



Robert Ellmén

# Loviisan voimalaitoksen kaapeleiden ikääntymisenhallinnan menetelyiden arviointi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkövoimatekniikka

Insinöörityö

15.2.2021

# Tiivistelmä

Tekijä:	Robert Ellmén
Otsikko:	Loviisan voimalaitoksen kaapeleiden ikääntymisenhallinnan menettelyiden arviointi
Sivumäärä:	61 sivua
Aika:	15.2.2021
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	sähkö- ja automaatioinsinööri
Ammatillinen pääaine:	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat:	vanhempi sähkösuunnittelija Jyri Piensalo lehtori Eero Kupila

---

Insinööritö tehtiin Fortum Power and Heat Oy:lle tavoitteena arvioida ja ehdottaa uusia toimenpiteitä suojarakennuksen sisällä olevien kaapelien ikääntymisenhallintaan.

Työssä tutkittiin ja esiteltiin erilaisia ikääntymisenhallinnan menetelmiä ja kuinka niitä toteutetaan. Lisäksi katsottiin millaista tutkimusta parhaillaan alalla tehdään ja millaisia uusia testausmenetelmiä tulisi tulevaisuudessa mahdollisesti markkinoille.

Keskeisimmät menetelmät poimittiin eri IAEA:n (kansainvälinen atomienergiajärjestö) julkaisemista aineistoista. Työssä selvitettiin lisäksi myös mitä menetelmiä on käytössä eri ydinvoimalaitoksilla ympäri Suomea, Eurooppaa ja Yhdysvaltoja. Tietoa kerättiin Ensreg:in julkisista dokumenteista sekä voimalaitoksien kaapelijärjestelmien asiantuntijoiden haastatteluiden avulla. Työssä keskeisessä roolissa oli pyrkiä löytämään ainetta rikkomattomia menetelmiä joita voi ottaa käyttöön ilman, että on olemassa testituloksia ikääntymisen eri vaiheista.

Insinööritöön lopputuloksena saatiin tiivistelmä eri menetelmistä sekä muutama ehdotus, joita olisi mahdollista ottaa käyttöön pikkuhiljaa erilaisten huoltotoimenpiteiden yhteydessä, mikäli voimalaitoksen ikääntymisenhallinnan asiantuntijat katsovat ne tarpeellisiksi.

Avainsanat: kaapelit, ikääntyminen, kunnonvalvonta, sähkövoimatekniikka, ydinvoimalaitos

## Abstract

Author: Robert Ellmén  
Title: Evaluation of the Ageing Management Procedures of Cables in Loviisa Nuclear Power Plant  
Number of Pages: 61 pages  
Date: 15 February 2021

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Electricity and automation engineering  
Professional Major: Electrical power engineering  
Instructors: Jyri Piensalo, Senior engineer, electrical design  
Eero Kupila, Senior lecturer

---

The purpose of this thesis work was to evaluate the existing methods, and suggest new methods of ageing assessment of cables within the containment building in Loviisa nuclear power plant. The thesis work was made for Fortum Power and Heat Ltd.

In this thesis different methods ranging from simple visual examinations to electrical, chemical and mechanical testing are presented. Recent and ongoing research of ageing assessment methods, such as ultrasonic testing of cable jackets were also explored in this work.

Main sources of information used included documents published by IAEA (international atomic energy agency), country peer-review assessment reports and various other research reports from different nuclear power plants around the world. The focus was on Europe, especially Finland and Sweden. Some of the information about methods used were obtained through interviews with representatives from Finnish and Swedish NPPs. The main goal was to gather information on either non-destructive, or at least non-intrusive testing methods, that do not require trended results.

As a result of this work is a short summary of different ageing management methods and a comparison of said programs between different plants. At the end there are suggestions on new methods to include into the ageing management program at Loviisa NPP.

Keywords: Cables, ageing management, electrical engineering, nuclear power plant

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Kaapeleiden ikääntyminen	2
2.1	Voimalaitoksen ympäristötekijöiden arviointi	3
2.2	Kelpoistaminen ja kiihdytetty ikäännyttäminen	4
2.3	Ikääntymisen seurannan prioriteetit	6
2.4	Kaapeleiden yleisimmät polymeerimateriaalit	6
2.5	Ikääntymisen seurannan menetelmät	8
2.5.1	Mekaaniset testit	9
2.5.2	Kemialliset testit	17
2.5.3	Sähköiset testit	21
2.5.4	Muita menetelmiä	27
3	Loviisan voimalaitoksen menetelmät	30
3.1	Aistinvaraiset tutkimukset ja olosuhteiden seuranta	30
3.2	Näytteiden otto ja testaaminen	31
4	Menetelmät muilla voimalaitoksilla	32
4.1	Olkiluoto	33
4.1.1	Olkiluoto 1 ja 2	33
4.1.2	Olkiluoto 3	34
4.2	Ruotsin ydinvoimalaitokset	35
4.2.1	Forsmark	35
4.2.2	Ringhals	36
4.2.3	Oskarshamn	37
4.3	Ranskan ydinvoimalaitokset	38
4.4	Tšekin ydinvoimalaitokset	39
5	Ehdotukset uusille toimenpiteille	41
5.1	Indenter modulus -mittaukset	42
5.2	Hapetuksenkesto aika ja -lämpötila	44
5.3	FDR	47
5.4	Piiriresistanssi- ja muita vastaavia mittauksia	47

5.5	Kaapelitietokanta	48
5.6	LIRA	49
5.7	"Wear out" -menetelmän soveltamista	49
6	Yhteenveto	50
	Lähteet	51

## Lyhenteet

CSPE	<i>Chlorosulfonated polyethylene</i> . Klorosulfonoitu polyeteenikumi, käytetään kaapelin eristeenä tai vaippana.
EAB	<i>Elongation at break</i> . Murtovenymän enimmäismuutos.
EFTE	Etyleeni-tetrafluoroetyleni. Käytetään kaapelin eristeenä tai vaippana.
ENSREG	<i>European Nuclear Safety Regulators Group</i> . Euroopan ydinturvallisuusviranomaisten ryhmä.
EPDM	Etyleenipropyleenidieeni. Käytetään kaapelin eristeenä tai vaippana.
EPR	Etyleenipropyleeni. Käytetään kaapelin eristeenä tai vaippana.
EVA	Etyleeni vinyyli asetaatti. Käytetään kaapelin eristeenä tai vaippana.
FDR	<i>Frequency domain reflectometry</i> . Sähköinen kaapelin testausmenetelmä
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i> . Kansainvälinen atomienergiajärjestö.
IM	<i>Indenter modulus</i> . Testillä määritetään materiaalin ikääntymisen aiheuttamaa kovettumista, viitataan työssä usein myös painaumanä.
IR	<i>Insulation resistance</i> . Eristysresistanssi
LCSR	<i>Loop current step response</i> . Lämpöantureiden testausmenetelmä
LIRA	<i>Line impedance resonance analysis</i> . Sähköinen kaapelin testausmenetelmä.

LOCA	<i>Loss of coolant accident.</i> Jäähdytteenmenetys onnettomuus. Suunnitteluperusteinen onnettomuustilanne
NDT	<i>Non-destructive test.</i> Materiaalia rikkomaton testimenetelmä
NIS	<i>Neutron instrumentation system.</i> Neutronivuon anturijärjestelmä
OIT/OITP	<i>Oxidation induction time/temperature.</i> Hapetuksenkesto aika/-lämpötila
PE	<i>Polyethylene.</i> Polyeteeni, yleisesti käytetty polymeeri.
PEEK	<i>Poly ether-ether ketone.</i> Polyetterieetteriketoni, käytetään kaapelin eristeenä tai vaippana.
PEX/XLPE	<i>Cross-linked polyethylene.</i> Ristisilloitettu polyeteeni, käytetään kaapelin eristeenä tai vaippana.
PPO	<i>Polyphenylene oxide.</i> Polyfenyleeni oksidi, käytetään kaapelin eristeenä tai vaippana.
PVC	<i>Polyvinyl chloride.</i> Polyvinyylikloridi, käytetään usein kaapelin eristeenä tai vaippana.
SiR	<i>Silicone rubber.</i> Silikonikumi, käytetään kaapelin eristeenä tai vaippana.
TDR	<i>Time domain reflectometry.</i> Sähköinen kaapelien testausmenetelmä.
TS	<i>Tensile Strength.</i> Murtolujuus.
VR	<i>Velocity rate.</i> Sähkömagneettikentän nopeus kaapelissa suhteessa valonnopeuteen tyhjiössä.

# 1 Johdanto

Tämä insinööri työ tehtiin Fortum Power and Heat Oy:lle, joka on osa Fortum Oyj konsernia.

Työssä tutkitaan kaapelien ikääntymisen arviointimenetelmiä ydinvoimalaitoksissa yleisesti, ja verrataan niitä Loviisan voimalaitoksen menetelmiin. Vertailujen lisäksi pyritään löytämään materiaaleja rikkomattomia testausmenetelmiä (engl. non-destructive test, NDT) ehdotettavaksi. Työn tavoitteena on päivittää, mikäli sille on tarvetta, Loviisan voimalaitoksen kaapelien ikääntymisenhallintamenetelmiä.

Suomessa Säteilyturvakeskus STUK velvoittaa, että ydinvoimalaitoksen luvan haltijalla on ikääntymisenhallintaohjelma, jonka sisältö esitellään YVL-ohjeessa A.8. YVL-ohjeiden mukaisesti luvan haltijoiden tulee toimittaa STUK:ille vuosittain ikääntymisenseurantaraportti. [1; 21.]

Tausta-aineistona käytetään muun muassa IEC-standardeja, kansainvälisen atomienergiajärjestön (IAEA) aineistoa, Fortumin omia aineistoja, Euroopan ydinturvallisuusviranomaisten ryhmän (ENSREG, European Nuclear Safety Regulators Group) koostamaa aineistoa maidensa ikääntymisenhallintamenetelmistä sekä haastatteluja Olkiluodon ja Ringhalsin ydinvoimaloiden kaapelijärjestelmävastaavien kanssa.

Työssä käsitellään yleisesti kaapelien ikääntymisenhallinnan menetelmiä. Eri menetelmiä käydään läpi ensiksi tarkemmin, sen jälkeen esitetään kuinka niitä sovelletaan eri ydinvoimalaitoksilla Loviisa mukaan lukien. Työn lopuksi arvioidaan, millaisia menetelmiä ja miten niitä voisi ottaa Loviisassa käyttöön.

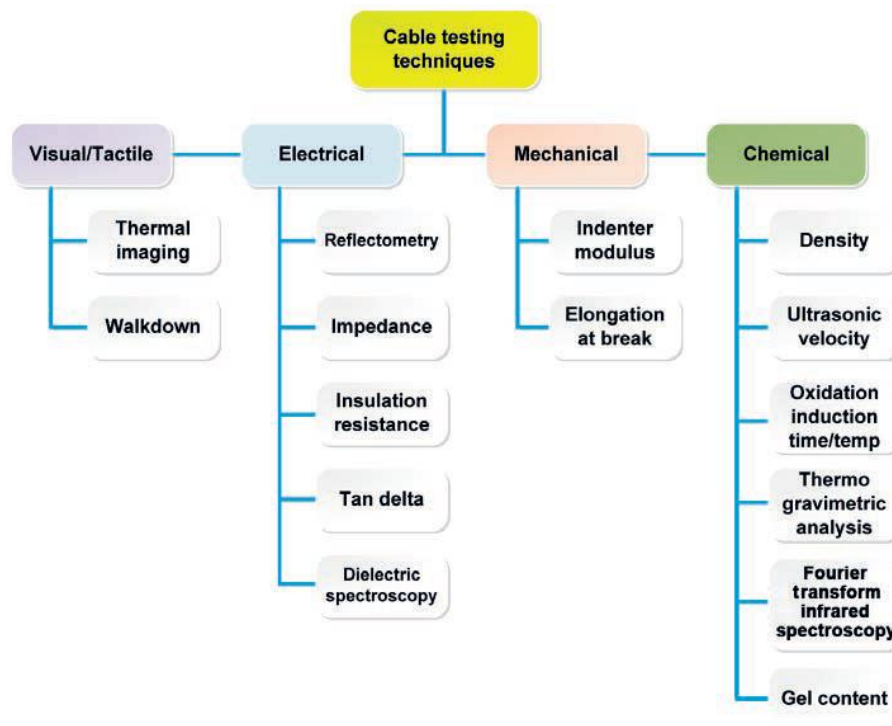


## 2 Kaapeleiden ikääntyminen

Kaapelien eristeiden dielektrisen lujuuden heikentyminen ikääntyessä voi aiheuttaa vaara- sekä vikaantumistilanteita, jotka pahimmassa tapauksessa häiritsevät vakavasti voimalaitoksen päivittäistä toimintaa.

Pitkäaikainen altistuminen lämmölle, säteilylle ja kosteudelle rasittaa kaapelien eristeitä ja johtimia. Näitä edellä mainittuja olosuhteita esiintyy ydinvoimaloissa sähköisten ja mekaanisten rasitusten, kuten värinän, puristuksen sekä vääntymisen lisäksi. Rasitteiden yhteinen vaikutus (synergismi) kiihdyttää kaapelien ikääntymistä entisestään, ja sen takia on tärkeää tarkasti seurata niiden kuntoa. [6.]

Voimalaitoksissa yksi merkittävimmistä ikääntymistä kiihdyttävä tekijä on lämpö. Sen takia voimalaitoksilla keskitytään usein selvittämään, missä kohdissa kaapelireittejä lämpötila nousee korkeimmilleen. Tästä kerrotaan tarkemmin kohdassa 2.1.



Kuva 1. Erilaisia testausmenetelmiä. [3, s. 18]

Ikääntymisen hallinnan seurantamenetelmät voidaan jakaa neljään osa-alueeseen (ks. kuva 1): aistinvaraiset, sähköiset, mekaaniset ja kemialliset testit [3]. Nämä menetelmät esitellään tarkemmin kohdassa 2.5. Kaapelien ikääntymisenhallintaohjelma on yleensä voimalaitoskohtainen, ellei kansallisia menetelmiä ole kehitetty, kuten Ranskassa missä yksi valtion omistama yritys vastaa kaikista ydinvoimalaitoksista. Tässä luvussa käydään läpi standardien ja IAEA:n aineiston pohjalta vaatimukset sekä suositukset kaapeleiden ikääntymisenhallinnalle. Luvuissa 3 ja 4 keskitytään voimalaitoskohtaisiin menetelmiin, eli kuinka aineistoa sovelletaan.

Keskeisimmät periaatteet ikääntymisen seurannassa ovat kuitenkin seuraavat:

- ympäristötekijöiden arviointi, jotta voidaan selvittää miten ja missä kaapelit rasittuvat.
- ympäristötekijöiden muutoksen seuranta.
- asennettujen kaapeleiden ominaisuuksien tunnistaminen, ja niiden käyttäytyminen ikääntyessään.
- näytteenotto, näytekaapeleiden asentaminen ja testaus.

## 2.1 Voimalaitoksen ympäristötekijöiden arviointi

Kaapelien ikääntymisen seuranta perustuu usein näytteiden ottamiseen. Näiden näytteiden ottaminen oikeilta paikoilta eli sieltä, missä rasitus on ollut kovinta, on elintärkeää ikääntymisen arvioinnissa. Esimerkiksi akkukäyttöisillä antureilla voi seurata lämpötilaa joustavasti ympäri voimalaitosta [1]. Myös lämpökamera-kuvauksilla saadaan tietoa paikallisista kuumista kohteista, eli niin kutsutuista hot spoteista. Lämpötilan ja säteilyn tason selvittäminen helpottaa näytekaapeleiden tai kaapelinäytteiden sijoituspaikan valinnassa. Useat voimalaitokset pitävätkin juuri tämän takia tarkkoja säännöllisesti päivitettäviä tietokantoja voimalaitoksen eri tilojen ympäristöolosuhteista. Ympäristöolosuhteiden arvioinnilla viitataan usein tämän työn lähdeaineistoissa hot spotien identifiointiin.

Loviisan voimalaitoksella esimerkiksi höyrystintilassa alasajon yhteydessä, lämpötilan ollessa vielä lähes käynninaikaisissa lukemissa, mitataan infrapunamittalaitteella eri kaapelien ja niiden reittien lämpötiloja. Pikkuhiljaa ollaan kuitenkin siirtymässä lämpökamerakuvaukseen. [4.]

## 2.2 Kelpoistaminen ja kiihdytetty ikäännyttäminen

Kaapeleiden kelpoistaminen tarkoittaa, että kaapelit osoitetaan vaatimusmäärittelyssä esitettyjen vaatimusten mukaiseksi käyttötarkoitukseensa ja -paikaansa. Kelpoistamisprosessissa arvioidaan kaapelin soveltuvuutta nojaten erilaisiin koestuksiin, tutkimuksiin ja käyttökokemuksiin.

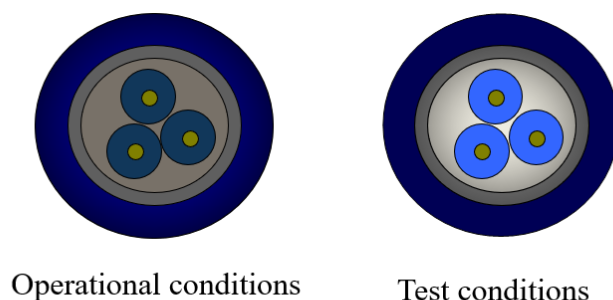
Kun uusia kaapeleita kelpoistetaan voimalaitokselle, niiden hyväksyttävää toimintaa asennuspaikan olosuhteissa kelpoistettavan eliniän aikana arvioidaan kiihdytetyn/keinotekoisena ikäännyttämisen kautta. Kiihdytetty ikäännyttäminen tarkoittaa, että kaapelia altistetaan erilaisille rasituksille, kuten korkealle lämpötilalle, säteilylle ja hapetukselle sillä tarkoituksella, että saadaan simuloitua ikäännytmistä oikeissa olosuhteissa. Laboratorio-olosuhteissa lämpötilat ja muut rasitukset ovat huomattavasti kovempia, jotta saadaan usean vuoden käyttöä vastaava ikäännyminen tapahtumaan viikoissa tai kuukausissa. Kun kaapeleita ikäännytetään ja testataan, ne yleensä jaetaan kolmeen kategoriaan: lämmöllä, säteilyllä ja näitä yhdistämällä ikäännytetty.

Kuinka kiihdytetty ikäännyttäminen ja kaapelien kelpoistaminen tulee tehdä, on selitetty IAEA:n NP-T 3.6 -dokumentissa *Assessing and managing cable ageing in nuclear power plants* [35].

Arrhenius-menetelmää käytetään, kun sovelletaan kiihdytettyä ikäännytmistä, se on matemaattinen kaava joka kuvaa kemiallisen reaktion nopeusvakion riippuvuutta lämpötilasta. Menetelmää ja yhtälön soveltamista kiihdytettyyn ikäännyttämiseen on tarkemmin kuvattu esimerkiksi IAEA tecdoc 1188 *Assessment and*

management of ageing of major nuclear power plant components important to safety [6].

**Diffusion limited oxidation. Possible effect of use of excessive temperatures or dose rates in accelerated ageing**



KS-2 Cable ageing seminar Olkiluoto March 2017

Kuva 2. Kaapelin kiihdytetyn ikääntymisen ongelmat. [5, s. 8]

Kiihdytetty/keinotekoinen ikäännyttäminen ei kuitenkaan ole täysin ongelmattonta. Esimerkiksi korkeat lämpötilat ja säteilytasot saattavat vaikuttaa pelkästään kaapelin vaippaan, mutta jättää lähes ennalleen kaiken kaapelin sisällä (ks. kuva 2). Tämä tulos ei ole suoraan verrattavissa todellisissa asennuspaikan olosuhteissa tapahtuneeseen ikääntymiseen.

Toinen huolenaihe keinotekoisessa ikäännyttämisessä on, että kaapelin arvioitu elinkaari voi olla lyhyempi kuin mitä se todellisuudessa on. Tämän takia ikääntymisen seurantaan käytetään muita menetelmiä joilla pyritään arvioimaan myöhemmin missä kunnossa kaapelit ovat.

Kelpoistamisprosessissa ei pelkästään arvioida kuinka pitkään kaapelit kestävät normaaleissa olosuhteissa, vaan niiden täytyy kestää elinikänsä loppuun, ja vielä sen jälkeen onnettomuustilanteesta. Kelpoistamistilanteessa käytetään usein LOCA-simulaatiota (Loss Of Coolant Accident, eli jäähdytteenmenetyksen onnettomuus), koska silloin ympäristörasitukset ovat kaapelin kannalta suurimmat, esimerkiksi kosteus ja korkea lämpötila heikentävät eristysresistanssia huomattavasti.

Keinotekoista ikääntymistä sovelletaan myös wear-out -menetelmässä, josta kerrotaan lisää kohdassa 2.5.4.

### 2.3 Ikääntymisen seurannan prioriteetit

Kaapelien ikääntymisen seurannassa tulee priorisoida kaapeleita, jotka ovat elintärkeitä voimalaitoksen toimivuuden kannalta. Nämä kaapelit ovat myös tyyppillisesti niitä, jotka ovat epäsuotuisimmissa paikoissa voimalaitoksella ja täten ovat altteimpia ikääntymiselle.

Reaktorirakennuksen suojakuoren sisällä ikääntymisenhallinta voi sisältää ympäristön ja kaapelien kunnonvalvonnan lisäksi kaapelien periodista korvaamista.

Koska reaktorirakennuksen kaapelit yleensä ohjaavat toiminnalle elintärkeitä komponentteja, niiden sähköisiä ominaisuuksia tutkitaan usein. Mutta koska sähköisten ominaisuuksien muutokset antavat usein puutteellisen kuvan kaapelien eristemateriaalin ikääntymisestä, tiloissa joissa on paljon ikääntymistä nopeuttavia tekijöitä (säteily, lämpö ja muita rasituksia kaapeleille), joudutaan ikääntymisen arviointiin soveltamaan muita menetelmiä. [6.]

### 2.4 Kaapeleiden yleisimmät polymeerimateriaalit

*PVC (polyvinyylidikloridi)* on yleisesti käytetty eriste- ja vaippamateriaali pienjännitetelekaapeleissa (PVC:tä ei suositella käytettäväksi suurjännitetelekaapeleihin). PVC on mekaanisesti kestävä muovi, vaikkakin sen lämmönkesto on heikohko. PVC on halogenoitu polymeeri, joka palaa huonosti, mutta palaessaan vapauttaa runsaasti savua ja myrkyllisiä kaasuja, kuten suolahappoa (HCl) [7]. PVC-kaapeleita on Loviisassa.

*PEEK (polyeetterieetteriketoni)* -muovilla on erinomaiset mekaaniset ja kemialliset kestokyvyt, jotka pysyvät ennallaan jopa korkeissa lämpötiloissa (260 celsiusastetta). PEEK-muovin dielektrinen lujuus on 20 kV/mm. PEEK-muovin huono puoli on korkea hinta. [8.] Loviisassa on PEEK-muovia sisältäviä kaapeleita.

*PPO:ta (polyfenyleenioksidi)* tai Norylia käytetään eristeenä. Sen lämmönkestävyys on maksimissaan 140 celsiusastetta, dielektrinen lujuus noin 20 kV/mm [9].

*EPR (etyleenipropyleenikumi)* on hyvin kestävä lämpöä (+110 celsiusastetta), hapetusta, otsonia ja muita ympäristövaikutuksia vastaan. EPR-kaapelit ovat taipuvia [38]. EPR-kaapeleita on Loviisassa.

*EPDM (etyleenipropyleenidieenikumi)* sietää jopa +110 celsiusasteen lämpötilaa, mutta suurin sallittu jatkuva käyttölämpötila voimakkaapeleissa on +85 celsiusastetta. EPDM-kumia sisältäviä kaapeleita on Loviisassa. [38.]

*EVAa (etyleenivinyyliaasettaatti)* käytetään kaapelin vaippana. Taipuvuutensa ja helpon prosessointikyvyn ansiosta, EVA:lla ollaan pystytty korvaamaan monia kumi ja vinyylituotteita sähköisissä sovelluksissa. Sen maksimilämmönkestävyys on +90–120 celsiusastetta kaapeleissa, ja dielektrinen lujuus 27 kV/mm. [10; 38.] EVA kaapeleita on Loviisassa.

*SiRiä (silikonikumi)* käytetään joskus kaapeleissa esimerkiksi Loviisassa tuotemerkeillä SSJS ja Monette. Se toimii laajalla lämpötila-alueella, -60 - +250 celsiusastetta, hetkellisesti jopa +300 C. Sen eristysresistanssi on 1-100 TΩ/m. [11; 30.]

*PE (polyeteeni)* käytetään yleensä kaapelien johdineristeenä. Polyeteenin lämmönkesto on -60 celsiusasteesta +80 celsiusasteeseen. Sen dielektrinen lujuus riippuu onko se vaahdotettua vai kiinteätä, mutta yleensä on verrattavissa PEXin dielektriseen lujuuteen eli 20 – 30 kV/mm. Polyeteenin jäykkyys on

riippuvainen sen tiheydestä, yleisimmät variaatiot ovat LD/HDPE (engl. low density/high density polyethylene). [36; 37.]

*CSPE (klorosulfonoitu polyeteenikumi)* kulkee nimellä Hypalon, ja sitä käytetään kaapelinvaipassa. Hyvän jopa +150 celsiusasteeseen ulottuvan lämmönkestävyyden, ja klooripitoisuuksien ansioista (20 - 45%) CSPE kestää hyvin UV säteilyä, otsonia ja kemiallisia rasituksia. Palaessa CSPE kuitenkin vapauttaa suolahappoa (HCl), rikkidioksidia (SO<sub>2</sub>) ja hiilimonoksidia (CO) jotka ovat myrkyllisiä. [12.] CSPE eristeisiä kaapeleita on Loviisassa.

*XLPE tai PEX (ristisilloitettu polyeteeni)* on sähköisesti, mekaanisesti ja kemiallisesti kestävämpää kuin tavallinen polyeteeni [7]. PEX-muovia käytetään kaiken tyyppisissä kaapeleissa, mutta se soveltuu parhaiten keskijännitekaapeleihin. PEX-muovi on yleisin eristemateriaali. PEX-kaapeleita on Loviisassa.

*Polyolefiini ja XLPO (ristisilloitettu polyolefiini)* on yhteisnimitys polyeteenille (PE) ja polypropeenimuoveille (PP). XLPOlla tässä työssä tarkoitetaan yleensä XLPE:tä, koska polyeteeni sisältyy olefiini kategoriaan. [16.]

*EFTEä (etyleeni-tetrafluoroetyleeni)* myydään tuotemerkillä Tefzel, ja sitä käytetään joskus eristeinä. EFTE:llä on erinomainen lämpötilojen kestävyys, se kestää -200 - +150 celsiusastetta, sillä on hyvä kemiallinen sietokyky eikä se tuota palaessaan paljoa savua. EFTE:n dielektrinen lujuus on 14,6 kV/mm. [13.]

## 2.5 Ikääntymisen seurannan menetelmät

Ikääntymisen seurannan tai arvioimisen tekemisessä on tärkeä selvittää ensin ikääntymisen korrelaatiota jonkin toiminnallisen ominaisuuden kanssa, jotta käyttöiän umpeutumislle on määriteltävissä jokin raja-arvo. Tärkeä on pyrkiä selvittämään, mitkä ominaisuudet kaapelin eristeessä tai vaipassa muuttuvat niin lineaarisesti kuin mahdollista ikääntyessä.

Seurattavaksi valittavien materiaalimuutosten tai ominaisuuksien tulee olla sellaisia, että niitä voidaan simuloida kiihdytetyssä ikääntymisessä. Ideaalitilanteessa menetelmää voidaan käyttää kaikille eri polymeereille ja myös vaikeissa paikoissa. Todellisuudessa tämä ei aina toteudu, koska eri polymeerit käyttäytyvät eri tavoin ikääntyessään, ja joka paikkaan ei voimalaitoksilla pääse tekemään testejä. [15.]

Ikääntymisen seuranta kannattaa aloittaa erottamalla laiteviat kaapelivioista. Yksi tapa erottaa nämä kaksi on Loop Current Step Response (LCSR) -testi. LCSR-testi voidaan suorittaa paikan päällä lähinnä resistanssiin perustuvien lämpötilamittarien kaapelien ongelmien havaitsemisessa. Testissä lämmitetään anturia pienellä 20–50 mA:n virralla, jonka tuloksena saadaan lämpötilan muutos ajan funktiona. Tulosten avulla antureita kalibroidaan uudelleen. [34.]

Kaapelien ikääntymisen arvioinnissa käytetään usein ensisijaisesti yksinkertaisia, passiivisia menetelmiä, joita kutsutaan myös kvalitatiivisiksi menetelmiksi. Nämä voivat olla aistinvaraisia tutkimuksia, joiden avulla etsitään kaapeleista halkeamia, paisumia, värin muutoksia tai muita ikääntymiseen viittaavia oireita. Laitteiden epänormaali käyttäytyminen voi myös antaa viitteitä kaapeleiden ikääntymisestä. [16.]

Passiivisten arviointimenetelmien lisäksi tehdään myös aktiivista arviointia. Näihin kuuluu esimerkiksi erilaiset sähköiset, mekaaniset ja kemialliset testit joita on eritelty seuraavissa alaotsikoissa.

### 2.5.1 Mekaaniset testit

Tässä työssä käsitellään kahta erilaista mekaanista testausmenetelmää, indenter modulus (suomeksi viitataan indenter modulus -testin tuloksiin painaumalla tässä työssä), joka mittaa materiaalin kovettumista, ja vetokoetta, jolla mitataan murtovenymän sekä -lujuuden muutosta. Murtovenymän enimmäismuutoksen



mittaaminen on yleisesti käytetty tapa määrittää kaapelin kuntoa, koska sille on asetettu selkeä läpäisykriteeri. Indenter modulus mittauksissa kriteerit taas vaihtelevat materiaalien välillä, mutta on kätevämpi testimenetelmä, koska tulosten saaminen ei edellytä kaapelin tai kaapelinäytteen rikkomista.

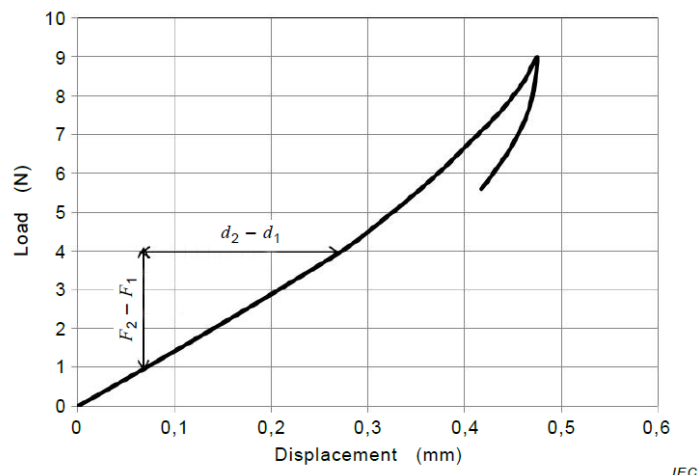
### Indenter modulus

Indenter modulus tarkoittaa kaapelin eristeen tai vaipan lujuuden mittaamista. Koska monet kaapeleissa käytetyt polymeerit kovettuvat ikääntyessään, testi on tuottanut luotettavia tuloksia joillakin materiaaleilla kun niitä seurataan kaapelin eliniän aikana, kuten CSPE, SiR ja EPR (ks. kuva 4). Kuvassa näkee murtovenymän (punaisella) ja indenter moduluksen (sinisellä) kehityksen keinotekoisesti ikäännytetyllä kaapelilla. Murtovenymän enimmäismuutoksen tulokset annetaan prosentteina, indenter moduluksen newtoneissa per millimetri. [17; 3.]

Testissä saadaan tuloksena kuvaaja, joka lasketaan kaavalla

$$IM = \frac{F_2 - F_1}{d_2 - d_1}$$

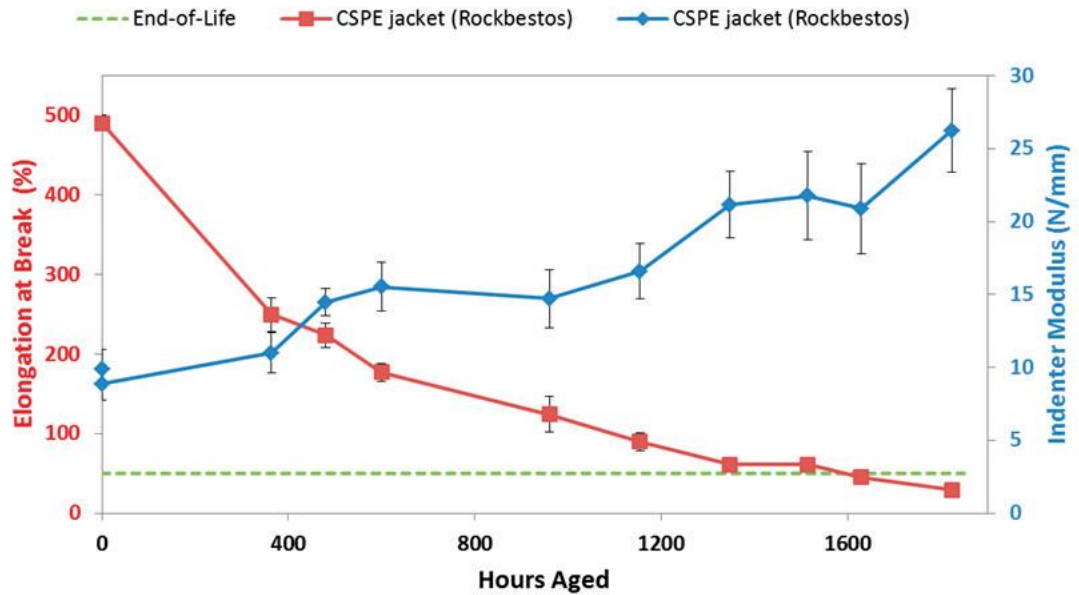
missä  $F_1 = 1 \text{ N}$ ,  $F_2 = 4 \text{ N}$  ja  $d_n$  on vastaava painauma-arvo millimetreissä (ks. kuva 3). [17.]



Kuva 3. Painaumakokeen käyrä. [17, s. 17]

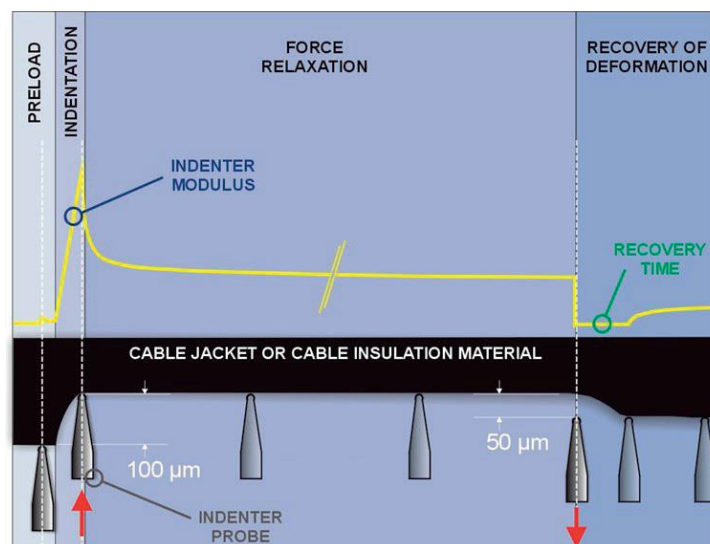
Testi on mahdollista tehdä kaapeleiden asennuspaikalla kannettavalla laitteella, jolla testataan kaapelin vaippaa epäsuotuisammassa kohdassa. Vaihtoehtoisesti voidaan ottaa näytteitä analysoitavaksi laboratorioissa. Indenter modulus -testin vahvin etu on, että se ei edellytä kaapelin rikkomista.

Indenter modulus -testeissä suositellaan käyttämään voima-alueita (engl. force range) syvyysalueen (engl. depth range) sijaan, koska vanhoissa kaapeleissa syvyysalue testi voi vaurioittaa eristettä ja antaa myös huonompia tuloksia (ks. kuva 6.) Näiden kahden ero on se, että voima-alueella on asetettu raja-arvot mittauksessa käytetylle voimalle, yleensä 1 – 4 N. Tuorempien tutkimustulosten mukaan kuitenkin 1 N alaraja saattaa olla liian korkea tarkkojen tulosten saamiseksi. Syvyysalue mittauksessa rajana toimii etäisyys, kuinka syväle mittapuu uppoaa eristeeseen. Kuten edellä mainittiin, ongelmaksi saattaa muodostua se, että vanhat eristeet saattavat haljeta, koska syvyysalue mittaus ei rajoita käytettyä voimaa. [3.]

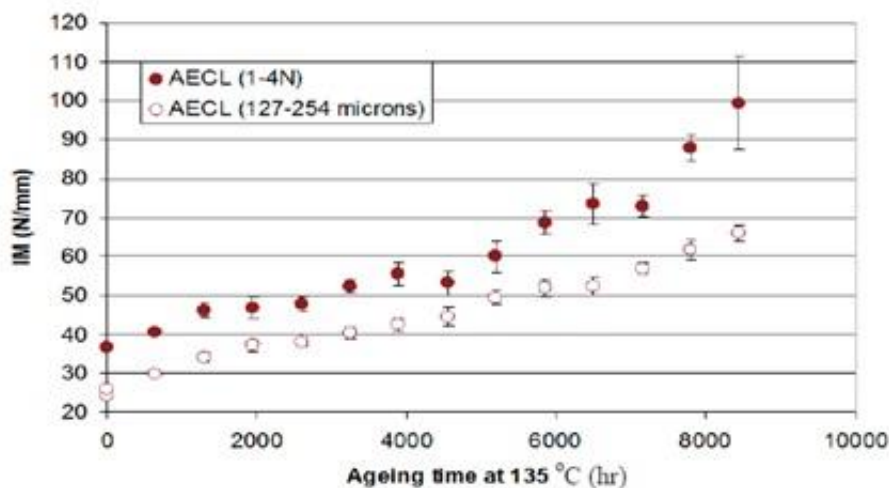


Kuva 4. Indenter modulus -testin korrelaatio murtovenymän (EAB) kanssa kun kyseessä on CSPE vaippa, keinotekoisesti ikäännytetty. [3, s. 25]

Painokokeen palautumisajan mittaus (engl. recovery time) on vastaavanlainen testi kuin indenter modulus, mutta painauman sijaan mitataan kuinka nopeasti materiaali palautuu alkuperäiseen muotoonsa testipuikon painamisen jälkeen (ks. kuvat 5 ja 7). Tätä mittausta sovelletaan kun kyseessä on ristosilloitettuja polymeerejä. [15.]



Kuva 5. Palautumisaikatesti. [15, s. 49]

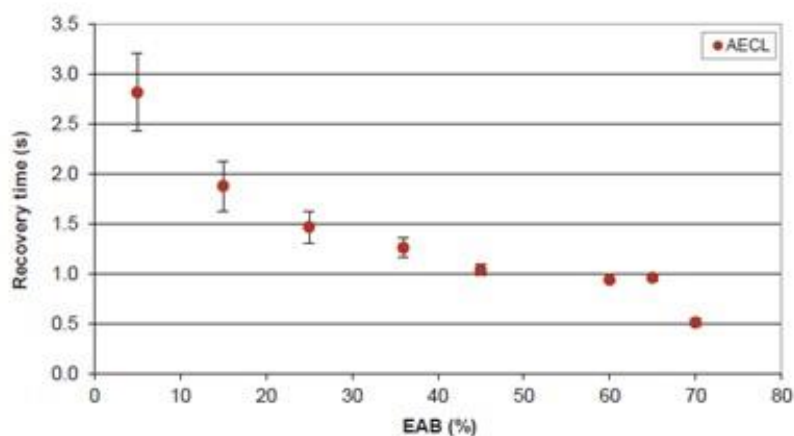


Kuva 6. Voima-alue (täytetyt pilkut) ja syvyysalue (tyhjät pilkut) ero kiihdytetysti ikäännytyssä EPR kaapelissa. [3, s. 48]

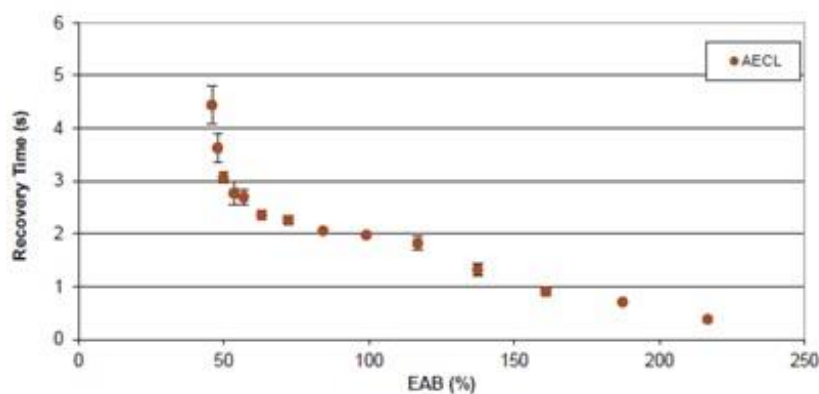
Tutkimukset ovat osoittaneet, että ainakin hypalon- ja neoprene-kaapeleilla, kun modulus arvot (niin lämpökäytyneillä kuin lämpö- ja säteilyikäntyneillä kaapeleilla) nousevat yli 15 N/mm:n, vastaa ikäntyminen sitä, että vetokokeessa EAB arvo laskee alle 50 %:n. [3; 18.]

Krškon voimalaitoksella Sloveniassa tutkittiin hypalon-kaapeleita tavoitteena löytää tarkka arvo IM -testille, jonka jälkeen voi todeta, että kaapeli on tullut elinikänsä päähän. Tutkimuksen lopputulos oli, että arvoilla yli 80 N/mm kaapeli tulee vaihtaa. [19.]

Painauma- ja palautumisajan mittaukset kumpikin vaativat yleensä vähintään vertausta uuteen sekä keinotekoisesti ikäännytettyyn kaapeliin tuottaakseen luotettavia tuloksia. Standardi IEC 62582 Electrical equipment condition monitoring methods vaatii raportointiin myös kaapelin elinaikana tehtyjä mittauksia, jos sellaisia on olemassa. Uusille kaapeleille raportoinnissa tulee selvittää, millaisissa olosuhteissa ne on säilytetty. [17.]

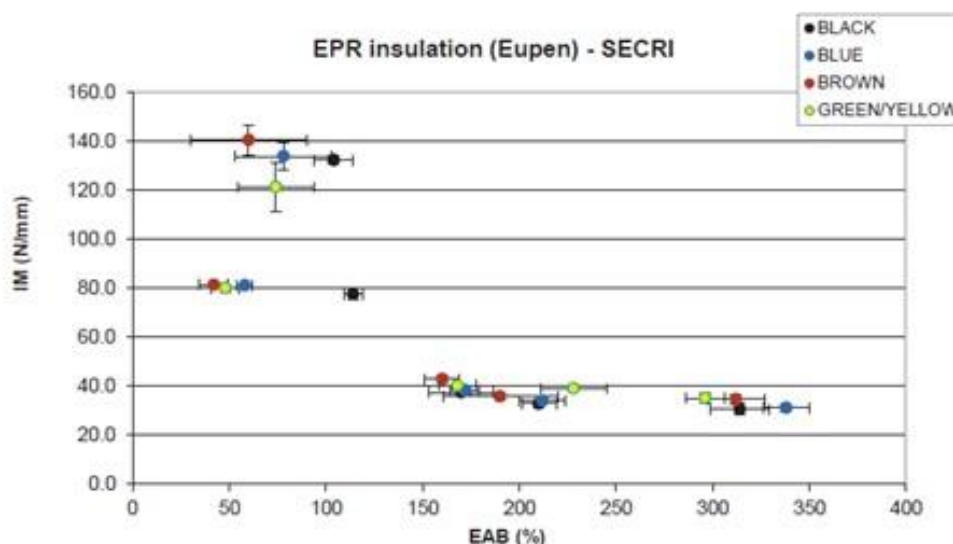


Kuva 7. Palautumisajan mittauksen korrelaatio murtovenymän kanssa XLPO-vai-palle. Kun palautumisaika lähenee sekuntia voidaan todeta, että kaapelin EAB lähenee 50 %. [3, s. 57]



Kuva 8. XLPO-eristeen palautumisajan korrelaatio murtovenymän kanssa, kun palautumisaika nousee yli kahteen sekuntiin murtovenymä lähestymään 50 % [3 s. 89.]

Selkeiden läpäisykriteerien määrittäminen on ollut vaikeaa, sillä moni polymeeri-materiaali käyttäytyy eri tavoin, ja jopa saman materiaalin kohdalla voivat erilaiset tekijät muuttaa tuloksia, kuten materiaalin väri (ks. kuva 9).



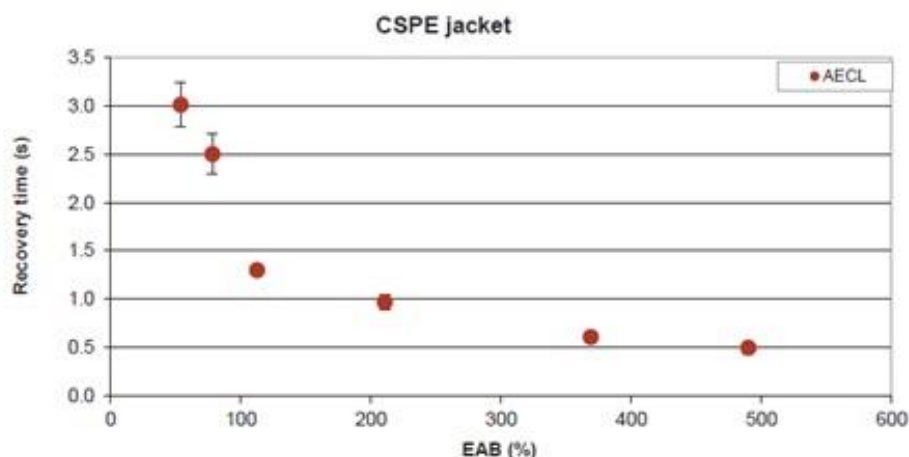
Kuva 9. Indenter modulus ja murtovenymän korrelaatio EPR-eristeiselle Eupen kaapelille. Suurimmat muutokset tapahtuvat murtovenymän alittaessa 150 %. Eristemateriaalin värillä on merkitystä tuloksiin [3 s. 59.]

Taulukko 1. Eristeen ja vaipan arvoja Changzhou EPR-kaapelille [3].

	Changzhou	
Indenter Modulus (EPR)	Eriste	Vaippa
Kun EAB on noin 50%	55	35
IM yksikkönä N/mm	58	44
	60	50
	65	40
	66	
	67	
Keskiarvo	61,83	42,25

Karkeasti katsottuna taulukosta 1 voidaan todeta, että kun EPR-vaipan arvo ylittää 30 N/mm kannattaa harkita jatkotestausta.

Palautumisaikamittauksissa ollaan havaittu, että arvot yleensä lähtevät nopeaan nousuun sen jälkeen kun murtovenymä laskee alle 100 % CSPE-muoville (ks. kuva 10.) Ristisilloitetulle polyolefiinille (XLPO) taas arvojen nousu ei ole yhtä dramaattista, mutta huomattavaa etenkin kun murtovenymä lähenee 50 % (ks. kuva 8.)



Kuva 10. Palautumisajan korrelaatio murtovenymän kanssa CSPE-vaipalle. Kun murtovenymä laskee alle 100 % palautumisaika rupeaa kasvamaan nopeasti. [3 s. 67.]

#### Murtovenymän enimmäismuutos

Murtovenymän enimmäismuutos (engl. Elongation at Break) -testi tehdään niin, että kaapelista tehtyä näytepalaa venytetään ja mitataan venymää ennen kuin kaapeli murtuu. Venymä ilmoitetaan prosenteissa. Polymeerien molekyyliarakenteessa ikääntyessä tapahtuvien muutosten takia kaapelien murtovenymän enimmäismuutos pienenee. Testiä tehdessä yleensä myös murtolujuusarvo tallennetaan (engl. tensile strength, TS).

Tämä testi on hyödyllinen yleisesti ottaen kaikille, paitsi kuiduilla vahvistetuille kaapeleille. Esimerkiksi PEEK ei ole osoittanut mitään käytännöllisiä muutoksia ikääntyessään muilla menetelmillä kuin murtovenymällä [3]. EAB on myös huono testi sellaisille materiaaleille, jotka eivät haurastu lineaarisesti (kuten XLPE). Testin haittana on se, että näytekappale lopulta tuhoutuu.

Testiin voi käyttää kaapeleita joita on keinotekoisesti ikäännytetty laboratoriossa tai vaihtoehtoisesti kaapelinäytelaatikosta, kunhan näyte on vähintään 10 mm kaapelin päädyistä [17].

EAB-testi on yleisin tapa määrittää kaapelien ikääntymistä tällä hetkellä (2021) [4]. Testissä raja-arvona pidetään 50 %, mutta tarvittaviin toimenpiteisiin, kuten kaapeliuusintoihin tai tarkasteluvälin tihentämiseen on suositeltavaa ryhtyä jo ennen raja-arvon saavuttamista, esimerkiksi 100 %:n kohdalla.

### 2.5.2 Kemialliset testit

Kemiallisten testien etu on useimmiten se, että tarvitaan pelkästään pieniä näyttekappaleita. Näiden kerääminen jopa käytössä olevista kaapelien vaipoista ja eristeistä ei yleensä pitäisi tuottaa ongelmia niiden toimivuudelle.

Testeistä saa useimmiten selville varhaisia ikääntymisen merkkejä, mutta yleensä kaapelin eliniän loppupäässä mittaustulokset eivät juurikaan enää muutu. Tällainen testi on esimerkiksi hapetuskestävyyden mittaaminen.

Tässä työssä käsitellään myös liukenemistekijän mittaamista, jolla on selkeä läpäisykriteeri joillekin polymeerimateriaaleille.

#### Hapetuskestävyys aika/lämpötila

Oxidation induction eli hapetuskestävyys aika/lämpötila on laboratorio testi joka tehdään kaapelista otettavalle näytteelle. Oxidation induction time (OIT) -testissä mitataan aikaa ja oxidation induction temperature (OITP) -testissä lämpöä. Aikaan perustuvassa testissä mitataan, kuinka kauan kestää materiaalin sulamisen ja hapettumisen alkamisen välillä, kun lämpötilaan perustuvassa mitataan, missä lämpötilassa hapettuminen alkaa.

Oksidaatio eli hapettuminen on yksi yleisimmistä ikääntymisen oireista polymeereissä [17].

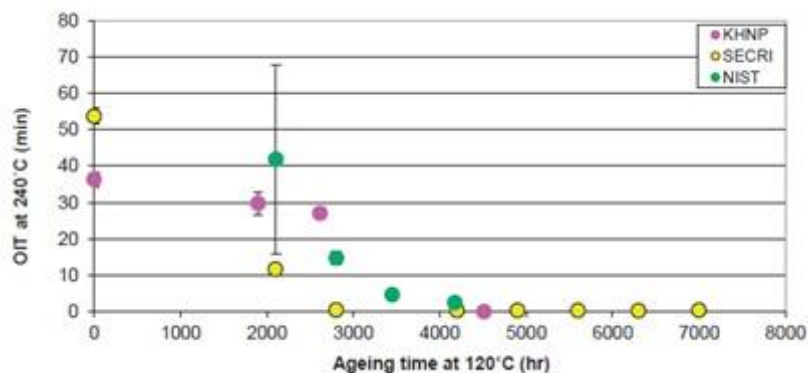


Näytteen kooksi on perinteisesti kehoitettu käyttämään 10 mg:n näytettä, mutta modernien instrumentaatioiden ansiosta riittää nykyään vain 5 mg näyte. Luotettavat tulokset vaativat yleensä useampia mittauksia, joten voidaan olettaa että menetelmä tarvitsee noin 30 mg:aa kaapelimateriaalia. [3; 18.]

OIT/OITP-testi soveltuu pääasiassa polyeteenille (PE, PEX), EPR-kumille sekä EVA-materiaaleille. Testiä ei yleensä sovelleta PVC- tai CSPE-muoveille, koska testissä vapautuu syövyttäviä aineita jotka saattavat tuhota testityökaluja. Jos kuitenkin käyttää OIT/OITP -testiä esimerkiksi PVC-näytteelle, näytteen tulee olla maksimissaan 2 mg. PVC-näytteille voidaan vastaavasti tehdä dehydrokloorinaatioaika testejä.

Testin käytännön etu on, että se ei tuhoa kaapelia. Testiin riittää pieni näyte vai-pasta tai eristeestä, jonka voi ottaa esimerkiksi jakorasian sisältä mikäli näyte-kaapeleita ei ole saatavilla. Aina tulee kuitenkin huomioida, että näytteenotosta ei aiheudu haittaa voimalaitokselle tai laitteille, jos toiminnassa olevasta kaapelista otetaan näytteitä. [17.]

OIT/OITP -mittaus on toimiva menetelmä antioksidanttien mittaamiseen, mutta mittatuloksesta on hankala ennustaa jäljellä olevaa elinikää. Hyväksytyt/hylätyt raja-arvoja on hankala määrittää, koska materiaalit säilyttävät yleensä mekaaniset ominaisuutensa siihen asti kunnes antioksidantit on kulutettu. Mutta tuloksesta voidaan vetää karkeita johtopäätöksiä, ja hapetuksen seuranta on hyvä lisä muun ikääntymisenseurannan ohelle koska se antaa hyviä aikaisia varoituksia (ks. kuva 11.)



Kuva 11. OIT-testin tuloksia lämmöllä keinotekoisesti ikäännytetylle EVA-vai-palle. Tuloksista näkee aikaset ”varoitukset” ja sen jälkeen tapahtuva ha-petuskestävyyden romahtaminen. [3, s 50]

OIT/OITP -testi antaa usein varhaisia varoituksia ikääntymisestä, mutta ei ole niin luotettava ikääntymisen myöhäisempien vaiheiden arvioinnissa. Testin etu on, että se vaatii hyvin vähän kaapelimateriaalia. Huono puoli kuitenkin on, että sen suorittamiseen sekä tulosten tulkitsemiseen vaaditaan kemian alan asian-tuntijaa. [15; 18.]

Monessa paikassa OIT/OITP -testejä tehdään pelkästään kaapelien kelpoistuk-sen aikana, eikä varsinaisesti hyödynnetä ikääntymisen seurannassa.

### Tiheysmittaukset

Tiheysmittaukset perustuvat siihen, että polymeerien tiheys yleensä nousee ikääntymisen myötä. Tiheyden muutos on kuitenkin joillakin materiaaleilla hyvin pientä tai epälineaarista, joka aiheuttaa vaikeuksia menetelmän soveltamiselle ikääntymisen seurantaan.

Tiheysmittaukset voidaan toteuttaa näytteille, ja ne tehdään niin, että näytekap-paleen painoa mitataan ilmassa ja nesteessä (yleensä tislatussa vedessä tai al-koholissa).

Tiheysmittaus ei tuhoa kaapelia, koska pieni, noin gramman kokoinen näyte-kappale riittää. Tiheysmittausten tulee jokaisen polymeerin kohdalla korreloida EAB-mittausten kanssa. EPR- ja CSPE-muovit soveltuvat hyvin tähän mittaukseen, kun taas XLPE/PEX eivät yhtä hyvin. [15.] Tiheysmittausten tekeminen on hyvin helppoa Arkhimedes -menetelmän avulla.

Tiheysmittausten luotettavuus on kuitenkin osoittautunut kyseenalaiseksi, sillä kaapeleilla voi olla niin suuria paikallisia tiheyseroja, että ne kumoavat ikääntyessä tapahtuvat tiheyden muutokset. Tiheyden muutokset tapahtuvat myös äkillisesti ja pääosin vasta silloin, kun kaapeli on elinikänsä lopussa (induction time -käyttäytyminen), mikä edelleen hankaloittaa menetelmän soveltamista ikääntymisen seurantaan. [18.]

#### Geelisisältö/liukenemistekijä

Polymeerien ikääntyessä geelisisältö ja liukenemistekijä (engl. solvent uptake factor) muuttuvat. Kumpikin parametri saadaan samasta kokeesta. Polymeerieristeissä, jossa ristisilloitus (engl. cross-linking) on pääsääntöinen ikääntymismekanismi, ja ne sijaitsevat paikoissa, joissa on korkea säteilytaso, tämä testi on osoittautunut hyödylliseksi. Ikääntymisenhallintaan tästä testistä on apua, jos sitä käyttää muiden testien tukena määrittämään, koska kaapeli tulee vaihtaa. [3.]

Liukenemistekijän/geelisisällön selvittäminen ei tuhoa kaapelia, koska pieni näyte-kappale riittää.

Sandia-aineiston mukaan vuonna 2005 spekulointiin, että testillä voisi olla yleinen läpäisykriteeri (kuten EAB:n 50 %) ainakin hypalon-, neoprene- ja klorinoiduille polyeteeni (CPE) -kaapeleille. Läpäisykriteeri oli se, kun liukenemistekijä laskee alle arvon 1,6. XLPO- ja EPR-kaapeleille testin tulokset ovat hyödyllisiä pelkästään lähellä kaapelin eliniän loppua. [18.]

### 2.5.3 Sähköiset testit

Sähköisten testien etu kemiallisiin ja moneen mekaaniseen verrattuna on se, että niihin ei tarvitse ottaa näytteitä. Joissakin testeissä, kuten LIRA (Line Impedance Resonance Analysis) ei tarvitse edes välttämättä kytkeä kaapelia irti. Tämän lisäksi useasti testijännite on hyvin pieni, joten ei tarvitse huolehtia siitä, että laitteistot tai kaapelit kärsivät vaurioita.

Toinen merkittävä etu on, että kerralla saadaan testattua koko kaapeli. Tämän takia sähköisiä testejä käytetäänkin usein hot spotien paikantamiseen.

Sähköisten testien haittapuolena on se, että kaapelien vaippaa on vaikea tutkia niiden avulla. Eristeen kunnosta saadaan kuitenkin niiden avulla tietoa.

#### Eristysresistanssi

Eristysresistanssimittaukset suositellaan tekemään DC-jännitteellä, koska AC-jännitteitä käytetään pääasiassa kaapelin toiminnallisuuden varmistamiseen.

Eristysresistanssimittauksessa tuloksena saadaan DC-virta, joka koostuu neljästä komponentista:  $I_s$  (surface leakage current),  $I_i$  (insulation leakage current),  $I_p$  (polarization absorption current) ja  $I_c$  (capacitive charging current).

Testi tehdään 500 VDC:n jännitteellä suurimmalle osalle kaapeleita. Koska joidenkin tietoliikennetekniikan kaapelien eristeet voivat vaurioitua korkeista jänniteteistä, näille suositellaan 100 VDC:n jännitettä.

Eristysresistanssimittauksia tehdään tyypillisesti esimerkiksi LOCA (Loss Of Coolant Accident) -testien aikana, jolloin korkeat lämpötilat ja ilmankosteus heikentävät kaapelien eristysresistanssia. [17.]

Eristysresistanssimittauksien tuloksia voidaan hyödyntää myös Polarisaatio Indeks- (PI), Polarization Ratio- (PR) tai Dielectric Absorbtion Ratio- (DAR) -mittauksissa. Nämä edellä mainitut mittaukset vaativat tarkkoja tuloksia eristysresistanssimittauksista, joita on yleensä hankala saada. Tämän takia PI- ja DAR-mittauksia ei aina pidetä luotettavina. [16.]

Eristysresistanssimittauksissa tavanomaisesti vaaditaan yli 30 M $\Omega$ /km:n arvo. Jos arvo alittaa tämän tulee kaapelin kuntoa tutkia muilla menetelmillä [21].

### Time Domain Reflectometry

Time Domain Reflectometry (TDR) -mittausta käytetään johtimen, liitoksen ja eristeen kunnon arviointiin. TDR-testi perustuu signaalin heijastumiseen kaapelissa. Testi on hyvä työkalu määrittelemään missä kohtaa kaapelia ongelmia esiintyy, ja testiä on käytetty paljon ydinvoimalaitoksissa ongelmien havaitsemiseen asennuspaikalla. [3.]

TDR-testin tulos ei itsessään kerro mitään kaapelin eristeen ikääntymisestä, mutta jos kaapelin elinaikana tekee useita TDR-testejä ja näiden tulokset rupeavat jossain vaiheessa eroamaan toisistaan huomattavasti tai tulokset eroavat kelpoistamis- ja asennusvaiheessa tehdyistä mittauksista, voi kaapelin ikääntyminen olla syy. Testi kertoo lähinnä paikallisista ongelmista, joita kannattaa tutkia lisää.

Kaapelien suoja (signal isolation) voidaan testata Signal leakage TDR (reverse TDR) -testillä, eli TDR-signaali laitetaan häiriösuojaan ja tutkitaan missä kohdissa se peittää [16].

TDR-mittauksia käytetään useimmiten neutronivuoantureiden (NIS) kaapeleissa.

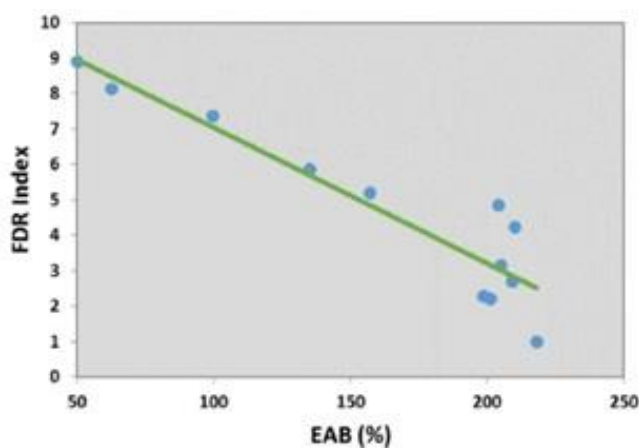
Testi ei tuhoa tai vahingoita kaapelia, mutta kaapeli tulee kytkeä irti testin ajaksi.

## Frequency Domain Reflectometry

Frequency Domain Reflectometry -testi on vastaavanlainen testi kuin TDR, FDR-testiä käytetään paikallisten vikojen paikantamiseksi voima- sekä signaali-kaapeleissa (ks. kuva 13). Testissä käytetään kahta johdinta signaalin siirtolinjana, jonka avulla voidaan etsiä esimerkiksi muutoksia kapasitanssissa ja impedanssissa. Testijännite on matala, joten se ei aiheuta vaaraa henkilöstölle tai laitteille, eikä kaapelia tarvitse kytkeä irti muuta kuin siitä päästä, jonne testilaitteisto liitetään.

FDR-testin avulla voidaan selvittää ongelmia niin eristeessä, kuin liittimissä ja johtimissa. Mutta pelkästään vaipassa tapahtunutta ikääntymistä ei voi FDR-testeillä havaita. Heijastunut signaali voi matkustaa kilometrejä ilman että se kokee samanlaisia häiriöitä kuten TDR.

Testi ei tuhoa tai vahingoita kaapelia, mutta se tulee kytkeä irti testin ajaksi. [24; 33.]



Kuva 12. FDR-testin korrelaatio murtovenymän kanssa, laboratoriotestien tuloksia lämpöikäännytetylle kaapelille Yhdysvalloista [31 s. 9.]

Oyster Creekin ydinvoimala Yhdysvalloissa selvitti vuonna 2017 laajasti FDR-tekniikan käyttöä ikääntymisenhallintamenetelmänä, ja laboratoriotestien avulla onnistuttiin luomaan arvoja, jotka korreloivat EAB-testien kanssa (ks. kuva 12). Yleensä FDR-testien tuloksia pidetään ns. trendattavina (eli niitä tulee verrata

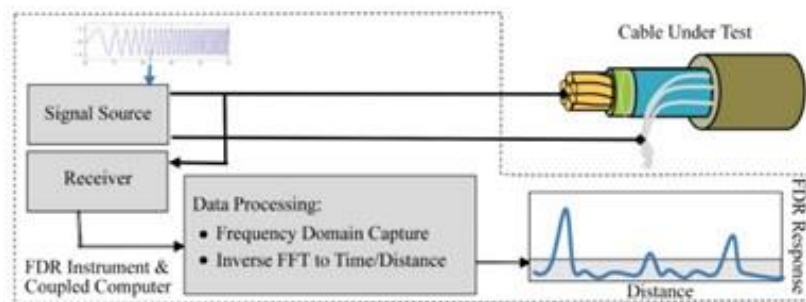
edellisiin mittaustuloksiin), mutta koska kyseisellä voimalaitoksella ei ollut aiempaa dataa jouduttiin turvautumaan läpäisykriteerien luomiseen. Näitä kriteereitä luotiin ja ikääntymistä arvioitiin vertaamalla mittaustuloksia höyrytintilan kaapeleista valvomon kaapeleihin. FDR- sekä muut sähköiset testit ovat nykyään osa Oyster Creekin ikääntymisenhallintaohjelmaa. [31.]

TABLE 2. FDR test and simulation conditions and observations

Condition	Observation
200 ft. undamaged cable simulation	Unrealistic without noise.
200 ft. cable with 1 inch of insulation removed from one conductor simulation with and without noise	Detectable, but signal level similar to noise level. Implies OK to compare to baseline, but difficult without baseline.
200 ft. cable with 6 inches of insulation removed from one conductor simulation with and without noise	Signal is slightly larger, but conclusion is similar to 1 inch removed simulation as above.
350 ft. cable with two 180-degree reversals (without extremely small bend radii) at 145 and 230 ft.	Cable reversal locations observed. Indicates signal is sensitive to cable shape.
350 ft. cable with 2.5 inches of jacket removed at 300 ft.	No difference in before and after jacket removal.
350 ft. cable with 2.5 inches of insulation removed at 300 ft.	Removed insulation detectable, but similar size signal to noise. Would not be detectable without baseline.
Shielded 14AWG stranded cable (compared from EPRI report) with abraded shield insulation	Shielded cable produced much lower noise. Cable damage clearly detectable independent of baseline except at extreme cable ends where blind zone expected.

Kuva 13. Eri vikoja kaapeleissa ja FDR-testin tuloksia. [22, s. 8]

FDR-testit ovat osoittaneet hyviksi etenkin paikallisen lämmön aiheuttaman ikääntymisen havaitsemisessa, mutta testeistä voi myös päätellä koko kaapelin yli tapahtunutta ikääntymistä. Tutkimusten mukaan parhaimmat tulokset saatiin kun käytettiin yli 200 MHz:n kaistanleveyttä. [33.]



Kuva 14. FDR-mittauksen kytkentä käytännössä. [33, s. 4]

## Line Impedance Resonance Analysis (LIRA)

LIRA-mittauksilla etsitään vikakohtia kaapeleista ja tutkitaan kaapelin eri ominaisuuksia. Mittaus vaatii referenssikaapelin joka on samaa tyyppiä kuin tutkittava kaapeli mittauksen tarkkuuden maksimoimiseksi. LIRA-laite määrittää referenssikaapelista kaapelityypin VR-arvon (velocity rate), joka kertoo sähkömagneettikentän nopeudesta kaapelissa suhteessa valonnopeuteen tyhjiössä.

VR-arvon määrittämisen jälkeen tutkittavasta kaapelista saadaan mitattua impedanssi, induktanssi sekä kapasitanssi. LIRA-analysaattori antaa kuvaajan, jossa nk. hot spotit näkyvät. Laite reagoi kaikkeen poikkeavuuteen kaapelin normaaleista dielektrisistä ominaisuuksista, niin vikoihin kuin liitoksiin. Siksi on tärkeää, että ennen mittaustulosten tulkintaa tiedetään, missä kohtaa kaapelia on liitoksia, jotta voidaan erottaa normaalit poikkeavuudet vioista. [23.]

LIRA-mittauksia kannattaa tehdä heti kun kaapeli on asennettu, jotta saadaan kaapelin ”sormenjälki” tallennettua laitteen tietoihin. Tätä sormenjälkeä käytetään myöhemmin, kun tehdään mittauksia vertailuarvona.

LIRA-tulokset ovat aina suhteellisia tuloksia, joten mitään yleisiä läpäisykriteerejä menetelmälle ei voida luoda. Myös tuloksista tulee pystyä suodattaa hot spotit esimerkiksi liitoksista ja läpivienneistä, koska kummatkin näyttäytyvät piikkeinä käyrissä.

LIRA-testin etuja on, että sillä voi löytää hot-spotteja, se antaa jotain viitettä kaapelin yleisestä kunnosta eikä kaapelia tarvitse kytkeä irti testin ajaksi. Testissä laite käyttää 5 V:n testisignaalia. Mittauksen haittapuolena on, että kaapelit joissa on useita johtimia ovat tuottaneet ongelmia tarkkojen tulosten saamiseksi.

LIRA-mittausten yhdistäminen esimerkiksi lämpökameramittauksiin on tuottanut lupaavia tuloksia hot-spottien identifioimiseksi, tällaista menetelmää on esimerkiksi kokeiltu Ringhalsin ydinvoimalaitoksella Ruotsissa.



## Tangentti-delta mittaukset

Tangentti-delta -menetelmä (TD) tai dissipation factor, mittaa tangenttikulmaa resistiivisen ja kapasitiivisen virran välillä vaihtovirtaa käytettäessä. Mittaus kertoo kaapelin eristeen kunnosta. Testi voidaan tehdä joko nostamalla porrastetusti AC-jännitettä 1,2 kertaa suuremmaksi kuin kaapelin nimellisjännite tasaisella taajuudella (kuten 50 Hz) tai matalalla jännitteellä vaihtaen taajuutta 20 kHz:iin asti.

Suositteluaan, että tan-delta -mittaukset tehdään niin laajalta taajuusalueelta kuin mahdollista, koska etukäteen ei voi tietää, mitkä taajuusalueet ovat tärkeimpiä ikääntymisen havaitsemisen kannalta. [3.]

Tan-delta mittauksia sovelletaan yleensä eri voimalaitoksilla keskijännitekaapeleille, ja niitä tehdään yhdessä osittaispurkausmittausten kanssa. Testi ei tuhoa kaapelia mutta se pitää kytkeä irti mittausten ajaksi.

## Vaihtovirran impedanssimittaukset

Vaihtovirran impedanssimittauksia voidaan hyödyntää eristeen ongelmien löytämisessä. Mittaukset suoritetaan LCR-mittarilla, ja tuloksissa ilmenevät poikkeavuudet impedanssissa saattavat kertoa eristeen ikääntymisestä, ja induktanssi taas syötettävän laitteen, johtimien tai liitosten ongelmista.

Impedanssimittauksissa on tärkeää, että tiedetään millaisia arvoja piirin tulisi tuottaa, jotta voidaan arvioida mittausten perusteella onko ongelmia vai poikkeavuuksia olemassa. [3.]

LCR-bulkkitestaus on hyvä lisä TDR-testeille, koska kaapelien ikääntymisen arvioinnin lisäksi menetelmä TDR-testien tukena auttaa löytämään syyt impedanssi ongelmille. Bulkkitestauksessa testataan kaikki kaapelit. [2.]

## Osittaispurkausmittaukset

Osittaispurkausmittauksia tehdään yleensä vain keskijännite- ja korkeajännitekaapeleille. Osittaispurkaus on sähköpurkaus, joka vain osittain oikosulkee johdinten välisen eristyksen. Näitä esiintyy kun sähkökentän voimakkuus ylittää eristeen sähkölujuuden.

Osittaispurkauksien mittaamisessa on tarkoitus löytää korrelaatiota purkausten ominaisuuksien ja eristyksen eliniän välillä. Osittaispurkauksien mittaamisessa varmistetaan, että eristysrakenteet täyttävät standardien vaatimaa tai sovittua toimivuutta. Mittaus toteutetaan sähköisenä sekä akustisena mittauksena, jälkimmäistä käytetään lähinnä ongelmien paikantamiseen. [24.]

### 2.5.4 Muita menetelmiä

#### Ultraääni- ja infrapunamittaukset

Koska äänennopeus materiaalissa on riippuvainen materiaalin tiheydestä ja elastisista ominaisuuksista, ja monen materiaalin elastiset ominaisuudet (kuten kimmokerroin/-moduuli) muuttuvat ikääntymisen myötä, voisi ultraäänimittaus olla lupaava ikääntymisen seurantamenetelmä. [29.]

Ultraäänimittauksissa lähetetään kaapelin pintaa pitkin ultraäänipulssi kahden anturin välillä. Vielä ei olla löydetty äänennopeusmittauksissa optimaalista pulsstin taajuutta.

Suurin haitta ultraäänimittauksissa on se, että tuloksia tulee korreloida erikoisten kaapeleiden kanssa eri materiaalien lisäksi. Mittaukset voivat myös häiriintyä kaapeleiden mahdollisista metallisuojauksista.

Ultraäänimittaukset ovat tuottaneet tuloksia säteilyikäännytettyjen materiaalien kanssa [25]. Mutta toistaiseksi lämpöikäännytetyillä näytteillä ei olla voitu

osoittaa korrelaatiota murtovenymän kanssa. Menetelmää testataan ja tutkitaan parhaillaan esimerkiksi Suomessa VTT:llä SAFIR-projektissa, jossa tutkimus toteutetaan yhteistyössä ruotsalaisen Energiforskin kanssa.

Infrapunasäteilyn heijastuminen on myös uusi potentiaalinen menetelmä ikääntymisenhallintaan. Infrapunamittauksissa tarvitaan pelkästään kannettava työkalu, jolla mitataan infrapunaspektriä. Menetelmää ei voi käyttää mustalla materiaalilla, mutta menetelmä on osoittanut korrelaatiota EAB-mittauksien kanssa ainakin EPR- ja XLPE-materiaalien kanssa. [15.]

#### Ikääntymisen seuranta pilven kautta

Paikkoihin, joissa on vaikea tutkia fyysisesti kaapeleita, voidaan soveltaa etäyhteydellä toteutettavia ikääntymisen arviointia. Esimerkiksi kaupunkien vedenjakelussa näitä jo sovelletaan, missä teknologian avulla etsitään vuotoja putkista virtausmittareiden avulla.

Kaapelien ikääntyminen muuttaa materiaalien kemiallisia rakenteita, ja täten myös eristeiden sähkölujuutta. Näitä olisi mahdollista mitata esimerkiksi impedanssi/dielectric spectroscopy menetelmien avulla. Kun tätä seuraa pidemmän ajanjakson aikana voi huomata helposti, jos ominaisuuksissa rupeaa tapahtumaan merkittäviä muutoksia.

Jos ikääntyminen aiheuttaa repeämiä, murtumia tai muita epätasaisuuksia materiaalissa, voi näitä havaita osittaispurkausmittauksilla. Prysmian on kehittänyt esimerkiksi kameran ja pilvipalvelun osittaispurkauksien seuraamiseen.

Suomalaisen ydinvoimatutkimusohjelman SAFIRin johtama SAMPO -projekti pyrkii löytämään mittausmenetelmiä, joiden avulla voidaan luotettavasti arvioida ikääntymistä. Tässä käytetyt tiedot ovat vuodelta 2019, projekti jatkuu vuoteen 2022. [15.]

## ”Wear-out” -lähestyminen ikääntymisen seurantaan

Wear-out -menetelmä on metallien ikääntymisenseurannan menetelmien soveltaminen polymeereihin. Periaate on, että otetaan pieniä näytteitä kaapeleista, jotka ovat käyttöolosuhteissa (tai näytekaapeleita) tietyn ajan, ja keinotekoisesti ikäännytetään niitä eliniän loppuun. Tämän datan keräämisen avulla on tarkoitus arvioida kaapelin jäljellä olevaa elinikää.

Tämän menetelmän yksiä etuja on, että on mahdollista tarkastella ikääntymistä lineaarisesti myös silloin, kun on kyseessä materiaaleja, jotka ikääntyvät yllättäen (engl. induction time, eli kohta ikääntymisprosessissa, jolloin materiaalisissa rupeaa tapahtumaan nopeita muutoksia). Vuonna 2005 julkaistujen tutkimustietojen perusteella menetelmästä on ollut hyötyä ainakin EPR-kumien jäljellä olevan eliniän arvioimisessa. [18.]

## Optical time domain reflectometry (OTDR)

Optical time domain reflectometry -menetelmää käytetään optisten valokuitukaapelien ikääntymisen arvioinnissa. Testissä heijastetaan valopulssi kaapelin läpi, jota mitataan ajan funktiona. Tämä testi on käytännöllinen tapa määrittää missä kohtaa kaapelia on virheitä.

OTDR-testi ei kerro mitään kaapelin tai kuidun mekaanisesta tilasta, vaikka on hyvä testi määrittää sen toiminnallisuutta, eikä se ole varsinaisesti sähköinen testi. [17.]

### 3 Loviisan voimalaitoksen menetelmät

Loviisan voimalaitoksen kaapelien ikääntymisenhallinnan seurantaohjelma käsittää kaikki voimalaitoksessa olevat kaapelit ja kaapelityypit. Lisäksi seurantaohjelmaan sisältyy myös kaapelireitit ja -hyllyt, liitokset sekä rakenne johon kaapelit ovat kiinnitetty. Seuranta on jatkuvaa ja siitä raportoidaan STUK:ille neljän vuoden välein. Seurannasta vastaa kaapelien järjestelmävastaaja. Päivittäinen kuntoseuranta toteutuu aistinvaraisilla tutkimuksilla. [1.]

Loviisassa kaapelien ikääntymisen seuranta tehdään eri paikkoihin sijoitetuilla näytekaapeleilla. Näytekaapeleiden sijoittamisessa on huomioitu tilan ympäristökijät, jotka vaikuttavat kaapelien ikääntymiseen [4].

Loviisan voimalaitoksen kaapelien ikääntymisseurannan menetelmät perustuvat IAEA:n Tecdoc 1188- ja NP-T-3.6 -dokumentteihin sekä IEEE 383 -standardiin. Kaapelien kelpoistus tehdään kiihdytetyllä/keinotekoisella ikääntymisellä.

#### 3.1 Aistinvaraiset tutkimukset ja olosuhteiden seuranta

Jatkuvan havaitsemisen lisäksi esimerkiksi höyrystintilassa, jossa on korkeat lämpötilat, säteilytaso ja korkea kosteusprosentti tehdään vuosittain mittavia tutkimuksia. Kaapelien kunnon seuraamisen ohella säteilytasoja ja lämpötilaa tarkkaillaan myös sekä kirjataan. [32.]

Aistinvaraisilla tutkimuksilla tarkoitetaan eristeen ja vaipan kunnon tutkimista silmä määräisesti ja mikäli mahdollista kevyesti taivuttamalla. Näillä menetelmillä ei tehdä lopullisia päätöksiä, mutta kerätään informaatiota kunnon arviointia varten.

Lämpötilan seuranta toteutuu antureilla, joita on sijoitettu ympäri voimalaitosta, ja neljän vuoden välein tehtävällä infrapunamittauksella. Voimalaitoksella ollaan vähitellen siirtymässä lämpökameramittauksiin.

### 3.2 Näytteiden otto ja testaaminen

Reaktorirakennuksen keskijännitekaapeleille tehdään aistinvaraisten tarkkailujen lisäksi tangentti delta, eristysresistanssi ja osittaispurkausmittauksia.

Osittaispurkausmittauksilla kerätään tietoa kaapeleiden kunnosta, ja huomattavien ongelmien perusteella voidaan myös luokitella kaapeli liian ikääntyneeksi.

Höyrystintilaan on sijoitettu puolen metrin pituisia näytekaapeleita. Näistä kaapelinäytelaatikoista kaksi sijaitsee keskimääräisissä olosuhteissa ja yksi vaativissa olosuhteissa. Näytekaapelit asennettiin vuosituhannen vaihteessa, ja olivat asennettaessa pääosin uusia kaapeleita.

Näytekappaleet lähetetään kolmannelle osapuolelle, joka tekee niille vetokokeita ja -lujuustestejä. Testien tuloksina saadaan murtovenymän enimmäismuutos prosentteina sekä kaapelinäytteen murtolujuuden (engl. tensile strength).

EAB-testin tulosta pidetään ratkaisevana tekijänä kun päätetään, koska kaapeli tulee vaihtaa. Vetokokeen tulosten perusteella voidaan myös ryhtyä seuraamaan tiettyä kaapelityyppiä. Kun murtovenymä lähenee 50 %:a katsotaan, että kaapeli on tullut elinikänsä päähän.

Kun näytekaapelityyppiä on vain yksi jäljellä, pyritään höyrystintilasta löytämään samaa kaapelityyppiä oleva kaapeli jonka asennushistoria tunnetaan. Vaihtoehtoisesti asennetaan uusi vastaava kaapeli. Kaikista uusista näytekaapelityypeistä lähetetään yksi näyte mekaanisiin testeihin referenssiarvojen saamiseksi. [32.]

Höyrystintilassa on käytössä muun muassa seuraavia kaapelityyppejä Acome (polyolefiini), Monette ja SSJS (silikonikumi), Sienopyr (EVA, EPR), LJNSM (PVC, EPDM), MHMS-Si (PVC) ja Habia (PEEK).

Kaikista tuloksista kerätään tietoa, jota voidaan käyttää uusien kaapelien kelpoistamisessa [1].

Toimenpiteitä kun kaapeli ei läpäise testiä

Mikäli eri testit osoittavat, että kaapelin kunto on lähestymässä eliniän loppua määritteleviä raja-arvoja, kaapelin kuntoa voidaan ruveta seuraamaan tarkemmin, se voidaan vaihtaa kokonaan tai jos vaihtaminen osoittautuu hankalaksi, tehdään kaapelijatkos. Höyrystintilassa kuitenkin pyritään välttämään jatkoksia. Mikäli vetokokeet osoittavat, että jokin kaapelityyppi alkaa ikääntyä, voidaan ko. kaapelityypille tehdä vastaavia toimenpiteitä kuin yksittäiselle kaapelille

Pienet viat esimerkiksi vaipassa voidaan väliaikaisesti korjata sopivalla tavalla. Korjaus kuitenkin raportoidaan, jotta voidaan arvioida kaapelin vaihtamisen ajankohtaa tarkemmin.

Vakavissa tapauksissa, erityisesti jos kaapeli kuuluu turvallisuuden kannalta tärkeisiin järjestelmiin, vaihtaminen on yleensä ainoa vaihtoehto. Mikäli kaapelityyppejä ei ole enää varastossa eikä saatavilla toimittajalta tai toista kelpoistettua kaapelia ei ole saatavilla, tulee siihen kelpoistaa uusi kaapeli. [1.]

Kaapeli vaihdetaan tai kelpoistetaan uudelleen myös siinä tapauksessa, kun kelpoistettu elinikä loppuu. Uudelleenkelpoistus tarkoittaa, että osoitetaan kaapelin soveltuvuus määritetylle lisäajalle.

#### **4 Menetelmät muilla voimallaitoksilla**

Kaikilla voimallaitoksilla hyödynnetään aistinvaraisia tarkistuksia, jos niitä on mahdollista tehdä, eli kaapeliin pääsee fyysisesti käsiksi. Ne ovat helppo ja tehokas tapa arvioida, onko kaapelin vaippaan tai eristeeseen ilmestynyt näkyviä ikääntymisen jälkiä.

## 4.1 Olkiluoto

Olkiluodon yksikköihin 1 ja 2 laadittiin standardien ja ohjeiden perusteella uusi ikääntymisenhallintaohjelma hiljattain, joka tulee myös muutamia erityispiirteitä lukuun ottamatta muistuttamaan Olkiluoto 3:sen tulevaa ohjelmaa.

Kaikista tehdyistä testeistä otetaan dataa talteen, koska kaapelien ominaisuuksien muuttuminen ajan myötä on keskeistä ikääntymisenhallinnassa.

Kummallakin voimalaitoksella suoritetaan kutakuinkin samoja testejä, joillakin erikoispiirteillä. Keskeisimmät menetelmät ovat murtovenymä- ja murtolujuustestit (EAB ja TS), eristysresistanssimittaukset, osittaispurkausmittaukset, jännitekoe (läpäisee/ei läpäise testi, ei varsinaisesti kerro ikääntymisestä) ja TDR mittaukset neutronivuoanturien koaksiaalikaapeleille. Automaatiokaapeleille tehdään johdinimpedanssi ja LCR mittauksia.

### 4.1.1 Olkiluoto 1 ja 2

Ikääntymisenhallinta kattaa kaikki turvallisuusluokan 2 ja 3 kaapelit reaktorin suojarakennusten sisällä. Analysoitavia näytekaapeleita pidetään kaikista ankarimmissa olosuhteissa voimalaitoksella eli siellä, missä on korkea säteilytaso ja lämpötila. Tällä tavalla saadaan näytekaapelia keinotekoisesti ikäännytettyä asennuspaikalla. Täten vältetään monelta ongelmalta, jota keinotekoinen ikäännyttäminen laboratoriossa tuo mukanaan (näitä on eritelty tarkemmin kohdassa 2.2).

Suojarakennuksen sisällä käytetään kolmea kaapelityyppiä, Lipalon, Firewall III sekä Habian LOCA. Lipalon -näytekaapelit ovat olleet asennettuna voimalaitoksen käyttöönotosta lähtien, Firewall III vuodesta 1992 ja Habia vuodesta 2011. Testejä tehdään myös joillekin valituille, suojarakennuksen ulkopuolella sijaitseville PVC-kaapeleille, varsinkin silloin kun niitä otetaan pois käytöstä. Lisäksi muutostöiden yhteydessä tarpeettomiksi jääneitä PVC-kaapeleita on jätetty



näytekäyttöön myös suojarakennukseen. Nämä edustavat yleisesti suojarakennuksen ulkopuolella käytössä olevien PVC-kaapelityyppien ikääntymistä vaativammissa ympäristöolosuhteissa.

Kaapelinäytteitä analysoidaan laboratoriossa, niille tehdään EAB- ja TS-testit. Näiden lisäksi tehdään myös sähköisiä jännite- ja eristysresistanssimittauksia. Näytteitä viedään testattavaksi viiden vuoden välein. [1.]

Keskijännitekaapelien ikääntymisenseurantaan käytetään osittaispurkausmittauksia. Näillä menetelmillä ei olla pelkästään havaittu ikääntymistä vaan myös esimerkiksi asennuksessa mahdollisesti tapahtuneita virheitä, joita on sittemmin korjattu.

Kaapelinäytteiden lisäksi suojarakennuksen sisään on asennettu 20–115 metriä pitkiä testipiirejä, joille suoritetaan eristysresistanssi ja piirivastusmittauksia vuoden välein tehoajojakson aikana. Vuosittain huoltoseisokin aikana tutkitaan myös ennalta valittu edustava ryhmä kojekaappeja ja -koteloita. [39.]

#### 4.1.2 Olkiluoto 3

Olkiluoto 3 ikääntymisenhallintaohjelma perustuu IAEA:n NP T 3.6 -dokumenttiin.

Kuten Olkiluoto 1&2, kolmosyksikön ikääntymisenhallinta kattaa kaikki turvallisuusluokitellut kaapelit. Näiden lisäksi ohjelma kattaa myös muita kaapeleita, joilla on tekemistä ydinturvallisuuden kanssa tai jotka ovat muuten tärkeitä voimalaitoksen toimivuudelle, ja ovat asennettuja erityisen kuormittaviin olosuhteisiin, on sisällytetty ikääntymisenhallintaohjelman seurannan piiriin.

Kaapeleita kohdellaan ryhminä ikääntymisenhallinnassa.

Olkiluoto 3:seen on asennettu kaapelinäytteitä suojakuoren sisäpuolelle kaapelitikkaille, näytteitä on 14 erilaisesta kaapelityypistä. Näille tullaan tekemään osittaispurkaustestejä, johdinsilmukan resistanssitestejä I&C kaapeleille, eristysresistanssitestejä sekä murtovenymä että -lujuus -testejä. [39.]

EAB-testin tulosta käytetään vertailuarvona, kun kaapelien ikääntymistä arvioidaan. [1.]

## 4.2 Ruotsin ydinvoimalaitokset

FORSAMP (Forsmark, Oskarshamn, Ringhals, Svensk kärnbränslehantering) on yhteistyöfoorumi, johon on kerätty esimerkiksi lista kaikista ikääntymismekanismista kaikenkaltaisille komponenteille.

### 4.2.1 Forsmark

Forsmark aikoo perustaa ikääntymisenhallintaohjelmansa IAEA:n Safety Guide NS-G2.12 -dokumenttiin. Tällä hetkellä ikääntymisen seuranta on koordinoitu muun seurannan yhteyteen, eli samalla kun tehdään muita tarkastuksia voimalaitoksella, tutkitaan myös kaapelit. Tähän kuuluu lämpökameralla hot spottien tutkiminen ja paikantaminen voimalaitoksella.

Kaapeleilla on tietokanta, jossa jokaisella kaapelilla on oma tietue. Forsmarkin ydinvoimalaitoksen kolmosyksikölle on sijoitettu kaapelinäytehyly.

Neutronivuoantureiden (NIS) kaapelit analysoidaan TDR-menetelmällä. Näihin Forsmark on kehittänyt ohjeita, joiden avulla tuloksista voi erottaa esimerkiksi liitoksia hot spoteista. NIS-kaapeleita analysoidaan TDR-menetelmällä kerran vuodessa vuosihuollon aikana.

Indenter modulus -testejä käytetään pienjännitekaapeleiden (Forsmarkilla  $\leq 1$  kV) ikääntymisen seurantaan. Testille ei olla asetettu mitään virallista aika-intervallia, ja sitä tehdään lähinnä hot spot:eilla. Tuloksia jaetaan Ringhalsin voimalaitoksen kanssa, kun havaitaan hot spotteja, joissa on tarve arvioida kaapelin ikääntymisen astetta.

EAB-mittaukset teetetään tilaustyönä muualla. LIRA-mittauksia tehdään satunnaisesti, sen avulla voidaan etsiä virheitä paikallisesti tai koko kaapelin pituudelta.

OIT-testejä käytetään pelkästään kaapelien kelpoistamisprosessissa. [26; 40.]

#### 4.2.2 Ringhals

Ringhalsin ikääntymisenhallinta perustuu IAEA:n Safety Guide NS-G-2.12 -dokumenttiin. Ikääntymisenseuranta on koordinoitu muiden ohjelmien kanssa.

Jokainen voimalaitoksessa oleva kaapeli on lisätty kaapelitietokantaan, ja jokaisella reaktoriyksiköllä on oma tietokantansa. Tietokantaan on lisätty kaapelireiitit, liitoskohdat, pituudet, kojeet ja keskuskeskukset. Kaapelitietokanta on korvannut paperiset kaapelidatat.

Ringhalsissa kerätään myös mittaavaa dataa eri tilojen ympäristöolosuhteista esimerkiksi lämpökameralla. Tilojen tiedot lisätään ympäristötietokantaan, jota käytetään mm. hot spottien identifioimiseksi.

Ringhals on tehnyt tutkimusta Lipalon- ja Hypalon -kaapeleilla suojarakennuksen sisällä. Tutkimuksen tuloksina löytyi huomattavaa korrelaatiota indenter moduluksen ja lämpötilan aiheuttaman ikääntymisen kanssa.

Indenter modulus -mittauksissa Ringhalsilla on tutkittu painauma-arvoja uusilla ja lämpöikäännytetyillä kaapeleilla. Näiden avulla on saatu selville arvoja, joiden

perusteella olisi syytä tehdä jatkotutkimuksia tai ryhtyä kaapelinvaihtoihin. Ristisilloitetut kaapelit eivät heidän tutkimustensa mukaan kovetu ikääntyessään, joten indenter mittaukset ovat hyödyttömiä tällaisille materiaaleille.

Painaumakokeiden tuloksia verrataan EAB-testeihin, kun luodaan läpäisykriteerejä tai arvioidaan jäljellä olevaa elinikää. Toinen tapa jota hyödynnetään, joka ei vaadi mittaushistoriaa, on saman kaapelin kylmimmän ja kuumimman kohdan painauma-arvojen vertaaminen. Jos arvot poikkeavat suuresti toisistaan, olisi syytä jatkotutkimuksiin.

Keskijännitekaapeleille Ringhalsilla tehdään eristysresistanssimittauksia ja VLF tan-delta -mittauksia. Pienjännitekaapeleille tehdään EAB-, indenter modulus-, LIRA- ja eristysresistanssimittauksia.

LIRA-mittauksia tehdään vuosittain huoltoseisokin aikana noin 100–150:lle kaapelille. Tuloksia verrataan edeltävien vuosien tuloksiin ja niiden avulla seurataan kuinka hot spotit kehittyvät, ja tuleeko sellaisia lisää kaapelin elinajan aikana.

EAB-mittaukset teetetään ulkoisesti tilaustyönä.

NIS-kaapeleille tehdään Ringhalsilla TDR-mittauksia. [26; 40.]

#### 4.2.3 Oskarshamn

Kuten Forsmarkissa Oskarshamnissa koordinoidaan ikääntymisenseuranta muun seurannan yhteyteen, mutta seurantaohjelma on kehitteillä.

Oskarshamnin kolmosyksikön kaikki kaapelit ovat lisätty tietokantaan, missä niihin on liitetty dataa siitä, mihin huoneeseen ne on asennettu ja mitkä ovat kyseisen huoneen ympäristöolosuhteet.

Kaapelien hyväksymiskriteerit seurannassa on, että niiden tulee toimia tarkoituksen mukaisesti, muuten kaapeli vaihdetaan seuraavassa vuosihuollossa. Keskijännitekaapelit Oskarshamnilla ovat sellaisissa paikoissa, että niitä ei pääse paikan päällä tarkistamaan. Nämä kaapelit asennettiin 2009, ja ne ovat kelpoistettu 15 vuodeksi. Kaapeleita seurataan suljetulla virtapiirillä, jos virta katkeaa, valvomoon tulee hälytys. Ongelmien ilmetessä ne raportoidaan ja kaapeli vaihdetaan seuraavan vuosihuollon aikana.

NIS-kaapeleita ei pääse tutkimaan, vaan ne vaihdetaan seisokin aikana, jos vikoja on ilmentynyt/testit eivät täytä vaatimuksia. [26.]

### 4.3 Ranskan ydinvoimalaitokset

Ranskassa EDF (Électricité de France) operoi kaikkia maan ydinvoimalaitoksia. Kaapelien ikääntymisenhallinta kattaa kaikki voimalaitoksien kaapelit, riippumatta luokituksista. Heidän mukaansa turvallisuusluokittelemattomien (NC) kaapelien sisältäminen ikääntymishallintaan antaa laajemman kuvan ikääntymisestä.

Paikan päällä tehdään eristysresistanssimittauksia, joilla pyritään löytämään lisätutkimuksia vaativat kaapelit. Keskijännitekaapeleille tehdään Tan-delta- ja osittaispurkausmittauksia. TDR-mittauksia tehdään NIS-kaapeleille eristysmittausten lisäksi.

EDF ei asenna kaapelinäytteitä voimalaitoksiinsa, vaan ikääntymisen seuranta tutkitaan pelkästään käytöstä poistetuilla kaapeleilla.

Kaapeleille tehtyihin laboratoriotutkimuksiin kuuluu esimerkiksi EAB-testejä. Pienille polymeerinäytteille tehdään myös infrapunamittauksia, jonka avulla etsitään hapetustuotteita, joita ilmenee polymeerien ikääntyessä. OIT testejä tehdään myös näytteille, ja erityisesti PVC-eristeissä mitataan

dehydroklorinointiaikaa. Dehydroklorinointiaika testin tuloksia verrataan yleensä arvoihin joita saadaan puhtaasta PVC-näytteestä.

Näiden lisäksi keski- sekä pienjännitekaapeleista pidetään tietokantaa, johon ollaan esimerkiksi infrapunakameralla etsitty hot spoteista tietoa. Infrapunakameralla etsitään myös mahdollisia ylikuormitettuja liittimiä pienjännitekaapeleissa. Kaapelikarttojen ja muiden tietokannan tietojen perusteella EDF on luonut näytteenotto-ohjelman asennetuille kaapeleille. Kovimman rasituksen alla olevia keskijännitekaapeleita tarkkaillaan eniten.

Kaapelitietokantaa päivitetään säännöllisesti, ja riskialueet arvioidaan samalla uudelleen. [27.]

#### 4.4 Tšekin ydinvoimalaitokset

Tšekeissä ikääntymisenhallintaohjelma kattaa kaikki turvallisuusluokitellut kaapelit. Kaapelien ikääntymisenseuranta toteutetaan sadoilla näytekaapeleilla, jotka ovat asennettu eripuolille Telemínin ja Dukovanyn voimalaitoksia. Näytteiden lisäksi käytöstä poistuvat kaapelit tutkitaan mekaanisilla ja sähköisillä menetelmillä.

Tilojen ympäristöolosuhteita on mitattu ja kerätty yksityiskohtaista tietoa jo vuodesta 1996. Tietojen käsittelyyn kaapeleista ja tiloista pidetään tietokantaa, joka kulkee nimellä SSK. Tietokannassa on dataa kaikista kaapeleista, vaikka ne eivät suoraan kuuluisi ikääntymisenhallintaohjelmaan.



Kuva 15. Kaapelinäytteitä tšekkiläisessä voimalaitoksessa. [28, s. 68]

Näytekaapeleita on useita metrejä pitkiä pätkiä (ks. kuva 15). Näytekaapeleita on myös asennettu tahallaan virheellisesti, kuten terävän reunan yli taivutettuna. Näille tehdään sähköisiä ja mekaanisia testejä paikan päällä. Näytekaapeleiden lisäksi on myös lyhyempiä pätkiä, joille tehdään esimerkiksi EAB-testejä laboratoriossa. Kaikki tulokset kirjataan sähköisesti tietokantaan vuosittain, ja tulokset kerätään vuosittaiseen kaapelinkuntoraporttiin.

Näytekaapeleiksi on käytetty uusia kaapeleita, vanhempia kaapeleita varastosta ja kaapeleita, joita on poistettu käytöstä muualta voimalaitokselta.

Voimalaitoksella pyritään yhdistämään useita erilaisia sähköisiä testejä kaapeleille, koska yksi testi itsessään harvoin kertoo kaapelin kunnosta. Sähköisten testien etu on se, että niitä voi tehdä kaapeleille joita on vaikea päästä käsiksi. On kuitenkin tärkeää, että mittauksia tehdään pidemmän ajan päälle, jotta saadaan yksilöllistä tietoa jokaiselle kaapelille.

Korkeajännitekaapeleille (Tšekeissä  $> 3$  kV) tehdään osittaispurkaus sekä tanelta mittauksia. [28.]

## 5 Ehdotukset uusille toimenpiteille

Työssä keskityttiin tutkimaan ja esittelemään ainetta rikkomattomia menetelmiä (engl. non-destructive tests, NDT), joita mahdollisesti voisi ottaa käyttöön Loviisan voimalaitoksella murtovenymä- sekä jo käytössä olevien sähköisten testien ohelle.

Ehdotuksissa päädyttiin hapetuksenkestoajan ja -lämpötilan testien hyödyntämiseen aikaisen ikääntymisen havaitsemisessa. Mekaanisiin testeihin voisi lisätä painauma- ja palautumisaika -testejä, joita voi tehdä kannettavalla laitteella kaapelin asennuspaikalla. Painauma- ja palautumisaikatestien yhdistäminen toimisi usealle eri polymeerille ja täten olisi hyvä lisä ikääntymisenhallintaohjelmaan (ks. kuva 16).

Sähköisistä testeistä ehdotetaan LIRA-, FDR- sekä piiresistanssimittauksia. Vastaavista mittauksista on kokemusta muilla ydinvoimalaitoksilla, LIRA-mittauksia on tehty myös Loviisassa. Tähän työhön valittujen sähköisten testien etu on se, että ne eivät edellytä näytekaapeleita ja niitä voi suorittaa kytkemättä kaapelia irti. Sähköisillä testeillä voidaan yhdestä paikasta helposti tutkia koko kaapelin kuntoa, mikä auttaa ikääntymisen havaitsemisen myös sellaisissa kohdissa, joihin ei helposti pääse muilla menetelmillä tutkimaan.

Testimenetelmien lisäksi ehdotetaan myös digitaalisen kaapelitietokannan luomista. Kaapelitietokantoja on käytössä monella eri ydinvoimalaitoksella.



TABLE 5. PRACTICAL USEFULNESS OF CM METHODS FOR EACH OF THE BENCHMARKED CABLE MATERIALS

CM method	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	EAB	IM	Recovery	OIT	OITP	TGA	Density	FTIR	Ultrasonic	Tan delta	Dielec. spec.	IR	FDR	TDR
1 PEEK (Habia)	Useful	Not Useful				Not Useful	Not Useful	Not Useful		Potentially Useful (Limited)	Potentially Useful (Limited)	*	*	*
2 XLPO (Habia)	Useful	Not Useful	Very Useful	Useful	Useful	Not Useful	Not Useful	Not Useful	Not Useful					
3 EPR (Eupen)	Useful	Useful		Useful	Useful	Not Useful	Not Useful	Useful		Not Useful	Not Useful	Not Useful	Useful	Not Useful
4 EVA (Eupen)	Useful	Useful	Not Useful	Useful	Useful	Not Useful	Not Useful	Potentially Useful	Potentially Useful					
5 SiR – insul. (Hew)	Useful	Useful										Not Useful	Useful	Not Useful
6 SiR – jacket (Hew)	Useful	Useful												
7 XLPE (Rockbestos)	Useful	Not Useful		Useful	Useful	Not Useful	Not Useful	Potentially Useful			Potentially Useful (Limited)			
8 CSPE (Rockbestos)	Very Useful	Very Useful	Very Useful	Useful	Potentially Useful	Not Useful	Useful		Useful					
9 EPR – insul. (Changzhou)	Useful	Useful		Useful	Useful	Not Useful	Useful	Potentially Useful		Useful	Not Useful	Not Useful	Potentially Useful	Not Useful
10 EPR – jacket (Changzhou)	Useful	Useful	Not Useful	Useful	Useful		Useful	Potentially Useful	Potentially Useful					
11 XLPO – insul. (Shanghai)	Useful	Useful		Useful	Useful	Not Useful	Not Useful	Potentially Useful		Potentially Useful	Not Useful	Not Useful	Not Useful	Not Useful
12 XLPO – jacket (Shanghai)	Useful	Useful	Very Useful	Useful	Useful		Not Useful	Potentially Useful	Useful					

\*The Habia cable was thermally aged at 190°C which caused permanent maximum insulation degradation at the first aged condition. No trending was possible for the electrical cable samples.



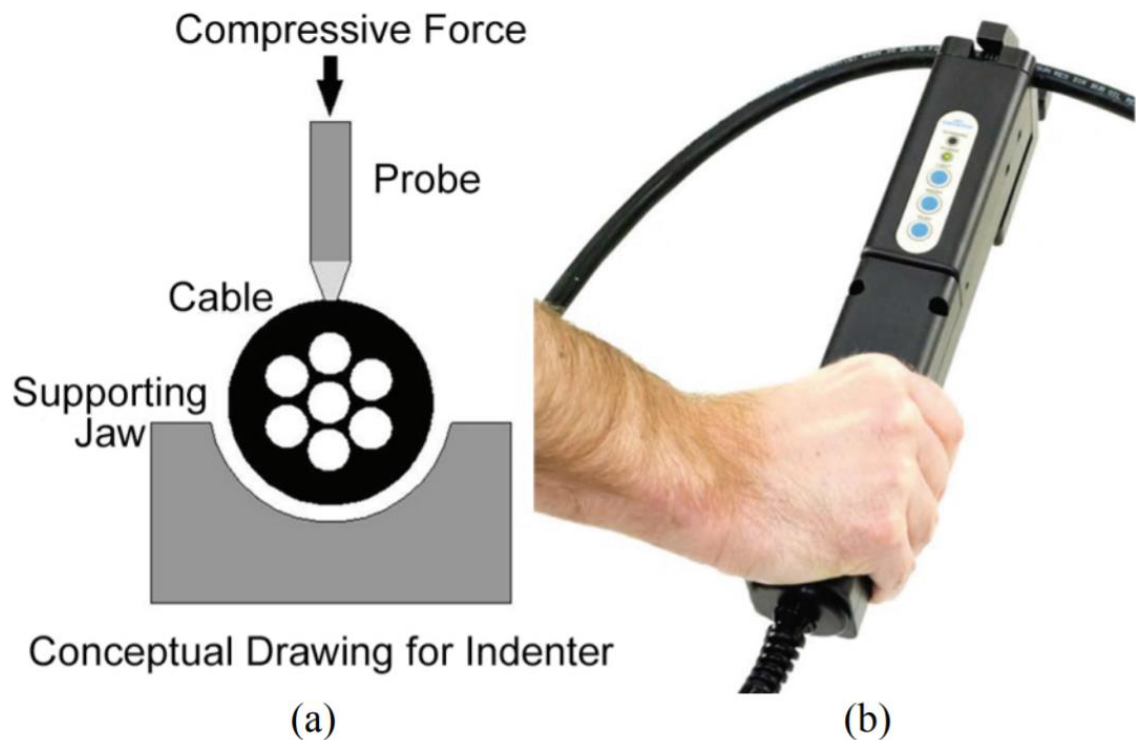
Kuva 16. Kuvassa kehystetty violetilla ne ikääntymisenseurannan menetelmät murtovenymän lisäksi, joita ehdotetaan tässä luvussa. [3, s. 80]

Mahdollisia vanhoja kaapeleita, jotka eivät ole enää käytössä voisi käyttää piiri-resistanssi- sekä muihin vastaaviin mittauksiin

## 5.1 Indenter modulus -mittaukset

Indenter modulus mittauksia voidaan suorittaa kannettavalla laitteella asennuspaikalla (ks. kuva 17). Tämän ansioista menetelmä on yksinkertainen ja nopea tapa seurata kaapelin ikääntymistä.

Tutkimusten perusteella indenter modulus -mittauksia voidaan käyttää EPR-, EVA-, SiR- ja CSPE-materiaaleille. Ristisilloitettuja polymeerimateriaaleja sisältäville kaapeleille voidaan soveltaa palautumisajan mittauksia (ks. kuva 16).

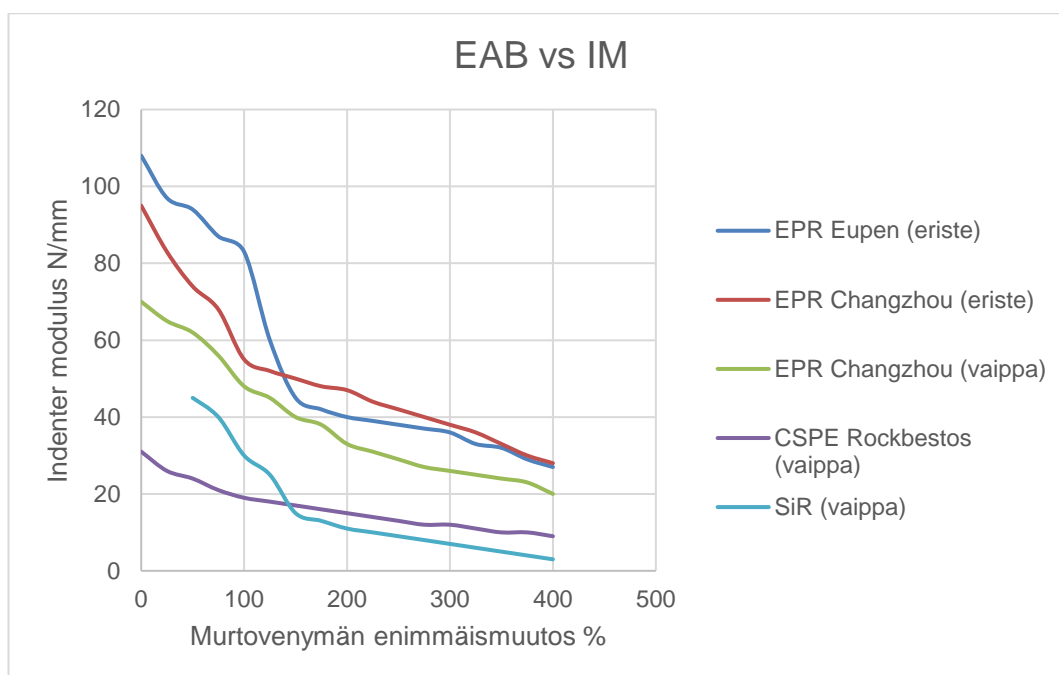


Kuva 17. Kannettava työkalu indenter modulus -mittauksia varten [22 s. 11.]

Voimalaitoksissa, joissa indenter modulus -mittaukset ovat käytössä, kuten Ruotsissa, määritellään läpäisykriteerejä lämpökäännytyille kaapeleille. Tällaista voisi esimerkiksi harkita kelpoistusprosessin aikana tehtäväksi, jos silloin muutenkin keinotekoisesti ikäännytetään kaapeleita.

Toinen ainakin Ruotsin Ringhalsissa käytetty toimenpide on kaapelin painaumarvojen vertaamista kahdesta eri kohtaa. Kohdat valitaan ns ”normaalioloista” ja sitten hot spotilta ja verrataan poikkeavatko nämä kaksi toisistaan. Jos poikkeavat huomattavasti (esim. yli 50 %) on syytä jatkotutkimuksiin.

Kun eri kaapelimateriaaleista on kerätty riittävästi dataa, ja verrattu muihin testeihin, voidaan asettaa tarkempia läpäisykriteerejä painauma- ja palautumisaikamittauksille. Tähän työhön on kerätty suuntaa antavia arvoja, ja esitetty tapoja hyödyntää painauma- sekä palautumisaikamittauksia ilman tarkkoja läpäisykriteerejä.

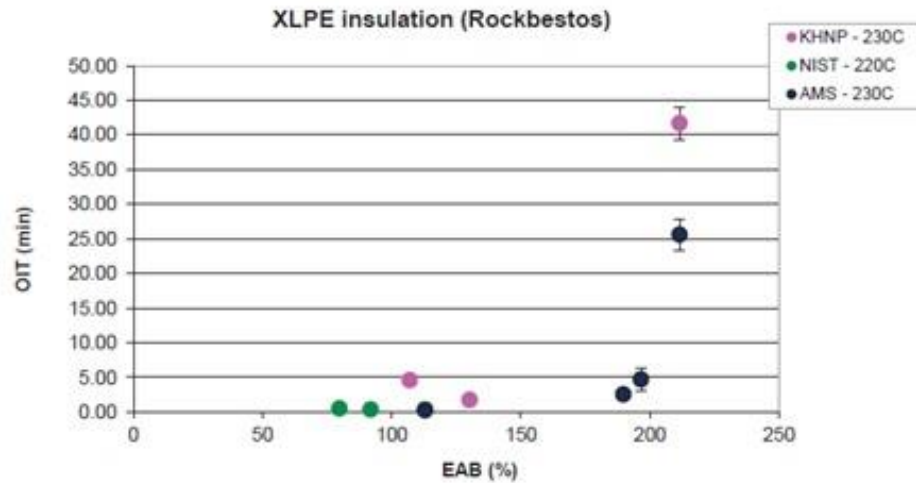


Kuva 18. Kootut suuntaa antavat korrelaatiot indenter moduluksen ja murtovenymän enimmäismuutoksen kanssa. Kuva on tehty tätä työtä varten, arvot ovat kerätty kansainvälisen atomienergiajärjestön dokumentista Tecdoc 1825. [3]

## 5.2 Hapetuksenkesto aika ja -lämpötila

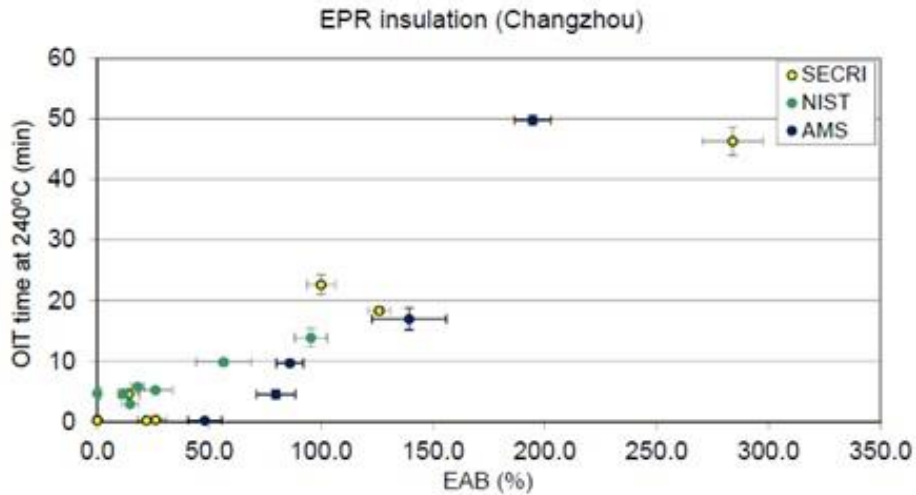
Hapetuksenkesto aikatestejä voidaan tehdä lisänä muille testeille. Se on hyödyllinen varsinkin ikääntymisen ensimmäisten merkkien havainnoinnissa, koska monessa materiaalissa antioksidantit rupeavat kulumaan jo varhaisessa vaiheessa. Usein ne ovat loppuun kulutettu silloin kun murtovenymä lähenee 100 %:a (ks. kuvat 19, 20 ja 21.)

Hapetuksenkestoaja ja -lämpötila testien hyvä puoli on, että niitä voidaan mitata hyvin pienillä, muutaman milligramman näytekappaleilla. Testit suoritetaan laboratoriossa.



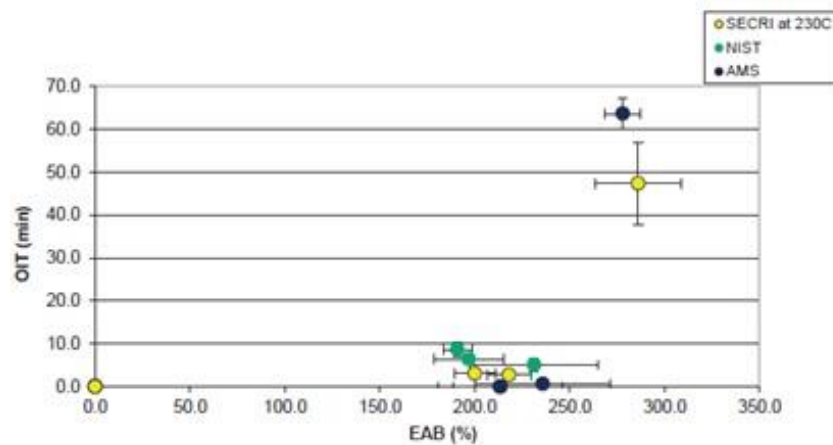
Kuva 19. Hapetuksenkestoajan ja murtovenymän enimmäismuutoksen korrelaatio PEX-muoville [3 s. 65.]

PEX-muovissa antioksidantit kuluvat loppuun nopeasti jo ikääntymisen varhaisissa vaiheissa. Kun hapetuksenkestoaja on laskemassa alle viisi minuuttia, kannattaa turvautua muihin testimenetelmiin, kuten painauma- tai palautumisai- kamittauksiin tai vetokokeisiin.



Kuva 20. Murtovenymän korrelaatio hapetuksenkestoajan kanssa EPR-eristeelle. [3 s. 81.]

EPR-eristeessä antioksidantit kuluvat hieman hitaammin ikääntyessä, jonka ansiosta menetelmää voidaan soveltaa koko kaapelin eliniän aikana ikääntymisen seurantaan.



Kuva 21. Hapetuksenkestoajan korrelaatio murtovenymän enimmäismuutoksen kanssa XLPO-materiaaleille. [3 s. 76.]

XLPO (ristisilloitettu polyolefiini) kaapeleissa antioksidantit ovat kulutettu liki loppuun siinä vaiheessa, kun murtovenymä on ohittanut 200 %. Samalla alueella painauma mittaukset eivät näytä suurta muutosta, joten OIT-testi on hyvä lisä sen ohelle.

### 5.3 FDR

FDR-testi on hyvin saman tyylinen testi kuin LIRA tai TDR. FDR-testissä käytetään alhaista testijännitettä, jonka avulla haetaan paikallisia ikääntymisen jälkiä eristeestä. FDR-testejä otettiin käyttöön yhdysvaltalaisessa Oyster Creek -ydinvoimalaitoksessa vuonna 2016. Käyttöön otossa Oyster Creekillä vuonna verrattiin mittausrvoja valvomon ja höyrystintilan kaapeleiden välillä, eli verrattiin nk. kaapelien ”terveiden” alueiden heijastumisarvoja ikääntyneisiin alueisiin. Näiden avulla määriteltiin miten ympäristöolosuhteet vaikuttavat FDR-mittauksien tuloksiin.

FDR-testien etuihin kuuluu mm.

- koko kaapelia voi tutkia yhdestä kohtaa
- matala testijännite
- tulokset saadaan nopeasti
- FDR-mittalaitteita on lukuisia markkinoilla
- tarkempi kuin esimerkiksi TDR
- yleensä ei edes tarvitse avata kaapeliliitoksia [33.]

### 5.4 Piiriresistanssi- ja muita vastaavia mittauksia

Olkiluodon voimalaitoksella on asennettu suojarakennuksen sisään kaapeleita, joista voi mitata erilaisia arvoja suojarakennuksen ulkopuolelta. Piirien pituudet ovat 20–115 metriä.

Vastaavanlaista olisi mahdollista hyödyntää Loviisassa esimerkiksi jättämällä käytöstä poistettu kaapeli paikoilleen. Näin saataisiin valmiiksi ikäännytetty kaapeli mitattavaksi. Jos tämän lisäksi muun kaapelivedon yhteydessä asentaa

toisen uuden testikaapelin samalle reitille, voitaisiin tuloksia vertailla keskenään sekä seurata uuden kaapelin käyttäytymistä ikääntyessään.

Esimerkiksi LCR-mittaustuloksissa poikkeavuudet uuden kaapelin tuloksiin saattavat vihjata ikääntymiseen eristeessä.

## 5.5 Kaapelitietokanta

Usealla ydinvoimalaitoksella on käytössä mittavia kaapelitietokantoja, joissa joihinkin on sisällytetty kaikki kaapelit ja toisiin pelkästään turvallisuusluokitellut.

Kaapelitietokannan hyödyt eivät välttämättä rajoitu ikääntymisenhallintaan, vaan voi myös nopeuttaa muutostöitä ja niistä aiheutuvia listojen ylläpitoa/päivitystä. Kaapelitietokantaan voi sisällyttää kaikki kaapelit, niiden reitit, liitoskohdat, kojeet, joita ne syöttävät, mahdolliset hot spotit sekä muut ympäristötekijöiden/rasitteiden tiedot.

Näiden tietojen saavutettavuuden helpottaminen todennäköisesti yksinkertais-  
taisi huoltoseisokin aikana ja muutenkin tehtävien tarkastusmittauksien suunnit-  
telua ja mittatulosten kirjaamista sekä seurantaa.

Työkaluja kaapelitietokantojen luomiseen on olemassa ainakin palvelinkeskuk-  
sille, joiden soveltaminen ydinvoimalaitoksen ikääntymisenhallintaan ei mahdol-  
lisesti ole paras ratkaisu. Esimerkiksi Ruotsissa Ringhalsin voimalaitos loi omat  
tietokannat alusta asti.

Mikäli Loviisaan halutaan vastaavaa soveltaa, tulisi todennäköisesti myös luoda  
tietokannat itse.

## 5.6 LIRA

LIRA-mittauksia käytetään ongelmien paikantamiseen kaapeleissa alhaisella testijännitteellä. Menetelmää käytetään onnistuneesti ruotsalaisissa ydinvoimaloissa, jossa parhaillaan huoltoseisokin aikana testataan 100–150 kaapelia.

LIRA-testit antavat suhteellisia arvoja, joten niillä ei voi määritellä onko kaapeli ikäännytynyt koko pituudeltaan, mutta hot spotteja ja liitoksia LIRAlla on helppo paikantaa.

Hyödylliset LIRA-mittaukset vaativat yleensä kaapelin eliniän yli tehtyjä mittauksia sekä nk. sormenjäljen uudesta kaapelista juuri kun se on asennettu. Loviisassa ei parhaillaan ole kumpiakaan sillä LIRA-mittauksia on pelkästään testattu.

Mikäli LIRA-laitteisto hankitaan voimalaitokselle, sillä pystyy ainoastaan seuraamaan ja havaitsemaan hot spotteja, joita voidaan tutkia tarkemmin muilla menetelmillä. Menetelmän käyttöönoton jälkeen, aina kun uusi kaapeli asennetaan, olisi siitä mahdollista tallentaa sormenjälki ikääntymisen seurantaan varten.

## 5.7 ”Wear out” -menetelmän soveltamista

”Wear out” -menetelmällä tarkoitetaan, että käytöstä poistunut kaapeli tai näytekaapeli keinoitekoisesti ikäännytetään loppuun, ja sen perusteella arvioidaan kaapelin tai kaapelityypin jäljellä olevaa elinikää asennusympäristössään.

”Wear-out” -menetelmää pidetään tarkempana kuin pelkästään laboratoriossa ikäännyttämistä, sillä osa polymeerin ikääntymisestä tapahtuu asennuspaikalla.

Tämän keinotekoisesti ikäännyttämisen aikana voidaan myös kerätä dataa paino- ja palautumisaika-, hapetuksenkestävyysaika- sekä murtovenymämittauksista mahdollisten läpäisykriteerien luomista varten. ”Wear out” -



menetelmästä saisi mahdollisesti tukea uusien ikääntymisenseurannan menetelmien käyttöönotossa Loviisan voimalaitoksella. Tiettyjen materiaalien ikääntymisenseurantaan menetelmä on myös itsessään käytännöllinen, kuten EPR:lle, jonka ikääntyminen voi alkaa yllättäen ja kehittyä nopeasti.

## 6 Yhteenveto

Insinööriyössä käytiin läpi ikääntymisenseurannan peruseriaatteet, yleisimmät testausmenetelmät, kuinka niitä sovelletaan ja ehdotettiin päivityksiä Loviisan ydinvoimalaitoksen ikääntymisenseurantaohjelmaan. Työssä painopiste oli materiaalia rikkomattomilla testeillä.

Insinööriyön lopputuloksena ehdotettiin uusia menetelmiä kaapelien ikääntymisen seurantaan Loviisan ydinvoimalaitokselle nykyisten lisäksi. Joitakin ehdotetuista menetelmistä on kokeiltu tai jopa sisällytetty ikääntymisenseurantaohjelmaan muilla ydinvoimalaitoksilla. Haasteeksi kuitenkin osoittautui se, että moni polymeerimateriaali käyttäytyy ikääntyessään eri tavoin, joten selkeiden, kaikkia kaapeleita kattavien läpäisykriteerien luominen on hankalaa. Siksi ehdotuksissa keskityttiin jo käytössä olevien testien lisäksi soveltamaan uusia menetelmiä.

Lisäksi työssä on myös lyhyt katsaus mahdollisista tulevista menetelmistä, kuten infrapuna- ja ultraäänimittauksista, joita parhaillaan tutkitaan.

Työn valmistuessa Loviisan kaapelijärjestelmien asiantuntijat arvioivat, otaanko työssä ehdotettuja menetelmiä käyttöön.

## Lähteet

- 1 Peer-review national assessment report of Finland 2017. luku 3 "Electrical Cables". Helsinki: Säteilyturvakeskus
- 2 SFS-EN IEC 62465:2019. Management of ageing of electrical cabling systems. Helsinki: SESKO ry
- 3 Tecdoc 1825. 2017. Benchmark Analysis for Condition Monitoring Test Techniques of Aged Low Voltage Cables in Nuclear Power Plants. Wien: Kansainvälinen atomienergiajärjestö IAEA.
- 4 A. Inkala. 2015. Loviisa 1 ja 2 sähköasennusten kunnonvalvonta Y-03-00064. Yrityksen sisäinen dokumentti. Fortum Power and Heat Oy.
- 5 Spång, Kjell. 2017. Methods for cable ageing management - Applicability and limitations. Olkiluoto: Cable Ageing seminar.
- 6 Tecdoc 1188. 2000. Assessment and management of ageing of major nuclear power plant components important to safety. Wien: Kansainvälinen atomienergiajärjestö IAEA.
- 7 Kaapelisanasto. Verkkoaineisto. Reka Kaapeli Oy. <<https://www.reka.fi/kaapelitietoa/kaapelisanasto>>. Luettu maaliskuu 2021
- 8 PEEK. Omnexus plastics & elastomers. Verkkoaineisto. <<https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyetheretherketone-peek-thermoplastic>, verkkoaineisto>. Luettu maaliskuu 2021.
- 9 PPA. Omnexus plastics & elastomers. Verkkoaineisto. <<https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyamide-pa-nylon/polyphthalamide-ppa-properties>>. Luettu maaliskuu 2021
- 10 EVA. Omnexus plastics & elastomers. Verkkoaineisto. <<https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/ethylene-vinyl-acetate/properties-of-eva>, verkkoaineisto, Luettu maaliskuu 2021
- 11 SiR. Omnexus plastics & elastomers. Verkkoaineisto. <<https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/silicone-rubber-elastomer>>. Luettu maaliskuu 2021.
- 12 Chlorosulfonated polyethylene. Corrosionpedia. Verkkoaineisto. <<https://www.corrosionpedia.com/definition/2884/chlorosulfonated-polyethylene-cspe>>. Julkaistu 14 helmikuuta 2019. Luettu maaliskuu 2021.
- 13 EFTE. Omnexus plastics & elastomers. Verkkoaineisto. <<https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/ethylene-tetrafluoroethylene-etfe-plastic>>. Luettu maaliskuu 2021.

- 14 Habia HFS 105 XL B datasheet. HabiaCable. Verkkoaineisto. <<https://www.habia.com/globalassets/documents---downloads/materials/materials---hfs105xlb---q.pdf>>. Luettu maaliskuu 2021
- 15 S. G. Burnay. 2018. Degradation of polymeric components in NPP applications. <<https://energiforsk.se/en/programme/polymeric-materials-in-nuclear-applications/reports/degradation-of-polymeric-components-in-nuclear-power-applications/>> Tukholma: Energiforsk Ab.
- 16 Agarwal, Mohit. 2016. Solar DC Cables. Verkkoaineisto. <<https://www.linkedin.com/pulse/solar-dc-cables-mohit-agarwal/>>. Julkaistu 22.11.2016. Luettu huhtikuu 2021
- 17 IEC/IEEE 62582 Parts 1-6:2012. Electrical equipment condition monitoring methods. Helsinki: SESKO ry
- 18 Gillen, Kenneth T. Assink, Roger A. Bernstein, Robert. 2005. Nuclear energy plant optimization (NEPO) Final Report on ageing and condition monitoring of low-voltage cable materials. Sandia National Laboratories: Albuquerque, New Mexico.
- 19 Marko Pirc. 2016. Book of abstracts of 11<sup>th</sup> international conference of the Croatian Nuclear Society. Cable Aging Management Program Implementation in Krško NPP-NEK. Krško: Journal of Energy.
- 20 Tao, Liu. Fei, Han. Haining, Shi. Xinming, Jin. 2010. Condition assessment of NPP cables through indenter modulus and break-elongation test. Suzhou: Suzhou Nuclear Power Research Institute.
- 21 Ohje YVL A.8. 2019. Ydinlaitoksen ikääntymisen hallinta. Helsinki: Säteilyturvakeskus.
- 22 Glass S.W. 2016. Assessment of NDE for key indicators of aging cables in nuclear power plants. <<https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4940629>>. Richland, Washington: Pacific Northwest National Library:
- 23 Jyri Piensalo. 2013. Kaapeleiden ja kaapelijatkosten suojaaminen ja koestaminen Loviisan voimalaitoksella. Insinööriyö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 24 Aro, Martti. 2015. Suurjännitetekniikka. Gaudeamus Oy: Espoo.
- 25 Sipilä, Konsta. Ryan, Jason. 2019. Polymer Components Exposed to Thermal-Radiative Environments. Energiforsk: Tukholma.
- 26 Peer-review National Assessment Report of Sweden 2017. Luku 3 "electrical cables". Solna: Strålsäkerhetsmyndigheten SSM.

- 27 Peer-review National safety Assessment of Nuclear Facilities in France 2017. Luku 3 "electrical cables". Montrouge: Autorité de Sûreté Nucléaire ASN.
- 28 Peer-review National Assessment Report of the Czech Republic 2017. Luku 3 "electrical cables". Praha: State Office for Nuclear Safety SUJB.
- 29 Rinta-Aho, Jari. Sipilä, Konsta. Vaari, Jukka. 2021. Studying the ageing of polyethylene by using non-destructive testing methods and molecular dynamics simulations. Espoo: VTT
- 30 Silicone rubber. SICCET. Verkkoaineisto. <<https://www.siccet.com/materials/silicone-rubber.html>>. Luettu maaliskuu 2021
- 31 C. J. Kiger. 2017. Implementation of new cable condition monitoring technology at Oyster Creek Nuclear Generating station. Knoxville, Tennessee: American Nuclear Society.
- 32 Jyri Piensalo. 2019. Suojarakennuksen sisäpuolisten kaapeleiden ikääntymisen seurantaohje T-04-00012. Yrityksen sisäinen dokumentti. Fortum Power and Heat Oy
- 33 Glass, S. W. Jones, A. M. Fifield, L. S. Hartman, T. S. 2017. Frequency domain reflectometry NDE for aging cables in nuclear power plants. vol. 1806, no. 1. <<https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.4974640>>. Richland, Washington: Pacific Northwest National Laboratory.
- 34 Santos, Roberto Carlos dos. Goncalves, Iraci Martine Pereira. 2013. Resistance temperature sensor aging degradation identification using LCSR (Loop Current Step Response) test. Sao Paulo, Brasilia: INAC international nuclear atlantic conference.
- 35 NP-T-3.6. 2012. Assessing and managing cable ageing in nuclear power plants. Wien: Kansainvälinen atomienergiajärjestö IAEA.
- 36 Dielectric strength of polymers. Polymer properties database. Verkkoaineisto. <<https://polymerdatabase.com/polymer%20physics/Dielectric%20Strength.html>>. Luettu huhtikuu 2021.
- 37 PE/Polyethylene. Galaxy wire & cable. <<https://www.galaxywire.com/custom-wire-cable/jacket-insulation/pe-polyethylene/>> Verkkoaineisto. Luettu huhtikuu 2021.
- 38 Alatalo, Pentti. 1975. Voimakaapelit ja asennusjohdot. Espoo: Oy Nokia Ab Kaapelitehdas.
- 39 Suomela, Tommi. kaapelijärjestelmävastaava Olkiluoto, TVO Oy, Microsoft Teams keskustelu huhtikuu 2021
- 40 Rydberg, Patrik ym. kaapeliasiantuntijoita, Vattenfall Ab, Microsoft Teams -keskustelu huhtikuu 2021

