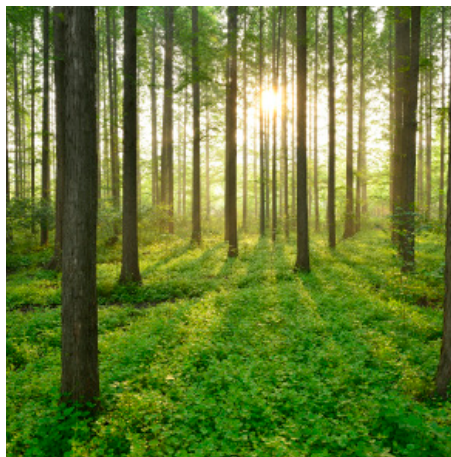
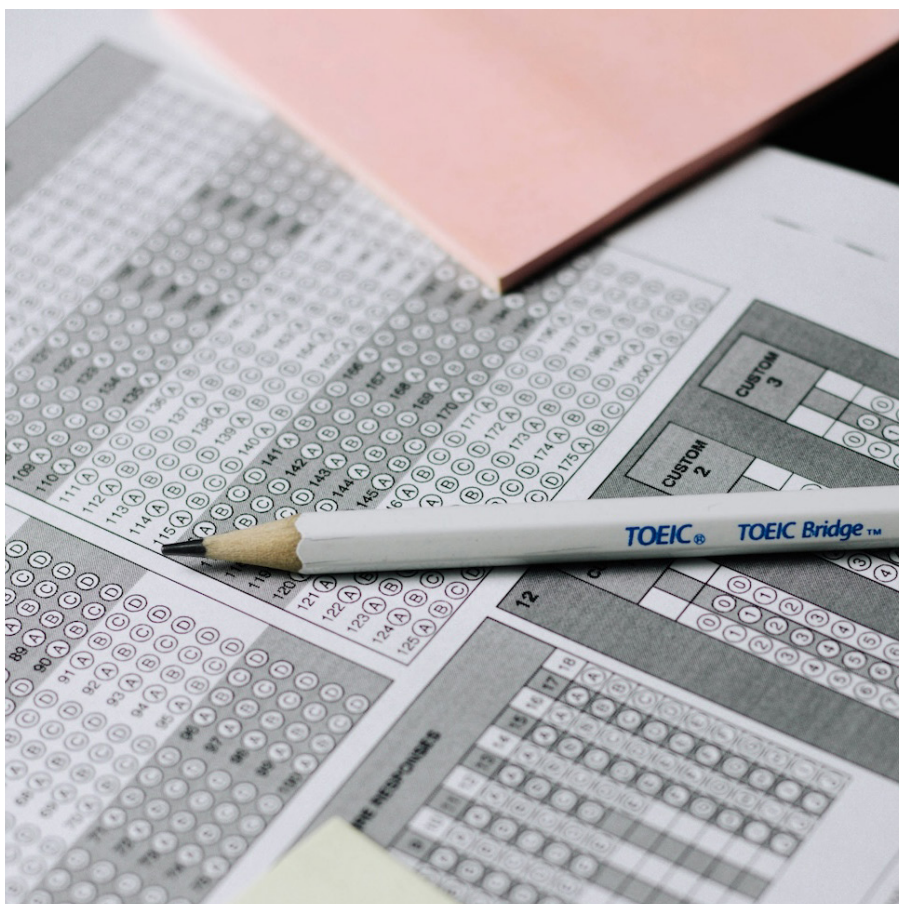


BEDÖMNING AV TÄTNINGSMEDELS LIVSMEDELS LIVSLÄNGD I OLIKA ELINSTALLATIONER

RAPPORT 2026:1200



UNDERHÅLL AV ELNÄT



Bedömning av tätningsmedels livslängd i olika elinstallationer

En omfattande studie av livslängd och vid häftning efter
åldring

MOHAMED JEBRANE, STIG BARDAGE

ISBN 978-91-89917-43-9 | © Energiforsk juni 2026

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

Förord

Projektet *Bedömning av livslängden för tätningsmedel använda för olika typer av elinstallationer* ingår i programmet *Underhåll av elnät och har studerat ett antal tätningsmassors livslängd och vidhäftning till olika material efter åldring.*

Med optimal metodik och tätningsmassa kan underhållsintervallet för elstolpar minskas. Efter tester har en åldringscykel arbetats fram map UV-ljus, vatten, kyla och värme. Resultatet är vägledande i val av tätningsmassor och testmetoder. Projektets PL har varit Mohamed Jebrane från RISE.

Stort tack till programstyrelsen för deras engagemang i projektet:

- Mohammed Abudaheer, Mölndal Energi Nät
- Homan Aldén, Energiföretagen Sv. (adj)
- Fredrik Andersson, Elinorr Ek. förening
- Joakim Andersson, Ystad Energi
- Jon Danielsson, Skellefteå Kraft Elnät
- Jimmy Glimdal, Öresundskraft
- Johan Roos, Göteborg Energi Nät
- David Håkansson, Nätkraft Borås
- Jan Olof Jonsson, Jämtkraft Elnät (ordförande)
- Hans Lagergren, Svenska kraftnät
- Johan Lindblad, Hitachi Energy Sweden
- Tommie Lindquist, RISE
- Julius Lundqvist, Jönköping Energi
- Joakim Sandvik, E.ON Energidistribution
- Anders Sjökvist, Falkenberg Energi
- Eva Slätis, Norrtälje Energi
- Kenneth Stefansson, Vattenfall Eldistribution
- Anton Svensson, Ellevio

Tack även till referensgruppen som stöttat projektet och bidragit med erfarenheter; Kenneth Stefansson på Vattenfall, Anton Svensson på Ellevio, Thomas Lindblad på Wopas, Stig Bardage och Juliana Aristéia de Lima på RISE.

Energiforsk framför ett stort tack till samtliga för värdefulla insatser till följande bolag har deltagit som intressenter till projektet:

- E.ON Energidistribution
- Vattenfall Eldistribution
- Ellevio
- Svenska kraftnät
- Göteborg Energi Nät
- Öresundskraft Elnät
- Tekniska verken i Linköping
- Skellefteå Kraft Elnät
- Jämtkraft Elnät
- Umeå Energi Elnät
- Jönköping Energi Nät
- Hitachi Energy Sweden
- Bodens Energi Nät
- Nätkraft Borås
- Luleå Energi
- Falu Energi & Vatten
- PiteEnergi Elnät
- Norrtälje Energi
- Eskilstuna Elnät
- Mölndal Energi Nät
- Falkenberg Energi
- Ystad Energi
- Elinorr ekonomisk förening;
- Bergs Tingslags Elektriska
- Blåsjön Nät
- Dala Energi Elnät
- Elektra Nät
- Gävle Energi
- Hamra Besparingsskog
- Hofors Elverk
- Härjeåns Nät
- Härnösand Elnät
- Ljusdal Elnät
- Malungs Elnät
- Sandviken Energi Nät
- Sundsvall Elnät
- Söderhamn Elnät
- Åsele Elnät
- Årsunda Kraft & Belys.fören.
- Övik Energi Nät och
- Energiföretagen

Detta är resultaten och slutsatserna från ett projekt, som är en del av ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Författaren/författarna ansvarar för innehåll.

Susanne Stjernfeldt

Energiforsk AB
Forskningsområde Elnät, Vindkraft och Solel

Sammanfattning

Detta projekt undersökte beständigheten och tätningsprestandan hos kommersiellt tillgängliga tätningsmaterial som används för att skydda borrade genomföringar i polyeten (PE) inkapslade trästolpar som kan användas i låg- och mellanspänningsnät för eldistribution. Dessa genomföringar är nödvändiga vid installation av beslag, men utgör en kritisk svaghet eftersom otillräcklig tätning kan möjliggöra fuktinträngning i träkärnan, vilket leder till accelererad nedbrytning och förkortad livslängd.

Ett omfattande experimentellt program genomfördes, som kombinerade materialnivåtester och systemnivåvalidering. Accelererade laboratorieåldringsmetoder (QUV och exponering i väderometer) användes tillsammans med kemisk och mekanisk karakterisering (FTIR, DMA och mikroskopi) för att utvärdera tätningsmaterialens stabilitet, vidhäftning och långtidsegenskaper. Därutöver utfördes laboratorietester i mindre skala på representativa PE inkapslade stolpprover med tätade infästningar för att bedöma motståndet mot fuktinträngning.

Resultaten visar tydliga skillnader i prestanda mellan olika typer av tätningsmaterial. Silikonbaserade material uppvisade bättre motståndskraft mot UV strålning, fukt och frys /tö cykling, och bibehöll sin kemiska stabilitet, mekaniska egenskaper och ytintegritet efter långvarig åldring. I kontrast visade kolvätebaserade material en successiv nedbrytning, inklusive kemiska förändringar, ytförsämring och uppmjukning, vilket indikerar sämre långtidstillförlitlighet.

På systemnivå påverkades tätningsprestandan av både materialval och appliceringsmetod. De mest effektiva lösningarna var baserade på silikonmaterial, särskilt när de applicerades med en tvåzons tätning som riktade sig både mot gränssnittet mellan skruv och trä samt mot gränssnittet vid PE ytan. Dessa konfigurationer förhindrade effektivt fuktinträngning under accelererad åldring, medan lösningar baserade på kolvätematerial visade sämre prestanda och tecken på lokal inträngning.

Baserat på dessa resultat initierades en fältexponeringsstudie i slutet av projektet för att verifiera resultaten under verkliga driftförhållanden. PE inkapslade trästolpar (cirka 1 m långa och med en diameter på 20–25 cm) installerades vid RISE fältstation i Borås. De testade konfigurationerna, som härleddes från laboratorieresultaten, omfattade genomgående bultar och skruvar som tätades med silikontejp (Nitto FB12) applicerad runt infästningarna före installation. Samtliga infästningar orienterades mot söder för att säkerställa jämförbar exponering för solinstrålning och väderpåverkan. Studien är utformad som ett långtidsförsök med periodiska inspektioner för att följa fuktinträngning, materialdegradering och mekanisk integritet över tid.

Användning av silikonbaserade tätningslösningar och optimerade appliceringsstrategier kan i hög grad minska fuktrelaterade skador, förlänga underhållsintervall och förbättra stolparnas långsiktiga tillförlitlighet. Den pågående fältstudien kommer att ge ytterligare validering och utgöra underlag för framtida riktlinjer för installationspraxis.

Nyckelord

PE-inkapslade trästolpar, fuktintrång, tätningsprestanda, silikontättningsmedel.

Summary

This project investigated the durability and sealing performance of commercially available sealants used to protect drilled penetrations in polyethylene (PE)-encapsulated wooden utility poles that could be used in low- and medium-voltage electricity distribution. These penetrations are necessary for hardware installation but represent a critical vulnerability, as insufficient sealing can allow moisture ingress into the wooden core, leading to accelerated degradation and reduced service life.

A comprehensive experimental programme was carried out, combining material-level testing and system-level validation. Accelerated laboratory ageing methods (QUV and weatherometer exposure) were used together with chemical and mechanical characterisation (FTIR, DMA, and microscopy) to evaluate sealant stability, adhesion, and long-term behaviour. In addition, laboratory-scale testing was performed on representative PE-encapsulated pole specimens with sealed fasteners to assess resistance to moisture ingress.

The results show clear differences in performance between sealant types. Silicone-based materials demonstrated better resistance to UV radiation, moisture, and freeze–thaw cycling, maintaining their chemical stability, mechanical properties, and surface integrity after prolonged ageing. In contrast, hydrocarbon-based materials showed progressive degradation, including chemical changes, surface deterioration, and softening, indicating reduced long-term reliability.

At the system level, sealing performance was influenced by both sealant type and application method. The most effective solutions were based on silicone materials, particularly when applied using a two-zone sealing approach targeting both the screw–wood interface and the PE surface interface. These configurations effectively prevented moisture ingress under accelerated ageing conditions, while hydrocarbon-based solutions showed reduced performance and signs of localized penetration.

Based on these findings, a field exposure study was initiated at the end of the project to validate the results under real service conditions. PE-encapsulated wooden poles (approximately 1 m in length and 20–25 cm in diameter) were installed at the RISE field test site in Borås. The configurations, derived from the laboratory results, included through-bolts and screws sealed with silicone tape (Nitto FB12). All fasteners were installed facing south to ensure consistent exposure to solar radiation and weathering. The study is designed as a long-term experiment with periodic inspections to monitor moisture ingress, material degradation, and mechanical integrity over time.

Adopting silicone-based sealing solutions and optimized application strategies could significantly reduce moisture-related damage, extend maintenance intervals, and improve the long-term reliability of poles. The ongoing field study will provide additional validation and support future guidelines for installation practices.

Innehåll

1	Inledning	11
2	Material och metoder	12
2.1	VAL AV TÄTNINGSMEDEL OCH TILLÄMPNINGSKONTEXT	12
2.2	PE-inkapslade trästolpssubstrat	13
2.2.1	Delvis PE-inkapslade halvcylinderprover	13
2.2.2	Fullt PE inkapslade prover	14
2.3	Beredning av borrade genomföringar och tätningskonfigurationer	14
2.4	Provberedning för accelererad åldring (tätningsmaterial)	16
2.5	QUV-accelererad åldring av tätningsmaterial	17
2.6	Åldring i Väderometer av tätade genomföringsmontage	17
2.6.1	Exponeringsuppställning	17
2.6.2	Accelererat vädrings–frysnyckelprotokoll	18
2.6.3	Bedömning av fuktinträngning med infärgningsmetod	19
2.7	FÄLTEXPONERING AV PE INKAPSLADE TRÄSTOLPAR	19
2.8	FTIR SPEKTROSKOPI	21
2.9	DYNAMISK MEKANISK ANALYS (DMA)	21
2.10	LJUSSMIKROSKOPI	21
3	Resultat och diskussion	23
3.1	KEMISKA FÖRÄNDRINGAR EFTER QUV ÅLDRING (FTIR)	23
3.2	TERMOMEKANISKT BETEENDE HOS QUV ÅLDRADE TÄTNINGSMEDEL (DMA)	24
3.3	YTMORFOLOGISKA FÖRÄNDRINGAR EFTER QUV-ÅLDRING (LJUSSMIKROSKOPI)	25
3.4	ÅLDRING I VÄDEROMETER OCH PRESTANDA AVSEENDE FUKTINTRÄNGNING	26
4	Slutsatser	28
5	Rekommendationer för tillgångsförvaltning och installationspraxis	29

1 Inledning

Syftet med detta projekt var att utvärdera långsiktig hållbarhet, åldringsbeteende och tätningseffektivitet hos kommersiellt tillgängliga tätningsmedel avsedda för användning i polyeten (PE)-inkapslade trästolpar som kan användas i låg- och mellanspänningsnät. Fuktinträngning via borrarade hål och skruvgränssnitt är en högriskmekanism för nedbrytning som kan förkorta stolpens livslängd avsevärt och öka underhållsbehovet.

Projektet hade därför följande mål:

- Identifiera och karakterisera potentiella tätningsmedel som är lämpliga för tätning av borrarade hål i inkapslade trästolpar.
- Bedöma deras åldringsbeteende under accelererad åldring.
- Utvärdera vidhäftning mot trä, polyeten och galvaniserat stål.
- Testa och verifiera en tillförlitlig metod för att bestämma fuktinträngning i det inkapslade träet.
- Rekommendera tätningskonfigurationer som effektivt förhindrar fuktinträngning och kan förlänga underhållsintervallen för distributionsstolpar.

Målet med detta projekt var att utvärdera åldringsprestanda, vidhäftning och långsiktig funktion hos flera kommersiella tätningsmedel avsedda att förhindra fuktinträngning via borrarade hål i inkapslade trästolpar. Ett omfattande program etablerades, inklusive accelererad QUV åldring, kemisk och mekanisk karakterisering, mikroskopi och fullskaliga tester av fuktinträngning.

2 Material och metoder

2.1 VAL AV TÄTNINGSMEDEL OCH TILLÄMPNINGSKONTEXT

En inledande kartläggning av kommersiellt tillgängliga tätningsmedel genomfördes för att identifiera material lämpliga för tätning av borrade genomföringar i polyeten (PE) inkapslade trästolpar som kan användas i låg- och mellanspänningsnät. I normal installationspraxis borrar fullt inkapslade trästolpar på plats för att montera kabelhållare och annan utrustning. Detta moment skapar en lokal skada i inkapslingen som måste återtätas effektivt efter installationen för att återställa inkapslingssystemets funktion som fuktbarriär.

Om borrade genomföringar inte tätas korrekt kan skadan i inkapslingen fungera som en väg för fuktinträngning, vilket gör att vatten kan passera PE inkapslingen och nå träsubstratet. Över tid kan fuktinträngning leda till accelererad nedbrytning av trä, reducerad strukturell integritet och förkortad teknisk livslängd. Ur ett tillgångsförvaltningsperspektiv utgör detta en kritisk felmekanism som kan medföra ökat behov av inspektion och underhåll samt förtida stolpbyte.

Urvalskriterierna för tätningsmedel omfattade därför motståndskraft mot miljöåldring, varaktig vidhäftning mot PE, trä och metalliska fästelement, mekanisk flexibilitet samt lämplighet för långvarig utomhusexponering.

Baserat på denna kartläggning valdes följande tätningsmaterial ut för experimentell undersökning:

- EPDM (etylen propylen dien monomer): Ett syntetiskt gummi som kännetecknas av god motståndskraft mot väderpåverkan, temperaturvariationer, kemikalier och vatten, vilket gör det väl lämpat för långvariga utomhusapplikationer.
- EPR (etylen propylen gummi), kommersiellt namn: 3M Scotchfil: Ett syntetiskt gummi känt för hög flexibilitet och god motståndskraft mot väderpåverkan, kemisk exponering och elektrisk påkänning, kombinerat med god termisk stabilitet.
- Silikongummi Nitto 12FB: Ett högpresterande silikongummimaterial med utmärkt motstånd mot extrema temperaturer, ultraviolett (UV) strålning och väderpåverkan, samt goda elektriska isoleringsegenskaper och långsiktig hållbarhet.
- Popstar silikontejp (grön): En självvulkaniserande silikontejp avsedd för krävande miljöer, som erbjuder god elektrisk isolering, vattentätning, hög flexibilitet samt motstånd mot värme och UV strålning.
- Tec 7: Ett högpresterande lim och tätningsmedel med god vidhäftning, flexibilitet, väderbeständighet, kemikalieresistens och vattentätande egenskaper.

På grund av sin viskösa konsistens (från vätska till pasta) kunde Tec 7 inte beredas som självbärande remsor och exkluderades därför från QUV åldring och FTIR karakterisering. Tec 7 kvarstod som en del av den övergripande materialkartläggningen men inkluderades inte i den laboratoriebaserade QUV åldringsstudien som beskrivs nedan.

2.2 PE-INKAPSLADE TRÄSTOLPSSUBSTRAT

PE inkapslade träsubstrat tillhandahölls av projektpartnern Wopas® och bereddes hos dem. Proverna var representativa för material och geometrier som kan förekomma vid installation och underhåll av PE inkapslade trästolpar.

Två substratkonfigurationer användes, där var och en hade ett specifikt syfte inom projektet.

2.2.1 Delvis PE-inkapslade halvcylinderprover

De delvis PE inkapslade halvcylinderproverna (Figur 1) utvecklades initialt som screeningprover för att utvärdera fuktinträning genom en tätad skruvgenomföring. I denna konfiguration fördes skruvar, belagda med Tätningsmedel 1, genom provets PE inkapslade yta, medan Tätningsmedel 2 applicerades i gränssnittet mellan skruvhuvudet och polyeteninkapslingen. Avsikten var att i en förenklad geometri återskapa de viktigaste gränssnitten som finns i en borrar genomföring.

För att möjliggöra bedömning av fuktinträning planerades de återstående, icke inkapslade ytorna på halvcylinderproverna att tätas med ytterligare ett tätningsmaterial (polyuretan eller epoxibaserade system) före accelererad åldring. Detta angreppssätt introducerade dock betydande experimentell osäkerhet. Särskilt kunde fuktinträning genom de tätade (limmade) icke inkapslade ytorna inte uteslutas eller kvantifieras på ett tillförlitligt sätt. Det var därför inte möjligt att entydigt attribuera observerat fuktupptag till transport via den avsedda genomföringsvägen, dvs. skruv-tätningsmedel-PE gränssnittet.

Denna begränsning försämrade möjligheten att isolera och utvärdera fuktinträningsmekanismer som är specifika för den tätade genomföringen. För att hantera detta och säkerställa en mer robust och realistisk bedömning reviderades provkonfigurationen. Fullt PE inkapslade cylindriska provkroppar beställdes därför från projektpartnern Wopas® och användes i de huvudsakliga experimentella undersökningarna, vilket möjliggjorde att fuktinträning kunde utvärderas uteslutande via avsiktligt introducerade och därefter tätade skador i inkapslingen.



Figur 1 Delvis PE inkläst halvcylanderformat träprov som användes under initial metodutveckling.

2.2.2 Fullt PE inkläst prover

Fullt inkläst prover bestod av träcylindrar som var helt omslutna av ett kontinuerligt PE hölje (Figur 2) och bereddes samt levererades av projektpartnern Wopas®. Dessa prov användes för de huvudsakliga experimentella undersökningarna och representerar realistiska driftförhållanden där borring genom inklästingen krävs för att installera utrustning. För att monteringen skulle få plats i Väderometern (Atlas Ci 5000) för accelererad åldring kapades sidorna på ändskivorna på cylinderns ändar, enligt Figur 2.



Figur 2 Fullt PE inkläst träcylinderprov som användes för att testa tätningseffektiviteten hos de undersökta tätningsmedlen; sidorna på ändskivorna kapades för att möjliggöra placering i väderometern (bilden till höger).

2.3 BEREDNING AV BORRADE GENOMFÖRINGAR OCH TÄTNINGSKONFIGURATIONER

Fullt PE inkläst prover användes för att utvärdera långsiktig hållbarhet, åldringsbeteende och tätningseffektivitet hos de valda tätningsmedlen under realistiskt simulerade driftförhållanden. Hål borrades genom PE inklästingen och in i träkärnan med ett 6 mm borr, vilket skapade en lokal skada i inklästingen. Därefter skruvades en fransk skruv in i varje borrarat hål.

För att återställa fuktbarriären vid genomföringen tillämpades i första hand en två tätningsmedelsstrategi. I denna strategi:

- Ett tätningsmedel användes för att omsluta skruven och tätta skruv-trä gränssnittet samt begränsa fukttransport längs fästelementet (tätningsmedel vid skruv-trä gränssnittet, Tabell 1).
- Ett andra tätningsmedel applicerades i gränssnittet mellan PE inkapslingen och skruvhuvudet för att tätta skadan i inkapslingen vid ytan (tätningsmedel vid PE-skruvhuvud gränssnittet, Tabell 1).

Som jämförelse utvärderades även konfigurationer med endast ett tätningsmedel. I dessa fall omslöt endast skruven med tätningsmedel, medan inget extra tätningsmedel applicerades vid PE-skruvhuvud gränssnittet. Dessa konfigurationer markeras med ett streck (-) i Tabell 1. Figur 3 visar borrning genom den PE inkapslade cylindern, följt av applicering av tätningsmedel och kontrollerad inskruvning.

Förberedelse: Borrning, tätningsmedel, skruvfixering,



Figur 3 Borrning, applicering av tätningsmedel och inskruvning i PE inkapslade prov.

Dessutom inkluderades genomgående genomföringar i testprogrammet. För dessa konfigurationer borrades ett hål helt igenom den PE inkapslade cylindern, och en 6 mm galvaniserad gängstång omslöt med tätningsmedel och fördes genom provet. Monteringen drogs sedan åt med muttrar i båda ändar, vilket representerar en alternativ installationskonfiguration och möjliggör bedömning av tätnings effektivitet för genomgående genomföringar.

Ett antal konfigurationer bereddades genom att variera vilka tätningsmedel som applicerades vid skruv-trä gränssnittet respektive vid PE-skruvhuvud gränssnittet, enligt sammanfattningen i Tabell 1. Dessa kombinationer speglar alternativa appliceringsstrategier relevanta för fältpraxis. Två replikatprover bereddades för varje konfiguration.

Tabell 1 Tätningskonfigurationer som användes för tester av tätade genomföringar

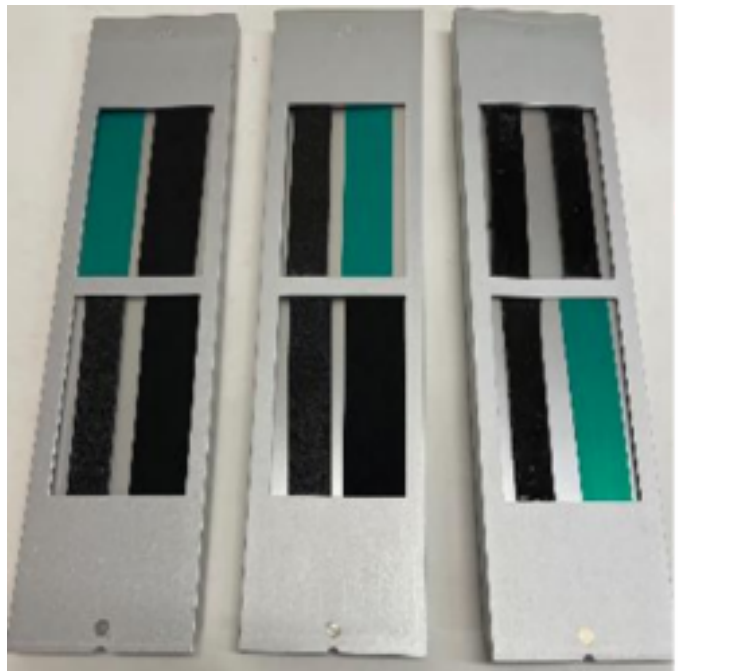
Prov ID	Tätningemedel som omsluter skruven (skruv-trä gränssnitt)	Tätningemedel vid PE-skruvhuvud gränssnitt
1-0, 1-1	EPDM	Silicone tape (Green)
2-0, 2-1	EPDM	Silicone rubber (Nitto)
3-0, 3-1	EPDM	EPR (Scotch 3M)
4-0, 4-1	TEC 7	Silicone tape (Green)
5-0, 5-1	TEC 7	Silicone rubber (Nitto)
6-0, 6-1	TEC 7	EPR (Scotch 3M)
7-0, 7-1	Silicone rubber (Nitto)	Silicone tape (Green)
8-0, 8-1	Silicone rubber (Nitto)	Silicone rubber (Nitto)
9-0, 9-1	Silicone rubber (Nitto)	EPR (Scotch 3M)
10-0, 10 1	EPR (Scotch 3M)	Silicone tape (Green)
11-0, 11 1	EPR (Scotch 3M)	Silicone rubber (Nitto)
12-0, 12 1	EPR (Scotch 3M)	EPR (Scotch 3M)
13	EPDM	–
14	TEC 7	–
15	Silicone rubber (Nitto)	–
16	EPR (Scotch 3M)	–
17	Silicone tape (Green)	–
18	EPDM	–
19	EPR (Scotch 3M)	Silicone rubber (Nitto)
20	Silicone rubber (Nitto)	EPR (Scotch 3M)

Noter:

- Ett streck (–) anger konfigurationer med endast ett tätningemedel, där inget tätningemedel applicerades vid PE-skruvhuvud gränssnittet.
- Prov ID som slutar på " 0" respektive " 1" representerar replikatprover.

2.4 PROVBEREDNING FÖR ACCELERERAD ÅLDNING (TÄTNINGSMATERIAL)

Tätningbands och gummimaterial bereddades genom att skära remsor med ungefärliga dimensioner 95 mm × 25 mm. Remsorna monterades på provhållare i metall för QUV för att säkerställa konsekvent positionering och exponering under åldringen (Figur 4). Två dubblettprover bereddades för varje tätningmaterial.



Figur 4 Tättnings- och gummiorsor monterade på QUV hållare för åldring.

2.5 QUV-ACCELERERAD ÅLDNING AV TÄTNINGSMATERIAL

Accelererad åldring av tätningemedel utfördes i en QUV sprayutrustning (Q-Lab) med UV A 340 lampor vid en irradiance på $0,89 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{nm})$ vid 340 nm.

Varje åldringscykel bestod av:

- 24 timmar kondensation vid $(45 \pm 3) ^\circ\text{C}$
- 144 timmar UV och vattenspraysubcykler (48 cykler med 2,5 h UV vid $60 \pm 3^\circ\text{C}$ följt av 0,5 timme vattenspray vid 6–7 L/min)
- 24 timmar frys exponering vid -20 C

Den totala exponeringstiden var 2016 timmar, med mellanliggande provuttag efter 504, 1008, 1512 och 2016 timmar.

2.6 ÅLDNING I VÄDEROMETER AV TÄTADE GENOMFÖRINGSMONTAGE

Utöver åldring på materialnivå exponerades kompletta genomföringsmontage bestående av fullt PE inkapslade träprover med isatta skruvar och olika kombinationer av tätningemedel för accelererad åldring i väderometer.

2.6.1 Exponeringsuppställning

placerades på roterande ställ inne i väderometerkammaren för att säkerställa jämn exponering av de tätade genomföringsområdena, inklusive skruvhuvuden och PE-tätningemedelsgränssnitt. Flera prov som representerade olika tätningkonfigurationer åldrades parallellt (Figur 5).



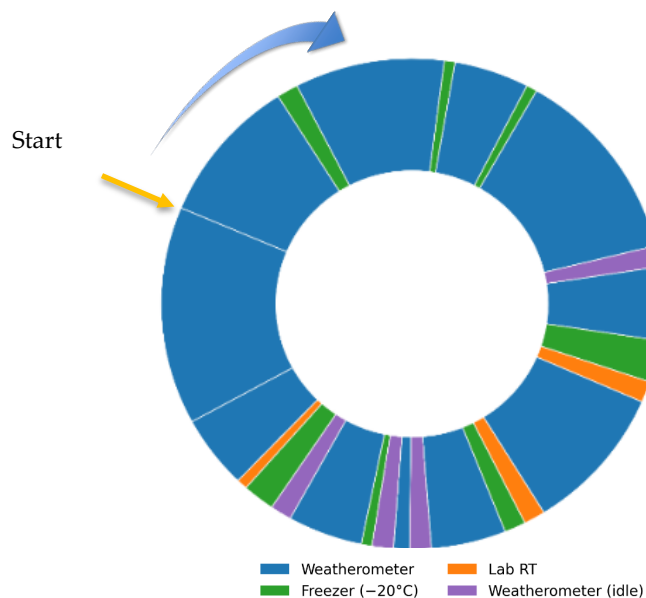
Figur 5 Roterande hållare i väderometer: tom, delvis lastad och fullt lastad konfiguration.

2.6.2 Accelererat vädrings–frys-cykelprotokoll

Montagen exponerades för ett accelererat vädrings–frys-cykelprotokoll som kombinerade exponering i väderometer, exponering i frys, stillestånd i kammare samt konditionering i rumstemperatur. Den kumulativa exponeringen omfattade:

Total kumulativ exponeringstid: 3482 timmar

- Exponering i väderometer: 2834 timmar
- Exponering i frys (-20 °C): 336 timmar
- Stopp/idle perioder i väderometer: 192 timmar
- Hålltid i rumstemperatur: 120 timmar



Figur 6 Schema för accelererad vädringsfrys-cykel.

Protokollet utformades för att simulera långvariga utomhusförhållanden, inklusive solstrålning, fukt, temperaturvariationer och frys /tö cykling. Åldring av kompletta

montage i väderometer kompletterar tester på materialnivå genom att utvärdera den samlade prestandan hos tätningsmedel, substrat och gränssnitt under realistiska cykliska påkänningar.

2.6.3 Bedömning av fuktinträngning med infärgningsmetod

Efter avslutad åldring i väderometer utvärderades de tätade genomföringsmontagen avseende fuktinträngning i träkärnan med hjälp av en infärgningsmetod. Metoden användes för att kvalitativt bedöma effektiviteten hos tätningskonfigurationerna att förhindra väsketransport genom systemet skruv-tättningsmedel-PE och in i det underliggande träsubstratet.

För detta ändamål nedsänktes varje fullt PE inkapslat träprov till ungefär halva diametern i en infärgningslösning, där skruv, tätningsmedel och PE-skruvhuvud gränssnitt var helt nedsänkta. Särskild omsorg lades på att säkerställa att den inkapslade regionen med genomföringen exponerades för lösningen, medan provets övre del förblev ovanför vätskenivån.

Infärgningslösningen bereddes genom att lösa "Äkta Bets 63 – Mörk Mahogny" (Herdins) i en blandning av etanol och vatten i förhållandet 1:20 (v/v), vilket gav en kraftigt infärgande, visuellt spårbar vätska som kan tränga in i fuktvägar. Proverna nedsänktes i lösningen under en vecka vid omgivande laboratorieförhållanden.

Efter nedsänkning togs proverna upp ur infärgningslösningen och fick dränera och torka i 48 timmar, vilket möjliggjorde avdunstning av överskottsvätska på ytan och begränsade fortsatt kapillärtransport efter att proverna tagits upp.

Därefter kapades varje prov i området runt skruvgenomföringen så att träsubstratet intill den tätade gränsytan exponerades. Snittytorna granskades visuellt för att avgöra om den infärgade lösningen hade trängt in i träet, vilket skulle indikera fuktinträngning genom eller runt den tätade genomföringen.

Förekomst, omfattning och fördelning av infärgning i träet användes som kvalitativa indikatorer på tätningseffektivitet och fuktbarriärens funktion för de olika tätningskonfigurationerna.

2.7 FÄLTEXPONERING AV PE INKAPSLADE TRÄSTOLPAR

För att komplettera laboratoriestudierna och utvärdera tätningsprestanda under realistiska driftförhållanden genomfördes en fältexponering av PE-inkapslade trästolpar.

Stolpprover med en längd på cirka 1 m och en diameter mellan 20 och 25 cm preparerades och installerades i RISE fältstation i Borås (Figur 7). De valda infästningskonfigurationerna representerar vanliga installationsmetoder i fält, och samtliga infästningar orienterades mot söder för att säkerställa jämförbar exponering mot solinstrålning och väderpåverkan.

Tre replikat per konfiguration användes för att möjliggöra jämförande utvärdering av variation i prestanda.



Figur 7 Slutlig uppställning av fältexponerade prover, med fästelement orienterade mot söder

Testade konfigurationer

1. Genomgående bult med brickor (KMD 24-590)

Ett genomgående bultsystem (KMD 24-590) installerades genom stolpen med brickor på båda sidor av den polyeteninkapslade konstruktionen.

Silikonmaterialet Nitto FB12 lindades runt bulten i området innanför brickorna före installation.

Denna konfiguration representerar en mekaniskt robust infästning där tätningsprestandan uppnås genom kombinationen av kompression i gränssnittet mellan bricka och polyeten samt silikonmaterialets förmåga att tätta längs genomföringen.

2. Fransk träskruv 6 × 50 mm

En fransk träskruv (6 × 50 mm) installerades i ett förborrat hål i stolpen.

Före installation lindades Nitto FB12 runt skruven.

Denna konfiguration representerar en vanlig infästningslösning där tätning uppnås genom samspelet mellan mekanisk inspänning och silikonmaterialets förmåga att fylla och tätta gränssnitten mellan skruv, trä och polyetenmantel.

3. Träskruv HEX 6.5 × 45 mm

En sexkantshuvad träskruv (6,5 × 45 mm) installerades i förborrade hål i stolpen.

Nitto FB12 lindades runt skruven före installationen.

Denna konfiguration återspeglar en praktisk installationsmetod där tätningsprestandan beror både på gänggreppet och på den viskoelastiska tätningsfunktionen hos silikonmaterialet vid gränsytorerna mellan skruv, polyeten och trä.

4. Referens (utan genomföring)

Prover utan någon infästning inkluderades som referens för att fastställa bakgrundsnivån av fukttransport i intakt PE-inkapslat trä.

Exponeringsförhållanden och utvärdering

Proverna exponeras för naturliga klimatförhållanden vid fältstationen, inklusive nederbörd, temperaturvariationer, UV-strålning samt frys-/tö-cykler över en längre tidsperiod.

Fältexponeringen är utformad som ett långtidsförsök. Stolparna kommer att kvarstå i fält och inspekteras samt utvärderas periodiskt med ungefär ett årsintervall, beroende på projektparternas intresse av att följa testets utveckling.

Utvärderingen kommer att utföras med metoder i linje med laboratoriestudierna, med särskilt fokus på:

- Förekomst och omfattning av fuktinträning i träsubstratet
- Tillstånd hos silikonmaterialet och gränssnitten
- Eventuell degradering av polyeteninkapslingen
- Mekanisk integritet hos infästningssystemen

Användningen av replikat möjliggör bedömning av spridning och ökar tillförlitligheten i de observerade trenderna över tid.

Denna långtidsbaserade fältstudie förväntas ge successiv validering av laboratorieresultaten och bidra med värdefulla insikter om tätningslösningarnas beständighet och prestanda under verkliga driftförhållanden.

2.8 FTIR SPEKTROSKOPI

Kemiska förändringar som inducerats av accelererad åldring i QUV hos tätningsmaterialen utvärderades med Fouriertransform infraröd spektroskopi (FTIR). Spektra från åldrade prover jämfördes med oåldrade referenser för att identifiera förändringar i karakteristiska absorptionsband som kan kopplas till polymernedbrytning.

2.9 DYNAMISK MEKANISK ANALYS (DMA)

Dynamisk mekanisk analys (DMA) utfördes på tätningsprover efter 2016 timmar QUV exponering och på motsvarande oåldrade prover. Mätningarna genomfördes i dynamiskt läge över temperaturområdet från -100 C till $+60\text{ C}$, och lagringsmodul, förlustmodul samt $\tan\delta$ registrerades för att bedöma åldringsrelaterade förändringar i viskoelastiskt beteende.

2.10 LJUSSMIKROSKOPI

Ytans tillstånd hos tätningsmedlen undersöktes med ljusmikroskopi efter 2016 timmar QUV exponering och jämfördes med oåldrade prover. Analysen

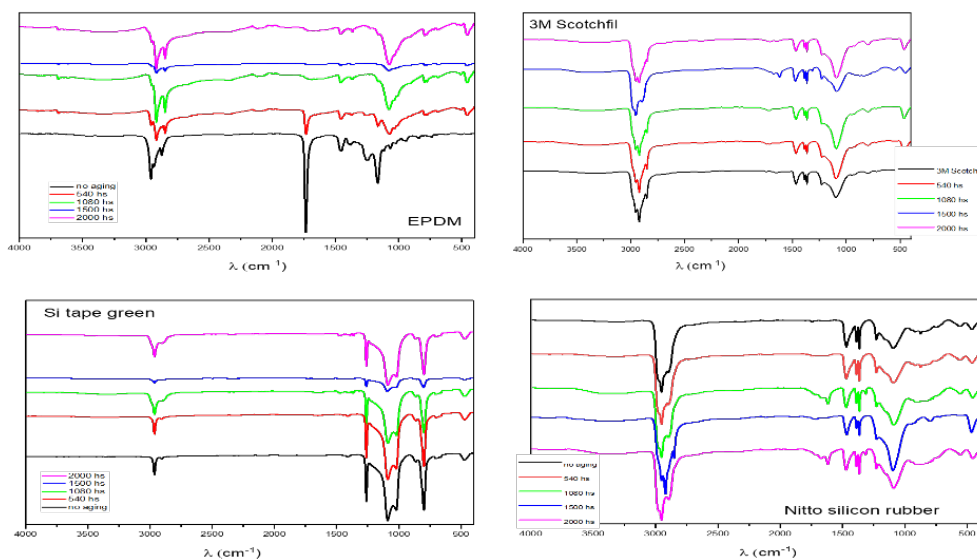
fokuserade på synlig ytnedbrytning såsom sprickbildning, missfärgning och ytuppruggning.

3 Resultat och diskussion

3.1 KEMISKA FÖRÄNDRINGAR EFTER QUV ÅLDRING (FTIR)

Figur 8 visar FTIR spektra för de undersökta tätningemedlen i oåldrat tillstånd och efter 500, 1000, 1500 och 2000 timmar QUV exponering, inklusive mellanliggande fryscykler vid -20°C . Detta illustrerar hur den kemiska strukturen utvecklas under accelererad åldring. FTIR analysen användes för att utvärdera det kemiska åldringsbeteendet hos tätningemedlen vid kombinerad UV bestrålning och frys /tö cykling.

EPDM uppvisade successiva kemiska förändringar med ökande exponeringstid. Medan spektra efter 500 timmar låg nära den oåldrade referensen blev gradvisa intensitetsförändringar tydliga vid längre exponeringstider, särskilt i områden kopplade till oxidativ nedbrytning. Efter 2000 timmar var dessa förändringar mest uttalade, vilket indikerar ackumulerad foto oxidativ åldring.



Figur 8 FTIR spektra för de undersökta tätningemedlen före och efter QUV åldring, inklusive frys /tö cykler.

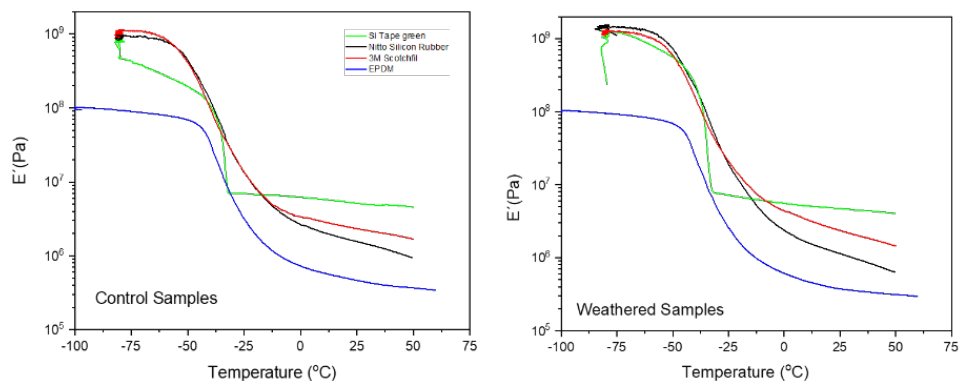
3M Scotchfil uppvisade en liknande trend, men med en mer måttlig spektral utveckling. Små förändringar i toppintensiteter framträdde efter 1000 timmar och ökade något vid fortsatt exponering, vilket tyder på gradvis kemisk åldring utan drastiska strukturella förändringar.

Silikonbaserade material (grön silikontejp och Nitto silikongummi) uppvisade däremot hög kemisk stabilitet under hela åldringsperioden. De karakteristiska absorptionsbanden för siloxan (Si–O–Si) och Si–CH₃ var stabila upp till 2000 timmar, med endast mindre intensitetsvariationer och utan tydliga tecken på bildning av degraderingsrelaterade funktionella grupper.

Sammantaget visar FTIR resultaten att kolvätebaserade tätningsmedel (EPDM och Scotchfil) är mer mottagliga för kemisk åldring under kombinerade QUV och frys /tö förhållanden, medan silikonbaserade tätningsmedel uppvisar bättre kemisk beständighet. Dessa resultat stödjer lämpligheten hos silikonmaterial för långvariga utomhusapplikationer och ger en kemisk grund för tolkning av efterföljande DMA och systemnivåresultat.

3.2 TERMOMEKANISKT BETEENDE HOS QUV ÅLDRADE TÄTNINGSMEDEL (DMA)

Dynamisk mekanisk analys utfördes på oåldrade tätningsmedel och på prover som åldrats i 2000 timmar under QUV exponering, inklusive mellanliggande frys /tö perioder, för att bedöma åldringsrelaterade förändringar i termomekaniskt beteende med relevans för vidhäftning och tätnings säkerhet. Endast resultaten för lagringsmodul (E') presenteras och diskuteras här, eftersom E' direkt återspeglar styvhet och mekanisk stabilitet vid mekanisk och termisk belastning som är relevant för användning. Förlustmodul (E'') och $\tan \delta$ uppmättes men redovisas inte.



Figur 9 Temperaturberoende lagringsmodul (E') för oåldrade tätningsmedel och efter 2000 timmar QUV åldring

EPDM uppvisade en märkbar minskning av lagringsmodulen och en förskjutning i övergångsområdet efter åldring, vilket indikerar ökad kedjerörlighet och minskad styvhet. Sådana förändringar kan påverka dimensionsstabilitet och vidhäftning vid skruv-trä och PE gränssnitt, vilket ökar risken för förlorad tätningsintegritet vid termisk cykling.

3M Scotchfil visade mer måttliga förändringar, med en lätt mjukgöring efter åldring men utan någon tydlig förskjutning i övergångsbeteende. Även om detta

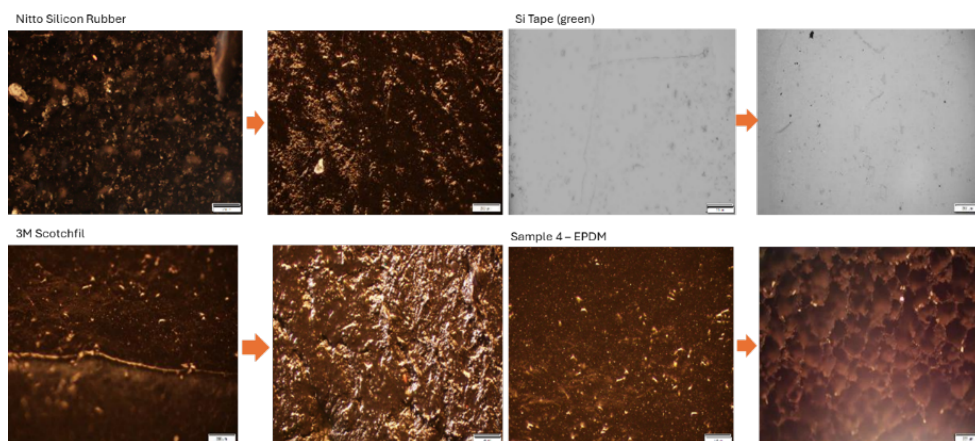
tyder på relativt stabilt mekaniskt beteende kan en gradvis minskning av styvheten ändå påverka långsiktig motståndskraft mot rörelser vid den tätade genomföringen.

I kontrast uppvisade silikonbaserade tätningsmedel (grön silikontejp och Nitto silikongummi) minimala förändringar i lagringsmodul efter 2000 timmar åldring. Bibehållen styvhet och övergångsbeteende indikerar stabil viskoelastisk prestanda, vilket stödjer varaktig vidhäftning och effektiv tätning under cykliska termiska och miljömässiga påkänningar.

Sammantaget bekräftar DMA-resultaten FTIR-fynden och visar att kolvätebaserade tätningsmedel är mer mottagliga för åldringsinducerade mekaniska förändringar som kan äventyra tätningens tillförlitlighet, medan silikonbaserade tätningsmedel bibehåller ett stabilt mekaniskt beteende och är bättre lämpade för långsiktiga utomhusapplikationer för tätning.

3.3 YTMORFOLOGISKA FÖRÄNDRINGAR EFTER QUV-ÅLDRING (LJUSMIKROSKOPI)

Ljuskopiering visade tydliga skillnader i ytstabilitet mellan de undersökta tätningsmedlen före och efter QUV-åldring. Silikonbaserade tätningsmedel (Nitto silikongummi och grön silikontejp) uppvisade minimala ytändringar efter åldring och bibehöll släta och kontinuerliga ytor utan synlig sprickbildning. I kontrast uppvisade kolvätebaserade tätningsmedel (EPDM och 3M Scotchfil) uttalad ytruggning och oregelbundna, degraderade morfologier efter exponering, vilket indikerar ytlig försprödning. Dessa observationer stödjer FTIR- och DMA-resultaten och indikerar att ytdegradering hos EPDM och Scotchfil kan påverka vidhäftning och långsiktig tätningstillförlitlighet negativt, medan silikonbaserade material bibehåller sin ytintegritet under accelererade åldringsförhållanden.



Figur 10 Ljuskopiering av tätningsmedelsytor före QUV-exponering och efter 2000 timmar QUV-åldring, som visar åldringsinducerade ytändringar i kolvätebaserade material och minimala förändringar i silikonbaserade material.

3.4 ÅLDNING I VÄDEROMETER OCH PRESTANDA AVSEENDE FUKTINTRÄNGNING

Åldring i väderometer användes för att utvärdera den systemövergripande hållbarheten hos tätade genomföringar i fullt PE-inkapslade träprover under kombinerade miljöbelastningar, inklusive ljusexponering, fukt, temperaturvariationer och frys-/töcykling. Tätningsprestandan bedömdes efter åldring med hjälp av en infärgningsbaserad metod för fuktinträngning, vilket möjliggjorde direkt visuell utvärdering av vätskeinträngning i träsubstratet intill genomföringen.

Motivering för val av tätningskombinationer

De tätningskombinationer som valdes för testning i väderometer baserades på resultaten från QUV-åldringsanalyserna (FTIR, DMA och ljusmikroskopi), tillsammans med praktiska överväganden avseende tätningsmedlens fysiska form, hanterbarhet och vidhäftning mot polyeten (PE). Endast tätningsmedel som uppvisade tillräcklig åldringsbeständighet och lämplighet för applicering vid aktuellt gränssnitt inkluderades. De utvärderade materialen omfattade silikonbaserade tätningsmedel (silikontejp och silikongummi), EPDM, 3M Scotchfil och TEC 7.

Tätningsmedlen tilldelades specifika applikationspositioner baserat på deras avsedda funktion:

- Skruv-trä-gränssnitt: EPDM, TEC 7, silikongummi (Nitto) och 3M Scotchfil
- PE-skruvhuvud-gränssnitt: silikontejp (grön), silikongummi (Nitto) och 3M Scotchfil

EPDM och TEC 7 användes därmed endast vid skruv-trä-gränssnittet, medan silikontejp uteslutande användes vid ytgränssnittet. Detta resulterade i tolv två-tätningsmedelskonfigurationer, kompletterade med utvalda enkel-tätningsmedelskonfigurationer.

Resultat från väderometeråldring och beteende avseende fuktinträngning

Utvärdering av de tvärsnittade proverna efter väderometeråldring och infärgning visade en tydlig differentiering i tätningseffektivitet mellan tätningskombinationerna.

De tre bäst presterande konfigurationerna, som effektivt förhindrade infärgning av träsubstratet, var:

- Silikongummi (Nitto) runt skruven och silikongummi (Nitto) vid PE-gränssnittet
- TEC 7 runt skruven i kombination med grön silikontejp vid PE-gränssnittet
- Silikongummi (Nitto) som enkel-tätningsmedelskonfiguration runt skruven

Dessa konfigurationer uppvisade ingen synlig infärgning i träet, vilket indikerar effektiv tätning av genomföringen och minimal fukttransport längs fästelementet eller genom PE-skruvhuvud-gränssnittet. Resultaten överensstämmer med den

höga kemiska stabiliteten (FTIR), det bibehållna mekaniska beteendet (DMA) samt den intakta ytmorfologi som observerats för silikonbaserade material.

En andra grupp av konfigurationer uppvisade acceptabel men reducerad prestanda, med begränsad eller lokal infärgning i närheten av genomföringen:

- Silikongummi (Nitto) runt skruven i kombination med 3M Scotchfil vid PE-gränssnittet
- 3M Scotchfil runt skruven i kombination med silikongummi (Nitto) vid PE-gränssnittet
- 3M Scotchfil använt vid både skruv-trä- och PE-skruvhuvud-gränssnitten

Även om dessa konfigurationer fortfarande gav viss tätning indikerar den observerade infärgningen en högre känslighet för fuktinträning, sannolikt till följd av partiell nedbrytning eller reducerad vidhäftning hos kolvätebaserade tätningsmedel under långvarig miljöexponering.

Sammantaget bekräftar resultaten att silikonbaserade material spelar en avgörande roll för att uppnå en robust fuktbarriär, särskilt när de används vid PE-skruvhuvud-gränssnittet. Resultaten visar även att en två-tätningsmedelsstrategi generellt ger högre tillförlitlighet än lösningar med ett enda tätningsmedel, även om väl fungerande enkel-tätningsmedelskonfigurationer baserade på silikongummi fortfarande kan ge tillfredsställande skydd.

4 Slutsatser

Sammantaget visar resultaten från väderometeråldring och infärgningsmetoden att tätningsmedlets kemi, applikationsposition och kombinationsstrategi har ett direkt inflytande på motståndet mot fuktinträngning. Tätningskombinationer baserade på silikonmaterial – med särskild betoning på effektiv yttätning vid PE-gränssnittet – erbjuder den högsta skyddsnivån och är därför bäst lämpade för långsiktig tätning av borrade genomföringar i PE-inkapslade trästolpar. Dessa konfigurationer har tydlig potential att minska risken för fuktinträngning och möjliggöra längre underhållsintervall.

5 Rekommendationer för tillgångsförvaltning och installationspraxis

Baserat på resultaten från QUV-åldring, väderometerexponering och den efterföljande bedömningen av fuktinträngning med infärgningsmetoden föreslås följande rekommendationer för tätning av borrade genomföringar i PE-inkapslade trästolpar.

- För långsiktigt och robust fuktskydd bör tätningskonfigurationer som involverar silikonbaserade material prioriteras.
- De mest effektiva lösningarna uppnåddes genom antingen silikongummi (Nitto) både runt skruven och vid PE-skruvhuvud-gränssnittet, eller TEC 7 runt skruven i kombination med silikontejp vid PE-ytan. Dessa konfigurationer förhindrade konsekvent fuktinträngning i träsubstratet efter accelererad åldring och medför därmed lägst underhållsrisik.
- En tvåzons-tätningstrategi rekommenderas starkt för kritiska installationer. Tätning av både skruv-trä-gränssnittet och PE-skruvhuvud-gränssnittet förbättrar motståndet mot fukttransport avsevärt jämfört med enkel-tätning med lösningar, särskilt under cyklisk miljöexponering. Silikonbaserade tätningsmedel vid PE-ytan är särskilt viktiga, eftersom degradering vid detta gränssnitt identifierades som en central väg för fuktinträngning.
- Enkel-tätning med lösningar baserade på silikongummi runt skruven kan ge acceptabelt skydd i applikationer med lägre risk, men erbjuder reducerad redundans jämfört med tvåzons-tätning och bör användas med försiktighet där lång livslängd krävs.
- Tätningskonfigurationer som huvudsakligen bygger på kolvätebaserade material (såsom EPDM eller 3M Scotchfil), särskilt när de används utan silikonbaserad yttätning, visade känslighet för åldring och fuktinträngning och rekommenderas därför inte för långsiktig tätning av PE-inkapslade stolpar.

Ur ett tillgångsförvaltningsperspektiv förväntas införandet av silikonbaserade tvåzons-tätninglösningar minska fuktrelaterad nedbrytning av trästolpar, möjliggöra längre underhållsintervall och förbättra distributionsinfrastrukturens långsiktiga tillförlitlighet.

BEDÖMNING AV TÄTNINGSMEDELS LIVSMEDELS LIVSLÄNGD I OLIKA ELINSTALLATIONER

Borrade genomföringar i polyeten (PE)-inkapslade trästolpar är nödvändiga vid installation men utgör en kritisk väg för fuktinträning, vilket kan leda till accelererad nedbrytning och förkortad teknisk livslängd. Även om PE-inkapslade stolpar ännu inte är i bred praktisk användning inom eldistributionsnät, finns en betydande potential för förbättrad beständighet och skydd jämfört med konventionella lösningar.

Denna studie ger en omfattande utvärdering av tätningsstrategier för sådana system och kombinerar laboratorietester i mindre skala, systemnivåvalidering samt initiering av fältexponering under verkliga miljöförhållanden. Resultaten visar att silikonbaserade tätningsmaterial ger överlägsen motståndskraft mot miljöåldring och upprätthåller tillförlitlig tätningsprestanda över tid.

Resultaten visar också att både materialval och appliceringsmetod är avgörande. Särskilt en tvåzons-tätning – där både gränssnittet mellan skruv och trä samt gränssnittet mot PE-ytan tätas – ger det mest effektiva skyddet mot fuktinträning. En långtidsbaserad fältstudie har initierats för att möjliggöra framtida validering och stödja praktisk implementering. Resultaten från denna studie utgör en solid teknisk grund för vidare utveckling och potentiell användning av PE-inkapslade stolpsystem, vilket kan bidra till förlängd livslängd, minskat underhållsbehov och ökad tillförlitlighet i eldistributionsinfrastrukturen.

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.