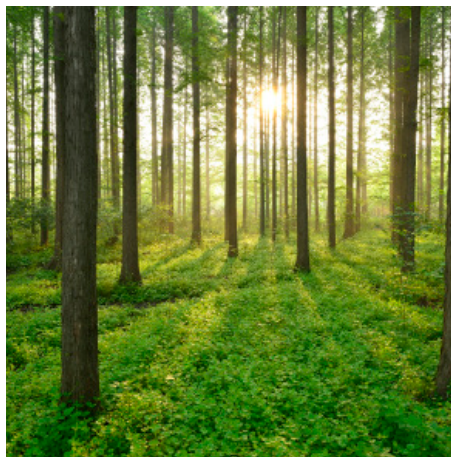


PD-AKTIVITET I NYARE NÄTSTATIONER, 10 KV

RAPPORT 2026:1201



UNDERHÅLL AV ELNÄT



PD-aktivitet i nyare nätstationer, 10 kV

En empirisk analys av tillståndet i svenska nätstationer,
10 kV

TOMAS JOHANSSON ET AL

ISBN 978-91-89917-44-6 | © Energiforsk augusti 2026

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

Förord

Projektet *Studie av orsaker till Pd-aktivitet i nyare nätstationer, 10 kV* ingår i programmet *Underhåll av elnät* och avser skapa förståelse för hur omfattande problemet med PD-aktivitet i 10 kV nätstationer är samt analysera gemensamma nämnare och grundorsaker för stationer som uppvisar PD-aktivitet.

Då >80% av nätstationerna i svenska elnätet utgörs av 10 kV är det kritiskt att kartlägga om problemet är lika allvarligt för 10kV stationer som för 20 kV. Projektets PL har varit Tomas Johansson från Svensk Linjebesiktning.

Stort tack till programstyrelsen för deras engagemang i projektet:

- Mohammed Abudaher, Mölndal Energi Nät
- Homan Aldén, Energiföretagen Sv. (adj)
- Fredrik Andersson, Elinorr Ek. förening
- Joakim Andersson, Ystad Energi
- Jon Danielsson, Skellefteå Kraft Elnät
- Jimmy Glimdal/Martin Eriksson, Öresundskraft
- Johan Gustafsson/Johan Roos, Göteborg Energi Nät
- David Håkansson, Borås Elnät
- Jan Olof Jonsson, Jämtkraft Elnät (vice ordf)
- 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; Michael Eriksson (SLB), Christer Gruber (Energiföretagen), Peter Ipsen (EON), Urban Persson (Jämtkraft), Kenneth Stefansson (Vattenfall Eldistribution), Patrik Forsberg (ELLEVIO), Homan Aldén (Energiföretagen), Tommie Lindquist (RISE) och Krzysztof Lukaszewicz (Kraftringen).

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

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

Stockholm i februari 2026

Susanne Stjernfeldt

Energiforsk AB

Forskningsområde Elnät, Vindkraft och Solel

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

Sammanfattning

Studien visar att PD-aktivitet (partiella urladdningar) är ett omfattande, allvarligt och akut problem i svenska 10 kV-nätstationer. Baserat på inspektioner av cirka 1 700 stationer (ca 1 % av beståndet) konstateras att minst 10 % av alla 10 kV-stationer är PD-drabbade, vilket motsvarar 15 000–20 000 stationer nationellt. I många fall leder PD-aktiviteten till kraftigt förkortad teknisk och ekonomisk livslängd, ibland till haveri redan efter 10–15 år istället för förväntade 40 år.

Den dominerande grundorsaken till PD-aktivitet är ändavslut på mellanspänningssidan (ca 60 % av fallen), följt av frånskiljare (31 %) och isolatorer (8 %). Resultaten indikerar att problem ofta uppstår till följd av brister i installation, design eller materialval, särskilt i stationer byggda från cirka 2005 och framåt. Nyare stationer verkar initialt fria från PD, vilket tyder på att det kan ta 5–7 år innan PD-aktivitet blir detekterbar i 10 kV-stationer.

Geografiska skillnader är mycket stora. Norra Sverige och Stockholm uppvisar låg förekomst (0–5 %), medan delar av södra Sverige – särskilt Västra Götaland – har mycket hög andel PD-drabbade stationer (upp till 40 %). Även fabrikatsskillnader förekommer, där vissa tillverkare uppvisar betydligt högre felfrekvens än andra.

En avgörande faktor för både uppkomst och detektion av PD-aktivitet är relativ luftfuktighet. Hög luftfuktighet ökar PD-aktiviteten kraftigt, och vid låg luftfuktighet kan PD tillfälligt avstanna, vilket innebär stor risk att stationer felaktigt bedöms som felfria. Därför rekommenderas att PD-besiktning inte utförs vid relativ luftfuktighet under 75–80 %.

PD-aktivitet orsakar accelererad nedbrytning av polymerer och metaller genom UV-strålning, ozon och sura kemiska processer. Detta bekräftas både empiriskt och genom laboratorieanalyser (bl.a. elektronmikroskopi), som visar mikrosprickor och förlorad isolationsförmåga i drabbade material.

Sammanfattningsvis konstaterar studien att:

Problemet med PD-aktivitet i 10 kV-nätstationer är utbrett, kostsamt och säkerhetskritiskt

Tidig identifiering är avgörande, eftersom skador och kostnader ökar exponentiellt över tid

Det finns ett akut behov av att lokalisera drabbade stationer, definiera åtgärder, ta fram en kostnadseffektiv besiktningsstrategi och genomföra konsekvens- och kostnadsanalyser

Nästa nödvändiga steg är att gå från kartläggning till konkreta åtgärds- och investeringsplaner för att minska livslängdsförluster, säkerhetsrisker och samhällskostnader.

Nyckelord

Koronabesiktning, PD-aktivitet, nätstationer, proaktivt underhåll, ändavslut

Summary

This study demonstrates that partial discharge (PD) activity is a widespread, serious, and urgent problem in Swedish 10 kV distribution substations. Based on inspections of approximately 1,700 substations (about 1% of the national 10 kV population), the results show that at least 10% of all 10 kV substations are affected by PD activity, corresponding to an estimated 15,000–20,000 defective substations nationwide. In many cases, PD activity leads to a dramatically shortened technical and economic lifetime, with failures occurring after 10–15 years instead of the expected 40 years.

The primary source of PD activity is the cable terminations, which account for about 60% of PD-affected substations, followed by disconnectors (31%) and insulators (8%). The findings indicate that PD is often caused by installation-related issues, design limitations, or material choices, particularly in substations built from around 2005 onwards. Newer substations appear initially free from PD, suggesting that it typically takes 5–7 years before PD activity becomes detectable in 10 kV installations.

Geographical differences are significant. Northern Sweden and the Stockholm region show low PD occurrence (0–5%), while southern regions—most notably Västra Götaland—exhibit very high levels, with up to 40% of substations affected. Differences between manufacturers are also evident, with some brands showing significantly higher PD frequency than others.

Relative humidity is identified as a critical factor influencing both the occurrence and detectability of PD activity. High humidity significantly increases PD activity, while low humidity may temporarily suppress it, creating a substantial risk of false “healthy” assessments. Consequently, the study recommends that PD inspections should not be performed at relative humidity levels below 75–80%.

PD activity causes accelerated degradation of both polymers and metals through UV radiation, ozone formation, and acidic chemical processes. These mechanisms are confirmed through empirical field data and laboratory analyses, including scanning electron microscopy, which reveal microcracking and loss of insulating properties in affected materials.

In conclusion, the study finds that:

PD activity in 10 kV substations is common, costly, and safety-critical

Early detection is essential, as damage and remediation costs increase exponentially over time

There is an urgent need to identify affected substations, define effective mitigation measures, develop a cost-optimized inspection strategy, and perform comprehensive cost and consequence analyses

The next critical step is to move from mapping and analysis to concrete action plans that reduce asset value loss, safety risks, and impacts on electricity supply reliability.

Innehåll

1	Bakgrund	11
2	Mål & Syfte	16
3	Avgränsningar	17
4	Metod	18
5	Resultat	21
6	Likheter och skillnader ur ett PD-perspektiv mellan 10 kV och 20 kV	26
7	Fallstudie, 20 kV	28
8	Teoretisk fördjupning, 10 & 20 kV	31
9	Elektronmikroskop, KTH, 10 & 20 kV	36
10	Diskussion	37
11	Slutsatser	39

1 Bakgrund

Svensk Linjebesiktning har tillsammans med svenska elnätsägare PD-besiktigat ca 10 000 nätstationer. Genom denna besiktning har värdefulla statistiska data samlats in som indikerar stora problem med PD-aktivitet i svenska nätstationer. PD-aktiviteten leder till haveri i stationerna långt innan ekonomisk livslängd uppnåts. Potentiellt har svenska elnätsägare därmed en mycket stor och oförutsedd underhållsskuld som behöver undersökas för att åtgärder ska kunna sättas in med en timing som minimerar totalkostnaden av dessa inbyggda fel. 2024 utfördes en studie i syfte att kartlägga i vilken utsträckning PD-aktivitet förekommer i populationen av 20 kV stationer. Resultatet visar att PD-aktivitet är mycket vanligt. Då majoriteten, ca 85%, av Sveriges nätstationer är 10 kV syftar denna studie till att kartlägga situationen i populationen för 10 kV stationer.

I svenska elnätet finns nästan 200 000 nätstationer. Det finns mycket starka indikationer på att många av dessa, potentiellt upp till 50 000 stationer, pga. av fel i design, montage eller materialval kommer att drabbas av funktionsfel i framtid. Detta då PD-aktivitet, partiella urladdningar, pågår vilket kan leda till att teknisk och ekonomisk livslängd blir signifikant reducerad. Svensk Linjebesiktning utfört omfattande statuskontroller av svenska nätstationer. Projektet syftar till en kartläggning av status i nätet och därmed identifiera grundorsakerna till problemet. Denna kartläggning kommer att möjliggöra korrigerande åtgärder och följaktligen mkt stora kostnadsbesparingar för Sveriges nätägare.

Svensk Linjebesiktning (SLB) har under de senaste åren tillsammans med ett begränsat antal nätägare svenska nätägare arbetat för att skapa en metod att proaktivt identifiera de defekter som leder till markant minskad ekonomisk och teknisk livslängd av nätstationer, och ofta även avbrott och försämrad servicenivå till nätägarnas kunder. Arbetet har resulterat i att man idag vet att det ofta är PD-aktivitet i stationerna som är grundorsaken till nedbrytning av både polymerer och metaller i stationen. Man vet att PD-aktiviteten skapar UV-ljus som bryter ner plaster, men också ger upphov till kemiska processer som leder till ozon och salpetersyrighet som mkt snabbt oxiderar metaller i hela stationen. Man vet att tidiga symtom inte kan upptäckas med mänskliga sinnen, utan att rätt teknik är nyckeln till att proaktivt identifiera PD-aktivitet tidigt. Man vet att PD-aktiviteten inte självläker. Man vet att skadorna på stationen ökar exponentiellt med tiden, och därmed också kostnaderna för åtgärder.

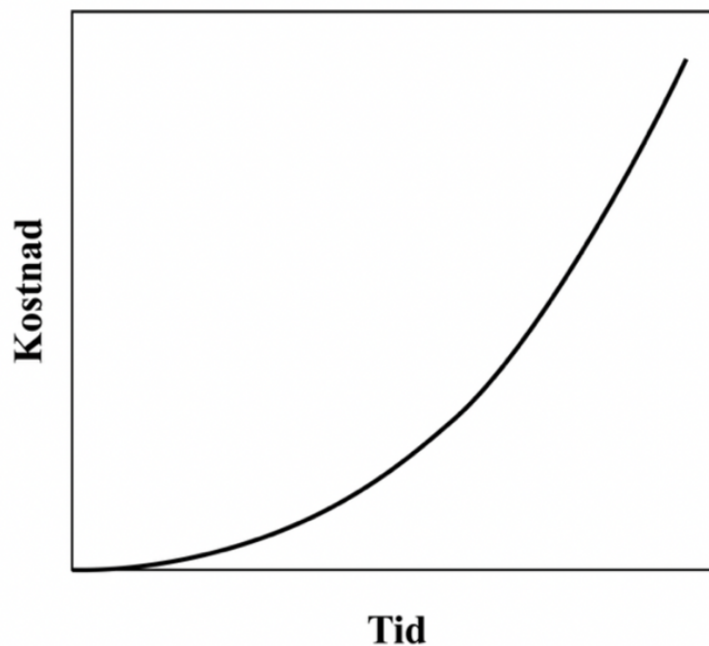


Bild 1. Exponentiell ökning av åtgärdskostnader ju längre man väntar med detektering respektive åtgärd

Baserat på inspektion av ca 10 000 stationer hos framförallt EON, Vattenfall och Kraftringen ser vi indikationer på att PD-aktiviteten kan ha ursprung i flertalet komponenter samt att komponenten som oftast uppvisar PD-aktivitet är ändavsluten på mellanspänningssidan.

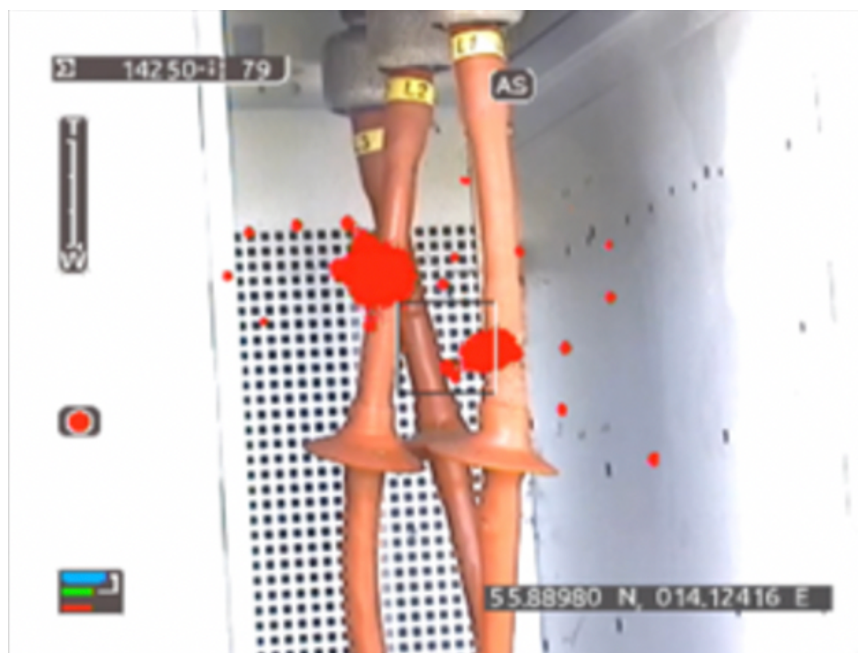


Bild 2. Den komponent som uppvisar allvarligast fel är ändavslut

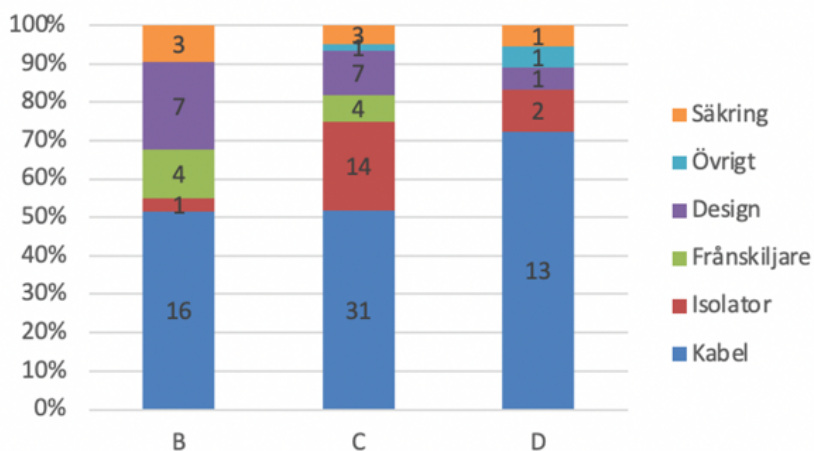


Bild 3. Vanligast att PD-aktivitet i nätstationer förekommer i ändavslut MSP

Det finns inga tecken på att PD-aktivitet självläker. Istället tyder erfarenheten på att konsekvenserna blir successivt större med tiden. Därför blir det viktigt att klassificera aktuell status på ett strukturerat sätt. Svensk Linjebesiktning har valt att kategorisera allvarlighetsgraden enligt EPRI's modell (Electric Power Research Institute) som kategoriserar enligt skalan A, B, C, D. Enligt skalan är A ofarlig PD-aktivitet, eller ingen PD-aktivitet alls. I kategori B landar stationer som uppvisar PD-aktivitet men där det ännu inte finns synliga symtom i stationen. I stationer som kategoriseras som C detekteras PD-aktivitet och konsekvenserna är redan synliga för mänskliga ögat som t ex oxidation på metaller eller färgskiftning av polymerer på drabbade komponenter. Stationer i kategori C bör åtgärdas av nätägaren inom ca 6–12 månader för att säkerställa servicegrad till slutkund samt personsäkerhet. Kategori D har precis som kategori C synliga defekter pga. korona. Men skillnaden är att här bedöms korrigerande åtgärder mera akut, inom 3 månader, för att säkerställa servicegrad och personsäkerhet. SLB har utvecklat EPRI's modell för att passa in på applikationen PD-aktivitet i nätstationer ytterligare genom två justeringar. Dels finns kategori Ci, C intermittent, som används för stationer där de synliga symtomen som är typiska för kategori C redan är synliga i stationen, men av olika anledningar så pågår inte detekterbar PD-aktivitet vid besiktningstillfället. Orsaken till att en pågående PD-aktivitet inte är detekterbar vid besiktningstillfället verkar primärt vara låg luftfuktighet i stationen vid besiktningstillfället som gör att PD-aktiviteten temporärt avstannar. Dels har en kategori som heter D+ adderats. Detta är en kategori där status på stationen är så pass dålig att besiktningspersonalen rapporterar till driften direkt för omedelbar nedstängning av stationen. Man har sett omfattande problem på både 10 kV stationer och 20 kV, och indikationer på att problemen är vanligare på 20 kV än 10 kV:

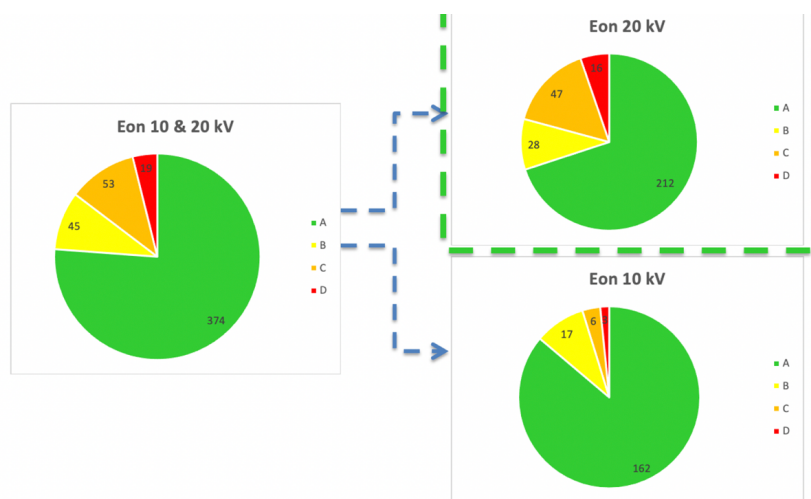


Bild 4. Ca 25% av nätstationerna är drabbade av PD-aktivitet. 20 kV verkar drabbas i högre utsträckning än 10 kV

Tidiga tendenser på att problematiken är större på 20 kV stationer än 10 kV så har gjort att besiktningen historiskt prioriterats på 20 kV. Detta ska inte tolkas som att 10 kV stationer är under kontroll. Snarare att kunskapen om 10 kV stationer varit sämre då det finns betydligt mindre ingångsdata, samt att teorin indikerar att nedbrytningsprocessen går långsammare i stationer med lägre spänning. Det kan alltså vara så att även 10 kV stationer har samma inbyggda problematik som 20 kV stationer men att det inte syns ännu. Ytterligare en mkt intressant, och oroväckande, indikation är att nyare stationer (upp till

ca 15 år) verkar ha mkt större felfrekvens än gamla stationer (äldre än 15 år). Det verkar som att design, montage eller materialval blivit sämre ur perspektivet PD-aktivitet, och därmed förkortad teknisk livslängd. Bild 5 nedan visar tydligt att stationer från ca 2005 och framåt uppvisar en oroväckande trend för kvaliteten i svenska nätstationer, framförallt i kombination med att uppskattningsvis 70% av samtliga nätstationer i Sverige byggts under senaste 15–20 åren.

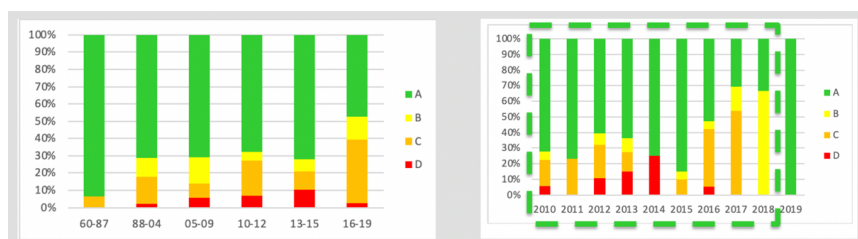


Bild 5. I diagrammet till vänster klustras årsmodeller i intervall för att ge en bild över utvecklingen över tid. I diagrammet till höger visas felfrekvensen per årsmodell 2010–2019

Det finns inga tydliga tendenser till förbättring i design, montage eller materialval. Snarare indikationer på försämring. Samtidigt som att detta är oroande erbjuder

det också en möjlighet att felsöka och förstå vad som gått fel och därmed förbättra processer så att vi bygger fler friska stationer. Detta bör vara prioritet nummer ett. Prioritet två bör vara att detektera ”sjuka” stationer i nätet och därefter strukturerat och kostnadseffektivt åtgärda dem. Det finns alltså en bild av utgångsläget hos ett begränsat antal nätägare som också är begränsat till ett antal geografier. Det finns också en metod, teknik och process för att besiktiga nätstationer och med mycket hög träffsäkerhet kartlägga PD-aktivitet. Då kostnaderna för dessa inbyggda fel är mycket omfattande finns nu ett behov att bygga ytterligare kunskap inom nedanstående områden:

- Är bilden ovan representativ för flertalet nätägare och geografier?
- Vad är grundorsaken till att felen uppstår? Hur kan de undvikas?
- När PD-aktivitet uppstått, hur snart behöver den identifieras, hur snart behöver den åtgärdas, vilka åtgärder krävs?
- Baserat på frågorna ovan hur stor ekonomisk fördel finns i att tidigt identifiera och åtgärda jämfört med att vänta in haveri eller avbrott?
- Vilken besiktningsstrategi är optimal ur ett ekonomiskt perspektiv?

2 Mål & Syfte

Syftet med projektet är att göra en mappning av tillståndet i 10 kV nätstationer i Sverige m avseende på PD-aktivitet och därigenom komplettera den kunskap man byggt upp för 20 kV stationer. Det är kritiskt att skapa en god förståelse för hur vanligt förekommande problemet är, vilka komponenter som är drabbade samt vilka faktorer som påverkar PD-aktiviteten. Genom kartläggning av problemet och bidragande faktorer möjliggörs prioritering av framtida forskningsinsatser för att åtgärda problemet med PD-aktivitet i nätstationer.

Mål 1: Att skapa ytterligare förståelse för hur omfattande problemet med PD-aktivitet i 10 kV nätstationer är samt analysera gemensamma nämnare för stationer som uppvisar PD-aktivitet jämfört med de som inte gör det.

Mål 2: Kartlägga vilka komponenter som vanligtvis drabbas av PD-aktivitet i 10 kV stationer.

Mål 3: Kartlägga grundorsakerna till varför PD-aktiviteten uppstår i 10 kV nätstationer för att i framtiden kunna förebygga problemet.

Mål 4: Definiera vilka faktorer som påverkar hur snabbt PD-aktiviteten förstör nätstationen.

Mål 5: Definiera kort- och långsiktiga tekniska och arbetsmiljömässiga konsekvenser av PD-aktivitet.

3 Avgränsningar

Projektet syftar primärt till att kartlägga hur omfattande problemet med PD-aktivitet i svenska 10 kV nätstationer är samt skapa förståelse för vilka komponenter som huvudsakligen ger upphov till partiella urladdningar. Vi försöker också definiera vilka parametrar som bidrar till PD-aktivitet i de drabbade komponenterna. Projektet syftar alltså inte till att undersöka hur problemet hanteras, förebyggs, åtgärdas eller elimineras. Detta blir lämpligtvis ett uppföljningsprojekt när problemets omfattning är kartlagt.

Följande avgränsningar har definierats:

1. Projektet adresserar inte hur komponenter/stationer som uppvisar PD-aktivitet bör åtgärdas
2. Projektet syftar inte till att ta fram en optimal besiktningstrategi
3. Projektet syftar inte till att kvantifiera de ekonomiska konsekvenserna av PD-aktivitet i nätstationer
4. Projektet baseras på data som inhämtas genom statusbedömningar av nätstationer utförda med koronasensor, primärt hos nätägare som bidrar finansiellt till att möjliggöra datainhämtning i fält.

4 Metod

Metoden för att uppnå målen med projektet är analys av besiktningsdata från utförda status kontroller av tusentals nätstationer. Under 2025 kompletteras existerande data med inhämtning av data från ytterligare ett tusental stationer. Endast stationer som besiktigats med koronasensor kommer att vara del av det statistiska underlaget då ingen annan metod visat sig vara tillförlitlig.

Svensk Linjebesiktning har under 2022–2024 utvärderat besiktningstekniker för att identifiera PD-aktivitet i nätstationer. Mjukvara för att samla in och dokumentera besiktningsdata har utvecklats. Metod för att utvärdera allvarlighetsgraden av PD-aktiviteten har utvecklats och optimerats. All data har samlats i en databas vilket möjliggör analys av hur omfattande problemet är i Sverige samt analys av gemensamma nämnare hos stationer som drabbats av PD-aktivitet. Genom att identifiera gemensamma nämnare hos PD-drabbade stationer respektive PD-fria stationer möjliggörs en empirisk översikt av parametrar som ökar risken för PD-aktivitet.

Tekniken som valts ut för att statusbestämma PD-aktiviteten är en koronasensor från sydafrikanska UVIRCO. Tekniken fungerar optiskt genom att sensorn registrerar det UV-ljus (UVC) som uppstår vid PD-aktivitet. Detta ljus kallas korona vilket är anledning till att kameran kallas koronasensor. Sensorn är mycket dyr då optiken är avancerad. UVC är ett ljus med kort våglängd som ligger utanför våglängderna för synligt ljus. För att identifiera UV-ljuset måste först allt synligt ljus filtreras bort utan att UVC strålarna också filtreras bort. Tekniken är mycket tillförlitlig men kräver ändå välutbildad personal så att resultatet blir tillförlitligt. Svensk Linjebesiktning har valt att utbilda all besiktningspersonal enligt EPRIs riktlinjer (Electric Power Research Institute).

Övriga tekniker som utvärderats är ett akustiskt mätverktyg från NL Acoustics, ett akustiskt mätverktyg som heter Ultra TEV Plus 2, en ozonmätare som heter OZ-ONE samt termografering.

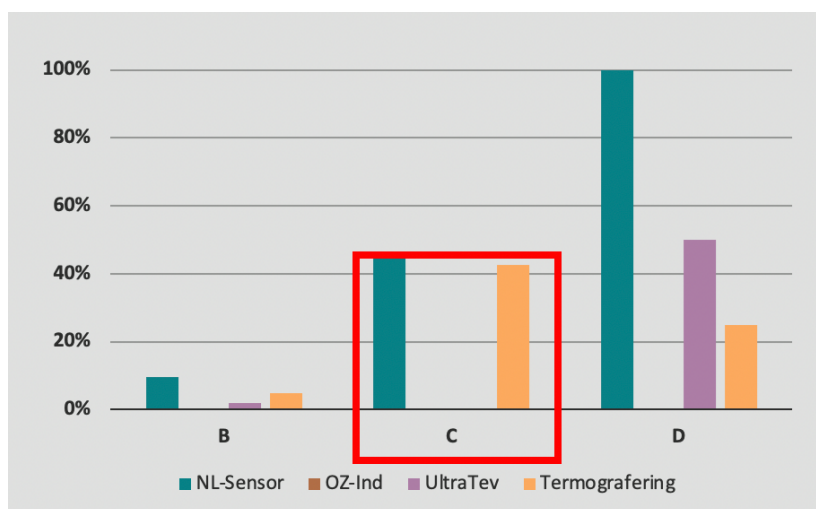


Bild 6. Bilden visar jämförelse mellan olika teknikers förmåga att identifiera PD-aktivitet per allvarlighetsgrad B, C och D

I diagrammet ovan definieras 100% av det antal PD-aktiviteter som identifierades med koronasensorn. Totalt sett är den teknik som är näst bäst den akustiska mätinstrumentet från NL Acoustics. Den missar totalt ca 80% av all PD-aktivitet i nätstationerna medan övriga tekniker presterar ännu sämre. Därav har vi i projektet valt att arbeta endast med statistik från stationer som besiktigats med koronasensor.

Allvarlighetsgraden bedöms genom en process som är baserad på EPRIs (Electric Power Research Institute) modell för koronainspektion för utomhuskomponenter. Processen har vidareutvecklats av Svensk Linjebesiktning för att vara optimalt tillämpbar på inomhusmiljöer, t ex nätstationer. Allvarlighetsgraden definieras för nätstationer enligt nedan:

A: Ingen PD-aktivitet

B: PD-aktivitet detekteras med koronasensorn, men ännu inga defekter som är synliga med mänskliga ögat (ex färgskiftning av polymerer eller oxidation på metaller). Planera för underhåll.

C: PD-aktivitet detekteras med koronasensorn. Dessutom har processen pågått så pass länge och intensivt att det syns defekter som färgskiftning av polymerer och/eller oxidation av metaller. Åtgärd bedöms nödvändig inom 12 månader.

Ci: Vid besiktningstillfället syns ingen PD-aktivitet, troligtvis pga låg relativ luftfuktighet. Dock syns tydliga spår av PD-aktivitet, t ex oxidation av metaller eller färgskiftning på polymerer. Det pågår alltså PD-aktivitet under vissa förhållanden men inte just när luftfuktigheten i utomhusluften är låg och inomhusluftfuktigheten vädras ut då stationen öppnas vid besiktningstillfället.

D: Samma som C men åtgärd bedöms nödvändig inom 3 månader.

D+: Samma som D men besiktningspersonalen bedömer läget mkt akut och kontakta driften för omedelbar åtgärd.

Utöver resultatet från koronasensorn och allvarlighetsgraden A till D+ registreras ett stort antal parametrar för att möjliggöra analys av faktorer som potentiellt bidrar till PD-aktivitet och därmed bör analyseras närmare teoretiskt och praktiskt i framtiden. Följande parametrar registreras i appen vid besiktningstillfället:

Vind, temperatur, lufttryck, relativ luftfuktighet, kustnära, vilka fack som är drabbade av koronaaktivitet, vilka komponenter som är koronadrabbade, om det förekommer oxidation, färgskiftningar på polymerer, ozonlukt, knastrande ljud, synbar korona m fl.

Från nätägaren samlas ytterligare data in som t ex årsmodell, koordinater, fabrikat, stationsnummer, avtalsområde och spänning.

Genom att söka samband mellan ovanstående parametrar och utfall på koronabesiktningen bör vi kunna utläsa vilka faktorer som bidrar till PD-

aktivitet i nätstationer. När de väl identifierats skapas möjligheten att minimera PD-aktivitet genom att begränsa de faktorer som bidrar till den.

5 Resultat

Viktigaste insikterna i projektet presenteras här och visar på att 1) problemet med PD-aktivitet är mkt utbrett i 10 kV nätstationer där var tionde station är PD-drabbad, 2) i sex av tio PD-drabbade stationer är det ändavsluten som är källan till PD-aktiviteten, i tre av tio är det fränkskiljaren och i en av tio är det isolatorn 3) olika geografier verkar drabbade i olika utsträckning där vissa områden i södra Sverige är mycket mer drabbade än norra Sverige 4) årsmodeller mellan 2005-2018 verkar ha högst felfrekvens, korrelation mellan ålder och förekomst av PD-aktivitet är mycket stark 5) hög luftfuktighet bidrar i stor utsträckning till PD-aktivitet.

Totalt har besiktningsresultat från ca 1734 st 10kV nätstationer, besiktigade under 2024-2025 använts för analysen nedan. Detta utgör ca 1% av Sveriges alla 10 kV-nätstationer. Stationerna utgör det statistiska underlaget tillhör E.ON, GEAB/Vattenfall, Ellevio, Krafringen och Kungälv Energi. Ca 75% av underlaget kommer från E.ON vilket betyder att det finns en teoretisk risk att resultatet snarare speglar E.ONs bestånd av nätstationer än Sveriges. Det syns dock inga indikationer på att resultatet från övriga nätägare skiljer sig nämnvärt från E.ONs underlag. Vi väljer i rapporten att inte presentera underlag från specifika nätägare i syfte att skapa ett så generiskt resultat som möjligt.

10% av alla nätstationer är drabbade av PD-aktivitet, varav 7% är allvarligt drabbade (C) och behöver därmed identifieras och åtgärdas inom en snar framtid.

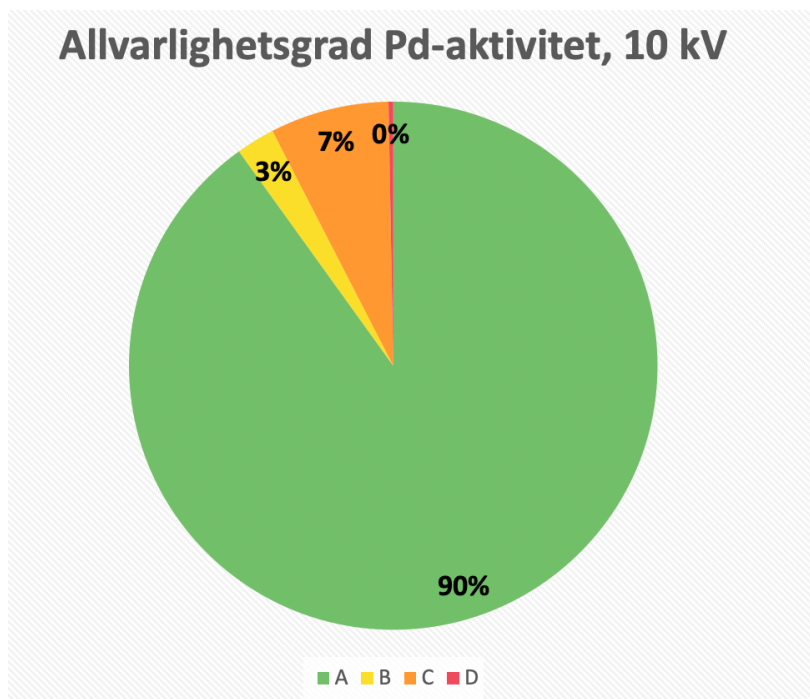


Bild 7. Bilden visar fördelning mellan besiktningsresultatet av nätstationerna. Grönt innebär att ingen korona förekommer. Gult, orange och rött visar allvarlighetsgrad B, C resp D

I 60% av alla PD-drabbade nätstationer är det ändavslutet som är grundorsaken till PD-aktiviteten. Övriga komponenter som skapar PD-aktivitet är fränkskiljaren

(31%), isolatorn (8%) resp säkring (1%). För att komma tillrätta med PD-aktivitetens snabba nedbrytning av beståndet av nätstationer i Sverige så behöver vi alltså främst förstå varför PD-aktivitet uppstår i ändavsluten. Därmed kan man sluta bygga in fel i nätstationer med katastrofal inverkan på deras livslängd. Genom att förstå orsakssambanden som leder till PD-aktivitet blir det eventuellt också möjligt att åtgärda stationer med redan inbyggda defekter och därmed potentiellt säkerställa stationens funktion under hela den förväntade ekonomiska och tekniska livslängden.

PD-aktivitet fördelat på komponenter, 10 kV

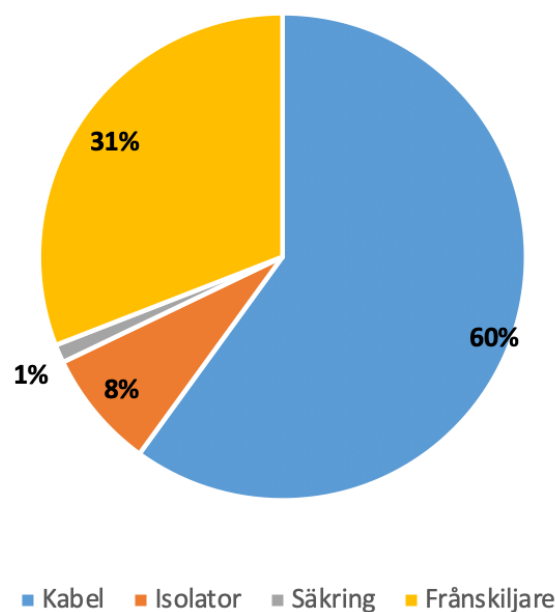


Bild 8. 60% av all PD-aktivitet kommer från ändavslut på mellanspänningssidan. Även frånskiljaren (31%) bidrar i stor utsträckning till PD-aktivitet

Förekomsten av PD-aktivitet varierar stort mellan olika geografiska områden i Sverige. Norrland, Stockholm, Närke och Östra Götaland uppvisar PD-aktivitet i 0-5% av stationerna. Sydligare delar av landet som Gotland, Skåne, Kronoberg och Blekinge uppvisar betydligt fler defekta stationer i intervallet 10-20%. Av någon anledning sticker Västra Götaland ut statistiskt med ca 40% PD-drabbade 10 kV stationer. Slutsatsen blir att nordligare geografier verkar nästan felfria medan sydligare geografier står för den absoluta majoriteten av defekta stationer.

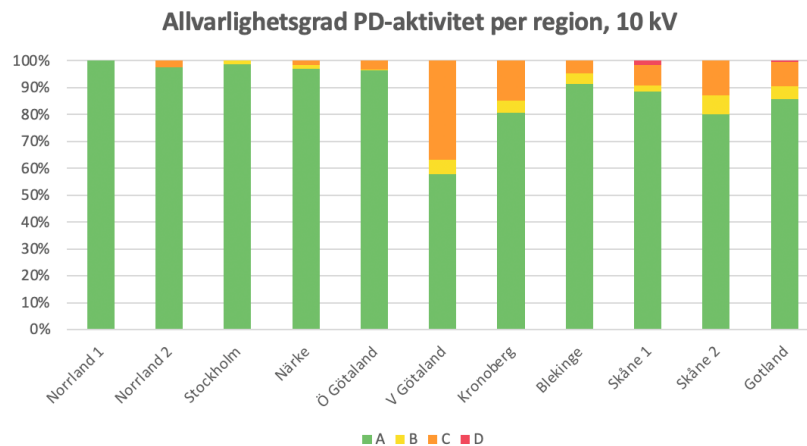


Bild 9. Norra Sverige verkar i princip felfritt medan södra delarna av landet kräver omedelbara åtgärder. I Västergötland är fyra av tio stationer defekta (!!).

Årsmodeller mellan 2019-2024 visar ingen PD-aktivitet. Betyder detta att nyare stationer är fria från defekter som skapar PD-aktivitet, eller betyder det att det tar ca fem år innan defekterna blir detekterbara? För stationer i åldersspannet 5-20 år, dvs årsmodeller 2005-2018, syns tydlig ökning av förekomst av PD-aktivitet som funktion av ålder. Även detta triggas frågan om detta primärt beror på att PD-aktiviteten ökar med tiden, eller primärt successivt förbättrade processer och materialval, eller en kombination. Åldersspannet 2005-2015 är värst drabbat med närmast 20% av stationerna drabbade av PD-aktivitet. 2005 sticker ut där fyra av tio stationer är defekta.

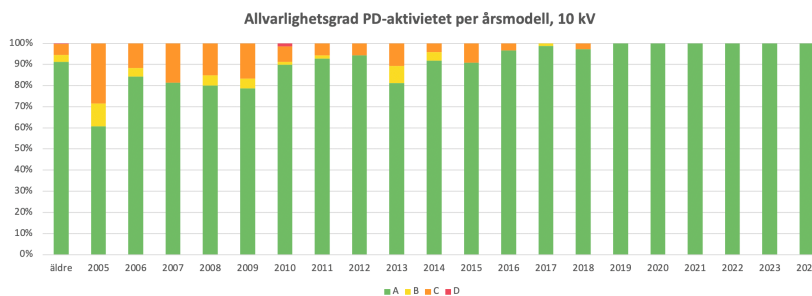


Bild 10.

Vanligast med PD-aktivitet i nätstationer inom åldersspannet 2005-2015. Inga detekterbara defekter hos stationer yngre än 5 år.

I linje med erfarenheter från 20 kV visar besiktningen av 10 kV stationer att relativ luftfuktighet har stor inverkan på förekomsten av PD-aktivitet. Bilden nedan visar förekomst av PD-aktivitet i nätstationer fördelat på relativ luftfuktighet vid besiktningstillfället i 5% intervaller. Föregående studie på 20 kV stationer visade att andelen stationer där PD-aktivitet detekteras minskar med minskande luftfuktighet. Särskilt stor förändring påvisades vid relativ luftfuktighet under 70% vid besiktningstillfället. Därför har Svensk Linjebesiktning sedan 2024 endast utfört PD-besiktning av nätstationer vid relativ luftfuktighet över 70%.

Luftfuktigheten är mätt utanför stationen innan besiktningen påbörjas. I analysen nedan antas att den relativa luftfuktigheten inne i nätstationen blir identisk med utomhusluftfuktigheten i samband med att besiktningspersonalen öppnar upp stationen. Vilken relativ luftfuktighet som råder i stationen när stationen är stängd är okänd men sporadiska mätningar indikerar att luftfuktigheten är mycket hög under stora delar av året och stora delar av dygnet. Därmed är klassningen Ci viktig för tillförlitlig besiktning. PD-aktiviteten kan avstanna temporärt vid öppnande av stationen i torr väderlek.

Resultatet visar tydligt att förekomsten av PD-aktivitet minskar från ca 12% vid 90-95% RH till ca 7% vid 75-80%. Aktuell RH vid besiktningstillfället är slumpmässigt. Även vilken station som besiktigas vid hög respektive låg RH. Vi bör alltså kunna anta att antal fel som orsakar PD är samma för de stationer som besiktigats vid låg RH som de stationer som besiktigats vid hög RH. Slutsatsen av detta blir att minimivärde vid besiktning är mycket viktigt, samt att det vid lägre RH är mycket viktigt att besiktningspersonalen är observant på symtom på PD-aktivitet även när sensorn inte detekterar UV-ljus.

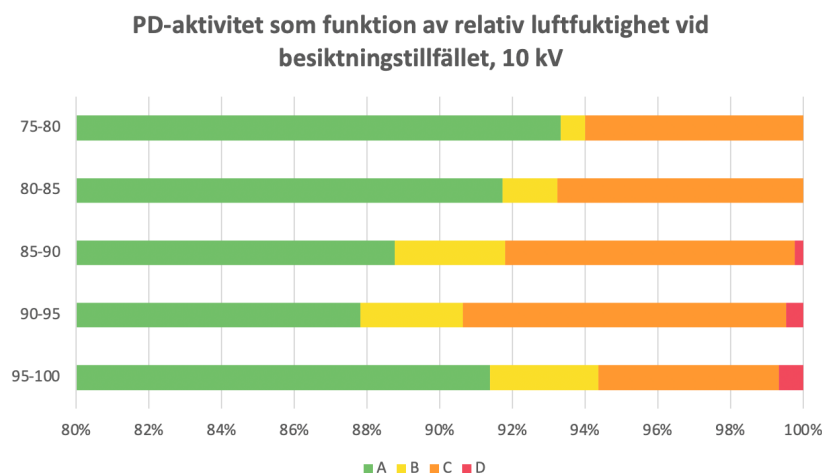


Bild 11. Diagrammet visar förekomsten av PD-aktivitet i nätstationer vid olika nivåer av relativ luftfuktighet. Luftfuktigheten är mätt utomhus vid nätstationen innan utförd besiktning

Besiktningsresultatet visar att olika fabrikat av nätstationer verkar vara drabbade av PD-aktivitet i olika utsträckning. Bilden nedan visar förekomsten av PD aktivitet i nätstationer fördelat på fem fabrikat: ABB, Harju, Holtab, KL Industri och Norrmontage. Antal stationer som är besiktigade per fabrikat varierar men då det är minst 100 stationer besiktigade per fabrikat är det rimligt att statistisk jämföra utfallet. Harju uppvisar, ur ett PD-perspektiv, bäst kvalitet med en felfrekvens på under 2%. Stationerna från ABB, KL Industri och Norrmontage är drabbade i drygt dubbel så stor utsträckning, ca 5 % av stationerna är PD-drabbade. Dessa fyra fabrikat är alltså drabbade långt under medelutfallet på 10% hos dom 1734 stationerna i totala underlaget. Enda fabrikatet med PD-aktivitet över medelutfallet är Holtab med 17%.

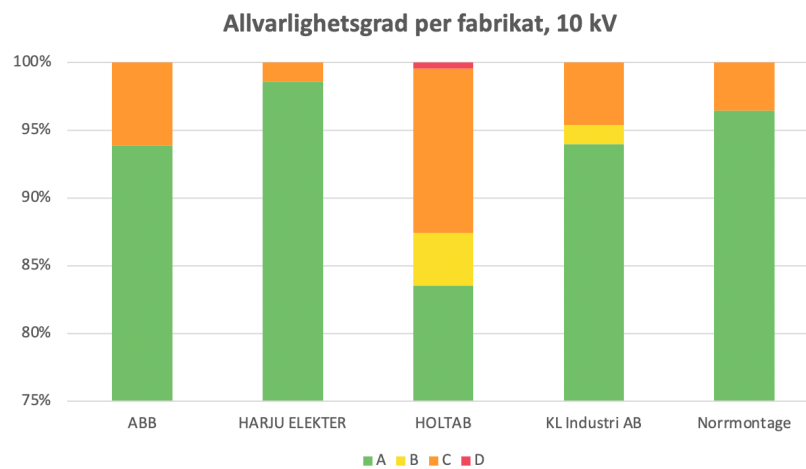


Bild 12. PD-aktivitet uppstår i mycket större utsträckning i stationer av fabrikatet Holtab än i övriga fabrikat.

6 Likheter och skillnader ur ett PD-perspektiv mellan 10 kV och 20 kV

Då tidigare rapport fokuserade på kartläggning av uteslutande 20 kV stationer och denna rapporten fokuserar på kartläggning av 10 kV blir det intressant att utvärdera skillnader och likheter mellan resultaten.

Inledningsvis är det tydligt att **PD-aktivitet detekteras mera frekvent i 20 kV stationer**. Utfallet för 20 kV var 18% PD-drabbade stationer medan utfallet för 10 kV var 10%. Det statistiska underlaget för 10 kV baserades på inspektioner vid relativ luftfuktighet på minst 75% medan underlaget för 20 kV besiktigades primärt vid minst 70% RF men ibland så pass lågt som 55%. Detta betyder att om samma regler (minst 75% RF) hade tillämpats vid besiktningen av 20 kV så hade utfallet med stor sannolikhet blivit något högre än 18%. En tumregel som kan utläsas av jämförelse mellan 10 kV och 20 kV är därmed att 20 kV stationer i Sverige verkar vara drabbade av PD-aktivitet i ca dubbelt så stor utsträckning som 10 kV.

En potentiell förklaring till att 20 kV är drabbade i dubbelt så stor utsträckning kan vara att de av någon anledning har högre andel inbyggda fel som under rätt/fel förhållanden leder till PD-aktivitet. En annan förklaring, och kanske mera trolig, är att det helt enkelt tar längre tid för inbyggda fel i en 10 kV-station att utvecklas till detekterbara fel. Teoretiskt är det känt att spänningsnivån har stor påverkan på PD-aktivitet. Det skulle alltså kunna vara så att vid den ögonblicksbild vi har för 20 kV (2022-2024) har större andel (20%) av montage-/designfel lett till detekterbar PD-aktivitet än för den ögonblicksbild vi har för 10 kV (2024-2025).

Även statistiken för **PD-drabbade komponenter** påvisar signifikanta skillnader mellan 10 kV och 20 kV. För 20 kV var det i 87% av alla PD-drabbade stationer ändavsluten på mellanspänningssidan som skapade PD-aktiviteten. Resterande PD-aktivitet uppstod i/på isolatorn. Även för 10 kV var ändavsluten på mellanspänningssidan den komponent som oftast var PD-drabbad, men endast i 60% av fallen. I de resterande stationerna var det fränskiljare (31%) respektive isolator (8%). Även om bilden skiljer mellan olika spänningsnivåer så är det entydigt att det är ändavsluten som skapar flest problem oavsett spänningsnivå. Vi ser ett liknande mönster mellan de olika spänningsnivåerna, men inte identiskt.

Vid en jämförelseanalys mellan **geografiska områden** för 10 resp 20 kV ser vi liknande mönster, men inte identiska. Oavsett spänningsnivå är det tydligt att norra Sverige är mindre drabbat av PD-aktivitet än södra Sverige. Norrland och Stockholm är minst drabbat oavsett spänningsnivå medan Västra Götaland, Kronoberg och Skåne påvisar högst andel PD-drabbade stationer. Dock är skillnaderna mellan geografier mycket tydligare för 10 kV än 20 kV. För 10 kV är siffrorna för Norrland och Stockholm under 5% drabbade stationer, medan Kronoberg och Skåne är drabbade i ca 4 gånger (!) så hög utsträckning, alltså ca 20% PD-drabbade stationer, och Västra Götaland sticker ut med över 40% (!) PD-drabbade stationer. För 20 kV är de geografiska skillnaderna inte lika påtagliga då Norrland och Stockholm ligger på ca 10-15% drabbade stationer, medan Skåne,

Västra Götaland och Kronoberg är drabbade i ca dubbelt (!!) så stor utsträckning med ca 20-25%. Vi ser alltså liknande mönster men inte identiskt. I samtliga regioner utom en ser vi att 20 kV är drabbade i större utsträckning än 10 kV om än i olika utsträckning. Undantaget är Västra Götaland där 25% av 20 kV stationerna är drabbade av PD, medan över 40% av 10 kV stationerna är PD-drabbade.

En fördjupning i variationer per **årsmodell** visar också liknande, men inte identiska, mönster. För 20 kV är defekterna under 10%, dvs långt under genomsnittet på 18%, för stationer av årsmodell 2004 eller äldre. Årsmodeller 2005 och 2006 visar fler defekter och flest PD-drabbade stationer finns i intervallet 2008-2015 med från 20% PD-drabbade stationer upp till över 30% för årsmodell 2011. De senaste 6-7 årsmodellerna före besiktningstillfället är mindre drabbade där genomsnitt är tillbaka under 10% och allvarliga fel som C och D är i nästan obefintliga. Sammanfattningsvis är äldre stationer från 2005 och bakåt alltså relativt betydligt mindre PD-drabbade, och detsamma gäller stationer som vid besiktningstillfället är mindre än sju år.

För 10 kV ser vi liknande mönster relaterat till årsmodell. Årsmodeller från 2004 och bakåt visar defekter på ca 10% vilket motsvarar genomsnittet för 10 kV. Fr 2005 och framåt är felfrekvensen långt över genomsnittet. Allra högst för årsmodell 2005 med 40% PD-drabbade stationer, och därefter stadigt minskande felfrekvens fram till 2018. Årsmodeller 2019-2024 är helt fria från PD-aktivitet. De senaste sex årsmodellerna före besiktningstillfället är alltså inte bara lågt i förhållande till medelstationen som i fallet med 20 kV, utan PD-frekvensen är t o m obefintlig. Detta kan vara en indikation på att det tar minst 6-7 år för en 10 kV station att utveckla detekterbar PD-aktivitet.

För både 10 kV och 20 kV är korrelationen mellan relativ luftfuktighet och detekterad PD-aktivitet mycket tydligt. Undantaget är intervallet 95-100% RF för 10 kV då vi ser in minskning relativt intervallet 90-95 resp 85-90%. Bortsett från detta undantaget är det mycket tydligt att antal detekterade fel minskar med minskande luftfuktighet. Vi kan alltså dra slutsatsen att PD-aktivitet avtar med torrare luft. Detta betyder att PD-aktivitet ev kan stoppas genom att på något sett permanent sänka luftfuktigheten till under ett visst maximalt gränsvärde. Det betyder också att man vid besiktning måste arbeta med ett visst minimalt gränsvärde för att resultatet ska vara tillförlitligt.

7 Fallstudie, 20 kV

Stationer som besiktigats med koronasensor i projektet är med något enstaka undantag besökta endast en gång. Det ger alltså en ögonblicksbild av status på nätstationen år X efter idriftsättning. Nedan beskrivs ett exempel på en nätstation där besiktningsresultatet kan jämföras med ett par år gamla bilder.

Låt oss inleda med att titta på bilder från nätstationer med typisk PD-aktivitet i ändavslut.

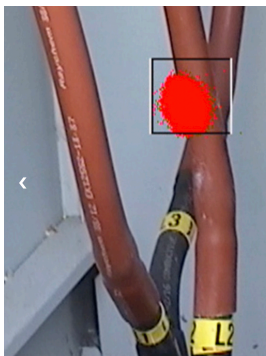


Bild 13. E.ON

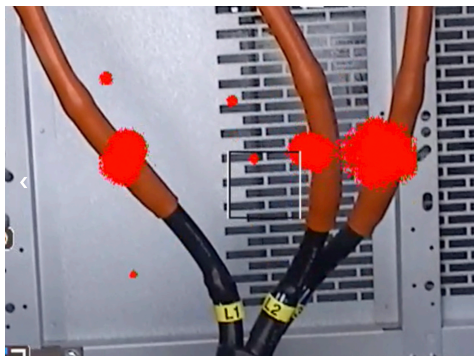


Bild 14. Vattenfall

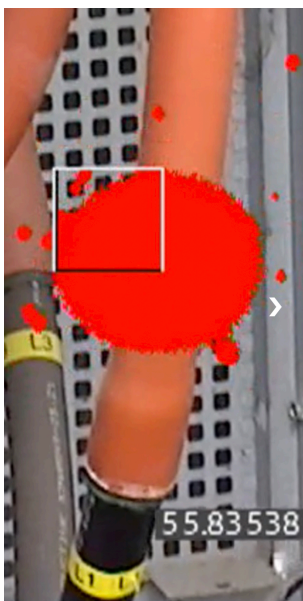


Bild 15. Kraftringen (67)

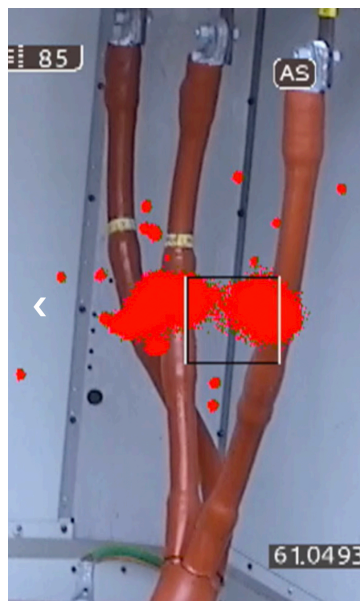


Bild 16. Ellevio (16)

Koronasensorn registrerar det UV-ljus som uppstår vid partiell urladdning. På bilderna syns alltså tydlig PD-aktivitet på ett eller flera ändavslut. PD-aktiviteten leder till accelererad nedbrytning av både metall- och polymerkomponenter inne i nätstationen. UV-ljuset som uppstår har en nedbrytande effekt på polymerer vilket initialt visar sig som försämrad isolering i avslutet och färgskiftning av materialet. PD-aktiviteten skapar också kemiska processer i luften som leder till ozon och

salpetersyrlighet vilket oxiderar metaller mycket snabbt. Vi illustrerar processen genom en fallstudie från en E.ON station nedan:

1. Stationen är driftsatt **2012** (inga bilder tillgängliga)
2. Bilden nedan är från **2017**:



Bild 17. E.ON Blekinge

1. Bilden nedan är från en koronabesiktning **2023**:

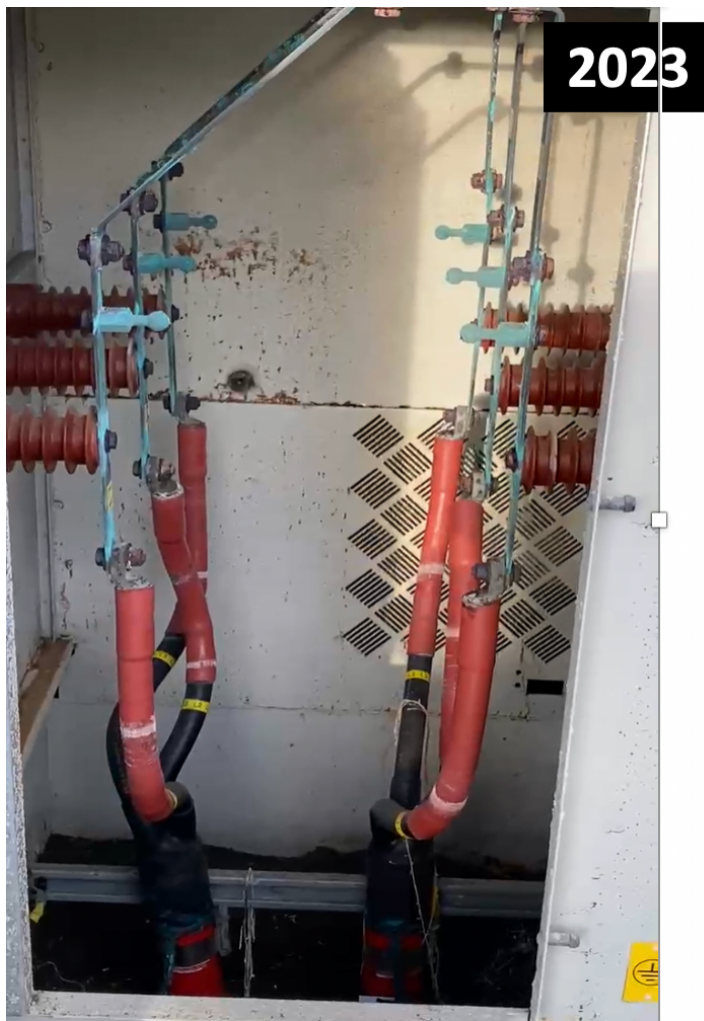


Bild 18. E.ON Blekinge

Fallstudien ovan ger en indikation på en potentiell tidslinje för koronadrabbade nätstationer. Någon gång mellan 2012 och 2017 uppstår PD-aktivitet i något av ändavsluten. Redan 2017 syns färgskiftning på ett av ändavsluten vilket betyder att PD-aktivitet pågått ett tag. Sex år senare, 2023, är stationen totalförstörd med PD-aktivitet som spritt sig till samtliga avslut och oxidation av stort antal metallkomponenter. Stationen har 2023 så pass stora funktionsfel att den byts ut till en totalkostnad på flera hundra tusen kronor. Stationen blev 11 år gammal. Förväntad ekonomisk livslängd var 40 år. Det uppstår alltså en förlust på ca 75% av investeringskostnaden.

8 Teoretisk fördjupning, 10 & 20 kV

Empirisk utvärdering av felfrekvens, grundorsaker, bidragande parametrar, gemensamma nämnare hos PD-drabbade stationer etc har behandlats ovan. Utöver detta är det viktigt att vi bygger en teoretisk kunskap om PD-aktivitet. Professor Ulf Gedde vid KTH har sammanställt nedanstående beskrivning av hur PD-aktivitet uppstår samt vilka kemiska och fysiska konsekvenser PD-aktiviteten leder till.

I homogena elektriska fält t.ex. mellan två parallella plattor med en mellanliggande gas (t.ex. luft) sker urladdningar om spänningen mellan plattorna överstiger ett visst kritiskt värde (Bild 19, vänstra delen). Diagrammet nedan visar det område (rödsträckt i grafen nedan) i vilket urladdning sker i torr luft; gränslinjens beskrivs väl av Paschens lag (Bild 19, mittdelen). Den kritiska spänningen (U_{krit}) är en funktion av produkten av gasens tryck (p) och avståndet mellan de två elektroderna (d). En urladdning mellan elektroderna bildas om spänningen är högre än det kritiska värdet. Urladdning är alltså fullständig, laddade partiklar (elektroner och joner) transporteras mellan elektroderna, en 'ström' leds genom luftgapet (Bild 19, högra delen).

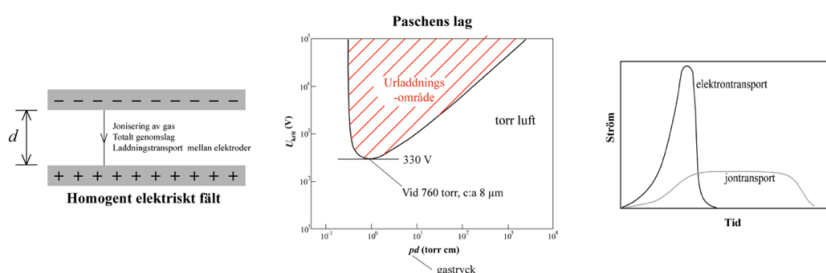


Bild 19. Fullständig urladdning i homogent elektriskt fält

En annan typ av urladdning sker vid lägre spänningsnivåer i inhomogena elektriska fält där den elektriska fältstyrkan är olika beroende på position. Detta sker vid spetsiga elektroder (schematiskt visat i Bild 20, vänstra delen). Urladdning är ofullständig. Runt den laddade elektroden i exemplet uppstår ett blått ljussken som en korona. Initieringen av korona beskrivs av andra empiriska formler (t.ex. Peek's formel) än Paschens lag. Man brukar säga att koronan är ett kallt plasma, i vilket elektronerna har en högre temperatur (kinetisk energi) än jonerna. Ett plasma är ett tillstånd hos materien som utmärks av att elektronerna är delvis separerade från atomkärnorna och laddade partiklar (elektroner och joner) finns ofta tillsammans med andra reaktiva ämnen (bl.a. fria radikaler). Processerna i plasmat ger också upphov till bildning av ljus, både synligt ljus och UV. Vid högre spänningar uppstår andra typer av relaterade urladdningar och om spänningen blir tillräckligt hög sker en fullständig urladdning som brygger över mellan elektroderna. (Bild 2, högra delen).

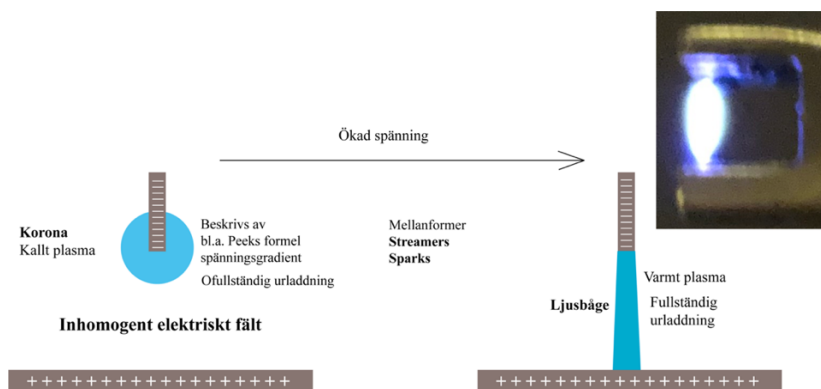


Bild 20. Korona urladdning i ett inhomogent elektriskt fält

Bild 21 (vänstra delen) visar korona utgående från en spetsig elektrod vid metall och en plastisolering. Det kalla plasmata emitterar skadligt UV-ljus och farliga ämnen som med tiden kommer att nedbryta materialen. Den högra delen av Bild 21 visar ett inre hålrum i en plastisolering och hur inre urladdningar kan ske om spänningen är tillräckligt hög, vilket leder till bildningen av trädliknande mikroskopiska hålrum.

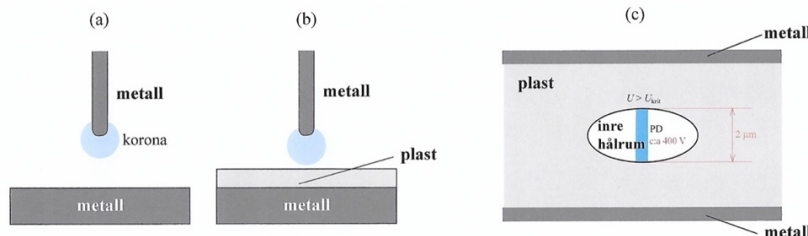


Bild 21. Några exempel på urladdningar

Korona genererar energirik (farlig) strålning och aggressiva ämnen (Bild 22). I koronan emitteras fria elektroner som accelereras i det elektriska fältet. Kollisionerna mellan elektroner med hög hastighet gör att gasmolekyler joniseras och en rad olika reaktiva ämnen bildas. Luft består av kvävgas (N_2), syrgas (O_2), argon (Ar), vattenånga (H_2O) och mindre mängder av koldioxid (CO_2) och olika spårämnen. Dessa ämnen utgör smörgåsbordet för de snabba elektronerna vilket leder till bildning av joner, starka oxidanter (bl.a. ozon, singlett-syre och hydroxylradikaler), sura ämnen (kväveoxider) och energirik UV-strålning, vars fotoner har högre energi än den UV-strålning som når oss från solen. Det korona-utsända UV-ljuset med en våglängd mellan 210 och 480 nm degraderar omgivande plast- och gummimaterial mycket mer än solljus.

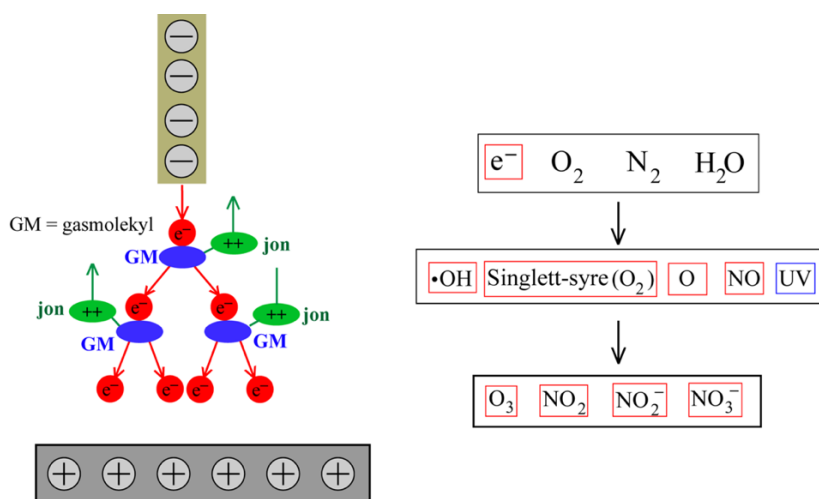


Bild 22. Bildningen av kallt plasmata bestående av elektroner, joner, fria radikaler och andra reaktiva ämnen (bl.a. ozon, singlett syre) och UV-strålning som utmärker korona.

Ozon (O₃) är en instabil förening som bryts ned till vanlig syrgas (O₂) och som oxiderar andra ämnen; plast och gummi är mest känsliga men även de flesta metaller oxideras. Ozon oxiderar alla elektrotekniskt använda metaller och kvävemoxid (NO) till NO₂ och NO₃. Ozon oxiderar omättade gummipolymerer såsom naturgummi, SBR-gummi och nitrilgummi (Bild 23, vänstra övre delen). Processen kallas ozonolys. Hydroxylradikaler (•OH) och singlettsyre är andra reaktiva ämnen som bildas och de initierar nedbrytning av plast och gummi. Högenergetiska elektroner (≤ 100 eV) initierar radikalbildning och därmed oxidationsreaktioner och kemisk nedbrytning (Bild 23, högra övre delen). Kvävedioxid (NO₂) är en stark oxidant och i vatten bildas bl.a. salpetersyra (HNO₃), ett surt ämne som degraderar plast, gummi och metall. Korona skapar alltså en miljö som är starkt nedbrytande på de flesta material. För polymerer (plast och gummi) kan nedbrytning uttryckas med en faktor $P = \Delta m/t$, där Δm är viktminskningen under tidsperioden t . Ett högt värde på P visar att materialet har låg koronabeständighet. Tabell 1 visar P -värden för några vanligt förekommande polymerer (observera att plast och gummi består av polymerer, stora molekyler som består av många likadana atomenheter (repetrande enheter)). Observera att de värden som presenteras i tabellen avser rena plast- och gummimaterial. Inblandning av oorganiska fyllmedel, vilket också inbegriper nanopartiklar (10 – 100 nm i storlek) har ofta en gynnsam effekt på materialens tålighet mot korona. Många moderna material, i synnerhet gummimaterial, är ofta kompositer.

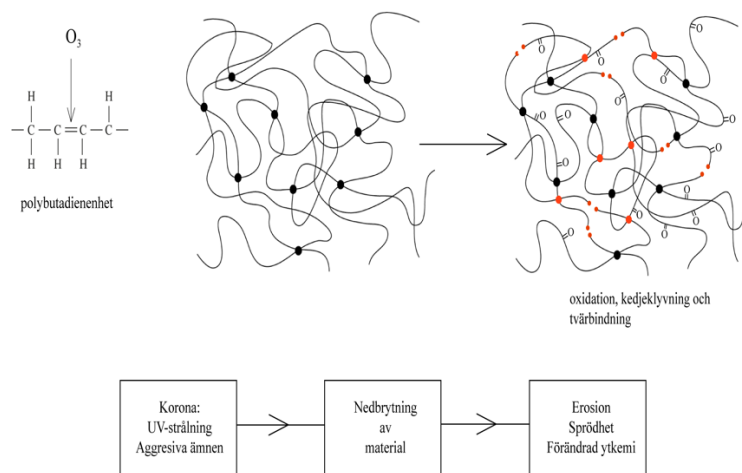


Bild 23. Skiss över nedbrytningen av polymera material inducerad av korona

Tabell 1. Nedbrytningskoefficient (P) värden.

Polymer	P
Polyimid (PI)	0.00
Silikongummi (SIR)	0.05
Aromatisk polyamid (PA)	0.15
Polyeten (PE)	0.24
Polyvinylfluorid (PVF)	0.32
Polytetrafluoretylen (PTFE)	0.35
Polystyren (PS)	0.35
Polyetylentereftalat (PET)	0.46
Polykarbonat (PC)	0.57
Polyvinylklorid (PVC)	0.60
Polypropen (PP)	0.88
Cellulosa-acetat (CA)	1.35

Källa: Japanese Electrical Society Technical Report, II, no. 43 (1976).

Bild 24 visar några exempel på korona-inducerade skador. Kabel-ändavslutningar är den mest förekommande komponenten som skadas av korona i nätstationerna. Bildningen av sura ämnen samt förekomsten av ozon ökar risken för korrosionsskador på metalliska material, som vi ser två exempel på i Bild 24.



Bild 24. Skadar orsakade av korona på polymera isolationsmaterial (vita banden på isoleringen, vänster) och metaller (korrosion; bilderna till höger)

9 Elektronmikroskop, KTH, 10 & 20 kV

Då ändavsluten är grundorsaken till PD-aktivitet i nio av tio drabbade nätstationer är det kritiskt att undersöka hur allvarlig nedbrytningen av dem är. Enligt teorin bryter UV-ljuset ner de skyddande polymererna i avslutet vilket leder till livsfara när de inte längre isolerar som de är designade att göra. KTH tog sig an uppgiften att undersöka påverkade polymerer mha elektronmikroskop.

Ett PD-drabbat avslut väljs ut och jämförs med ett PD-fritt avslut. Ett prov skars ut från respektive avslut.



Bild 25. Avslut som uppvisat PD



Bild 26. Avslut som är fritt från PD

Därefter scannas de båda proven i ett elektronmikroskop. Elektronmikroskopet visar att det i det PD-utsatta avslutet har skapats mikrosprickor medan det PD-fria avslutet är homogent. Mikrosprickorna innebär med stor sannolikhet att polymerens isolerande effekt förlorats medan det PD-fria avslutet troligtvis fortfarande levererar den isolation som det designats för.

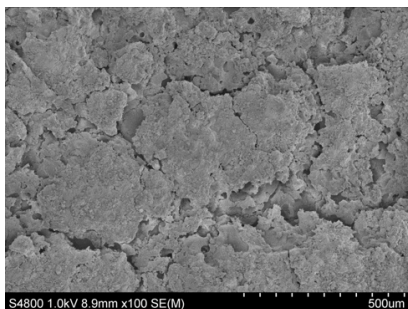


Bild 27. Avslut som uppvisat PD

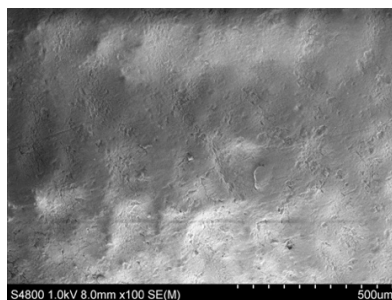


Bild 28. Avslut som är fritt från PD

10 Diskussion

Resultatet visar att minst var tionde 10 kV nätstation är defekt, med en förkortad ekonomisk livslängd som konsekvens. Vidare ser vi att det primärt verkar vara en komponent som är grundorsaken till PD-aktivitet i nätstationer, ändavslutet. Relativ luftfuktighet har en mycket stor påverkan på PD-aktiviteten i nätstationer. Vidare är det tydligt att vissa geografier, årsmodeller och fabrikat verkar vara utsatta i större omfattning. Vad betyder resultatet i praktiken och hur tar branschen sig vidare?

Att så många som en av tio 10 kV nätstationer är defekta är ett akut problem. För vissa fabrikat, årsmodeller och geografier är andelen defekta stationer mycket större. Detta borde anses totalt oacceptabelt av hela branschen. Mångmiljardbelopp har investerats i nätstationer och det är så klart oerhört viktigt att branschen säkerställer att förväntad funktion och livslängd garanteras. Detta är kritiskt från nätägarnas perspektiv men också från konsumenternas perspektiv och inte minst ur ett säkerhetsperspektiv.

Vi har sett ovan att livslängden på en nätstation kan bli mycket kort vid pågående PD-aktivitet. Fallstudien från E.ON visar att en station kan vara helt slut 11 år efter driftsättning samt 6 år efter att en koronabesiktning skulle resulterat i allvarlighetsgraden C. Ett rimligt antagande är att det också kan ta 20-25 år innan stationen är helt slut vid mer gynnsamma omständigheter, men lika troligt är att det också kan leda till livslängder betydligt kortare än 11 år. Det är alltså högst troligt att det finns tusentals nätstationer i Sverige som redan kommit långt i nedbrytningsprocessen. Därmed är det kritiskt att agera snabbt i två steg. Först identifiera drabbade stationer och sen planera in åtgärder beroende på allvarlighetsgrad.

Ett av målen i projektet var att fullt ut förstå grundorsaken till varför PD-aktivitet uppstår. Projektet har tydliggjort att grundorsaken till PD-aktivitet är ändavsluten. Exakt vad som skapar PD i vissa ändavslut men inte i andra är fortfarande oklart. Diskussioner i referensgrupp och med experter inom nätstationer har landat i att montören tvingas arbeta för snabbt, att stationerna är för små och erbjuder för lite plats för att utföra installationen korrekt, att det är svårt att värma avsluten tillräckligt vid installation, att man tvingats böja avsluten för mycket, att det kommit in sand eller fukt vid installationen, att man skurit för djupt med kniv etc. Det verkar alltså vara något i installationsprocessen som går fel ibland och att design och material inte är tillräckligt förlåtande för att tillåta misstag vid installation. Exakt vad som har gått fel vet bara personen som utförde arbetet för 5, 10, 15 år sedan.

Luftfuktigheten är en avgörande parameter för PD-aktivitet. Vi har sett att relativ luftfuktighet på 90-95% leder till PD-aktivitet i dubbelt så stor utsträckning som vid RH 75-80%. Detta betyder att vi behöver ta reda på hur hög luftfuktigheten är inne i nätstationerna under året. Potentiellt är den mycket högre stora delar av året än vid besiktningstillfället då man öppnat upp stationen och aktuell luftfuktighet i stationen blivit samma som utomhus. Detta betyder också att PD-aktivitet potentiellt kan pågå i stationen stor del av året i nätstationen men att den avbryts

vid besiktningstillfället ifall RH utomhus är låg. Därmed kan felfrekvensen vara ännu högre än de 10% som projektet påvisat. Det betyder också att en lägsta tillåten RH utomhus vid besiktning bör fastställas för att säkerställa besiktningen registrerar all skadlig PD-aktivitet. Svensk Linjebesiktning rekommenderar att all PD-mätning i 10 kV stationer bör ske vid minimum 75% relativ luftfuktighet utomhus. Detta för att minimera antalet felaktigt "friskförklarade" stationer samtidigt som det blir praktiskt möjligt att utföra besiktning under stor del av året.

Sammanfattningsvis har vi ett mycket stort problem med PD-aktivitet i 10 kV-nätstationer i Sverige. Samtidigt är problemet mycket akut. Kombinationen av stort och akut kräver att branschen agerar omedelbart. Projektet har primärt syftat till att förstå hur utbrett problemet med PD-aktivitet är för 10 kV stationer och därmed kompletterar redan existerande kunskap för 20 kV stationer. Syftet har också varit att skapa förståelse kring var och hur problemet uppstår och utvecklas. Det finns nu kunskap inom dessa områden, även för 10 kV, och det är nu kritiskt att flytta fokus till att skapa en åtgärdsplan för att hantera problemet.

11 Slutsatser

Studien visar entydigt att PD-aktivitet i svenska 10 kV-nätstationer är ett omfattande, allvarligt och akut problem som kräver omedelbara åtgärder. Minst 10 % av stationerna är PD-drabbade, vilket innebär att 15 000–20 000 stationer i Sverige sannolikt har en kraftigt förkortad teknisk och ekonomisk livslängd. Den verkliga omfattningen kan vara ännu större, eftersom PD-aktivitet inte alltid är detekterbar vid låg relativ luftfuktighet.

Den klart dominerande grundorsaken till PD-aktivitet är ändavsluten på mellanspänningssidan, följt av fränksiljare och isolatorer. Detta indikerar att problematiken i hög grad är kopplad till design, materialval och installationsprocesser, snarare än slumpmässigt åldrande. Särskilt utsatta är stationer byggda från cirka 2005 och framåt, vilket tyder på en systematisk kvalitetsförsämring jämfört med äldre stationer.

Studien visar även att PD-aktivitet utvecklas över tid och att det i 10 kV-stationer normalt tar minst 5–7 år innan aktiviteten blir detekterbar. Detta innebär att många relativt nya stationer kan bära på inbyggda defekter som ännu inte syns, men som kommer att leda till accelererad nedbrytning och framtida haverier.

Relativ luftfuktighet är en avgörande parameter för både förekomst och detektering av PD-aktivitet. PD-aktiviteten ökar kraftigt vid hög luftfuktighet och kan tillfälligt avstanna vid torrare förhållanden. Därmed finns en betydande risk för felaktig friskförklaring av stationer vid besiktning under låg relativ luftfuktighet. För tillförlitliga resultat bör PD-besiktning därför inte utföras vid relativ luftfuktighet under 75–80 %.

Det finns mycket stora geografiska variationer i förekomsten av PD-aktivitet, där södra Sverige – särskilt Västra Götaland – uppvisar extremt höga felfrekvenser, medan norra Sverige är relativt opåverkat. Även skillnader mellan fabrikat är tydliga, vilket ytterligare stärker slutsatsen att PD-problematiken är systemisk och inte slumpmässig.

PD-aktivitet leder till snabb nedbrytning av både polymerer och metaller genom UV-strålning, ozon och sura kemiska processer. Detta resulterar i exponentiellt ökande åtgärdskostnader över tid, försämrad personsäkerhet och minskad leveranssäkerhet. Fallstudier visar att nätstationer kan bli totalförstörda långt före förväntad livslängd, med betydande ekonomiska förluster som följd.

Sammantaget visar studien att det finns ett akut behov av att snabbt identifiera PD-drabbade nätstationer, definiera effektiva åtgärder, samt ta fram en kostnadsoptimerad och tillförlitlig besiktningsstrategi. Utan omedelbara och strukturerade insatser riskerar svenska nätägare att stå inför en mycket stor och växande underhållsskuld med allvarliga ekonomiska, säkerhetsmässiga och samhällskritiska konsekvenser.

PD-AKTIVITET I NYARE NÄTSTATIONER, 10 KV

PD-besiktning har utförts av ca 1700 10 kV nätstationer tillhörande svenska nätägare. Resultatet har analyserats vilket leder till följande slutsatser:

- Det finns ett mycket stort problem med PD-aktivitet i svenska nätstationer.
- PD-aktiviteten leder till kraftigt förkortad livslängd hos nätstationerna.
- För att säkerställa förväntad livslängd krävs omedelbar definition av strategi för att identifiera drabbade stationer samt åtgärdsplan för de defekter som identifieras.

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.



Energiforsk