

Livslängdsprediktering och statusutvärdering av fjärrvärmeledningar

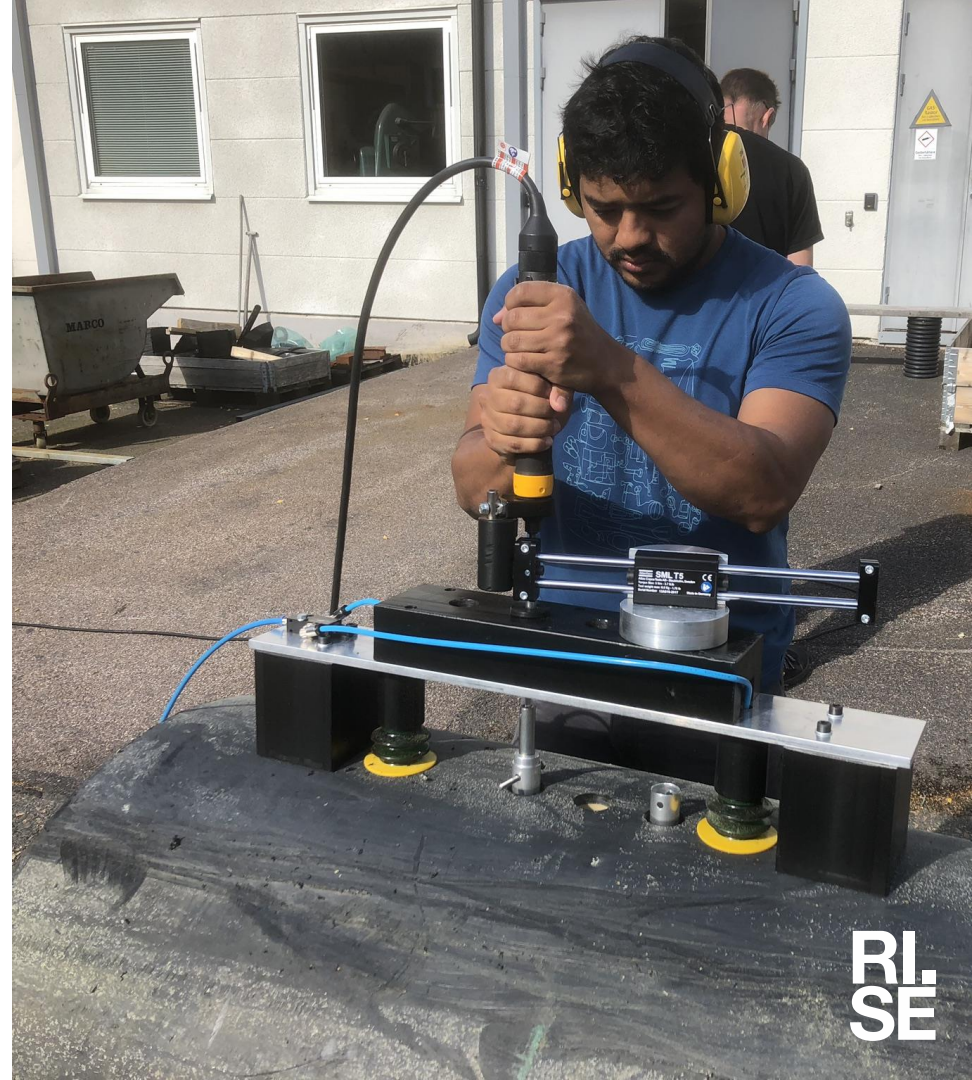
Jan Henrik Sällström, RISE

Ignacy Jakubowicz, Alberto Vega, Nazdaneh Yarahmadi

2022-02-03

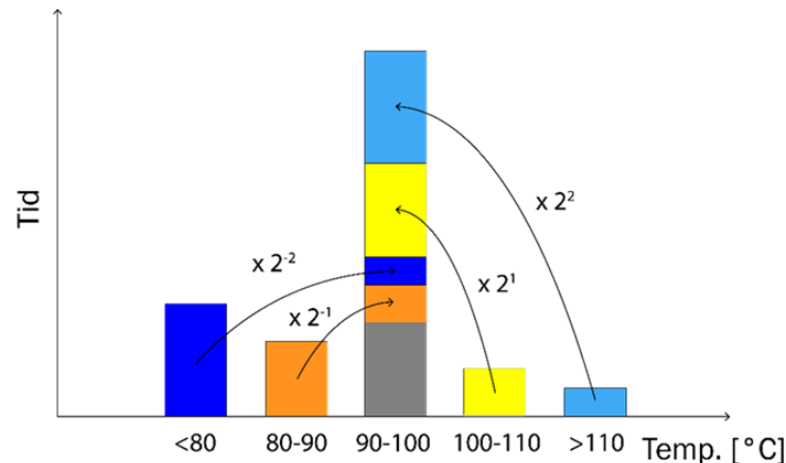
Innehåll

- Sammanfattning (3-6)
- Bakgrund (7-8)
- Skjuvhållfasthet (9)
- RISE Pluggmetod (10- 11)
- Resultat fältmätningar (12-14)
- Effektiv driftstid (15)
- Gräns skjuvhållfasthet (16)
- Temperaturberoende (17)
- Korrelation skjuvhållfasthet (18)
- Avslutande kommentarer (19-21)



Sammanfattning

- Pipeopsy
 - RISE pluggmetod (statusbedömning i fält av fjärrvärmeledningar i drift)
 - Kemisk analys av borttagen isolering i laboratoriet (FTIR, absorptionsindex)
 - Återställning (isolering ersätts & mantel tätas)
- Beräkningsmetod för effektiv driftstid vid vald referenstemperatur (Fram 95 °C, Retur 55 °C)
 - Arrhenius "tumregel" och accelerationsfaktor 2,5
 - Reaktionshastigheten ökar med faktorn 2,5 vid varje temperaturökning på 10 °C
 - Representativ temperaturhistorik under 1 år
- RISE pluggmetod
 - Robusthet & tillförlitlighet verifierats i fält
 - Mätnoggrannhet studerats (6-7 pluggar krävs)
 - Skjuvhållfasthetens temperaturberoende studerats
 - Korrelation till axiell skjuvhållfasthet



Samband mellan accelerationsfaktor & aktiveringsenergi

Parameter	Beteckning	Fall I		Fall II	
Accelerationsfaktor	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

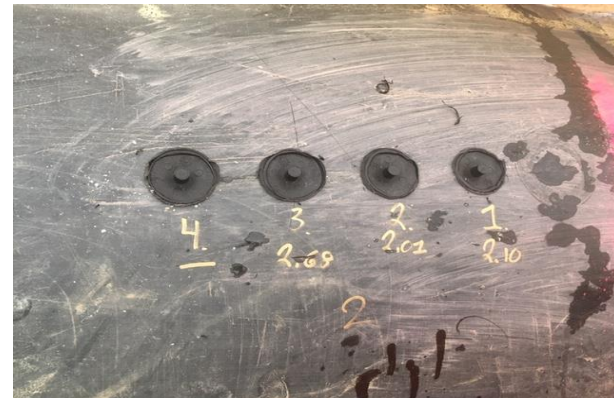
Sammanfattning forts

- Gräns för axiell skjuvhållfasthet 0,040 MPa baserad på yttre last (första bedömning)
 - Förfinat krav baserat på förläggningsdjup, friktion & dimension
 - Kravet blir 3 ggr större värde för pluggmetoden baserat på korrelation
 - Undersökta ledningar har tillräckligt bra status för fortsatt drift
 - 2 ledningar effektiv driftstid på ca 30 år vid referenstemperaturen 95 °C - övriga väsentligt kortare
 - Jfr livslängd enligt EN 253: 30 år vid 120 °C med enstaka toppar på 140 °C under totalt 300 timmar per år



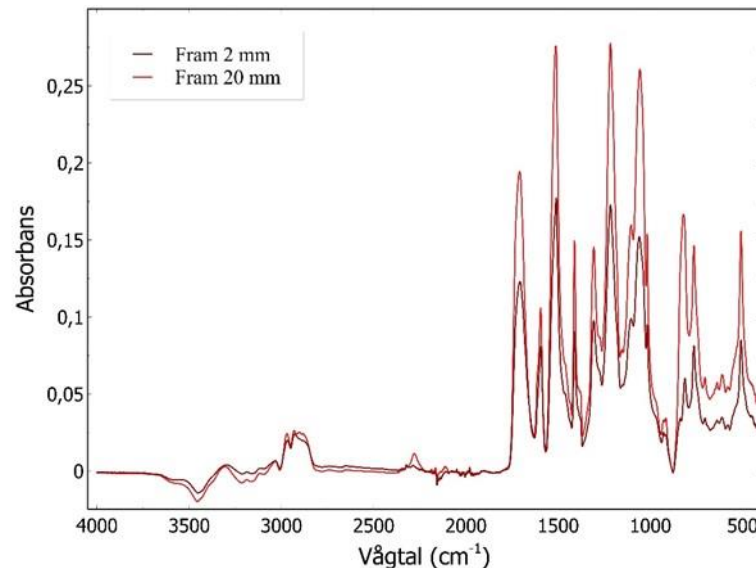
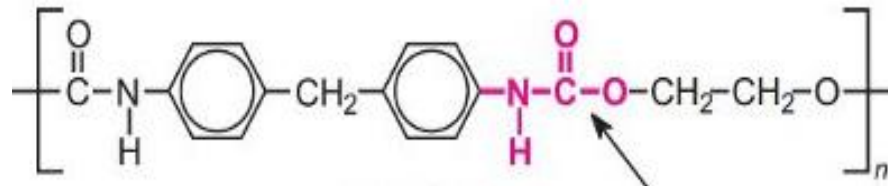
Sammanfattning forts 2

- Internationellt samarbete
 - 2 workshops
 - Rimlig temperaturnivå för accelererad provning
 - Plattform för internationell samverkan inom IEA-DHC om livslängds-prediktering hos förisolerade fjärrvärmeledningar
 - Task shared project TS6: Projektbeskrivning för ett framtida projekt formuleras



Sammanfattning forts 3

- Kemisk analys: Infraröd spektroskopi (FTIR)
 - Absorptionsindex för två bindningar C=O och N-H i uretangruppen vid vågtalen 1712 cm^{-1} respektive 1512 cm^{-1}
 - Dessa bindningar påverkas vid termisk och oxidativ nedbrytning
 - Absorptionsindex: Absorptionstoppar normeras med toppintensiteten vid vågtalet 1595 cm^{-1} som tillhör bindningarna i de aromatiska ringarna
 - Absorptionskvot: Kvot mellan absorptionsindex för isolering nära medieröret och opåverkad isolering långt från medieröret
 - Absorptionsförhållande: Förhållande mellan absorptionskvot för fram- och returledning
 - Förhållande av skjuvhållfasthet för fram- och returledning



Bakgrund

- Fortsatt användning av gamla fjärrvärmeledningar
- Planerat och selektivt utbyte
 - Metoder för statusbedömning
 - Metoder för bedömning av återstående livslängd
- Del 1: Ny fältmetod för funktionell statusbedömning
 - Princip: Plugg av PUR friläggs och vrids loss
 - Erforderligt moment mäts och skjuvhållfasthet beräknas. (Vid bedömning tas hänsyn till drifts-temperatur)
 - Efterföljande kemiska analys av pluggar
 - Ingen driftsstörning
- Del 2: Internationellt överenskommen metodik för livslängdsprediktering
 - Underlag till ny version av EN 253
 - Acceptans av en svensk modell / synsätt
 - Bättre bedömning av framtid status / livslängd
 - Kommersialisering av en svensk fältmetod



Bakgrund forts

- Nedbrytningsmekanismerna försämrar PUR-isoleringen
 - Termisk nedbrytning: Vid höga temperaturer bryts PUR ned genom att bindningar i molekylerna bryts. PUR får då försämrade mekaniska egenskaper.
 - Termo-oxidativ nedbrytning: Syre diffunderar in i isoleringen och reagerar med PUR. Isoleringen färgas brun och får försämrade mekaniska egenskaper.
 - Mekano-kemisk nedbrytning: Mekanisk belastning på en polymer accelererar nedbrytning, ofta på grund av morfologiska förändringar i materialet pga spänning
 - 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.



Motivering av skjuvhållfasthet

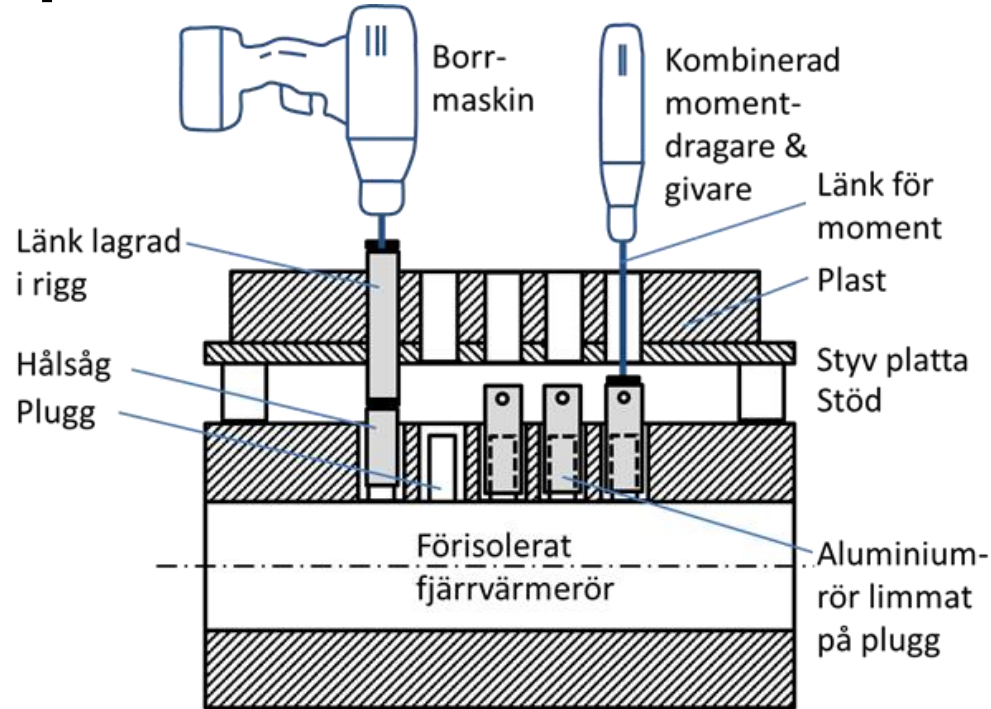
- Fjärrvärmeledningar av
 - medierör av stål
 - isolering av polyuretan
 - mantel av polyeten
- Mäta vidhäftningsförmågan (skjuvhållfasthet) mellan isolering och medierör
- Förlorad vidhäftningsförmågan kan leda till utmattning av stålmedierören nära böjar och kross av PUR-skum i böjar pga temperaturväxlingar vid drift
- Läckor hos medierör och mantel uppstår och långa sträckor kan förstöras när isoleringen kommer i kontakt med varmt vattnen



RISE Pluggmetod - princip

- Plugg av PUR friläggs och vrids loss
- Erforderligt moment mäts och skjuvhållfasthet beräknas.
- Vid bedömning kan hänsyn tas till driftstemperatur
- Ingen driftsstörning
- Beräkning skjuvhållfasthet

- $$\tau_u = \frac{16 M}{\pi d^3}$$
 - Uppmätt moment: M
 - Diameter plugg: d



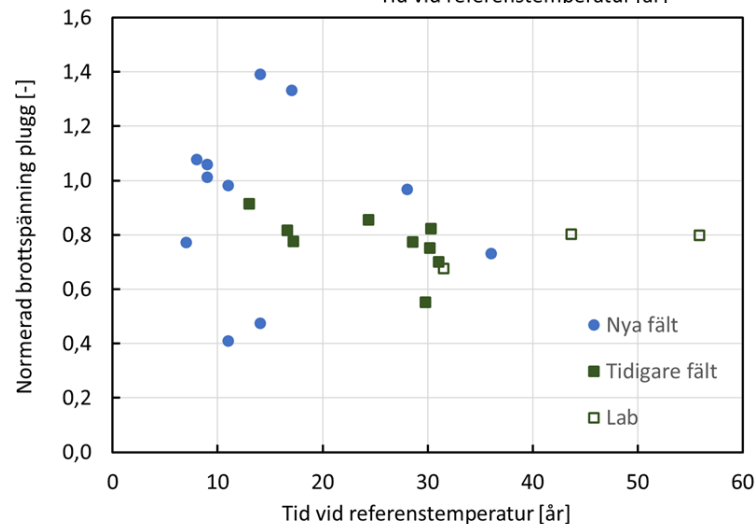
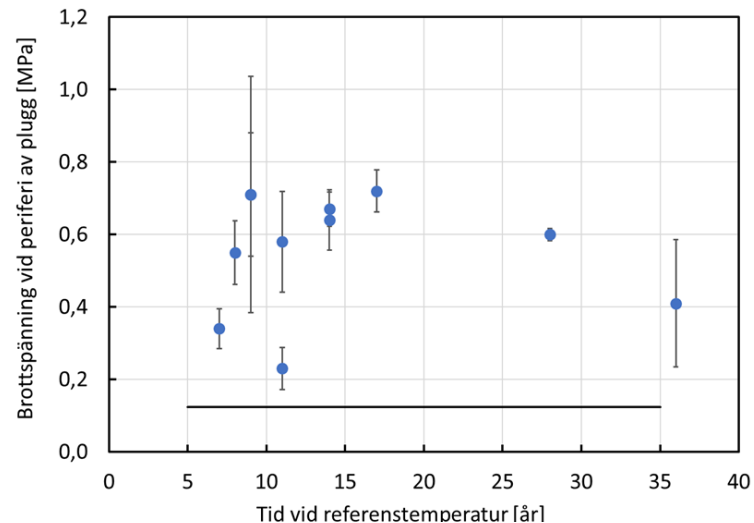
RISE Pluggmetod - tillämpning

- Visuell undersökning och kontroll av eventuell skada på medierör
- Förutsättningar för fältmätningar
 - Typ av rör – singelrör
 - Större än DN50
 - Känd temperaturhistorik
 - Känd ålder, typ av cellgas, fabrikat
 - Ytterligare anledning att gräva
 - Höga driftstemperaturer under en längre tid
- All statusbedömning kan vara till nytta för framtida underhållsplanering



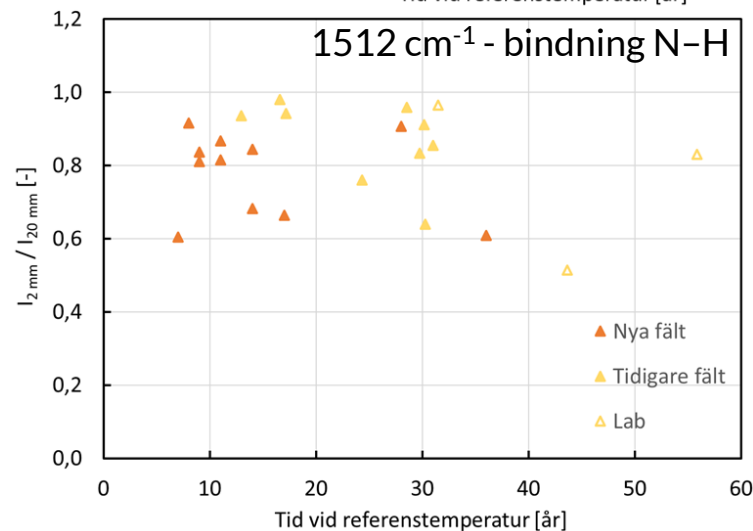
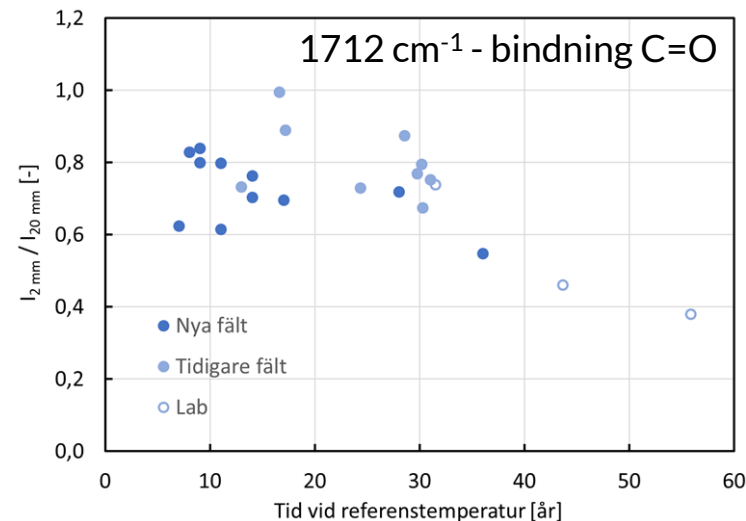
Resultat: Fältmätningar

- Skjuvhållfasthet (brottspänning) vid 11 fältmätningar med markerad osäkerhet hos medelvärdet (95% konfidens, baserat på 2σ)
- Referenstemperatur 95 °C för framledning
- Förhållande av skjuvspänningar mellan fram- och returledning (normerad brottspänning)
 - Tidigare mätningar 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



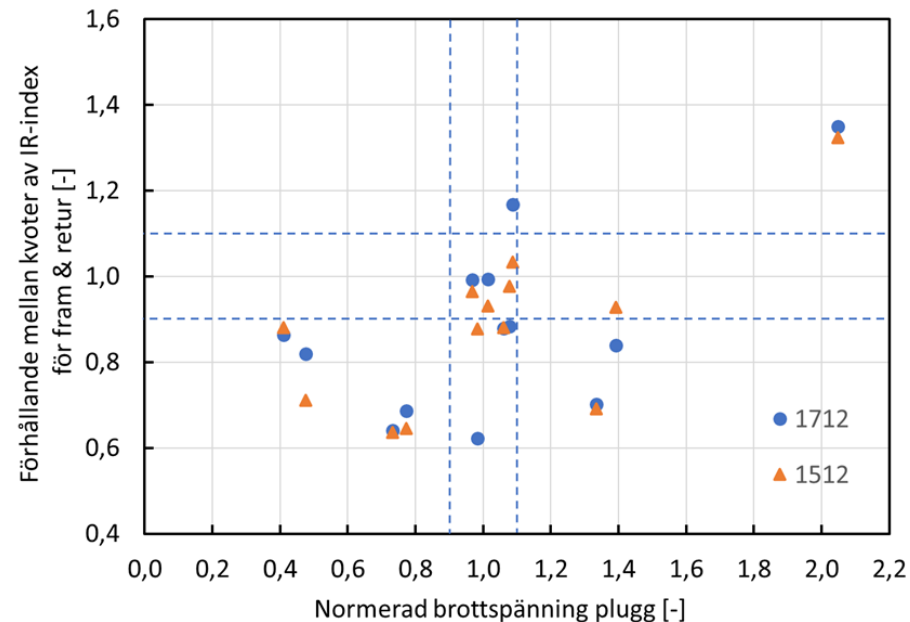
Resultat: Absorptionsindex

- Absorptionsindex för framledning
 - Tidigare mätningar gjorda av Vega m. fl. (2020a) i laboratoriet har markerats ljusare färger
 - Tidigare mätningar på rör åldrade i laboratoriet har markerats med icke fyllda ringar respektive trianglar
- Referenstemperatur 95 °C för framledning
- Överst vågtal 1712 cm^{-1} - bindning C=O
- Underst vågtal 1512 cm^{-1} - bindning N-H



Resultat: Förhållande mellan fram- & returledning

- Horisontell axel: Förhållande av skjuvspänningar mellan fram- och returledning (Normerad brottspänning)
- Vertikal axel: Förhållande mellan absorptionskvoter för fram- & returledning
- Vågta 1712 cm^{-1} - bindning C=O
- Vågta 1512 cm^{-1} - bindning N-H
- Returledningen borde vara opåverkad efter användning
- Samtliga förhållanden borde vara under 1 eller lika med 1 om framledningen inte brutits ned än
- 3 fall avviker
- Längst upp till höger kommer från "Göteborg 1981" med lite åldrad framledningen, men returledningen har kraftigt reducerad vidhäftningsstyrka. Även IR resultatet och okulär besiktning visar på en betydande kemisk nedbrytning hos returledningen.

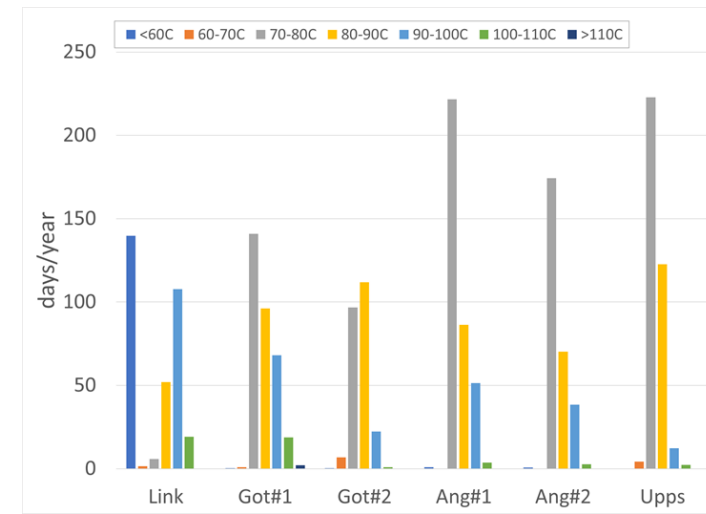
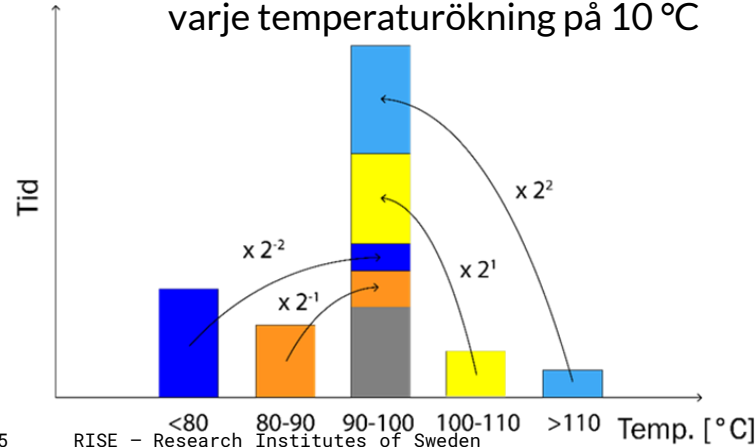


(Förhållande av skjuvspänningar mellan fram- och returledning)

2 fall har förhållande av vidhäftningen större än 1,1 samtidigt som IR-förhållandena är mindre än 1. Returledningen har lägre vidhäftning än framledningen. IR resultaten visar att det inte har skett kemisk nedbrytning av returledningen, men viss nedbrytning av framledningen.

Effektiv driftstid

- Beräkningsmetod för effektiv driftstid vid vald referenstemperatur (Fram 95 °C, Retur 55 °C)
- Representativ temperaturhistorik under 1 år
- Stapeldiagram: Antal dagar med viss temperatur
- En effektiv driftstid
 - Arrhenius "tumregel" och accelerationsfaktor 2,5
 - Reaktionshastigheten ökar med faktorn 2,5 vid varje temperaturökning på 10 °C



Samband mellan accelerationsfaktor & aktiveringsenergi

Parameter	Beteckning	Fall I	Fall II
Accelerationsfaktor	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

Gräns för axiell skjuvhållfasthet

- Gräns för axiell skjuvhållfasthet 0,040 MPa baserad på yttre last (första bedömning)
 - Förfinat krav baserat på förläggingsdjup, friktion & dimension
 - Kravet blir 3 ggr större värde för pluggmetoden baserat på korrelation

Tabell 1: Friktion mellan mantel och fyllnadsmaterial

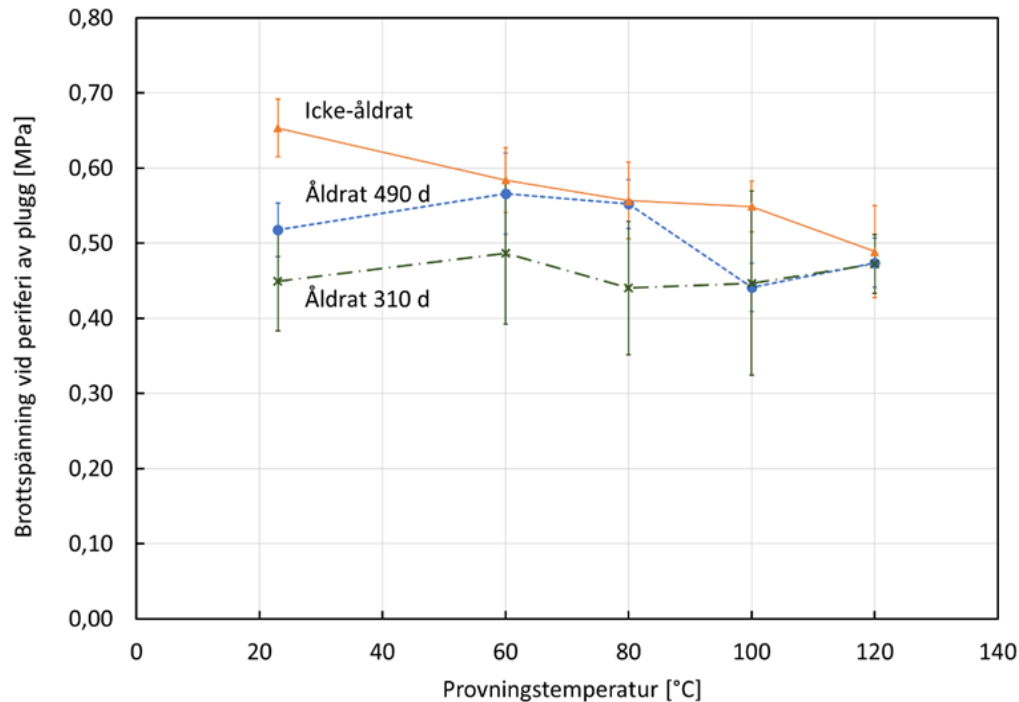
Fyllnadsmaterial	Referens	μ
Kross 0-8 mm	Molin (1997)	0,73
Naturmaterial 0-100 mm	Molin (1997)	1,16
Kross 0-100 mm	Molin (1997)	0,83
Sandjord	EN 13941-1 (2019)	0,4
Sandjord vid snabba rörelser	EN 13941-1 (2019)	0,6

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

Dimension	H_c [m]	μ	τ_{sp} [kPa]
DN 32/140	0,6	0,7	21
DN 32/140	1,0	0,7	33
DN 32/140	1,5	0,7	49
DN 50/160	0,6	0,7	17
DN 50/160	1,0	0,7	27
DN 50/160	1,5	0,7	40
DN 200/400	0,6	0,7	14
DN 200/400	1,0	0,7	21
DN 200/400	1,5	0,7	29

Skjuvhållfasthetens temperaturberoende

- Laboratorieprovningar: Undersökning av temperaturberoende
 - 3 rör DN50 (60 mm) /140 mm
 - 2 är åldrade vid 140 °C i minst 6 månader
 - Testtemperaturer med pluggmetoden: 23, 60, 80, 100, 120 °C
- Varje punkt i diagrammet är ett medel av 7-14 mätningar
- Utökad mätosäkerhet med konfidens 95% är markerat



Korrelation med axiell skjuvhållfasthet

- Mätningar av skjuvhållfasthet med RISE pluggmetod och axiell metod
- Ett medelvärde av kvoten viktat map mätosäkerhet blir 3,1
- Ett oviktat medelvärde ger likvärdigt resultat

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

Avslutande kommentarer

- Pipeopsy
 - RISE pluggmetod (statusbedömning i fält av fjärrvärmeledningar i drift)
 - Kemisk analys av borttagen isolering i laboratoriet (FTIR, absoptionsindex)
 - Återställning (isolering ersätts & mantel tätas)
- Beräkningsmetod för effektiv drifttid vid vald referenstemperatur (Fram 95 °C, Retur 55 °C)
- RISE pluggmetod
 - Robusthet & tillförlitlighet verifierats i fält
 - Mätnoggrannhet studerats (6-7 pluggar krävs)
 - Skjuvhållfasthetens temperaturberoende studerats
 - Korrelation till axiell skjuvhållfasthet



Avslutande kommentarer forts

- Gräns för axiell skjuvhållfasthet 0,040 MPa baserad på yttre last (första bedömning)
 - Kravet blir 3 ggr större värde för pluggmetoden baserat på korrelation
 - Undersökta ledningar har tillräckligt bra status för fortsatt drift
 - 2 ledningar effektiv driftstid på ca 30 år vid referenstemperaturen 95 °C
- Internationellt samarbete
 - 2 workshops
 - Plattform för internationell samverkan inom IEA-DHC om livslängds-prediktering hos förisolerade fjärrvärmeledningar



Avslutande kommentarer forts 3

- Kemisk analys: Infraröd spektroskopi (FTIR)
 - Absorptionsindex för två bindningar C=O och N-H i uretangruppen vid vågtalen 1712 cm^{-1} respektive 1512 cm^{-1}
 - Dessa bindningar påverkas vid termisk och oxidativ nedbrytning
 - Absorptionsindex: Absorptionstoppar normeras med toppintensiteten vid vågtalet 1595 cm^{-1} som tillhör bindningarna i de aromatiska ringarna

