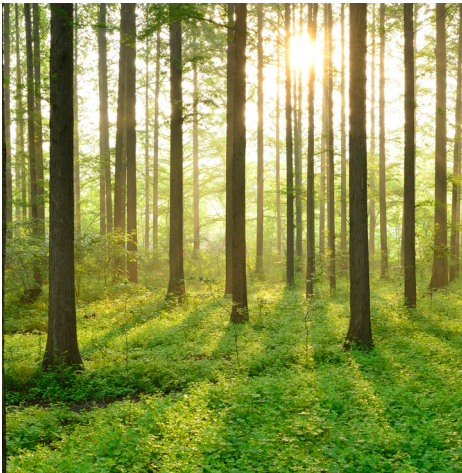


LIVSLÄNGDSPREDIKTERING OCH STATUSUTVÄRDERING AV FJÄRRVÄRMELEDNINGAR

RAPPORT 2022:851



Livslängdsprediktering och statusutvärdering av fjärrvärmeledningar

**IGNACY JAKUBOWICZ
JAN HENRIK SÄLLSTRÖM
ALBERTO VEGA
NAZDANEH YARAHMADI**

ISBN 978-91-7673-851-1 | © Energiforsk februari 2022

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

Förord

Ett sätt att kostnadseffektivt underhålla fjärrvärmenäten är att selektivt byta ut de ledningar som är i behov av underhåll. För detta krävs kännedom om en lednings status. Det här projektet har syftat till att utveckla en fältmetod för att mäta den funktionella statusen hos fjärrvärmeledningar i drift. Projektet har också syftat till att utveckla en internationellt accepterad metodik för livslängdsprediktering med avseende på förlorad vidhäftning mellan isolering och medierör.

Projektet har letts av Jan Henrik Sällström och genomförts tillsammans med kollegorna Ignacy Jakubowicz, Alberto Vega och Nazdaneh Yarahmadi från RISE Research Institute of Sweden. En referensgrupp bestående av Magnus Ohlsson, Öresundskraft (sammanhållande); Daniel Byström, Skellefteå Kraft; Josefin Ekman, E.ON Energiinfrastruktur; Shahriar Badii och Gun Bjurling, Vattenfall; Lennart Kramér, Göteborg Energi; Martin Linder, Tekniska Verken i Linköping; Johan Lundén och Linda Mårtensson, Kraftringen har följt och kvalitetssäkrat projektet.

Projektet ingår i programmet FutureHeat vars långsiktiga mål är att bidra till visionen om ett hållbart uppvärmningssystem med framgångsrika företag som utnyttjar nya tekniska möjligheter och där de samhällsinvesteringar som gjorts i fjärrvärme- och fjärrkyla tas till vara på bästa sätt. Detta projekt ingår i programmets andra etapp.

Programmet leds av en styrgrupp bestående av Jonas Cognell, Göteborg Energi (ordförande); Anders Moritz, Tekniska verken i Linköping; Anna Hinderson, Vattenfall AB; Charlotte Tengborg, E.ON Energiinfrastruktur; Fabian Levihn, Stockholm Exergi; Holger Feurstein, Kraftringen; Dan Bruhn, Jönköping Energi; Patrik Grönbeck, Borlänge Energi; Leif Bodinson, Söderenergi; Lena Olsson Ingvarson, Mölndal Energi; Magnus Ohlsson, Öresundskraft; Niklas Lindmark, Gävle Energi; Per Örvind, Eskilstuna Strängnäs Energi & Miljö; Petra Nilsson, Växjö Energi; Staffan Stymne, Norrenergi; Stefan Hjärtstam, Borås Energi och Miljö; Svante Carlsson, Skellefteå Kraft; Ulf Lindquist, Jämtkraft och Julia Kuylensstierna (adjungerande), Energiforsk.

Suppleanter utgörs av Ann Britt Larsson, Tekniska verken i Linköping; och Peter Rosenkvist, Gävle Energi.

Julia Kuylensstierna, programansvarig FutureHeat

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Projektet har fokuserat på fjärrvärmeledningar uppbyggda av medierör av stål, isolering av polyuretan (PUR) och mantel av polyeten. Projektet hade två huvudmål: En fältmetod skulle utvecklas för att mäta den funktionella statusen hos fjärrvärmeledningar i drift och en internationellt accepterad metodik för livslängdsprediktering med avseende på förlorad vidhäftning skulle presenteras.

Även om befintliga system byggs ut, moderniseras och driftas annorlunda i framtiden finns det ett intresse av att fortsätta använda gamla fjärrvärmeledningar så länge som möjligt. Gamla ledningar behöver underhållas på ett kostnadseffektivt sätt genom ett planerat och selektivt utbyte.

En fältmetod (RISE pluggmetod) att bedöma status hos fjärrvärmeledning i drift har utvecklats i projektet. Metoden mäter vidhäftningsstyrkan (skjuvhållfasthet) mellan isolering och medierör. Fältmetoden har kompletterats med en kemisk analys av borttagen isolering efter provning i laboratoriet. En återställningsmetod där borttagen isolering ersätts och manteln tätas efter provning har också utvecklats. RISE Pluggmetod, kemisk analys och återställningsmetoden utgör en komplett metod som kallas PipeOpsy. Metodens robusthet och tillförlitlighet har verifierats med stort antal mätningar i fält samt kompletterande tester i laboratoriet.

En metod att jämföra drifttid vid en vald referenstemperatur för olika fjärrvärmeledningar efter användning har presenterats. En gräns för godtagbar axiell skjuvhållfasthet har föreslagits till 0,040 MPa, som kan användas vid en första bedömning. Ett specifikt värde för de aktuella förhållandena kan bestämmas utgående ifrån ledningens dimension, läggningsdjup och friktion mellan mantel och fyllnadsmaterial. De i projektet analyserade fjärrvärmeledningarna hade generellt sett, med enstaka undantag, en tillräckligt bra status för fortsatt drift. Flertalet av ledningarna bedömdes heller inte ha utsatts för en hög driftstemperatur under många år. Två av ledningarna hade en drifttid på knappt respektive drygt 30 år vid referenstemperaturen 95 °C. De övriga nio hade väsentligt kortare drifttid vid samma temperatur. Ytterligare mätresultat från laboratoriemätningar har tagits med som jämförelse, och bland dessa hade två rör utsatts för accelererad åldring motsvarande 44 respektive 56 år.

Vad gäller metodik för livslängdsprediktering har forskningsläget fastställts genom en litteraturoversikt. Två workshops har genomförts. En rimlig temperaturnivå för accelererad provning har överenskommit. En plattform för internationell fortsatt samverkan har skapats tillsammans med andra inom IEA-DHC för fortsatt forskning om metodik för livslängdsprediktering hos förisolerade fjärrvärmeledningar.

Summary

The project has focused on district heating pipes built up of steel service pipes, polyurethane insulation (PUR) and polyethylene casing. The project had two main objectives: A field method should be developed to measure the functional status of district heating pipes in operation and an internationally accepted methodology for lifetime prediction regarding loss of adhesion would be presented.

Even if existing systems are expanded, modernized, and operated differently in the future, there is an interest in continuing to use old district heating pipes for as long as possible. Old pipelines need to be maintained in a cost-effective way through a planned and selective replacement.

A field method (RISE plug method) to assess the status of district heating pipes in operation has been developed in the project. The method measures the adhesion strength (shear strength) between insulation and service pipes. The field method has been supplemented with a chemical analysis of removed insulation after testing in the laboratory. A restoration method where removed insulation is replaced, and the casing is sealed after testing has also been developed. RISE Plug method, the chemical analysis and the restoration method form a complete method called PipeOpsy. The method's robustness and reliability have been verified with many measurements in the field as well as supplementary tests in the laboratory.

A method to compare operating time at a selected reference temperature for different district heating pipelines after use has been presented. A limit for acceptable axial shear strength has been proposed to 0,040 MPa, which can be used in an initial assessment. A specific value for the current conditions can be determined based on the dimension of the pipe, laying depth and the friction between the casing and the filling material. The district heating pipes analysed in the project generally had, with a few exceptions, a sufficiently good status for continued operation. Most of the pipes were also not considered to have been exposed to a high operating temperature for many years. Two of the pipelines had operating times of about 30 years at the reference temperature of 95 ° C. The other nine had significantly lower operating times at the same temperature. Additional measurement results from laboratory measurements have been included as a comparison, and among these, two pipes had been exposed to accelerated ageing corresponding to 44 and 56 years, respectively.

About methodology for lifetime prediction, the research situation has been determined through a literature review. Two workshops have been conducted. A reasonable temperature level for accelerated testing has been agreed. A platform for international continued collaboration has been created together with others within the IEA-DHC for research on lifetime prediction of pre-insulated district heating pipes.

Innehåll

1	Introduktion	7
2	Litteraturöversikt	8
3	Livslängdsbegränsning	11
4	Fältmetod	13
4.1	RISE pluggmetod	13
4.2	Mätningar i fält	13
4.3	Kemisk analys	15
4.4	Mätresultat	16
5	Laboratorieundersökningar	17
5.1	Material	17
5.2	Temperaturberoende	17
5.2.1	Tillvägagångsätt	17
5.2.2	Resultat	17
5.3	Korrelation av skjuvhållfasthet mellan RISE Pluggmetod och standardmetod	18
5.3.1	Tillvägagångsätt	18
5.3.2	Resultat	19
5.4	Täthet hos mantel	19
5.4.1	Tillvägagångsätt	19
5.4.2	Resultat	19
6	Analysmetoder	21
6.1	Omräkning av driftstid vid olika temperaturer till en gemensam referenstemperatur	21
6.2	FTIR analys	23
7	Analys av resultat	24
7.1	Mätningar av vidhäftning i fält	24
7.2	Analys med ftir på prover tagna från fältmätningar	27
7.3	Diskussion	30
8	Internationellt samarbete	31
8.1	Workshop nr 1	31
8.2	Workshop nr 2	32
8.3	Projekt inom IEA DHC CHP	33
8.4	Resultat	33
9	Slutsatser	34
10	Förslag till fortsatt arbete	36
	Referenser	37

1 Introduktion

Även om befintliga system byggs ut, moderniseras och drifas annorlunda i framtiden finns det ett intresse av att fortsätta använda gamla fjärrvärmeledningar så länge som möjligt. Gamla ledningar behöver underhållas på ett kostnadseffektivt sätt genom ett planerat och selektivt utbyte.

Projektet fokuserar på fjärrvärmeledningar uppbyggda av medierör av stål, isolering av polyuretan (PUR) och mantel av polyeten. Projektet har två huvudmål: En fältmetod utvecklas för att mäta statusen hos fjärrvärmeledningar gällande skjuvhållfasthet och en internationellt accepterad metodik för livslängdsprediktering med avseende på förlorad vidhäftning presenteras.

Förlorad vidhäftning mellan isolering och medierör anses vara den viktigaste haverimekanismen därför att när vidhäftningsstyrkan (skjuvhållfastheten) förloras, kan rörliga stålmedierören nära böjar att utmattas och gå sönder. Vidare kan isoleringen i böjarna att tryckas sönder av medieröret, vilket kan leda till skador på manteln och dess skarvar. Rörelser och utmattningen beror på temperaturväxlingar i fjärrvärmesystemen vid drift. Då läckor hos medierör och mantel uppstår, kan långa sträckor av isoleringen förstöras när den kommer i kontakt med varmt vatten. Vidare kommer vattnet att leda till korrosion av medieröret.

En fältmetod (RISE pluggmetod) att bedöma status hos fjärrvärmeledning i drift utvecklas i projektet. Metoden mäter vidhäftningsstyrkan mellan isolering och medierör. Dess mätnoggrannhet och korrelationen mot axiell skjuvhållfasthet studeras. Skjuvhållfasthetens temperaturberoende studeras också, eftersom isoleringens egenskaper kan variera med temperaturen.

En återställningsmetod där borttagen isolering ersätts och mantelröret tätas efter provning utvecklas också. Fältmetoden kompletteras med en kemisk analys av borttagen isolering i laboratoriet. Hela processen med RISE pluggmetod och kemisk analys av inhämtade provkroppar kallas för PipeOpsy. Metodens robusthet och tillförlitlighet verifieras med flertalet mätningar i fält samt kompletterande tester i laboratoriet.

Vidare är målet att genom internationell samverkan med andra aktörer inom fjärrvärme, göra en analys av forskningsläget och skapa en plattform för att uppnå samsyn gällande metoder för livslängdsbedömningar av fjärrvärmeledningar. En viktig del är att kunna förutspå hur vidhäftningsstyrkan förändras med tiden till följd av nedbrytningen av isoleringen av polyuretan vid användning av ledningarna under olika driftförhållanden. Genom samverkan med andra inom IEA-DHC byggs en plattform för att samarbeta och starta nya internationella projekt, som leder till bättre resursanvändning och underhållsprioritering inom detta område.

Det slutgiltiga målet är att kunna förutse återstående livslängd genom att kombinera resultat från fältmätningar av vidhäftningsstyrka och kemisk analys (kallat PipeOpsy) med en överenskommen beräkningsmodell.

2 Litteraturöversikt

Förtillverkade fjärrvärmeledningar, bestående av mantel av polyeten (HDPE), isolering av polyuretan och medierör av stål, degraderar och blir sämre med tiden. I denna rapport studeras 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. De viktigaste nedbrytningsmekanismerna som leder till försämringar av isoleringen av polyuretan är:

- Termisk nedbrytning: Vid höga temperaturer bryts polyuretanet ned genom att bindningar i molekylerna bryts. Polyuretanet får då försämrade mekaniska egenskaper.
- Termo-oxidativ nedbrytning: Syre diffunderar in i isoleringen och reagerar med polyuretanet. Isoleringen färgas brun och får försämrade mekaniska egenskaper.
- Mekano-kemisk nedbrytning: Mekanisk belastning på ett polymert material accelererar nedbrytningen av materialet, ofta på grund av morfologiska förändringar i materialet orsakade av spänningen.
- Diffusion av gaser: Luft (kväve och syre) diffunderar in genom manteln och koldioxid diffunderar ut. Även blåsgasen (cyklopentan eller CFC11) diffunderar ut ur isoleringen. I det första fallet är manteln den skyddande barriären och i det andra fallet är själva isoleringen barriären.

Polymerisationsreaktionen skulle också kunna gå i omvänd riktning, 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 polyuretan 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 isosyanat och polyol börjar vid 200 °C i kvävemiljö.

Diffusion av gaser i fjärrvärmeledningar och dess långsiktiga inverkan på isoleringsförmågan har studerats i flera arbeten, se t. ex. artiklar av Olsson m. fl. (2001, 2002) och avhandlingen av Persson (2015). Olsson studerade diffusion av gaser genom manteln och i polyuretanet. Manteln utgör en diffusionsbarriär för koldioxid, syre och kväve, medan polyuretanskummet 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 polyuretan i fjärrvärmeledningar. Vidare var målet att utveckla testmetoder för att ta reda på termisk åldring av polyuretan. Olika försök genomfördes av polyuretan 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 fjärrvärmeledningar togs fram med metoder för livslängdsprediktering baserade på Noltes idéer, se EN 253 (2009). I standarden användes aktiveringsenergin 150 kJ/mol för beräkning av livslängden.

Nya undersökningar om nedbrytning av fjärrvärmeledningar startade först i Tyskland och pågick i olika nationella projekt mellan 2005-2016, se rapporten av Schleyer & Richter (2016). Man befarade att nedbrytningen av fjärrvärmeledningarna 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 fjärrvärmeledningar togs fram av Sällström m. fl. (2012, 2013). Metoden har vidareutvecklats inom detta projekt och anpassats bättre till användning i fält. Den kallas nu RISE pluggmetod och beskrivs i Kapitel 4. Metoden har använts i flera senare projekt. Yarahmadi och Sällström (2014) använde metoden och andra konventionella metoder då åldring av fjärrvärmeledningar 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 polyuretan i luft och kväve miljö. Polyuretanet förändrades mycket mer i luft än i kväve, vilket indikerar betydelsen av termo-oxidativ nedbrytning hos isoleringen i fjärrvärmeledningar. Förändring av molekylstrukturen observerades endast vid termo-oxidativ 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 fjärrvärmeledningarna. 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 dominanta i olika temperaturspann. Vega m. fl. (2020a) kom fram till att initiala förändringar av vidhäftningsstyrka hos fjärrvärmeledningar i bruk 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 fjärrvärmeledningar vid förhöjd temperatur (130 and 140 °C) med och utan inverkan av axiella skjuvspänningar. Fjärrvärmeledningarna utsätts för skjuvspänningar i glidzonerna, när ledningarna

glider relativt marken då de 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.

3 Livslängdsbegränsning

Det kan finnas olika orsaker till att en del av en ledning måste bytas ut. Det kan vara läckage av vatten från otätt medierör eller otät mantel, vilket leder till att isoleringen bryts ned och korrosion av stålmedieröret. Läckagen kan bero på misstag vid konstruktion, installation eller yttre åverkan av ledningen. Isoleringen kan också brytas ned efter alltför höga driftstemperaturer eller efter normal användning vid höga driftstemperaturer under en längre tid.

De högsta temperaturerna finns vid medieröret, vilket betyder att nedbrytningsreaktioner hos isoleringen sker snabbare här än längre ifrån. När vidhäftningsstyrkan (skjuvhållfastheten) förloras, kan rörliga stålmedierören nära böjar efter en tid att utmattas och gå sönder. Vidare kan isoleringen i böjarna att tryckas sönder av medieröret, vilket i sin tur kan leda till skador på manteln och dess skarvar. Rörelserna och utmattningen beror på temperaturväxlingar i fjärrvärmesystemen vid drift.

Vid provning av nya fjärrvärmerör finns det krav i Standarden EN 253 (2019) att skjuvhållfastheten ska överskrida 0,12 MPa. Vid drift belastas ledningarna i glidzonerna där de axiella krafterna byggs upp. Skjuvspänningen vid medieröret beror på friktionskraften längs med manteln, som i sin tur beror på friktionskoefficienten mellan mantel och fyllnadsmaterial och trycket mellan mantel och fyllnadsmaterial.

Det horisontella trycket beror på jordtryckskoefficienten K_0 , som beror på fyllnadsmaterialets inre friktionsvinkeln φ :

$$K_0 = 1 - \sin(\varphi) \quad (1)$$

Friktionskraften per längdenhet på röret kan tecknas

$$F_f = \frac{1 + K_0}{2} p_v \mu \pi D_c \quad (2)$$

Här ingår det vertikala trycket p_v från fyllnadsmaterialet, friktionskoefficienten μ mellan mantel och fyllnadsmaterial samt ytterdiametern D_c hos manteln. Ekvation (2) är en förenkling jämfört med det som står i EN 13 941-1 (2019). Skjuvspänningen vid medieröret blir

$$\tau_{sp} = \frac{F_f}{\pi D_{sp}} \quad (3)$$

Här ingår medieröret ytterdiameter D_{sp} . Friktionskoefficienten mellan mantel och fyllnadsmaterial varierar beroende på fyllnadsmaterialets sammansättning. Molin m. fl. (1997) gjorde mätningar av dragkrafter då fjärrvärmeledningar lags och drogs axiellt i olika fyllnadsmaterial. Friktionskoefficienterna räknades fram och blev något högre än förvänta, vilket förklarades med att fyllnadsmaterialet var synnerligen väl packat. Friktionskoefficienter från den undersökningen och från standarden EN 13941-1 (2019) ges i Tabell 1.

Tabell 1: Friktion mellan mantel och fyllnadsmaterial

Fyllnadsmaterial	Referens	μ
Kross 0-8 mm	Molin (1997)	0,73
Naturmaterial 0-100 mm	Molin (1997)	1,16
Kross 0-100 mm	Molin (1997)	0,83
Sandjord	EN 13941-1 (2019)	0,4
Sandjord vid snabba rörelser	EN 13941-1 (2019)	0,6

Tabell 2: Beräknad skjuvspänning vid medierör då viktensiteten är 18 kN/m³

Dimension	H_c [m]	μ	τ_{sp} [MPa]
DN 32/140	0,6	0,7	0,021
DN 32/140	1,0	0,7	0,033
DN 32/140	1,5	0,7	0,049
DN 50/160	0,6	0,7	0,017
DN 50/160	1,0	0,7	0,027
DN 50/160	1,5	0,7	0,040
DN 200/400	0,6	0,7	0,014
DN 200/400	1,0	0,7	0,021
DN 200/400	1,5	0,7	0,029

I Tabell 2 har skjuvspänningen vid medieröret beräknats vid en relativt hög friktionskoefficient för ledningar av serie 3 med tjock isolering. Olika täckningsdjup har behandlats. En lägre isoleringsserie och även större dimension ger lägre spänningar, eftersom förhållandet mellan mantelns diameter D_c och medierörets D_{sp} minskar. Utgående ifrån Tabell 2 bedöms att ett krav på skjuvhållfastheten på 0,040 MPa är rimligt och täcker in det mesta, dvs uppfylls kravet blir det inga haverier som beror på att isoleringen släppt från medieröret.

Detta krav kan användas vid en första bedömning om ledningens skjuvhållfasthet är tillräcklig. Skulle ledningen vara i sämre skick, så bör ett specifikt krav för de aktuella förhållandena bestämmas utgående ifrån ledningens dimension, läggningsdjup och friktion mellan mantel och fyllnadsmaterial. Kravet baseras alltså på hur stor skjuvspänning som en yttre last på ledningen kan orsaka.

4 Fältmetod

En fältmetod har utvecklats för att undersöka status hos förisolerade fjärrvärmeledningar bestående av medierör av stål, isolering av polyuretanskum och mantel av polyeten. Metoden mäter skjuvhållfastheten (vidhäftningsstyrkan) mellan isoleringen och medieröret av stål. Metoden kompletteras med laboratorieanalys av förändringar av den kemiska strukturen hos isoleringen.

Förisolerade fjärrvärmeledningar måste kunna hålla för skjuvspänningar som uppstår mellan isolering och medierör orsakade av temperatur expansion. Skjuvspänningarna finns i glidzoner där ledningarna glider relativt marken i närheten av böjar. Bra vidhäftning mellan isolering och medierör och även mellan isolering och mantel är en förutsättning för långsiktig prestanda hos förisolerade fjärrvärmeledningar. När vidhäftningen släpper längs långa sträckor, utmattas stålet vid böjar då stora varierande spänningar uppstår vid varierande driftstemperaturer. Enligt standarden EN 253 (2009) mäts skjuvhållfastheten antingen i axiell eller tangentiell riktning. Här beskrivs en alternativ metod som kan tillämpas i fält utan att störa driften.

4.1 RISE PLUGGMETOD

Metoden kallas RISE pluggmetod och principen bakom bygger på att frilagda pluggar (borrkärnor) av isolering vrids loss från medieröret, se Figur 1. 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.

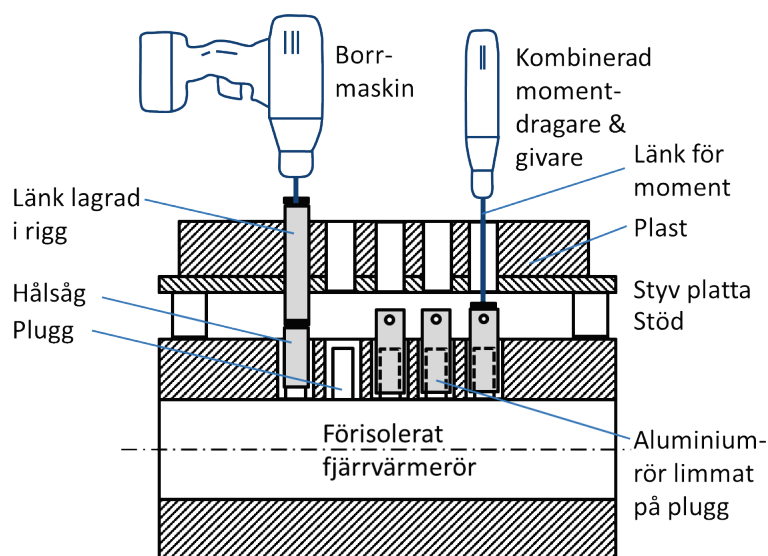
Det kan bli brott mellan isolering och medierör (adhesionsbrott) eller brott i isoleringen självt en bit från medieröret (kohesionsbrott). Olika hålsågar används för att forma pluggarna med den slutgiltiga diametern Ø27 mm. Ett aluminium rör limmas på pluggen. Snabbhårdande polyuretanlim läggs på rörets inneryta i ena änden och trycks på pluggen, så att en glipa på ca 2 mm mellan aluminiumrör och medieröret bildas. För att få ett bra statistiskt underlag och en låg mätosäkerhet m. a. p. medelvärde krävs provning med ca sju pluggar. Skjuvhållfastheten τ_u [Pa] beräknas från uppmätt vridmoment M [Nm] och pluggens diameter $d = 0,027$ m enligt

$$\tau_u = \frac{16 M}{\pi d^3} \quad (4)$$

4.2 MÄTNINGAR I FÄLT

För mätningar i fält, har en speciell rigg utvecklats som medger stöd och lagring vid både provberedning och mätning av vridmoment, se Figur 2 och Figur 3. Riggen hålls på plats med stöd mot manteln och sugkoppar med undertryck. En kombinerad momentdragare och givare, som får stöd via en arm länkad i riggen, används vid provningen. I anslutning till fältmätningar mäts även temperaturen på medieröret för att kunna bedöma dess inverkan på mätresultatet.

Det kan vara motiverat att bedöma status på ledningar vid tillfällen, då de ändå är frilagda efter schaktning av någon annan anledning. Det kan även vara motiverat schakta fram ledningar för enbart statusbedömning, om dessa misstänks ha utsatts för höga drifttemperaturer under en längre tid (flera år). Det är av speciellt intresse att prova delar av ledningarna som befinner sig i glidzonerna, eftersom det är här skjuvhållfastheten behövs och det har visat sig att nedbrytningen kan gå fortare här, se artikeln av Vega m. fl. (2020b). All statusbedömning kan vara till nytta för framtida underhållsplanering.



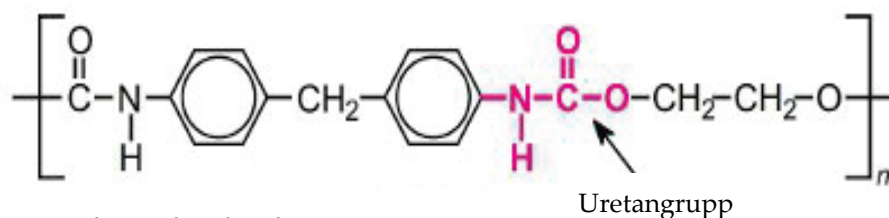
Figur 1: Principskiss av RISE pluggmetod



Figur 2: Provberedning i fält för RISE pluggmetod



Figur 3: Mätning i fält med RISE pluggmetod



Figur 4: Polyuretan kemisk struktur

4.3 KEMISK ANALYS

För att studera kemiska förändringar i polyuretanets molekylstruktur används en absorptionsspektroskopimetod som i det här fallet är FTIR-spektroskopi (Fourier Transform Infra Red). En utrustning bestrålar materialprovet med infrarött ljus och ett spektrum erhålls av de vågtal hos ljuset som absorberas. Metoden kan användas för att identifiera organiska och oorganiska material. Den kan också användas för att studera förändringar i molekylstrukturen t. ex. som ett resultat av oxidation. För att studera nedbrytning av polyuretan som funktion av åldringstiden har spektrumet normerats med absorptionstoppen vid 1595 cm^{-1} . Den representerar dubbelbindningar mellan kolatomer i de aromatiska ringarna, som är termiskt stabila och inte påverkas av åldringen. Nedbrytningen studeras genom att beräkna absorptionsindex vid 1712 cm^{-1} och 1512 cm^{-1} , som representerar uretanbindningarna C=O respektive N-H efter olika åldringstider vid olika temperaturer, se Figur 4. Absorptionsindex för ett visst vågtal definieras som den normerade intensiteten hos absorptionstoppen vid detta vågtal.

4.4 MÄTRESULTAT

Många naturligt åldrade rör 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 rör som tagits bort från fjärrvärmenätet. Mätresultaten redovisas i Tabell 3. Här redovisas också en nedre gräns för brottspänningen (skjuvhållfastheten) baserat på den uträknade utökade mätosäkerheten med två standardavvikelser och att mätresultaten är normalfördelade. Med 97,5% sannolikhet är den faktiska brottspänningen större än den angivna nedre gränsen. Detta grundas på att med 95% konfidens förväntas faktiska medelvärde av brottspänningen ligga inom intervallet

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

Här definieras den utökade mätosäkerheten som

$$U_{\tau} = t_{97,5\%,N-1} \times \frac{\tau_{std}}{\tau_{avr} \sqrt{N}} \quad (6)$$

Här är τ_{avr} det beräknade medelvärde 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 $t_{97,5\%,N-1}$.

För att minska mätresultatens variation, har prov uttagits samlat längs en generatris. Det behövdes i regel 6-7 prov för att minska medelvärde mätosäkerhet till en godtagbar nivå. Mätresultaten i Tabell 3 diskuteras i Kapitel 7 tillsammans med resultat från den kemiska analysen.

Tabell 3: Mätresultat för naturligt åldrade fjärrvärmeledningar. 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]		Mäto-säkerhet [%]		Nedre gräns brottspänning [MPa]	
			Fram	Retur	Fram	Retur	Fram	Retur	Fram	Retur
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

5 Laboratorieundersökningar

Olika laborietester har gjorts för att undersöka skjuvhållfasthetens temperaturberoende, RISE pluggmetods korrelation med axiell skjuvhållfasthet och tätheten hos ledningen efter återställning/reparation.

5.1 MATERIAL

Vid laboratorieundersökningar har både nytillverkade rör och naturligt åldrade rör från fältet använts. De nya rören har tillverkats av Powerpipe Systems AB med en diskontinuerlig metod genom enstyckstillverkning.

5.2 TEMPERATURBEROENDE

Syftet var att undersöka effekten av driftstemperaturen på vidhäftningsstyrkan. I laboratorieundersökningen har tre nytillverkade förisolerade fjärrvärmerör av dimension DN50 / Ø140 mm med längd 3,7 m använts. Samtliga rör kapades till från ett och samma rör. Två av rören 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 rören 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 mätt med skjuvhållfasthet. Förändringar har under denna fas dock tidigare observerats med kemisk analys av molekylstrukturen hos isoleringen enligt Vega m. fl. (2018).

5.2.1 Tillvägagångssätt

Ett jungfruligt fjärrvärmerör och två rör som utsatts för accelererad åldring har undersökts. RISE pluggmetod har använts för att studera skjuvhållfasthetens temperaturberoende hos både nya och åldrade rör. Fem temperaturnivåer valdes: 23, 60, 80, 100, och 120 °C. Rören 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 röret. Det behövs ca sju prov för att få ett medelvärde med acceptabel mätosäkerhet. En provserie med fem temperaturnivåer på ett specifikt rör gjordes under 1-2 dagar.

5.2.2 Resultat

Provningsresultaten visas i Figur 5. Tre rör har provats: ett jungfruligt och två som har utsatts för accelererad åldring under 310 respektive 490 dygn. Det jungfruliga röret visar en avtagande tendens hos skjuvhållfastheten vid ökande temperatur. De åldrade rören 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 röret åldrat 310 dygn blev mätosäkerheten hög då antalet prov var 6-7 stycken vid varje temperatur. För de övriga rören genomfördes dubbelt så många prov vid varje temperatur, och en mindre mätosäkerhet erhöles.

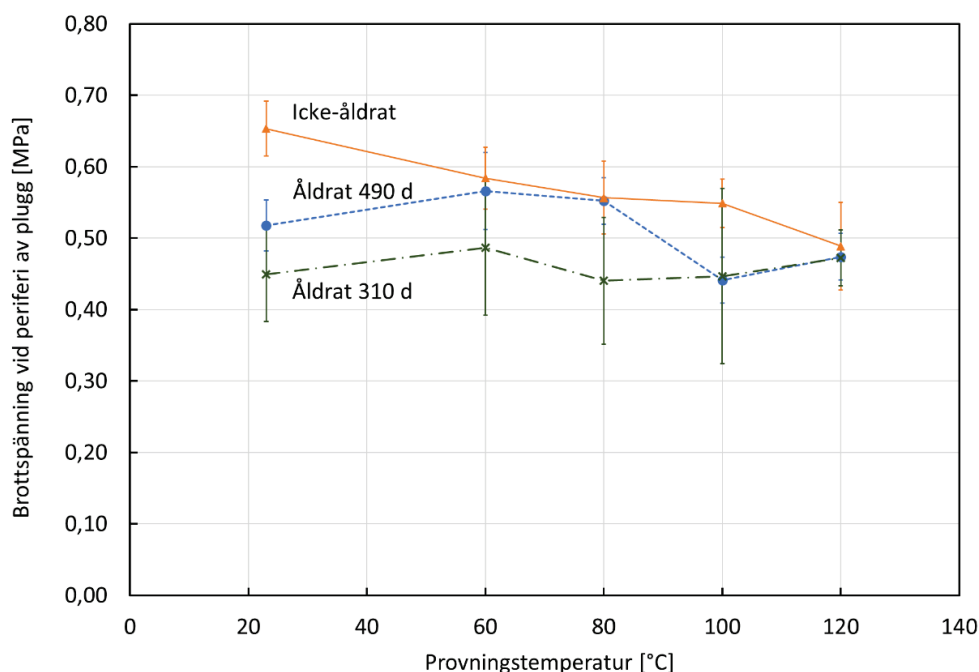
Vid varje provning togs proven i närheten av varandra för att minimera effekten av densitetsvariationer hos PUR isoleringen längs med röret och därmed få en lägre mätosäkerhet. Två mätserier genomfördes för de två rören med lägre mätosäkerhet. Positionerna har valts olika för de två mätserierna, men resultaten för respektive temperatur har vägts samman. Variationerna längs med röret bedöms vara av samma storleksordning som den variation som erhålls då provningstemperaturen varierar.

5.3 KORRELATION AV SKJUVHÅLLFASTHET MELLAN RISE PLUGGMETOD OCH STANDARDMETOD

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

5.3.1 Tillvägagångssätt

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



Figur 5: Brottspänning vid varierande temperatur hos tre olika rör uppmät med pluggmetoden

Tabell 4: 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
Nytt rör	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

5.3.2 Resultat

Brottspänningar uppmätta med RISE pluggmetod och med den axiella metoden redovisas i Tabell 4. 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.

5.4 TÄTHET HOS MANTEL

Efter provning med RISE pluggmetod lagades röret med förtillverkade pluggar av polyuretan som stoppades i hålen och därefter svetsades polyetenproppar i manteln. Eftersom det är viktigt att vatten inte kan tränga in i isoleringen utvärderades återställningsmetoden genom att mäta vattentätheten hos lagade rör.

5.4.1 Tillvägagångssätt

Ändarna på röret tätades med silikon. Fjärrvärmeröret ställdes i en tank med färgat vatten enligt EN 489-1, se Figur 6. Samma färgämne togs, som det som används i fjärrvärmesystemen. Trycket var minst 3 m vattenpelare (0,030 MPa) under 24 timmar.

Täthet utvärderades genom att manteln skars upp vid pluggarna efteråt och inspekterades. Om vatten trängt in finns det färgämne på skummet. En UV-lampa kan användas eftersom färgen är fluorescerande.

5.4.2 Resultat

I Figur 7 visas röret efter provning då det nedsänktes i vatten med fluorescerande färg. Bilderna visar att inget vatten trängt in.



Figur 6: Tank avsedd för täthetsprovning av fjärrvärmeskarvar



Figur 7: Efter nedsänkning i vatten sågades röret sönder för att se om något vatten trängt in

6 Analysmetoder

För att kunna jämföra olika fjärrvärmeledningar med varandra som har utsatts för olika driftstemperaturer under olika tidsperioder vid användning, behövs en metod att översätta ett spektrum av driftstemperaturer med olika brukstider till en period vid en gemensam referenstemperatur. Vidare behövs kompletterande analysmetoder för att studera den kemiska nedbrytningen av isoleringen.

6.1 OMRÄKNING AV DRIFTSTID VID OLIKA TEMPERATURER TILL EN GEMENSAM REFERENSTEMPERATUR

Vanligtvis används fjärrvärmenät vid driftstemperaturer som varierar över tid och mellan olika system. För att kunna jämföra ålder hos ledningar från olika platser med hänsyn tagen till olika driftstemperaturer har vi tagit fram en ny beräkningsmetod. Perioder vid olika temperaturintervall räknas om till en ekvivalent period vid en gemensam referensdriftstemperatur såsom beskrivs nedan.

Låt oss anta att en kemisk reaktion följer Arrhenius ekvation. Då ges reaktionshastighetens temperaturberoende av

$$k_i = Ae^{-E_a/RT_i} \quad (7)$$

Här är hastighetskonstanten k_i vid den absoluta temperaturnivån T_i . I Ekvation (7) ingår reaktionens aktiveringsenergi E_a , en pre-exponentiell faktor A och den ideala gaskonstanten $R = 8,314 \text{ J/(K mol)}$. Om vi jämför inverkan av två temperaturnivåer kan vi se på relationen mellan hastighetskonstanterna som ger ett mått på accelerationen

$$\frac{k_1}{k_2} = \exp \left[-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \quad (8)$$

Ett annat sätt är att betrakta förhållandet av de tider det tar att uppnå ett visst tillstånd hos materialet vid olika temperaturer

$$\frac{t_2}{t_1} = \exp \left[-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \quad (9)$$

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

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

Då definieras Af av

$$\frac{k_1}{k_2} = Af \quad (11)$$

och

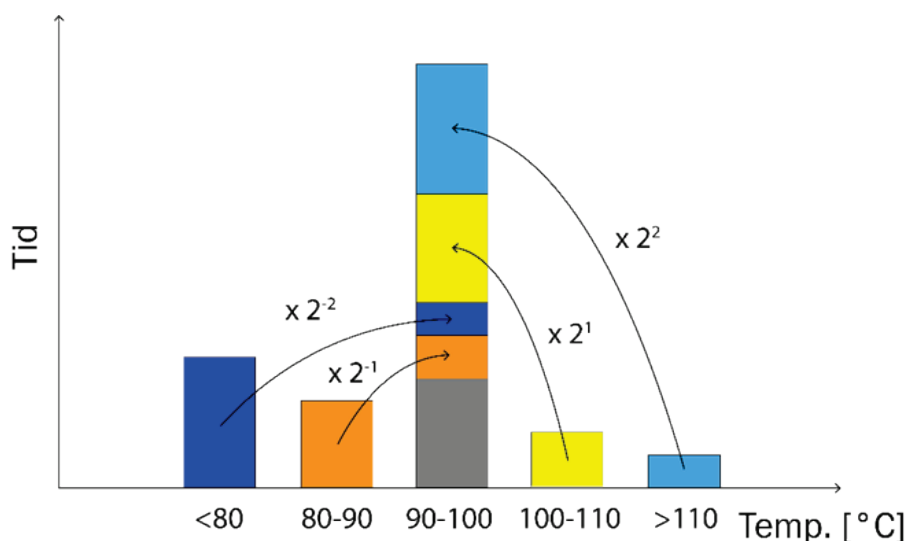
$$\frac{t_2}{t_1} = Af \quad (12)$$

Som en tumregel inom kemi brukar A_f vara 2 för en temperaturskillnad på 10 K och detta brukar refereras till som Arrhenius tvåa, vilket betyder att reaktionshastigheten för en kemisk reaktion fördubblas vid en ökning av temperaturen med 10 K.

För att jämföra vad olika fjärrvärmeledningar i fält har utsatts för, så har vi räknat om temperaturspektra till ekvivalent tid vid en viss referenstemperatur. Detta illustreras i Figur 8. Här har accelerationsfaktorn A_f antagits vara 2. Tiden vid referenstemperaturen blir då dubbelt så lång, som den verkliga drifttiden vid en 10 K högre temperatur. I Tabell 5 ges en jämförelse av accelerationsfaktorer och aktiveringsenergi vid en viss referenstemperatur. Fall II med accelerationsfaktorn 2,5 har tagits med, eftersom denna visat sig ge bättre överensstämmelse mellan status hos fjärrvärmeledningar och drifttid för olika temperaturer.

Tabell 5: Samband mellan accelerationsfaktor och aktiveringsenergi vid en viss temperatur

Parameter	Beteckning	Fall I		Fall II	
	A_f	2		2,5	
Referenstemperatur	T_0	90	°C	90	°C
Temperaturhöjning	ΔT	10	°C	10	°C
Aktiveringsenergi	E_a	78	kJ/mol	103	kJ/mol

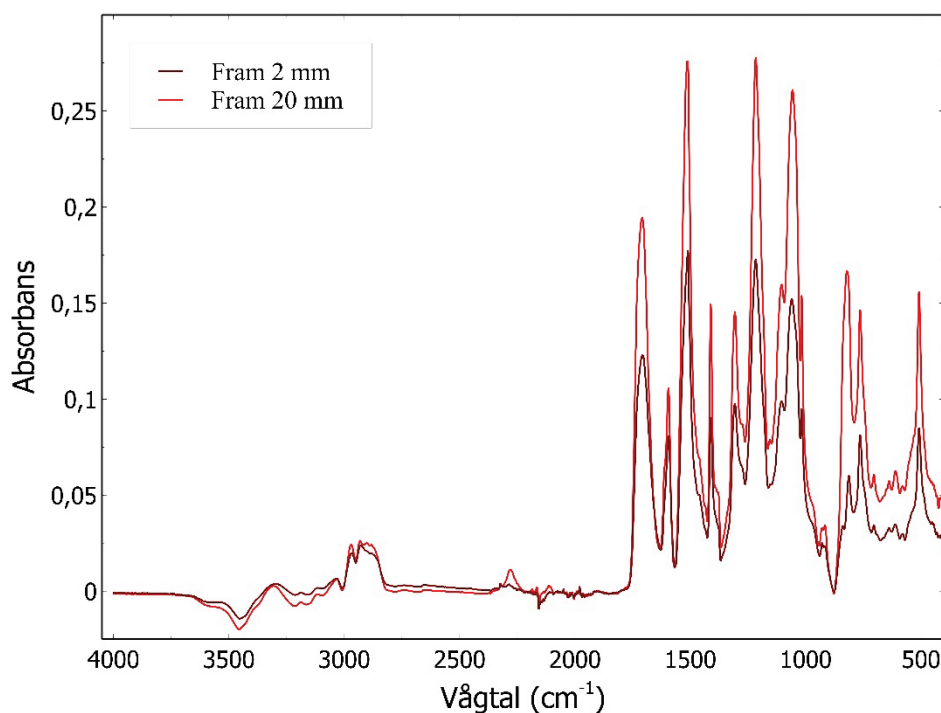


Figur 8: Schematisk exempel för en enkel omvandling av bruktid vid olika temperatur, till tid vid referenstemperatur om A_f är 2

6.2 FTIR ANALYS

Nedbrytning av polyuretan börjar vanligtvis med dissociation av uretanbindningarna, se Figur 4 igen. För att analysera den typen av förändringar i den kemiska strukturen hos PUR-materialet som ett resultat av nedbrytningsprocesser, har Fouriertransform infraröd spektroskopi (FTIR) med ATR (Attenuated Total Reflectance) använts. 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 och användes i FTIR-analyserna. Proven placerades på ATR-kristallen och pressades därefter mot ytan för att erhålla en optimal kontakt. De erhållna spektra användes för att i detalj studera nedbrytningsprocesser som funktion av åldringstid och temperatur.

Som en referens togs ytterligare ett tunt materialprov 20 mm ifrån medieröret. Minst tre prover analyserades från varje position. När IR-strålning passerar genom ett prov absorberas en del strålning av provet (absorbans) och en del passerar igenom (transmittans). Den resulterande signalen vid detektorn ger ett absorptionsspektrum, som är unik för polyuretanet och utgör ett molekylärt "fingeravtryck" av materialet.



Figur 9: FTIR spektra av prov tagna 2mm och 20 mm från medierör hos accelererat åldrat rör vid 140 °C

7 Analys av resultat

Resultaten av fältmätningar analyseras här tillsammans med nya resultat av förändringar hos PUR-skummet analyserade med FTIR.

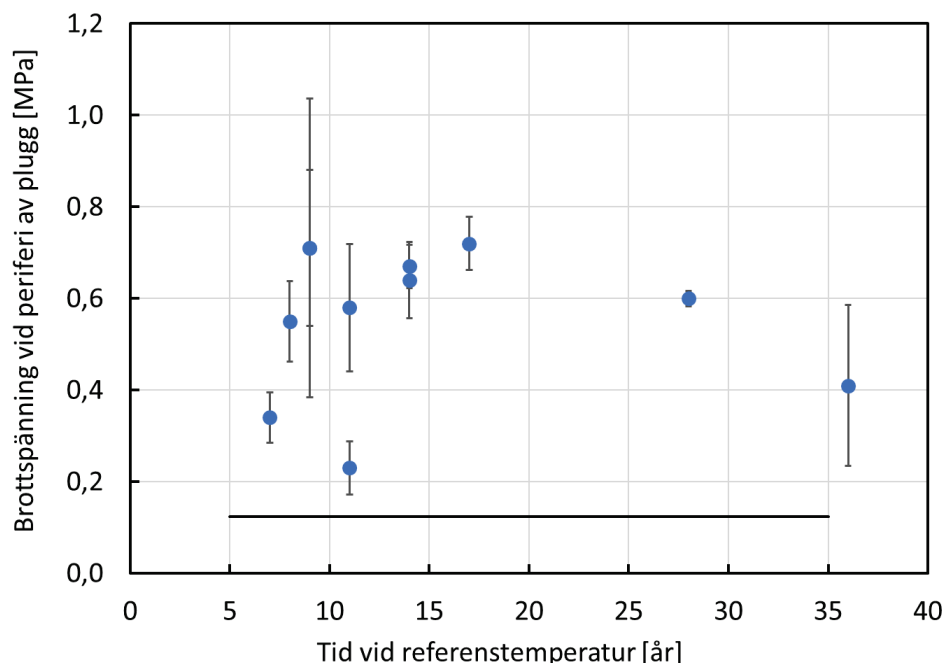
7.1 MÄTNINGAR AV VIDHÄFTNING I FÄLT

Mätningar av skjuvhållfasthet hos fjärrvärmeledningar har gjorts med RISE pluggmetod på många ställen i Sverige, se Tabell 3. En nedre gräns för en acceptabel axiell skjuvhållfasthet har bedömts vara 0,040 MPa, se Kapitel 3. Värdet kan jämföras med kravet 0,120 MPa för nytillverkade rör i EN 253 (2019).

Experimentellt har ett samband fastställts mellan axiell skjuvhållfasthet och skjuvhållfasthet mätt med RISE Pluggmetod, se Avsnitt 5.3. Här fastställdes en kvot mellan skjuvhållfasthet mätt med RISE Pluggmetod och axiell skjuvhållfasthet till 3,1. Acceptabel skjuvhållfasthet mätt med RISE Pluggmetod blir då 0,124 MPa.

Med denna bakgrund framgår att inget av provställena uppvisar för låg skjuvhållfasthet, se Tabell 3 igen och även Figur 10. I tre fall är marginalen mellan uppmätt och tillåtet värde, så pass liten att en noggrannare analys av ledningarna bör göras.

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 10 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.

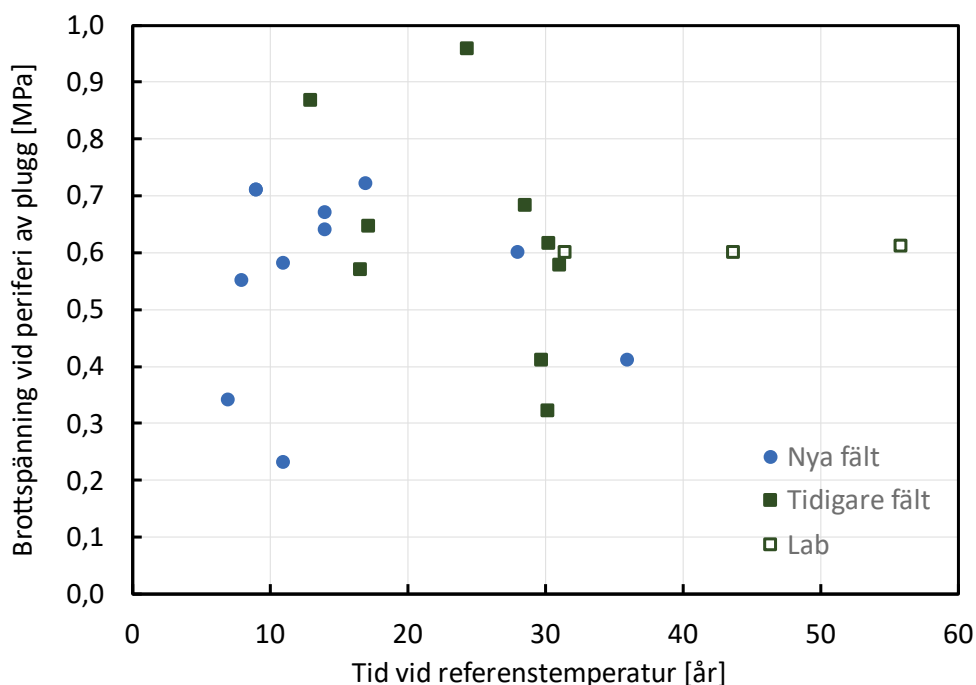


Figur 10: Brottspänning i framledningar beräknad av uppmätt vridmoment, som funktion av omräknad drifttid vid referenstemperatur 95 °C. Osäkerhet hos värdena är markerade. Förslag till minsta tillåtna brottspänning markerad med svart linje.

Drifttiden har räknats om med metoden i Avsnitt 6.1 till tid vid 95 °C. Brottspänningar ges som funktion av den omräknade drifttiden i Figur 10 och även i Tabell 6. I tabellen finns även en motsvarande drifttid vid 55 °C för returledningarna. I Figur 11 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 12 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 11. I Figur 12 ser vi alltså bara på nedbrytningen av framledningen, men använder returledningen som en referens.

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 11 med nivån 0,23 MPa och i Figur 12 med 0,41. Framledningen från Jönköping installerad 1983 har jämförelsetid 36 år med nivån 0,41 MPa i Figur 11 och 0,73 MPa i Figur 12.

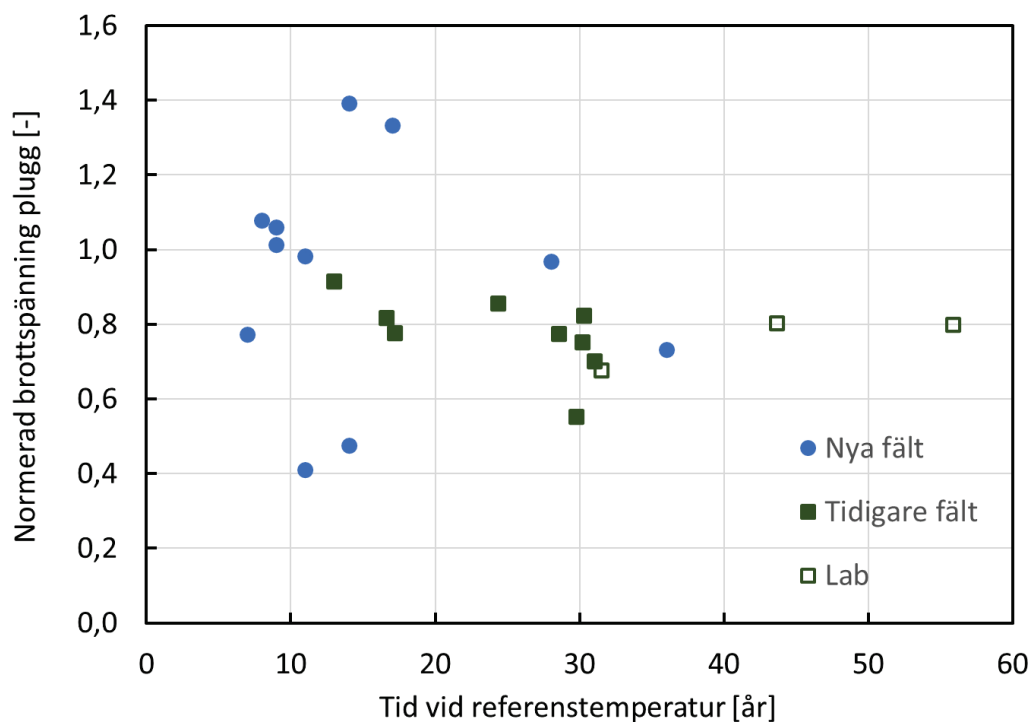
Resultaten i Figur 12 visar att den kvarvarande vidhäftningsstyrkan hos äldre ledningar ligger ungefär på samma nivå, mellan 70 och 90 % av motsvarande värde för returledningen, oavsett ålder. Detta bekräftar tidigare resultat från accelererade åldringstester, vilka antydde att vidhäftningsstyrkan förblir konstant (benämnd som platåfas) under en mycket lång tid (längre än 30 år).



Figur 11: 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 rör åldrade i laboratoriet har markerats med icke fyllda fyrkanter

Tabell 6: Ytterligare mätresultat för naturligt åldrade fjärrvärmeledningar, 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

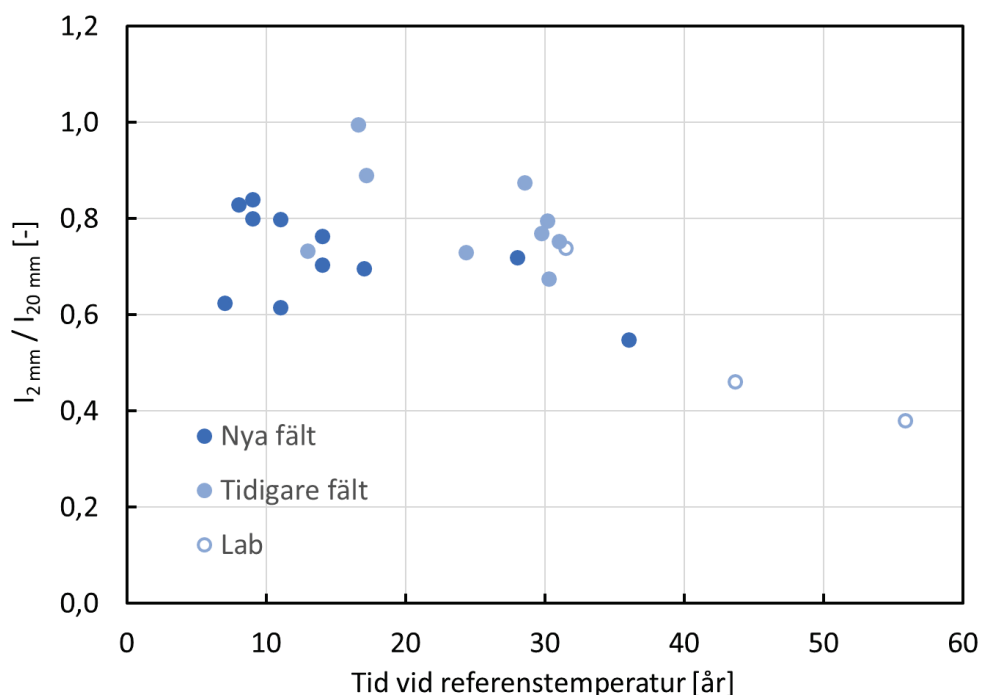
Plats	År	År vid 95°C		År vid 55°C		Brottspänning [MPa]		Fall	Index vid 1712 cm ⁻¹		Index vid 1512 cm ⁻¹	
		Fram	Retur	Fram	Retur	Fram	Retur		Fram	Retur	Fram	Retur
Linköping	1996	11	4			0,58	0,59	2	0,62	0,99	0,87	0,99
Jönköping	2006					1,00	0,92	2	1,11	0,95	0,98	0,95
Ängelholm	1979	14	20			0,64	0,46	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



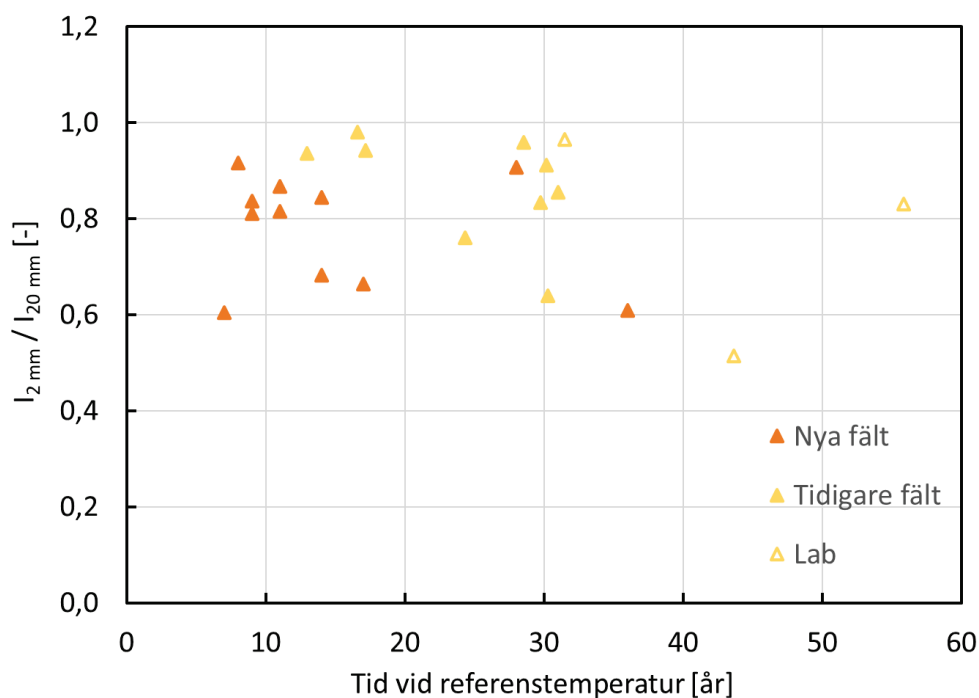
Figur 12: Brottspänning i framledningar normerad med brottspänningen hos tillhörande returledningar beräknad, som funktion av omräknad drifttid vid referenstemperatur 95 °C. Tidigare mätningar från fältprov gjorda av Vega m. fl. (2020a) i laboratoriet har markerats med gröna fyrkanter. Tidigare mätningar på rör åldrade i laboratoriet har markerats med icke fyllda fyrkanter

7.2 ANALYS MED FTIR PÅ PROVER TAGNA FRÅN FÄLTMÄTNINGAR

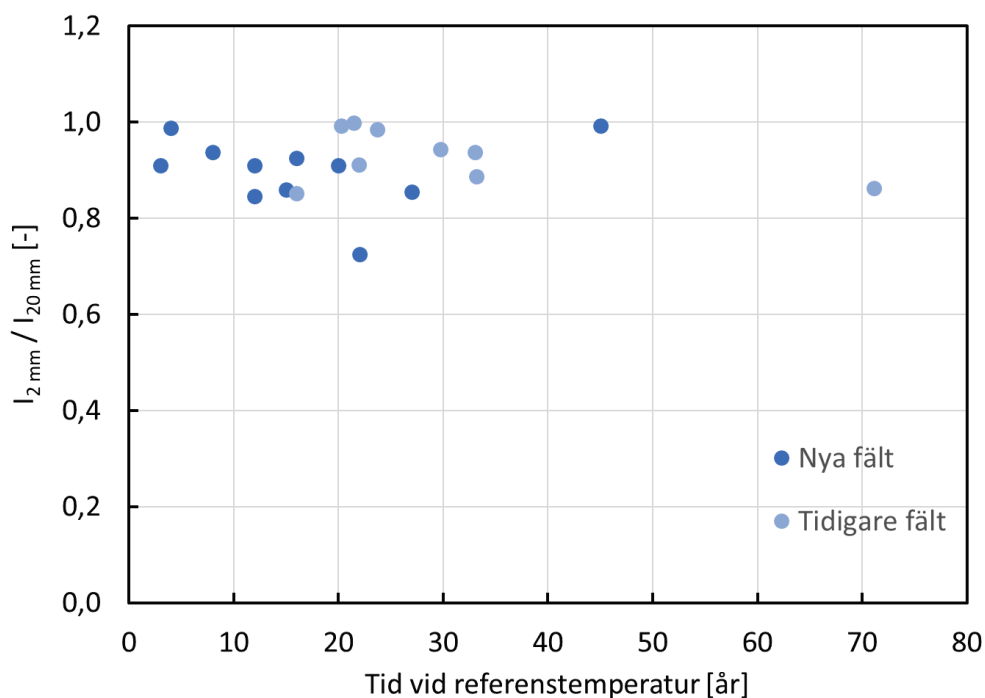
Polyuretanskum från framledningen och returledningen har analyserats var för sig. Nedbrytningen studeras genom att mäta absorptionsindex (IR-index) vid vågtalen 1712 cm^{-1} och 1512 cm^{-1} , som representerar uretanbindningarna C=O respektive N-H. Skum som tas nära medieröret, 2 mm ifrån, och skum 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 13 och Figur 14. Här finns spridda resultat, när tidigare äldre resultat har tagit med. De resultat som kommer ifrån de nya mätningarna gjorda i detta projekt visar en nedåtgående trend med den omräknade driftstiden. I Figur 15 och Figur 16 visas motsvarande resultat för returledningen. Dessa resultat visar en relativt konstant nivå, vilket förväntas eftersom returtemperaturerna är betydligt lägre. Framledningen från Ängelholm som var i dåligt skick, återfinns i Figur 13 och Figur 14 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 13 och Figur 14 vid jämförelsetiden 36 år och nivåerna 0,55 och 0,61 för vågtalen 1712 cm^{-1} respektive 1512 cm^{-1} .



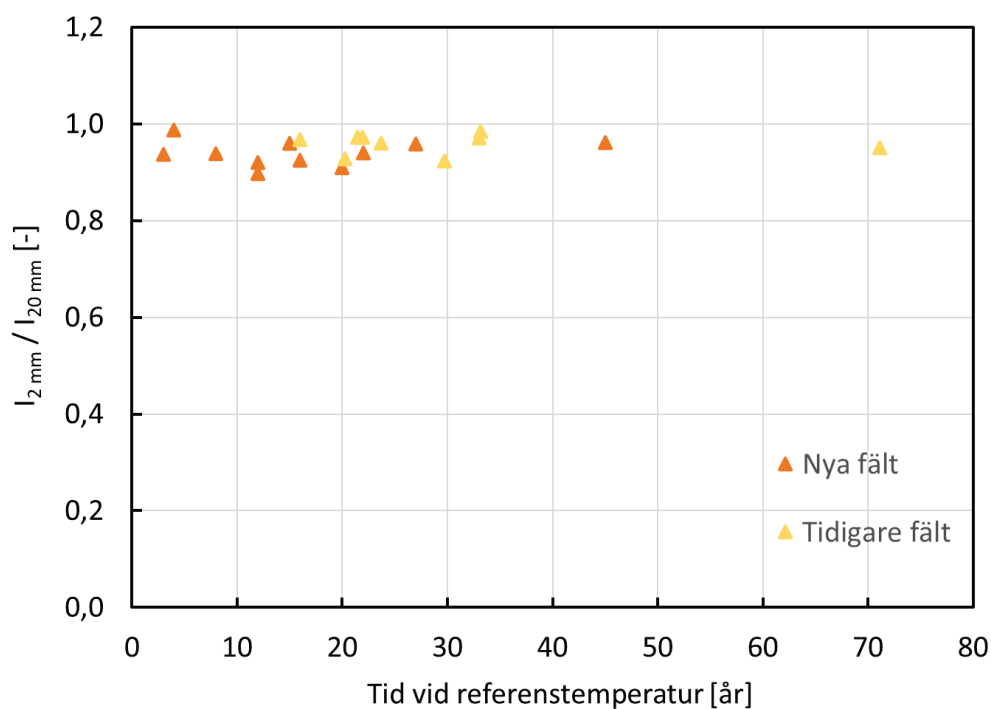
Figur 13: Kvot av absorptionsindex för vågtal 1712 cm^{-1} av PUR-skum nära medierör (2 mm ifrån) och opåverkat skum långt från medierör (20 mm) hos undersökta framledningar, som funktion av omräknad driftstid vid referenstemperatur 95 °C . Tidigare mätningar från fältprov av Vega m. fl. (2020a) har markerats med ljusare ton. Tidigare mätningar av rör åldrade i laboratoriet har markerats med icke fyllda cirklar



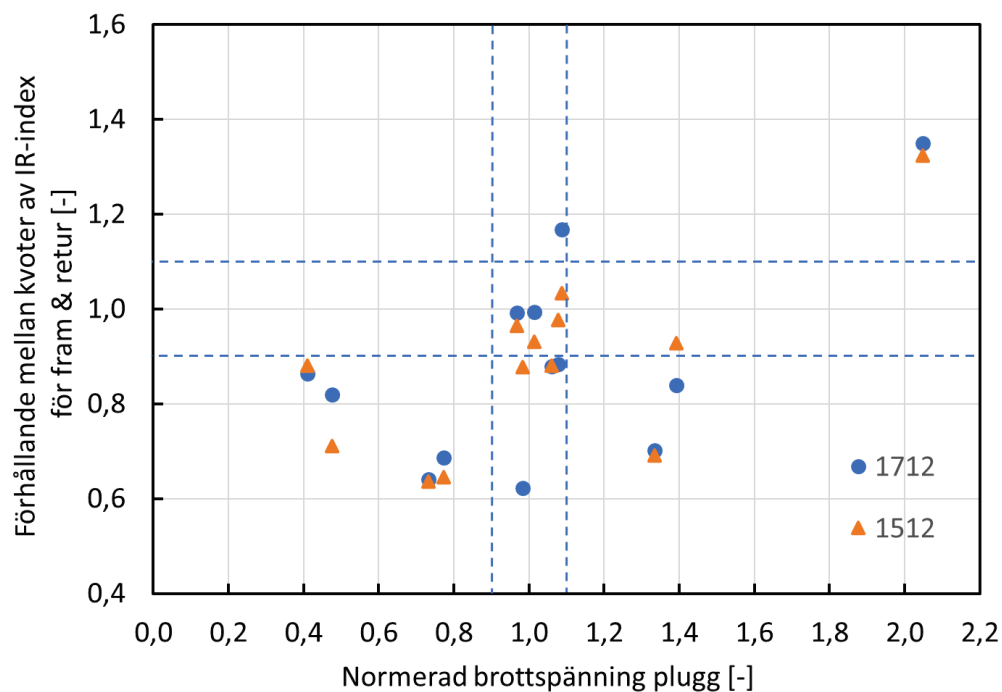
Figur 14: Kvot av absorptionsindex för vågtal 1512 cm^{-1} av PUR-skum nära medierör (2 mm ifrån) och opåverkat skum långt från medierör (20 mm) hos undersökta framledningar, som funktion av omräknad driftstid vid referenstemperatur $95\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tidigare mätningar från fältprov av Vega m. fl. (2020a) har markerats med ljusare ton. Tidigare mätningar av rör åldrade i laboratoriet har markerats med icke fyllda trianglar



Figur 15: 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 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tidigare mätningar från fältprov av Vega m. fl. (2020a) har markerats med ljusare ton



Figur 16: 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 17: Förhållande mellan kvoter av IR-index för fram- och returledning som funktion av normerad brottspänning dvs förhållande mellan brottspänning (vidhäftningsstyrka) för fram- och returledning

7.3 DISKUSSION

Vega m. fl. (2020a) beräknade relativa värden av vidhäftningsstyrkan för att direkt kunna jämföra värden från olika naturligt åldrade fjärrvärmeledningar. 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 6. Är värdet ungefär 1 har ingen förändring skett, se Fall 2 i Tabell 6. 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 6.2 och 7.2) genom att beräkna IR-index för toppar vid 1712 cm^{-1} och 1512 cm^{-1} , som tillhör bindningar i uretangergruppen, se Figur 4. Kvoter av IR-index för PUR taget 2 mm och 20 mm ifrån medierört 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 17 sammanfattas resultaten från naturligt åldrade ledningar som listas i Tabell 3 och Tabell 6.

Det syns i diagrammet att tre ledningar avviker från de förväntade resultaten vad gäller vidhäftning, se Fall 3 i Tabell 6. 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.

8 Internationellt samarbete

Mycket forskning har gjorts om åldring och status hos traditionella fjärrvärmeledningar med medierör av stål, isolering av polyuretan och mantel av polyeten. Olika forskningsprojekt om detta har utförts i Tyskland mellan 2004 och 2016, vilka redovisas av Schleyer och Richter (2016). I Sverige har flera projekt genomförts, som behandlar skjuvhållfasthet. De första redovisades av Sällström m. fl. (2012) 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 är att i samverkan utveckla och implementera överenskomna metoder för accelererad åldring och bestämning av livslängd och framtida status. En viktig del är att kunna förutspå hur vidhäftningsstyrkan förändras med tiden till följd av nedbrytningen av isoleringen av polyuretan vid användning av ledningarna under olika driftsförhållanden.

8.1 WORKSHOP NR 1

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 fjärrvärmeledningar 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 temperatur bör ligga kring 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 kortade perioder upp till 130 °C och enstaka toppar upp till 140 °C föreslogs. Provningsperioder på maximalt 1 år men helst ett halvt år diskuterades.

8.2 WORKSHOP NR 2

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 fjärrvärmeledningarna används vid betydligt högre driftstemperaturer än normalt. Det ifrågasattes om enskilda tillämpningar med höga driftstemperaturer ska styra kravsättningen på fjärrvärmeledningarna eller om det ska finnas olika krav för olika tillämpningar.

Normalt används fjärrvärmeledningarna 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 faktiskt används.

De temperaturhistorier från svenska nät som vi har fått tillgång till under detta projekt visar, att under vinterperioden varierar framledningstemperaturen kring en nivå 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 i närheten av den temperatur, 140 °C, som förslagit lämplig för att accelerera beteende vid 100 °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. Det finns pågående experiment med syremätning i fjärrvärmerör i ett pågående projekt, Resurseffektiva fjärrvärme och fjärrkyla system, vilka kan belysa om det finns tillräckligt med syre närvarande utan att syrediffusionen accelereras genom manteln.

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 fjärrvärmeledningarna i glidzonerna. Den allmänna slutsatsen av workshoppen blev att diskussionerna och arbetet måste fortsätta i ett planerat projekt inom IEA DHC.

8.3 PROJEKT INOM IEA DHC|CHP

Ett arbete att forma ett internationellt samfinansierat projekt (Task Shared 6) för statusbedömning, nedbrytning, livslängdsuppskattningar, tillgångsförvaltning av fjärrvärmeledningar har startats. Arbetet har initierats av AGFW tillsammans med HCU och RISE. RISE deltar som projekt- och delprojektledare vid framtagandet av totalt fyra arbetspaket i kommande ansökan, som består av fem olika arbetspaket.

Arbetspaketen består av statusbedömning, nedbrytning, livslängdsuppskattningar, tillgångsförvaltning och framtida perspektiv av fjärrvärmenät. Under 2021 kommer en förfinad projektbeskrivning att tas fram. Sedan behöver deltagarna skriva nationella ansökningar om finansiering under början av 2022, eftersom inga medel finns att söka inom IEA DHC|CHP i denna typ av projekt.

8.4 RESULTAT

En medvetenhet har skapats om att accelererad åldring bör inte utföras vid så höga temperaturer som tillämpas i EN 253 (2019), då dess syfte är att accelerera förlopp som sker vid användning av ledningarna.

På internationell nivå har man insett att det finns ett behov av samarbete för att få fram bättre metoder för statusbedömning och prediktering av återstående livslängd. Ett led i detta är att bättre förstå hur nedbrytningsprocesserna fungerar. Vidare har fjärrvärmesektorn ett behov av tillgångsförvaltning. Ett internationellt samarbete har startats för att reda ut dessa frågor.

9 Slutsatser

En fältmetod (RISE pluggmetod) att bedöma status hos fjärrvärmeledning i drift har utvecklats i projektet. Metoden mäter vidhäftningsstyrkan (skjuvhållfasthet) mellan isolering och medierör. Fältmetoden har kompletterats med en kemisk analys av borttagen isolering i laboratoriet. 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. Metodens robusthet och tillförlitlighet har verifierats vid ett flertal mätningar i fält samt kompletterande tester i laboratoriet. En beräkningsmetod har tagits fram för att uppskatta en jämförbar ålder hos olika ledningar som inte är direkt baserad på installationsår.

En utrustning att mäta skjuvhållfasthet har byggts och verifierats i fält. Metodens mätnoggrannhet har studerats och resultat har korrelerats till axiell skjuvhållfasthet. Vidare har skjuvhållfasthetens temperaturberoende studerats. De hittills erhållna resultaten visar att för ett oåldrat rör minskar brottspänningen med ökad provningstemperatur (från 0,65 MPa vid 20 °C till 0,50 MPa vid 120 °C). För åldrade rör verkar brottspänningen vara oberoende av provningstemperaturen och ligger på ca 0,50 MPa.

En beräkningsmodell har presenterats som gör det möjligt att jämföra effektiv drifttid vid en vald referenstemperatur för fjärrvärmeledningar utsatta för olika driftstemperaturer. Beräkningsmodellen är baserad på Arrhenius "tumregel" och en accelerationsfaktor 2,5 i stället för den vanligen förekommande faktorn 2,0. Vid jämförelsen beaktas att reaktionshastigheten hos nedbrytningsreaktionerna approximativt ökar med faktorn 2,5 vid varje temperaturökning på 10 °C. För beräkning av drifttid vid en vald referenstemperatur krävs en representativ temperaturhistorik under minst ett år.

För framledningen har 95 °C valts som referenstemperatur och för returledningen 55 °C. Dessa temperaturer och tillhörande drifttid kan relateras till att livslängden ska vara 30 år vid 120 °C med enstaka toppar på 140 °C under totalt 300 timmar per år enligt EN 253 (2019). Beräkningsmodellen kan användas som ett verktyg av nätägare för att ta reda på vilka ledningar som har åldrats mest. Detta i sin tur kan vara en viktig pusselbit för statusbedömning av befintliga ledningar och underhållsplanering av hela nätet.

En gräns för godtagbar axiell skjuvhållfasthet har föreslagits i det här arbetet motsvarande 0,040 MPa, som kan användas vid en första bedömning. Ett specifikt krav för de aktuella förhållandena kan bestämmas utgående ifrån ledningens dimension, läggningsdjup och friktion mellan mantel och fyllnadsmaterial. Kravet baseras på hur stor skjuvspänning som en yttre last på ledningen kan orsaka. För RISE pluggmetod blir kravet på skjuvhållfastheten hos pluggen tre gånger större baserat på korrelation mellan pluggmetod och axiell metod.

Det visade sig att i normalfallet krävs 6-7 pluggprov för att fastställa ett medelvärde av skjuvhållfastheten med acceptabel mätosäkerhet. För att bedöma resultaten av skjuvhållfastheten kan absoluta värden för respektive ledning jämföras med tillhörande krav. För att bedöma nedbrytning kan förhållandet mellan skjuvhållfastheten hos fram- och returledning beräknas.

I den kemiska analysen har polyuretan undersökts med infraröd spektroskopi (FTIR) för att bestämma ett absorptionsindex för två bindningar C=O och N-H i uretanguppen vid vågtalen 1712 cm^{-1} respektive 1512 cm^{-1} . Dessa bindningar påverkas vid termisk och oxidativ nedbrytning. Ett Absorptionsindex beräknas genom att intensiteten hos absorptionsstoppar från dessa bindningar normeras med toppintensiteten vid vågtalet 1595 cm^{-1} som härrör från bindningarna i de aromatiska ringarna, vilka är mycket termiskt stabila. En absorptionskvot har bildats genom att analysera isolering närmast medieröret och opåverkad isolering långt från medieröret. Absorptionskvoten visar nedbrytningen av polyuretanisoleringen hos fram- och returledning var för sig. Absorptionsförhållandet mellan absorptionskvoter mellan fram- och returledning kvantifierar nedbrytningen av framledningen relativt returledningen.

Förhållandena av skjuvhållfastheten och IR absorptionsförhållanden borde vara samstämmiga. Båda förhållanden borde vara mindre än 1 eller ungefär 1, eftersom framledningen borde brytas ned snabbare med tiden än returledningen som utsätts för betydligt lägre temperatur. Vidare borde IR absorptionskvoten för returledningen i normalfallet visa på att ingen nedbrytning skett, då temperaturerna är låga i returledningar.

De i projektet analyserade fjärrvärmeledningarna hade generellt sett, med enstaka undantag, en tillräckligt bra status för fortsatt drift. Flertalet av ledningarna bedömdes inte heller ha utsatts för en hög driftstemperatur under många år. Två av ledningarna hade en drifttid på knappt respektive drygt 30 år vid referenstemperaturen 95 °C . De övriga åtta hade väsentligt kortare drifttid vid samma temperatur.

Två workshops har genomförts. En rimlig temperaturnivå för accelererad provning har överenskommit med deltagarna. En plattform för internationell fortsatt samverkan har skapats tillsammans med andra inom IEA-DHC för fortsatt forskning om metodik för livslängdsprediktering hos förisolerade fjärrvärmeledningar. Arbete på detta tema fortsätter även under 2022 i ett tvillingprojekt "Resurseffektiva fjärrvärme- och fjärrkylanät - nya material, statusbedömning och livslängdsuppskattning".

10 Förslag till fortsatt arbete

Arbetet med livslängdbedömning av förisolerade fjärrvärmeledningar har kommit in i en spännande fas med tanke på energikris i Europa och den globala hållbarhetsaspekten. Vi på RISE har arbetat multidisciplinärt i en nationell och internationell samverkan. För att både kunna definiera och lösa utmaningar gällande förisolerade fjärrvärmeledningar spänner arbete över mekanik, kemiteknik och polymerteknologi. När det gäller underhållsplanering baserad på livslängdsbedömning är arbetet inte färdigt, men vi har riktningen klar för oss.

Forskning för en förfinad metodik för livslängdsprediktering av förisolerade fjärrvärmeledningar bör fortsätta i både nationell och internationell samverkan via plattformen skapad inom IEA-DHC. En projektbeskrivning för ett framtida projekt håller på att formuleras och projektet är tänkt att bli ett så kallat "Task shared project". Även ett parallellt svenskt projekt planeras.

Det behövs bättre/nya beräkningsmodeller för att kunna göra mer tillförlitliga livslängdspredikteringar. Modellerna behöver baseras på relevanta experiment, som accelererar men inte förändrar beteendet hos nedbrytningsprocesserna. Alla miljöfaktorer som påverkar nedbrytningsprocesserna måste tas i beaktande såsom cykliska mekaniska laster.

Även ytterligare provning av naturligt åldrade fjärrvärmeledningar i fält skulle ge värdefull information för bedömningar av kvarstående livslängd hos förisolerade fjärrvärmeledningar. Åldringstester för kvalitetssäkring och metodik för bedömning av kvarstående livslängd hos fjärrvärmeledningar i aktuell standard, behöver granskas, diskuteras internationellt och förbättras i samförstånd.

Referenser

- 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.
- 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, CEN, Brussels.
- 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, CEN, Brussels.
- EN 13 941-1: 2019, District heating pipes – Design and installation of thermal insulated bonded single and twin pipe systems for directly buried hot water networks – Part 1: Design, CEN, Brussels.
- 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).
- 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.
- J Molin, G Bergström & S Nilsson (1997), Kulvertförläggning med befintliga massor, *Svenska Fjärrvärmeföreningen FOU* 1997:17, 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 Kunststoffmantelrohrsysteme in der Fernwärmeversorgung -Alterungsprüfmethode, Wechselbeanspruchung, zerstörungsfreie Muffenprüfungen, Diffusionshemmung, Zeitstandsverhalten, Versagensmechanismen, Forschung und Entwicklung Heft 39, AGFW, Frankfurt am Main.

W Schuricht and A Leuteritz (2010), Entwicklungsanforderungen an die Rohrhersteller, Euroheat & Power 39(3): p. 38-41.

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.

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 of district heating pipes, Polymer Degradation and Stability, 182.

N Yarahmadi & J H Sällström (2014), Proceedings of the 14th International Symposium on District Heating and Cooling (DHC14), September 7-9, Stockholm.

Sökord

Livslängdsprediktering, statusutvärdering, accelererad åldring, fjärrvärmeledningar, fältmetod för provtagning, skjuvhållfasthet, kemisk analys, FTIR, termo-oxidativ nedbrytning

LIVSLÄNGDSPREDIKTERING OCH STATUSUTVÄRDERING AV FJÄRRVÄRMELEDNINGAR

Projektet har fokuserat på fjärrvärmeledningar uppbyggda av medierör av stål, isolering av polyuretan (PUR) och mantel av polyeten. Projektet hade två huvudmål: En fältmetod skulle utvecklas för att mäta statusen hos fjärrvärmeledningar gällande skjuvhållfasthet och en internationellt accepterad metodik för livslängdsprediktering med avseende på förlorad vidhäftning skulle presenteras.

En fältmetod (RISE pluggmetod) att bedöma status hos fjärrvärmeledning i drift har utvecklats i projektet. Metoden mäter vidhäftningsstyrkan (skjuv-hållfasthet) mellan isolering och medierör. Fältmetoden har kompletterats med en kemisk analys av borttagen isolering i laboratoriet. En metod att jämföra driftstid vid en vald referenstemperatur för olika fjärrvärmeledningar efter användning har presenterats.

Vad gäller metodik för livslängdsprediktering har forskningsläget fastställts genom en litteraturöversikt. En plattform för internationell fortsatt samverkan har skapats tillsammans med andra inom IEA-DHC för fortsatt forskning om metodik för livslängdsprediktering hos förisolerade fjärrvärmeledningar.

Ett nytt steg i energiforskningen

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



Energiforsk