleringen för 5-Glyttinge.

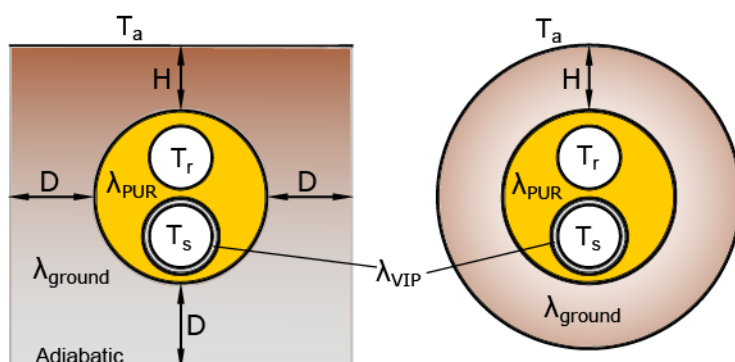


Figur 25: Värmekonduktivitet på vakuumisoleringspanelerna

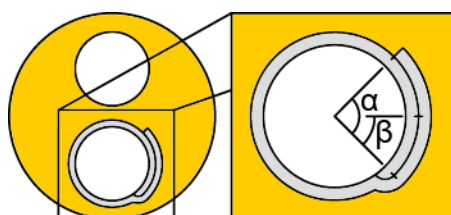
4 Simuleringar

För att skatta inverkan av olika designval, såsom storlek och placering av överlapp eller vakuumisoleringspanelens tjocklek, har simuleringar gjorts. Simuleringarna har gjorts

med Finita Element Metoden i mjukvaran COMSOL Multiphysics. För att titta på inverkan av överlapp och VIP tjocklek modellerades ett tvådimensionellt tvärsnitt av ett vakuumisoleringsrör enligt figurXXX. För att utvärdera VIP tjocklek användes en rektangulär domän med adiabatiska ränder på avstånd D från rörets ytterdiameter. För överlappsberäkningar visade det sig smidigare att använda en cirkulär domän med det förenklade antagandet om nergrävningsdjupet till en utomhustempererad rand. Överlappet beskrivs genom två vinklar enligt figurxxx där α beskriver överlappets längd och β beskriver överlappets start relativt till en x-axel med origo i framledningsrörets center.



Figur 26: Beskrivning av simuleringsmodellen och dess indata.



Figur 27: Definition av överlappets startvinkel, β och dess längdvinkel, α .

Tre olika dimensioner har analyserats DN 25, DN 80 och DN 150, samtliga med mantelrörsdiameter från serie 1 och serie 3 i enlighet med SS-ENXXXX. Två olika antaganden har använts för värmekonduktiviteten i höljet: $\lambda_{20}=20 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ vilket ungefärligt svarar mot ett 0.1 mm tjock aluminiumfoliehölje och $\lambda_{05}=0.5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ vilket svarar mot ett 0.1 mm tjockt hölje av metalliserade plastfolier. Om inget annat anges användes den indata som visas i Tabell 5. Simuleringsresultaten har konsekvent jämförts med polyuretanskumsfyllda rör med samma dimensioner enligt ekvation (10):

$$p_q = \frac{q_{VIP}}{q_{PUR}} - 1 \quad (10)$$

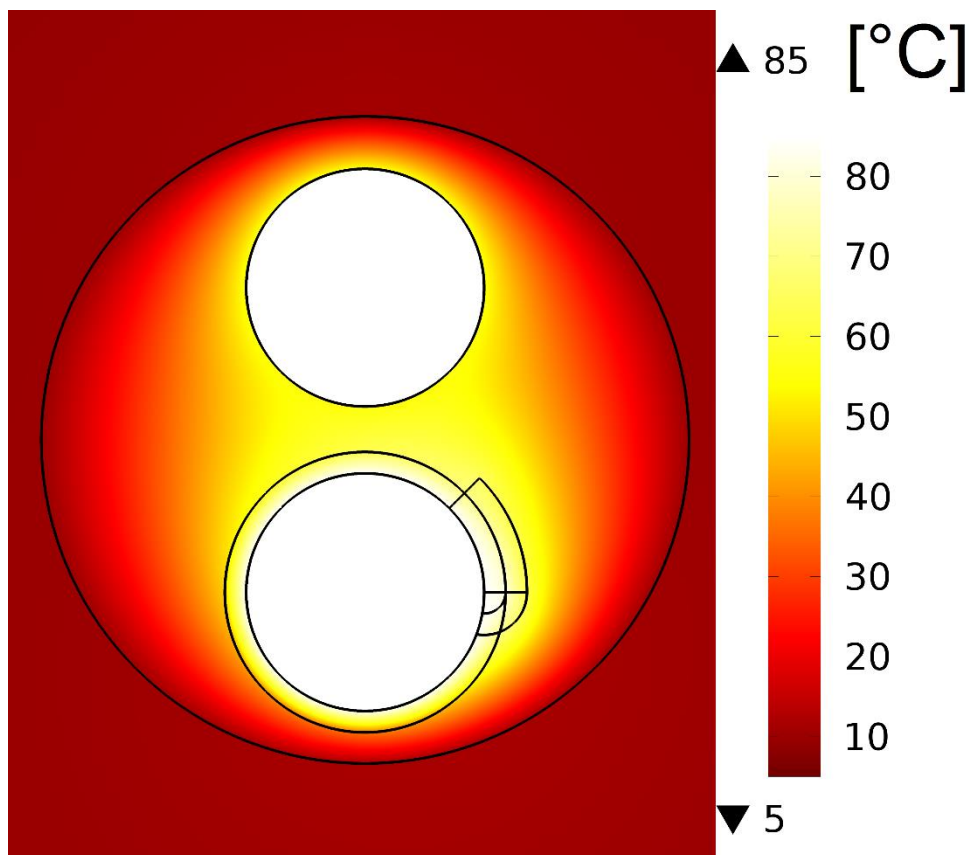
där p_q är den relativa förtjänsten av vakuumisoleringspanelen (%), q_{VIP} är värmeförlusten från simuleringsfallet med vakuumisoleringspanel (W/m) och q_{PUR} är värmeförlusten från en referenssimulering utan vakuumisoleringspanel (W/m).

Tabell 5: Standardindata.

Markytans temperatur, T_a	5°C
Framledningstemperatur, T_s	85°C
Returtemperatur, T_r	55°C
Täckningsdjup, H	0.8 m
VIP-tjocklek, t_{VIP}	8 mm

Stålrörsdiameter	DN 80
Isoleringsserie	S1
Mantelrörsdiameter	250 mm
Höljets värmekonduktivitet	λ_{20}
Längdvinkel överlapp, α	45°
Startvinkel överlapp, β	0°
Domäntyp	Rektangulär

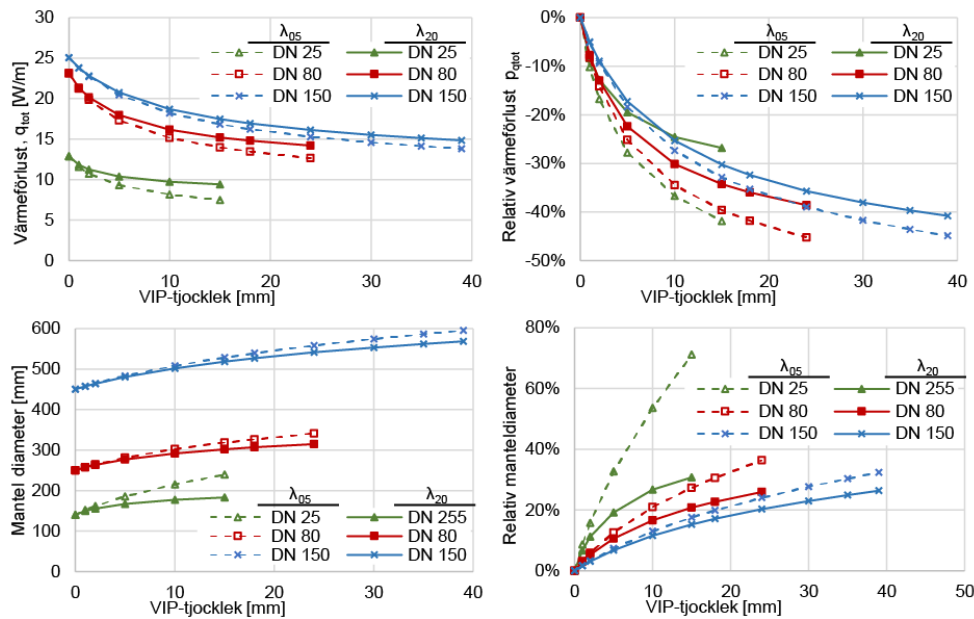
Figur 28 visar resultatet från en simulering med standardindatan från Tabell 5. Man kan se hur temperaturen når längre ut genom köldbryggan i överlappet.



Figur 28: Bild av simuleringsresultat.

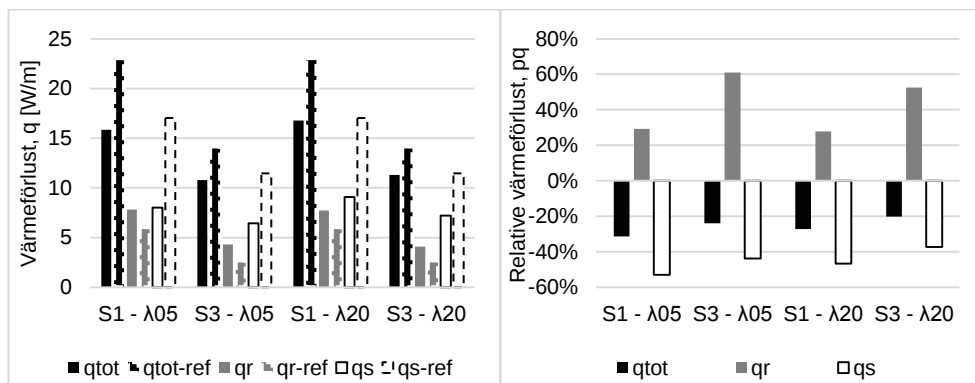
4.1 VIP-tjocklek

Resultaten från analysen av VIP-tjockleken visas i de fyra graferna i Figur 29. De vänstra graferna visar absoluta värden medan de högra figurerna visar relativa värden jämfört med ett rör med bara polyuretanskummsisolering, baserat på Ekvation (10). De övre graferna visar inverkan av VIP-tjockleken på värmeförlusterna. Istället för att använda VIP skulle man kunna öka diametern på mantelröret och tillföra mer polyuretanskummsisolering istället. De nedre graferna visar hur mycket mantelrörets diameter skulle behöva ökas för att ge samma isolerande effekt som vakuumisoleringspanelen.



Figur 29: Inverkan av olika VIP-tjocklekar.

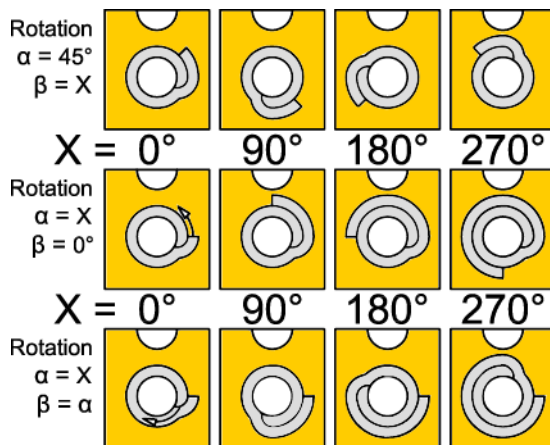
Som väntat har de första millimetrarna VIP störst inverkan på värmeförlusterna och efter ungefär 10 mm börjar effekten plana ut. För rör i serie 1 som här kan man förvänta sig en förminskning av totalförlusterna med 25%-35% när 10 mm VIP monteras kring framledningröret. Figur 30 visar hur inverkan av VIP varierar för olika serier. Man kan se att totalförlusten blir lägre i högre serier men den relativa förlusten blir lägre då rör i en högre serie redan från början har en bättre värmeprestanda. Resultaten i Figur 30 för DN 80-S3 kan även jämföras med mätningarna på dubbelrör i Kapitel 2.1 där den relativa förbättringen av vakuumpanelen blev runt 20%. Av samma storleksordning som i simuleringarna.



Figur 30: Värmeförlust från DN80 med 8 mm VIP för serie 1 & 3 och olika värmekonduktivitet på höljet.

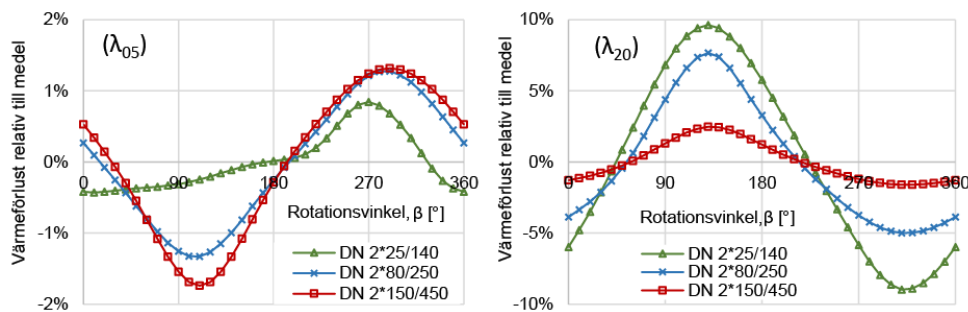
4.2 Överlappsvinklar

Utöver vakuuminiseringspanelernas tjocklek har köldbryggan genom överlappet undersöks för att se inverkan av hur den termiska prestandan påverkas av hur överlappet är placerat. Dels har β varierats för att undersöka inverkan av överlappets riktning och dels har α varierats för att undersöka inverkan av överlappets längd. De olika regimerna för rotationen presenteras i Figur 31.



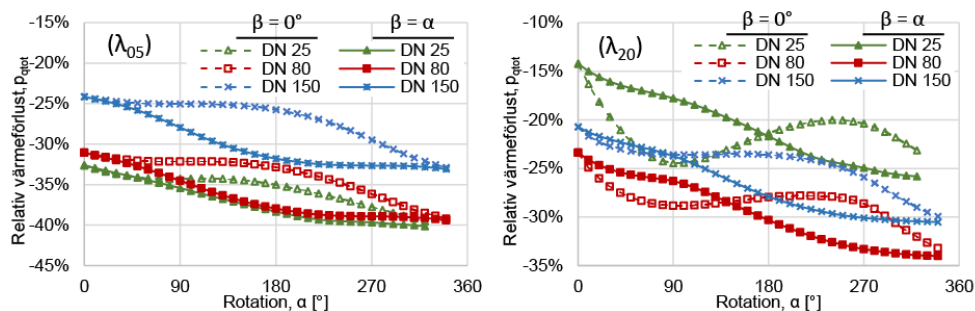
Figur 31: Beskrivning av rotation för de olika rotationsfallen.

Resultaten från rotationen av överlappets position visas i Figur 32. Där man kan se att värmekonduktiviteten i höljet spelar en avgörande roll för resultatet. Skillnaden mellan ett tjockare och ett tunnare hölje blir en spegelvändning av kurvan. För positionen där det tjockare höljet har sitt maximum har det tunnare höljet sitt minimum och vice versa. Det beror på om köldbryggan eller det extra lagret isolering dominerar i överlappet. Om köldbryggan dominerar blir resultaten som värst om köldbryggan pekar nedåt, närmast den kalla omgivningen. Om istället den dubbla isoleringen dominerar blir nedåtpositionen bäst då det blir extra isolering där omgivningen är som kallast. Detta resultat gör det komplicerat att optimera placeringen av panelerna i fjärrvärmerören då det kräver precis kunskap om höljets egenskaper.



Figur 32: Resultat av rotation av β där resultaten jämförs relativt medelvärdet för samtliga vinklar.

Figur 33 visar resultatet om överlappets längd varierar istället. Resultatet visas relativt ett referensrör med bara polyuretanskum. Två olika fall har simulerats där antingen den inre ändan har fästs, $\beta = 0^\circ$, alternativt att yttre ändan har fästs och den inre ändan varierar med ländvinkeln, $\beta = \alpha$. Resultaten indikerar att man bör ha kontroll över överlappets position annars kan ett förlängt överlapp i värsta fall till och med försämra prestandan trots att där är mer isolering. För fallet där $\beta = \alpha$ värkar förändringarna vara större vilket indikerar att positionen på den yttre ändan av överlappet styr inverkan på värmeförlusten.



Figur 33: Resultat av olika överlappslängder, ändring av α .

5 Slutsatser

De samlade resultaten visar att man förvänta sig en förbättring runt 30% när 10 mm VIP används i dubbelrör av serie 1. Förlusten från framledningsröret minskar betydligt mer men det vägs upp av att förlusterna från returröret ökar då detta hamnar i en kallare omgivning. För singelrör hamnar motsvarande siffra runt 50%. Inverkan av VIP blir starkare för mindre dimensioner. I synnerhet om man ser till mängden material som skulle behövas för att få samma resultat av polyuretanskum.

Långtidsmätningarna ger lovande resultat. Där verkar finnas en långsam försämring av vakuumet över tiden som vi kan se för våra äldsta mätstationer men isoleringsförmågan är fortfarande bra. Resultatet från fältmätningarna verkar samstämmiga med resultatet från laboriet där ett hybridisolerat rör varit utsatt för 115°C i över 4 år utan att panelerna har gått sönder.

Detta med undantag för mätstationen 4-HissingsBacka där panelerna verka försämrats snabbt. Där finns också två paneler som verkar ha varit skadade redan vid installationen vilket accentuerar behovet av att hantera panelerna med omsorg under både produktion och utläggning.

En ny fältmätstationsstation, 5-Gyttinge, med en ny generation paneler har just installerats i Linköping och de preliminära resultaten ser väldigt lovande ut. Panelerna uppvisar extremt bra värmekonduktiviteter.

6 Referenser

- Adl-Zarrabi, B., Berge, A., 2013. Hybridisolerade fjärrvärmerör.pdf (No. 2013:23). Fjärrsyn, Stockholm, Sweden.
- Adl-Zarrabi, B., Berge, A., 2012. Högpresterande fjärrvärmerör (No. 2012:16). Fjärrsyn, Stockholm, Sweden.
- Berge, A., Adl-Zarrabi, B., 2016. Long term performance of vacuum insulation panels in hybrid insulation district heating pipes. Presented at the The 15th international symposium on district heating and cooling, Seoul, South Korea.
- Berge, A., Adl-Zarrabi, B., 2014. Evaluation of vacuum insulation panels used in hybrid insulation district heating pipes, in: 14th International Symposium on District Heating and Cooling. Presented at the 14th international symposium on district heating and cooling, Swedish district heating association, Stockholm, Sweden, pp. 454–461.
- Berge, A., Adl-Zarrabi, B., 2012. Using high performance insulation in district heating pipes, in: 13th International Symposium on District Heating and Cooling. Presented at the 13th international symposium on district heating and cooling, District energy development center, Kobenhaven, Denmark, pp. 156–162.

- 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., 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
- Bøhm, B., Kristjansson, H., 2005. Single, twin and triple buried heating pipes: on potential savings in heat losses and costs. *Int. J. Energy Res.* 29, 1301–1312. doi:10.1002/er.1118
- COMSOL, 2015. COMSOL Multiphysics® Modeling Software [WWW Document]. URL <http://www.comsol.com/> (accessed 5.8.15).
- Dalla Rosa, A., Li, H., Svendsen, S., 2011. Method for optimal design of pipes for low-energy district heating, with focus on heat losses. *Energy* 36, 2407–2418. doi:10.1016/j.energy.2011.01.024
- Reidhag, C., Werner, S., 2008. Profitability of sparse district heating. *Appl. Energy* 85, 867–877. doi:10.1016/j.apenergy.2008.01.006
- SS-EN 253, 2009. District heating pipes - Preinsulated bonded pipe systems for directly buried hot water networks - Pipe assembly of steel service pipe, polyurethane thermal insulation and outer casing of polyethylene (Standard No. 253:2009). Swedish standards institute.
- SS-EN 15698-1, 2009. District heating pipes - Preinsulated bonded pipe systems for directly buried hot water networks - Part 1: Twin pipe assembly of steel service pipe, polyurethane thermal insulation and outer casing of polyethylene. (Standard No. 15698-1:2009). Swedish standards institute.
- Statistics Sweden, 2013. El-, gas- och fjärrvärmeförsörjningen 2013. Slutlig statistik (No. SM1401), EN11.
- Zinko, H., Bohm, B., Ottosson, U., Rämä, M., Sipilä, K., 2008. District heating in areas with low heat demand density (No. 8DHC-08-03), Annex VIII. IEA-DHC.