

Energimyndighetens titel på projektet – svenska Resurseffektiva fjärrvärme- och fjärrkylanät - nya material, metoder för statusbedömning och metodik för livslängdsuppskattning	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska Resource-efficient district heating and cooling networks - new materials, methods for status assessment and lifetime prediction	
Universitet/högskola/företag RISE Research Institutes of Sweden	Avdelning/institution Samhällsbyggnad
Adress Box 857, 501 15 Borås	
Namn på projektledare Nazdaneh Yarahmadi	
Namn på ev övriga projektdeltagare Alberto Vega, Anders Höjje, Christian Jonasson, Daniel Cederkrantz, Ignacy Jakubowicz & Jan Henrik Sällström	
Nyckelord: 5-7 st Förtillverkade fjärrvärmeledningar, statusbedömning, livslängdsprediktering, polyuretan, nedbrytning, accelererad åldring, plaströr, PEX, EPS	

Förord

Denna rapport sammanfattar resultat från två parallella projekt som har finansierats av Energimyndigheten, Energiforsk, RISE Research Institutes of Sweden, Cederkrantz Gård & Konsult samt övriga deltagande partners. De tillverkande partnererna har varit BEWI Insulation, Elgocell, Powerpipe Systems och Uponor. De deltagande energiföretagen har varit E. ON Energilösningar, Gävle Energi, Göteborg Energi, Jönköping Energi, Kraftringen, Vattenfall och Öresundskraft.

Energiforsk har finansierat det ena projektet genom programmet Futureheat där Julia Kuylenstierna är programansvarig. En referensgrupp tillsattes av Energiforsk bestående av Magnus Ohlsson, Öresundskraft (sammanhållande); Daniel Byström, Skellefteå Kraft; Josefin Ekman, E.ON Energiinfrastruktur; Shahriar Badiie och Gun Bjurling, Vattenfall; Lennart Kramér, Göteborg Energi; Martin Linder, Tekniska Verken i Linköping; Johan Lundén och Linda Mårtensson, Kraftringen.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	4
Summary	7
1 Inledning	10
2 Bakgrund/kunskapsläget	11
2.1 Tredje generationens FV-ledningar	11
2.2 Fjärde generationens FV-system	13
3 Genomförande	14
3.1 Kemiska analysmetoder av polymera material	16
3.1.1 OIT (Oxidation Induction Time)	16
3.1.2 Infraröd spektroskopi (FTIR).....	17
3.2 Mätmetoder för egenskaper hos tredje generationens FV-ledningar.....	18
3.2.1 Vidhäftning (RISE Pluggmetod)	18
3.2.2 Värmeledning (Portabel mätare).....	19
3.2.3 Syrehalt (Syresensor).....	21
3.3 Mätosäkerhet för skjuvhållfasthet.....	24
3.4 Livslängdsuppskattning av traditionella FV-ledningar.....	24
3.4.1 Krav och kriterier för livslängdsuppskattning	24
3.4.2 Drifttid vid referenstemperatur.....	25
3.4.3 Kemisk analys av PUR-skum	25
3.4.4 Utvärdering av alternativa material/lösningar	26
3.4.5 Mätmetod för termisk konduktivitet hos FV-ledningar.....	26
3.4.6 Beräkning av termisk konduktivitet hos FV-ledningar.....	28
3.5 Ledningar av polymera material för lågtemperatur FV/FK.....	29
3.5.1 Medierör av PEX.	29
3.5.2 Isolering av EPS.....	30
3.5.3 Kryptest av EPS	30
3.5.4 Vattenabsorption hos EPS	32
3.5.5 Termisk konduktivitet hos EPS	32
3.5.6 Termisk konduktivitet hos flexibla FV-ledningar	32
4 Resultat	34
4.1 Förtillverkade traditionella FV-ledningar	34
4.1.1 Skjuvhållfasthetens temperaturberoende	34
4.1.2 Korrelation mellan RISE pluggmetod och axiell metod.....	35
4.1.3 Fältmätningar	36
4.1.4 FTIR analys av prover tagna i fält	40
4.1.5 Isoleringsförmåga hos polyuretanskum	43
4.1.6 Syrehaltsmätningar	49
4.2 Utvärdering av alternativa material för lågtemperatur FV	56
4.2.1 Medierör av PEX	56
4.2.2 Termisk konduktivitet hos flexibla FV-ledningar	63
4.2.3 Beräkningar av tryck och temperatur i kulvert av EPS	64
4.2.4 Kryptest av EPS	66
4.2.5 Uppmätta kryptöjningar hos EPS	68
4.2.6 Vattenabsorption hos EPS	73
4.2.7 Termisk konduktivitet hos EPS	74

4.3	Tekniska krav på alternativa lösningar	75
4.3.1	Medierör av PEX i prefabricerade flexibla FV-ledningar	75
4.3.2	Termisk konduktivitet hos flexibla FV-ledningar	76
4.3.3	Isolering av EPS.....	76
5	Diskussion.....	77
6	Kommersialisering.....	80
7	Internationell samverkan.....	81
7.1	Workshop NR1	81
7.2	Workshop NR2	82
7.3	Projekt inom IEA DHC.....	82
8	Fjärrkyla (FK).....	84
8.1	Vad är FK?.....	84
8.2	Användning av FK ”State of the art”	84
8.3	Distribution av FK	88
8.4	FK hos energibolagen och rörtillverkare	89
	Publikationslista.....	96
	Referenser, källor.....	98
	Bilagor	102

Sammanfattning

Det finns ett starkt intresse av att fortsätta använda det befintliga fjärrvärmenätet (FV-nätet) under en lång tid framöver även om driftsförhållandena förändras. Det krävs då metoder att bedöma status av befintligt FV-nät och förväntad återstående livslängd. För utveckling och utvärdering av isoleringsmaterialet polyuretan (PUR) för framtida FV-ledningar behövs korrekta och realistiska fält- och laboratoriemetoder, som kan används för kvalitetssäkring och livslängdsbedömning. Dessa metoder ska kunna ge tillräckliga och korrekta svar angående nedbrytning på grund av temperatur, syrehalt etc., som direkt påverkar ledningens livslängd.

I och med att fjärde generationens FV-system med lägre driftstemperaturer introduceras öppnar sig möjligheter att använda mer resurssnåla och billigare konstruktionsmaterial. Även för fjärrkyla (FK) kan sådana material tillämpas. Materialen måste vara hållbara, vilket betyder att de måste ha en låg miljöpåverkan och kunna användas under många år utan omfattande underhåll. Det krävs metoder att bedöma livslängd hos ledningar bestående av de alternativa konstruktionsmaterialen.

För traditionella FV-ledningar bestående av ett medierör av stål, isolering av polyuretan (PUR) och skyddande mantel av polyeten (PE) har förändring av prestanda och funktionen med tiden utvärderats genom att studera en kritisk egenskap nämligen vidhäftningsstyrkan (skjuvhållfastheten) mellan isolering och medierör. En laboratoriemetod kallad RISE pluggmetod har vidareutvecklats till en fältmetod inom ramen för projektet för att mäta vidhäftningsstyrka hos ledningar i drift. Fältmetoden kan tillämpas utan att störa driften av ledningen. En återställningsmetod där borttagen isolering ersätts och manteln tätas efter provning har också utvecklats. RISE pluggmetod har kompletterats med en spektroskopisk analys av borttagen isolering i laboratoriet. Genom att jämföra resultaten från mätningar av vidhäftningsstyrkan med den kemiska analysen av PUR kan slutsatser dras om kemisk nedbrytning är orsaken till förlusten av vidhäftningen. Alla de tre delarna: mätning av vidhäftningsstyrkan i kombination med provtagning, kemisk analys av provet och återställning har kallats ”Pipeopsy”.

En beräkningsmetod har tagits fram som räknar om driftstid vid olika temperaturer till en effektiv driftstid vid en vald referenstemperatur. Den effektiva driftstiden beror på historiken av uppmätta driftstemperaturer under olika perioder och installationsår. Med hjälp av denna beräkningsmetod kan statusen hos ledningar som varit i drift olika länge och använts vid olika temperaturer jämföras. Jämförelsen kan användas som ett verktyg för att förstå effekten av driftsförhållanden på livslängden av ledningarna. Detta kan hjälpa energibolagen att uppskatta hur de kan optimera driftsförhållanden och på så sätt påverka livslängden av ledningarna, vilket i sin tur skulle kunna utgöra ett beslutsunderlag för underhållsplaner och olika prioriteringar.

De flesta ledningarna från fältet som har provats i studien har visat sig ha en driftstid på under 30 år vid referenstemperaturen 95 °C. Generellt sett är statusen

hos de undersökta FV-ledningarna gällande vidhäftningsstyrkan tillräckligt bra. Ett generellt krav gällande axiell skjuvhållfasthet på 0,040 MPa, som baseras på den skjuvspänning som faktiskt uppstår i interfacet mellan PUR och medierör, har tagits fram. Ett noggrannare krav kan tas fram för enskilda ledningarna, som baseras på förläggningdjup, friktion mellan mantel och mark samt dimensioner hos ledningen.

Termisk isoleringsförmåga är också en viktig egenskap som ingår i statusbedömningen av FV-ledningar i drift. En metod att mäta termisk konduktivitet hos PUR i laboratoriet och i fält har utvecklats. Metoden är en vidareutveckling av TLS-metoden (Transient Line Source method) för termisk konduktivitetmätning som beskrivs i ASTM D5334 (2014) för mätning av värmeledningsförmåga i jordarter. Mätinstrumentet består av en handhållen enhet till vilken en 100 mm lång, nålformad givare ansluts. Hela nålen trycks ner i provet i samband med mätning. Metoden har utvecklats och adopterats för FV-ledningar och kan användas tillsammans med pluggmetoden då redan gjorda hål kan användas för att trycka in givaren i isoleringen. Att kunna kombinera metoderna betyder att både mekaniska, kemiska och termiska egenskaper kan mätas mer eller mindre samtidigt. Metoden är känslig för effekter av åldring såsom nedbrytning och gasutbyte samt fuktskador i PUR-isoleringen, där samtliga dessa händelser ökar den termiska konduktiviteten och på så vis även reducerar ledningens effektivitet vid värmeöverföring. Resultaten från TLS-metoden är jämförbara med traditionella laboriemetoder, men metoden är mycket enklare och snabbare att använda.

Det är välkänt att syre har en stor betydelse för nedbrytningshastigheten och den termiska isoleringsförmågan hos PUR. Närvaro av syre är avgörande för den termo-oxidativa nedbrytningen av PUR medan gasutbyte mellan syre och koldioxid leder till sämre isoleringsförmåga (högre termisk konduktivitet). Syftet med den tredje metoden som har undersökts i projektet, var att mäta syrediffusion genom manteln och in i isoleringen som funktion av tiden. I metoden användes en fiberoptisk syresensor från tyska PreSen som är 4 mm i diameter och 100 mm lång, och har ett mätområde 0-5 % syre. Syrediffusion mätes hos en ledning där medieröret hölls vid en konstant temperatur av 130 °C och en referensledning som förvarades i rumstemperatur. Uppmätta resultat av syrehalten varierar för de två ledningarna. Några av syresensorena bedöms ha skadats under skumningsprocessen av ledningarna, medan andra har fortsatt att ge tillförlitliga värden. Syrehalterna i den uppvärmda ledningen ökade från ca 0,1 % under de första 3000 timmarna för att sedan stabilisera sig på en konstant nivå på ca 0,3 %.

När det gäller alternativa, resurssnåla konstruktionsmaterial har PEX för medierör, EPS för isolering och hybridisolerade FV-ledningar med vakuumpanel undersökts med avseende på förhållanden som de exponeras för. PEX-dragprovstavar har exponerats för varmt cirkulerande vatten vid olika temperaturer. Medierör av PEX har åldrats under trycket 6 bar och temperaturerna 70, 80 och 90 °C. Kemiska och mekaniska egenskaper som funktion av exponeringstiden har utvärderats. Längre tider för accelererad åldring än vad

projektet medgav hade varit önskvärt, men slutsatsen blev ändå att driftstemperaturer på 90 °C eller mer bör undvikas annat än under korta perioder.

Nya hybridisolerade FV-ledningar har utvecklats med motiveringen att de har betydligt bättre isolerförmåga och kan därför markant minska distributionsförlusterna. Den skenbara konduktiviteten för hybridledningen med vakuumpanel och PEX-skum uppmättes till 0,020 W/(m K) medan panelen hade 0,009 W/(m K). Värdena kan jämföras med kraven för PUR i standarden EN 253 (2019) på 0,029 W/(m K).

Kulvertar av EPS används redan idag vid förläggning av både FK och FV-ledningar. Då dessa utsätts för tryckande mekanisk belastning och förhöjda temperaturer har simuleringar gjorts för att beräkna spänningsnivåer och temperatur nivåer för FV. Kryptöjningar hos jungfrulig och återvunnen EPS studerades vid olika tryckande belastningar. Mätningar av deformationer då ett varmt rör belastar ett EPS-block visar att efter drygt 7000 timmar är deformationen försumbar (mindre än 0,3 mm). Termisk konduktivitet hos EPS på dels konditionerade provkroppar, dels fuktiga provkroppar gav ingen nämnvärd skillnad mellan jungfruligt och återvunnet material men en stor skillnad mellan konditionerade och fuktiga material.

Inom ramen för projektet har omfattande insatser genomförts för kommunikation och internationell samverkan. Syftet var att sprida information om projektet och dess viktigaste resultat. Den internationella samverkan omfattade förutom vetenskapliga artiklar och informella kontakter även två ”workshop” och skapande av ett nytt internationellt samfinansierat projekt Annex Task Shared Project 6 (TS 6): ”Status assessment, ageing, lifetime prediction and asset management of District Heating Pipes” inom ramen för IEA DHC. Målet med TS 6 är att analysera kunskapsläget, fylla i kunskapsluckor och implementera överenskomna metoder för accelererad åldring och bestämning av livslängd.

Summary

There is a strong interest in continuing to use the existing district heating (DH) network for many years to come, even if the operating conditions change. Methods are then required to assess the status of the existing DH networks and their expected remaining lifetime. For the development and evaluation of the insulation material polyurethane (PUR) for future DH pipelines, correct and realistic laboratory methods are needed that can be used for quality assurance and lifetime assessment. These methods must be able to provide sufficient and correct answers regarding degradation due to temperature, oxygen content, etc., which directly affect the life of the pipelines.

With the introduction of fourth-generation DH systems with lower operating temperatures, opportunities are opening to use more resource-efficient and cheaper engineering materials. Such materials can also be used for district cooling (DC). The materials must be durable, which means that they must have a low environmental impact and could be used for many years without extensive maintenance. Methods are required to assess the service life of pipelines consisting of the alternative engineering materials.

For traditional DH pipelines consisting of a service pipe of steel, insulation of PUR and protective casing of polyethylene (PE), the change in performance and function over time has been evaluated by studying a critical property namely the adhesion strength (shear strength) between insulation and service pipe. A laboratory method called the RISE plug method has been further developed into a field method within the framework of the project to measure the adhesion strength of pipelines in operation. The field method can be applied without disturbing the operation. A restoration method where removed insulation is replaced, and the casing sealed after testing has also been developed. The RISE plug method has been supplemented with a spectroscopic analysis of removed insulation in the laboratory. By comparing the results of adhesion strength measurements with the chemical analysis of the PUR, conclusions can be drawn as to whether chemical degradation is the cause of the loss of adhesion. All three parts: measurement of the adhesion strength in combination with sampling, chemical analysis of the sample and restoration have been called "Pipeopsy".

A calculation method has been developed, which recalculates operating time at different temperatures to an effective operating time at a selected reference temperature. The effective operating time depends on the history of measured operating temperatures during different periods and installation year. Using this calculation method, the status of pipelines that have been in operation for different lengths of time and used at different temperatures can be compared. The comparison can be used as a tool to understand the effect of operating conditions on the life of the pipelines. This can help energy companies to estimate how they can optimize operating conditions and thus influence the lifetime of the pipelines, which in turn could form a decision basis for maintenance plans and different priorities.

Most of the pipelines from the field that have been tested in the study, have an operating life of less than 30 years at the reference temperature of 95 °C. In general, the status of the investigated DH pipelines regarding the adhesion strength is sufficiently good. A general axial shear strength requirement of 0.040 MPa, which is based on the shear stress that occurs at the interface between PUR and service pipe, has been established. A more accurate requirement can be calculated for individual pipelines, which is based on the laying depth, friction between the casing and the ground and the dimensions of the pipeline.

Thermal insulation ability is also an important property included in the status assessment of DH pipelines in operation. A method to measure thermal conductivity of PUR in the laboratory and in the field has been developed. The method is a further development of the TLS (Transient Line Source) method for thermal conductivity measurement described in ASTM D5334 (2014) for the measurement of thermal conductivity of soils. The measuring instrument consists of a hand-held unit to which a 100 mm long, needle-shaped probe is connected. The entire needle is pressed into the sample when measuring. The method has been developed and adopted for DH pipelines and can be used together with the plug method, as the made holes can be used to push the sensor into the insulation. Being able to combine the methods means that both mechanical, chemical, and thermal properties can be measured simultaneously. The method is sensitive to ageing effects such as degradation and gas exchange as well as moisture damage in the PUR insulation, where all these events increase the thermal conductivity and thus also reduce the efficiency of the pipeline in heat transfer. The results from the TLS method are comparable to traditional laboratory methods, but the method is much easier and faster to use.

It is well known that oxygen is of great importance to the degradation rate and the thermal insulation ability of PUR. The presence of oxygen is decisive for the thermo-oxidative degradation of PUR, while gas exchange between oxygen and carbon dioxide leads to poorer insulation performance (higher thermal conductivity). The purpose of the third method investigated in the project was to measure oxygen diffusion through the casing and into the insulation as a function of time. In the method, a fibre optic oxygen sensor from German PreSen was used, which is 4 mm in diameter and 100 mm long and has a measurement range of 0-5 % oxygen. Oxygen diffusion is measured in a pipeline where the service pipe was kept at a constant temperature of 130 °C and a reference pipeline that was kept at room temperature. Measured results of the oxygen content vary for the two pipelines. Some of the oxygen sensors are believed to have been damaged during the foaming process of the pipelines, while others have continued to give reliable readings. Oxygen levels in the heated pipeline increased from about 0.1 % during the first 3000 hours and then stabilized at a constant level of about 0.3 %.

In terms of alternative resource-efficient engineering materials, PEX for service pipes, EPS for insulation, and hybrid insulated DH pipelines with vacuum panels have been investigated for conditions they are exposed to. PEX tensile test samples have been exposed to hot circulating water at various temperatures. Service pipes made of PEX have been aged under the pressure of 6 bar and the

temperatures of 70, 80 and 90 °C. Chemical and mechanical properties as a function of exposure time have been evaluated. Longer times for accelerated ageing than the project allowed had been desirable, but the conclusion was still that operating temperatures of 90 °C or more should be avoided except for short periods.

New hybrid-insulated DH pipelines have been developed with the justification that they have significantly better insulating ability and can therefore significantly reduce distribution losses. The apparent conductivity of the hybrid pipeline with vacuum panel and PEX foam was measured to be 0.020 W/(m K) while the panel had 0.009 W/(m K). The values can be compared with the requirements for PUR in the standard EN 253 (2019) of 0.029 W/(m K).

EPS culverts are already used today when laying both DC and DH pipelines. As these are exposed to compressive mechanical load and elevated temperatures, simulations have been made to calculate stress levels and temperature levels for DH. Creep strains of virgin and recycled EPS were studied at different compressive loads. Measurements of deformations when a hot pipe loads an EPS block showed that after just over 7000 hours the deformation is negligible (less than 0.3 mm). Thermal conductivity of EPS on conditioned specimens and moist specimens gave no significant difference between virgin and recycled material but a large difference between conditioned and moist materials.

Within the framework of the project, extensive efforts have been carried out for communication and international cooperation. The purpose was to spread information about the project and its most important results. Besides scientific articles and informal contacts, the international collaboration included two workshops and the creation of a new international co-financed project Annex Task Shared Project 6 (TS 6): "Status assessment, ageing, lifetime prediction and asset management of District Heating Pipes" within the framework of the IEA DHC. The goal of TS 6 is to analyse the state of knowledge, fill in knowledge gaps and implement agreed methods for accelerated ageing and prediction of service life.

1 Inledning

Ett energieffektivt och hållbart fjärrvärme- (FV) och fjärrkylasystem (FK) kan starkt bidra till effektivare användning av råvaror och energi samt ersättning av fossilbaserade resurser med förnybara dito. Ökad energiprestanda hos FV-system är både en utmaning och en möjlighet. Dagens FV-system har utvecklats runt en norm för högtemperaturvärme, ursprungligen baserad på fossila primära energikällor. I dagsläget används högtemperatur FV-system vilka ofta benämns som tredje generationens system. Den tredje generationens FV-ledningar består av en mantel av högdensitetspolyeten (HDPE), ett isolerande skikt av styvt polyuretanskum (PUR) och ett medierör av stål för transport av värmebäraren. En förutsättning för denna design är god vidhäftningen mellan komponenterna, vilket säkerställer både den mekaniska och den termiska prestandan hos rören. Den viktigaste haverimekanismen i denna konstruktion anses vara förlorad vidhäftning mellan isolering och medierör. När vidhäftningsstyrkan förloras, börjar de rörliga stålmedierören nära böjar att utmattas och gå sönder. Vidare kan isoleringen i böjar tryckas sönder av medieröret, vilket kan leda till skador på manteln och dess skarvar. Rörelser och utmattning beror på temperaturväxlingar i FV-systemen vid drift. Som en konsekvens uppstår läckor och när isoleringen kommer i kontakt med det varma vattnet kan långa sträckor förstöras. Det totala återanskaffningsvärdet av FV-ledningar i Sverige uppskattas till mer än 100 miljarder kronor. Det finns därför ett starkt ekonomiskt och miljömässigt intresse av att fortsätta använda det befintliga FV-nätet så länge som möjligt med hänsyn tagen till eventuellt nya driftsförhållanden i framtiden.

Eftersom samhällsnormen styr mot att mildra antropogena klimatförändringar kommer tillgången på en högtemperaturvärmeförsörjning från fossila bränslen att minska inom en nära framtid. Det pågår därför ett arbete med att integrera energi från förnybara källor och spillvärme samtidigt som man strävar efter lägre temperaturer i distributionsnäten. Dessa nya FV-system som är anpassade till värme från lågtempererade värmekällor benämns fjärde generationens system. Vid lägre driftstemperaturer hos FV-system och även i FK-system öppnas möjligheter till användning av alternativa polymera material, som är mer miljövänliga och ekonomiskt fördelaktiga. I projektet undersöktes några av dessa polymera material med avseende på viktiga egenskaper och livslängd och samtidigt utvecklades specialanpassade testmetoder och kravprofiler.

Projektet har haft två huvudinriktningar nämligen forskning för en fortsatt resurs-effektiv användning av tredje generationens FV-system samt forskning kring testmetoder och prestandakrav för fjärde generationens FV-system med fokus på de nya polymerbaserade komponenterna. I ett separat avsnitt fokuseras innehållet på fjärrkyla (FK) där "state-of-the-art" i Sverige och världen har undersökts via litteratursökning och diskussioner med projektpartners om deras arbete och planer inom detta område. Kommersialisering och internationalisering var två andra delar i det här projektet som kopplar projektresultaten till samhällsnytta.

2 Bakgrund/kunskapsläget

2.1 Tredje generationens FV-ledningar

Förtillverkade FV-ledningar, bestående av mantel av polyeten (PE), isolering av polyuretan (PUR) och medierör av stål, bryts ner med tiden med en hastighet som beror på driftsförhållandena och kvaliteten på ledningen. När det gäller förtillverkade FV-ledningar, studeras i första hand försämringar av isoleringen och dess vidhäftning till medieröret.

Korrosion hos medierör, vilket begränsas av att det finns tillsatser i det cirkulerande vattnet, behandlas inte. Försämring av manteln hos ledningarna eller tätheten vid skarvar tas heller inte upp i detta projekt.

De viktigaste nedbrytningsmekanismerna i PUR isoleringen är:

- Termisk nedbrytning: Vid höga temperaturer bryts PUR ned genom kedjebrott. PUR får då försämrade mekaniska egenskaper.
- Termo-oxidativ nedbrytning: Syre diffunderar in i isoleringen och orsakar nedbrytningen av PUR genom oxidation. Nedbrutet PUR färgas brunt och får försämrade mekaniska och termiska egenskaper.
- Mekano-kemisk nedbrytning: Mekanisk belastning i kombination med termo-oxidativ nedbrytning accelererar ofta nedbrytningen av polymera material, på grund av morfologiska förändringar i materialen orsakade av den mekaniska spänningen.
- Diffusion av gaser: Luft (kväve och syre) diffunderar in genom manteln och koldioxid diffunderar ut. Även blåsgasen (cyklopentan) kan långsamt diffundera ut ur isoleringen men den skyddande barriären är själva PUR-isoleringen.

Depolymerisation skulle också kunna inträffa, men detta händer endast vid mycket höga temperaturer, vilket Schuricht & Leuteritz (2010) rapporterade om. Detta sker alltså inte vid normal användning av ledningarna. Jiao m. fl. (2013) undersökte termisk nedbrytning hos PUR i syre- respektive kvävemiljö med termogravimetrisk analys (TGA), differentiell svepkalorimetri (DSC) och även IR-spektroskopi. Nedbrytningen i syremiljö gick fortare än den i kväve och sönderdelningen av uretangupperna till isocyanat och polyol började vid 200 °C i kvävemiljö.

Diffusion av gaser i FV-ledningar och dess långsiktiga inverkan på isoleringsförmågan har studerats i flera arbeten, t.ex. artiklar av Olsson m. fl. (2001, 2002) och avhandlingen av Persson (2015). Olsson studerade diffusion av gaser genom manteln och i PUR. Manteln utgör en diffusionsbarriär för koldioxid, syre och kväve, medan PUR-skummet är en diffusionsbarriär för cyklopentan. Larsen m. fl. (2009) studerade skillnader mellan mantel av polyeten av unimodal och bimodal typ.

Nolte (1982) undersökte termisk åldring av PUR i FV-ledningar. Olika försök genomfördes av PUR som lagrats och åldrats termiskt i flaskor utan syretillförsel. Försök gjordes också med tillgång på syre. Isoleringen utvärderades med olika sorts mekaniska försök. Vid accelererad åldring höjdes temperaturen till 140, 150 och 165 °C. Nolte uppskattade att den undersökta isoleringen skulle ha en livslängd på 30 år då medietemperaturen var 125 °C. En standard för FV-ledningar togs fram med metoder för livslängdsprediktering baserade på Noltés idéer, se EN 253 (2009). I standarden användes aktiveringsenergin 150 kJ/mol för beräkning av livslängden.

Nya undersökningar om nedbrytning av FV-ledningar startade först i Tyskland och pågick i olika nationella projekt mellan 2005–2016, se rapporten av Schleyer & Richter (2016). Man befarade att nedbrytningen av FV-ledningarna kunde ske fortare än vad predikteringsmetoderna i standarden EN 253 (2009) visade, se även artikeln av Meigen & Schuricht (2005). Syftet var bl. a. att undersöka syrets påverkan på åldringsprocessen. Både naturligt åldrade och accelererat åldrade rör undersöktes. Experiment har i vissa fall utförts i en omgivning med förhöjd temperatur för att accelerera syrediffusionen genom manteln. Mycket höga temperaturer upp till 190 °C hos medieröret har använts för att accelerera nedbrytningen. En skenbar aktiveringsenergi på 95 kJ/mol bestämdes utgående ifrån experiment vid temperaturer mellan 150–190 °C hos medierör med en tunn mantel (film av polyeten) enligt Leuteritz m. fl. (2016).

En ny metod att bestämma status hos FV-ledningar togs fram av Sällström m. fl. (2012a, b). Metoden har vidareutvecklats inom detta projekt och anpassats bättre till användning i fält. Den kallas nu RISE pluggmetod och beskrivs i Avsnitt 3.2.1. Metoden har använts i flera senare projekt. Yarahmadi och Sällström (2014) använde metoden och andra konventionella metoder då åldring av FV-ledningar studerades. För att accelerera tillförseln av syre användes tunnare mantel och förhöjd omgivningstemperatur. Även de använde förhöjda temperaturer hos medieröret vid accelererade åldring mellan 130–150 °C.

Vega m. fl. (2017) undersökte nedbrytning av PUR i luft och kväve miljö. PUR förändrades mycket mer i luft än i kväve, vilket indikerar betydelsen av termo-oxidativ nedbrytning hos isoleringen i FV-ledningar. Förändring av molekylstrukturen observerades endast vid nedbrytning i luft. Vega m. fl. (2018) undersökte accelererad åldring vid 130, 150 och 170 °C och upptäckte att beteendet hos nedbrytningen vid de högre temperaturerna skiljer från det som sker vid 130 °C. Det sker andra nedbrytningsreaktioner vid de högre temperaturerna 150 och 170 °C, än de som sker vid normal användning av FV-ledningarna. Det går alltså inte att accelerera åldring som sker vid normal användning med så höga temperaturer som 150 °C. Skillnader i nedbrytning observerades för skjuvhållfasthet (vidhäftning), termisk konduktivitet och förändringar av molekylstrukturen.

Celina m. fl. (2005) studerade resultat av accelererad åldring från litteraturen. Nedbrytningsbeteende som inte följer Arrhenius samband förklarades med att två konkurrerande processer med olika aktiveringsenergi, som är dominant i olika temperaturspann. Vega m. fl. (2020a) kom fram till att initiala förändringar av

vidhäftningsstyrka hos FV-ledningar i drift avstannar efter en kortare tid och statusen hos dem ligger därefter på en konstant nivå under mycket lång tid.

Vega m. fl. (2020b) har också undersökt åldring av FV-ledningar vid förhöjd temperatur (130 and 140 °C) med och utan inverkan av axiella skjuvspänningar. FV-ledningarna utsätts för skjuvspänningar i glidzonerna, när ledningarna glider relativt marken då driftstemperaturerna varierar. Det är väsentligt för ledningarnas fortsatta funktion att vidhäftningen mellan medierör och isolering består. Nedbrytning hade ett betydligt snabbare förlopp i de experiment som skjuvspänningen varierade cykliskt med tiden, än då den var konstant noll. Variation hos vidhäftningen och molekylstrukturen undersöktes, varvid FTIR-spektroskopi (Fourier Transform Infra Red) användes för den sistnämnda.

2.2 Fjärde generationens FV-system

En övergång från befintliga till lågtemperatur FV-system kräver kunskap om temperaturvariationer i fram- och returledningar, samt nätets holistiska integration med förnybara energikällor, som kan vara intermittenta. Det öppnar också upp för att använda nya komponenter såsom medierör och isoleringsmaterial gjorda av olika polymerbaserade material. De alternativa materialen har redan kommit in på marknaden och för vissa lösningar existerar standarder, men några formella verifieringskrav och kontroller finns inte inom Euroheat & Powers certifieringsprogram (2022). Projektet har därför fokuserat på att studera relevanta kompletterande utvärderingsmetoder och kravspecifikationer för dessa nya material med avseende på viktiga egenskaper samt livslängd. De undersökta materialen i det här projektet var PEX (tvärbunden PE) som medierör och EPS (expanderad polystyren) som isoleringsmaterial, både jungfrulig och återvunnen. Även kombinationen av PEX och PE-skum med vakuumpanel har undersökts. Termisk stabilitet och mekanisk hållfasthet före och efter åldring i olika miljöer har också studerats och utvärderats.

3 Genomförande

Projektet har genomförts i fyra arbetspaket (AP) i nära samarbete med ett parallellt projekt "Livslängdsprediktering och statusutvärdering av fjärrvärmeledningar" finansierat av Energiforsk AB inom ramen för FutureHeat-programmet.

AP1: Utveckling av nya digitaliserade fältmetoder

För att gamla ledningssystem ska kunna användas länge krävs planerat, effektivt och selektivt utbyte av uttjänta delar vilket kräver kunskap om de befintliga ledningarnas funktionella status och återstående livslängd. För detta ändamål har projektet utvecklat tre nya innovativa metoder för övervakning och statusbedömning av FV-ledningar. En av metoderna är den så kallade "Pipeopsy" som mäter vidhäftningen mellan medieröret och PUR-isoleringen och dessutom analyserar PUR-materialet närmast stålröret med avseende på graden av kemisk nedbrytning. De två andra metoderna är baserade på känsliga sensorer som har anpassats för mätningar i FV-ledningar i drift. En ny snabb metod för mätning av termisk ledningsförmåga hos PUR-isoleringen använder en nålliknande sensor och är utvecklad för att kunna användas i fält och med fördel som ett komplement till Pipeopsy. Den andra sensormetoden använder en syresensor som gjuts in i PUR-isoleringen och ger information om syrediffusion genom mantelröret och PUR-isoleringen. En del av arbetspaketet har varit kopplat till det parallella projektet "Livslängdsprediktering och statusutvärdering av fjärrvärmeledningar" där mätningar av naturligt åldrade ledningar var ett viktigt bidrag till AP2 och beräkningsmodellen till statusbedömning av befintliga ledningar (TRL 5 & TRL 6). Den nya fältmetoden har skapat ett internationellt intresse för kommersialisering och har redan efterfrågats och testats på tyska och nederländska ledningar.

AP2: Nya beräkningsmodeller och relevanta accelererade åldringstester

En stor utmaning för livslängdsprediktering är att förstå och kvantifiera FV-ledningars nedbrytning, vilket skulle vara till stor hjälp för staten och energisektorn vid planering av verksamheten på kort och lång sikt. Ett avgörande moment är att ha tillgång till en tillförlitlig metod för livslängdsbedömning. Det saknas idag samsyn gällande metoder för accelererad åldring, utvärderingskriterier och beräkningsmodeller för livslängdsuppskattning av FV-ledningar. Inom projektet har därför en plattform skapats för samverkan med andra forskargrupper främst inom IEA DHC, och ett arbete har startats som utifrån tillgängliga forskningsrapporter och egna erfarenheter ska leda till internationellt överenskommen metodik för livslängdsprediktering.

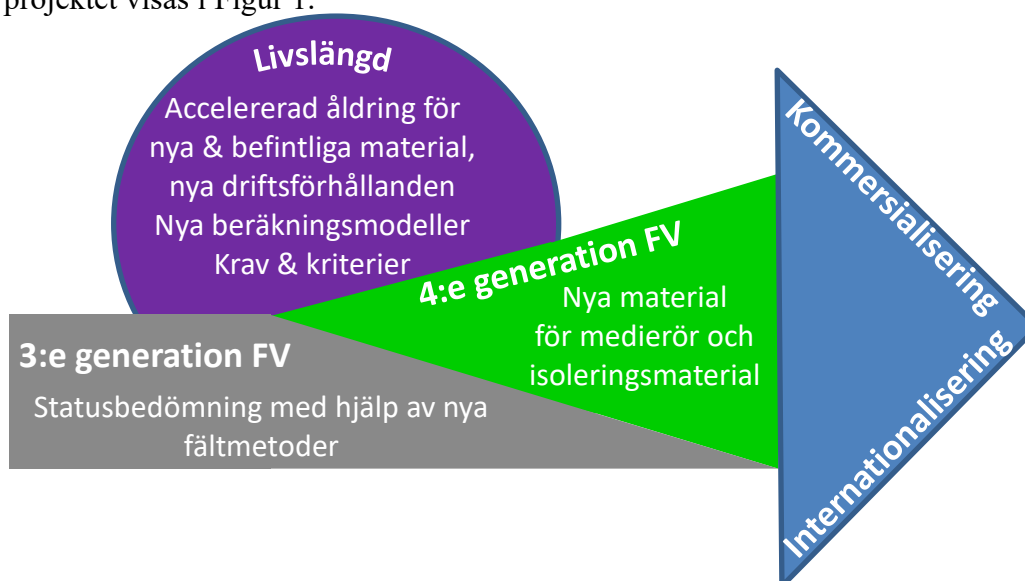
I AP2 har också nya materialanpassade experimentella metoder, tekniska krav och beräkningsmodeller för livslängdsuppskattning utvecklats för nya/alternativa material för FV-ledningar. Arbetet har delvis utförts i ett doktorandprojekt i samarbete med Chalmers Tekniska Högskola av Alberto Vega (2020c) som disputerade den 20 december 2020 och titel på hans avhandling är "Assessment of the lifetime of district heating pipes" (TRL 2 & TRL 3).

AP3: Nya innovativa lösningar och alternativa resurseffektiva material

Lägre temperaturer i FV-ledningar gör det möjligt att använda alternativa plastmaterial, dels för medierör, dels för isoleringsmaterial. Det finns dock en osäkerhet vad gäller plastmaterialens livslängd under olika driftförhållanden, och därmed om de ger en långsiktig ekonomisk fördel. Bristen på testmetoder för livslängdsbedömning är en begränsande faktor. I AP3 har därför alternativa material, materialkombinationer och konstruktionslösningar för framtida generationer av FV-system med lägre driftstemperaturer utvärderats. Undersökningarna behandlade resurseffektivitet i förhållande till funktionalitet och långtidsegenskaper. Syftet var att bestämma vilka krav som bör uppfyllas vid byte av material och konstruktionslösningar för FV-ledningar (TRL 3-4 samt TRL 5). En lämplig kravprofil med avseende på viktiga egenskaper och livslängd föreslås.

AP4 Projektledning, administration, kommunikation och kommersialisering

AP4 har handlat om projektledning, administration, kommunikation och kommersialisering. Projektet har haft två projektmöten per år med alla 12 partners och referensgruppen, där resultat har diskuterats och beslut tagits om vidare undersökningar. Resultaten har spridits både genom akademiska kanaler (konferenser, kvalitetsgranskade artiklar) och genom populärvetenskapliga kanaler (artiklar i branschtidningar och branschkonferenser, se Publikationslistan). För att kunna utföra ett sådant multitekniskt projekt inom produktionsteknik, mekanik, kemi, värmeteknik och energi behövdes tät kommunikation och flera möten i olika konstellationer mellan olika projektutförare och partner. Ca 50 sådana möten har hållits. Resultatspridningen har lett till en starkt internationell positionering av Sveriges kunskap inom FV. Det har även byggts en plattform inom IEA DHC och startats ett "Task Shared 6"-projekt med titeln "Status assessment, ageing, lifetime prediction and asset management of District Heating Pipes". Strukturen av projektet visas i Figur 1.



Figur 1: Skiss av projektets olika delar

3.1 Kemiska analysmetoder av polymera material

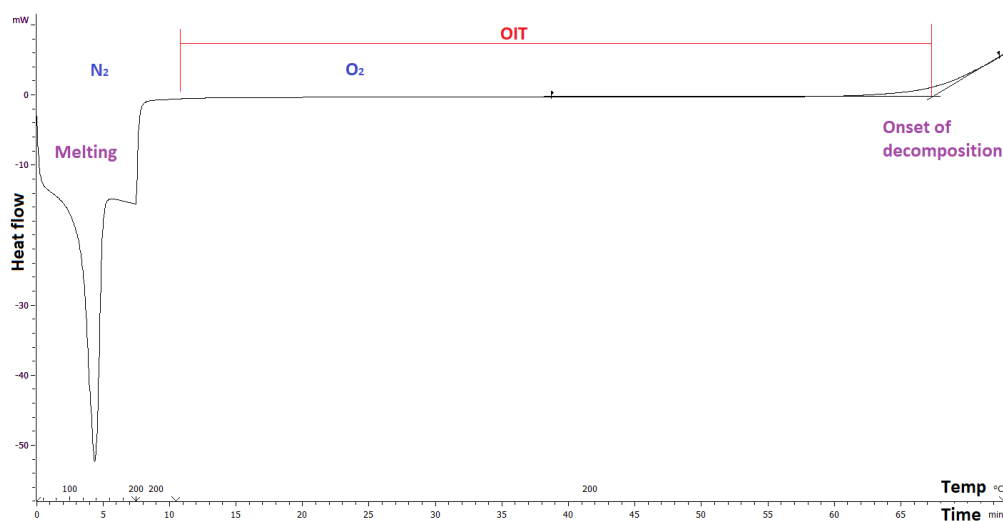
De polymera materialen som används i isolering och medierör utsätts för nedbrytning, vilken kan påskyndas av varierande mekaniska spänningar. Nedbrytningen av polymera material förhindras eller fördröjs genom att stabilisatorer tillsätts. Dessa är verksamma under tillverkning och användning av produkterna. Stabilisatorerna förbrukas också under produktens livslängd, då de skyddar produkten från kemisk nedbrytning. Nedan presenteras två metoder för att studera status gällande nedbrytning av polymera material.

Tredje generationens FV-ledningar utsätts för både höga temperaturer och mekaniska spänningar under deras livslängd. PUR-skum och PE-mantel åldras med tiden och förändrar sina mekaniska, fysikaliska och kemiska egenskaper. Dessa material skyddas därför med olika stabilisatorer beroende på den designade livslängden. Stabilisatorerna i sin tur förbrukas under användningstiden. För att en FV-ledning ska kunna prestera måste den uppfylla vissa egenskapskrav för varje material i varje del (medierör, isolering och mantel) samt i kombination med varandra.

3.1.1 OIT (Oxidation Induction Time)

Oxidationsinduktionstid eller OIT är ett standardiserat test som ger ett mått på mängden aktiv stabilisator i det testade materialet. Med denna metod mäts tiden från när syre kopplas på till början av en exoterm reaktion under isotermiska förhållanden. Atmosfären är kväve under uppvärmning och smältning och den ändras sedan till syre när testtemperaturen är uppnådd. Den typiska testtemperaturen är 190–220 °C.

Antioxidanter är stabilisatorer som skyddar materialet från termo-oxidativ nedbrytning. Dessa förbrukas under produktion och användning i en applikation. Då de helt tagit slut börjar materialet brytas ner och följderna blir att olika egenskaper försämras. OIT ger ett mått på halten kvarvarande, aktiv stabilisator i materialet. Detta test är rutinmässigt när man bedömer kvaliteten på polymera produkter såsom polyetenrör.



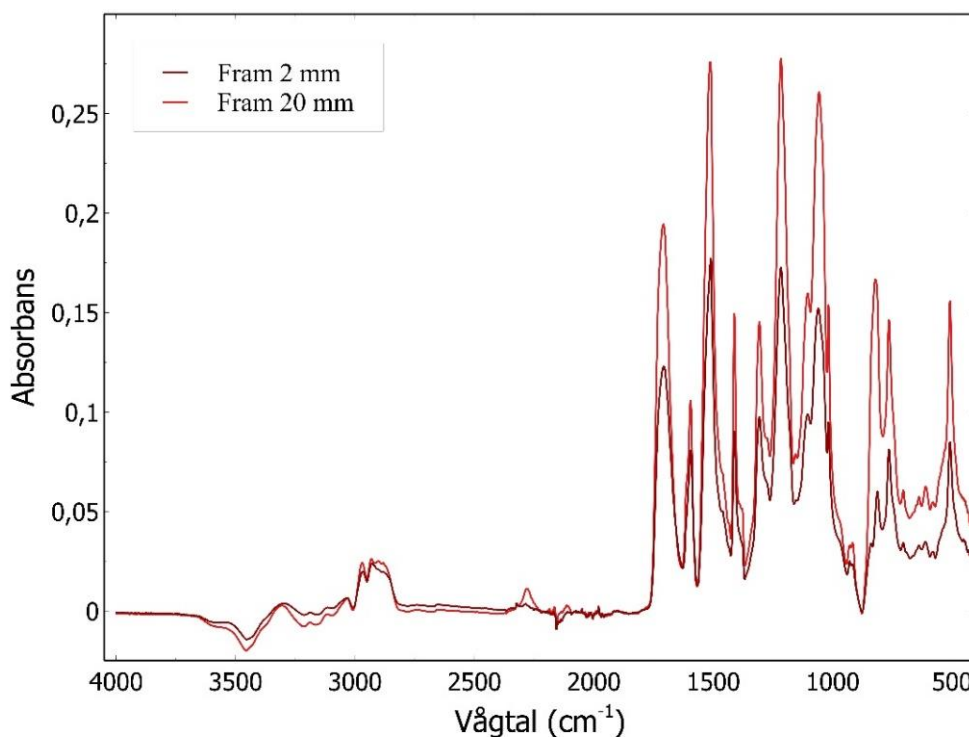
Figur 2: Exempel på DSC-kurva för bestämning av OIT

OIT bestäms vanligtvis med hjälp av en differentialsanning kalorimeter (DSC). Det är en termoanalytisk teknik där skillnaden i mängden värme som tas upp eller avges av ett prov jämfört med en referens mäts som en funktion av temperaturen eller tiden. Fasomvandlingar i materialet såsom smältning, kristallisation eller nedbrytning ger upphov till skillnader i värmeflöde från provet jämfört med referensen. Värmeflödet registreras och fasomvandlingarna ger toppar eller dalar hos tillhörande kurva, se Figur 2. Denna kurva kan användas t.ex. för att utläsa tiden från när syre kopplas på till nedbrytning startar, dvs OIT.

3.1.2 Infraröd spektroskopi (FTIR)

För att studera kemiska förändringar hos det polymera materialets molekylstruktur används en spektroskopimetod som i det här fallet är FTIR-spektroskopi (Fourier Transform Infra Red) med en ATR tillsats (Attenuated Total Reflectance). En ljuskälla bestrålar materialprovet med infrarött (IR) ljus. Vissa frekvenser av ljuset absorberas av provet och andra passerar igenom. En detektor mäter hur mycket av ljuset som har absorberats av materialet. Genom att registrera detta i form av ett IR-spektrum kan man se vilka bindningar som finns i ett material.

De studerade förändringarna i molekylstrukturen kan bero på oxidation. Metoden kan också användas för att identifiera organiska och oorganiska material. Figur 3 visar FTIR-spektra av PUR prov tagna 2 mm och 20 mm från medieröret av en ledning som utsatts för accelererad åldring vid 140 °C. Förändringar i absorptionsnivåer hos specifika absorptionstoppar används som ett mått på nedbrytning.



Figur 3: FTIR spektra av PUR prov tagna 2mm och 20 mm från medierör hos rör åldrat vid 140 °C

3.2 Mätmetoder för egenskaper hos tredje generationens FV-ledningar

Olika mätmetoder har använts för att studera förändringar hos traditionella förtillverkade FV-ledningar med medierör av stål, isolering av polyuretan (PUR) och mantel av polyeten (PE). Vidhäftningsstyrka (skjuvhållfasthet) har mätts med RISE pluggmetod och även axiellt enligt standarden EN 253 (2019) i en dragprovningssmaskin. Andra egenskaper som mätts är termisk konduktivitet hos isoleringen och syrehalt i isoleringen. Det senare ska vara ett mått på diffusion av syre genom manteln.

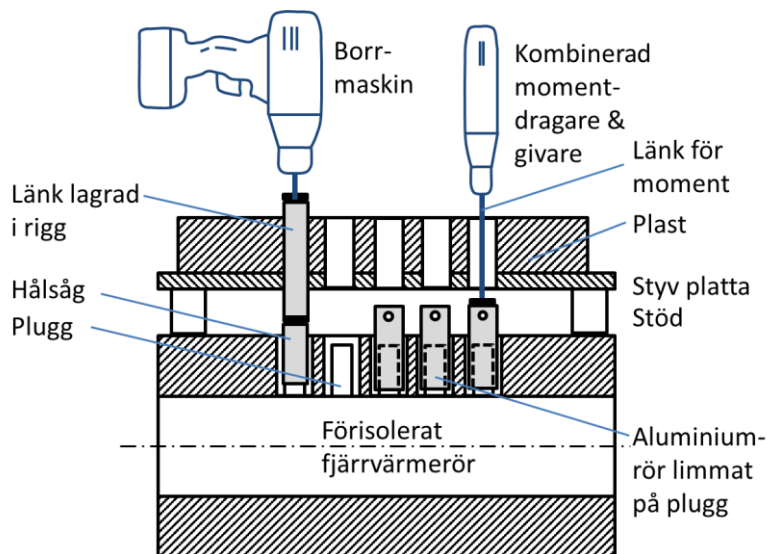
3.2.1 Vidhäftning (RISE Pluggmetod)

En fältmetod (RISE pluggmetod) för att bedöma status hos FV-ledningar i drift med avseende på vidhäftning mellan medierör och PUR-isolering (skjuvhållfasthet) har utvecklats. Arbetet har i detta projekt bestått av att vidareutveckla metoden för laboratoriebruk till en metod anpassad till provning i fält. Metodens mät noggrannhet och korrelationen mot axiell skjuvhållfasthet har studerats. Vidhäftningsstyrkans temperaturberoende har också studerats, eftersom isoleringens egenskaper kan variera med temperaturen.

RISE pluggmetod bygger på principen att frilagda pluggar (borrkärnor) av isolering vrids loss från medieröret, se Figur 4. Aluminiumrör limmas fast på pluggen för att kunna lägga på ett vridmoment på pluggen.

Vridmomentet och även vridvinkeln kan mätas då pluggen vrids loss med konstant vinkelhastighet. Hålsåg används för att skapa pluggen med diametern $\varnothing 27$ mm. Skjuvhållfastheten τ_u [Pa] beräknas från uppmätt vridmoment M [Nm] och pluggens diameter $d = 0,027$ m enligt

$$\tau_u = \frac{16 M}{\pi d^3} \quad (1)$$



Figur 4: Princip för RISE pluggmetod

Pluggarna av borttagen isolering analyseras med kemisk analys efteråt i laboratoriet, se Avsnitt 3.4.3. En återställningsmetod där borttagen isolering ersätts och manteln tätas efter provning har också utvecklats. Hela förfarandet med bestämning av vidhäftningsstyrka med RISE pluggmetod vid drift, kemisk analys med FTIR för utvärdering av nedbrytning av PUR och återställning av FV-ledningen utgör en komplett metod som kallas PipeOpsy. Metodens robusthet och tillförlitlighet har verifierats med stort antal mätningar i fält hos energibolagen som är projektpartner i detta projekt samt kompletterande tester i laboratoriet.

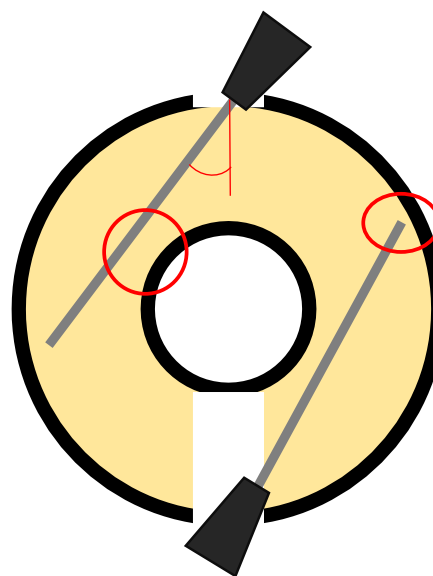
3.2.2 Värmeledning (Portabel mätare)

I API har även en portabel metod för att mäta termisk konduktivitet hos PUR-isoleringen i fält studerats och förfinats. Metoden är en utökning av den metod som beskrivs i ASTM D5334 (2014) för mätning av värmeledningsförmåga i jordarter. Hårdvaran som används är Thermtest TLS-100. Instrumentet består av en handhållen enhet till vilken en 100 mm lång, nålformad givare ansluts. Hela nålen trycks ner i provet i samband med mätningen och värms upp då konstant ström leds genom ett värmeelement. Givarens temperaturökning under uppvärmningen övervakas och från den resulterande transienten kan den termiska ledningsförmågan beräknas. För att anpassa metoden till PUR-isoleringens låga termiska ledningsförmåga används en låg effekt för uppvärmningen, detta för att se till att temperaturökningen hålls inom rimliga nivåer så att beräkningarna inte påverkas. Under en mätning bör givarens temperatur inte ökas mer än ca 10 °C, vilket gör denna anpassning nödvändig. Metoden kräver även mycket god kontakt mellan prov och givare, alternativt kan termiskt fett användas. För porösa och isolerande prover så som PUR är fett inte ett lämpligt alternativ, så i stället är det viktigt att provet sluter tätt kring nålen. Lyckligtvis har PUR goda egenskaper för att uppnå detta kriterium.

Värdet på den termiska ledningsförmågan i provet är proportionellt mot inversen på lutningen av den linjära delen av givarens temperaturökning som en funktion av tiden. Värmeledningstalet kan då beräknas med följande förenklade ekvation:

$$\lambda = \frac{CQ}{4\pi S} \quad (2)$$

där λ är den termiska konduktiviteten, C är givarens kalibreringsfaktor, Q är effekten per längdenhet i givaren och S är lutningen av den linjära delen av temperaturökningen plottad som en funktion av logaritmen av mättiden. Kalibreringsfaktorn C är för TLS-100 fastställd av tillverkaren och alla beräkningar sker direkt i instrumentets medföljande mjukvara.



Figur 5: Mätning av termisk konduktivitet med Thermtest TLS-100 via hål upptaget i manteln

Metoden kan med fördel kombineras med RISEs pluggmetod då hålet från denna metod kan användas för att TLS-givaren ska kunna få tillgång till isoleringen. Att kunna kombinera metoderna betyder att både termiska och mekaniska egenskaper kan mätas mer eller mindre samtidigt utan att ledningen behöver tas ur drift, det behöver bara friläggas. TLS-givaren kan även användas utan att kombineras med pluggmetoden och då räcker det med att ett hål tas upp i manteln. TLS-givare är designad för att klara temperaturer upp till 100 °C och då givaren aldrig ska vara i kontakt med medieröret så påverkar denna begränsning inte mätningarna.

När nålen förs in i isoleringen måste vinkeln (se Figur 5) väljas så stor att givaren inte kommer för nära medieröret och så liten att givarens spets inte slår i manteln på motsatt sida. Att komma för nära medieröret betyder höga temperaturer samt att volymen PUR kring givaren blir för liten och medierörets stål påverkar resultaten. Att slå emot manteln gör att inte hela nålen kan föras in i provet, vilket bryter mot antagandet att hela nålen är omsluten av provkroppen. Metoden förväntas vara känslig för åldring, gasutbyte och fuktskador i PUR-isoleringen, där samtliga dessa faktorer förväntas öka den termiska konduktiviteten och på så vis även reducera ledningens effektivitet.

Mätningar har utförts för att bedöma stabilitet i resultaten, hur nålens placering i ledningen påverkar, huruvida nya och åldrade ledningar kan skiljas åt, hur väl metoden fungerar i fält, hur väl den fungerar med ledningar i drift och i kombination med pluggmetoden, samt vilken effekt en fuktskada kan ha. För att undersöka hur bra resultaten från TLS-metoden stämmer med mer traditionella metoder har även mätningar med klassisk plattapparat (Heat Flow Meter), i enlighet med EN 12667 (2001), genomförts. Till dessa mätningar har Thermtest HFM-100 använts. Till skillnad från den transienta TLS-metoden mäter en plattapparat vid ”steady-state”. I jämförelse är en transient mätning avsevärt snabbare än en ”steady-state”-

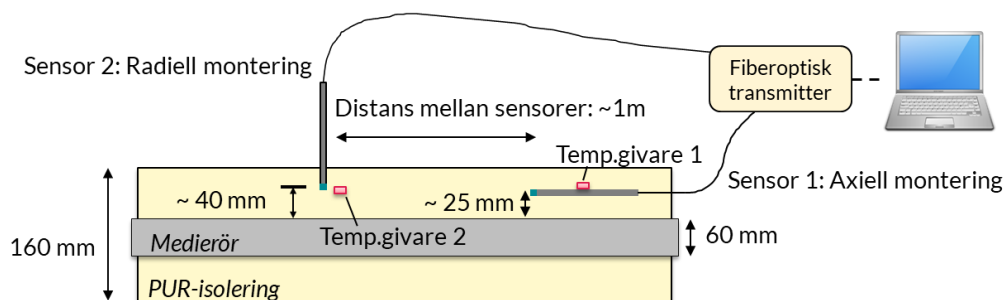
mätning. För mätningar enligt EN 12667 krävs även relativt stora prover med specifik geometri, ofta skivor 300 x 300 mm med en tjocklek upp till 100 mm. En dylik metod är inte praktiskt användbar när PUR-isolering från befintliga ledningar ska testas, vilket gör en metod som TLS attraktiv. Traditionella metoder går heller inte att använda i fält eller under drift.

3.2.3 Syrehalt (Syresensor)

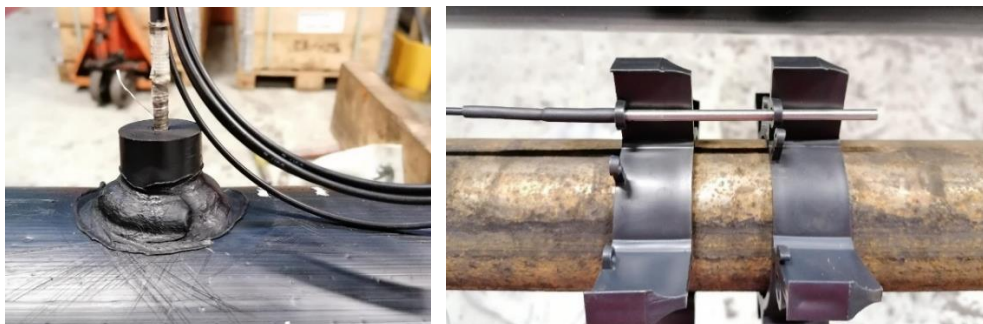
Syftet med den tredje metoden som har utvecklats i AP1 var att mäta syrediffusion genom manteln. Uppskattning av diffusionshastighet och mängden av syre i isoleringen vid driftstemperatur under FV-ledningens livslängd är viktiga för att utvärdera effekten av syre på nedbrytningsmekanismen och den termiska isoleringsförmågan hos PUR. För att kunna genomföra den här typen av mätning krävdes en liten och tunn sensor för att underlätta ingjutning i isoleringen. Sensorn bör även klara temperaturer på upp till 140 °C under ingjutningsförloppet.

Valet föll på en fiberoptisk syresensor från tyska PreSens som har tillverkat en specialanpassad sensor (en variant av modell: "DP-PSt6-L2.5-St10-YOP-HT".) som tål 110 °C och som kalibrerades upp till 100 °C. Sensorns storlek är 4 mm i diameter och längden är 100 mm. Sensorn har en polymerbeläggning i änden vars optiska egenskaper påverkas av mängden syre i omgivningen. Mätområdet för sensorn är 0-5 % O₂. Sensorn kopplas till ett optiskt instrument från PreSens som i sin tur kopplas till en PC för loggning av data. Instrumentet kan hantera fyra sensorer samtidigt.

Efter leverans funktionstestades sensorerna på RISE i kontrollerad miljö med olika syrehalt (blandning av ren kvävgas och luft). Sedan gjordes en två-punktskalibrering för varje sensor enligt leverantörens protokoll i 0 % respektive 2 % O₂ vid rumstemperatur.



Figur 6: Principskiss som visar två olika monteringsätt av syresensorer och temperaturgivare. Temperaturgivare 1 monterades tätt intill syresensor 1 (axiell). Temperaturgivare 2 monterades fritt i PUR-isoleringen, på samma radiella avstånd från FV-ledningens mantel.



Figur 7: Till vänster visas sensor monterad axiellt i ledningen. Till höger visas axiell montering, innan skumning av PUR

Inledande försök

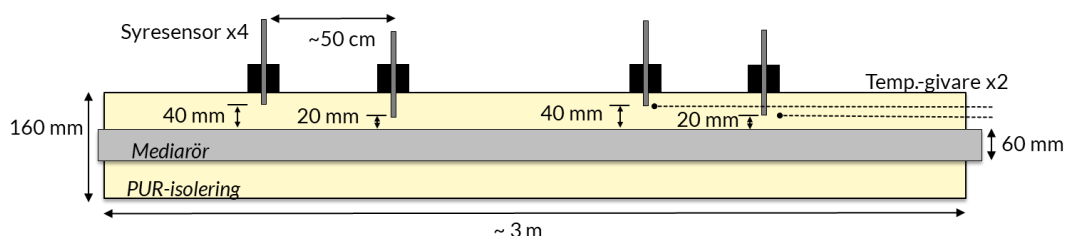
Ett inledande försök att gjuta in två sensorer i en FV-ledning genomfördes på PowerPipe januari 2020. En sensor monterades radiellt och en axiellt vilket visas i Figur 6 och Figur 7. För den radiella monteringen svetsades en PE-cylinder på manteln och en PE-svets lades omkring cylindern för att göra konstruktionen stabilare. Cylindern hade ett hål med samma diameter som sensorn som stoppades i hålet. Ett termoelement placerades nära sensorn för att mäta temperaturen. Kabeln från sensorerna togs ut via ändgaveln genom avluftningshål.

Ledningen skummades och temperaturen mättes under processen. När ledningen var klar togs den till RISE för syremätningar. Sensordata loggades sedan under drygt en månad.

Långtidstest

Efter det inledande försöket hos PowerPipe (våren 2020) beslutades att samtliga sensorer i efterföljande långtidstest skulle monteras radiellt i ledningarna (Figur 7). Radiell montering är enklare att genomföra och sensorns kabel (fiber) befinner sig utanför röret vilket förenklar tätning av rörändar och därmed minskar risken att skada kabeln under tillverkning/skumning. Sensorns topp (syrekänsliga delen) kan då också placeras i princip på vilket avstånd från manteln eller medieröret som önskas. Totalt gjöts åtta sensorer in i två olika FV-ledningar

- 4 sensorer i en referens som efter tillverkning förvarades i rumstemperatur
- 4 sensorer i en ledning med uppvärmt medierör för accelererad åldring (130 °C)



Figur 8: Fyra sensorer monterades i PUR-isoleringen i varje ledning och på två olika avstånd från medieröret (20 resp. 40 mm).

Sensorerna monterades på två olika avstånd från medieröret (20 och 40 mm) med minst 500 mm från varandra, se Figur 8. Ledningens längd var totalt 3 m varav 2,6 m var isolerat och med fria stålrörsändar på totalt 400 mm. Medierören isolerades sedan i båda ändarna med strumpa. Sensorerna placerades ca 600 – 700 mm från ändarna. Distanser användes för att kunna fixera termoelement i isoleringen i nära anslutning till syresensorerna (på samma avstånd från medieröret). Temperaturen är viktig att logga under skumningen men även under åldringen då syremätningen behöver temperaturkompenseras. Ytterdiametern hos manteln var 160 mm och medierörets diameter var 60 mm.

Efter tillverkning transporterades ledningarna till RISE för start av långtidstest (se Figur 9). Referensledningen hölls vid rumstemperatur under hela testet medan den andra värmdes upp genom att hålla medieröret vid 130 °C.

Två sensorer per ledning loggades kontinuerligt (en monterad 20 mm och en 40 mm från medieröret) medan två övriga sensorer lästes av ungefär en gång per månad. Testet kördes i ca 14 månader mellan april 2021 och juni 2022.

Efterkontroll

Efter att långtidstestet hade avslutats så demonterades de fyra sensorer som hade loggats kontinuerligt under testet, två från respektive ledning monterade på olika avstånd från medieröret. Sensorerna inspekterades först visuellt och sedan genomfördes funktionstester på RISE i kontrollerad miljö med en syrehalt på 0 % samt 2 % vid rumstemperatur. De två sensorer som suttit monterade i det uppvärmda ledningen testades dessutom i 60 °C respektive 100 °C.



Figur 9: Ett långtidstest på RISE med två FV-ledningar, ett i rumstemperatur och ett med uppvärmt medierör vid 130 °C.

3.3 Mätosäkerhet för skjuvhållfasthet

För olika mätresultat kan en osäkerhet redovisas. Här används den utökade mätosäkerheten med två standardavvikelser för resultat angående skjuvhållfasthet. Då mätresultaten antas vara normalfördelade, kan med 95% konfidens det faktiska medelvärdet av skjuvhållfastheten förväntas ligga inom intervallet definierat av gränserna

$$\tau_{avr,ci} = \tau_{avr} \pm t_{97,5\%,N-1} \times \frac{\tau_{std}}{\sqrt{N}} = \tau_{avr} (1 \pm U_{\tau}) \quad (3)$$

Här definieras den utökade mätosäkerheten som

$$U_{\tau} = t_{97,5\%,N-1} \times \frac{\tau_{std}}{\tau_{avr} \sqrt{N}} \quad (4)$$

Här är τ_{avr} det beräknade medelvärdet av gjorda mätningar och standardavvikelsen för mätningarna är τ_{std} . Antal mätningar är N och den 97,5%-kvantilen av t -fördelningen med $(N-1)$ frihetsgrader betecknas $t_{97,5\%,N-1}$.

Den nedre gränsen för skjuvhållfastheten är given av Ekvation (3) då minus-tecknet används. Med 97,5% sannolikhet är den faktiska skjuvhållfastheten större än den angivna nedre gränsen.

3.4 Livslängdsuppskattning av traditionella FV-ledningar

För att kunna göra en livslängdsuppskattning av en FV-ledning behövs ett kriterium för när den ska betraktas som förbrukad, vidare behövs status gällande den kritiska egenskapen för ledningen och en modell för den fortsatta utvecklingen. Modellen bör ta hänsyn till vad ledningen utsatts för under dess hittillsvarande brukstid.

3.4.1 Krav och kriterier för livslängdsuppskattning

Vidhäftningsstyrkan (skjuvhållfasthet) hos förtillverkade FV-ledningar är av stor betydelse i glidzonerna nära böjar. Den nödvändiga vidhäftningsstyrkan beror på hur stora skjuvspänningar som kan uppstå mellan medierör av stål och isolering av polyuretan. Storleken på skjuvspänningarna beror på friktionskoefficienten mellan manteln och omgivande fyllnadsmaterial, trycket mellan mantel och fyllnadsmaterial vilket i sin tur beror på förläggningdjupet. I rapporten av Sällström m. fl. (2022) beräknas skjuvspänningar för olika fall. Mindre dimensioner leder till högre skjuvspänningar då kvoten mellan diametern hos manteln och diametern hos medieröret blir större. Utgående från beräkningarna bedöms ett rimligt krav på axiell skjuvhållfasthet vara över 0,040 MPa. Detta krav kan användas vid en första bedömning. En noggrannare bedömning i det enskilda fallet kan göras genom beräkningarna med indata för det aktuella fallet enligt rapporten av Sällström m. fl. (2022). Det föreslagna kravet är väsentligt lägre än 0,12 MPa som anges i standarden EN 253 (2019) gällande nytillverkade FV-ledningar.

En korrelation, som bygger på mätresultat på olika ledningar, mellan axiell skjuvhållfasthet och den skjuvhållfasthet som mäts med RISE pluggmetod, visar att den

senare är tre gånger högre. Motsvarande krav för skjuvhållfasthet med RISE pluggmetod blir 0,12 MPa. Detta diskuteras i Avsnitt 4.1.2 i denna rapport.

3.4.2 Driftstid vid referenstemperatur

Vanligtvis varierar driftstemperaturer i FV-nät över tid och även mellan olika nät. För att kunna jämföra vad en ledning har utsatts för har en beräkningsmetod tagits fram. Perioder vid olika temperaturintervall räknas om till en ekvivalent period vid en referenstemperatur. Antag att hastigheten för nedbrytningsreaktionerna följer Arrhenius ekvation. Då ges hastighetskonstanten av

$$k_i = Ae^{-E_a/RT_i} \quad (5)$$

Här ingår absoluta temperaturnivån T_i , reaktionens aktiveringsenergi E_a , en pre-exponentiell faktor A och den ideala gaskonstanten $R = 8,314 \text{ J/(K mol)}$. Kvoten mellan hastighetskonstanterna ger ett mått på accelerationen då temperaturen ökar från T_2 till T_1

$$\frac{k_1}{k_2} = \exp \left[-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \quad (6)$$

Ett annat sätt är att betrakta förhållandet av de tiderna tills ett visst tillstånd hos materialet uppnås vid olika temperaturer

$$\frac{t_2}{t_1} = \exp \left[-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \quad (7)$$

En accelerationsfaktor A_f brukar definieras utgående ifrån en temperaturökning på 10 K. Anta att

$$T_1 = T_2 + 10K \quad (8)$$

Då definieras A_f av

$$\frac{k_1}{k_2} = A_f \quad (9)$$

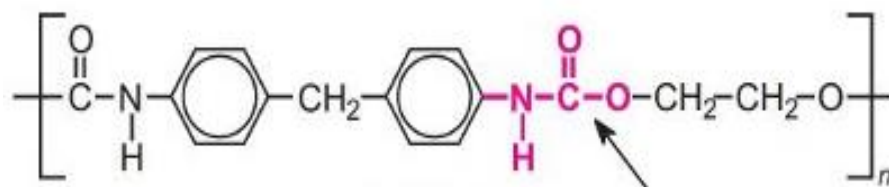
och

$$\frac{t_2}{t_1} = A_f \quad (10)$$

En antagen accelerationsfaktor A_f på 2,5 har visat ge bra överensstämmelse vid olika experimentella försök. Då tid räknas om från ett intervall 10 K högre än referenstemperaturen blir den tiden 2,5 gånger längre omräknad till tid vid referenstemperaturen. Ytterligare ett intervall (20 K) högre än referenstemperaturen blir tiden 2,5 gånger 2,5 längre, osv. Då temperaturen är lägre divideras i stället tiden med samma faktorer.

3.4.3 Kemisk analys av PUR-skum

Nedbrytning av polyuretan börjar vanligtvis med brott av uretanbindningarna, se Figur 10. För att analysera den typen av förändringar i den kemiska strukturen hos PUR-materialet har Fourier transform infraröd spektroskopi (FTIR) med ATR (Attenuated Total Reflectance) använts.



Figur 10: Polyuretans kemiska struktur

Uretangrupp

Små materialprover 1-2 mm tjocka, som har befunnit sig nära medieröret (2 mm ifrån), togs ur de cylindriska PUR-proverna från de mekaniska testerna med RISE pluggmetod. Proven placerades på ATR-kristallen och pressades därefter mot ytan för att erhålla en optimal kontakt. De erhållna spektra användes för att studera resultatet av nedbrytningsprocesser som funktion av åldringstid och temperatur. Som en referens togs ytterligare ett tunt materialprov 20 mm ifrån medieröret vilket antogs vara opåverkad av nedbrytningen. Minst tre prover analyserades från varje position.

Spektra normerades med absorptionstoppen vid 1595 cm^{-1} , som representerar termiskt stabila dubbelbindningar mellan kolatomer i de aromatiska ringarna och inte påverkas av åldringen. Nedbrytningen studerades genom att beräkna absorptionsindex för absorptionstopparna vid 1712 cm^{-1} och 1512 cm^{-1} , som representerar uretanbindningarna C=O respektive N-H efter olika åldringstider vid olika temperaturer, se Figur 10. Absorptionsindex för ett visst vågtal definieras som den normerade intensiteten hos absorptionstoppen vid detta vågtal.

3.4.4 Utvärdering av alternativa material/lösningar

Plaströr som alternativ till medierör av stål och isolering av andra polymera material än PUR blir allt intressantare då driftstemperaturer blir lägre i delar av FV-näten. Det kan röra sig om sekundärsystem där temperaturen sänkts via en värmeväxlare till det primära systemet. Vissa varianter av flexibla FV-ledningar är standardiserade och andra bygger på att standardiserade medierör kombineras med nya typer av isolering. Plastledningars livslängd under olika driftsförhållanden studerades genom accelererade åldringstester som utvärderades genom provning av mekaniska egenskaper och med hjälp av analytiska metoder.

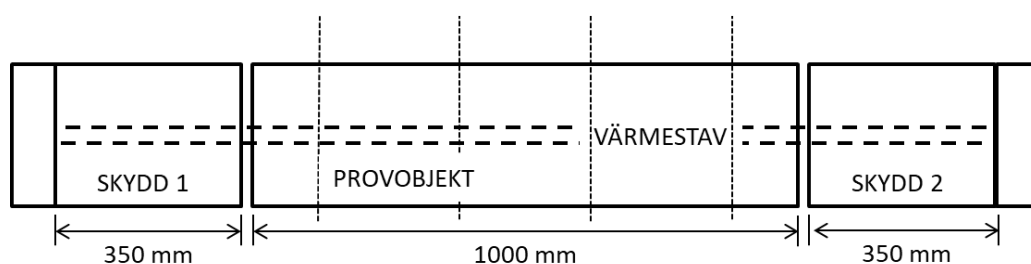
EPS (expanderad polystyren) som ett alternativt isoleringsmaterial till PUR utsattes för funktionstester och accelererade åldringstester. EPS materialen utvärderades främst med avseende på deras funktion genom långtidstester.

3.4.5 Mätmetod för termisk konduktivitet hos FV-ledningar

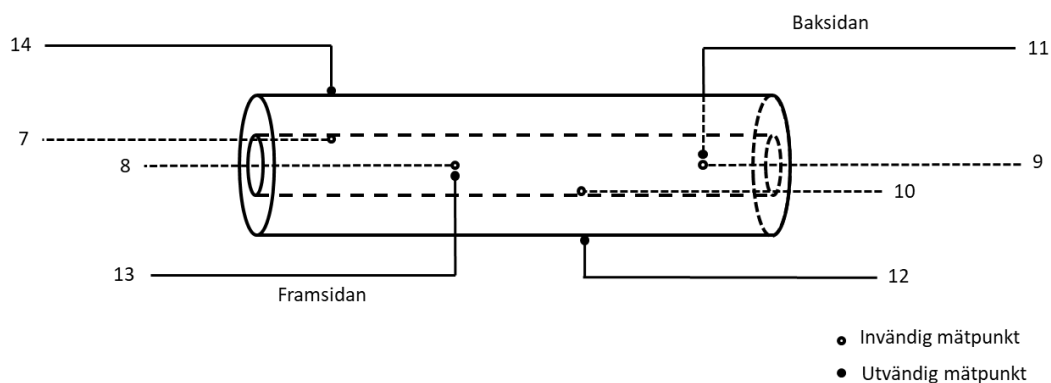
Mätningar av termisk konduktivitet hos isoleringen i FV-ledningar sker enligt standard ISO 8497 (1994). Metoden bygger på att en FV-ledning (provobjekt) värms upp med en inre värmestav tills stationära förhållande uppnås. Tillförd effekt mäts och temperaturer på insidan av medieröret och utsidan av manteln mäts också. Värme leds ut i radiell riktning då FV-ledningens ändrar isoleras med isolerande skydd, se Figur 11. Skydden ska helst vara av samma typ av FV-ledning som provobjektet. Värmestaven är uppdelad i tre från varandra isolerade delar, vars tillförda effekt kan styras var och en för sig. Temperaturer mäts på båda sidor om mellanrummen mellan den centrala delen av värmestaven och de

yttre delarna. Temperaturerna vid mellanrummen i de yttre delarna av värmestaven styrs så, att de sammanfaller med temperaturerna vid ändarna av den centrala delen av värmestaven. Det uppstår då inget axiellt värmefflöde, när stationära förhållande uppnåtts.

Temperaturgivare (termotrådar) monteras på fyra axiella positioner längs med provobjektet på insidan av medieröret och utsidan av manteln. Dessa givare positioneras också på fyra olika positioner runt om rören med mellanrum på 90°, se Figur 12. Varje par av temperaturgivare på insidan av medieröret och utsidan av manteln positioneras på samma axiella position och samma position i omkretsled. Ett medelvärde bildas av samtliga givare på insidan av medieröret och ett annat för givarna på utsidan av manteln. Längden på provobjektet ska vara 1000 mm och skydden har längden 350 mm.



Figur 11: Skiss av rigg



Figur 12: Skiss av lägen för termogivare

3.4.6 Beräkning av termisk konduktivitet hos FV-ledningar

Värmeledningsekvationen ges av sambanden

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -\nabla \cdot Q \quad (11)$$

$$Q = -\lambda \nabla T \quad (12)$$

Här betecknas temperaturen T [K], värmeflödet Q [W/m²] och operatören $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})$. Dessutom ingår densitet ρ [kg/m³], specifika värmekapacitet c [J/(kg K)] och termisk konduktivitet λ [W / (m K)]. Ekvation (12) kallas för Fouriers lag. Värmeledningsekvationen för stationära och rotationssymmetriska förhållanden i polära koordinater blir

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (13)$$

Lösningen till värmeledningsekvationen för en cylinder, se Figur 13, med randvillkor på inner- och ytterranden kan under stationära förhållanden tecknas

$$T(r) = T_b + (T_a - T_b) \frac{\ln(b/r)}{\ln(b/a)} \quad (14)$$

Temperaturen $T(r)$ vid radien r beror av temperaturen $T(r=a)=T_a$ på innerranden och temperaturen $T(r=b)=T_b$ på ytterranden. Värmeeffekten q [W/m] som leds ut ges av

$$q = \frac{2\pi \lambda (T_a - T_b)}{\ln(b/a)} \quad (15)$$

Här betecknar λ termisk konduktivitet (värmeledningsförmåga) [W / (m K)]. Ekvation (15) kan skrivas om och den termiska resistansen R [m K / W] kan definieras enligt

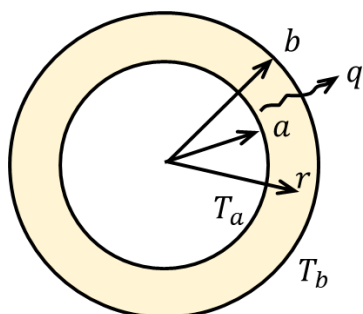
$$R = \frac{T_a - T_b}{q} = \frac{\ln(b/a)}{2\pi \lambda} \quad (16a,b)$$

Genom att termisk konduktivitet och mått för en cylinder är kända, så är även den termiska resistansen känd enligt Ekvation (16b). Med den termiska resistansen och värmeeffekten kan temperaturen på ytterranden beräknas då temperaturen på innerranden är känd. Då blir temperaturen med Ekvation (16a)

$$T_b = T_a - q R \quad (17)$$

Är den termiska resistansen känd enligt (16a) kan termisk konduktivitet beräknas med en omskrivning av Ekvation (16b)

$$\lambda = \frac{\ln(b/a)}{2\pi R} \quad (18)$$



Figur 13: Radiell värmeledning i cylinder

Vid mätningarna på en FV-ledning monterad i laboratorieriggen mäts under stationära förhållanden temperaturer på insidan av medieröret och på manteln och även tillförd effekt. Temperaturen på inner- och ytterrändan av isoleringen kan då räknas ut genom att använda Ekvation (17) två gånger med radier och termisk resistans för respektive rör. Resistanserna är kända enligt Ekvation (16b) då de termiska konduktiviteterna för materialen i medieröret och manteln är kända. När temperaturerna på inner- och ytterrändan av isoleringen är beräknade kan först den termiska resistansen enligt Ekvation (16a) bestämmas och sedan den termiska konduktiviteten för isoleringen med Ekvation (18).

3.5 Ledningar av polymera material för lågtemperatur FV/FK

3.5.1 Medierör av PEX.

Långtidsegenskaper hos medierör av PEX har undersökts vid olika temperaturer och miljöer. En långtidsstudie var att undersöka effekten av olika temperaturer då inre tryck väljs enligt aktuellt designtryck hos en dimension av PEX-rör, se Figur 14. Det aktuella designtrycket är 6 bar = 0,6 MPa. Spänningen i omkretsled ges av

$$\sigma_{\varphi} = p \frac{D - t}{2t} = p \frac{SDR - 1}{2} \quad (19)$$

Här är ytterdiameter D , godstjockleken t och $SDR = D/t$ hos röret. Spänningen blir 3,0 MPa vid trycket 0,6 MPa då $SDR=11$. De provade medierören har diameter $\varnothing 63$ mm och godstjocklek 5,8 mm. Testtemperaturerna har valts till 70, 80 och 90 °C. Tryck och temperaturer kan jämföras med krav i ISO 15875-2 (2003) att inget brott ske före 1000 timmar då spänningen i röret är 4,4 MPa och temperaturer är 95 °C. Med provningsmetoden i ISO 9080 sker åldring och utvärdering genom en enda process. Rörprovet åldras till brott vid en kombination av tryck och temperatur. I detta fall åldrades röret i stället i en process med tryck och temperatur och därefter utvärderades nedbrytningen med andra metoder. Vidare har dragprovstavar av PEX-rör åldrats i varmt cirkulerande vatten med temperaturerna 70, 80 och 90 °C.

Efterföljande utvärdering har gjorts med OIT för att studera mängden kvarvarande aktiv stabilisator, och eventuella förändringar i molekylstrukturen undersöktes med FTIR. Dessutom mättes förändrade mekaniska brottdata för dragprovstavar tagna ur de åldrade rören och för dragprovstavar åldrade i vatten utan tryck. För de trycksatta rören mättes även förändringar av maximalt tryck vid sprängprovning vid 23 °C.



Figur 14: Till vänster tre rörprover av PEX för åldring under tryck 6 bar och temperaturer 70, 80 och 90 °C. Till höger åldring av provstavar från PEX-rör i vanner med cirkulerande vatten vid samma temperaturer.

3.5.2 Isolering av EPS

Elgocell tillverkar FV-ledningar med medierör av tvärbunden polyeten (PEX) och isolering av expanderad polystyren (EPS), se Figur 15. Det är av intresse att ta reda på hur EPS belastas i marken och hur mycket den deformeras på 50 år. Vidare är det viktigt att veta hur stora termiska förluster den kan ha och hur dessa påverkas av fukt.

Nilsson m. fl. (2003) undersökte tidigare effekter av dränkning av kulvertar av EPS. En kulvert byggdes i en stor låda i laboratoriet som kunde vattenfyllas. Två olika kvaliteter av EPS fanns med i undersökningen. Värmeförlusterna ökade efter varje dränkning under efterföljande torkperioder. Avslutningsvis tillämpades en längre torkperiod på 1500 timmar, då blev förlusterna 20 % respektive 6 % högre än de ursprungliga för de provade kvaliteterna.

3.5.3 Kryptest av EPS

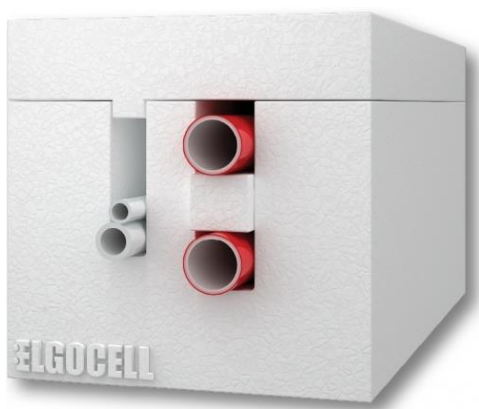
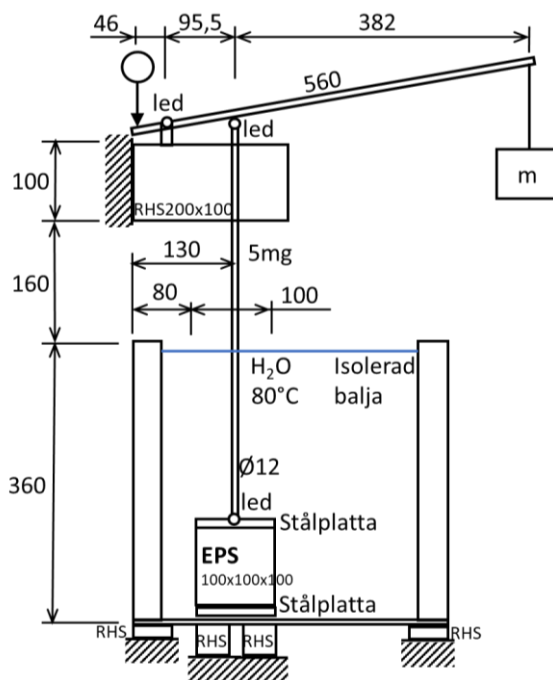
EPS har normalt en hög hållfasthet som gör den tålig mot belastning. Icke desto mindre är det viktigt att försäkra sig om att sättningsskador som beror på krypning av isoleringsmaterialet inte uppstår på lång sikt. I projektet har kryp studerats vid nivån 20 % och även 30 % i kompletterande fall av den deklarerade tryckklassen 200 kPa.

När det gäller temperaturen, genomfördes krypprovning vid laborietemperatur på 23 ± 2 °C och vid förhöjd temperatur på 45 °C. Dessutom genomfördes ett speciellt prov då ett rör med temperaturen 80 °C belastar ett rättblock av EPS. Syftet var att studera vad som händer lokalt med EPS då det belastas av egenvikten av ett rör med varmt vatten.

De olika krypproven sammanfattas i Tabell 1. Vid förhöjd temperatur genomfördes provet i ett vattenbad med en rigg som visas i Figur 16.

Tabell 1: Typer av krypprov

Provkropp	Omgivning	Temperatur [°C]	Belastning [kPa]	Antal prov jungfrulig EPS	Antal prov återvunnen EPS
Kub 100 mm	Laboratoriemiljö	23 ± 2	40	4	4
Kub 100 mm	Laboratoriemiljö	23 ± 2	60	2	2
Kub 100 mm	Förhöjd temperatur i vatten	45	40	4	4
Rätblock 200x200x100 mm	Varmt rör belastar EPS i laboratoriemiljö	80	Egentyngd motsvarande rör med vatten	2	2


Figur 15: FV-ledning med isolering av EPS (Bild: Elgocell)

Figur 16: Skiss av försöksuppställning för att studera kryp av EPS i varm omgivning

Resultaten av krypproven utvärderades och storleken av kryptöjningen efter 50 år uppskattades. Kryptöjningens tidsfunktion anpassades till en modell av Bailey

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + b t^m \quad (20)$$

Modellen av Bailey är den enklast tänkbar tidsfunktionen hos kryptöjningen, se t. ex. boken av Boyle & Spence (1983). I ett log-log-diagram ger modellen linjära linjer, dvs logaritmen av kryptöjningen blir en linjär funktion av logaritmen av tiden. Metoden som användes här följer principerna i EN 1606 (2013).

3.5.4 Vattenabsorption hos EPS

Vattenabsorption hos EPS mätes dels vid långvarig nedsänkning enligt ISO 16535 (2019), dels vid långvarig diffusion enligt ISO 16536 (2019). Vid långvarig nedsänkning sänktes provkropparna ned helt i vatten under 28 dygn och därefter fick rinna av på en ställning i 10 minuter. Provkropparna valdes här med tjockleken 100 mm. Fyra av provkroppar provades. Före provningen konditionerades provkropparna vid laboratorieförhållanden 23 ± 2 °C och 50 ± 5 % RF.

Vid långvarig diffusion har tjockleken valts till 50 mm, vilket berodde på, förutom att det är en rimlig tjocklek, att provkropparna också skulle användas vid mätning av termisk konduktivitet. Före provningen konditionerades provkropparna vid laboratorieförhållanden med temperaturen 23 ± 2 °C och relativ luftfuktigheten 50 ± 5 % (RF). Provkropparna placerades 50 mm över ett vattenbad som höll en temperatur på 50 ± 1 °C. Ovanpå respektive provkropp placerades en kylplatta som höll en ytemperatur på $1,0 \pm 0,5$ °C.

3.5.5 Termisk konduktivitet hos EPS

Termisk konduktivitet hos EPS bestämdes med standarden EN 12667 (2001) och EN 12664 (2001). Först konditionerades provkropparna vid laboratorieförhållanden 23 ± 2 °C och 50 ± 5 % RF. Tjockleken bestämdes enligt EN 823 (2013) vid mättryck 250 Pa. Provkropparna var kvadratiska block med storleken 500x500 mm och tjockleken ca 50 mm. En värmeflödesmätare användes vid proverna och ett stationärt värmeflöde skapades mellan två plattor med två olika temperaturer. I dessa mätningar valdes temperaturerna 30 och 40 °C. Temperaturskillnaden över provet av EPS mätes med fyra par av seriekopplade termoelement. Två fall behandlades, dels konditionerade provkropparna av EPS vid laboratorieförhållanden 23 ± 2 °C och 50 ± 5 % RF, dels fuktiga provkroppar efter att långvarig diffusion användes.

3.5.6 Termisk konduktivitet hos flexibla FV-ledningar

Två olika typer av förtillverkade FV-ledningar har utvärderats med avseende på värmeisoleringsförmåga. Den första typen är isolerad med en vakuumpanel och utanför denna finns en matta med PEX-skum, som skyddas av en korrugerad mantel. Den andra typen har enbart isolerats med mattor av PEX-skum och har en skyddande korrugerad mantel. Båda typerna av FV-ledningar tillverkas av Uponor och har försetts med medierör av PEX. Metoden som diskuteras i avsnitten 3.4.5 och 3.4.6 har använts för dessa ledningar.

Isolering a typen vakuumpanel (VIP) har även testats med avseende på termisk effusivitet (ett mått på hur snabbt ett material absorberar värme). Dessa mätningar har genomförts med ett Thermtest TPS-EFF-instrument i enlighet med ASTM D7984 (2016). Anledning till att denna metod används är att en TLS-nål skulle punktera vakuumpanelen samtidigt som panelerna är för stora för att passa in en plattaparat men kan inte kapas till önskad storlek. Effusivitet kan dock mätas med en stetoskopliknande givare och effusivitet är nära kopplat till termisk konduktivitet. Ett problem med VIP är att de har ett termiskt ledande ytskikt, vilket snabbt sprider värme. Som en följd av detta ska dessa mätningar främst ses som jämförande. Man kan till exempel skilja hela från defekta paneler med metoden.

4 Resultat

4.1 Förtillverkade traditionella FV-ledningar

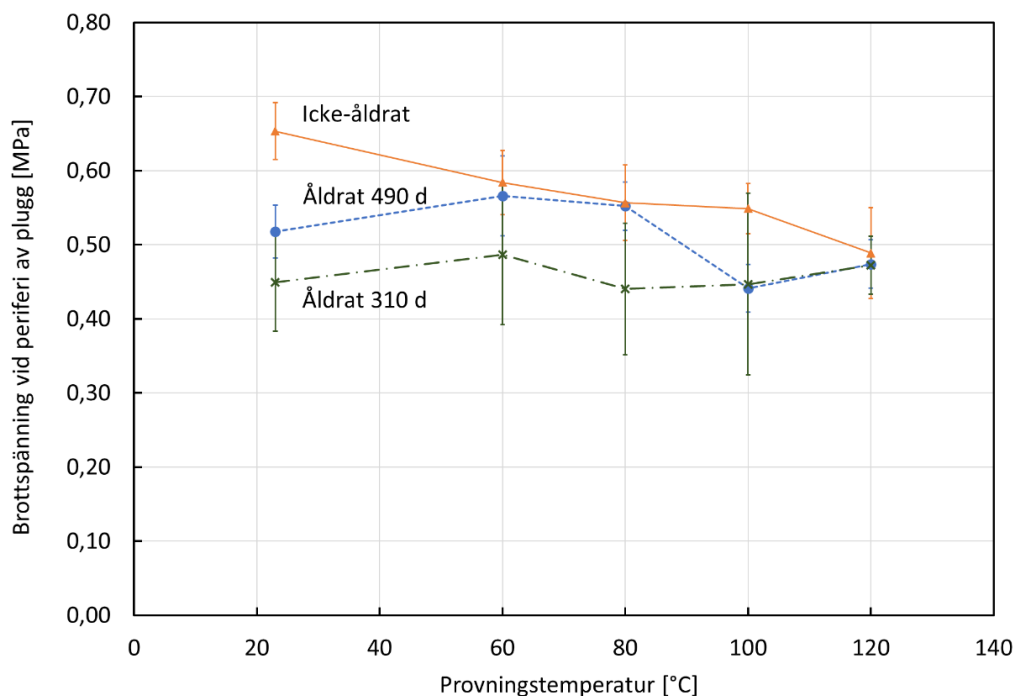
4.1.1 Skjuvhållfasthetens temperaturberoende

Användningen av RISE-pluggmetoden i fält utan att störa driften innebär att mätningarna utförs vid olika driftstemperaturer. Eftersom skjuvhållfastheten varierar med temperaturen, var en av uppgifterna att undersöka effekten av driftstemperaturen på vidhäftningsstyrkan för att ta fram en korrelation mellan resultat från mätningar vid olika driftstemperaturer och laborietemperatur. I laborieundersökningen har tre nytillverkade förtillverkade FV-ledningar av dimension DN50 / Ø140 mm med längd 3,7 m använts. Samtliga prov kapades till från en och samma ledning, vilket var tillverkat av Powerpipe Systems AB genom enstyckstillverkning. Två av ledningarna har utsatts för accelererad åldring genom att medieröret hölls vid en konstant temperatur av 140 °C medan den omgivande temperaturen har varit 23 °C. Uppvärmningen har skett med elektrisk ström som leds genom medieröret. Den accelererade åldringen pågick i minst 6 månader. Avsikten var att nedbrytningsprocessen skulle fortgå tills statusen (skjuvhållfastheten) hos ledningarna hade passerat en initial fas och nått en platåfas med konstant nivå. Platåfasen kan vara under lång tid och då sker ingen förändring av statusen med avseende på skjuvhållfastheten. Förändringar av molekylstrukturen hos isoleringen har under denna fas dock tidigare observerats med kemisk analys enligt Vega m. fl. (2018).

RISE pluggmetod har använts för att studera skjuvhållfasthetens temperaturberoende hos både nya och åldrade ledningar. Fem temperaturnivåer valdes: 23, 60, 80, 100, och 120 °C. Ledningarna värmdes med elektrisk ström till den önskade nivån och fick stabilisera sig under ett tidsförlopp på 1-2 timmar. Ett antal provtagningar gjordes bredvid varandra på en generatris längs med ledningen. Det behövs ca sju prov för att få ett medelvärde med acceptabel mätosäkerhet. En provserie med fem temperaturnivåer på ett specifikt ledning gjordes under 1-2 dagar.

Provningsresultaten visas i Figur 17. Tre ledningar har provats: ett jungfruligt och två som har utsatts för accelererad åldring under 310 respektive 490 dygn. Det jungfruliga visar en avtagande tendens hos skjuvhållfastheten vid ökande temperatur. De åldrade visar inte på någon sådan tendens. Det visade sig att det behövdes ta fler prover än 6-7 stycken för att få ned mätosäkerheten hos medelvärdet av skjuvhållfastheten vid försöken. För ledningen åldrad i 310 dygn blev mätosäkerheten hög då antalet prov var 6-7 stycken vid varje temperatur.

För övriga ledningar genomfördes dubbelt så många prov vid varje temperatur, och en mindre mätosäkerhet erhöles. Vid varje provning togs proven i närheten av varandra för att minimera effekten av densitetsvariationer hos PUR isoleringen längs med ledningen och därmed få en lägre mätosäkerhet. Två mätserier genomfördes för de två ledningarna med lägre mätosäkerhet. Positionerna har valts olika för de två mätserierna, men resultaten för respektive temperatur har vägts samman. Variationerna längs med ledningen bedöms vara av samma storleksordning som de variationer som erhålls då provningstemperaturen varierar.



Figur 17: Brottspänning vid varierande temperatur hos tre olika ledningar uppmät med pluggmetoden

4.1.2 Korrelation mellan RISE pluggmetod och axiell metod

Flera prov har utförts för att få en korrelation mellan resultat från RISE pluggmetod och axiell skjuvhållfasthet. De ledningar som användes för att studera temperaturberoende har också använts för korrelationen. Samtliga provningar i denna jämförelse har utförts vid laborietemperaturen 23 °C.

RISE pluggmetod har använts för att prova ledningar som har åldrats naturligt under användning eller efter accelererad åldring i laboriet. Provningsen har utförts vid temperaturen 23 ± 2 °C. Den del av ledningen som inte påverkats av någon tidigare provning sågades upp i bitar med längd 200 mm. Åtminstone fem provbitar tillverkades för den axiella skjuvhållfasthetsprovningsen. Brottspänningar uppmätta med RISE pluggmetod och med den axiella metoden redovisas i Tabell 2.

Tabell 2: Resultat för brottspänning uppmätt med RISE pluggmetod och axiell metod

Plats	År	Brottspänning [MPa] plugg		Mätosäkerhet plugg		Brottspänning [MPa] Axiellt		Mätosäkerhet Axiellt		Kvot	
		Fram	Retur	Fram	Retur	Fram	Retur	Fram	Retur	Fram	Retur
Ny ledning	2019	0,69		6,2%		0,30		4,7%		2,3	
Kruthusgatan	1982	0,71	0,70	24%	4,5%	0,28	0,20	6,3%	2,9%	2,5	3,5
Rondo		0,73	0,35	10%	23%	0,19	0,21	24%	28%	3,8	1,7
Icke-åldrat	2020	0,65		5,9%		0,20		17%		3,3	
Artificiellt åldrat 310 d	2020	0,45		15%		0,16		8,3%		2,7	
Artificiellt åldrat 490 d	2021	0,52		6,9%		0,14		35%		3,7	
Sofierogatan	1981	0,50	0,25	17%	10%	0,13	0,06	20%	13%	3,9	3,9

Kvoten mellan brottspänning uppmätt med pluggmetoden och den axiella metoden varierar något. Ett medelvärde av kvoten viktat med avseende på mätosäkerhet blir 3,1. Ett oviktat medelvärde av kvoterna ger ett likvärdigt resultat.

4.1.3 Fältmätningar

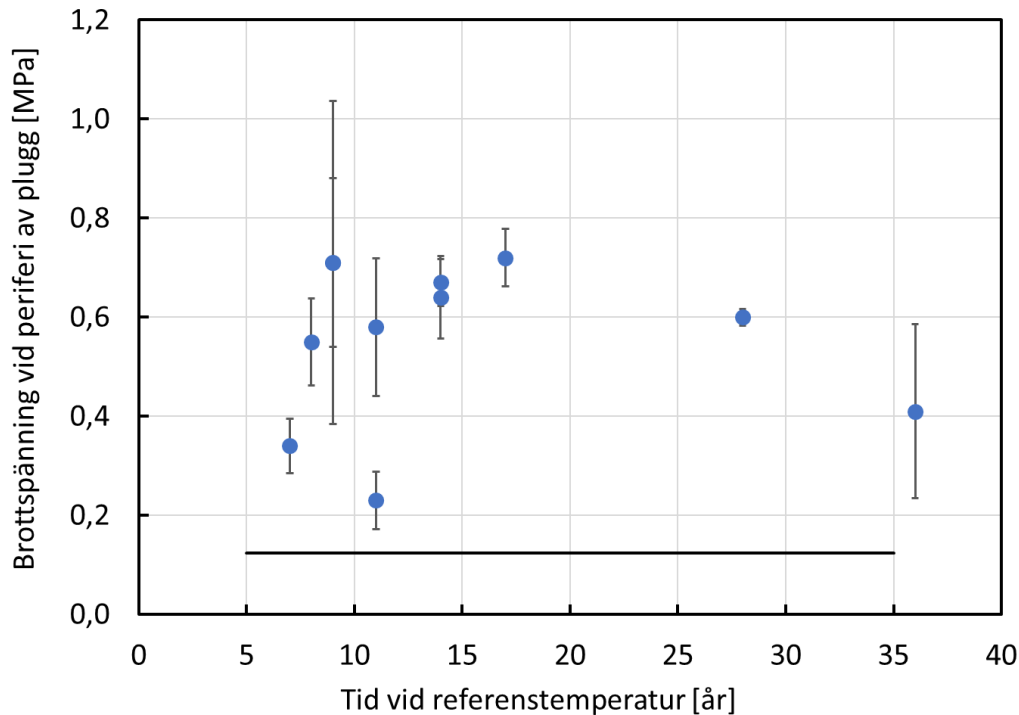
Många naturligt åldrade ledningar har provats med RISE pluggmetod i fält vid drift. I några fall har provningen skett i fält när nätet har varit avstängt och i andra fall i laboratoriet på ledningar som tagits bort från FV-nätet. Mätresultaten redovisas i Tabell 3. En nedre gräns för en acceptabel axiell skjuvhållfasthet har bedömts vara 0,040 MPa, se diskussionen i Avsnitt 3.4.1. Värdet kan jämföras med kravet 0,120 MPa för nyttillverkade ledningar i EN 253 (2019).

Experimentellt har ett samband fastställts mellan skjuvhållfasthet mätt med RISE pluggmetod och axiell skjuvhållfasthet (se Avsnitt 4.1.2) En kvot beräknades mellan resultaten från dessa metoder till 3,1. Acceptabel skjuvhållfasthet mätt med RISE Pluggmetod blir då 0,124 MPa (vilket motsvarar 0,04 MPa mät med den axiella metoden).

Med denna bakgrund framgår att inget av provställena uppvisar för låg skjuvhållfasthet, se Tabell 3 och även Figur 18. I tre fall är marginalen mellan uppmätt och tillåtet värde, så pass liten att en noggrannare analys av ledningarna bör göras.

Tabell 3: Mätresultat för naturligt åldrade FV-ledningar. Mätningarna har utförts på plats vid drift, på plats efter avstängning och i laboratorium. Detta framgår av temperaturerna hos medieröret vid provning. Provning i laboratoriet sker vid 23 °C, vid lägre temperaturer är det avstängt och vid högre är ledningarna i drift

Plats	Datum	År	Temperatur vid provning [°C]		Brottspänning [MPa]		Mätosäkerhet [%]		Nedre gräns brottspänning [MPa]	
			Fram	Retur	Fram	Retur	Fram	Retur	Fram	Retur
	Provning	Inst.								
Linköping	2019-09-17	1996	6	6	0,58	0,59	24	40	0,44	0,35
Jönköping	2019-10-18	2006	10	10	1,0	0,92	22	27	0,78	0,67
Ängelholm	2019-10-22	1979	78	43	0,64	0,46	13	34	0,56	0,30
Uppsala	2019-11-27	1990	72	47	0,55	0,51	16	20	0,46	0,41
Göteborg	2020-04-12		23	23	0,73	0,35	10	23	0,66	0,27
Göteborg	2020-04-17	1982	23	23	0,71	0,70	24	4,5	0,54	0,67
Göteborg	2020-06-12	1987	78	54	0,72	0,54	8	10	0,66	0,49
Göteborg	2020-08-03	1982	67	32	0,71	0,67	46	16	0,38	0,56
Ängelholm	2020-09-17	1980	68	40	0,23	0,56	25	13	0,17	0,49
Göteborg	2021-04-15	1981	23	23	0,50	0,25	17	10	0,42	0,22
Stockholm	2021-06-09	1993	23		0,51		15		0,43	
Lund	2021-06-29	1975	70	40	0,34	0,44	16	16	0,29	0,37
Jönköping	2021-06-30	1983	75	52	0,41	0,56	43	19	0,23	0,45
Jönköping	2021-06-30	1991	67	42	0,60	0,62	2,8	12	0,58	0,55
Lund	2021-11-19	1980	23	23	0,67	1,41	7,1	6,4	0,62	1,32



Figur 18: Brottspänning (skjuvhållfasthet) i framledningar beräknad av uppmätt vridmoment, som funktion av omräknad drifttid vid referenstemperatur 95 °C. Osäkerhet hos värdena är markerade. Förslag till minsta tillåtna brottspänning markerad med svart linje

Detta gäller alltså en returledning från Göteborg installerad 1981 och de andra är framledningar från Ängelholm och Jönköping installerade 1980 respektive 1983. Framledningarna återfinns i Figur 18 med Ängelholm 1980 med drifttid 11 år vid referenstemperaturen 95 °C och brottspänning (skjuvhållfasthet) 0,23 MPa samt Jönköping 1983 med 36 år och 0,41 MPa. Motsvarande nedre gränser är 0,17 respektive 0,23 MPa då hänsyn tas till mätosäkerhet. Dessa ska jämföras med tillåten spänning på 0,124 MPa mätt med RISE pluggmetod.

Drifttiden har räknats om med metoden i Avsnitt 3.4.2 till tid vid 95 °C. Brottspänningar ges som funktion av den omräknade drifttiden i Figur 18 och även i Tabell 4. I tabellen finns även en motsvarande drifttid vid 55 °C för returledningarna. I Figur 19 har även ledningar, som provats tidigare av Vega m. fl. (2020a) i laboratoriet tagits med. I nästa steg så används brottspänningen hos returledningen, som referens för framledningens initialtillstånd.

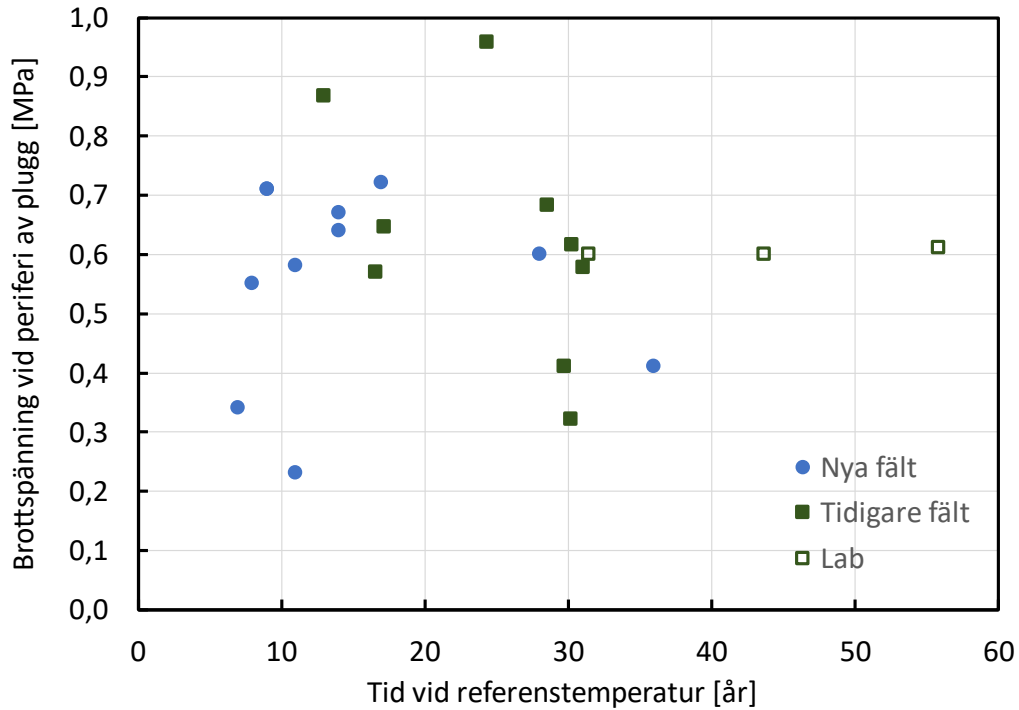
I Figur 20 ges kvoten av brottspänningarna för fram- och returledning, som funktion av framledningens omräknade drifttid vid 95 °C. Mätresultaten pekar på en mer tydlig nedåtgående trend än i Figur 19. I Figur 20 ser vi alltså bara på nedbrytningen av framledningen, men använder returledningen som en referens.

Tabell 4: Ytterligare mätresultat för naturligt åldrade FV-ledningar, se Tabell 3. Här finns servicetid för valda referenstemperaturer, brottspänning som tidigare och index från FTIR. Index är en kvot mellan isoleringsmaterial hämtat 2 mm och 20 mm från medierör

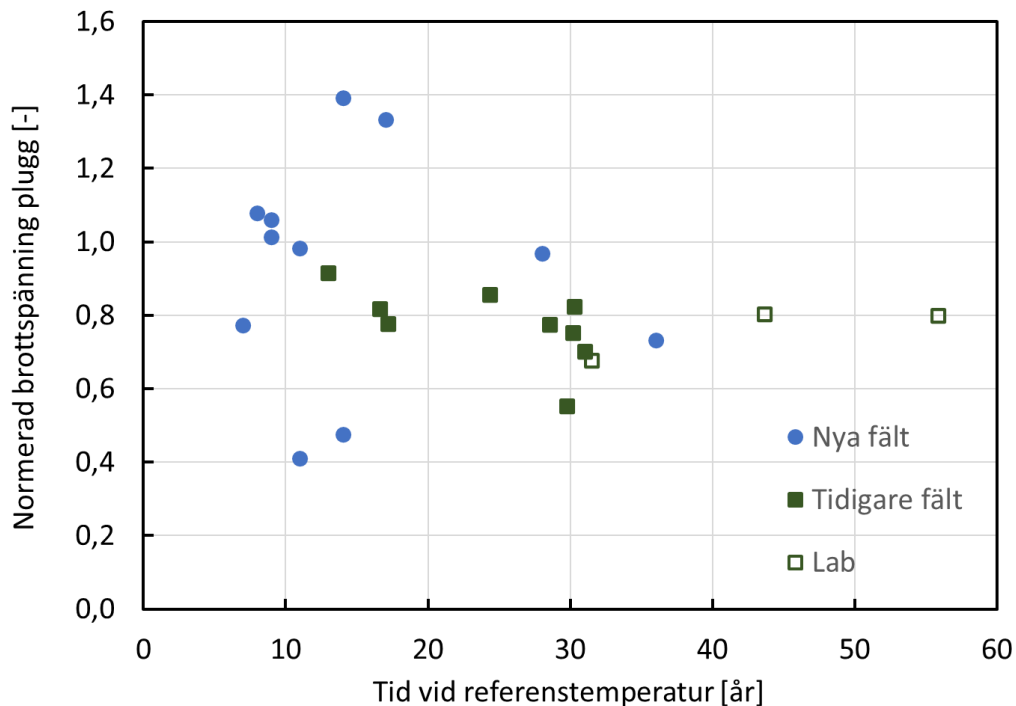
Plats	År	År vid		Brottspänning [MPa]		Fall	Index vid 1712 cm ⁻¹		Index vid 1512 cm ⁻¹	
		95°C	55°C	Fram	Retur		Fram	Retur	Fram	Retur
Linköping	1996	11	4	0,58	0,59	2	0,62	0,99	0,87	0,99
Jönköping	2006			1,00	0,92	2	1,11	0,95	0,98	0,95
Ängelholm	1979	14	20	0,64	0,46	3	0,76	0,91	0,84	0,91
Uppsala	1990	8	8	0,55	0,51	2	0,83	0,94	0,92	0,94
Göteborg				0,73	0,35	3				
Göteborg	1982	9	12	0,71	0,70	2	0,84	0,85	0,84	0,90
Göteborg	1987	17	45	0,72	0,54	3	0,70	0,99	0,66	0,96
Göteborg	1982	9	12	0,71	0,67	2	0,80	0,91	0,81	0,92
Ängelholm	1980	11	16	0,23	0,56	1	0,80	0,93	0,81	0,93
Göteborg	1981	68	272	0,50	0,25	3	0,85	0,63	0,94	0,71
Stockholm	1993			0,51						
Lund	1975	7	3	0,34	0,44	1	0,63	0,91	0,60	0,94
Jönköping	1983	36	27	0,41	0,56	1	0,55	0,86	0,61	0,96
Jönköping	1991	28	22	0,60	0,62	2	0,72	0,73	0,91	0,94
Lund	1980	14	15	0,67	1,41	1	0,70	0,86	0,68	0,96

Returledning från Göteborg installerad 1981, som var i dåligt skick, är inte med i dessa diagram. Framledningen från Ängelholm installerade 1980 har en jämförelsetid på 11 år och återfinns i Figur 19 med nivån 0,23 MPa och i Figur 20 med 0,41. Framledningen från Jönköping installerad 1983 har jämförelsetid 36 år med nivån 0,41 MPa i Figur 19 och 0,73 i Figur 20.

Resultaten i Figur 20 visar att den kvarvarande vidhäftningsstyrkan hos äldre ledningar ligger ungefär på samma nivå, mellan 70 och 90 % av motsvarande värde för returledningen, oavsett ålder. Detta bekräftar tidigare resultat från accelererade åldringstester, vilka antydde att vidhäftningsstyrkan förblir konstant (benämnd som plåtåfas) under en mycket lång tid (längre än 30 år).



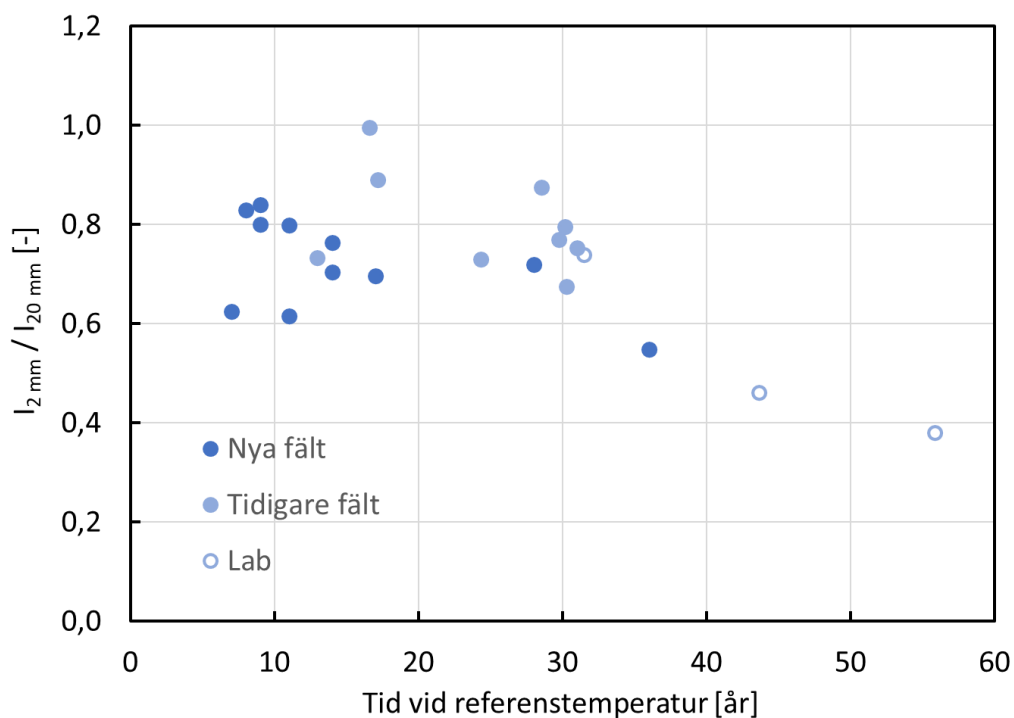
Figur 19: Brottspänning i framledningar beräknad av uppmätt vridmoment, som funktion av omräknad drifttid vid referenstemperatur 95 °C. Tidigare mätningar från fältprov gjorda av Vega m. fl. (2020a) i laboratoriet har markerats med gröna fyrkanter. Tidigare mätningar på ledningar åldrade i laboratoriet har markerats med icke fyllda fyrkanter



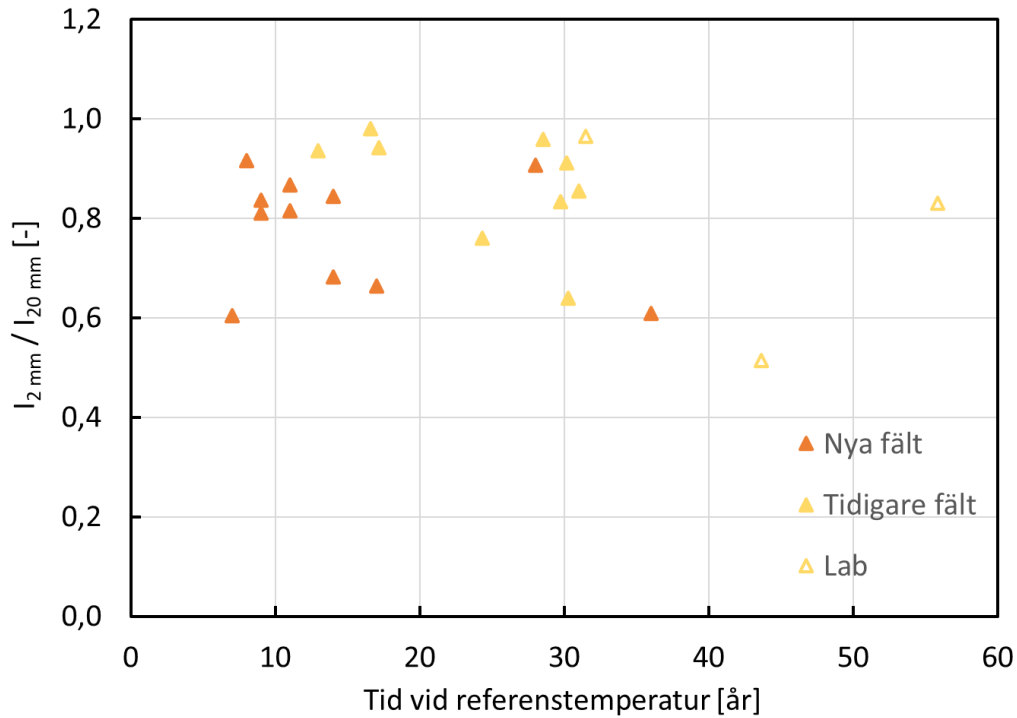
Figur 20: Brottspänning i framledningar normerad med brottspänningen hos tillhörande returledningar beräknad, som funktion av omräknad drifttid vid referenstemperatur 95 °C. Tidigare mätningar från fältprov gjorda av Vega m. fl. (2020a) i laboratoriet har markerats med gröna fyrkanter. Tidigare mätningar på ledningar åldrade i laboratoriet har markerats med icke fyllda fyrkanter

4.1.4 FTIR analys av prover tagna i fält

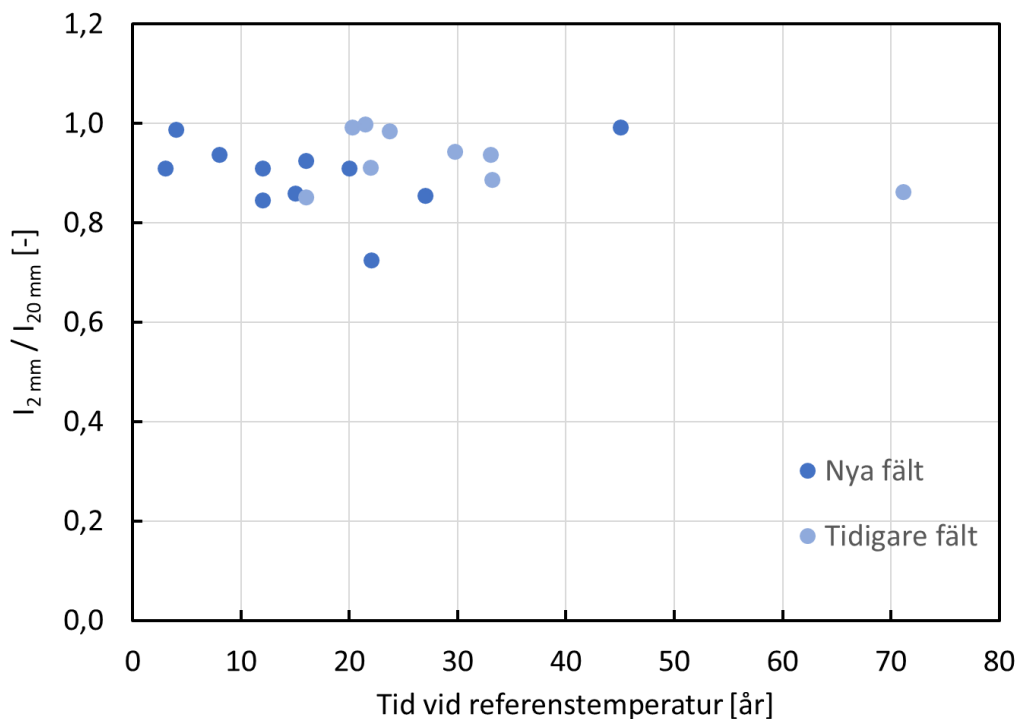
PUR skum från framledningen och returledningen har analyserats var för sig. Nedbrytningen studeras genom att mäta absorptionsindex (IR-index) vid vågtalen 1712 cm^{-1} och 1512 cm^{-1} , som representerar uretanbindningarna C=O respektive N-H. Skum som tas nära medieröret, 2 mm ifrån, och skum som tas långt ifrån medieröret, 20 mm ifrån, har analyserats. Kvoter mellan absorptionsindex för prov tagna på dessa positioner från en ledning bildas för de nämnda vågtalen. Resultaten för framledningen visas i Figur 21 och Figur 22. Här finns spridda resultat, när tidigare äldre resultat har tagits med. De resultat som kommer ifrån de nya mätningarna gjorda i detta projekt visar en nedåtgående trend med den omräknade drifttiden. I Figur 23 och Figur 24 visas motsvarande resultat för returledningen. Dessa resultat visar en relativt konstant nivå mellan 0,8 och 1, vilket förväntas eftersom returtemperaturerna är betydligt lägre och orsakar inte nedbrytning. Framledningen från Ängelholm som var i dåligt skick, återfinns i Figur 21 och Figur 22 vid jämförelsetiden 11 år och nivåerna 0,80 och 0,81 för vågtalen 1712 cm^{-1} respektive 1512 cm^{-1} . Framledningen från Jönköping återfinns i Figur 21 och Figur 22 vid jämförelsetiden 36 år och nivåerna 0,55 och 0,61 för vågtalen 1712 cm^{-1} respektive 1512 cm^{-1} tyder på betydande nedbrytning.



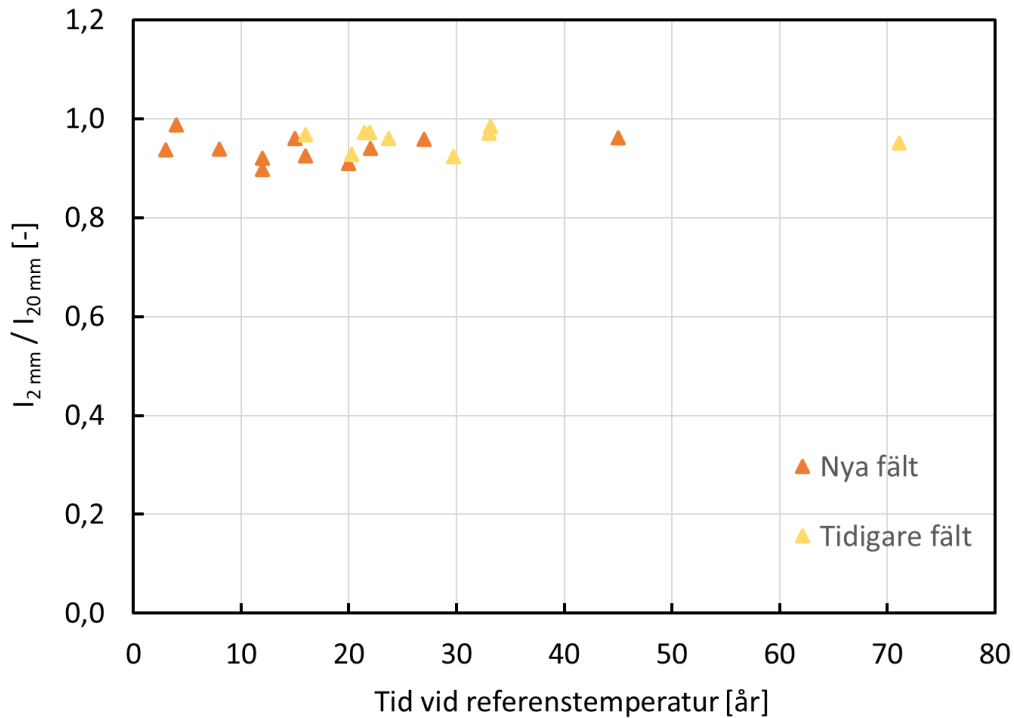
Figur 21: Kvot av absorptionsindex för vågtal 1712 cm^{-1} av PUR-skum nära medierör (2 mm ifrån) och opåverkat skum långt från medierör (20 mm) hos undersökta framledningar, som funktion av omräknad drifttid vid referenstemperatur 95 °C . Tidigare mätningar från fältprov av Vega m. fl. (2020a) har markerats med ljusare ton. Tidigare mätningar på ledningar åldrade i laboratoriet har markerats med icke fyllda cirklar



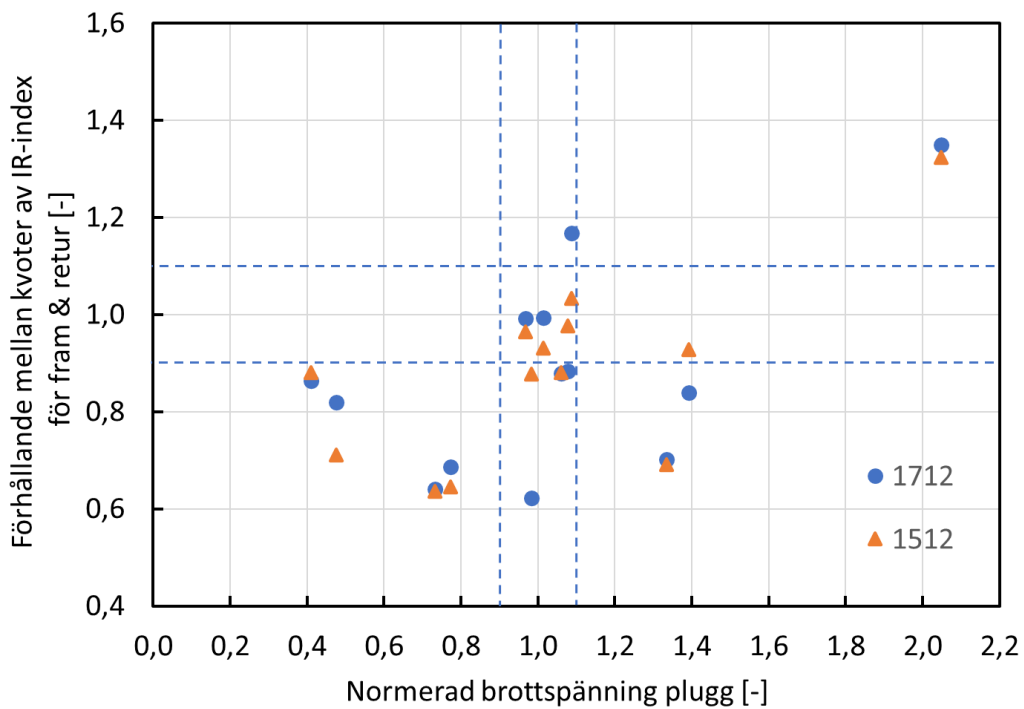
Figur 22: Kvot av absorptionsindex för vågtal 1512 cm^{-1} av PUR-skum nära medierör (2 mm ifrån) och opåverkat skum långt från medierör (20 mm) hos undersökta framledningar, som funktion av omräknad driftstid vid referenstemperatur 95 °C . Tidigare mätningar från fältprov av Vega m. fl. (2020a) har markerats med ljusare ton. Tidigare mätningar på ledningar åldrade i laboratoriet har markerats med icke fyllda trianglar



Figur 23: Kvot av absorptionsindex för vågtal 1712 cm^{-1} av PUR-skum nära medierör (2 mm ifrån) och opåverkat skum långt från medierör (20 mm) hos undersökta returledningar, som funktion av omräknad driftstid vid referenstemperatur 55 °C . Tidigare mätningar från fältprov av Vega m. fl. (2020a) har markerats med ljusare ton



Figur 24: Kvot av absorptionsindex för vågtal 1512 cm^{-1} av PUR-skum nära medierör (2 mm ifrån) och opåverkat skum långt från medierör (20 mm) hos undersökta returledningar, som funktion av omräknad driftstid vid referenstemperatur 55 °C . Tidigare mätningar från fältprov av Vega m. fl. (2020a) har markerats med ljusare ton



Figur 25: Förhållande mellan kvoter av IR-index för fram- och returledning som funktion av normerad brottspänning dvs förhållande mellan brottspänning (vidhäftningsstyrka) för fram- och returledning

Vega m. fl. (2020a) beräknade relativa värden av vidhäftningsstyrkan för att direkt kunna jämföra värden från olika naturligt åldrade FV-ledningar. Förhållandet av vidhäftningsstyrkan (brottspänningen, skjuvhållfasthet) hos fram- och returledningen beräknades, då returledning betraktades som en referens. Det innebär att om förhållandet ligger tydligt under 1 så har framledningen en reducerad vidhäftningsstyrka jämfört med returledningen, se Fall 1 i Tabell 4. Är värdet ungefär 1 har ingen förändring skett, se Fall 2 i Tabell 4. För att dessutom ta reda på om reducerad vidhäftning beror på kemisk nedbrytning av PUR har vi analyserat PUR, som befunnit sig nära medieröret (2 mm ifrån) med FTIR (se Avsnitt 3.4.3) genom att beräkna IR-index för toppar vid 1712 cm^{-1} och 1512 cm^{-1} , som tillhör bindningar i uretanguppen, se Figur 10. Kvoter av IR-index för PUR taget 2 mm och 20 mm ifrån medieröret bildades för respektive ledning. Förhållandet mellan kvoterna för fram- och returledningen studerades. Om IR-förhållandet ligger tydligt under 1 samtidigt som tillhörande förhållande för vidhäftningen också ligger under 1, så tolkar vi det som en bekräftelse på att kemisk nedbrytning är orsaken till förlusten av vidhäftningen. I diagrammet i Figur 25 sammanfattas resultaten från naturligt åldrade ledningar som listas i Tabell 3 och Tabell 4.

Det syns i diagrammet att tre ledningar avviker från de förväntade resultaten vad gäller vidhäftning, se Fall 3 i Tabell 4. Resultatet längst upp till höger härrör från ledningar från "Göteborg 1981" och visar att medan framledningen är lite åldrad så har returledningen fått en kraftigt reducerad vidhäftningsstyrka. Även IR resultatet och okulär besiktning visar på en betydande kemisk nedbrytning hos returledningen. De två andra fallen som har förhållande av vidhäftningen större än 1,1 samtidigt som IR-förhållandena är mindre än 1. Detta betyder att returledningen har lägre vidhäftning än framledningen, samtidigt som IR resultaten visar på att det inte har skett kemisk nedbrytning av returledningen, men viss nedbrytning av framledningen. Orsaken kan vara att fram- och returledning inte är producerade vid samma tillfälle eller är två olika produkter. Ytterligare en punkt faller lite utanför med ett förhållande av vidhäftningsstyrka på nära 1, trots att IR-förhållanden tyder på nedbrytning av framledning.

4.1.5 Isoleringsförmåga hos polyuretanskum

Placering av givare, effekt av åldrat PUR samt temperaturens inverkan på resultat

Initiala studier av TLS-givarens placering i PUR visade att så länge avståndet mellan givare och mantel eller medierör är större än 5 mm har dessa ingen påverkan på resultaten. Då givaren kommer för nära en av dessa gränser kommer ett högre värde än väntat att uppmätas. Det är alltså möjligt att direkt i en mätning se om placeringen av givaren är bra.

I samma studie kunde det fastslås att metoden kan skilja på jungfruligt och åldrat prov. I detta fall jämfördes två delar av samma ledning, en jungfrulig del och en laboratorieåldrad del, se Figur 26. Resultaten visade i detta fall en ca 8 % högre termisk konduktivitet i det åldrade provet, se Tabell 5.

Tabell 5: Termisk konduktivitet i PUR från jungfrulig och åldrad ledning

Mätpunkt	Termisk konduktivitet [W/m/K]	
	PUR från jungfrulig ledning	PUR från åldrad ledning
1	0,024 ± 0,000	0,027
2	0,790 ± 0,019	1,166
3	0,028 ± 0,000	0,029
4	0,025 ± 0,000	0,027
5	0,025 ± 0,000	0,027
6	0,025 ± 0,000	0,026
7	0,026 ± 0,000	0,027
8	0,030 ± 0,000	0,031


Figur 26: Jungfruligt ledning och TLS-givare (vänster). Åldrad ledning från samma produktionstillfälle (höger). Mätpunkter inringade och numrerade

Utöver ovan presenterade data genomfördes ytterligare mätserier för att jämföra oåldrat och åldrat PUR. Dessa mätningar bekräftade ovanstående trend, och av utrymmesskäl är inte all mätdata publicerad.

I fortsatta studier undersöktes hur resultaten med TLS-givaren varierar med temperatur. I detta fall genomfördes mätningar först vid 50 °C i värmeskåp, sedan vid rumstemperatur om 22 °C. I samband med detta undersöktes även om det var möjligt att återanvända redan använda hål för upprepade mätningar, det vill säga åter föra ner givare in ett gammalt hål.

I Tabell 6 kan man se att den termiska konduktiviteten ökar med temperaturen, vilket är det förväntade beteendet. Det framgår även att gamla hål inte bör användas igen då resultaten uppmätt där i samtliga fall visar högre värden än de gör i färska hål. Vad detta beror på är inte helt känt, men troligen är det kopplat till givarens kontakt med PUR och ytan i hålet.

Tabell 6: Uppmätt termisk konduktivitet vid två temperaturer

Prov	50 °C, Termisk konduktivitet [W/m/K]	22 °C, Termisk konduktivitet [W/m/K]*	Skillnad [W/m/K] mellan 22 °C och 50 °C*
Rör 1	0,0280	0,0265 / 0,0253	0,0015 / 0,0027
Rör 2	0,0278	0,0272 / 0,0258	0,0006 / 0,0020
Rör 3	0,0286	0,0276 / 0,0266	0,0010 / 0,0020
Rör 4	0,0269	0,0257 / 0,0247	0,0011 / 0,0023

*Samma hål som vid 50 °C / nytt hål

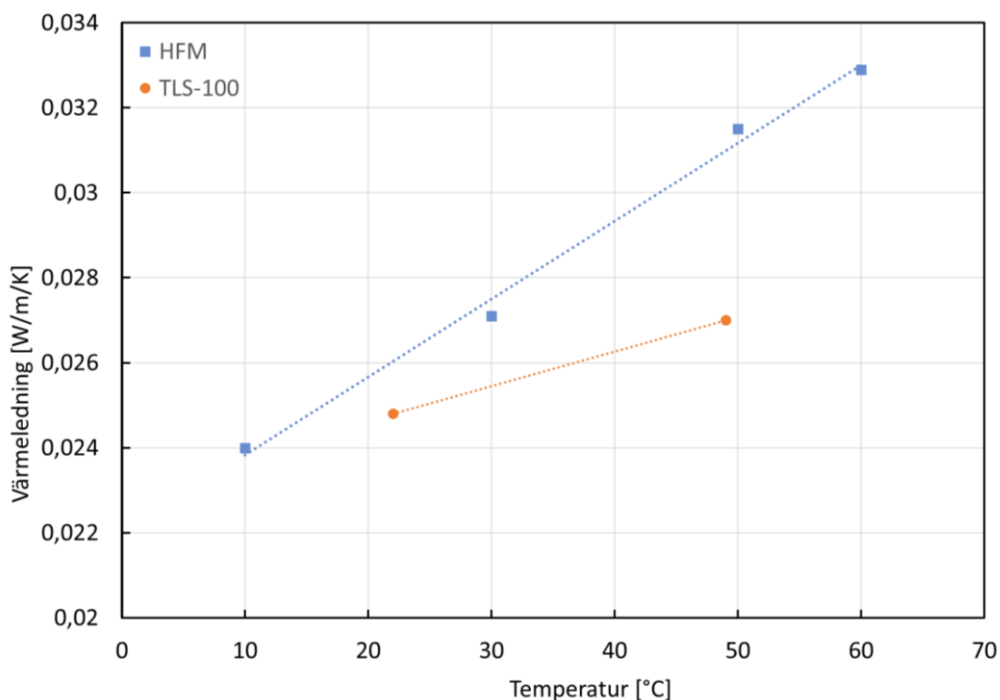

Figur 27: Mätpunkter använda för att jämföra resultat vid 22 °C och 50 °C

Samtliga ledningar i denna studie tillhandahölls av RISE och var märkta som prov 1, 2, 3 och 4. Mätpunkter valdes enligt Figur 27. Punkt 1 och 2 användes för mätningar vid 50 °C samt mätningar vid 22 °C. Punkt 3 användes endast vid 22 °C för att se skillnaden mellan nytt och gammalt hål. Presenterade data är medelvärden av upprepade mätningar. I samtliga fall genomfördes mätningarna först vid 50 °C.

Jämförelse mellan resultat från TLS-givare och traditionell plattapparat

För att undersöka TLS-givarens mätnoggrannhet genomfördes mätningar med både TLS-100 och en Heat Flow Meter (HFM) plattapparat. En HFM fungerar enligt standard EN 12667 (2001) och är avsedd att testa isolerande prover. I detta fall testades en friskummad skiva PUR först i HFM sedan med TLS-100. På detta sätt kan en traditionell stationär metod jämföras med den transienta TLS-metoden. Mätningar med HFM sker i HFM-instrumentets interna kammare och TLS-mätningarna görs i rumstemperatur samt i värmeskåp.

Det testade provet var en skiva av PUR av storlek 300 x 300 x 50 mm. I Figur 28 presenteras mätresultat. Det framgår att TLS och HFM ger snarlika resultat vid 20 °C, men vid 50 °C tycks TLS-givaren underskatta provets konduktivitet. Denna underskattning är troligen kopplad till TLS-instrumentets kalibrering eller alternativt till förändring av kontakten mellan prov och givare vid temperaturhöjningen.



Figur 28: Jämförelse mellan termisk konduktivitet i PUR uppmätt med HFM och TLS-100

Resultat av fältmätningar

Efter mätningar i kontrollerad miljö genomfördes ett antal tester i fält i Göteborg, Lund och Jönköping. I dessa fall kombinerades TLS-mätningar med RISE pluggmetod och givaren fördes in PUR genom plugghål enligt Figur 29. Det kan noteras att resultaten skiljer sig från ledning till ledning, men generellt så betyder högre temperatur högre konduktivitet. I vissa fall skiljer sig första mätningen i en viss mätpunkten från följande mätningar. Detta beror på att temperaturen i givaren inte hunnit stabilisera sig innan första mätningen startades. För följande mätningar har stationär givartemperatur uppnåtts. Resultaten från fältmätningar sammanfattas i Tabell 7 - Tabell 10. Kravet termisk konduktivitet i EN 253 (2019) är att den inte ska överstiga 0,029 W/(m K).



Figur 29: Mätning av termisk konduktivitet i fält

Tabell 7: Mätningar av termisk konduktivitet [W/(m K)] i fält vid driftstemperatur i Göteborg 2021-03-30 och efterföljande mätningar i laboratoriet vid 23 °C. Mätningarna är gjorda på samma ledningar vid två positioner 1 och 2

	Fram 1 vid		Fram 2 vid	Retur 1 vid		Retur 2 vid
	87 °C	23 °C	23 °C	48 °C	23 °C	23 °C
#1	0,0265	0,0282	0,0261	0,0282	0,0259	0,0293
#2	0,0283	0,0248	0,0260	0,0251	0,0245	0,0280
#3		0,0253		0,0251	0,0261	0,0282
#4		0,0257			0,0260	

Tabell 8: Två på varandra följande mätningar av termisk konduktivitet λ i fält i Lund 2021-06-29. Även temperaturen T i isoleringen mäts

	Fram vid 70 °C		Retur vid 50 °C	
	λ [W/(m K)]	T [°C]	λ [W/(m K)]	T [°C]
#1	0,0273	58	0,0272	50
#2	0,0282	63	0,0270	51

Tabell 9: Två på varandra följande mätningar av termisk konduktivitet λ i fält i Jönköping (Industrigatan) 2021-06-30. Även temperaturen T i isoleringen mäts

	Fram vid 75 °C		Retur vid 52 °C	
	λ [W/(m K)]	T [°C]	λ [W/(m K)]	T [°C]
#1	0,0277	50	0,0267	37
#2	0,0274	50	0,0267	36

Tabell 10: Två på varandra följande mätningar av termisk konduktivitet λ i fält i Jönköping (Västra Storgatan) 2021-06-30. Även temperaturen T i isoleringen mäts

	Fram vid 67 °C		Retur vid 42 °C	
	λ [W/(m K)]	T [°C]	λ [W/(m K)]	T [°C]
#1	0,0322	50	0,0306	32
#2	0,0318	45	0,0308	34

Mätningar på fuktskadat respektive mycket gammal ledning

Som komplement till ovanstående mätningar genomfördes även tester på dels ett fuktskadad ledning, dels en mycket gammal ledning med numera förbjuden cellgas. Det fuktskadade ledningen innehöll så mycket vatten att vatten trängde ut när nålen fördes in i vissa positioner. Ledningen hade förvarats horisontellt för att behålla sina egenskaper. Mätningar med TLS-100 genomfördes i tre positioner för att studera vattnets påverkan på PURs isoleringsförmåga. Mätpositionerna var: botten (1), toppen (2), och ena sidan (3), i enlighet med Figur 30. Mätningar i position 1 resulterade i ett värde motsvarande rent vatten. Detta betyder att isoleringen måste vara helt mättad av vatten. Även i position 3 uppmättes mycket hög konduktivitet, nästan i nivå med position 1. I position 2 mättes istället ett värde som kan anses vara normalt för en ådrad FV-ledning. Detta betyder att ledningen är vattenmättad upp till och förbi position 3 men torrt i position 2. Skillnaden mellan position 1 och position 2 är alltså en faktor 20, se Tabell 11. Vatten i PUR-isoleringen är således mycket skadligt för isoleringsförmågan. Det är även troligt att mätningar med denna metod kan avgöra hur omfattande en vattenskada är. Observera, för att en vattenskada inte ska missas bör mätningar av detta slag ske i ledningens undre del där vatten samlas.

Tabell 11: Termisk konduktivitet i vattenskadad ledning

Position i isolering	Termisk konduktivitet [W/m/K]
1	0,586
2	0,0305
3	0,596



Figur 30: Vänster, schematisk sidovy med mätpositioner markerade. Uppskattad vattenmättnad upp till nivå mellan 2 och 3. Höger, bild av faktiskt prov med givare monterad i position 3

Tabell 12: Termisk konduktivitet i FV-ledning producerat för ca 40 år sedan

Position i isolering	Termisk konduktivitet [W/m/K]
1	0,0240
2	0,0248
3	0,0244

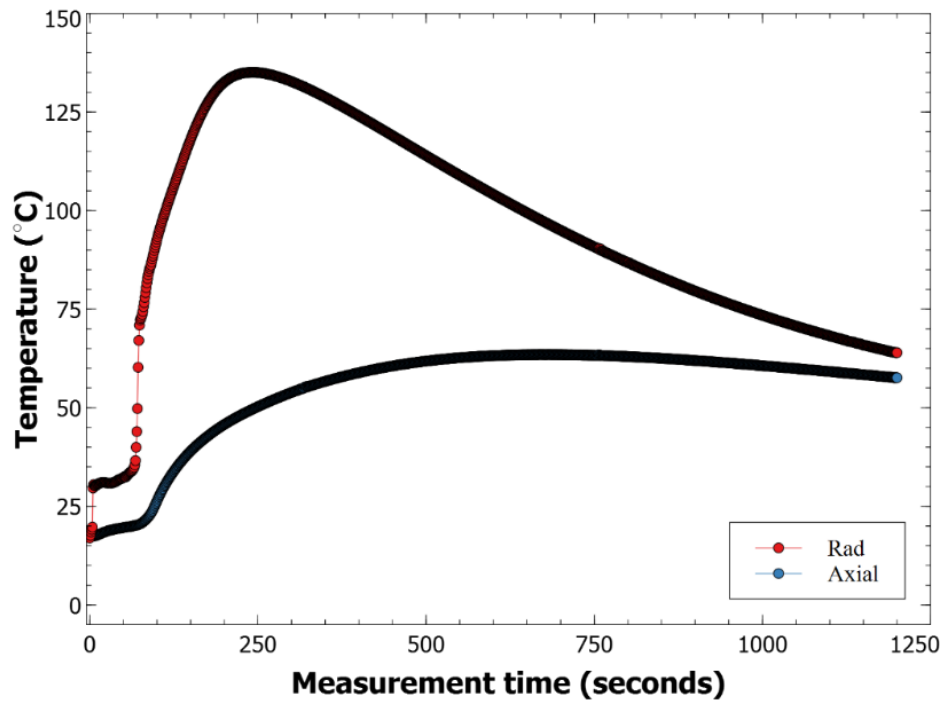

Figur 31: Ca. 40 år gammal ledning

Den gamla ledningen producerades för cirka 40 år sedan. Den är till synes i gott skick med torr isolering som dock är missfärgad efter många år i tjänst. Mätningar genomfördes även i detta prov vid tre olika positioner: botten (1), toppen (2) och sidan (3). Förvånande nog visade resultaten från samtliga positioner oväntat låg termisk konduktivitet. Den rimligaste förklaringen är den cellgas, troligen CFC-11 (chloro-fluoro-carbon), som användes vid tiden produktionen av ledningen. Dessa tunga och nu förbjudna gaser kan inte lämna strukturen över tid på samma sätt som koldioxid gör och har lägre termisk konduktivitet än cyklopentan i moderna ledningar. Ledningen visas i Figur 31 och mätdata presenteras i Tabell 12.

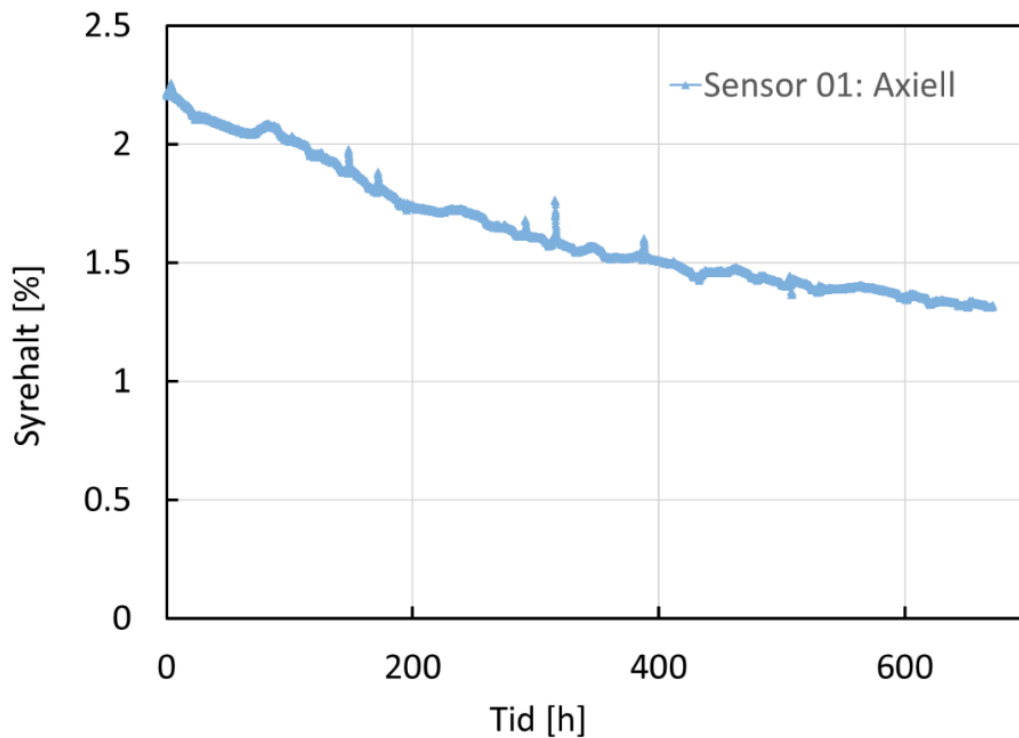
4.1.6 Syrehaltsmätningar

Ett första försök att gjuta in två syresensorer samt två termoelement i en FV-ledning genomfördes på PowerPipe i januari 2020. En av sensorerna placerades i radiell riktning och den andra i axiell riktning. I Figur 32 visas temperaturen uppmät av respektive termoelement under skumningsprocessen.

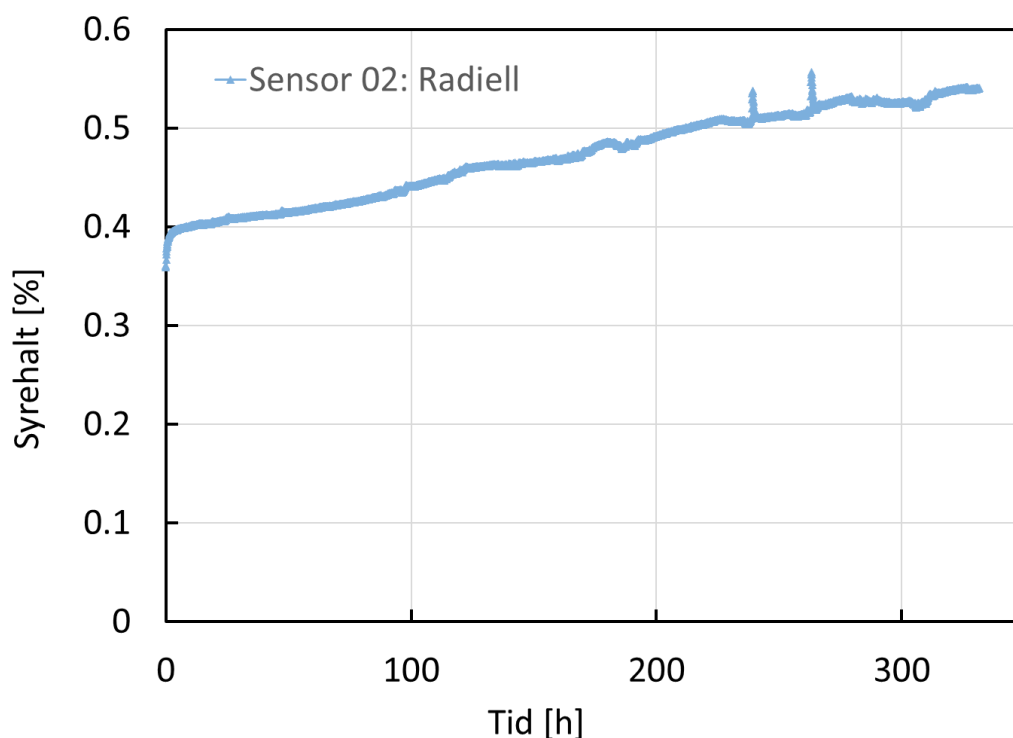
Syresensorerna loggades totalt under en månad efter tillverkningen av ledningen och resultatet kan ses i Figur 33 och Figur 34. Under denna tid befann sig ledningen i rumstemperatur. Varje sensor loggades under ca. två veckor då den utrustning vi hade vid tillfället bara kunde hantera en sensor åt gången.



Figur 32: Temperatur under skurning mätt med två termoelement monterade i ledningen



Figur 33: Syremätning med sensor 01 monterad axiellt i ledningen (25 mm från medieröret). Första mätpunkterna loggades strax efter tillverkning av ledningen. Efter det loggades sensor 02 (radiell montering) under cirka två veckor innan loggning av sensor 01 startade igen



Figur 34: Syremätning med sensor 02 som monterades radiellt i ledningen (40 mm från medieröret). Mätning startade strax efter tillverkning (skumning) och pågick i cirka två veckor

Sensorerna demonterades efter ca en månad. Kabeln till sensor 01 som monterats axiellt skadades under borttagning och den optiska fibern gick av helt. Metallröret som skyddar sensorn böjdes troligen under skumning, se Figur 35.

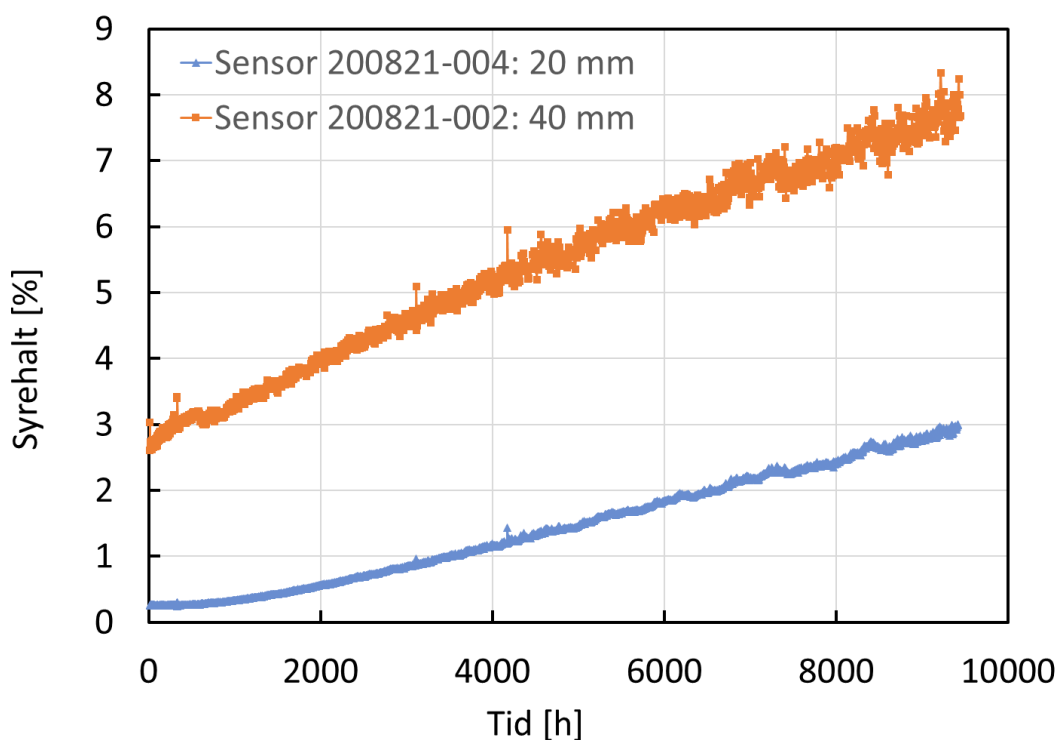
Sensorn som monterades radiellt (02) kunde tas bort utan några problem men visade för svag signal när den kopplades till den optiska mätutrustningen. Excitationsljusets intensitet kunde ökas några steg och då erhöles en signal från sensorn. Dock visade signalen inget korrekt värde. Kalibreringen gäller bara för den vid en viss given ljusintensitet. Nytt test av sensorn gjordes efter ytterligare en vecka efter demontering, men problemet kvarstod. Sensorn efter demonteringen visas i Figur 36.



Figur 35: Sensor 01 (axiell) efter demontering



Figur 36: Sensor 02 (radiell) efter demontering



Figur 37: Uppmätt syrehalt för två sensorer i referensledningen (rumstemperatur), monterade på 20 mm (ID: 200812-004) respektive 40 mm (ID: 200821-002) från medieröret. Testet pågick i ca 14 månader

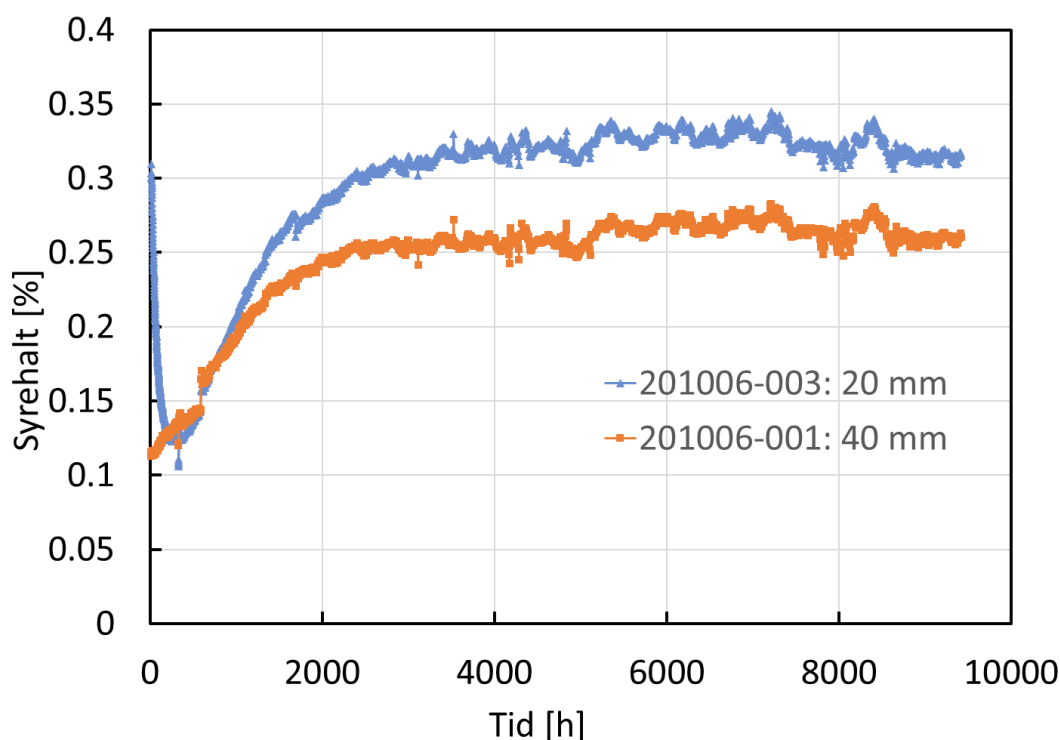
Efter det inledande försöket genomfördes ett långtidstest där åtta sensorer gjöts in i två olika FV-ledningar: 4 sensorer i en referens som efter tillverkning förvarades i rumstemperatur samt 4 sensorer i en ledning med uppvärmt medierör för accelererad åldring (130 °C). I båda ledningarna monterades sensorerna på två olika avstånd från medieröret (20 och 40 mm). Testet pågick i 14 månader.

I Figur 37 visas resultatet över tid för två av sensorerna i referensledningen. För båda sensorerna ser vi en kontinuerligt ökande syrenivå genom hela åldringstestet. Sensorn som satt monterad på 20 mm från medieröret visade efter tillverkning en syrehalt på 0,3 % som sedan ökade upp till ca 3 % i slutet av testet. Sensorn placerad på 40 mm mätte inledningsvis en syrehalt på ca 3 % som sedan ökade

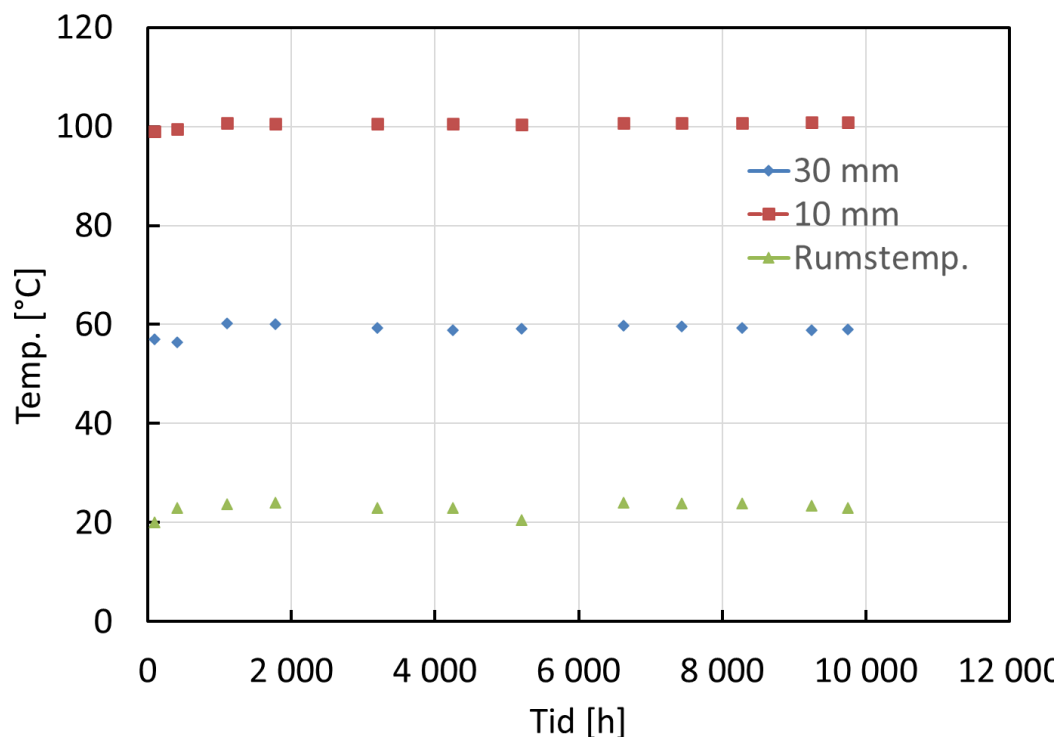
kontinuerligt upp till ca 8 %. Dessa resultat är tvivelaktiga, dels på grund av de höga syrehalterna, dels för att syrehalten närmast manteln borde vara högst.

Motsvarande resultat för två av sensorerna monterade i den uppvärmda ledningen visas i Figur 38. Här ser vi en annan typ av förlopp med en ökning av syrehalten under de första 2000–3000 timmarna för att sedan stabilisera sig på en konstant nivå. De uppmätta värdena för båda sensorerna är dock betydligt lägre jämfört med referensledningen och ligger mellan ca 0,1 % och 0,3 %. Den stora skillnaden är svårt att förklara. För sensorn monterad längst ifrån manteln kan vi dessutom notera en relativ snabb nergång i syrenivå under de första 400 timmarna efter ingjutning. Därefter följer sensorerna mer eller mindre varandra. Denna initiala nergång syns endast för en av sensorerna under testet.

Under testet loggades temperaturen i isoleringen med hjälp av två termoelement som monterades i samband med tillverkningen. Termoelementen satt endast monterade i den uppvärmda ledningen på samma avstånd från medieröret som syresensoren. I Figur 39 visas loggad temperatur för de två positionerna i den uppvärmda ledningen under den tid testet pågick. Även den omgivande luftens temperatur loggades och visas i Figur 39.



Figur 38: Uppmätt syrehalt för två av sensorerna i den uppvärmda ledningen, monterade på 20 mm (ID: 201006-003) respektive 40 mm (ID: 201006-001) från medieröret. Testet pågick i ca 14 månader



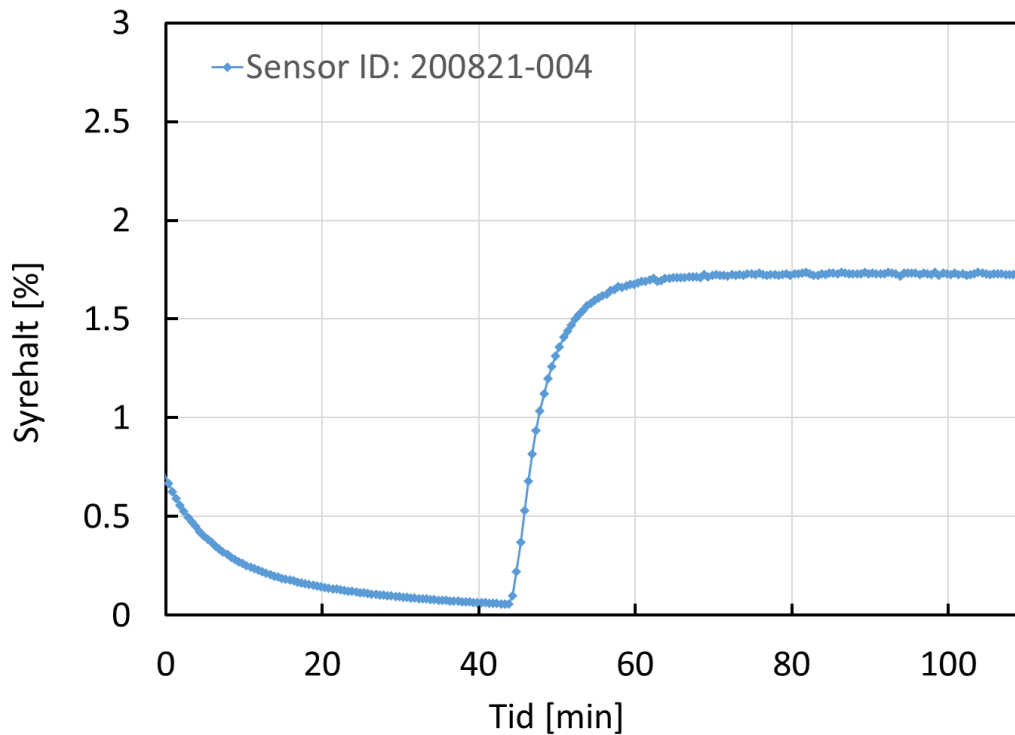
Figur 39: Loggad temperatur i uppvärmd ledning på 10 respektive 30 mm avstånd från manteln (40 respektive 20 mm från medieröret), samt temperatur i den omgivande miljön där referensledningen befann sig

Efter att långtidstestet avslutades så demonterades de fyra sensorer som hade loggats kontinuerligt under testet, två från respektive ledning monterade på olika avstånd från medieröret. Efter en första visuell inspektion kunde vi konstatera att sensorerna hade klarat sig bra under testet och inga synliga skador kunde observeras. Man kunde dock se ett tydligt skikt av PUR över samtliga sensorers aktiva yta, utom 201006-001 som bara delvis var täckt.

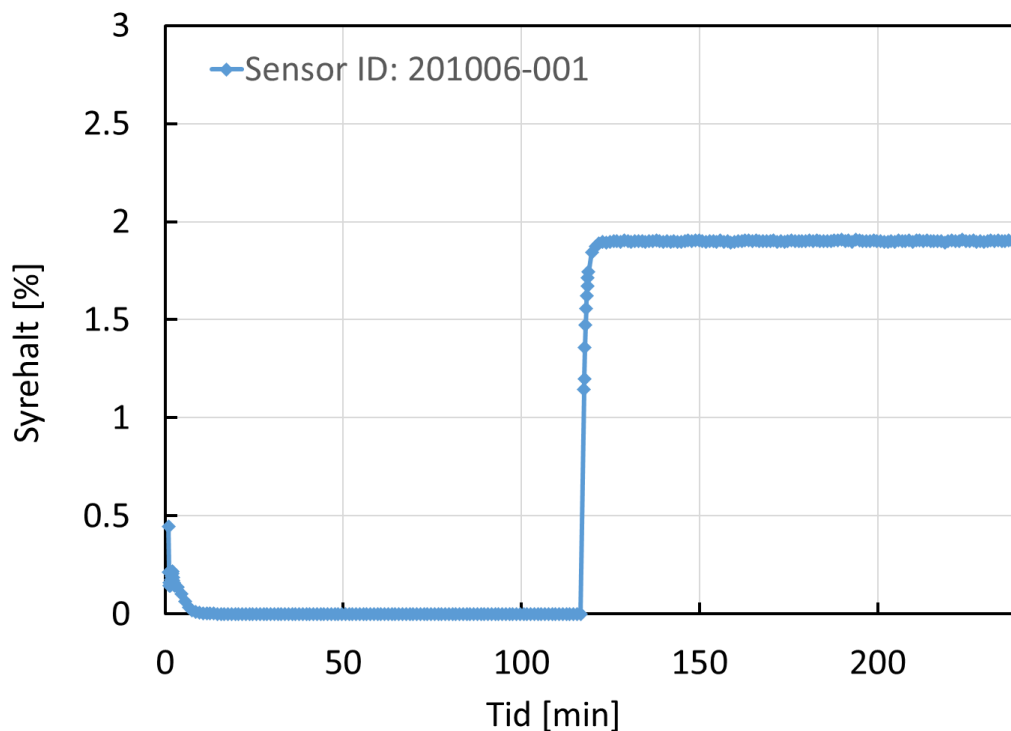
Funktionstester genomfördes i kontrollerad miljö med en syrehalt på 0 % samt 2 % vid rumstemperatur. De två sensorer som suttit monterade i den uppvärmda ledningen testades dessutom i 60 °C respektive 100 °C. Resultat redovisas i Tabell 13 samt två exempel på sensorrespons i Figur 40 och Figur 41.

Tabell 13: Sammanfattning av resultat från sensortester i kontrollerad syremiljö efter demontering. De sensorer som har suttit i uppvärmd ledning har testats i både rumstemperatur (RT) och i den temperatur den utsattes för i långtidstestet

Sensor-ID	Temperatur	Ref. 0% O ₂	Ref. 2% O ₂
200821-002	RT	0,6 %	2,9 %
200821-004	RT	0,1 %	1,7 %
201006-001	RT	0,0 %	1,9 %
201006-003	RT	0,0 %	1,8 %
201006-001	60 deg	0,1 %	1,8%
201006-003	100 deg	2,8 %	4,6 %



Figur 40: Funktionstest sensor 200821-004 i kontrollerad miljö, först i ren kvävgas som sedan växlades över till 2 % O₂ efter ca 45 min. Kvarvarande PUR-skikt på sensorn medför en långsammare respons jämfört med en ren sensor.



Figur 41: Funktionstest av sensor 201006-001 i kontrollerad miljö, först i ren kvävgas som sedan växlades över till 2 % O₂ efter ca 115 min. Ett delvis kvarvarande PUR-skikt på sensorn medför en snabbare respons jämfört med de sensorer med ett heltäckande skikt

4.2 Utvärdering av alternativa material för lågtemperatur FV

Medierör av PEX (tvärbunden polyeten), flexibla FV-ledningar med isolering av vakuumpanel och PEX-skum samt isolering av EPS har undersökts som alternativa material för framtida FV-ledningar.

4.2.1 Medierör av PEX

PEX har undersökts och utvärderats med avseende på kemiska och mekaniska egenskaper som funktion av exponeringstiden vid olika temperaturer och miljöer.

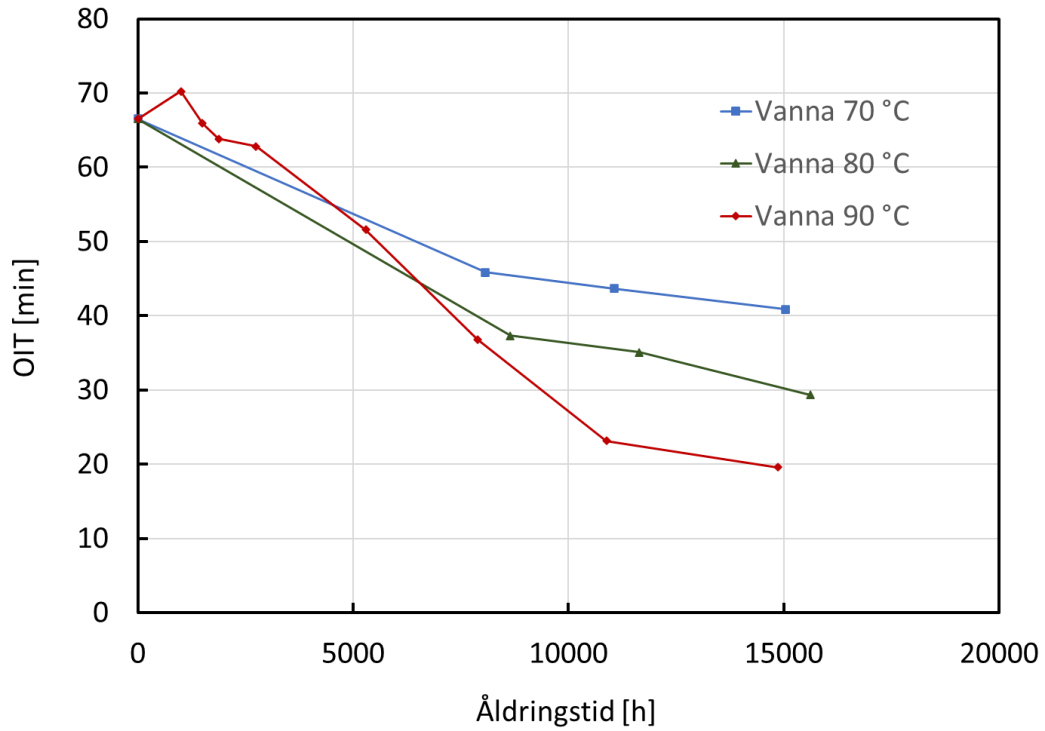
Från de PEX-rör som åldrats vid olika tryck och temperaturer, samt från PEX-materialen som åldrades i varmt vatten utan tryck, har provuttag gjorts regelbundet under projektets gång. Materialen analyserades för att se om någon förändring skett, som kunde vara tecken på att nedbrytningen hade startat.

Mätningarna av OIT visade, att halten aktiv stabilisator minskar med åldringstiden och som väntat snabbare ju högre åldringstemperatur, se Figur 42. Det material som minskade mest i OIT (åldrat vid 90 °C) föll till mindre än en tredjedel av ursprunglig OIT under den tid som åldringen pågick (knappt 2 år). Det betyder att det fortfarande finns aktiv stabilisator kvar i materialet och man förväntar sig därför att ingen nedbrytning har skett vilket har bekräftats med FTIR analyser. Om försöken hade fått fortsätta ytterligare något år finns dock risk att halten skulle närma sig mycket låga nivåer och materialet skulle börja brytas ner. Användningstemperaturer på 90 °C eller mer bör därför undvikas annat än under korta perioder.

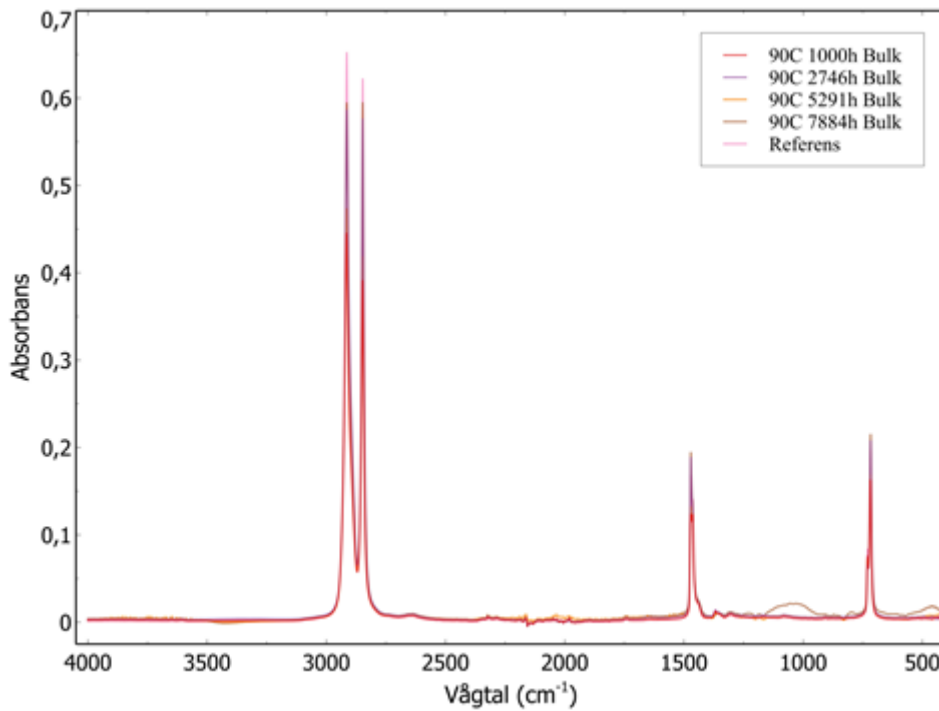
Även vid åldring i mer normala användningstemperaturer (70 – 80 °C) sker en minskning av OIT, men minskningen går långsammare. Troligtvis kommer rören ha kvar aktiv stabilisator under flera år, men det krävs ytterligare försök för att kunna uttala sig om trolig livslängd.

Prover från rören åldrade under tryck analyserades också och visade liknande resultat. Trycket verkar inte påverka minskningen hos OIT nämnvärt utan det är temperaturen som är avgörande.

Samtliga uttagna prover analyserades också med ATR-FTIR, se Figur 43. Spektra ser mer eller mindre identiska ut för olika åldringstider, vilket visar att ingen nämnvärd nedbrytning skett. Nedbrytning av polymerkedjan kan påvisas genom förändrade förhållanden mellan toppar som representerar CH₂-grupper (2920, 2860 och 729 cm⁻¹) och CH₃-grupper (2954 och 1377 cm⁻¹) och genom att nya toppar i området 1700-1800 cm⁻¹ bildas.



Figur 42: OIT för PEX åldrad i glasvannor med vatten vid olika temperatur



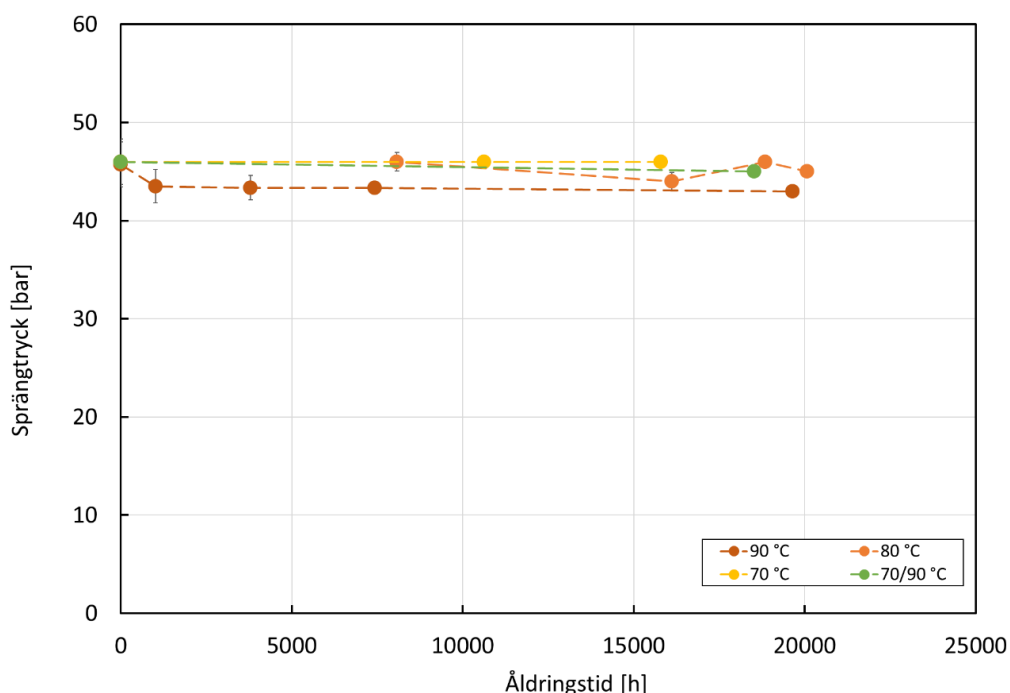
Figur 43: FTIR-spektra för PEX-prover åldrade i vanna vid 90°C olika lång tid



Figur 44: Rörprov med kopplingar för sprängprovning

PEX-rör som åldrats under tryck 6 bar vid tre olika temperaturer, plockades ut efter olika tider för en efterföljande utvärdering med sprängprovning. I Figur 14 visas tre sammankopplade rörprover. Varje provbit kapades och rörkopplingar sattes på rörändarna så att de kunde trycksättas, se Figur 44. Vid sprängprovningarna kopplades varje rör individuellt till ett trycksystem och trycket höjdes med konstant hastighet tills röret sprängdes. Den maximala trycknivån noterades.

Figur 45 visar resultat efter sprängprovning. Varje punkt är ett medelvärde av tre mätningar. Resultaten visar att sprängtrycket ligger på mer eller mindre samma trycknivå oberoende av åldringstemperatur och tid. Figur 46-Figur 49 visar bilder på brott och missfärgning efter åldring vid olika temperaturer och konstant tryck av 6 bar. Alla rör gick sönder på ett likadant sätt.



Figur 45: Resultat av sprängprovningar efter åldring under olika temperatur och tryck av 0,6 MPa. Resultat betecknade 70/90 °C tillhör rör som åldrats vid 70 °C och sedan flyttades behållare med 90 °C efter 15 800 h



90 °C; 1010 h



90 °C; 3795 h



90 °C; 7432 h



90 °C; 19 647 h

Figur 46: Bilder på brott från sprängprovningar av rör åldrade vid 90 °C



80 °C; 8076 h



80 °C; 16 111 h

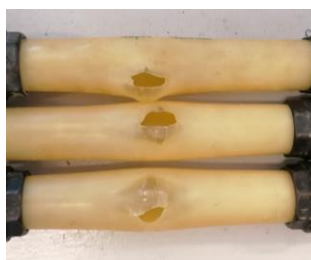


80 °C; 18 843 h



80 °C; 20 069 h

Figur 47: Bilder på brott från sprängprovningar av rör åldrade vid 80 °C



70 °C; 10 628 h



70 °C; 15 795 h

Figur 48: Bilder på brott från sprängprovningar av rör åldrade vid 70 °C



70/90 °C; 18 527 h

Figur 49: Bild på brott från sprängprovningar av rör åldrade vid 70/90 °C. Rör som åldrats vid 70 °C flyttades efter 15 800 h till behållare med 90 °C för fortsatt åldring

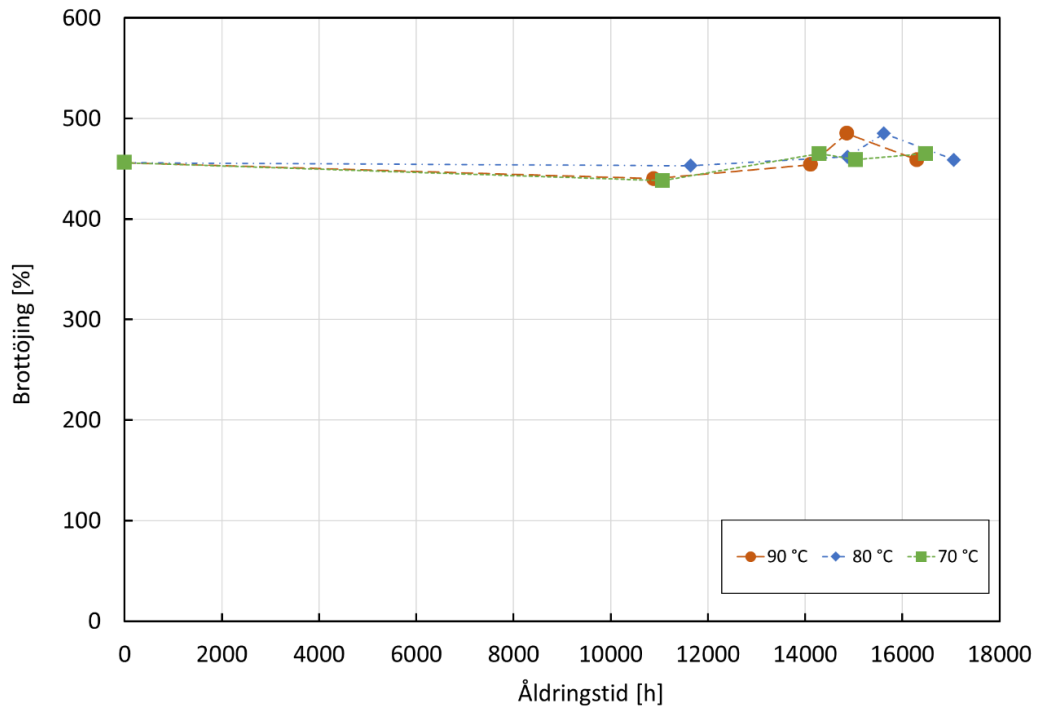
Dragprovstavar sågades ut från ett långt PEX-rör med diameter $\text{\O}63$ mm och godstjocklek 5,8 mm. Totalt 75 dragprovstavar hängdes i tre glasvannor med cirkulerande varmt vatten med olika temperaturer (70, 80 & 90 °C). I Figur 14 visas stavarna i en glasvanna. OIT och FTIR användes för utvärdering av åldringen på stavarna. Därefter plockades fem stavar ut åt gången efter olika åldringstider för utvärdering med dragprovning.

Dragprovning genomfördes enligt ISO 6259-3 (2015) med provstavar av typ 1 i standarden. Draghastighet var 50 mm/min från start till brott. Töjning mättes med en mekanisk extensometer och mätsträcken var initialt 50 mm. Figur 50 visar monteringen vid dragprovningen.

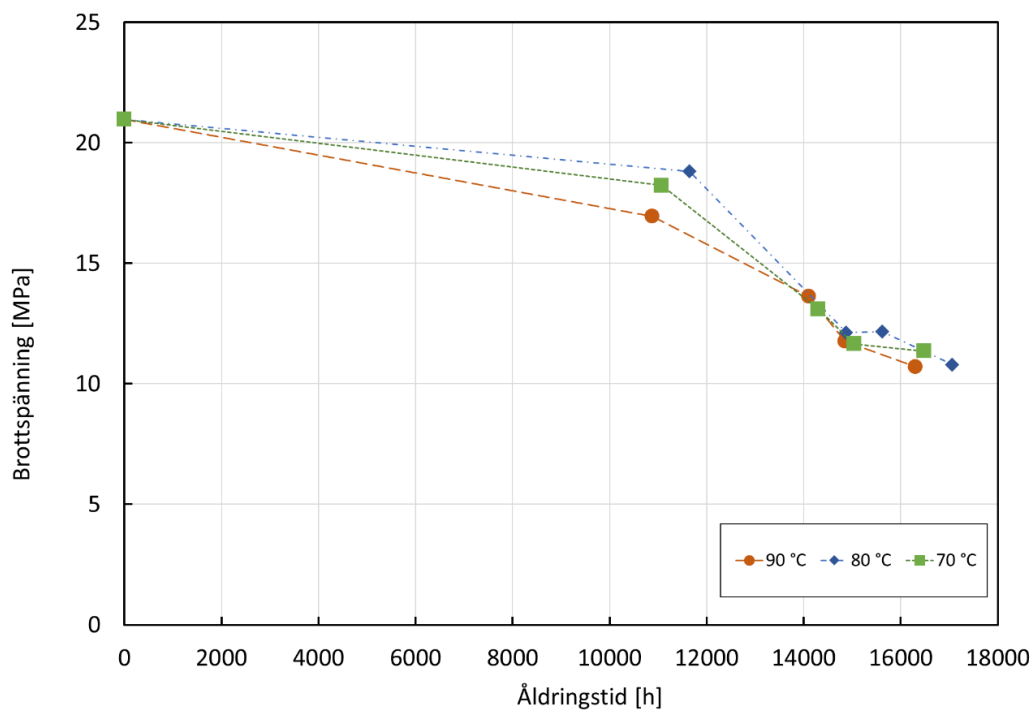
Figur 51 visar att brotttöjning hos PEX stavar åldrade i varmt vatten är oförändrad oberoende av temperatur och åldringstid medan brottspänning minskar med åldringstiden enligt Figur 52.



Figur 50: Dragprovning av PEX stavar enligt ISO 6549-3



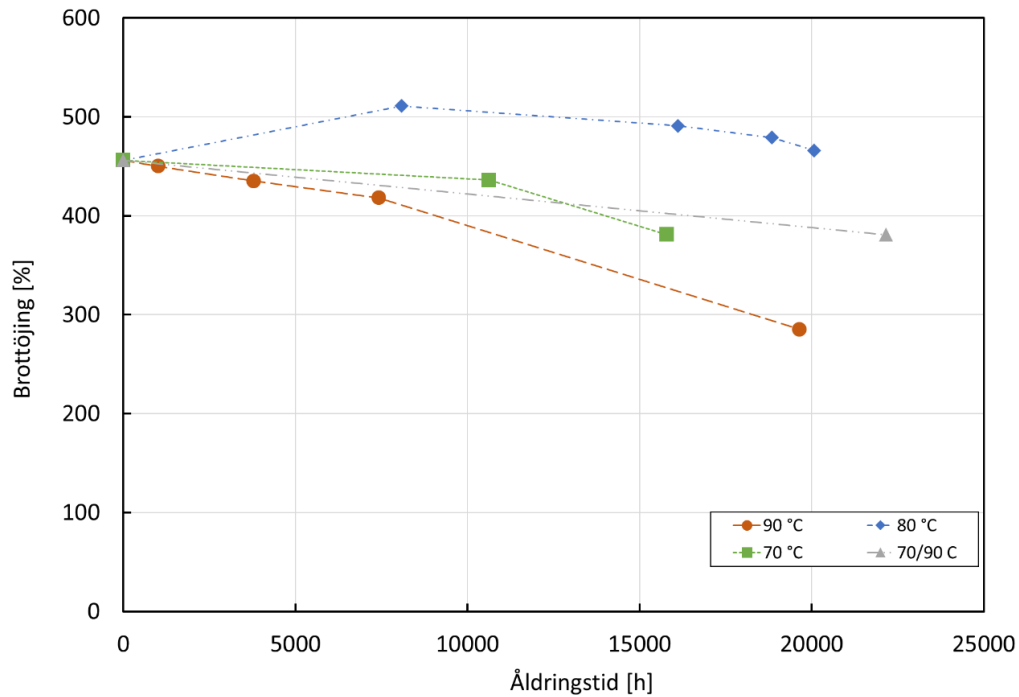
Figur 51: Brottöjning hos PEX åldrad i cirkulerande varmt vatten



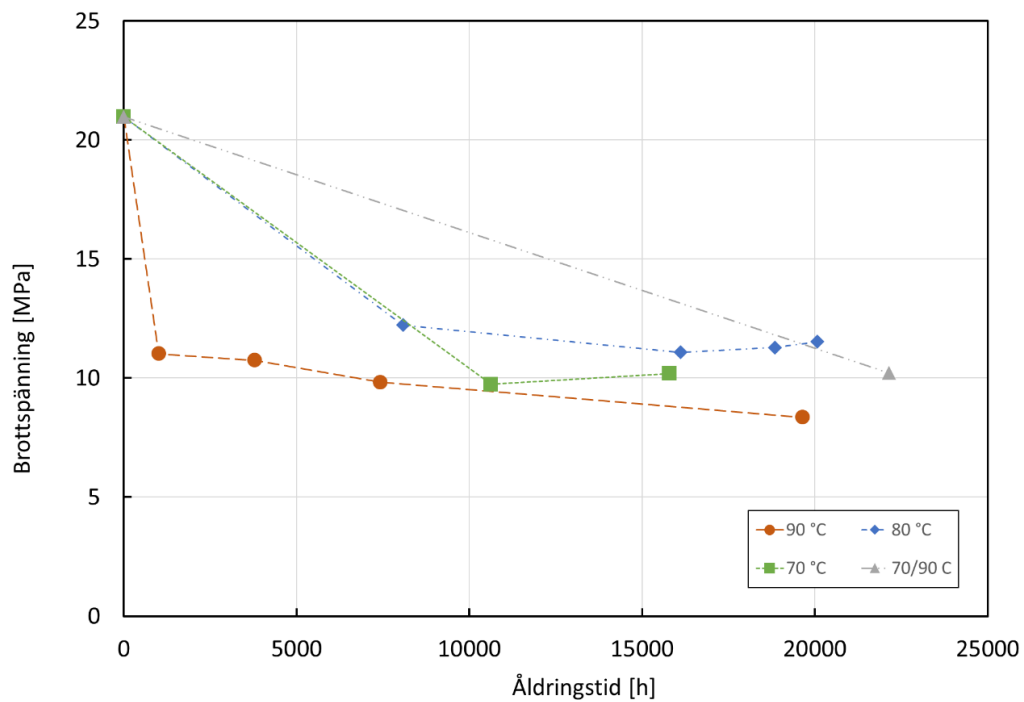
Figur 52: Brottspänning hos PEX åldrad i cirkulerande varmt vatten

Provstavar för dragprovning togs även ut från PEX-rören som hade åldrats under tryck och temperatur i behållare. Fem stavar togs ut från alla tre bitar som tillhörde samma omgång och åldringstid. Dragprovning genomfördes på samma

sätt som metoden beskriven ovan. Figur 53 visar att brottöjning minskar något med åldringstiden och vid 90 °C ligger den på drygt 60 % av ursprungsvärdet efter 2 år. Brottspänning minskar också med tiden enligt Figur 54, men minskningen sker på ett annorlunda sätt. Det sker en drastisk minskning under den första åldringsperioden för att sedan mer eller mindre plana ut.



Figur 53: Brottöjning hos provstavar från trycksatta åldrade PEX-rör



Figur 54: Brottspänning hos provstavar från trycksatta åldrade PEX-rör

4.2.2 Termisk konduktivitet hos flexibla FV-ledningar

Två olika typer av förtillverkade FV-ledningar har utvärderats med avseende på värmeisoleringsförmåga (se Tabell 11). Den första typen var isolerad med en vakuumpanel av nominell tjocklek 6 mm och utanför denna fanns en matta med PEX-skum, som skyddas av en korrugerad mantel med diametern Ø140 mm. Den andra typen hade enbart isolerats med mattor av PEX-skum och hade en skyddande korrugerad mantel med diametern Ø200 mm, se Figur 55. Båda typerna av FV-ledningar tillverkades av Uponor och hade medierör av samma dimension Ø75 mm. Isoleringen och manteldiametern skiljde de båda typerna åt. Vid mätningarna utrustades den senare typen av isolerande skydd vid ändarna med samma typ av isolering som provobjektet. Den första typen hade isolerande skydd av traditionell FV-ledning av dimension DN50/140 mm (medierör Ø60,3 x 2,9 mm och mantel Ø140 x 3,0 mm). Det går inte att tillverka skydd av samma typ och dimension som provobjektet med vakuumpanel, eftersom skyddet ska ha längden 350 mm och varje panel är ca 1000 mm. Om skyddet sågas från ledningen kommer panelen att bli punkterad och får då andra isolerande egenskaper. Det har därför bedömts som en bättre lösning att använda skydd av en traditionell FV-ledning.

Den första typen försågs med ett inre stålrör, som svarvades ned av ett stålmedierör av dimensionen DN50 (Ø60,3 x 2,9 mm) till diametern Ø59,0 mm. Det fanns två syften med detta, dels att få det böjda medieröret rakt, dels att senare ha möjligheten att åldra FV-ledningen vid förhöjd temperatur genom att en elektrisk spänning läggs över stålrörets ändrar.

Fyra termotrådar monterades enligt Figur 12 inuti det extra stålröret hos den första typen av FV-ledning och direkt i medieröret av den andra typen. Ytterligare fyra termotrådar monterades i dalarna på de korrugerade mantelrören. För FV-ledning Rör 2 placerades två extra termotrådar på panelens utsida på motsvarande positioner som de två centrala paren av givare i Figur 12. Förutom mätning av temperaturer mäts tillförd effekt. Termisk konduktivitet hos stål, polyeten och PEX har antagits vara 50 W/(m K), 0,40 W/(m K) respektive 0,40 W/(m K).

Tabell 14: Provade förtillverkade flexibla FV-ledningar

Beteckning	Dimension medierör Ø x t [mm]	Dimension mantelrör Ø x t [mm]	Diameter dal mantel Ø [mm]	Typ av ledning	Format på leverans
Rör 2	75,2x7,3	140x1,2	120,8	VIP & PEX-skum	Som en spole
Rör 4	75,4x7,3	140x1,8	121,2	VIP & PEX-skum	Något böjd på pall
Rör 5	75,4x7,3	140x1,8	121,2	VIP & PEX-skum	Något böjd på pall
Rör 6	75,5x7,5	200x2,6	179,3	PEX-skum	Något böjd på pall

Tabell 15: Skenbar termisk konduktivitet för isolering hos FV-ledning vid 50 °C

Beteckning	Typ av rör	Termisk konduktivitet hos isolering [mW/m K]	Termisk konduktivitet hos panel (VIP) [mW/m K]
Rör 2	VIP & PEX-skum	19,8	8,64
Rör 4	VIP & PEX-skum	18,3	
Rör 5	VIP & PEX-skum	20,07	
Rör 6	PEX-skum	42,6	


Figur 55: Flexibel FV-ledning isolerad med vacuumpanel och PEX-skum till vänster och till höger visas laboratorieuppställning för mätning av termisk konduktivitet

Temperaturen på insidan av isoleringen bestämdes genom att tillämpa ekvationerna (16b) och (17) för stålroret respektive medieröret. Temperaturen på utsidan av isoleringen bestämdes av samma ekvationer tillämpade för mantelroret. Effekten anpassades så att medelvärdet av temperaturen på insidan av isoleringen och utsidan av isoleringen blev strax över eller under 50 °C.

Tre olika effekter användes för varje FV-ledning. För varje effekt räknades den skenbara termiska konduktiviteten över hela isoleringen ut med ekvationerna (16a) och (18). Den skenbara termiska konduktiviteten räknades sedan ut för medeltemperaturen 50 °C. Resultaten visas i Tabell 15. Även den skenbara termiska konduktiviteten hos panelen räknades ut för Rör 2. Beteckningen ”skenbar” används, eftersom en termisk konduktivitet räknas ut som om det vore ett homogent material mellan inner- och ytterradien hos isoleringen.

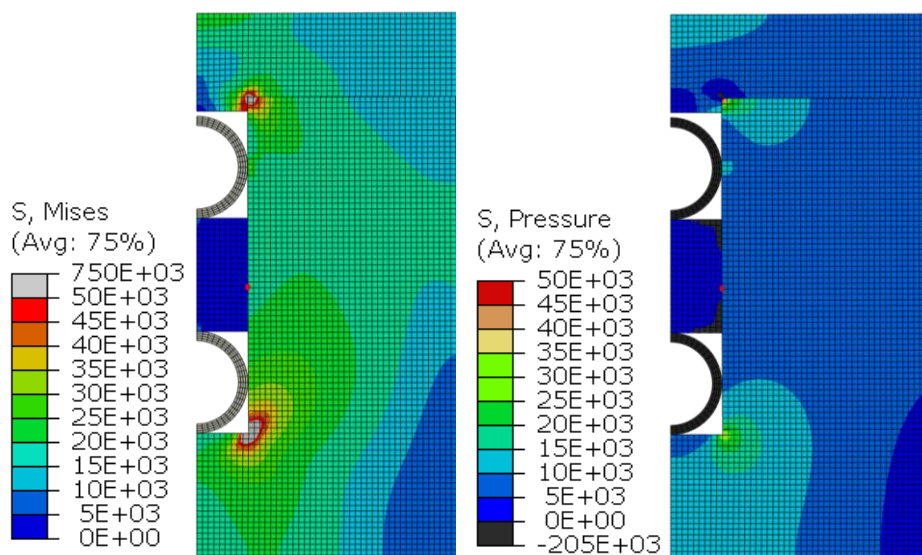
4.2.3 Beräkningar av tryck och temperatur i kulvert av EPS

För att välja mekanisk belastning och temperaturer i krypexperiment har simuleringar gjorts för en ledning förlagd med en täckning ovan isoleringen på 0,6 m. Fram- och returledningstemperatur hos vattnet valdes till 80 °C respektive 40 °C. Höjden och bredden hos isoleringen valdes enligt produktkatalog till 480 mm respektive 460 mm. Medierören hade dimensionen Ø90 mm och tjockleken

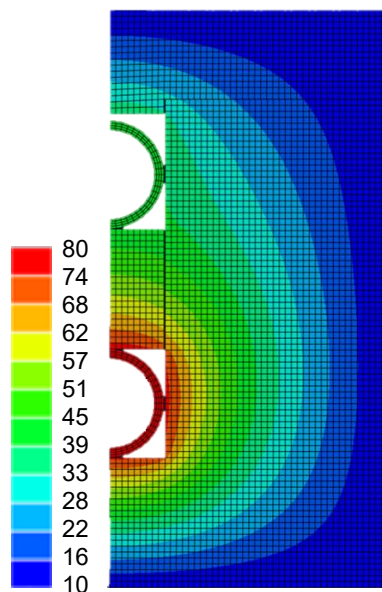
8,2 mm. Medierören var positionerade över varandra som i Figur 15, när det endast finns en fram- och en returledning.

Trycket från marken blir 15 kPa i vertikal led och 7,6 kPa i horisontell led. Marktemperaturen valdes till 10 °C. Elasticitetsmodulen för PEX och EPS valdes till 900 MPa respektive 10 MPa. Tvärkontraktionstalen valdes till 0,4 respektive 0,3. Termisk konduktivitet för PEX och EPS valdes till 0,4 respektive 0,034 W/mK.

Resultat av den mekaniska belastningen visas i Figur 56. Under rören ligger spänningsnivån mellan 20-30 kPa. Resultaten för det stationära temperaturfältet visas i Figur 57. En medeltemperatur för materialet under det varma röret ligger på 45 °C. Närmast röret uppnås i princip samma temperatur som vattnet hos framledningen på 80 °C.



Figur 56: Spänningar i EPS. Till vänster jämförelsespänning enligt von Mises och till höger summa av tryckspänningar i samtliga riktningar dividerat med 3



Figur 57: Temperatur i EPS

4.2.4 Kryptest av EPS

Beräkningsresultaten i Avsnitt 4.2.3 visar att spänningsnivån ligger mellan 20-30 kPa. Det finns olika nivåer specificerade i standarden EN1606 (2013) för att studera kryp vid tryckande belastning. Materialet är tryckklassat till 200 kPa vid töjning 10 %. Här har nivån valts till $0,2 \times 200 = 40$ kPa och en extra nivå har tillämpats för några enstaka prov på nivån $0,3 \times 200 = 60$ kPa. Dessa tryck inkluderar en avsevärt djupare förläggning än en täckning på 0,6 m ovan EPS-kulverten.

Beräkningsresultaten visar att temperaturnivån på en sträcka 100 mm under det varma medieröret är 45 °C. Krypprovning genomfördes därför vid laboratorietemperatur på 23 ± 2 °C och vid förhöjd temperatur på 45 °C. Dessutom genomfördes ett speciellt prov då ett rör med temperaturen 80 °C belastar ett rätblock av EPS.

I Figur 58 visas krypprov i laboriemiljö. I Figur 59 visas krypprov vid förhöjd temperatur och vatten. Krypprovet som simulerar kryp vid kontakt mellan varmt rör och EPS visas i Figur 60. I Tabell 16 görs en jämförelse med belastningar från två dimensioner av PEX-rör och aktuellt aluminiumrör använt vid experimenten.

Tabell 16: Jämförelse av belastning från PEX-rör med vatten och aluminiumrör med värmare

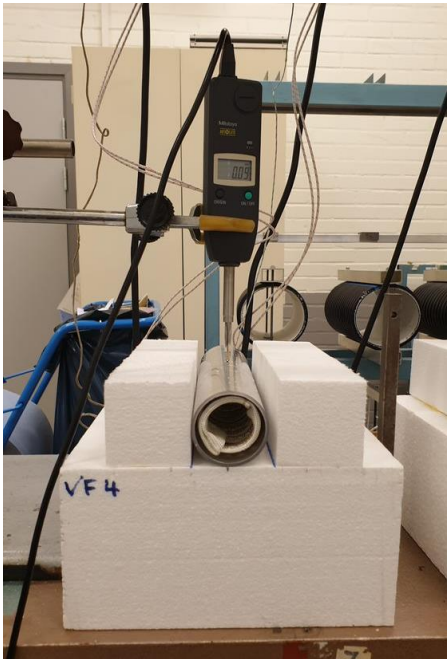
	PEX	PEX	Al	Enhet
Längd	200	200	200	mm
Diameter	40	50	45	mm
Tjocklek	3,7	4,6	2	mm
Densitet	950	950	2700	kg/m ³
Massa rör	0,080	0,125	0,146	kg
Massa vatten	0,167	0,261		kg
Massa värmare			0,21	kg
Total massa	0,247	0,386	0,356	kg



Figur 58: Krypprov av EPS i laboratoriemiljö



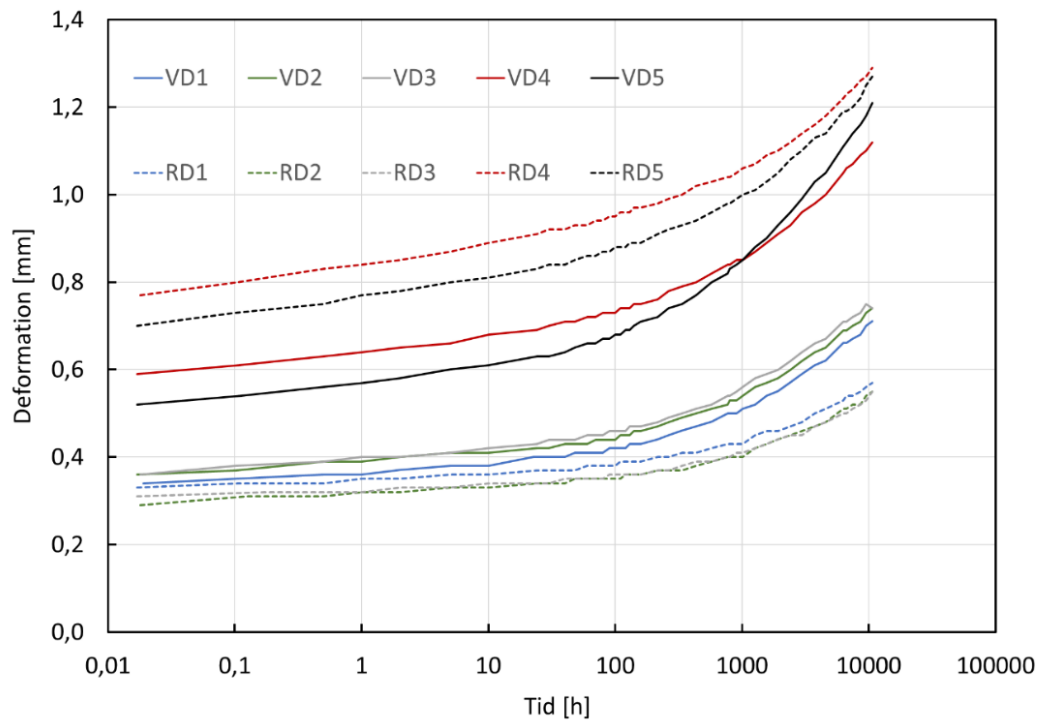
Figur 59: Krypprov av EPS vid förhöjd temperatur via varmt vatten. Överst visa EPS prov i balja som fyllts med varmt vatten. Nederst till vänster visas belastad prov och nederst till höger visas hävarmar med belastning



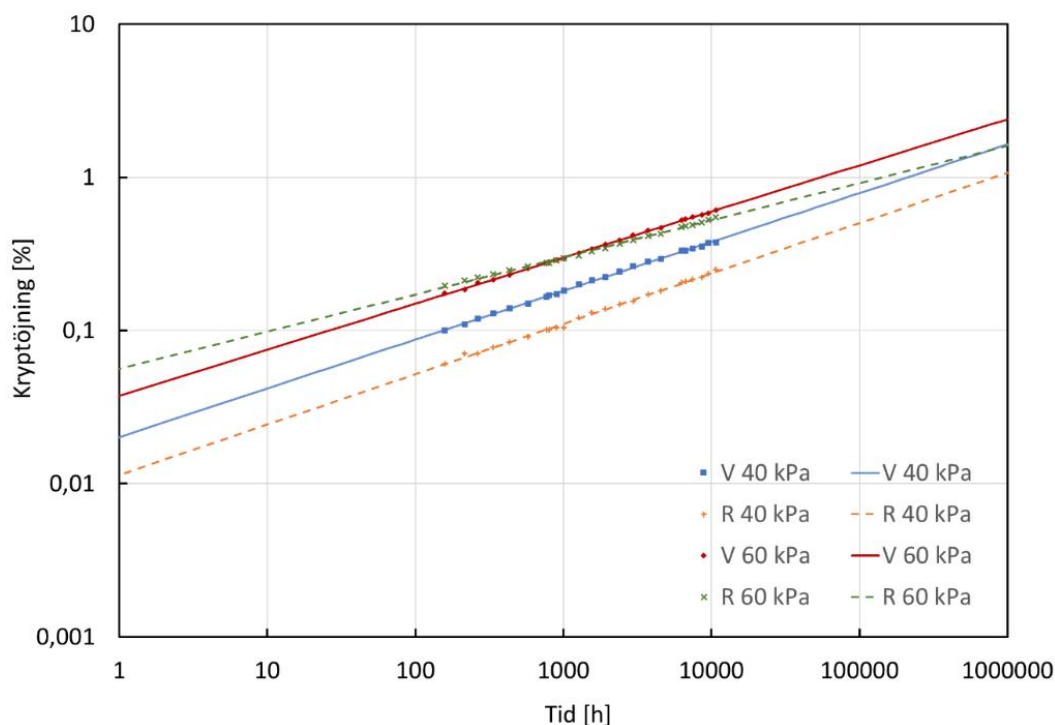
Figur 60: Krypprov för att studera lokal kontakt mellan varmt rör och EPS

4.2.5 Uppmätta kryptöjningar hos EPS

För laboratorieförhållanden visas deformation av jungfrulig och återvunnen EPS i Figur 61. Kryptöjningen i log-log diagram visas i Figur 62. Varje mätpunkt i diagrammet motsvarar ett medelvärde av gjorda mätningar. För 40 kPa är det tre kryptoprov och för 60 kPa är det två kryptoprov.



Figur 61: Kryptöjningsdiagram i laboratoriemiljö med 23 ± 2 °C med lasten 40 respektive 60 kPa på kuber av jungfrulig (VD) och återvunnen (RD) EPS



Figur 62: Kryptöjning hos kuber av jungfrulig (V) EPS belastade med 40 respektive 60 kPa i laboratoriemiljö med 23 ± 2 °C, samt återvunnet (R) EPS belastad med samma nivåer. Medelvärden från mätningar markerade med punkter och kurvor visar anpassad modell

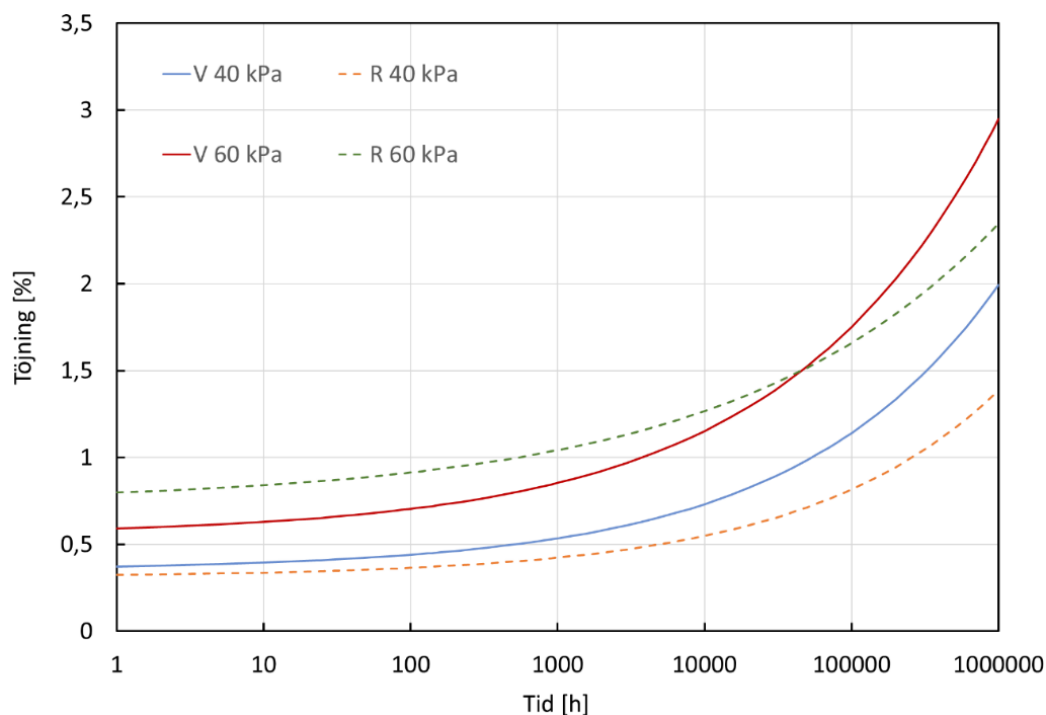
Linjära funktioner anpassas av mätvärden efter 158 timmar för att simulera krypningens sekundära fas. Anpassade parametrar och töjning efter 50 år visas i Tabell 17. Töjning som funktion av tiden vid de två olika spänningsnivåerna visas i Figur 63.

Motsvarande resultat för EPS vid 45 °C nedsänkt i vatten visas i Figur 64, Figur 65 och Figur 66. I Figur 65 är varje mätpunkt ett medelvärde av fyra krypprov. Efter lång tid (efter 5 år) blir töjningen större för jungfrulig EPS än återvunnen då temperaturen är 23 °C vid båda belastningsnivåerna, se Figur 63. Det omvända gäller för EPS vid 45 °C enligt anpassade modeller efter gjorda mätningar, se Figur 66.

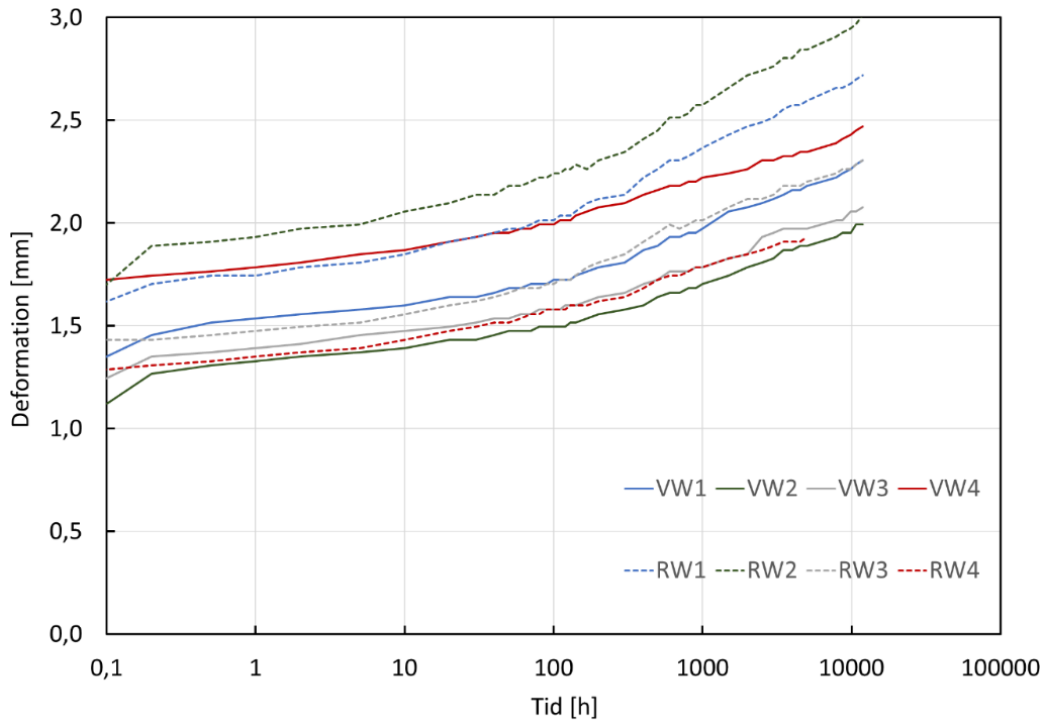
Mätningar av deformationer då ett varmt rör belastar ett EPS-block visas i Figur 67. Eftersom det visade sig svårt att nollställa mätklockorna då mätningen startade, så har positionen satts till noll i efterhand vid tiden 5 timmar. Det blir inga speciella deformationer i kontakten mellan ett varmt rör och EPS. Efter drygt 7000 timmar är deformationen mindre än 0,3 mm.

Tabell 17: Anpassad modell baserad på töjningsmätningar av kuber 100 mm av EPS. Töjning efter 50 år baserad på anpassade parametrar anges också. R^2 är ett mått på korrelationen mellan mätvärde och anpassade parametrar vid regressionsanalysen. Extrapolationen till 50 år är ca 41 gånger provningstiden för proverna i rumstemperatur och 37 gånger för de andra vid förhöjd temperatur

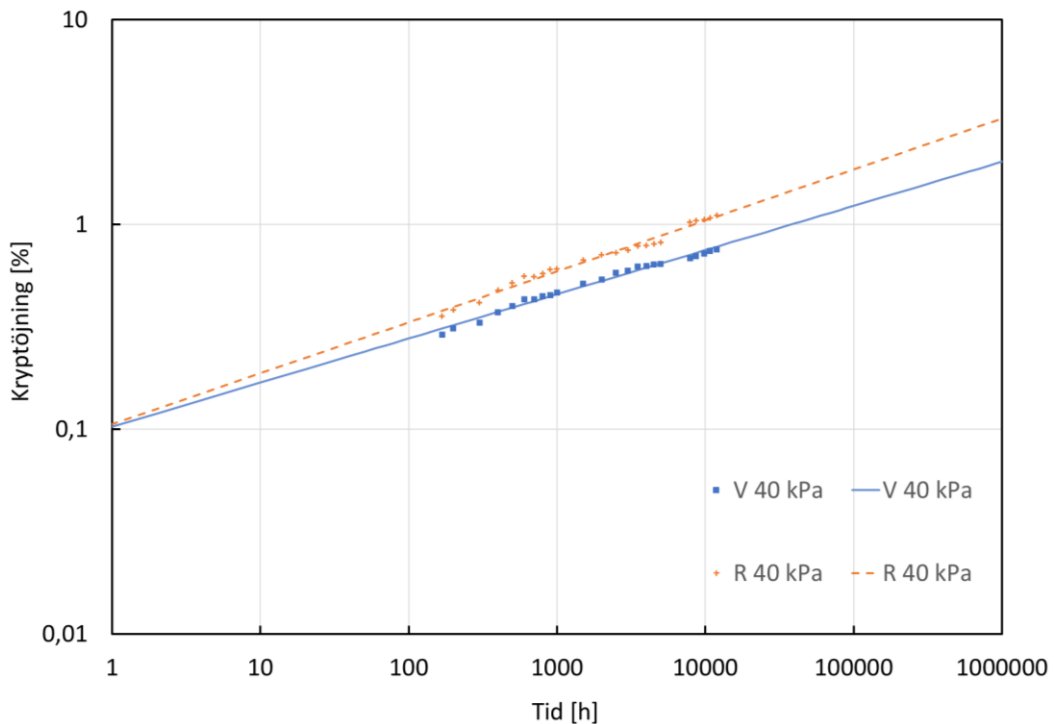
EPS	Belastning [kPa]	Temperatur [°C]	Initial töjning [%]	b [%]	Exponent m	R^2	Töjning 50 år [%]
Jungfrulig	40	23±2	0,353	0,020	0,319	0,999	1,6
Återvunnen	40	23±2	0,313	0,011	0,329	0,997	1,1
Jungfrulig	60	23±2	0,555	0,037	0,301	0,999	2,4
Återvunnen	60	23±2	0,742	0,056	0,243	0,997	2,1
Jungfrulig	40	45	1,452	0,103	0,216	0,986	3,1
Återvunnen	40	45	1,598	0,106	0,249	0,984	4,3



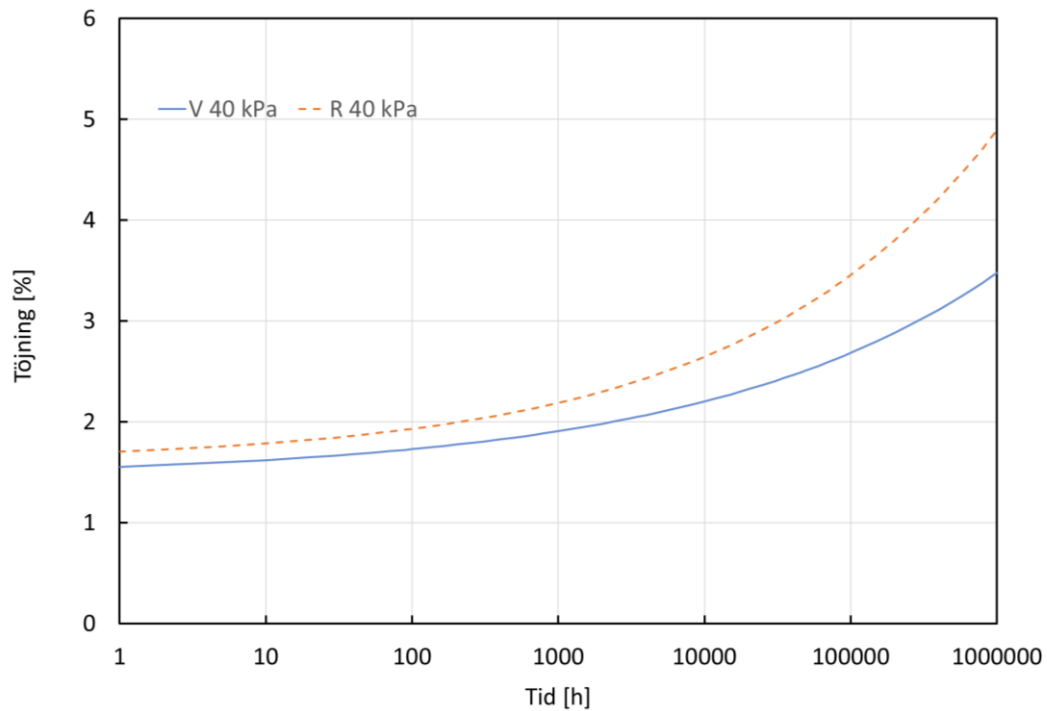
Figur 63: Töjning hos kuber av jungfrulig (V) EPS belastade med 40 respektive 60 kPa i laboratoriemiljö 23 ± 2 °C, samt återvunnet (R) EPS belastad med samma nivåer. Kurvor visar modell baserad på mätningar



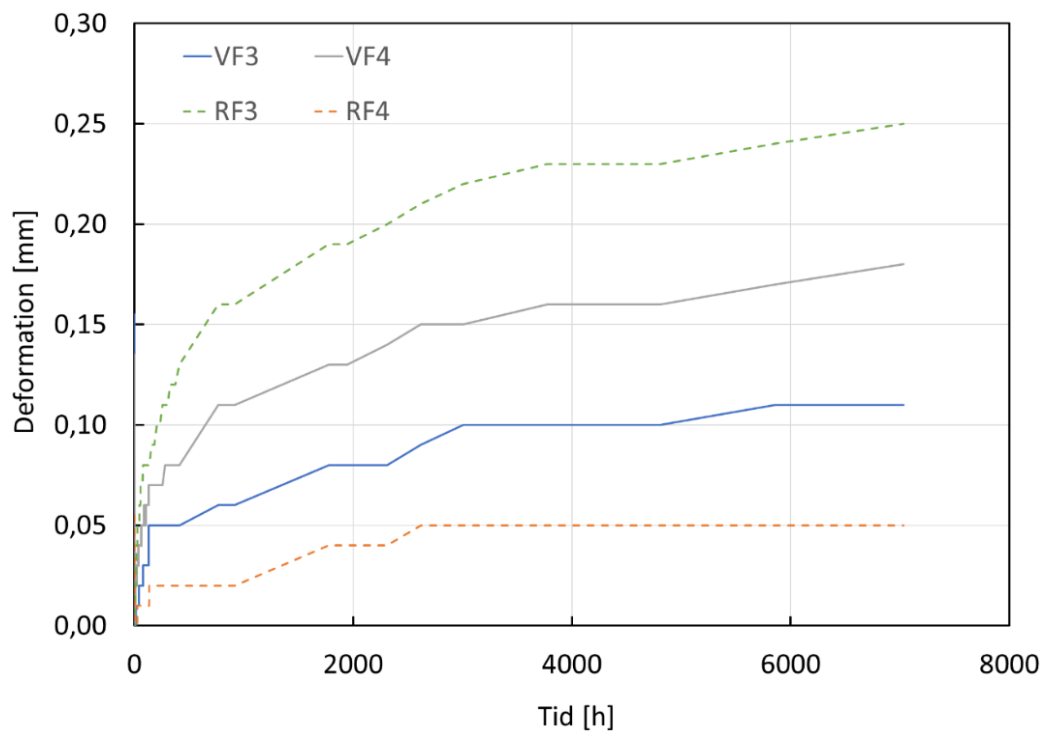
Figur 64: Krypförsök i vatten 45 °C med lasten 40 kPa på kuber av jungfrulig (VW) och återvunnen (RW) EPS



Figur 65: Kryptöjning hos kuber av jungfrulig (V) och återvunnen (R) EPS belastade med 40 kPa i vatten med 45 °C. Medelvärden från mätningar markerade med punkter och kurvor visar anpassad modell



Figur 66: Töjning hos kuber av jungfrulig (V) och återvunnen (R) EPS belastade med 40 kPa i vatten med 45 °C. Kurvor visar modell baserad på mätningar



Figur 67: Krypförsök i laboratoriemiljö 23 ± 2 °C med belastning med varmt rör av temperatur 80 °C rätblock av jungfruligt (Virgin) och återvunnet (Recycled) EPS

4.2.6 Vattenabsorption hos EPS

Vattenabsorption hos EPS vid långvarig diffusion bestämdes enligt ISO 16536 (2019). Fyra provkroppar användes med tjocklek 50 mm, bredd 500 mm och längd 500 mm. Två av provkropparna var tillverkade av jungfrulig EPS och de två andra av återvunnen EPS.

De fyra provkropparna placerades 50 mm över ett vattenbad som håller en temperatur på 50 ± 1 °C. Ovanpå respektive provkropp placerades en kylplatta som håller en yttemperatur på $1,0 \pm 0,5$ °C. Provet pågick i 28 dygn och provkropparna vändes var sjunde dygn. Provkropparna vägdes före och efter provningen. Mätresultaten visas i Tabell 18. Både jungfrulig (VP) och återvunnen EPS (RP) tog upp ca 10 % vatten baserat på volym. Ytterligare information om mätningarna finns i rapporten av Ståhl (2022b).

Vattenabsorption hos EPS vid långvarig nedsänkning bestämdes enligt ISO 16535 (2019). Åtta provkroppar användes med tjocklek 100 mm, bredd 200 mm och längd 200 mm. Fyra av provkropparna var tillverkade av jungfrulig EPS och de fyra andra av återvunnen EPS.

Tabell 18: Vattenabsorption hos EPS vid långvarig diffusion enligt ISO 16536

Beteckning	Tjocklek [mm]	Densitet [kg/m ³]	Massa före [kg]	Massa efter [kg]	Vattenabsorption [volyms-%]
VP1	50,4	30,5	0,384	1,622	9,8
VP2	50,0	30,1	0,374	1,642	10,2
RP1	51,3	26,7	0,339	1,760	11,2
RP2	51,9	27,6	0,354	1,685	10,4

Tabell 19: Vattenabsorption hos EPS vid långvarig nedsänkning enligt ISO 16535

Beteckning	Tjocklek [mm]	Densitet [kg/m ³]	Massa före [kg]	Massa efter [kg]	Vattenabsorption [volyms-%]
VF1	100,1	29,0	0,116	0,260	3,6
VF2	100,1	29,0	0,116	0,282	4,1
VF3	100,2	29,0	0,116	0,249	3,3
VF4	100,4	28,7	0,115	0,281	4,1
Medel					3,8
RF1	99,7	27,0	0,106	0,162	1,4
RF2	100,0	29,0	0,115	0,170	1,4
RF3	99,8	27,6	0,109	0,167	1,5
RF4	99,8	28,9	0,114	0,170	1,4
Medel					1,4

Tabell 20: Termisk konduktivitet vid 35 °C hos EPS före och efter långvarig diffusion av vatten

Beteckning	Tjocklek [mm]	Densitet [kg/m ³]	Vattenabsorption [volyms-%]	Termisk konduktivitet [W/(m K)]
VP1	50,4	30,5	Ingen	0,0354
VP2	50,0	30,1	Ingen	0,0352
RP1	51,3	26,7	Ingen	0,0367
RP2	51,9	27,6	Ingen	0,0367
VP1	50,4		9,8	0,0514
VP2	50,0		10,2	0,0494
RP1	51,3		11,2	0,0501
RP2	51,9		10,4	0,0506

De åtta provkropparna placerades helt nedsänkta i ett vattenbad i laboratoriet med temperatur 23±2 °C. Ovanpå respektive provkropp placerades glasbägare med tyngd för att trycka ned provkropparna. Provkropparna var nedsänkta i vatten i 28 dygn. Provkropparna vägdes före och efter provningen. Mätresultaten visas i Tabell 19. Jungfrulig EPS (VP) tog upp knappt 4 % vatten och återvunnen (RP) 1,4 % baserat på volym.

4.2.7 Termisk konduktivitet hos EPS

Termisk konduktivitet bestämdes enligt EN 12667 (2001) och EN 12664 (2001). Två fall har behandlats, dels har konditionerade provkropparna av EPS vid laborieförhållanden 23±2 °C och 50±5 % RF använts, dels har fuktiga provkroppar efter diffusion använts. Den standarden senare behandlar termisk konduktivitet för det fuktiga materialet.

Provkropparna utsattes för långvarig diffusion över ett vattenbad (50 ± 1 °C) enligt ISO 16536 (2019) under 28 dagar, se Avsnitt 4.2.6. Provkropparna av kvadratiska block av EPS med sidan 500 mm och tjockleken ca 50 mm har använts.

Mätresultaten visas i Tabell 20 för både konditionerad EPS och fuktig EPS. Vid mätningarna skapades ett stationärt värmefflöde mellan två plattor med temperaturerna 30 och 40 °C. Värmefflödet mättes med en värmefflödesmätare och temperaturskillnaden över provet av EPS mättes med fyra par av seriekopplade termoelement. Ytterligare beskrivningar finns i rapporten av Ståhl (2022a).

4.3 Tekniska krav på alternativa lösningar

4.3.1 Medierör av PEX i prefabricerade flexibla FV-ledningar

Plaströr som exponeras för långvarig kontakt med varmt vatten riskerar att förlora aktiva stabilisatorer genom extraktion till vatten och/eller genom förbrukning vid oxidering vilken i sin tur leder till nedbrytning av rörmaterialet. Detta kan studeras med hjälp av accelererade åldringstester där det åldrade materialet utvärderas periodiskt med OIT (Oxidation Induction Time) för att studera mängden kvarvarande aktiv stabilisator, och eventuella förändringar i molekylstrukturen undersöks med FTIR som en bekräftande metod. Det framgår av denna studie att under åldring vid normala användningstemperaturer (70-80 °C) sker en minskning av OIT. Detta är en långsam process, men det är viktigt att göra fler/längre försök för att ta reda på om hur mycket detta kan påverka plaströrets livslängd.

Förisolerade FV-rör finns i två huvudtyper nämligen med fast förband mellan medierör, isolering och mantel och utan fast förband. Själva isoleringen kan vara PUR eller PE cellplast. Eftersom PEX rör inte är helt täta mot vattenånga eller syre måste långtidsegenskaper av hela konstruktionen bestämmas för att ta reda på om förisolerade röret klarar förhållanden för typiska FV-system med avseende på temperatur och tryck, inklusive effekten av syre.

Idag används medierör av tvärbunden polyeten (PEX) i flexibla FV-ledningar, se EN 15632-2 (2010), och även i kulvertar med isolering av expanderad polystyren (EPS). I EN 15632-2 (2010) kvantifieras livslängden för flexibla FV-ledningar till 30 år då maximal temperatur ligger på 80 °C under 29 år, 90 °C under 1 år och 95 °C under 100 timmar. Rören kan utsättas för olika driftstryck, vilket även medför olika krav på godstjockleken. För trycken 6 bar, 8 bar och 10 bar krävs SDR (kvot mellan ytterdiameter och godstjocklek) 11, 9 respektive 7,4.

Det finns många standarder som reglerar användandet av PEX-rör. Standarden ISO 15875-1 och -2 (2003) ger krav på PEX-rör för varm- och kallvatteninstallationer gällande provning och användning. I standarden finns olika klasser 1, 2, 4 och 5 baserade på olika vattentemperaturer (designvärde, maximala värden) med tillhörande tidsintervall dessa temperaturer kan tillåtas. Provningsen baseras på standarden ISO 9080 (2012). Plaströr ska enligt den standarden provas vid olika statiska tryck och temperaturer till dess brott sker. Standarden anger metoder för att svara på hur lång livslängden är för ett rörsystem av termoplast vid ett givet tryck och temperatur, eller omvänt vilket maximalt tryck rörsystemet kan belastas med vid en given temperatur och krav på livslängd. Provningstiden ska överskrida 7000 timmar i fyra fall och 9000 timmar i ett enstaka fall.

Standarden ISO 13730 (1998) behandlar kumulativa skador för plaströr som utsätts för ett inre tryck och en förhöjd temperatur. Om brukstiden och tiden till brott är kända för en viss kombination av tryck och temperatur, så uppstår skadan som kvoten av brukstiden och brottiden. För olika förhållande kan motsvarande kvoter summeras och när summan uppgår till ett är röret förbrukat. Med denna standard kan livslängden uppskattas för andra temperaturprofiler än den som anges i t. ex. EN 15632-2 (2010).

4.3.2 Termisk konduktivitet hos flexibla FV-ledningar

Mätningar av termisk konduktivitet hos isoleringen i FV-ledningar sker enligt standard ISO 8497 (1994). I denna studie genomfördes mätningar av den effektiva värmekonduktiviteten hos FV-ledningar isolerade med en vakuumpanel och en matta med PEX-skum. En viktig information för den tekniska kravprofilen borde vara hur mycket isoleringsförmågan försämras med användningstiden. Vakuumpanelernas prestanda kan sjunka under driftstiden, på grund av att luft kan diffundera in i vakuumpanelen. En sådan studie har inte genomförts inom ramen för projektet.

4.3.3 Isolering av EPS

Standarden EN 1606 (2013) reglerar hur kryptester av EPS och andra värmeisolerande produkter för byggnader kan göras vid konstant tryckspänning. Det finns olika nivåer specificerade i standarden för att studera kryp vid tryckande belastning utgående ifrån tryckhållfasthet eller tryckspänningen vid töjningen 10 %.

Vattenabsorption hos EPS och andra värmeisolerande produkter för byggnader kan antingen bestämmas vid långvarig diffusion eller långvarig nedsänkning i vatten. Vattenabsorption vid långvarig nedsänkning i vatten bestäms enligt ISO 16535 (2019) genom att mäta ökningen hos provkroppens massa efter en total nedsänkning i vatten (metod 2) under en period av 28 dagar.

Vid långvarig diffusion tillämpas standarden ISO 16536 (2019). För varje kvalitet ska två provkroppar användas. Provkroppar ska vara kvadratiska block med sidan 500 mm och tjockleken ska vara den i aktuell tillämpning. Före provningen ska provkropparna konditioneras vid laboratorieförhållanden med temperaturen 23 ± 2 °C och relativ luftfuktigheten 50 ± 5 % (RF). Provkropparna ska placeras 50 mm över ett vattenbad som håller en temperatur på 50 ± 1 °C. Ovanpå respektive provkropp placeras en kylplatta som håller en yttemperatur på $1,0 \pm 0,5$ °C. Provningen ska pågå i 28 dygn och provkropparna ska vändas var sjunde dygn. Provkropparna ska vägas före och efter provningen. Efter provningen torkas ytvatten av och provkropparna vägs.

Termisk konduktivitet hos EPS och andra värmeisolerande produkter för byggnader kan bestämmas med standarden EN 12667 (2001). Standarden tillämpas för produkter med hög och medelstort värmemotstånd, som inte innehåller fukt. För fuktiga produkter tillämpas i stället EN 12664 (2001). Värmeledningstalet för EPS ligger normalt under $0,040$ W/(m K) vilket är högre än isoleringsmaterial av PUR som används idag med värdet typiskt under $0,030$ W/(m K). Det högre värmeledningstalet för EPS kan kompenseras för genom att mer isolering används. Om en EPS kulvert periodiskt dränks i vatten så finns det en risk att fukt diffunderar in i cellerna och kondenserar där, vilket kan på sikt påverka isoleringsförmågan negativt. Det har visat sig att värmeförlusterna kan öka med 21-43 % beroende på densiteten av EPS, se rapporten av Nilsson m. fl. (2003). I denna studie ökade den termiska konduktiviteten med ca 39 % vid en vattenabsorption på ca 10 volyms-%.

5 Diskussion

Eftersom det finns ett starkt intresse av att fortsätta använda det befintliga FV-nätet under en lång tid framöver på ett driftsäkert och kostnadseffektivt sätt har projektet utvecklat testmetoder anpassade till användning i fält som gör det möjligt att bedöma status av FV-ledningar i drift. En av metoderna är en så kallad RISE pluggmetod som mäter vidhäftningsstyrkan (skjuvhållfasthet) mellan PUR isolering och medierör. Den tidigare utvecklade laboratoriemetoden har vidareutvecklats för att kunna användas i fält utan att störa driften och återställa ledningen för fortsatt drift. Metoden har kompletterats med en spektroskopisk analys av borttagen isolering i laboratoriet. Genom att jämföra resultaten från mätningar av vidhäftningsstyrkan med den kemiska analysen av PUR kan slutsatser dras om kemisk nedbrytning är orsaken till förlusten av vidhäftningen. En återställningsmetod där borttagen isolering ersätts och manteln tätas efter provning har också utvecklats. Alla de tre delarna: mätning av vidhäftningsstyrkan i kombination med provtagning, kemisk analys av provet och återställning har kallats ”Pipeopsy”. Metoden är nu ”kalibrerad” och verifierad i fält och kan användas rutinmässigt för att ge kunskap om de befintliga ledningarnas funktionella status.

Åldringsprocesser sker olika snabbt vid olika temperaturer vilket gör det svårt att jämföra resultat från olika fältmätningar av gamla ledningar. I projektet har därför en beräkningsmetod tagits fram som räknar om drifttid vid olika temperaturer till en effektiv drifttid hos olika ledningar vid en vald referenstemperatur. Den effektiva drifttiden beror på historiken av uppmätta driftstemperaturer under olika perioder och installationsår. De flesta ledningarna från fältet som har ingått i studien har visat sig ha en drifttid på under 30 år vid referenstemperaturen 95 °C. Generellt sett är statusen hos de undersökta FV-ledningarna gällande vidhäftningsstyrkan tillräckligt bra för fortsatt drift. Ett generellt krav gällande axiell skjuvhållfasthet på 0,040 MPa, som baseras på den skjuvspänning som faktiskt uppstår i interfacet mellan PUR och medierör, har tagits fram. Ett noggrannare krav kan tas fram för enskilda ledningarna, som baseras på förläggningsdjup, friktion mellan mantel och mark samt dimensioner hos ledningen.

En metod att mäta termisk konduktivitet hos PUR i fält har utvecklats. Metoden är en vidareutveckling av den metod som beskrivs i ASTM D5334 (2014) för mätning av värmeledningsförmåga i jordarter och ger ytterligare ett mått på status hos en ledning i drift. Instrumentet består av en handhållen enhet till vilken en 100 mm lång, nålformad givare ansluts. Hela nålen trycks ner i PUR-provet i samband med mätning. Metoden kan användas tillsammans med pluggmetoden då redan gjorda hål kan användas för att trycka in TLS-givaren i isoleringen. Att kunna kombinera metoderna betyder att både mekaniska och termiska egenskaper kan mätas mer eller mindre samtidigt. Metoden är känslig för effekter av åldring såsom nedbrytning och gasutbyte samt fuktskador i PUR-isoleringen, där samtliga dessa händelser ökar den termiska konduktiviteten och på så vis även reducerar ledningens effektivitet vid värmeöverföring. Studien visade att metoden kan skilja på färsk och åldrad ledning genom att registrera en ca 8 % högre termisk konduktivitet i det åldrade provet. En fuktskadad ledning undersöktes på samma sätt. Mätning av termisk konduktivitet längst ner i isoleringen resulterade i ett värde

motsvarande rent vatten, vilket betyder att isoleringen är helt mättad av vatten. Ett värde som uppmättes längst upp i isoleringen kan anses vara normalt för en åldrad FV-ledning. Skillnaden mellan dessa två mätningar var en faktor 20. Mätningarna bedöms generellt vara relativt enkla att genomföra i fält och resultaten som stabila och inom rimliga nivåer. Det visade sig att vissa praktiska detaljer bör beaktas, att det är lämpligt att arbeta under tält eller annat tak, dels för att skydda utrustning och hål i manteln från regn, dels för att skydda mätområdet från sol. Metoden är mycket lämplig att användas i fält för att övervaka isoleringens termiska egenskaper då resultaten från TLS-metoden är jämförbara med traditionella laboratoriemetoder men är mycket enklare och snabbare att få fram.

Det är välkänt att syre har en stor betydelse för nedbrytningshastigheten och den termiska isoleringsförmågan hos PUR. Närvaro av syre är avgörande för den termo-oxidativa nedbrytningen av PUR medan gasutbyte mellan syre och koldioxid leder till sämre isoleringsförmåga (högre termisk konduktivitet). Syftet med den tredje metoden som har utvecklats i projektet, var att mäta syrediffusion genom manteln och in i isoleringen som funktion av tiden. I metoden användes en fiberoptisk syresensor från tyska PreSen som är 4 mm i diameter och 100 mm lång, och har ett mätområde 0-5 % O₂. Sensorn kopplades till ett optiskt instrument som i sin tur kopplades till en PC för loggning av data. Sensorerna monterades på två olika avstånd från medieröret (20 och 40 mm). Syrediffusion mätes, dels i en ledning där medieröret hölls vid en konstant temperatur av 130 °C, dels i en referensledning som efter tillverkning förvarades i rumstemperatur. Sensorn som satt monterad i referensen 20 mm från medieröret visade efter tillverkning en syrehalt på 0,3 % som sedan ökade upp till ca 3 % i slutet av testet. Sensorn placerad på 40 mm i samma ledning mätte inledningsvis en syrehalt på ca 3 % som sedan ökade upp till ca 8 %. Dessa resultat är tvivelaktiga pga de höga syrehalterna och för att syrehalten närmast manteln borde vara högre värde än längre ifrån. Motsvarande resultat för den uppvärmda ledningen var betydligt lägre jämfört med referensen och låg mellan ca 0,1 % och 0,3 % vilket är den förväntade nivån och ytterligare antyder att syrenivåerna uppmätta i referensledningen måste ifrågasättas. Syrehalterna i den uppvärmda ledningen ökade under de första 3000 timmarna för att sedan stabilisera sig på en konstant nivå. Generellt sett var undersökningen av syrehalten med den här metoden besvärlig och resultat behöver kontrolleras och jämföras med en bekräftad metod.

De lägre driftstemperaturerna i fjärde generationens FV-system möjliggör användning av mer resurssnåla och billigare konstruktionsmaterial. Ett av de är PEX som kan användas i medierör. PEX har därför undersökts och utvärderats med avseende på kemiska och mekaniska egenskaper som funktion av exponeringstiden vid olika temperaturer och miljöer. PEX-dragprovstavar exponerades i vannor med varmt cirkulerande vatten vid olika temperaturer. Efter olika åldringstider mättes mekaniska egenskaper, kemiska förändringar och halten av aktiv stabilisator. Resultatet av dragprovning visade att brottöjningen var oförändrad medan brottspänningen minskade med åldringstiden och efter 16 000 timmar låg på halva värdet oberoende av temperatur. I varmt vatten sker urlakning av stabilisatorer vilket kan mätas med hjälp av OIT-metoden, som ger ett mått på mängden kvarvarande aktiv stabilisator. Mätningarna av OIT visade, att halten aktiv

stabilisator minskar med åldringstiden och som väntat snabbare ju högre åldrings-temperatur. OIT i materialet som minskade mest (exponerad vid 90 °C) föll till mindre än en tredjedel av ursprunglig OIT under den tid som exponeringen pågick (knappt 2 år). Det betyder att det fortfarande finns aktiv stabilisator kvar i materialet och man förväntar sig därför att ingen nedbrytning har skett vilket kunde bekräftas med FTIR analyser. Om försöken hade fått fortsätta ytterligare något år finns dock risk att halten skulle närma sig mycket låga nivåer och när alla aktiva stabilisatorer har förbrukats skulle materialet börja brytas ner. Användningstemperaturer på 90 °C eller mer bör därför undvikas annat än under korta perioder. För medierören åldrade under trycket 6 bar och temperaturerna 70, 80 och 90 °C har sprängtryck utvärderats och axiella provstavar sågats ut. Efter drygt 18 000 timmars exponering (6 bars tryck vid olika temperaturer) har ingen förändring av sprängtrycket skett. För dragprovstavarna i 90 °C har brottspänningen minskat till hälften och brottöjningen har reducerats ca 30 % under samma åldringstid.

Nya s.k. ”hybridisolerade” FV-ledningar har föreslagits med motiveringen att de har betydligt bättre isolerförmåga och kan därför markant minska distributionsförlusterna. Två olika typer av flexibla FV-ledningar har utvärderats med avseende på värmeisoleringsförmåga. En typ hade medierör av PEX och isolering med vakuumpanel och PEX-skum medan den andra hade enbart PEX-skum. Den termiska konduktiviteten för PEX-skummet uppmättes till 0,043 W/(m K) och den skenbara konduktiviteten för hybridledningen med vakuumpanel och PEX-skum uppmättes till 0,020 W/(m K) medan VIP panelen själv hade 0,009 W/(m K). Värdena kan jämföras med kraven för PUR i standarden EN 253 (2019) på 0,029 W/(m K).

Kulvertar av EPS används redan idag vid förläggning av FV- och FK-ledningar. Det finns ett särskilt intresse att få veta mer om EPS för isolering av FV-applikationer. I det här arbetet har både jungfrulig och återvunnen EPS undersökts. Då dessa utsätts för tryckande mekanisk belastning och förhöjda temperaturer har simuleringar gjorts för att beräkna spännings- och temperaturnivåer för FV-ledningar. Kryptöjningar hos jungfrulig och återvunnen EPS studerades vid olika tryckande belastningar. Efter lång tid (efter 5 år) blir töjningen större för jungfrulig EPS än återvunnen då temperaturen är 23 °C vid båda belastningsnivåerna. Det omvända gäller för EPS vid 45 °C enligt anpassade modeller efter gjorda mätningar. Mätningar av deformationer då ett varmt rör belastar ett EPS-block visar att efter drygt 7000 timmar (ca. 291 dagar) är deformationen försumbar (mindre än 0,3 mm). En annan egenskap av intresse är vattenabsorption. Vid långvarig diffusion var vattenabsorption hos både jungfrulig och återvunnen EPS ca 10 % baserat på volym. Vattenabsorption hos EPS vid långvarig nedsänkning var knappt 4,0 % för jungfrulig EPS och 1,4 % för återvunnen baserat på volym. Termisk konduktivitet hos EPS på dels konditionerade provkroppar, dels fuktiga provkroppar efter diffusion gav ingen nämnvärd skillnad mellan jungfruligt och återvunnet material men en stor skillnad mellan konditionerade och fuktiga material.

6 Kommersialisering

Det pågår ett arbete på RISE med att kommersialisera provningsmetoden PipeOpsy som har utvecklats i detta projekt. PipeOpsy marknadsförs genom fortsatt användning i ett nystartade forskningsprojekt och via dedikerade kanaler på den tyska FV-marknaden. Bilateral samtal har också förts med FV-aktörer på den nederländska marknaden.

Thermtest TLS-100 är redan en kommersiell produkt, men optimerad för mätningar av termisk konduktivitet hos jord, sand, grus och fyllmaterial enligt standard ASTM D5334. För mätningar hos PUR-isolering i FV-ledningar behöver produkten dock justeras. Framst bör kalibrering ske med avseende på isoleringsmaterial och över ett större temperaturintervall, uppvärmningseffekten optimeras och mättiden möjligen justeras något. Då ASTM D5334 inte är tillämpbar på PUR-isolering är det även möjligt att justera nålens geometri, vilket skulle kunna vara en fördel i vissa lägen, såsom vid mätning på ledningar med liten diameter. Diskussioner kring detta förs mellan Cederkrantz Gård & Konsult och tillverkaren Thermtest Inc. Till detta kommer utvecklande av hjälpmedel för att kunna föra in nålen i isoleringen med önskad vinkel, något som med fördel kan kombineras med RISE PipeOpsy. Metoden uppvisar redan acceptabel mätnoggrannhet, som demonstrerat på nyproducerade ledningar hos PowerPipe samt vid jämförelse med mätningar utförda med plattapparat (EN 12667).

7 Internationell samverkan

Mycket forskning har gjorts om åldring och status hos traditionella FV-ledningar med medierör av stål, isolering av polyuretan och mantel av polyeten. Olika forskningsprojekt inom detta område har utförts i Tyskland mellan 2004 och 2016, vilka redovisas av Schleyer och Richter (2016). I Sverige har flera projekt genomförts, som behandlar accelererad åldring och dess inverkan på skjuvhållfastheten och kemiska och fysikaliska egenskaper. De första redovisades av Sällström m. fl. (2012a,b) och Yarahmadi & Sällström (2014). Arbetet fortsattes av Vega m. fl. (2018). Den forskning som gjorts ledde till att standarden EN 253 (2009) reviderades och relationen provtid i laboratoriet vid förhöjd temperatur och brukstid vid driftstemperatur togs bort i EN 253 (2019). Det har funnits delade meningar om hur accelererade prov ska utföras och vid vilka temperaturer.

Målet med internationell samverkan är att analysera kunskapsläget, fylla i kunskapsluckor och implementera överenskomna metoder för accelererad åldring och bestämning av livslängd samt framtida statusbedömning. En viktig del är att kunna förutspå hur vidhäftningsstyrkan förändras med tiden till följd av nedbrytningen av isoleringen av polyuretan vid användning av ledningar under olika driftsförhållanden.

7.1 Workshop NR1

En Workshop genomfördes 2021-04-12 med 16 deltagare från Danmark, Ryssland, Storbritannien, Sverige och Tyskland. Workshopen inleddes med definition av vad vi menar med livslängd av en produkt. Det är den tid det tar för en kritisk egenskap att minska till en kritisk nivå då produkten utsätts för en given påfrestning. För traditionella förtillverkade FV-ledningar är livslängdskravet 30 år, den kritiska egenskapen är skjuvhållfasthet, påfrestning är 120 °C och den kritiska nivån 0,12 MPa och 45 % av den initiala nivån enligt EN253. Olika forskargrupper från RISE, IMA (Dresden) och HCU (Hamburg) presenterade kortfattat sina senaste experimentella forskningsresultat.

På Workshopen var den allmänna meningen att accelererad åldring ska genomföras med rimlig temperaturhöjning, så att samma slags nedbrytningsreaktioner sker som vid normal användning. En maximal åldringstemperatur bör inte överskrida 140 °C.

Tillgången på syre måste vara tillräckligt stor vid den accelererade åldringen. En åsikt var att även diffusionen av syre genom manteln bör accelereras eller i vart fall beaktas vid accelererad åldring.

En dimensionerande livslängd på 50 år vid en användningstemperatur på 120 °C med kortare perioder upp till 130 °C och enstaka toppar upp till 140 °C föreslogs. Provningsperioder på maximalt 1 år men helst ett halvt år diskuterades.

7.2 Workshop NR2

En andra Workshop genomfördes 2021-09-14 med 13 deltagare från Danmark, Ryssland, Sverige och Tyskland. Den var en fortsättning på den förra och skulle ge möjlighet till fortsatta diskussioner.

I diskussionerna framkom att det finns tillämpningar där FV-ledningar används vid betydligt högre driftstemperaturer än normalt. Det ifrågasattes om enskilda tillämpningar med höga driftstemperaturer ska styra kravsättningen på FV-ledningar eller om det ska finnas olika krav för olika tillämpningar.

Normalt används FV-ledningar med maximala nivåer i spannet 90-110 °C med enstaka toppar upp till 130 °C. I EN 253 (2019) står att livslängden ska vara 30 år vid 120 °C med enstaka toppar på 140 °C under totalt 300 timmar per år. Om en livslängd på 50 år önskas måste temperaturerna ligga under 115 °C. Under mötet beslutades att vi bör ta fram underlag för de driftstemperaturer som faktisk används. De temperaturhistorier från svenska nät som vi har fått tillgång till under detta projekt visar, att under vinterperioden varierar framledningstemperaturen inom spannet 80-100 °C. Standardavvikelsen för en temperaturhistoria vintertid ligger i spannet 5-10 °C.

Frågan om temperatur vid accelererade provningar i laboratoriet togs upp igen. Det påpekades att andra nedbrytningsmekanismer sker vid temperaturer över 140 °C än vid användningstemperaturer kring 100 °C, se artikeln av Vega m.fl. (2018). Det behövs andra typer av isolerade rör för höga användningstemperaturer över 140 °C.

Nödvändigheten och möjligheten att öka tillgången på syre för att accelerera åldringsprocessen togs upp. Det finns två möjligheter att öka syrediffusionen genom manteln. Det ena är att använda en tunnare mantel och det andra är att öka temperaturen hos omgivningen och därmed manteln. Det finns efter skumning ett tryck mellan isoleringen och mantel och även medieröret. Detta tryck förändras om manteln blir tunnare eller temperaturen ökar. Dessa mekaniska förändringar misstänks kunna påverka försämringen av vidhäftningen.

Mätningar av förändringar hos molekylstrukturen med hjälp av IR-spektra togs upp. Vidare diskuterades nyttan med varierande skjuvspänningar för att efterlikna vad som händer med FV-ledningarna i glidzonerna. Den allmänna slutsatsen av workshoppen blev att diskussionerna och arbetet måste fortsätta i ett planerat projekt inom IEA DHC.

7.3 Projekt inom IEA DHC

Projektresultaten har presenterats för marknaden och akademien utanför Sverige vilket har placerat svensk fjärrvärme och fjärrkyla forskning i främsta ledet på den internationella arenan. Vi har tillsammans med andra lyckats att skapa ett nytt internationellt samfinansierat projekt Annex Task Shared Project 6 (TS 6): "Status assessment, ageing, lifetime prediction and asset management of District Heating Pipes" inom ramen för IEA DHC.

Task Shared 6 har redan startat. Arbetet har initierats av AGFW tillsammans med HCU och RISE. RISE har deltagit som projekt- och delprojektledare vid framtagandet av fyra av totalt fem arbetspaket i ansökan.

Arbetspaketen består av statusbedömning, nedbrytning, livslängdsuppskattningar, tillgångsförvaltning och framtida perspektiv av fjärrvärmenät. Deltagarna behöver skriva nationella ansökningar om finansiering, eftersom inga medel finns att söka inom IEA DHC för denna typ av projekt.

8 Fjärrkyla (FK)

När de globala temperaturerna stiger, ökar behovet av luftkonditionering. Då det växande energibehovet hotar att leda till ökade utsläpp av växthusgaser, har många engagerat sig i nya satsningar på effektiv kylning. Energin som behövs för luftkonditionering kommer sannolikt att tredubblas till 2050, med tio nya luftkonditioneringsenheter som förväntas säljas varje sekund under de kommande 30 åren. Denna enorma efterfrågan har potential att driva upp utsläppen av växthusgaser och ytterligare förvärra själva problemet som ska lindras. Det är därför kritiskt att kartlägga oberäknade effekter av den globala kolproduktionen. Källa: Oxford Martin School (2021).

Investeringar i en ren och effektiv kylning kan ha en stor positiv inverkan på klimatförändringarna och kan också vara till hjälp för att uppnå en hållbar utveckling och spara pengar. Kylbehovet i världen som en adaptiv metod för klimatförändring pekar på att FK kan vara en av framtidens mest växande teknik inom energieffektivisering, som kan gynna inte bara Europa och Sverige utan hela världen. Sveriges långa erfarenhet och stora kunskap inom FV kan ge en boost för FK-utveckling. I detta avsnitt har vi summerat en del av initiativen som görs hos de internationella, europeiska och nationella företag och organisationer. Befintliga och framtida planer för FK hos energibolagen som är partner i det här projektet har också undersökts och summerats. FK-ledningar med deras material och relaterade standarder har också undersökt för Sveriges del.

8.1 Vad är FK?

FK fungerar på samma sätt som FV. Ett centralt kylaggregat kyler ner en köldbärare som transporteras genom ett ledningssystem till den miljö som ska kylas som kontor, köpcentra, lägenheter eller kylrum och liknande. Den vanligaste köldbäraren är kallt vatten som matas in i de enskilda byggnadernas egna kylsystem genom en värmeväxlare. När vattnet har kylt byggnaden återgår det till kylanläggningen vid en högre temperatur där det kyls igen och omfördelas i en sluten slinga. FK kan produceras på flera sätt genom frikyla från hav eller sjöar, kylmaskiner eller absorptionskyla med överskottsvärme och el. Om överskottsvärme kommer från spillvärme eller avfallsförbränning på sommartid så blir det absorptionsvärme ett hållbart sätt både ekonomisk och miljömässig att producera FK eftersom det produceras ingen värme vid produktion av kyla.

8.2 Användning av FK "State of the art"

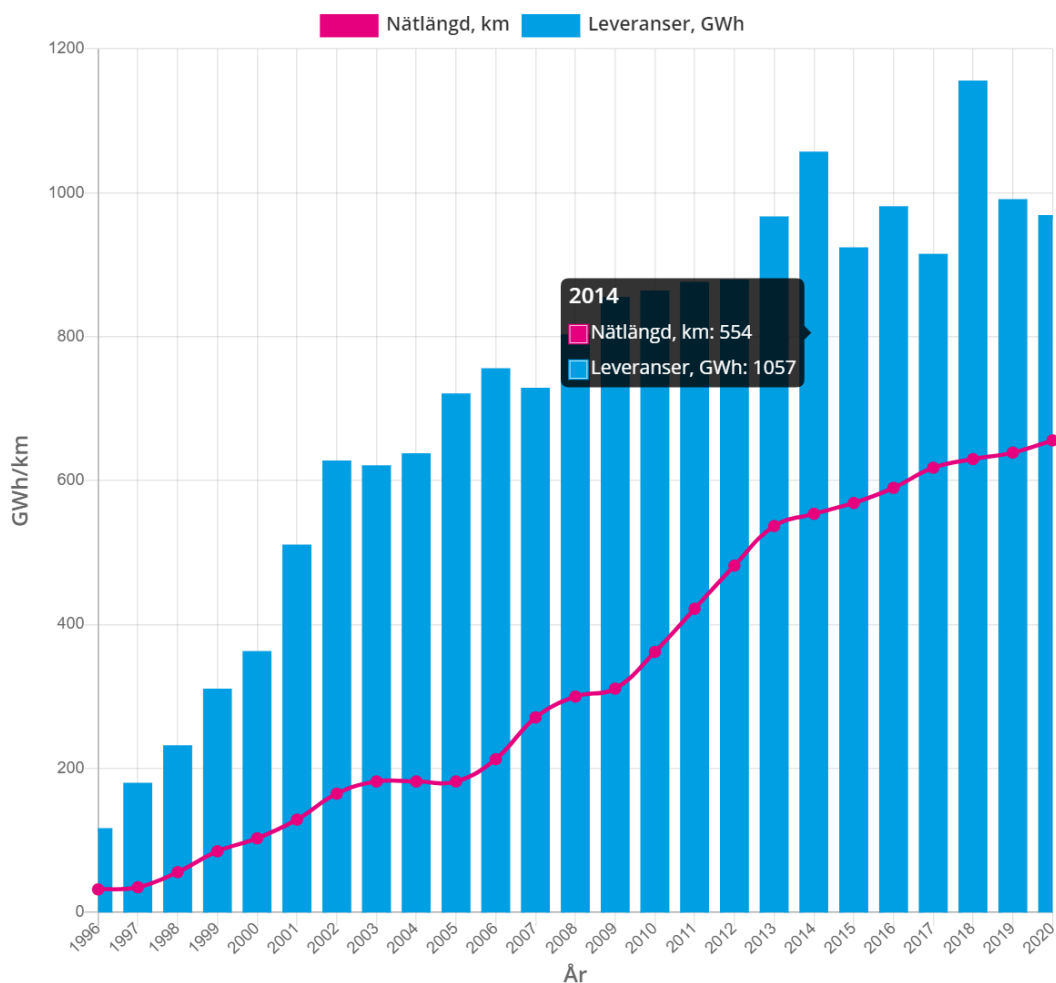
Sverige

FK byggs ut kontinuerlig i Sverige och kyla från kylmaskiner och absorptionskyla är de vanligaste produktionsteknikerna men värmepumpar kommer strax därefter. Enligt Energiföretagen Sveriges undersökningar går ungefär, en tredjedel av den levererade FK till kontorsfastigheter och kommersiella lokaler. De totala leveranserna av FK var 969 GWh för år 2020 med en minskning av 21 GWh jämfört med år 2019. Ökning av FK syns på de ökande nätlängderna, 2020 ökade den totala längden FK-ledningar till 656 km. Det är en tydlig indikation på att efterfrågan på

FK växer även om leveransen från föregående år minskade. Enligt Energiföretagen Sverige har FK ökat stadigt i Sverige, se Figur 68.

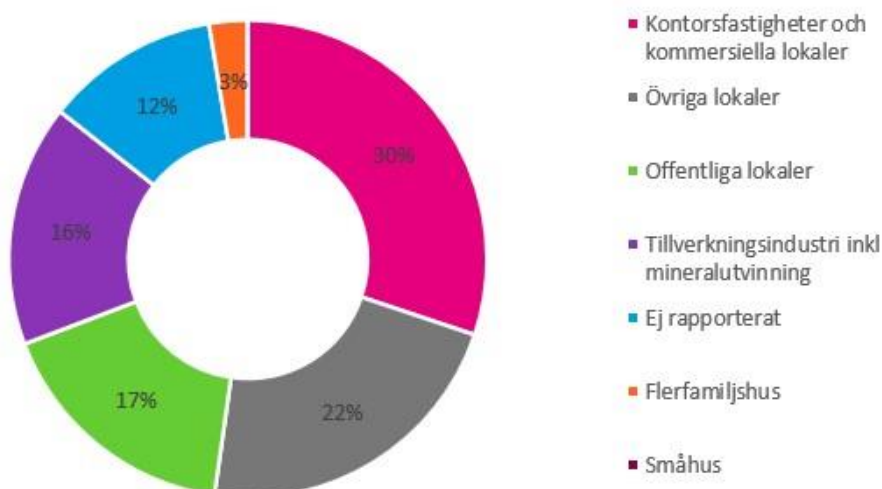
Andel av FK som går till bostäder är fortfarande några få procent, se Figur 69 från Energiföretagens statistik, ungefär 3 % till flerfamiljshus.

Fjärrkyla: leveranser och nätlängd



Figur 68: Nätlängd och leveranser av FK i Sverige mellan år 1996-2020 (Källa: Energiföretagen Sveriges statistik)

Fördelning Kundtyp



Figur 69: Fördelning mellan kundtyper för fjärrkyla i Sverige (Källa: Energiföretagen Sveriges statistik)

Det sämsta sättet att producera kyla är att använda små luftkonditioneringsaggregat för varje byggnad enligt Gates (2021). FK är tystare, tar mycket mindre plats, är mer tillförlitlig och är lönsammare både ekonomiskt och miljömässigt i jämförelse med enskilda luftkonditioneringsaggregat.

Internationellt

Danmark: Byggnadsägare i Taarnby kommun, Storköpenhamn, använder konkurrenskraftigt prissatt och miljövänlig kyla.

Produktion av FK och FV i kombination med markkyla och kylvattenlagring i en anläggning som även utnyttjar överskottsvärme från ett närliggande reningsverk. Symbiosen gör att energibolaget inte bara kan tillhandahålla konkurrenskraftig kyla för invånarna, utan också att generera mer kostnadseffektiv värme till FV-nätet enligt Danfoss (2022).

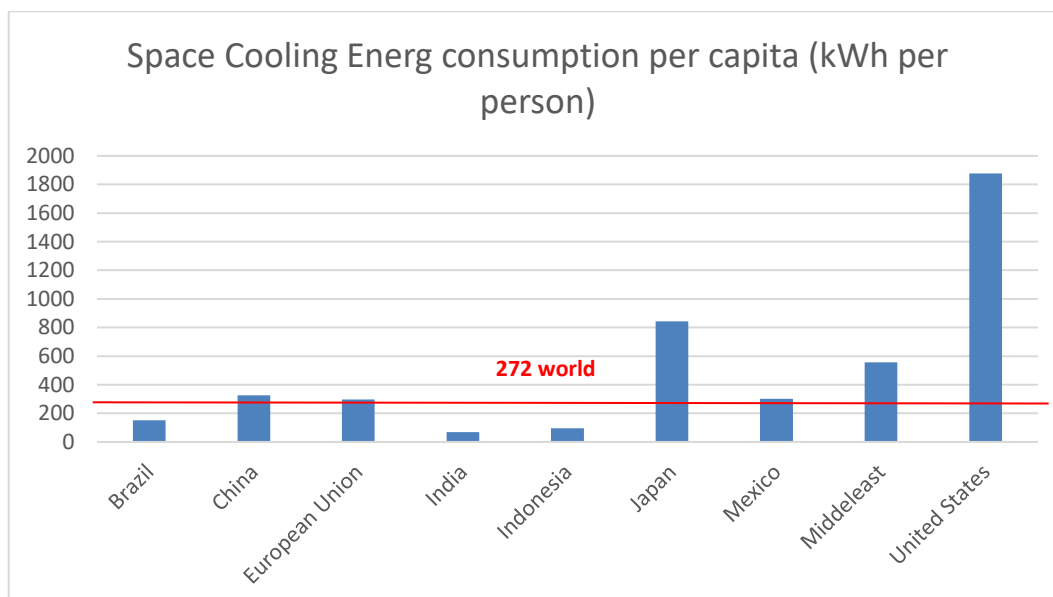
Analys av olika scenarier för distribution av centraliserat kylvatten bör ta hänsyn till konceptdesign av distributionsnät för kylt vatten inklusive rörmaterial, typ av isolering, designtryck och preliminär layout med specifikationer på dimension, längd och typ av installationer per sträcka IEA (2020). Typiska utmaningar är att markförhållandena kan vara väldigt olika beroende på typ och geokondition hos området. En annan utmaning vid analys av FK:s lönsamhet är att förutsäga framtidens utvecklingshastighet, kundkopplingar och elpriser, vilket gör att en riskanalys behövs. Även om riskidentifiering normalt utförs i färdplansfasen, måste riskerna analyseras och prioriteras. Tillgång till platser för produktionsanläggningar och underjordiska utrymmen för distributionsledningar är avgörande för att utveckla ett framgångsrikt FK-projekt. Det bästa sättet att hantera denna

risk är att ta itu med den så snart som möjligt eftersom sådana processer kan vara tidskrävande. Källa: IEA DHC|CHP (2019).

The Greater Copenhagen Utility (HOFOR, 2022) driver den havsvattenbaserade FK, som betjänar en mängd olika kommersiella kunder. 50 % av kunderna använder FK för komfortkyla, 40 % använder den för processkyla och 10 % för frysanläggningar. Det innebär att runt hälften av FK kapaciteten används för att upprätthålla ett behagligt inomhusklimat på kontor, butiker och andra platser där många delar lokaler. De 40 % som används för processkyllning gäller serverrum, processanläggningar eller sjukhusutrustning.

The Cool Coalition (2022) har lagt fram sina förslag för generalsekreteraren för FN:s klimattoppmöte i New York att det finns flera intressenter i nätverket som kopplar samman ett brett spektrum av nyckelaktörer från myndigheter, städer, internationella organisationer, företag, finans, akademi och grupper i det civila samhället. Dessa kan underlätta kunskapsutbyte, opinionsbildning och gemensamma åtgärder mot en snabb global övergång till effektiv och klimatvänlig kylning. The Cool Coalition främjar en strategi baserad på minska-förändra-förbättra: skydda holistiskt och tvärspektoriell strategi för att möta kylbehoven hos både industrialiserade länder och utvecklingsländer genom bättre samhällsbyggnad, bättre byggnadsdesign, energieffektivitet, förnybar energi, och termisk lagring samt avveckling av HFC (Hydrofluorocarbons).

Kyla är kopplad till ekonomisk tillväxt och anses vara nyckeln till hälsa och välbefinnande hos människor i varma klimat. Indien som är en växande ekonomi som kännetecknas av låg penetration av luftkonditionering, men stigande inkomst per capita och snabb urbanisering. Eftersom Indien ligger till stor del i tropiskt klimat, kommer utvecklingen att leda till att kravet på kylning ökar. Att ta itu med det stigande kylbehovet ger en utmaning såväl som en unik möjlighet, att bygga ut FK, eftersom det är mest hållbart och kan göras tillgängligt för många. Enligt International Energy Agency (IEA) (2020) orsakar kyla och luftkonditionering (RAC) 10 % av globala CO₂ utsläpp. Indien som land har en av de lägsta tillgångarna till kylning i världen, vilket reflekteras i deras låga nivå av energikonsumtionen för byggnadskyllning per capita 69 kWh, jämfört med världsgenomsnittet på 272 kWh enligt Government of India (2018).



Figur 70: Energikonsumtion för kylning av byggnader. Källa: IEA (2018)

Enligt Cooling Coalition (2020) är Storbritannien, Indien, Frankrike, Rwanda och Vietnam pionjirländerna som utforskar och distribuerar innovativ teknik, strategier och finansieringsmekanismer för att säkerställa termisk komfort och tillgång till hållbara alternativ samtidigt som de begränsar yttre miljöeffekter av kylning.

8.3 Distribution av FK

Drifttemperaturen för ett FK-system är vanligtvis mellan 5 och 12 °C där vatten är kylmedia. Även kylmedier med extremt låga temperaturer, till exempel från den kemiska industrin, kan transporteras. Transport av kylvatten med bibehållen lågtemperatur har studerats och förisolerade rör och komponenter för FK, som säkerställer en minimal värmeförlust från rörsystemet har använts.

Många faktorer kan påverka effektiviteten, livslängden och kvaliteten på det totala kylsystemet, och var och en av dessa faktorer bör undersökas när man väljer de bästa rören och ventilerna för applikationen. I de flesta fall är ventiler, rör och sensorer alla nyckelfaktorer för ett kylsystems effektivitet och övergripande kvalitet.

Det har utvecklats standarder för olika typer av FK-ledningar, se EN 17414 del 1-3 (2020) och EN 17415-1 (2020).

I de flesta fall kan fem typer av rör användas för ett kylsystem, inklusive: slang, gjutjärn, stål, rostfritt stål eller legeringar och plast. Storleken och typen av rör som ska användas i systemet bestäms av faktorer som önskad flödes hastighet genom systemet, kompatibilitet med vätskan och de kemikalier som måste införas i systemet för att säkerställa effektivitet. Storleken på rörledningen är viktig, men den kan lätt avgöras av hur mycket vatten som behöver rinna genom systemet vid

varje given tidpunkt. Högre kvaliteter av rörmaterial kommer med en högre kostnad men balanseras av längre livslängd och tillförlitlighet. Rörsystemets kompatibilitet är viktig eftersom vatten kommer att rinna genom det med en nästan konstant flödes hastighet. När vattenflödet ökar krävs ett mer kemiskt resistent rörmaterial för att bättre hålla emot korrosion eller nedbrytningen. Om det finns korrosion eller nedbrytning i rörsystemet kan det finnas ett antal problem, inklusive: läckor i rörsystemet där vatten kan sippra igenom, korrosionsuppbyggnad i röret, korrosion kommer oundvikligen att minska vattnets flödesarea. Detta korrosionsproblem är mer dominerande i små system. Storleken på röret är viktig eftersom beräkningar måste göras för att rördiametern ska passa med hela systemet. Beräkningarna av rördiametern måste vara korrekta så att systemets hastighet blir optimerad och effektiv. Om hastigheten minimeras i hela systemet, kommer vattnet att kunna rinna fritt och kyla lämpliga områden. Dessutom blir det mindre korrosion om hastigheten hålls till ett minimum. Det sista elementet att tänka på när man tittar på rörledningarna i ett kylsystem är införandet av kemikalier i vattnet. I ett system med öppen atmosfär introduceras vanligtvis kemikalier för att kontrollera vattnets pH-nivå. Om kemikalier inte införs och pH-nivåerna inte övervakas, är det sannolikt korrosion i rörsystemet, vilket orsakar ett långsamt flöde av vatten. I slutna system tenderar det att finnas färre mineraler i vattnet. Följaktligen kan slutna system använda aggressiva vätskor som avjoniserat vatten, vilket passar bättre vid användning av plaströr eller rostfritt stål snarare än gjutjärn eller stål. Källa: Werner & Fredriksen (2014).

8.4 FK hos energibolagen och rörtillverkare

För att få en uppfattning om magnitud och harmonisering av FK i Sverige har vi gjort en undersökning hos de samarbetspartner (energibolagen, rörtillverkare och system installatörer) som samarbetar i projektet (Öresundskraft AB, Vattenfall AB, Göteborg Energi AB, E.ON Energilösningar AB, Krafringen AB, Jönköping Energi AB, Powerpipe Systems AB, Uponor AB) och har fokuserat på följande delar. Vi har skickat 8 st. konkreta frågor för att kunna få en uppfattning om vad är det aktuella samspelet mellan kylbehov och kraftsystem. T.ex. (i) aktuell volym av kylbehov; (ii) förväntad ökning av kylbehov; (iii) profilen för kylbehovet en typisk dag. Hur uppskattas den potentiella utvecklingen av interaktionen mellan kyla och kraftsystem i frånvaro av ren kylning? Hur stor potentiell framtida kylbelastning uppskattas från den förväntade ökningen av kylbehovet till 2030 under antagande av ett business as-usual-scenario. Vad är den potentiella roll för ren kylning för att tillhandahålla flexibilitetstjänster till kraftsystemet? De typer av utmaningar som uppstår från den framtida interaktionen mellan kylkraftsystemen. Kan ni identifiera rena kyllosningar med prioritering av rena kyllosningar för vidareutveckling.

Svaren var varierande och det gjorde att vi fick mycket breddare information än bara svar på våra frågor, t.ex. Öresundskraft svarade mycket konkret på ett frågeformulär medan Göteborg Energi valde att beskriva mer historisk process runt deras FK som kunde ge oss en bild av deras motivation för varför deras FK ser ut idag, utöver svar på frågorna. Vattenfall har svarat på frågorna med avseende på deras FK i Uppsala. Jönköping Energi beskrev hur deras fjärrkyla

fungerar idag och planer för framtiden. Powerpipe Systems AB har beskrivit deras nuvarande och framtida planer från en rörtillverkares perspektiv. Elgocell informerade oss om användning av EPS material för isolering av plaströr i FK system hos andra energibolagen i Sverige.

Svar från Öresundskraft:

F1) Hur många km FK-nät har ni för närvarande? 20,2 km F2) Hur har ni planerat för närmaste 5 respektive 10 år när det gäller expansion av FK? Fortsatt utbyggnad, men det går trögt med bara enstaka nyanslutningar varje år.

F3) Vilka typ av rör, ev. isolering och kopplingar har ni för era FK-ledningar? Stålrör med betongcoating och skarvar med asfaltslinda samt plaströr

F4) Har ni haft någon/några haverier och vad berodde de på? Nej

F5) Vilken sorts energikälla använder ni för FK-nätet? Är det kylmaskiner (el), absorptionskyla eller frikyla? Kylmaskin och frikyla med absorptionsmaskin

F6) Vad är fram- respektive returtemperatur för ert vatten i FK-ledningar? 6-12°C

F7) Har ni någon annan utmaning som behöver belysas? Förutom dålig nyanslutning hade vi problem med vagabonderande strömmar som är åtgärdat för tillfället.

F8) Har ni något övrigt att tillägga? Tror inte det

Svar från Göteborg Energi AB

FK-produktionen började med lokala öar och absorptionskylmaskiner som tillhandahöll kyla till en eller ett fåtal kunder. Genom att utnyttja ett överskott av tillgänglig FV kunde Göteborg Energi AB få fart på FK-leveranser.

I dagsläget förekommer det både frikyla från en värmeväxlare som tar kyla från älvvattnet, absorptionskylmaskiner samt kompressorkylmaskiner. Det finns tankar på en ackumulatortank men än är ingen byggd för FK.

Över tiden har de olika produktionsöarna byggts samman till ett sammanhängande FK-nät. Den senaste sammanbyggnationen uppstod då Göteborg Energi AB korsade älven och kunde knyta samman FK-näten på de olika sidorna.

Ledningsmässigt rörande markförlagda rör för distribution började Göteborg Energi AB med coatade stålrör. Därefter började man med samma typ av rör som man använder för FV i dagligt tal kallat PEH rör. Sedan gick man över till plaströr dvs PE-rör. I dagsläget tilläggsisolerar vi tilloppsledningen med lite PUR vilket skyddas av ytterligare en mantel i PE.

Systemtekniskt separerar vi FV och FK. Energiföretagen har tagit fram en utredning som visar på vikten att dela på dessa produkter ekonomiskt. Kunderna vill mer och mer ha både värme och kyla så det är viktigt att kunna erbjuda båda produkterna men vi håller isär dem.

Det finns ett fåtal i världen som bygger något som kanske ändå kommer att få kallas 5:e generationens FV där man hanterar både FV och FK hos kunder. Som energibolag tillhandahåller man något som närmar sig gråvatten i kombination med enorma ackumulatörer och mycket avancerade komplicerade system fyllda med värmepumpar fast bara två rör i backen där man använder det ena röret som tillopp för FV och det andra för retur för FV. Samma rör blir då det andra för tillopp för FK och det ena som retur för FK. Göteborg Energi AB har i dagsläget inga planer på den typen av lösning. Eftersom Göteborg förtätas och expanderar mycket kraftigt nu så måste bolaget som energileverantör hålla jämna steg med alla produkter. Det innebär en kraftig utbyggnad av både FK-produktion och FK-nät.

Svar på frågor:

F1) Hur många km FK-nät har ni för närvarande? 45,6 km.

F2) Hur har ni planerat för närmaste 5 respektive 10 år när det gäller expansion av FK? Göteborg Energi AB har utbyggnadsplaner som bygger på säljprognoser. Detta för att ha färdigt med vår FK-infrastruktur där nya stadsområden byggs upp eller befintliga omformas.

F3) Vilka typ av rör, ev. isolering och kopplingar har ni för era FK-ledningar? Nybyggnation sker med PE-rör i SDR 17 alt. SDR 11, tillopp isoleras vanligtvis. Finns även Rostfriarör och stålrör av FV-standard i nätet. Kopplingar och ventiler är av standardkaraktär.

F4) Har ni haft någon/några haverier och vad berodde de på? Ja. Yttre påverkan, materialdefekter, montage/installationsdefekter.

F5) Vilken sorts energikälla använder ni för FK-nätet? Är det kylmaskiner (el), absorptionskyla eller frikyla?

Göteborg Energi AB använder frikyla, absorptionskylmaskiner samt kompressorkylmaskiner.

F6) Vad är fram- respektive returtemperatur för ert vatten i FK-ledningar? Beror på utetemperatur, Varierande framledningstemperaturer 6 - 12°C och retur 16°C

F7) Har ni någon annan utmaning som behöver belysas? Nej

F8) Har ni något övrigt att tillägga? Nej

Svar från Vattenfall AB:

F1) Hur många km FK-nät har ni för närvarande? Ca 25 km. Delar av nätet ägs av kund men driftas av Vattenfall

F2) Hur har ni planerat för närmaste 5 respektive 10 år när det gäller expansion av FK? Efterfrågan på kyla är stor och vi har en arbetsgrupp som jobbar med hur vi kan växa. Vi har en kundlista där vi gör bedömningar när de olika kunderna kan bli aktuella.

F3) Vilka typer av rör, ev. isolering och kopplingar har ni för era FK-ledningar? FV-rör isolerclass 1 eller motsvarande, Coatade stålrör med offeranoder, PE100 rör PN10 och PN16 (används vid styrd borrning)

F4) Har ni haft någon/några haverier och vad berodde de på? Nej

F5) Vilken sorts energikälla använder ni för FK-nätet? Är det kylmaskiner (el), absorptionskyla eller frikyla? Alla tre nämnda.

F6) Vad är fram- respektive returtemperatur för ert vatten i FK-ledningar?
Framtemp 6 °C. Retur bestämmer kund, kan ligga mellan 10 till 17 °C. Snitt som kommer tillbaka kan ligga på ca 14,5 °C.

F7) Har ni någon annan utmaning som behöver belysas? Dimensionering av nät, antal producerande enheter, legionella i kyltorn, kunder med dåligt Delta-T.

F8) Har ni något övrigt att tillägga? Utmanade att växa snabbt. Efterfrågan på kyla har ökat snabbare än vad vi förutsett.

Svar från Jönköping Energi AB:

Vi har för närvarande fem olika FK-nät:

Huvudnätet i Centrala Jönköping: sedan mitten av 90:talet. 55 kunder och ca 12,5 km ledning. Frikyla från Vättern (ca 66 %), absorbtionskyla (ca 29 %) och kompressorkyla (ca 5 %).

A6 (Köpcenter): sedan 2015. 6 kunder och ca 2,3 km ledning. Kompressorkyla (ammoniakmaskin).

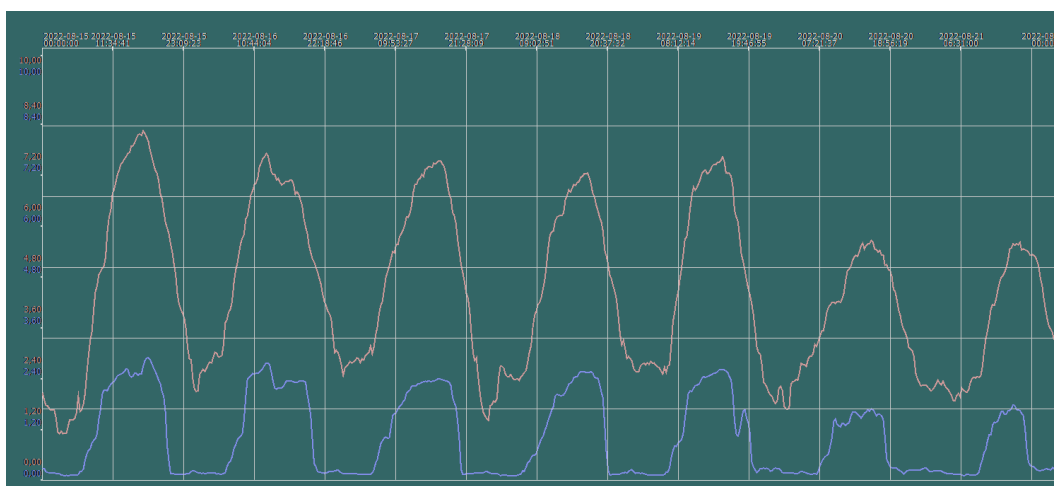
Solåsen (affärslokaler): Sedan 2013. 4 kunder och ca 0,5 km ledning.

Kompressorkyla.

Saab Stensholm. Sedan 2016. 8 kunder och ca 0,8 km ledning. Kompressorkyla.

Axamo flygplats. Övertogs 2010. 4 kunder och ca 1 km ledning. Geokyla.

FK är, till skillnad mot FV snarare en effektprodukt, då dygnsvariationerna är stora, se Figur 71.



Figur 71: Övre kurvan visar effekten (i MW) i huvudnätet) och nedre kurvan visar effekten på A6 köpcenter under v33 i 2022.

Vi ser att intresset för FK ökar och tror att den trenden kommer att fortsätta framöver.

Systemmässigt har vi de senaste åren bundit ihop två mindre FK-nät till huvudnätet och inom ett år så kommer även A6 nätet ingå i huvudnätet. Nästa steg är att förnya produktionsflottan samt jobba mer aktivt på kundsidan, där vi har stora problem med dåliga ΔT från kunder (några kundanläggningar som enbart tar ut 2-3 grader, med ett alldeles för stort flöde som följd).

Vi har, liksom Göteborg Energi, helt separerade FK och FV-system, och har inga planer på att förändra detta. Däremot ser vi FK i många fall som ett komplement till FV, ibland är det ett kundkrav att vi kan tillhandahålla kyla för att även få värmeaffären. Så ur den aspekten så hänger de samman.

Ledningsmässigt så börjande vi bygga med plastcoatade stålrör (utan isolering), men har de senaste 10-15 åren byggt med isolerade stålrör (FV-rör serie 1). I några enstaka fall har vi även byggt ledningsnät i plast, då främst när det handlar om sjöförlagda ledningar.

Powerpipe Systems och Elgocell som produkt och materialtillverkare i det här projektet har beskrivit sina aktiviteter i FK enligt följande:

Powerpipe Systems AB har beskrivit att deras FK- och FV-marknaden växer båda. Förfrågningar växer inom båda segmenten. Orsaker kan vara global temperaturökning i kombination med ökade krav på komfort (FK) samt ökat fokus på hållbar energi och för Europas del ökat fokus på att bättre nyttja lokala resurser och ökad fossilfrihet (FV). Vi levererar FK-rör med medierör av både stål och PE. Alltid PUR-isolering och PE-mantel.

Elgocell AB har levererat till flera energibolagen i Sverige sedan 2010 ett system som består av plaströr för medierör och isolering av EPS (expanderade polystyren), se följande:

Elgocells försäljning av isolering för framledningröret i Fjärrkylanät, typ EPS PIPE-FJK

Stad		År		DN	
Halmstad	7 513 m	2010	71 m	50	61 m
Växjö	12 465 m	2011	5 301 m	63	24 m
Kristianstad	1 309 m	2012	1 433 m	75	593 m
Malmö	2 921 m	2013	5 887 m	90	317 m
Falun	2 899 m	2014	2 688 m	100	153 m
Umeå	583 m	2015	3 010 m	110	1 004 m
		2016	2 218 m	115	50 m
Totalt	27 690 m	2017	2 362 m	125	1 871 m
		2018	736 m	140	907 m
		2019	1 054 m	145	193 m
		2020	2 930 m	160	954 m
				180	3 469 m
		Totalt	27 690 m	200	3 247 m
				220	198 m
				225	355 m
				250	2 700 m
				280	731 m
				315	4 380 m
				355	6 452 m
				450	12 m
				500	19 m
					27 690 m

F1) Hur många km FK-nät har ni för närvarande?

FK- Kulvert längd = 16,6 km

F2) Hur har ni planerat för närmaste 5 respektive 10 år när det gäller expansion av FK?

För 5-årsplanen räknar vi med en fördubbling av energiförsäljningen och en ledningsutbyggnad på ca 4-5km ledning. För en 10års-horisont ser vi ytterligare 2-3km utbyggnad.

F3) Vilka typer av rör, ev. isolering och kopplingar har ni för era FK-ledningar?
Elgocell AB, Pipelife, Wavin och Logstor

F4) Har ni haft någon/några haverier och vad berodde de på?

Nej

F5) Vilken sorts energikälla använder ni för FK-nätet? Är det kylmaskiner (el), absorptionskyla eller frikyla?

Vi har absorptionskyla, frikyla och kompressorkyla (el). Frikyla nyttjas mest på vinterhalvåret och sedan är det absorptionskyla i basen och kompressorkyla på toppen.

F6) Vad är fram- respektive returtemperatur för ert vatten i FK-ledningar?
För sommarlasten ligger vi på ca 6 grader fram och 13 grader retur.

F7) Har ni någon annan utmaning som behöver belysas?
Utmaningen ligger i att få ner läggingskostnaderna för FK då det kan vara långt mellan kunderna då det inte är lika självklart som att ansluta sig till FV.

F8) Har ni något övrigt att tillägga?
Nej

Publikationslista

Resultaten av projektet har kommunicerats ut via flera kanaler. Publiceringar har gjorts i flera tidningar och vetenskapliga journaler i Sverige och på den internationella arenan. En doktorsavhandling har publicerats av Alberto Vega inom ramen för det här projektet på Chalmers tekniska högskolan:

A Vega (2020c), Assessment of the lifetime of district heating pipes, Avhandling, Industri- och materialvetenskap, Chalmers tekniska högskola, ISBN 978-917905-359-8.

De aktuella artiklarna för projektet som ingår i avhandlingen är

A Vega, N Yarahmadi & I Jakubowicz (2020a), Determining the useful life of district heating pipes: Correlation between natural and accelerated ageing, Polymer Degradation and Stability, 175, s 109-117.

A Vega, N Yarahmadi, J Sällström, I Jakubowicz, (2020b), Effects of cyclic mechanical loads and thermal ageing on district heating pipes, Polymer Degradation and Stability, 182, artikel 109385.

En rapport har skrivits om arbetet som utförts främst inom AP1 och behandlar livslängdsbedömning och statusutvärdering. Rapporten har publicerats av Energiforsk:

I. Jakubowicz, J. H. Sällström (red), A. Vega & N. Yarahmadi (2022), Livslängdsprediktering och statusutvärdering av fjärrvärmeledningar, Energiforsk, Rapport 2022:851, ISBN 978-91-7673-851-1, <https://energiforsk.se/>.

Inom ramen för den internationella delen i projektet har följande presenterats för IEA DHC:

Stefan Hay & Nazdaneh Yarahmadi, Annex Task Shared Project 6 - Status assessment, ageing, lifetime prediction and asset management of District Heating Pipes, Technology Collaboration Programme by IEA, 3rd December 2021.

Publikationer och presentationer i branschknuta tidningar:

J Fredriksson (2020), Branschnära FoU: Så ska fjärrvärme bli mer hållbar, VVS Forum, nr 2.

Konferensbidrag:

- Resurseffektiva fjärrvärmenät med hjälp av nya material, metoder för statusbedömning och metodik för livslängdsuppskattning (Energimyndigheten), A. Vega, Distributionsdagarna, 10 feb 2021.
- Combination of mechanical and thermal loads for the ageing of district heating pipes, Alberto Vega, Nazdaneh Yarahmadi, Ignacy Jakubowicz, IEA-DHC 17th Symposium for District Heating and Cooling, 2021.
- Development of knowledge about ageing mechanism and its assessment for pre-insulated district heating pipes, Nazdaneh Yarahmadi, 13th

International Conference Linnaeus Eco-Tech Conference 21-23 Nov, 2022.

- PipeOpsy - A novel method to assess status of pre-insulated district heating (DH) pipes in operation, *Alberto Vega*, 13th International Conference Linnaeus Eco-Tech Conference 21-23 Nov, 2022.
- Effect of combine mechanical and thermal loads on degradation of pre-insulated district heating pipes, *Ignacy Jakubowicz*, 13th International Conference Linnaeus Eco-Tech Conference 21-23 Nov, 2022.

Referenser, källor

ASTM D5334 (2014), Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure, ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D7984 (2016), Standard Test Method for Measurement of Thermal Effusivity of Fabrics Using a Modified Transient Plane Source (MTPS) Instrument, ASTM International, West Conshohocken, PA.

J T Boyle & J Spence (1983), Stress Analysis for Creep, Butterworths, London.

M Celina, K T Gillen & R A Assink (2005), Accelerated aging and lifetime prediction: Review of non-Arrhenius behaviour due to two competing processes, Polymer Degradation and Stability 90, s 395-404.

Cool coalition (2020), SUMMARY REPORT, From Recovery to COP26: The Contribution of Sustainable Cooling, www.coolcoalition.org.

Cool coalition (2022), Delivering cooling can be either a huge part of the problem or a huge part of the solution, www.coolcoalition.org.

[Danfoss \(2022\), \(ipapercms.dk\) DKDD.PC.405.A1.02, www.danfoss.com](http://www.ipapercms.dk).

EN 253:2009+A2:2015, 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, Comité Européen de Normalisation, Bryssel.

EN 253:2019, District heating pipes – Bonded single pipe systems for directly buried hot water networks – Factory made pipe assembly of steel service pipe, polyurethane thermal insulation and a casing of polyethylene, Comité Européen de Normalisation, Bryssel.

EN 823 (2013), Thermal insulating products for building applications – Determination of thickness, Comité Européen de Normalisation, Bryssel.

EN 1606 (2013), Thermal insulating products for building applications – Determination of compressive creep, Comité Européen de Normalisation, Bryssel.

EN 12664 (2001), Thermal performance of building materials and products – Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – Dry and moist products of medium and low thermal resistance, Comité Européen de Normalisation, Bryssel.

EN 12667 (2001), Thermal performance of building materials and products – Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – Products of high and medium thermal resistance, Comité Européen de Normalisation, Bryssel.

EN 15632-2 (2010), District heating pipes – Pre-insulated flexible pipe systems – Part 2: Bonded plastic service pipes – Requirements and test methods, Comité Européen de Normalisation, Bryssel.

EN 17414-1 (2020), District cooling pipes – Factory made flexible pipe systems – Part 1: Classification, general requirements and test method, Comité Européen de Normalisation, Bryssel.

EN 17414-2 (2020), District cooling pipes – Factory made flexible pipe systems – Part 2: Bonded system with plastic service pipes; requirements and test methods, Comité Européen de Normalisation, Bryssel.

EN 17414-3 (2020), District cooling pipes – Factory made flexible pipe systems – Part 3: Non bonded system with plastic service pipes; requirements and test methods, Comité Européen de Normalisation, Bryssel.

EN 17415-1 (2020), District cooling pipes – Bonded single pipe systems for directly buried cold water networks – Part 1: Factory made pipe assembly of steel or plastic service, Comité Européen de Normalisation, Bryssel.

Energiföretagen Sverige (2022), www.energiforetagen.se.

Euroheat & Power (2022), www.euroheat.org/certification-programme.html, 2022-06-17.

B Gates (2021), How to avoid a Climate Disaster- The solutions we have and the breakthroughs we need, Alfred A. Knopf, N.Y.

Government of India (2018), India Cooling Action plan, Ministry Of Environment, Forest & Climate Change, moef.gov.in/en/india-cooling-action-plan/.

HOFOR (2022), Greater Copenhagen Utility, www.hofor.dk.

IEA (2018), Technology report - The future of cooling - Opportunities for energy efficient air conditioning, www.iea.org.

IEA (2020), The go-to guide for sustainable district cooling, DHC TCP - IEA research project, www.iea.org.

IEA DHC|CHP (2019), International Energy Agency Technology Collaboration Programme on District Heating and Cooling Including Combined Heat and Power, Sustainable District Cooling Guidelines.

ISO 6259-3 (2015), Thermoplastics pipes – Determination of tensile properties –, Part 3: Polyolefin pipes, International Organization for standardization, Genève.

ISO 8497 (1994), Thermal insulation - Determination of steady-state thermal transmission properties of thermal insulation for circular pipes, International Organization for standardization, Genève.

ISO 9080 (2012), Plastics piping and ducting systems – Determination of the longterm hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation, International Organization for standardization, Genève.

- ISO 13760 (1998), Plastics pipes for the conveyance of fluids under pressure – Miner's rule – Calculation method for cumulative damage, International Organization for standardization, Genève.
- ISO 15875 (2003) Plastics piping systems for hot and cold water installations – Crosslinked polyethylene (PE-X) –Part 1: General, Part 2: Pipes, International Organization for standardization, Genève.
- ISO 16535 (2019), Thermal insulating products for building applications – Determination of long-term water absorption by immersion, International Organization for standardization, Genève.
- ISO 16536 (2019), Thermal insulating products for building applications – Determination of long-term water absorption by diffusion, International Organization for standardization, Genève.
- L Jiao, H Xiao, Q Wang & J Sun (2013), Thermal degradation characteristics of rigid polyurethane foam and the volatile products analysis with TG-FTIR-MS, *Polymer Degradation and Stability*, 98, s 2687-2696.
- C Ting Larsen, P Tøgeskov & A Leuteritz (2009), Extending the service life of pre-insulated pipes - Analyses of diffusion rates through PE and impact on ageing, *EuroHeat & Power*, English edition, 6(II).
- S Hay, A Leuteritz, N Yarahmadi & A Kallert (2021), Upcoming IEA DHC Annex Task Shared Project 6 is still looking for further contributions, *Euroheat & Power*, English Edition, Vol. 18, IV/2021, s 8-9.
- A Leuteritz, K-D Döring, T Lampke & I Kuehnert (2016), Accelerated ageing of plastic jacket pipes for district heating, *Polymer Testing* 51, s142-147.
- M Meigen & W Schuricht (2005), Preinsulated pipes age more quickly and differently than assumed, *Euroheat & Power - English Edition*, Vol. 2005(1), s. 32-39.
- S Nilsson, S-E Sällberg, G Bergström (2003), EPSPEX-kulvert - funktion under och efter vattendränkning, *Svensk Fjärrvärme*, Rapport FOU 2003:97, ISSN 1402-5191.
- K Nolte (1982), Untersuchung der thermischen Alterung vom PUR-Hartschaum in Fernwärmeleitungen, Bericht BMFT-FB-T 82-197, Amtliche Materialprüfanstalt für Werkstoffe des Maschinenwesens und Kunststoffe im Institut für Werkstoffkunde, Universität Hannover.
- M Olsson, U Jarfelt, M Fröling & O Ramnäs (2001), The polyethylene casing as a diffusion barrier for polyurethane insulated district heating pipes, *Journal of Cellular Polymers*, 20, s 37-47.
- M Olsson, U Jarfelt, M Fröling, S Mangs & O Ramnäs (2002), Diffusion of Cyclopentane in Polyurethane Foam at Different Temperatures and Implications for District Heating Pipes, *Journal of Cellular Plastics*, 38(1), s 177-188.

- C Persson (2015), Predicting the long-term insulation performance of district heating pipes, Avhandling, Byggnadsteknologi, Chalmers tekniska högskola, ISBN 978-91-7597-172-8.
- A Schleyer & S Richter (2016), Qualitätssicherung für zukünftige Kunststoff-mantelrohrsysteme in der Fernwärmeversorgung -Alterungsprüfmethoden, Wechselbeanspruchung, zerstörungsfreie Muffenprüfungen, Diffusionshemmung, Zeitstandsverhalten, Versagensmechanismen, Forschung und Entwicklung Heft 39, AGFW, Frankfurt am Mein.
- W Schuricht and A Leuteritz (2010), Entwicklungsanforderungen an die Rohrhersteller, Euroheat & Power 39(3): p. 38-41.
- F Ståhl (2022a), Bestämning av värmekonduktivitet, Rapport P104788-01, RISE, Borås 2022-06-02.
- F Ståhl (2022b), Bestämning av vattenabsorption vid långvarig diffusion, Rapport P104788-02, RISE, Borås 2022-02-07.
- J H Sällström, O Ramnäs and S-E Sällberg (2012a). Statusbedömning av fjärrvärmerörsystem, Rapport 2012:37, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.
- J H Sällström, O Ramnäs & S-E Sällberg (2012b), Status assessments of district heating pipes, Proceedings of the 13th International Symposium on District Heating and Cooling (DHC13), September 3-4, Copenhagen.
- Oxford Martin school (2021), The Oxford Martin Programme on The Future of Cooling, www.oxfordmartin.ox.ac.uk/future-of-cooling.
- A Vega, N Yarahmadi & I Jakubowicz (2017), Accelerated ageing and degradation characteristics of rigid polyurethane foam, Polymer Degradation and Stability, 138, s 192-200.
- A Vega, N Yarahmadi & I Jakubowicz (2018), Determination of the long-term performance of district heating pipes through accelerated ageing, Polymer Degradation and Stability, 153, s 15-22.
- A Vega, N Yarahmadi & I Jakubowicz (2020a), Determining the useful life of district heating pipes: Correlation between natural and accelerated ageing, Polymer Degradation and Stability, 175, s 109-117.
- A. Vega, N. Yarahmadi, J. Sällström, I. Jakubowicz, (2020b), Effects of cyclic mechanical loads and thermal ageing on district heating pipes, Polymer Degradation and Stability, 182, artikel 109385.
- S Werner & S Frederiksen (2014), Fjärrvärme och Fjärrkyla, Studentlitteratur, Lund, ISBN 9789144085296, 576 s.
- N Yarahmadi & J H Sällström (2014), Proceedings of the 14th International Symposium on District Heating and Cooling (DHC14), September 7-9, Stockholm.

Bilagor

Bilaga 1: Administrativ bilaga ligger i separat dokument.