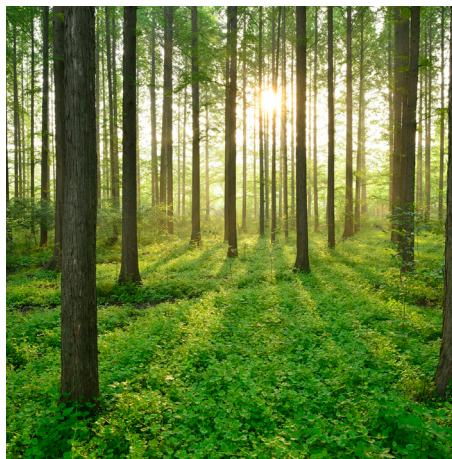


EFFEKT AV MEKANISK LAST PÅ ÅLDRING AV PREFABRICERADE FJÄRRVÄRMELEDNINGAR

RAPPORT 2025:1140



Effekt av mekanisk last på åldring av prefabricerade fjärrvärmeledningar

- tillverkade enligt EN 253

JAN HENRIK SÄLLSTRÖM

IGNACY JAKUBOWICZ

NAZDANEH YARAHMADI

ISBN 978-91-89918-42-9 | © Energiforsk november 2025

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

Förord

Projektet har undersökt hur dagens fjärrvärmenät kan fortsätta användas under lång tid genom att identifiera när och var ledningar behöver bytas ut, för att undvika onödiga reinvesteringar och miljöpåverkan. Fokus har legat på förisolerade fjärrvärmeledningar av stål, och särskild vikt har lagts vid att mekaniska belastningar påskyndar nedbrytning. Studien analyserade nedbrytning i fält, särskilt där isoleringen släpper från medieröret, vilket kan leda till utmattning och läckage. Erfarenheter från andra haverimekanismer har också sammanställts. Parallellt utvecklades nya metoder för att bedöma livslängd och status, genom laborietester, för att möjliggöra smart underhåll och selektivt utbyte av uttjänta delar. Målet var en mer tillförlitlig beräkningsmodell för återstående livslängd baserad på verkliga fältförhållanden. Projektet har letts av Jan Henrik Sällström, RISE.

Referensgruppen har bestått av följande personer: Magnus Ohlsson, Öresundskraft – sammanhållande; Inge Eklund, Mälarenergi; Håkan Bergman, Härnösand Energi och Miljö; Patrick Lauenburg, E.ON Energiinfrastruktur; Sebastian Szajda, Södertörns Fjärrvärme; Johan Renlund, Vattenfall och Mikael Karlsson, Energiforsk.

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 tredje etapp.

Programmet leds av en styrgrupp bestående av Cecilia Bergquist (ordförande), Halmstad Energi och Miljö; Stefan Hjærtstam, Borås Energi och Miljö; Peter Mattsson, Södertörns Fjärrvärme; Svante Carlsson, Skellefteå Kraft; Stina Berg, Tekniska Verken i Linköping; Dado Hadziomerovic, Vattenfall; Fabian Levihn, Stockholm Exergi; Lisa Granström, Mälarenergi; Magnus Ohlsson, Öresundskraft; Magnus Revland, Finspångs Tekniska Verk; Harald Andersson, E.ON Energiinfrastruktur; Linda Östberg, Karlstads Energi; Ulf Lindqvist, Jämtkraft; Patrik Grönbeck, Norrenergi; Erik Axelsson Göteborg Energi

Mikael Karlsson, Energiforsk

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

Sammanfattning

I projektet undersöktes om prefabricerade fjärrvärmeledningar, tillverkade enligt EN 253, i glidzonerna, där de utsätts för mekanisk belastning, bryts ner fortare än på andra ställen. Indikationerna var försämrade vidhäftning mellan medierör och isolering och förändringar i den kemiska strukturen hos isoleringen. Andra haverimekanismer vid sidan av förlorad vidhäftning sammanställdes.

Statusbedömningar av framledningar i fält i och utanför ledningarnas glidzoner gjordes med RISE PipeOpsy™. De väsentligaste delarna är RISE Pluggmetod i fält, kemisk analys av polyuretanisoleringen i laboratoriet och en omräkning av driftstiden till en ekvivalent sådan vid en referenstemperatur. Vidare sammanställdes andra haverimekanismer via en internationell workshop och skadestatistik.

I de undersökta fallen är den ekvivalenta driftstiden vid en konstant referenstemperatur 95 °C omkring 20 år. Med tanke på att det gällande kravet är en livslängd på 30 år vid kontinuerlig driftstemperatur på 120 °C, så har de provade ledningarna varit i drift en relativt kort tid.

Nedbrytning av polyuretan och försämring av vidhäftning hos prefabricerade fjärrvärmeledningar bedömdes vara större i glid- än i fixzon, vilket bekräftar teorin som denna undersökning har utgått ifrån. Det är just i glidzonen som vidhäftningen behöver vara god. I de undersökta fallen hade ingen omfattande nedbrytning av fjärrvärmeledningarna skett än.

Andra typer av haverier än förlorad vidhäftning är ofta relaterade till skarvar hos mantel och medierör. För skarvar bedöms vissa haverier vara åldersrelaterade och andra inte. Icke-åldersrelaterade beror på fel som uppstår på grund av misstag vid installation, konstruktion och tillverkning av komponenter.

Haverier av skarvar som beror på ålder, kan vara mantelskarvar av krymptyp som med tiden börjar läcka då mastic torkar och tätar sämre eller då skarvarna skadas av många rörelser i mark. Vidare kan små porer i svetsfogar från tillverkning och installation, som utsätts för både utmattning och korrosion, med tiden leda till läckage.

Nyckelord

Prefabricerade fjärrvärmeledningar, fältprovningar, PipeOpsy, nedbrytning, statusbedömningar, vidhäftning, fixzon, glidzon

Summary: Effects of mechanical loads on ageing of prefabricated district heating pipes

The project investigated whether prefabricated district heating pipes, manufactured according to EN 253, in the sliding zones, where they are exposed to mechanical stress, degrade faster than at other positions. The indications were deterioration of adhesion between the service pipe and the insulation, and changes in the chemical structure of the insulation. Other failure mechanisms besides loss of adhesion were compiled.

Status assessments of supply pipes in the field, in and outside the pipes' sliding zones, were made with RISE PipeOpsy™. The most important parts are the RISE Plug method in the field, chemical analysis of the polyurethane insulation in the laboratory and a conversion of the service time to an equivalent one at the reference temperature. Furthermore, other failure mechanisms were compiled via an international workshop and failure statistics.

In the cases investigated, the equivalent service time at a constant reference temperature of 95 °C is around 20 years. Considering that the current requirement is a service life of 30 years at a continuous operating temperature of 120 °C, the tested pipes have been in operation for a relatively short time.

Degradation of polyurethane and deterioration of adhesion in prefabricated district heating pipes was assessed to be greater in the sliding zone than in the fixed zone, which confirms the theory on which this study is based. It is precisely in the sliding zone that adhesion needs to be good. In the cases investigated, no extensive degradation of the district heating pipes had yet occurred.

Other types of failures than loss of adhesion are often related to joints in the casing or service pipes. For joints, some failures are assessed to be age-related and others not. Non-age-related failures are due to errors that occur due to mistakes during installation, design or manufacturing of components.

Failures of joints due to age can be shrink-type casing joints that begin to leak over time, when the mastic dries and seals less well or when the joints are damaged by many movements in the ground. Furthermore, small pores in welded joints in service pipes from manufacturing and installation, which are exposed to both fatigue and corrosion, can lead to leakage over time.

Extended Summary: Effects of mechanical loads on ageing of prefabricated district heating pipes

The project investigated whether prefabricated district heating pipes, manufactured according to EN 253, in the sliding zones, where they are exposed to mechanical stress, degrade faster than at other positions. The indications were deterioration of adhesion between the service pipe and the insulation, and changes in the chemical structure of the insulation. Other failure mechanisms besides loss of adhesion were compiled.

Status assessments of supply pipes in the field, in and outside the pipes' sliding zones, were made with RISE PipeOpsy™. The most important parts are the RISE Plug method in the field, chemical analysis of the polyurethane insulation in the laboratory and a conversion of the service time to an equivalent one at the reference temperature. Furthermore, other failure mechanisms were compiled via an international workshop and failure statistics.

RISE Plug method is based on that uncovered plugs (drill cores) of insulation are twisted loose from the service pipe, see Figure 1. During the test, the operation of the pipeline can continue. The rig allows for support and steering during both sample preparation and measurement of the torque. Aluminium sleeves are glued to the plugs to be able to apply the torque to each plug.

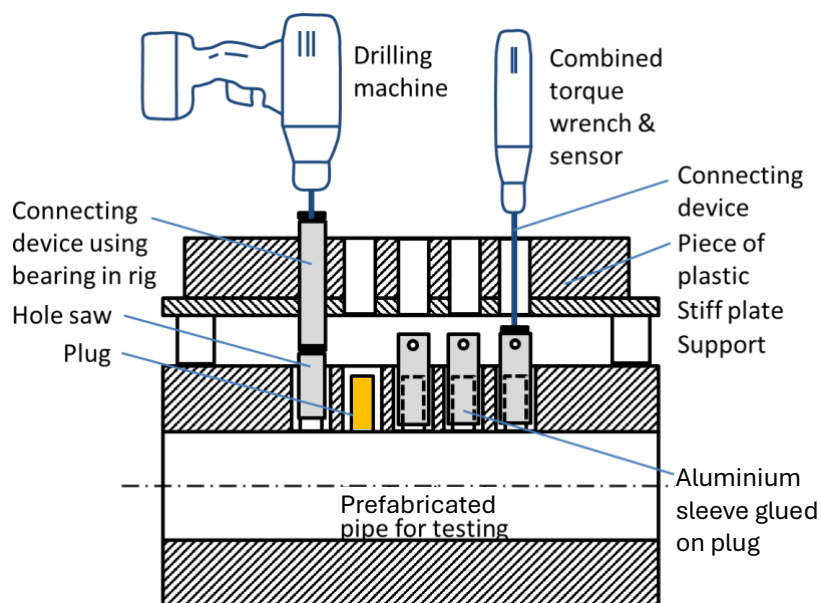


Figure 1: Sketch of RISE plug method

In RISE PipeOpsy™, chemical changes in the molecular structure of polyurethane are studied using FTIR spectroscopy (Fourier Transform Infra-Red) with ATR (Attenuated Total Reflectance). Degradation of polyurethane usually begins with the dissociation of the urethane bonds C=O and N-H, see Figure 2. Absorption indices are determined for these bonds corresponding to the wavenumbers 1712 cm⁻¹ and 1512 cm⁻¹, respectively. Each absorption spectrum is normalized with the absorption peak at 1595 cm⁻¹, which represents the thermally stable double bonds between carbon atoms in the aromatic rings.

Thin slices 1-2 mm thick of the plugs from field measurements, which have been in contact with the service pipe and those that have been located far (about 20 mm) from the service pipe are studied. The purpose is to analyse the degradation of the polyurethane at the service pipe. The ratio of absorption indices of polyurethane in contact with and far from the service pipe is a measure of the degradation of the polyurethane at the service pipe.

For the conversion of the service time, an acceleration factor A_f equal to 2.5 is used. This value has shown good agreement between status and service time for different operating temperatures. When the operating temperature is increased by 10 °C, the chemical reactions are assumed to proceed A_f times faster. The actual service time and the operation temperatures are converted to an equivalent operation time at the reference temperature 95 °C. The same damage or degradation is assumed to occur in both cases, but the impact is easier to quantify in the latter case. Furthermore, this makes it easier to compare what different pipelines have been exposed to.

In the cases investigated, the equivalent service time at a constant reference temperature of 95 °C is around 20 years. Considering that the current requirement is a service life of 30 years at a continuous operating temperature of 120 °C, the tested pipes have been in operation for a relatively short time.

Degradation of polyurethane and deterioration of adhesion in prefabricated district heating pipes was assessed to be greater in the sliding zone than in the fixed zone, which confirms the theory on which this study is based. It is precisely in the sliding zone that adhesion needs to be good. In the cases investigated, no extensive degradation of the district heating pipes had yet occurred.

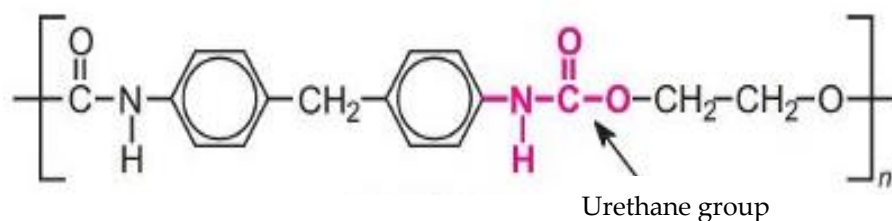


Figure 2: Chemical structure of polyurethane

For the chemical analysis (FTIR), the deterioration is greater in the sliding zone than in the fixed zone with a probability of 97.5 %. In some individual cases of the positions examined, there is a clear difference between the sliding and fixed zones. For the adhesion, the deterioration of this is greater in the sliding zone than in the fixed zone with a probability of 93 %.

Other types of failures, than loss of adhesion, are often related to joints in the casing or service pipes. For joints, some failures are assessed to be age-related and others not. Non-age-related failures are due to errors that occur due to mistakes during installation, design or manufacturing of components.

Failures of joints due to age can be shrink-type casing joints that begin to leak over time, when the mastic dries and seals less well or when the joints are damaged by many movements in the ground. Furthermore, small pores in welded joints in service pipes from manufacturing and installation, which are exposed to both fatigue and corrosion, can lead to leakage over time.

Innehållsförteckning

1	Introduktion	11
1.1	Mål och syfte	11
2	PipeOpsy	13
2.1	Fältprovning – RISE Pluggmetod	13
2.2	Kemisk analys	14
2.3	Omräkning av driftstid	15
2.4	Värmeledningsförmåga	16
2.5	Återställande	16
3	Analys av resultat av mätningar	17
3.1	Fältprovning	18
3.2	Kemisk analys	19
3.3	Omräkning av driftstid	21
3.4	Diskussion	22
4	Andra typer av haverier	23
4.1	Workshop	23
4.2	Skadestatistik	24
4.3	Diskussion	25
5	Slutsatser	26
	Referenser	27
	Appendix A: Bilder av pluggar	29

1 Introduktion

Stora summor har investerats i fjärrvärmenäten genom åren, och att ersätta fjärrvärmeledningarna skulle leda till enorma reinvesteringar. Det finns därför starka skäl till att använda näten så länge som det är tekniskt möjligt.

Ett kostnads- och miljöeffektivt underhåll, som bygger på selektivt ersättande av förbrukade delar, kan väsentligt förlänga användningstiden. Vidare bör driften av näten optimeras så att även hänsyn tas till faktorer som påverkar livslängden av ledningarna. Projektet har fokuserat på prefabricerade fjärrvärmeledningar tillverkade enligt EN 253 och bestående av medierör av stål, isolering av polyuretan och mantel av polyeten. En viktig haverimekanism i dessa ledningar anses vara förlust av vidhäftningen mellan isolering och medierör, vilket leder till att medierör kan röra sig fritt. Då utsätts stål nära böjar för utmattning och isolering i böjar kan tryckas sönder.

Under normala driftsförhållanden utsätts fjärrvärmeledningar för betydande temperaturvariationer på grund av variationer i kunders behov och optimering av värmeproduktion. Vid interaktion med mark leder detta till varierande mekaniska belastningar på ledningarna. Tidigare experiment har visat att isoleringen i mekaniskt belastade fjärrvärmeledningar under höga åldringstemperaturer bryts ned snabbare än i obelastade ledningar, som åldras vid samma temperatur [1]. Detta resulterar i att vidhäftningen mellan isolering och medierör minskar fortare vid varierande belastning.

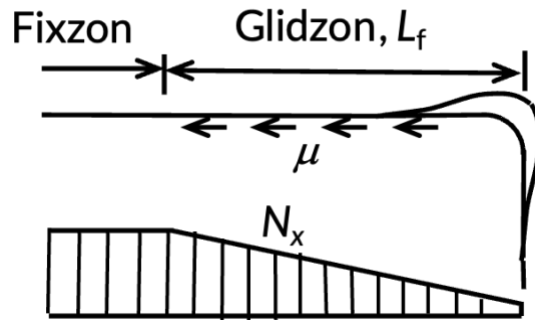
1.1 MÅL OCH SYFTE

Ett viktigt mål i projektet var att bekräfta att isoleringen i mekaniskt belastade ledningar åldras snabbare än i ledningar utan mekanisk belastning. För att ta reda på detta undersöktes statusen hos äldre fjärrvärmeledningar i drift i glidzonerna, där mekanisk belastning på isoleringen antas vara som störst, och samma ledningar i fixzonerna, där mekanisk belastning antas vara liten/försumbar.

Resultatet är nyttigt för att avgöra var statusbedömningar bör göras och generellt vilka delar av fjärrvärmenäten som bryts ned snabbast. I Figur 1.1 visas en skiss av en fjärrvärmeledning. Axialkraften byggs upp i glidzonen av friktionen mellan mantel och mark, vilket orsakar skjuvspänningar i isoleringen. Ledningen är fixerad långt från böjar och vid symmetripunkter i nätet. Ett andra mål var att kartlägga andra typer av haverier i fjärrvärmenäten.

Syftet med projektet var att ta fram relevant kunskap som underlag till förbättrat underhåll av fjärrvärmenäten vilket stöder det selektiva utbytet av delar. Statusbedömningar i näten och bättre livslängdsuppskattningar är nödvändiga verktyg för ett optimalt underhåll av näten.

I projektet har statusbedömningar gjorts i fält, i och utanför ledningarnas glidzoner, med RISE PipeOpsy™. Vidare har andra haverimekanismer sammanställts via en internationell workshop och skadestatistik.



Figur 1.1: Skiss av fjärrvärmeledning bestående av raka ledningar som möts i böj. Axialkraften ökar i glidzonen med längden L_f när ledningen blir längre vid temperaturökning och glider i marken. Friktionen mellan mantel och mark leder till ökning av axialkraften och skjuvspänningar i isoleringen. Om friktionen är konstant i glidzonen ökar axialkraften linjärt

1.2 TIDIGARE STUDIER

Detta projekt har baserats på tidigare studier gjorda vid RISE. I ett tidigare projekt inom FutureHeat [2] ges en litteraturöversikt av nedbrytningsmekanismer, som är betydelsefulla för prefabricerade fjärrvärmeledningar. Utveckling av enklare metoder för statusbedömning presenterades 2012 [3], som ett resultat ett nationellt projekt och tillämpades senare i ett internationellt projekt [4]. Nedbrytning av polyuretan, accelererad åldring och naturlig åldring har studerats i flera publicerade studier [5], [6] och [7].

2 PipeOpsy

RISE PipeOpsy™ [8] som är registrerad RISE metod 5790, består av RISE pluggmetod, kemisk analys av polyuretan isoleringen, en omräkning av drifttiden, mätning av värmeledningsförmåga hos isoleringen och återställande av undersökta fjärrvärmeledningar.

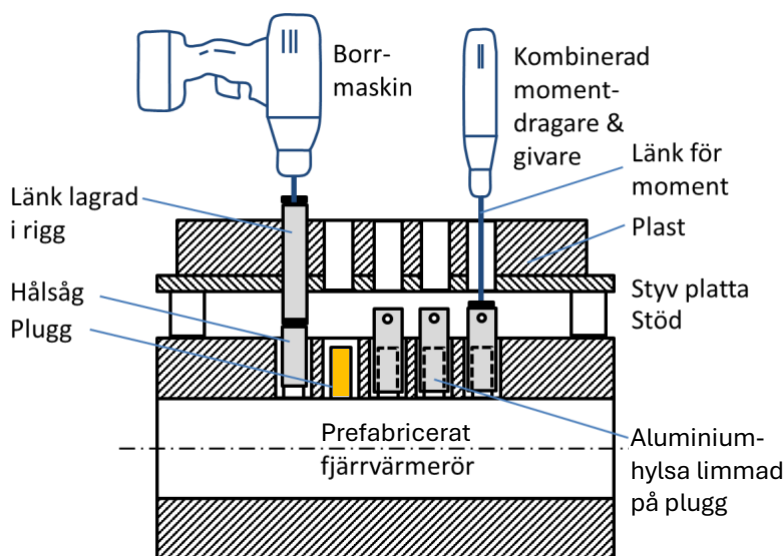
2.1 FÄLTPROVNING – RISE PLUGGMETOD

I det tidigare projektet [2] inom FutureHeat utvecklades en metod för mätningar i fält av vidhäftningsstyrka mellan isolering och medierör. Metoden bygger på att frilagda pluggar (borrkärnor) av isolering vrids loss från medieröret samtidigt som pålagt vridmomentet mäts. Vid provningen kan driften av ledningen fortgå. En specialutvecklad rigg används som medger stöd och lagring vid både provberedning och mätning av vridmoment, se Figur 2.1. Aluminium-hylsor limmas fast på pluggarna för att kunna vrida loss pluggarna.

En kombinerad momentdragare och givare har använts vid mätningarna, men även en enklare momentnyckel har använts. I anslutning till fältmätningar har temperaturen på medieröret mätts för att kunna bedöma dess inverkan på mätresultatet.

För att få ett bra statistiskt underlag och en låg mätosäkerhet m. a. p. medelvärdet krävs provning med ca sju pluggar. Skjuvhållfastheten τ_u [Pa] beräknas från uppmätt vridmoment M [Nm] och pluggens diameter $d = 0,027$ m enligt

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



Figur 2.1: Principskiss av RISE pluggmetod

2.2 KEMISK ANALYS

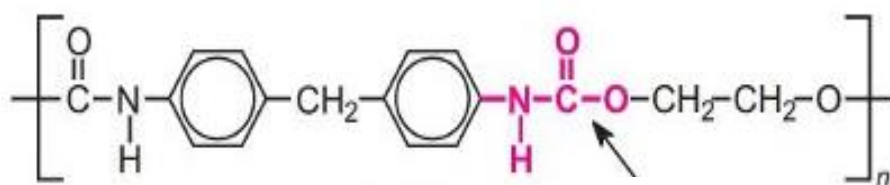
Kemiska förändringar hos polyuretanets molekylstruktur kan studeras med en spektroskopimetod. I detta fall används FTIR-spektroskopi (Fourier Transform Infra Red) med ATR- (Attenuated Total Reflectance) tillsats. En utrustning bestrålar materialprovet med infrarött (IR) ljus och ett spektrum erhålls av de vågtal som absorberas. Metoden kan användas för att identifiera organiska och oorganiska material. Den kan också användas för att studera förändringar i molekylstrukturen såsom ett resultat av oxidation.

Nedbrytning av polyuretan börjar vanligtvis med dissociation (kemisk nedbrytning) av uretargruppen och kan studeras med hjälp av FTIR genom att mäta förändringar i intensiteten hos två karaktäristiska toppar motsvarande de kemiska bindningarna C=O och N-H, se Figur 2.2. Absorptionsindex för bindningarna C=O och N-H vid vågtalen 1712 cm^{-1} respektive 1512 cm^{-1} beräknas. Varje spektrum normeras med absorptionstoppen vid 1595 cm^{-1} , vilken representerar de termiskt stabila dubbelbindningarna mellan kolatomer i de aromatiska ringarna.

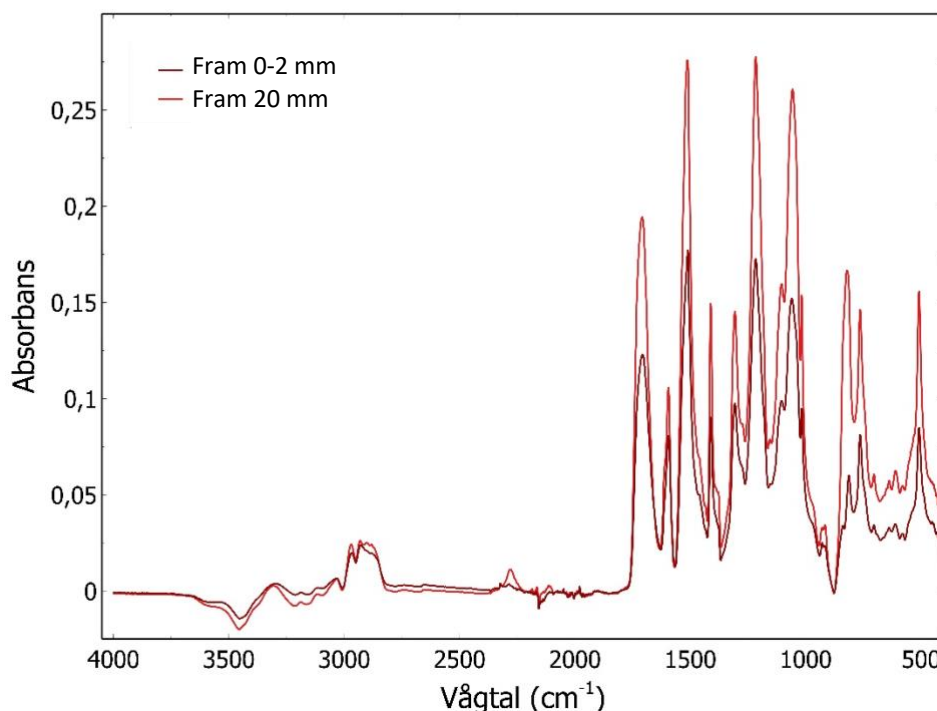
Tunna skivor 1-2 mm tjocka av pluggarna från fältmätningar, som har befunnit sig i kontakt med medieröret och sådana som befunnit sig långt (ca 20 mm) ifrån medieröret studeras. Syftet är att analysera nedbrytningen av polyuretanet som har varit i kontakt med medieröret. Polyuretanet som befunnit sig långt från medieröret används som referens, och här förväntas att ingen nedbrytning ha skett. Proven placeras på ATR-kristallen och pressas därefter mot ytan för att erhålla en optimal kontakt. Från varje position analyseras minst tre prov med FTIR.

När IR-strålning tränger in i ett prov absorberas en del av strålningen av provet (absorbans). Den resulterande signalen vid detektorn ger ett absorptionsspektrum, som är unikt för polyuretanet och utgör ett molekylärt "fingeravtryck" av materialet. Figur 2.3 visar FTIR-spektra av prov tagna från kontaktytan och 20 mm från medieröret av en ledning som utsatts för accelererad åldring vid 140 °C . Skillnader i absorbansnivåer indikerar skillnader i nedbrytning.

Topparna i spektra för vågtalen 1712 cm^{-1} och 1512 cm^{-1} ger, genom medelvärdesbildning av minst tre prov, absorptionsindex tillhörande bindningarna C=O respektive N-H. För varje topp bildas kvoten av index bestämda från polyuretan i kontakt med medieröret och långt ifrån, vilket ger mått på nedbrytningen av polyuretanet vid medieröret.



Figur 2.2: Polyuretan kemisk struktur



Figur 2.3: FTIR spektra av prov tagna 0-2 mm och 20 mm från medierör hos accelererat åldrat rör vid 140 °C

2.3 OMRÄKNING AV DRIFTSTID

Driftstemperaturen i fjärrvärmenäten varierar över tid beroende på säsong och andra driftsbetingelser. De senare kan variera mellan olika fjärrvärmenät. För att få en uppfattning om vilken påfrestning en viss ledning har utsatts för räknas ledningens drifttid om till en ekvivalent drifttid (ålder) vid referenstemperaturen 95 °C. Omräkningen ger möjlighet att jämföra ålder hos olika ledningar med olika driftstider och driftstemperaturer från olika nät.

Vid omräkningen används en accelerationsfaktor A_f som valts till 2,5, vilken stämmer överens med värden rapporterade i den vetenskapliga litteraturen och har visat bra överensstämmelse mellan status och drifttid för olika driftstemperaturer. När driftstemperaturen höjs 10 °C antas de kemiska reaktionerna gå A_f gånger fortare. I Figur 2.4 illustreras metoden för $A_f = 2$.

Metoden bygger på en tumregel som innebär att en reaktion fördubblas i hastighet för varje 10 °C temperaturökning ($A_f = 2$) och brukar kallas Arrhenius tvåan. Låt oss anta att en kemisk reaktion följer Arrhenius ekvation. Då ges reaktionshastighetens temperaturberoende av

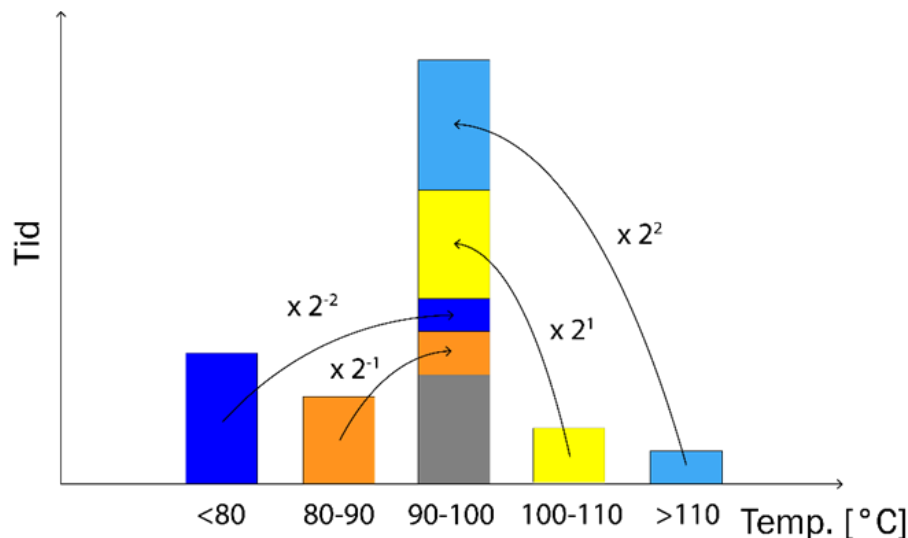
$$k_i = Ae^{-E_a/RT_i} \quad (2)$$

Här är hastighetskonstanten k_i vid den absoluta temperaturnivån T_i . I Ekvation (2) ingår reaktionens aktiveringsenergi E_a , en pre-exponentiell faktor A och den ideala gaskonstanten $R = 8,314 \text{ J/(K mol)}$. Om man känner till värdet på aktiveringsenergin så kan man använda Arrhenius ekvationen (2) för att beräkna accelerationsfaktorn. Anta att

$$T_1 = T_2 + 10 \text{ K} \quad (3)$$

Tabell 2.1: Samband mellan accelerationsfaktor vid 95 °C och aktiveringsenergi

Parameter	Beteckning	Fall I		Fall II	
	Af	2		2,5	
Referenstemperatur	T_0	95	°C	95	°C
Temperaturhöjning	ΔT	10	°C	10	°C
Aktiveringsenergi	E_a	80	kJ/mol	106	kJ/mol


 Figur 2.4: Schematisk exempel för en enkel omvandling av brukstid vid olika temperatur, till tid vid referenstemperatur om Af är 2

Då blir accelerationsfaktorn

$$Af = \frac{k_1}{k_2} = \exp \left[-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \quad (4)$$

I Tabell 2.1 ges samband mellan accelerationsfaktor och aktiveringsenergin när temperaturen höjs från 95 till 105 °C.

2.4 VÄRMELEDNINGSFÖRMÅGA

Termisk konduktivitet hos isoleringen av polyuretan kan också mätas i fält med Thermtest TLS-100 enligt standarden ASTM D5334 [9]. Detta är en handhållen enhet med en nålformad givare, som är 100 mm lång och 2 mm i diameter. Givare trycks in i isoleringen via ett plugghål. Innan konduktiviteten mäts bör man vänta ca 10 minuter så att friktionsvärme som bildats vid intryckningen har letts bort. Inga mätningar av konduktivitet gjordes i projektet.

2.5 ÅTERSTÄLLANDE

Efter fältprovningen återställs ledningen genom att preparerade cylindrar av polyuretanisolering trycks in i hålen. Manteln återställs med svetspluggar av polyeten, som värms i ett speciellt verktyg.

3 Analys av resultat av mätningar

Totalt utfördes 11 parvisa mätningar i fält på ledningar i rörgrav eller på bortkapade ledningsbitar. Mätningarna utfördes på en framledning i två positioner där ledningar glider relativt marken i den ena positionen och är fixerad i den andra.

Ledningen skulle vid dessa positioner i övrigt vara helt lika, dvs samma dimension, samma fabrikat, installerade samtidigt och utsatt för samma temperaturhistorik. Vid mätningarna togs även prov på returledningen ifall det skulle vara bra att ha en referens vid den senare analysen. Mätningarna utfördes enligt PipeOpsy, se Kapitel 2.

I Tabell 3.1 listas de platser där ledningar har antingen provats på plats eller efter uppgrävning. I listan anges ledningarnas driftstid och en ekvivalent driftstid vid referenstemperaturen 95 °C. Provningarna vid Jordbro värmeverk och Södra Jordbro gäller en ledning som levererar vatten med konstant driftstemperatur 120 °C till en industri. Ledningarna vid dess positioner var inte lika gamla och kunde därför inte behandlas som ett par från glid- respektive fixzon.

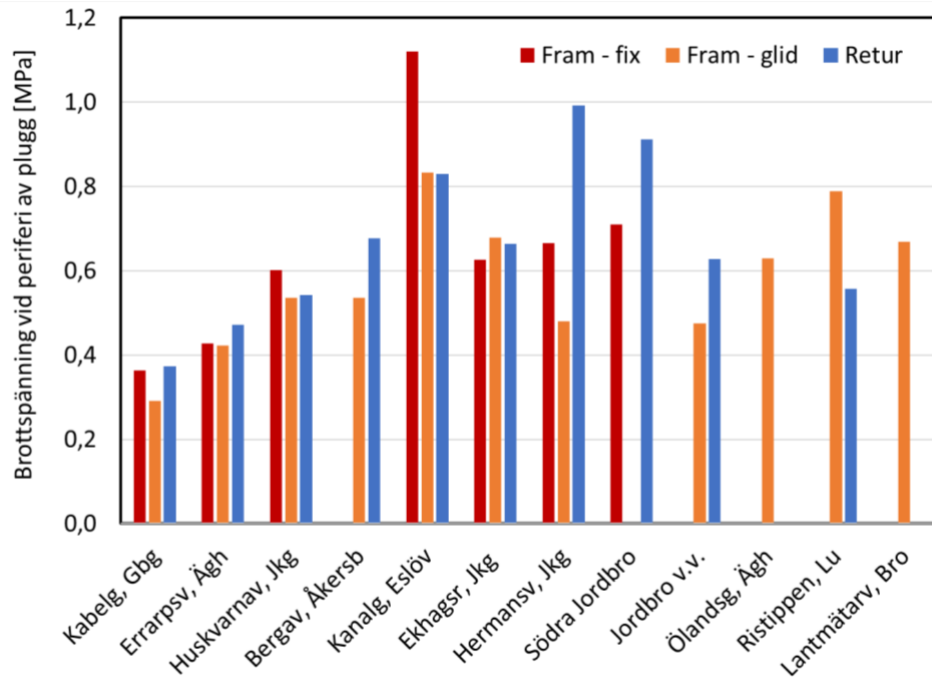
I Tabell 3.1 anges dessutom installationsår och trolig drivgas. Drivgasen CFC11 förbjöds i Sverige 1 juli 1991 och cyklopentan blev tillgänglig i mitten av 1990-talet. I övergången mellan dessa drivgaser användes koldioxid, mjuka freoner (HCFC) och även 1.1.1. trikloretan [10].

Tabell 3.1: Fältmätplatser, installationsår, trolig drivgas och driftstider [år]

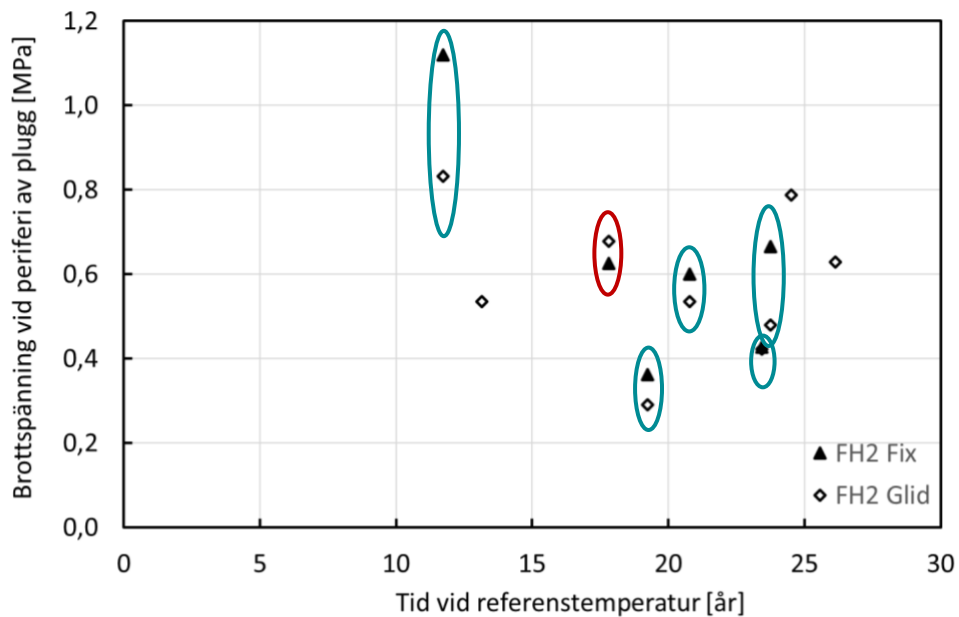
Plats	Installationsår	Trolig drivgas	Driftstid	Ekvivalent driftstid vid 95 °C
Kabelgatan, Gbg	1976	CFC11	47	19
Errarpsvägen, Ägh	1997	C-pentan	26	23
Huskvarnavägen, Jkg	1995	CO ₂	28	21
Bergavägen, Åkersberga	1981	CFC11	42	13
Kanalgatan, Eslöv	1985	CFC11	39	12
Ekhagsringen, Jkg	2000	C-pentan	24	18
Hermansvägen, Jkg	1992	CO ₂	32	24
Södra Jordbro	1997	C-pentan	27	232
Jordbro v.v.	2015	C-pentan	9	77
Ölandsgatan, Ägh	1995	CO ₂	29	26
Ristippen, Lund	1970	CFC11	54	25
Lantmätarvägen, Bro	1980	CFC11	44	36

3.1 FÄLTPROVNING

Vid fältprovningen mäts det moment som krävs för att vrida loss pluggen. I det tidigare projektet [2] gjordes en uppskattning av tillräcklig axiell skjuvhållfasthet på 0,04 MPa. Via korrelationsstudier har det framkommit att brottspänningen vid periferin av pluggen (skjuvhållfastheten mätt med pluggmetoden) ligger tre gånger högre vid adhesionsbrott, dvs 0,12 MPa [2].



Figur 3.1: Brottspänning vid periferi av plugg för olika platser



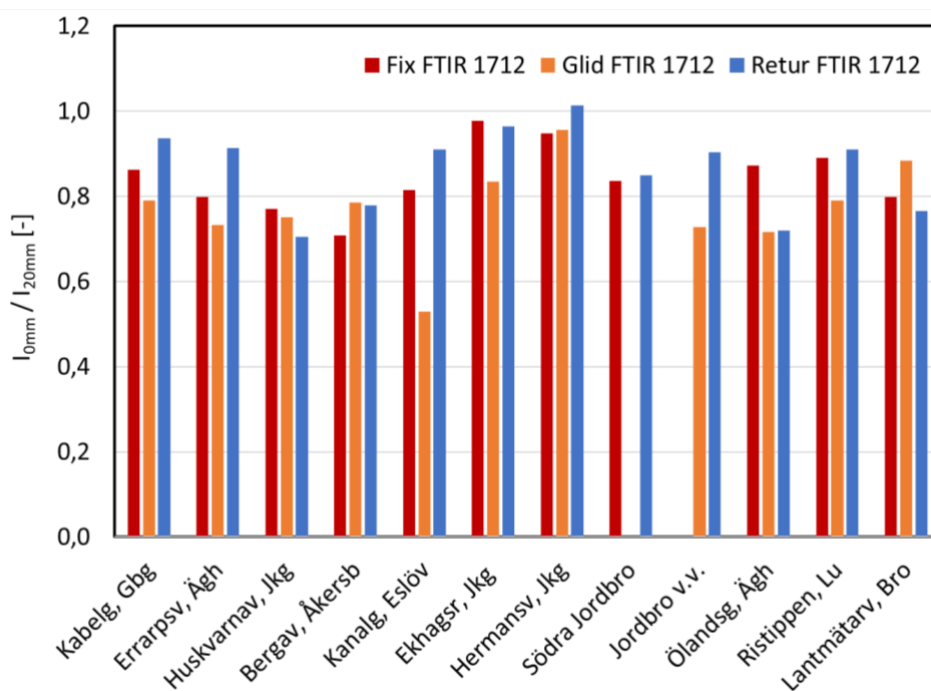
Figur 3.2: Brottspänning vid periferi av plugg som funktion av ekvivalent drifttid vid 95 °C. Resultaten från Södra Jordbro och Jordbro värmeverk är inte redovisade här. Inte heller resultaten från Bro, då uppgifterna om ledningarna var osäkra

Resultaten av skjuvhållfastheten visas i Figur 3.1 för olika mätplatser. För Bergavägen i Åkersberga, Ölandsgatan i Ängelholm och Ristippen i Lund samt även Lantmästarvägen i Bro var vidhäftningen hos framledningen i fixzonen så låg att pluggen lossnade vid beredningen av pluggen.

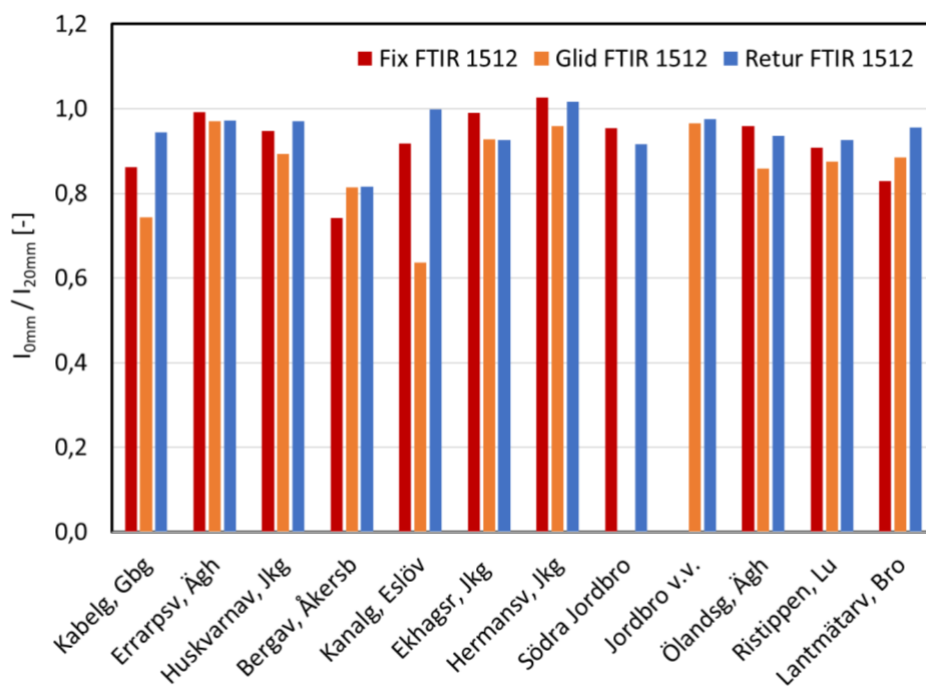
I Figur 3.2 visas skjuvhållfastheten som funktion av ekvivalent drifttid vid 95 °C. Endast sex parvisa mätningar av skjuvhållfastheten har genomförts med tydligt underlag. I alla fall utom i ett fall ligger dessa mätresultat som förväntat. Det förväntade resultatet är större skjuvhållfasthet i fixzonen än i glidzonen, då nedbrytningen antas ha framskridit längre i glidzonen på grund av effekten av mekanisk belastning. Avvikelser från detta kan bero på olika omständigheter, men redan efter tillverkningen kan det finnas variationer i fjärrledningarna av densitet och skjuvhållfasthet. Detta gäller speciellt vid enstyckstillverkning.

3.2 KEMISK ANALYS

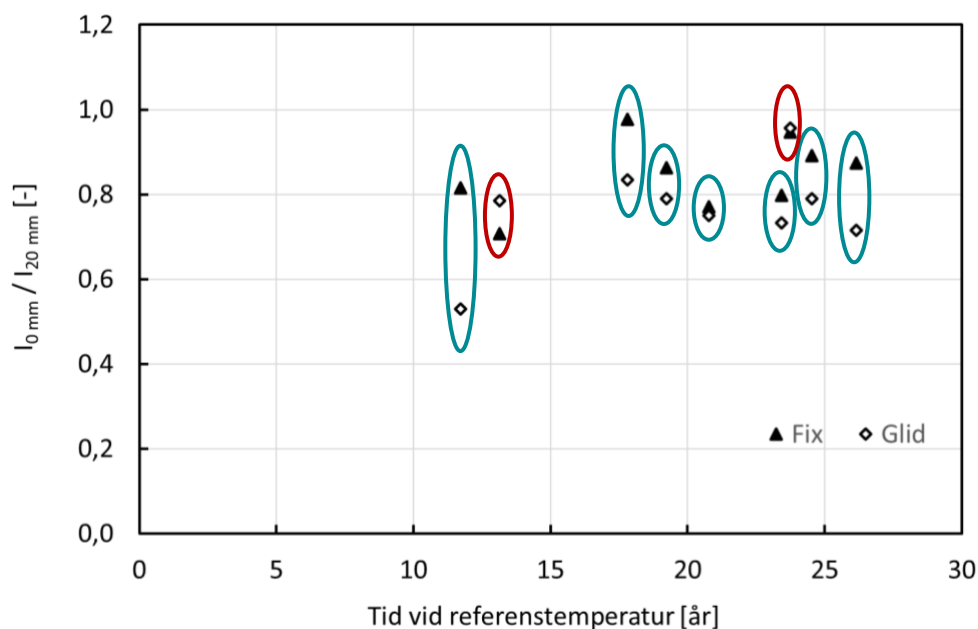
Pluggarna tagna från fält har analyserats i laboratoriet med FTIR. Index beräknas för IR-topparna motsvarande bindningarna C=O och N-H i polyuretanisolering i kontakt med och långt från medieröret. Isoleringen långt från medieröret används som referens. Kvoten mellan indexen är ett mått på nedbrytningen vid medieröret. Resultaten visas för varje plats i Figur 3.3 och Figur 3.4. Bindningen C=O är den som i regel bryts tidigare vid termo-oxidativ nedbrytning. Tillhörande indexkvot har för vissa platser resultat under 0,8, vilket tyder på att viss nedbrytning har skett. Indexkvot för N-H är som regel högre och påvisar nedbrytning endast för några få platser.



Figur 3.3: Index för 1712 cm⁻¹ (Bindning C=O i Uretangruppen) vid olika platser



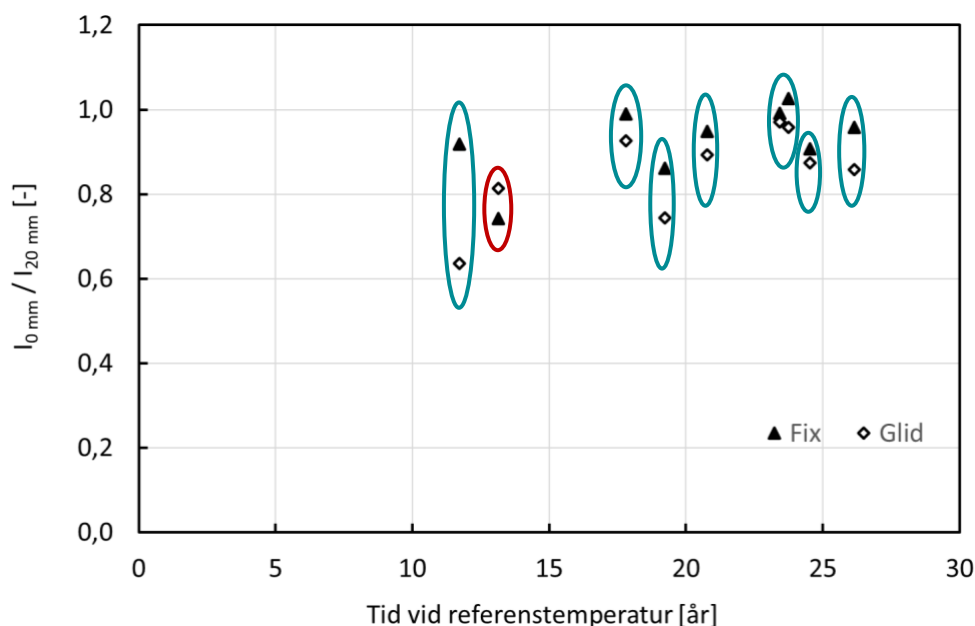
Figur 3.4: Index för 1512 cm⁻¹ (Bindning N-H i Uretangruppen) vid olika platser



Figur 3.5: Index för 1712 cm⁻¹ (Bindning C=O i Uretangruppen) som funktion av ekvivalent drifttid vid 95°C

Tabell 3.2: Differens mellan värden tillhörande fix- och glidzon. För varje par bildas differensen varefter medelvärde, standardavvikelse, t-fördelningen samt övre och undre gräns bestäms. Med sannolikheten 95 % ligger differensen mellan angivna gränser

	Medel	Stdav	Antal par n	$t_{97,5\%, n-1}$	Övre gräns	Undre gräns
Vidhäftning [MPa]	0,094	0,124	6	2,571	0,223	-0,036
Indexkvot för C=O [-]	0,084	0,106	9	2,306	0,165	0,003
Indexkvot för N-H [-]	0,074	0,095	9	2,306	0,147	0,001



Figur 3.6: Index för 1512 cm⁻¹ (Bindning N-H i Uretangruppen) som funktion av ekvivalent drifttid vid 95°C

I Figur 3.5 och Figur 3.6 visas kvoter av index som funktion av ekvivalent drifttid vid 95 °C. I dessa fall finns nio parvisa mätningar av index för mätplatser med tydligt underlag. För bindning C=O vid vågtal 1712 cm⁻¹ ligger alla kvoter av index som förväntat utom två, se Figur 3.5 igen. I fixzonen förväntas mindre nedbrytning och högre värde på indexkvoten. För bindningen N-H vid vågtalet 1512 cm⁻¹ ligger alla index som förväntat utom ett, se Figur 3.6 igen.

Bilder på pluggar från fältprovningarna redovisas i Appendix A. Vid termo-oxidativ nedbrytning av polyuretan mörknar det, vilket betyder att intensiteten hos den bruna färgen är ett mått på nedbrytning.

3.3 OMRÄKNING AV DRIFTSTID

I Tabell 3.1 redovisas ekvivalent drifttid vid 95 °C. De flesta ledningar har inte varit i bruk vid en hög driftstemperatur längre än omkring 20 år. Med tanke på att kravet i standarden EN 253 [11] på en livslängd på 30 år vid kontinuerlig driftstemperatur på 120 °C, så har de provade ledningarna varit i drift relativt kort tid.

3.4 DISKUSSION

För att avgöra om hypotesen att nedbrytningen är större i glidzon än i fixzon, bildas för varje par av provningar differensen mellan resultaten tillhörande fix- och glidzon. Om hypotesen är sann ska differensen vara positiv.

I Tabell 3.2 visas de parvisa differenserna för vidhäftning och indexkvoter. Medelvärde $\bar{x}$ och standardavvikelse s av differenserna beräknas för varje typ av resultat. Med sannolikheten (konfidensen) 95 % ligger det sanna värdena på differenserna inom intervallet

$$\hat{x} = \bar{x} \pm t_{97,5\%,N-1} \times \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (5)$$

Antalet par är N och den 97,5%-kvantilen av t -fördelningen med $(N-1)$ frihetsgrader betecknas $t_{97,5\%,N-1}$.

För kvoterna av index ligger differensen över noll, så det visar att nedbrytningen är större i glidzonerna, se Tabell 3.2. Med sannolikheten 97,5 % är differensen för kvoterna av index större än noll och med samma sannolikhet är indexen i fixzon större än i glidzon.

Sannolikheten för att differensen av vidhäftningen är större än noll är lägre än 97,5 %. Om sannolikheten sänks i Ekvation (5) kan den nedre gränsen för differensen på vidhäftningen överstiga noll. Om gränserna bestäms för sannolikheten 86 %, så kommer den undre gränsen att överstiga noll. Med endast 93 % konfidens kan det då påstås att vidhäftningen i fixzon är större än i glidzon.

Kvoterna av index tillhörande C=O talar för att ingen omfattande nedbrytning skett för framledningen vid Bergavägen i Åkersberga, Ölandsgatan i Ängelholm, Ristippen i Lund och Lantmätarvägen i Bro. Bristen på vidhäftning i dessa positioner antas därför bero på andra omständigheter än termo-oxidativ nedbrytning. Det bedöms skäligt att bortse från dessa positioner där vidhäftningen för framledningen varit så dålig i fixzonen, att det inte varit möjligt att mäta denna.

4 Andra typer av haverier

För att bredda perspektiven gällande olika slags haverier har en internationell workshop genomförts och skadestatistik från Energiföretagen Sverige har behandlats.

4.1 WORKSHOP

En workshop hölls i april 2023. Målet var att diskutera tillståndet hos fjärrvärmenäten i olika länder, sammanställa andra haverimekanismer än förlorad vidhäftning hos prefabricerade fjärrvärmeledningar, sammanställa metoder för statusbedömningar, villkor för accelererad åldring och sammanställa kunskap om livslängdsuppskattningar.

Ett skadefall presenterades [12] där vidhäftningen släppt, medieröret expanderat i längsled och tryckt sönder isoleringen i en böj samt läckage hade uppstått i manteln vid krympskarven mellan rårör och böj. Röret var drygt 20 år gammalt och hade haft drifttemperaturer upp till 125 °C och rörböjen var omgiven av kuddar. Ett möjligt skadescenario är att det läckt in vatten via krypskarven som blivit varm då den var isolerad med kuddar. Mastic i krypskarven ändrar egenskaper då temperaturen ökar och tätar sämre. Vattnet har lett till att delar av isoleringen blev förstörda av hydrolys och medieröret har fått expandera fritt och kunnat orsaka ytterligare skada på böj och isolering.

Haverimekanismer såsom inre korrosion av medierör orsakade av syre och dålig vattenkemi förekommer knappast i Sverige idag [13]. Korrosion av medierör från utsidan har ofta att göra med brister vid installation och är ofta relaterade till mantelskarvar. Det finns även läckage som uppstår med tiden, när mantelskarvar dras fram och tillbaka då drifttemperaturer varierar och mastic åldras i krypskarvar. Svetsfel hos medierör står för en betydande del av uppkomna läckage och haverier. Beroende av svetsfelets art kan det bedömas som icke-åldersrelaterade och hänförs till misstag vid installation. Det finns även åldersrelaterade läckage som beror på spricktillväxt initierade av mindre svetsfel i medierörens skarvar.

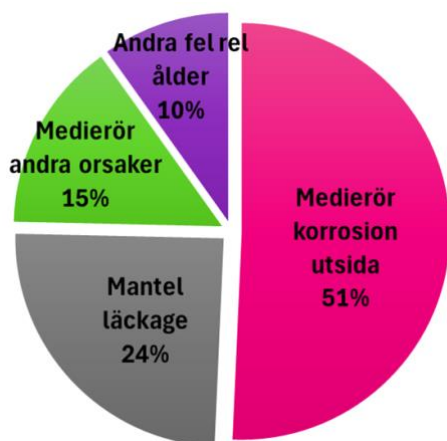
När det gäller statusbedömning presenterades PipeOpsy™, se Kapitel 2, och en metod baserad på Termogravimetrisk analys (TGA) [14]. Vid accelererad åldring ska processer som sker vid naturlig användning accelereras. Nedbrytningsprocesserna vid accelererad åldring ska inte skilja sig från de vid naturlig användning, eftersom andra slags processer ger felaktigt resultat avseende förväntad livslängd. Experiment på RISE har visat att accelererad åldring av polyuretan som isolering i fjärrvärmeledningar fungerar upp till 140 °C [15]. När det gäller livslängdsuppskattning av fjärrvärmeledningar finns det anledning att utveckla förfinade metoder.

4.2 SKADESTATISTIK

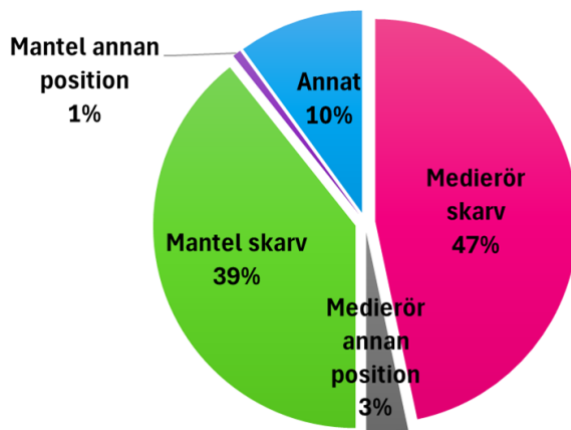
Fjärrvärmenätet i Sverige har en rörgravslängd på 23 000 km. Av denna längd består 45 % av enkla prefabricerade fjärrvärmeledningar, tillverkade enligt EN 253, med medierör av stål, isolering av polyuretan och mantel av polyeten. Vidare består 26 % av prefabricerade dubbelrör av samma material. När det gäller enkla prefabricerade fjärrvärmeledningar har det uppstått 142 fel som bedömts som åldersrelaterade under perioden 2012-2023 och som rapporterats in till Energiföretagen Sverige [16]. Det bedöms att många fler skadefall finns, men inte blivit rapporterade.

Andelen 75 % av dessa fel utgörs av yttre läckage, som kan bero på torr mastic eller mantelskarvar som skadas efter många rörelser i mark, se Figur 4.1. Andelen 51 % av alla åldersberoende fel leder det yttre läckaget till korrosion och läckage på medierören. Andra orsaker till åldersrelaterade fel och läckage hos medierör kan vara små porer i svetsfogar från tillverkning och installation som utsätts för både utmattning och korrosion.

Under perioden 2012-2023 har det skett 150 fel på enkla prefabricerade fjärrvärmeledningar som bedömts som icke-åldersrelaterade. Det kan vara fel som uppstår på grund av misstag vid installation, konstruktion och tillverkning av komponenter. Det handlar i de allra flesta fallen om fel som leder till läckage på mantelskarvar eller medierörsskarvar, se Figur 4.2. Tillsammans utgör felen på skarvar 86 % av alla icke-åldersrelaterade fel. En liten andel rör har fel på andra positioner än skarvarna hos mantel- och medierör. Andra fel kan bero på yttre åverkan.



Figur 4.1: Åldersrelaterade skador för prefabricerade enkla fjärrvärmeledningar



Figur 4.2: Icke-åldersrelaterade skador för prefabricerade enkla fjärrvärmeledningar

4.3 DISKUSSION

Många haverier hos prefabricerade fjärrvärmeledningar är relaterade till skarvarna hos mantel eller medierör. Skadestatistiken är övergripande och inga speciella tidsberoende haverimekanismer har identifierats, som skulle tala för utbyte av större delar av fjärrvärmenäten.

Idag åtgärdas läckor efterhand som de upptäcks, vilket kan vara tillräckligt. För att förebygga läckage skulle det behövas data som talar för att vissa delar kräver utbyte efter en viss driftstid. När det gäller termo-oxidativ nedbrytning och den provning som genomförts och redovisats i Kapitel 3, så har dessa ledningar inte utsatts för en omfattande nedbrytning än.

Det skulle kunna vara så enkelt att en nätägare upptäcker fel för en viss typ av mantelskarvar och befarar ytterligare fel framöver. Då kan nätägaren planera in grävning och utbyte av denna typ av skarvar längs de aktuella sträckorna.

5 Slutsatser

Under projektet planerades 11 parvisa statusmätningar på tilloppet hos fjärrvärmeledningar i fält och vidare analys i laboratoriet. I varje par befinner sig framledningen i den ena positionen i fixzonen och i den andra i glidzonen. Två par exkluderades där det ena paret utgjorde ledningar installerade vid olika tidpunkter och det andra på grund av osäkert underlag.

En omräkning av drifttiden med varierande driftstemperaturer till en ekvivalent drifttid vid referenstemperaturen 95 °C görs. Samma skada eller nedbrytning antas ske i de båda fallen, men påverkan är lättare att kvantifiera i det senare fallet. Detta gör det lättare att jämföra vad olika ledningar har utsatts för.

I de undersökta fallen är den ekvivalenta drifttiden vid referenstemperaturen 95 °C omkring 20 år. Med tanke på att kraven i standarden EN 253 [11] på livslängd 30 år vid kontinuerlig driftstemperatur på 120 °C, så har de provade ledningarna varit i drift en relativt kort tid.

I den kemiska analysen är det klarlagt att nedbrytningen är större i glidzonen än i fixzonen. Med sannolikheten 97,5 % är nedbrytningen större i glidzon än i fixzon. I några enskilda fall av de undersökta positionerna finns det en tydlig skillnad mellan glid- och fixzon.

När det gäller vidhäftningen är det något mindre klart att försämringen av denna är större i glidzonen än i fixzonen. Med sannolikheten 93 % är försämringen av vidhäftningen större i glidzon än i fixzon.

När det gäller andra typer av haverier är dessa oftast relaterade till skarvar hos mantel eller medierör. Vid fel på mantelskarvar läcker grundvatten in i fjärrvärmeledningen, så att isoleringen förstörs och medieröret rostar. Vid fel på skarvar hos medierör läcker varmt vatten ut och förstör isoleringen. När vattnet sprider sig längs med ledningen kan långa sträckor av isolering förstöras. En stor del av dessa haverier är inte åldersrelaterade utan beror på fel och misstag vid installation, konstruktion eller tillverkning av komponenter.

Det finns många andra haverier relaterade till skarvar, som har med ålder att göra. Mantelskarvar av krymptyp kan med tiden leda till läckage då mastic torkar och tätar sämre eller då skarvarna skadas efter många rörelser i mark. Vidare kan små porer i svetsfogar i medierör från tillverkning och installation, som utsätts för både utmattning och korrosion, med tiden leda till läckage. Bättre tekniska lösningar, utbildningar av personal och kontroller bedöms minska risken för läckage i nyare ledningar.

Referenser

- [1] A. Vega, N. Yarahmadi, J. H. Sällström, I. Jakubowicz, "Effects of cyclic mechanical loads and thermal ageing on district heating pipes". *Polymer Degradation and Stability*, 182, Article 109385, 2020.
- [2] I. Jakubowicz, J. H. Sällström, A. Vega & N. Yarahmadi, "Livslängds-prediktering och statusutvärdering av fjärrvärmeledningar", Rapport 2022:851, ISBN 978-91-7673-851-1, Energiforsk, 2022.
- [3] J. H. Sällström, O. Ramnäs & S.-E. Sällberg, Status assessments of district heating pipes, *Proceedings of the 13th International Symposium on District Heating and Cooling (DHC13)*, September 3-4, 2012, Copenhagen
- [4] N. Yarahmadi & J. H. Sällström (2014), *Proceedings of the 14th International Symposium on District Heating and Cooling (DHC14)*, September 7-9, Stockholm.
- [5] A. Vega, N. Yarahmadi & I. Jakubowicz, Accelerated ageing and degradation characteristics of rigid polyurethane foam, *Polymer Degradation and Stability*, 138, s 192-200, 2017.
- [6] A. Vega, N. Yarahmadi & I. Jakubowicz, Determination of the long-term performance of district heating pipes through accelerated ageing, *Polymer Degradation and Stability*, 153, s 15-22, 2018.
- [7] A. Vega, N. Yarahmadi & I. Jakubowicz, Determining the useful life of district heating pipes: Correlation between natural and accelerated ageing, *Polymer Degradation and Stability*, 175, s 109-117, 2020.
- [8] I. Jakubowicz, A. Vega, J. H. Sällström, N. Yarahmadi, "Pipeopsy: A Novel Method for Status Assessment of District Heating Pipes in Operation", *ASCE Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice* 16 (1), 2024, <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JPSEA2.PSENG-1689>
- [9] ASTM D5334-22AE1, "Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock by Thermal Needle Probe Procedure", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
- [10] G. Johansson, FV Konsult, personlig kommunikation, 2024-06-16.
- [11] EN 253:2019+A1:2024, "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, Brussels.
- [12] S. Hay, AGFW, Presentation vid "2nd Workshop on ageing of district heating (DH) pipes", Stockholm 2023-04-18.
- [13] L. Nordengren, Energiföretagen Sverige, Presentation vid "2nd Workshop on ageing of district heating (DH) pipes", Stockholm 2023-04-18.

- [14] S. Hay, A. Leuteritz, M. Morgenthum, "Remaining service life of preinsulated bonded pipes – A key element of transformation strategies and future district heating systems in Germany", *Energy Reports*, 7, s 440-448, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.084>.
- [15] N. Yarahmadi, RISE, Presentation vid "2nd Workshop on ageing of district heating (DH) pipes", Stockholm 2023-04-18.
- [16] F. Östby & L. Nordengren, Energiföretagen Sverige, personlig kommunikation, maj 2024.

Appendix A: Bilder av pluggar

Bilder av pluggar från fältprovingar redovisas i Tabell A. 1.

Tabell A. 1: Bilder av pluggar hämtade från fältprovningar

Kabelgatan: Fixzon fram	Kabelgatan: Glidzon fram	Kabelgatan: Retur
		
Errarpsvägen: Fixzon fram	Errarpsvägen: Glidzon fram	Errarpsvägen: Retur
		
Huskvarnavägen: Fixzon fram	Huskvarnavägen: Glidzon fram	Huskvarnavägen: Retur
		

Bergavägen: Fixzon fram	Bergavägen: Glidzon fram	Bergavägen: Retur
		
Kanalgatan: Fixzon fram	Kanalgatan: Glidzon fram	Kanalgatan: Retur
		
Ekhagsringen: Fixzon fram	Ekhagsringen: Glidzon fram	Ekhagsringen: Retur
		

Hermansvägen: Fixzon fram	Hermansvägen: Glidzon fram	Hermansvägen: Retur
		
Södra Jordbro: Fixzon fram		Södra Jordbro: Retur
		
	Jordbro v.v.: Glidzon fram	Jordbro v.v.: Retur
		

Ölandsgatan: Fixzon fram	Ölandsgatan: Glidzon fram	Ölandsgatan: Retur
		
Ristippen: Fixzon fram	Ristippen: Glidzon fram	Ristippen: Retur
		
Lantmätarvägen: Fixzon fram	Lantmätarvägen: Glidzon fram	Lantmätarvägen: Retur
		

EFFEKT AV MEKANISK LAST PÅ ÅLDRING AV PREFABRICERADE FJÄRRVÄRMELEDNINGAR

Nedbrytning av polyuretan och försämring av vidhäftning hos prefabricerade fjärrvärmeledningar bedöms vara större i gid- än i fixzon. Det är just i glidzonen som vidhäftningen behöver vara god. I de undersökta fallen har ingen omfattande försämring av fjärrvärmeledningarna skett än. Andra typer av haverier än förlorad vidhäftning är ofta relaterade till skarvar hos mantel och medierör. För skarvar bedöms vissa vara åldersrelaterade och andra inte.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.

