



Satakunnan ammattikorkeakoulu  
Satakunta University of Applied Sciences

VISA NIEMI

# **Tehomuuntajan avaava perushuolto ja sen ympäristövaikutukset**

Opinnäytetyö

SÄHKÖ- JA AUTOMAATIOTEKNIIKAN  
KOULUTUSOHJELMA

2023

Tekijä Niemi, Visa	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Lokakuu 2023
	Sivumäärä 62	Julkaisun kieli Suomi
Julkaisun nimi <b>Tehomuuntajan avaava perushuolto ja sen ympäristövaikutukset</b>		
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikka		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia Omexomilla tehtävää muuntajan perushuoltoa ja perehtyä sen ympäristövaikutuksiin, mutta ottaa myös suppeasti kantaa taloudelliseen kannattavuuteen.</p> <p>Työssä tarkastellaan muuntajan eliniän pidentämistä perushuollolla ja verrataan uuden muuntajan hankkimiseen. Pääpiirteinä olivat ympäristölliset seikat. Laskennat suoritettiin hiilijalanjälki laskentatyökalulla ja omilla laskutoimituksilla, joissa käytettiin todennettuja päästökertoimia.</p> <p>Työssä käytettiin paljon arvioita ja kaikki arvot eivät ole todennettua faktaa. Hyvänä esimerkkinä on pidemmän aikajakson ennusteet, sillä tulevaisuutta ei voida tietää.</p> <p>Tutkimustyön ja laskennan pohjalta saatiin kerättyä tärkeää tietoa, mitä taloudellisia ja ympäristöllisiä etuja huollolla saavutetaan.</p>		
<p><u>Asiasanat</u> muuntaja, muuntajahuolto, ympäristö, hiilijalanjälki, suurjännitetekniikka</p>		

Author Niemi, Visa	Type of Publication Bachelor's thesis	Date October 2023
	Number of pages 62	Language of publication: Finnish
Title of publication <b>Power transformer maintenance and its environmental effects</b>		
Degree programme Electrical and automation engineering		
<p>Abstract</p> <p>The aim of the thesis was to study the opening maintenance of a transformer at Omexom and to get familiar with its environmental impact, but also to take a narrow view on the economic viability.</p> <p>The thesis examines the life extension of a transformer through opening maintenance and compares it with the purchase of a new transformer. The focus was on environmental considerations. The calculations were carried out using a carbon footprint calculation tool and backed up using own calculations with verified emission factors.</p> <p>Many estimates were used and not all values are verified facts. A good example is the projections for a longer period, as the future cannot be known.</p> <p>Based on the research and calculations, important information was collected, which economic and environmental benefits are achieved with maintenance.</p>		
<p><u>Key words</u> transformer, transformer maintenance, environment, carbon footprint, high voltage technology</p>		

## ALKUSANAT

Ympäristöasiat ovat jatkuvasti yhä merkittävämmässä roolissa työelämässä. Omexomin muuntajahuollosta on muut asiat huomioiden tehty tutkimustyötä nimenomaan sen ympäristövaikutuksista. Haluan kiittää esihenkilöäni, kollegoita ja muita toimijoita Omexomissa saamastani tuesta, tiedosta, opastuksesta ja kannustuksesta tätä opinnäytetyötä tehdessäni. Opinnäytetyötäni olen tehnyt töiden ohella itselleni uudessa yrityksessä, ja kiireitä on riittänyt tutustuessa ja oppiessa uutta työtä ja tätä opinnäytetyötä uurtaessa. Työn tekoa on kuitenkin helpottanut huomattavasti se, että olen saanut mahdollisuuden tehdä opinnäytetyötätyötä ajoittain myös työajalla. Kiitän myös läheisiäni tuesta ja kärsivällisyydestä opinnäytetyön aikana.

## SISÄLLYS

1 JOHDANTO .....	7
2 MUUNTAJA.....	8
2.1 Muuntajan rakenne .....	9
2.1.1 Rautasydän.....	9
2.1.2 Käämit, käämikytkin ja väliottokytkin .....	11
2.1.3 Muuntajaöljy ja vaihtoehtoiset eristysnesteet .....	13
2.1.4 Muuntajan säiliö ja läpivientieristimet.....	15
2.1.5 Jäähdytys- ja suojalaitteet .....	15
2.2 Muuntajan toiminta .....	17
2.3 Muuntajan vanhenemismekanismit .....	17
2.3.1 Eristepaperin ja öljyn kunnonvalvonta .....	18
3 MUUNTAJAHUOLTO JA MITTAUKSET .....	19
3.1 Muuntajille tehtävät huollot .....	19
3.1.1 Tarkastushuolto.....	19
3.1.2 Perushuolto ja sen vaikutukset.....	20
3.2 Tehomuuntajan avaava perushuolto .....	21
3.2.1 Aktiiviosan säiliöstä nosto .....	21
3.2.2 Käämitysten kiristys.....	22
3.2.3 Muuntajan sisäiset liitokset.....	23
3.2.4 Muuntajasydän .....	25
3.2.5 Käämikytkinhuolto .....	25
3.2.6 Muuntaja-, paisuntasäiliö ja tiivisteet .....	26
3.2.7 Muuntajan kuivaus.....	27
3.2.8 Suojalaitteet, läpiviennit, ulkoinen johdotus, apukaapit ja -kotelot....	28
3.2.9 Radiaattorit.....	28
3.2.10 Öljyn käsittely .....	28
3.3 Perushuollossa suoritettavat sähköiset mittaukset.....	28
3.3.1 Muuntosuhteen mittaus .....	29
3.3.2 Käämien vastusmittaus .....	29
3.3.3 Eristysvastusmittaus.....	30
3.3.4 Tyhjäkäyntivirran mittaus .....	30
3.3.5 DRM-mittaus .....	31
3.3.6 Läpivientivirtamuuntajien muuntosuhde ja napaisuuden tarkastus ....	31
3.4 Taloudellinen kannattavuus.....	32
3.4.1 Sääolosuhteet ja käyttöaste .....	32

3.4.2 Uuden muuntajan toimitusaika ja muuntajan sijainti.....	33
3.4.3 Hankintahinta sekä kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöt .....	33
4 UUDEN MUUNTAJAN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET JA HIILIJALANJÄLKI	
.....	35
4.1 Hiilijalanjälki ja päästökerroin .....	35
4.1.1 CO2-ekvivalentti ja GWP .....	35
4.2 Uuden muuntajan hiilijalanjälki .....	36
4.2.1 Laskennan rajaaminen .....	36
4.2.2 Työkalut .....	36
4.2.3 CarbonApp .....	37
4.2.4 Laskurin tulokset ja eliniän vaikutus päästöihin .....	37
4.3 Omat laskumenetelmät ja rajaaminen.....	39
4.3.1 Käytettävät päästökertoimet ja jakaumat .....	40
4.3.2 Sähkön- ja vedenkulutuksen päästöt .....	43
5 PERUSHUOLLON YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET JA HIILIJALANJÄLKI .....	45
5.1 Laskennan rajaaminen ja lähtötietojen keräys .....	46
5.1.1 Suorat hiilidioksidipäästöt ja ostoenergian päästöt (Scope 1 ja Scope	
2).....	46
5.1.2 Epäsuorat hiilidioksidipäästöt (Scope 3) .....	47
5.2 Perushuollon sähkönkulutus.....	47
5.2.1 Huoltohallin lämmitys ja valaistus.....	49
5.2.2 Kokonaiskulutus ja sen hiilijalanjälki.....	49
5.3 Huollon päästöjen laskeminen, käytetyt materiaalit, koneet ja ajoneuvot .....	50
5.4 Laskentatyökalun tulokset.....	50
5.5 Perushuollon ympäristövaikutukset pitkällä aikavälillä.....	52
5.6 Esimerkki 1.....	56
5.6.1 Esimerkki 2 .....	56
5.7 Laskujen vertailu .....	57
6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET .....	59

LÄHTEET

LIITTEET

## 1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön keskeisempänä tavoitteena on kerätä tietoa tehomuuntajille tehtävien perushuoltojen vaikutuksesta ympäristöön. Kerättyä tietoa vertaillaan uuden muuntajan hankkimiseen ja tarkastellaan pitkän aikavälin vaikutuksia. Samalla käydään läpi perushuollon teknistä ja taloudellista kannattavuutta. Työ rajataan Hikiällä tehtävään tyypillisen 110kV muuntajan huoltoon. Yritys tekee huoltoja aina 400kV kantaverkon suurtehomuuntajiin saakka, mutta tässä työssä niitä ei käsitellä. Muuntajan avaavalla perushuollolla tarkoitetaan huoltoa, jossa muuntajan aktiiviosa nostetaan säiliöstä ulos, eristys kuivataan ja käämit kiristetään.

Uusien muuntajien toimitusajat ovat tällä hetkellä erityisen pitkiä. Muuntajien hankintakustannukset ovat lisäksi nousseet rajusti inflaation myötä. Muuntajan perushuolto voi tästäkin syystä olla hyvinkin järkevä vaihtoehto verrattuna uuden muuntajan hankintaan. Huollolla voidaan lisätä muuntajan luotettavaa käyttöikää jopa 20 vuotta. Uudelle muuntajalle annetaan luotettavaa käyttöikää käytöstä riippuen esimerkiksi 30–45 vuotta, joten perushuolto lisää elinikään suhteutettuna luotettavaa käyttöikää hyvinkin merkittävästi.

Ympäristölliset kysymykset ovat nousseet jatkuvasti isommaksi tekijäksi niin työelämässä, kuin arkielämässä. Tästä syystä yritykset pyrkivät jatkuvasti kehittämään työskentelytapojaan ekologisemmiksi. Uusien muuntajien tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt ovat tyypillisesti alhaisemmat, joten huollon positiiviset ympäristölliset vaikutukset tulevat pääasiassa kierrätyksestä. Huollossa uusiokäytetään käytännössä kaikki, joten se on huomattavasti vähemmän kuormittavaa, kuin uuden materiaalin valmistaminen.

## 2 MUUNTAJA

Muuntajia käytetään vaihtojännitteen suuruuden muuttamiseen. Tehomuuntajat ovat useimmiten kolmivaiheisia ja niitä käytetään paljon esimerkiksi jakelu ja kantaverkoissa. Täten mahdollistetaan eri jännitteisten verkkojen yhteen liittäminen ja tehonsiirto niiden välillä. Muuntajat ovat pysyneet peruserämuotoiltaan hyvinkin samanlaisina jo pidemmän aikaa. Niiden pääosat ovat: rautasydän, käämit, öljy, eristysaineet, jäähdytyslaitteet, jännitteensäätölaitteet (väliotto- ja käämikytin), säiliö, läpiviennit ja suojaruuvit.

Isoja tehomuuntajia voi olla myös yksivaiheisia. Esimerkiksi EstLink 2 DC-linkin muuntajat ovat 400kV yksivaihemuuntajia, joita on 3kpl ennen tyristorisiltoja, jotka muuttavat vaihtojännitteen tasajännitteeksi. Itse otetussa kuvassa 1 näemme EstLinkin varamuuntajan. (Fingrid, 2014)



Kuva 1. Yksivaihetehomuuntaja



## 2.1 Muuntajan rakenne

Tämä kappale antaa yksityiskohtaista tietoa muuntajan rakenteesta ja komponenteista, joista muuntaja koostuu. Aktiivinen osa, jossa muunnos tapahtuu, koostuu sydäimestä ja käämeistä. Passiivisia osia ovat mm. tukirakenteet, eristimet, muuntajaöljy ja jäähdytyslaitteet. (ABB, 2004, s. 74)

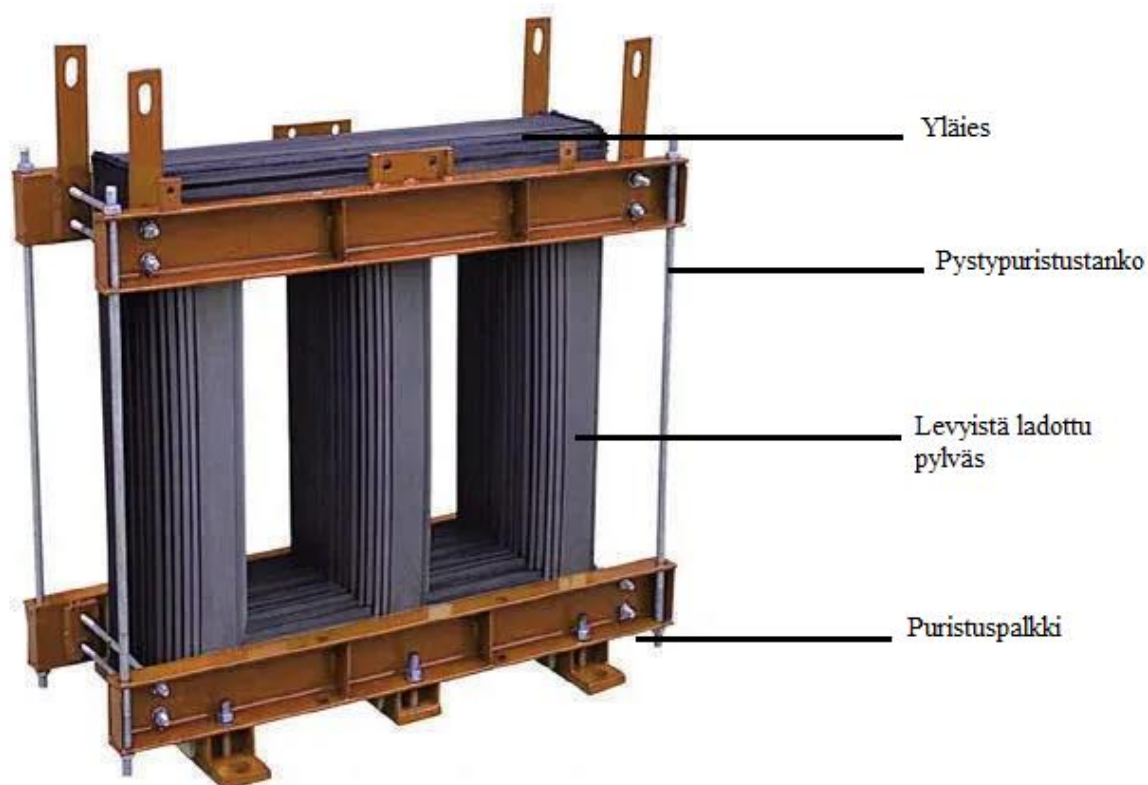
### 2.1.1 Rautasydän

Rautasydän koostuu ohuista eristetyistä peltilevyistä, jotka muodostavat pylviäitä ja niitä yhdistäviä levyrakenteita, joita kutsutaan ylä- ja alaikeeksi. Pylväät eristetään käämeistä usein kuvan 2 kaltaisella prespaanierieillä, joka on käytännössä erikoisvalmisteista pahvia.



Kuva 2. Prespaanieriste (Swift Supplies, 2023)

Pylväiden eristämisen lisäksi ensiö- ja toisiokäämit ovat eristetty toisistaan prespaanilieriöillä. Kuten kuvasta 3 voimme huomata, kolmivaihemuuntajissa on tyypillisesti kolme pylvästä, mutta tietyissä tapauksissa niitä voi olla viisi. Viisipylväisessä sydänmuuntajassa on kolme pylvästä, jotka on tarkoitettu käämeille, ja lisäksi kaksi pylvästä, jotka sijaitsevat ulompien käämien ulkopuolella. Tämä rakenne mahdollistaa sen, että yhden vaiheen magneettivuolle jää paluutie, joka ei riipu toisten vaiheiden magneettivuosta. Eli käytännössä jokaisella vaiheella on oma paluutie, mikä parantaa muuntajan toimintaa. Viisipylväinen muuntaja on rakenteeltaan matalampi ja tämän vuoksi voi tulla kyseeseen kohteessa, jossa tarvitaan matalamaa rakennetta. Käämien sijoittaminen samaan pylvääseen pienentää hajavuota ja hajareaktanssia. (ABB, 2004, s. 77–79; Korpinen, 2003, s. 3)

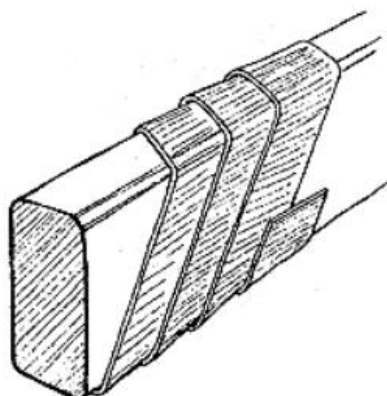


Kuva 3. Muuntajan sydän, puristuspaalkit ja pystypuristustangot (Indiamart, 2023)

### 2.1.2 Käämit, käämikytkin ja väliottokytkin

Rautasydämen pylvään ympärille on käämitty sekä ylä- että alajännitekäämit, jotka on kierretty päällekkäin. Muuntajassa yläjännitekäämit kutsutaan myös ensiökäämitykseksi ja alajännitekäämit toisiokäämitykseksi. Käämien materiaali voi olla joko kuparia tai alumiinia. Kuvan 4. mukaisesti käämien johtimet on yleensä muotoiltu suorakulmion muotoisiksi, koska se helpottaa käämistystä ja säästää tilaa. Johtimien eristeenä käytetään useimmiten paperia, joka on tehty valkaisuamattomasta selluloosasta. Eristeenä voi joissakin tapauksissa olla myös lakkaa tai hartsia, mutta tässä työssä keskitytään pääasiassa öljy-paperieristeseen. Kun johtimen poikkipinta-ala kasvaa, pyörrevirtahäviöt tulevat esiin. Tällöin johdin jaetaan useammaksi samansuuntaiseksi johtimeksi, joista jokainen eristetään toisistaan. (ABB, 2004, 80; Aura & Tonteri, s. 38–40)

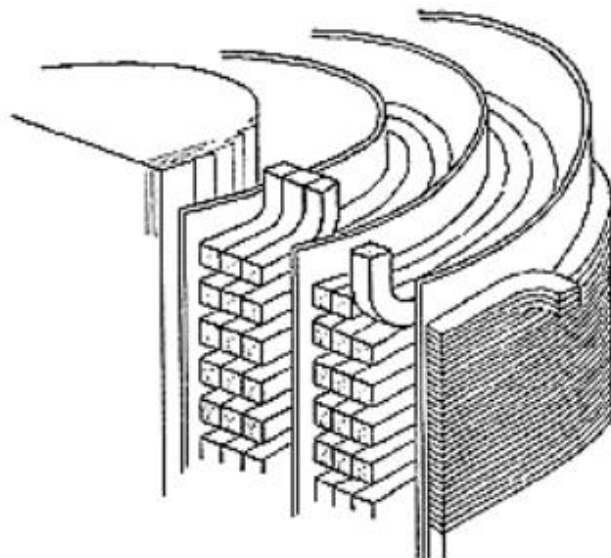
Alajännitepuolen käämit sijaitsevat lähimpänä rautasydäntä, koska ne ovat helpommat eristää sydäimestä. Ne voivat olla ruuvikäämejä tai kaksikerroskäämejä. Vaikeammin eristettävä yläjännitekäämi sijaitsee kauempana sydäimestä ja se on monikerroskäämi. Myös yläjännitekäämissä käytetään paperieristettä. Johdin voidaan eristää myös lakakerroksella. Yläjännitepuolella käämikytkimen asennuksella on vaikutusta käämin sijoittamiseen päällimmäiseksi. (Aura & Tonteri, 1996, s. 39–41)



*Conductor strand with insulation paper lapping*

Kuva 4. Suorakulmion mallinen johdin, jonka päällä on eristyspaperi (ABB, 2004, s. 80)

Alajännitekäämin ja muuntajan rautasydämen välissä on yleensä prespaanista rakennettu lieriömäinen eriste. Alajännite- ja yläjännitekäämien väliin laitetaan myös vastaavanlainen eriste, kuten kuvasta 5 voimme huomata. Kuvasta 5 näemme myös alajännitepuolen ruuvikäimityksen, yläjännitepuolen levykäämityksen ja jännitesäätöön tarkoitetun säätökäämityksen.



*A helical winding closest to the core followed by a disc winding and a layer winding for voltage regulation.*

Kuva 5. Toisiojännite-, ensiojännite- ja kerroskäämi (ABB, 2004, s. 86)

Kolmivaihemuuntajan kytkentäryhmissä käämit kytketään yleensä tähteen tai kolmioon. Joissain alajännitepuolen jakelumuuntajissa taas on käytössä hakatähtikytkentä. Tehomuuntajissa käytetään aina toisio ja ensiöpuolella tähti- tai kolmiokytkentää. Kytkennässä isot kirjaimet tarkoittavat yläjännitepuolen kytkentää ja pienet alajännitepuolen. Kirjain n tarkoittaa, että muuntajan kannelle on tuotu käytettävissä oleva tähtipiste.

Tehomuuntajissa on yleensä käämikytkin tai väliottokytkin muuntosuhteen säätämistä varten. Suurjännitemuuntajassa käämikytkimellä voidaan säätää  $\pm 15\%$  ja väliottokytkimellä  $\pm 5\%$ . Säätö tapahtuu yläjännitepuolen johdinkierrosmäärää muuttamalla.

Käämikytkimen toiminta perustuu muuttamalla käämin kierroslukumäärää muuntajan ollessa jännitteinen ja virrallinen. Käämikytkintä käytetään verkon jännitetason säätämiseen riittävän korkealle tasolle. Kuormituksen vaihtelu vaikuttaa jännitteen vaihteluna ja käämikytkimen säätämällä kompensoidaan tätä. Käämikytkimessä pääosina toimivat tehokytkin, valitsin ja ohjain. Tehokytkin suorittaa virran katkaisun. Tehokytkin on sijoitettu omaan öljytilaansa, sillä se likaa muuntajaöljyä. Valitsin toimii virrattomana, joten se on voitu sijoittaa muuntajan omaan öljytilaan. Käämikytkin saa energian toimintaansa varten ohjaimen virittämältä jousikoneistolta. Tällä voidaan varmistaa toiminta, vaikka omakäyttösähkö katkeaa.

Yleensä kantaverkon ja jakeluverkon muuntajissa käytetään käämikytkintä, koska sillä voidaan säädellä käytönaikaisesti jännitettä. Voimalaitosten generaattorimuuntajissa ja joissain jakelumuuntajissa, joissa ei tarvita käytönaikaista jännitteensäätöä voidaan käyttää väliottokytkintä. Väliottokytkin on toimintaperiaatteeltaan hyvin samanlainen, kuin tehokytkin, eli se säätää jännitettä muuttamalla muuntosuhdetta. Erona on se, että sitä voidaan ohjata ainoastaan jännitteettömänä.

### 2.1.3 Muuntajaöljy ja vaihtoehtoiset eristysnesteet

Tehomuuntajissa muuntaja täytetään yleensä mineraalipohjaisella muuntajaöljyllä. Muuntajaöljyn tarkoitus on toimia muuntajassa jäähdytys- ja eristysaineena. Muuntajaöljyä menee muuntajaan todella isoja määriä ja se on kriittinen osa muuntajan oikeaa toimintaa. Esimerkkinä 40 MVA, 110/20kV tehomuuntajassa öljyä voi olla noin 20 tonnia. Muuntajaöljyssä sähköiset ominaisuudet ja alhainen viskositeetti tekevät siitä hyvän aineen jäähdytykseen sekä muuntajan eristykseen. Huonoja puolia ovat sen alttius hapettumisella ja suhteellisen alhainen leimahduslämpötila. Muuntajaöljyn leimahduspiste on kuitenkin melkein 200 °C. (Nynas Naphthenics AB, 2004)

Muuntajaöljyn ominaisuudet heikkenevät olennaisesti, mikäli öljyyn kertyy epäpuhauksia, muuntajaöljy hapettuu tai kerää kosteutta. Selluloosapaperin ja öljyn yhdistelmällä saadaan aikaiseksi erittäin hyvä eristys, jonka sähkölujuus on huomattavasti parempi, kuin kummallakaan erikseen. Öljy täyttää muuntajan säiliön tehokkaasti ja me-

nee kaikkiin mahdollisiin väleihin. Tästä syystä se on loistava aine eristämään ja jäädyttämään muuntajaa. Paperi puolestaan pitää huolen, että öljy tunkeutuu jännitteisten osien väliin. Prespaani antaa myös tukea jänniteisille osille ja näiden yhdistelmällä varmistetaan hyvää mekaanista- ja sähkölujuutta.

Paperi ja öljyeristeen hyvässä eristyksessä on tärkeää, että paperin tulee kyllästyä täysin öljyllä, eikä ilmakuplia saa jäädä. Mikäli öljyyn jää ilmakuplia huonon imeytymisen takia, on mahdollista, että siitä aiheutuu purkauksia. Öljy myös pystyy mukautumaan lämpölaajenemisesta aiheutuviin muutoksiin. Muuntajassa on paljon puuta tukirakenteissa. Puu imee itseensä öljyä ja toimii siten hyvänä eristeenä.

Tehomuuntajissa ei aina voida käyttää mineraaliöljyä. Näistä esimerkkejä ovat palonkeston ja ympäristön vaatimukset. Vaihtoehtoja mineraaliöljylle ovat silikoniöljy ja esterit. Muuntajaöljy on erityisen haitallista päästessään luontoon. Sisätiloissa muuntajaöljyn syttyminen voi muun muassa aiheuttaa riskejä. Tästä syystä se täytyy eristää palamattomilla aineilla tai vaihtoehtoisesti käyttää kokonaan erilaista kuivamuuntajaa.

Esterit ovat luonnossa hajoavia, paloturvallisia eivätkä ne ole myrkyllisiä. Esterit ovat kuitenkin ominaisuuksiltaan heikompi eristysvaihtoehto, kuin muuntajaöljy. Tästä syystä niitä ei käytetä, jos on mahdollista käyttää mineraalipohjaista muuntajaöljyä. Esterin heikkoja puolia ovat esimerkiksi korkeampi hinta ja viskositeetti. Niissä on myös epätasainen häviökerroin, koska niissä veden liukeneminen on suurempaa.

Toinen mahdollinen vaihtoehto mineraaliöljylle on silikoniöljyt. Ne ovat palamattomia ja kemiallisesti stabiileja. Mineraaliöljyyn verrattuna niiden heikkouksia ovat pienempi sähkölujuus ja heikompi jäähdytys johtuen heikommasta lämmönjohtavuudesta. Mikäli silikonipohjaista öljyä käyttäessä tapahtuu läpilyönti, sen sähkölujuus heikkenee kertaheitolla huomattavasti enemmän verrattuna mineraalipohjaiseen öljyyn.

#### 2.1.4 Muuntajan säiliö ja läpivientieristimet

Muuntajan säiliö on osa mikä näkyy ensimmäisenä silmään ja mistä muuntajan kuori pääasiassa koostuu. Muuntajan sydän on säiliössä ja se pitää myös öljyt sisällään. Säiliön yläosaan tulee kiinni paisuntasäiliö ja osa suojalaitteista. Kylkeen tulee käyttösähkölle kaappi ja mittarit. Öljyntilavuuden vaihtelun vuoksi säiliöön tulevaa korvausilmaa otetaan ilmankuivaimen kautta. Radiaattoreissa on mahdollisesti myös tuulettimia. Säiliö on valmistettu seostamattomasta teräksestä ja profiilipalkeista. Säiliö on rakennettu hitsaamalla ja mahdollisia korjauksia on myös mahdollista tehdä täten. Isoissa muuntajissa käytetään usein sisäpuolelle tehtävää vuorausta ehkäisemään hajuvoiton tekemää lämpenemistä. (ABB 2004, s. 91)

Muuntajan kannella ovat myös läpivientieristimet, joissa ovat johtimet ja niiden ympärillä olevat eristeet. Muuntajassa läpivientien tulee varmistaa tiivis ulostulo säiliöstä ja eristää muuntajan runko jännitteisistä osista. Yleensä läpivientieristimet ovat hermeettisiä, eli niissä oleva eristemateriaali ei ole kontaktissa ulkopuolisen ilman kanssa. Pienemmissä muuntajissa, alle 24kV, rakenne pysyy suhteellisen yksinkertaisena ja se voidaan toteuttaa kuivilla- ja öljytäytteisillä posliinieristimillä.

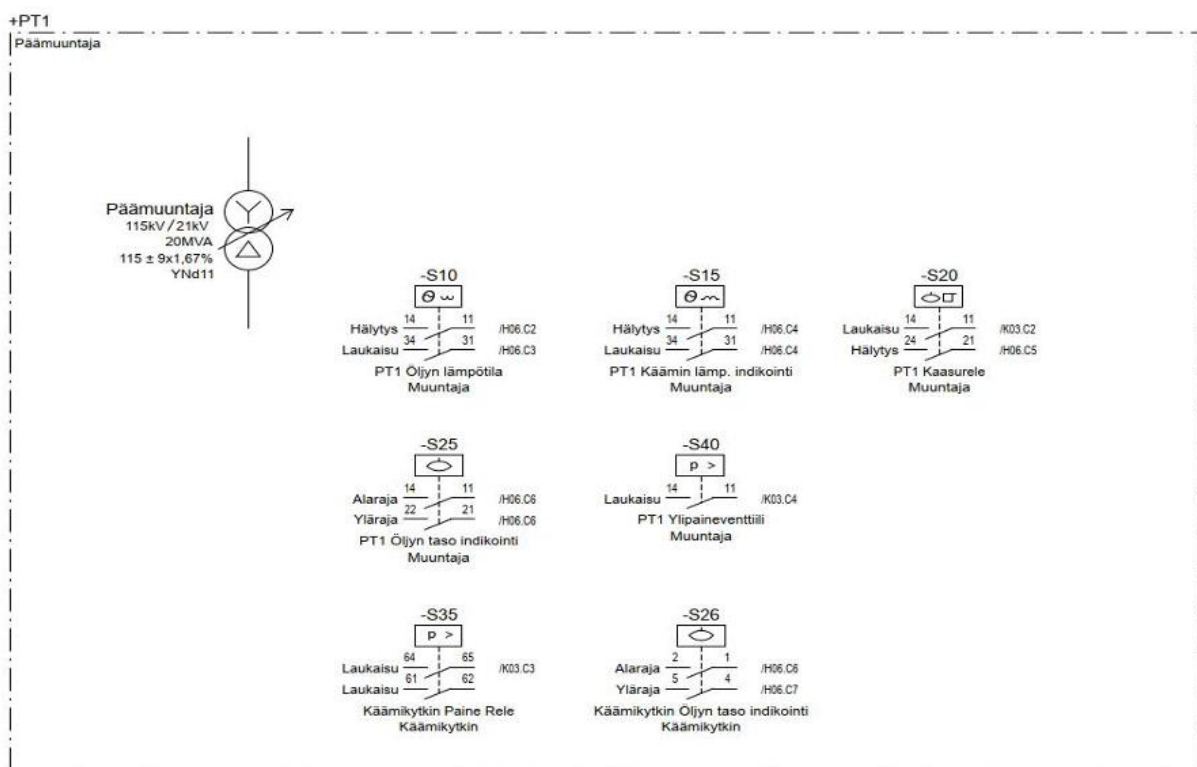
Isommissa muuntajissa yläjännitepuolella käytetään posliini- tai silikonieristeisiä kondensaattorirakenteisia läpivientejä. Kuparitanko tai johdin menee eristimen sisällä suoja-putkessa. Putken ulkopuolella ennen posliinista tai silikonista kuorta on sähköä johtavasta aineesta tehtyjä lieriöitä ja eristepaperikerroksia, jotka muodostavat itse kondensaattorirakenteen. (Aro ym., 2015, s. 162–165)

#### 2.1.5 Jäähdytys- ja suojalaitteet

Muuntajissa jäähdytyslaitteina toimivat radiaattorit. Radiaattoreiden idea on johtaa lämpöä ympäröivään ilmakehään. Öljy kiertää muuntajassa, joko vapaasti tai avustetuna pumpuilla, jotka vahvistavat öljyn lämmönhaihtumista. Radiaattoreissa voi olla myös ilmapuhaltimia, joita ohjataan öljyn lämpötilan perusteella.

Muuntajassa on suoja- ja valvontalaitteita, jotka estävät vakavammat seuraukset mahdollisissa vikatilanteissa. Vikoja olisi vaikeampi havaita ulkoisilla laitteilla, joten muuntajaan on integroitu sisäisiä suojalaitteita. Hälytys- ja laukaisutiedot lähtevät muuntajan ulkopuolisille suojaus- ja ohjauslaitteille. Integroituja suojalaitteita ovat esimerkiksi lämpötilamittarit ja suojareleet, jotka vikatilanteessa laukaisevat muuntajan pois verkosta tai antavat hälytyksen. Muuntajissa voi olla myös sisäiset virtamuuntajat, joita käytetään ohjaamaan suuret virrat suoja- ja mittalaitteistoille sopiviksi.

Ehkä tärkein suojalaite muuntajassa on kaasurele. Kaasurele aiheuttaa hälytyksen tai muuntajan laukaisemisen irti verkosta. Kaasureleen toiminta perustuu siihen, että muuntajavian sattuessa muuntajaan syntyvät kaasut havaitaan ja rele tekee hälytyksen. Mikäli vikatila on kriittinen, voimakas öljyosky laukaisee kaasureleen välittömästi ja irrottaa muuntajan verkosta. Kuvasta 6, voimme havaita muuntajaan integroituja suojalaitteita. Näiltä viedään laukaisu- ja hälytystiedot eteenpäin muuntajan pääsuojareleelle.



Kuva 6. Päämuuntajan suojalaitteiden yleiskaavio



## 2.2 Muuntajan toiminta

Muuntajassa teho siirtyy magneettivuon välityksellä toisiokäämiin. Käämien kierros-  
lukumäärien suhde on sama, kuin jännitteen suhde. Eli käytännössä muuntajan toi-  
minta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Muuntajan rautasydän on tärkeässä  
roolissa toimintaa ajatellen, sillä sen magneettisten ominaisuuksien vuoksi, magneet-  
tivuo on merkittävästi suurempi, kuin ilman rautasydäntä. Kun muuntajan toisiopuo-  
lelle kytketään kuormaa, toisiopuoleen indusoitunut jännite synnyttää siihen virran.  
Toisiopuolen virta aiheuttaa sen, että muuntajan päävuo pyrkii laskemaan ja siten las-  
kemaan ensiöpuolen jännitettä. Tästä seuraa tehon virtaaminen muuntajan läpi.  
(ABB, 2004, s. 136–137)

## 2.3 Muuntajan vanhenemismekanismit

Muuntajan ensisijainen vanhenemismekanismi on öljyn ja eristepaperin vanhenemi-  
nen. Öljyn ja eristepaperin kuntoa analysoimalla pystytään määrittämään muuntajan  
kuntoa. Tästä syystä muuntajista otetaan öljynäytteitä ylä- ja alapuolen venttiileistä.  
Öljyyn kertyvään kosteuteen vaikuttaa esimerkiksi ilmankuivaimen huono kunto, tii-  
vistevuodot ja kuormituksen vaihtelu. Liika kosteus öljyssä heikentää sen ominaisuuks-  
sia ja pahimmassa tapauksessa voi tapahtua läpilyöntipurkaus. (Aro & kumppanit.,  
2015, s. 184–187)

Vanhetessaan öljyyn kerääntyy happea ja typpeä, näiden lisäksi öljyn rakenne saostuu  
ja härskiintyy. Öljyn vanhenemista havaitaan öljyanalysoinneissa arvojen huononemi-  
senä. Öljyyn ja paperieristeeseen voi muodostua ilmakuplia. Nämä voivat johtaa osit-  
taispurkauksiin, jotka heikentävät muuntajan eristystä ja muodostavat vetykaasua sekä  
hiilihiukkasia. Näiden seurauksena vanhentuvan muuntajan jännitekestoisuus piene-  
nee. (Hyvönen ym., 2005, s. 11–13)

### 2.3.1 Eristepaperin ja öljyn kunnonvalvonta

Paperin kunnosta kertoo DP-luku (degree of polymerization). Uuden muuntajan DP-luku on noin 1200 ja muuntajassa, joka on käyttöikänsä lopussa noin 200. Paperin haurastumista ei voida estää, arvon pienentyessä muuntaja hajoaa helpommin rasiuksesta. Perushuoltoa tehtäessä muuntajasta voidaan ottaa paperinäyte ja määrittää DP-luku. Tietyissä tilanteissa on mahdollista ottaa paperinäyte myös avaamatta muuntajaa esimerkiksi ylipaineventtiilin läpiviennistä. Tarkimman mahdollisen arvon saavuttamiseksi näyte otetaan kuumimmasta kohdasta. Eristepaperin kuntoon vaikuttaa myös merkittävästi kosteuden määrä. Kosteus voidaan todeta näytteestä tai eristysvastusmittauksen huonontuneessa mittaustuloksessa. (Aro & kump., 2015, s. 184–186)

Muuntajaöljystä tehtävät analyysit kertovat paljon muuntajan kunnosta. Näytteitä voidaan analysoida esimerkiksi kaasukromatografialla ja läpilyöntijännitteen testauksella. Näytteet kuljetetaan tyypillisesti laboratorioon ja analysoidaan siellä. Testitulokset annetaan asiakkaille ja näiden perusteella päätetään mahdollisista jatkotoimista. Öljyyn liuenneiden kaasujen määrästä voidaan päätellä muuntajassa piileviä ja kehittyviä vikoja. Äkilliset viat kasvattavat kaasujen määrää merkittävästi, mutta ne kasvavat myös normaalissa vanhenemisessa. (Aro & kump. 2015, 206–208; Jari, S. 2023)

## 3 MUUNTAJAHUOLTO JA MITTAUKSET

### 3.1 Muuntajille tehtävät huollot

Muuntajille tehtäviä huoltoja ovat perushuolto, käämikytkinhuolto, öljyn käsittely ja muita pienempiä huoltoja, kuten yleinen ja tärkeä tarkastushuolto. Tarkastushuollossa ja muissa pienemmissä huolloissa ei avata muuntajaa, kiristetä käämejä tai kuivata muuntajaa.

#### 3.1.1 Tarkastushuolto

Muuntajan tarkastushuollossa tehdään tarkastuksia, testauksia, puhdistuksia, tarvittavia pieniä korjauksia ja testataan laukaisuja. Tarkastushuolto voidaan tehdä myös käämikytkinhuollon yhteydessä. Huollossa voidaan myös ottaa öljynäyte, jos se koetaan tarpeelliseksi ja asiakas näin haluaa. Ulkoisiin tarkastuksiin sisältyy mm. radiaattorit, venttiilit, öljyvuodot, tiivisteet, jakokaapit, kotelot, johdotus, tuulettimet, pumput, ruostevauriot, maalaus, ilmankuivain, läpiviennit ja öljymäärä. Tämän lisäksi koestetaan suojalaitteiden hälytykset ja laukaisut. Tarkastushuoltoon sisältyy myös lämpötilamittausten tarkastus keittämällä niiden antureita öljyssä. Kaikki havainnot, tulokset ja huomiot kirjataan tarkastus- ja huoltopöytäkirjaan, joka luovutetaan asiakkaalle huollon jälkeen.

Muuntajaan voidaan tehdä myös tarvittaessa vuotokorjauksia, mikäli sellaisia havaitaan. Mikäli muuntajassa on käämikytkin, sen toiminta testataan ja lukema kirjataan ylös, vaikka itse käämikytkinhuoltoa ei suoriteta. Erikseen sovittaessa kosteusnäyte voidaan ottaa eristeestä ja muuntaja pestä. (Jari S, 2023, henkilökohtainen tiedonanto)

### 3.1.2 Perushuolto ja sen vaikutukset

Muuntajan perushuollon tavoitteena on jatkaa muuntajan luotettavaa käyttöikää, pienentää riskiä vikaantumiselle ja alentaa kunnossapitokustannuksia. Niin kuin aikaisemmin mainittu, paperieristeiden kuntoa ei voida parantaa. Tästä syystä on tärkeää ottaa muuntajasta paperinäyte, jotta voidaan analysoida muuntajan kuntoa ja eliniän odotetta paremmin. Perushuolto on usein hyvä vaihtoehto sen sijaan, että investoitaisiin uuteen muuntajaan.

Perushuollossa havaittuja vikoja voidaan tehokkaasti korjata, mutta osaa vioista ei pystytä. Havainnot, joita ei pystytä korjaamaan käytetään kuitenkin hyväksi ehkäisemään ongelmia tulevaisuudessa ja muuntajan kunnan valvonnassa. Muuntajasta selvitetään mahdolliset siirtojen ja käytön aikana tulleet vauriot ja DP-luku. Muuntajan aktiivi-osan peseminen vähentää osittaispurkauksia ja ehkäisee eristyksen vanhenemista. Mikäli tukirakenteissa on vikaa, ne voidaan korjata, joka parantaa muuntajan oikosulkulujuutta.

Alajänniteliitoksien eristysten purkaminen ja pultiliitosten kiristys auttaa kuumenemiseen ja ehkäisee löystymistä. Yläjännitepuolella myös kiristäminen auttaa löystymiseen ja heikentää riskiä osittaispurkauksiin. Muuntajan eristeistä tutkitaan niiden paikoillaan pysyminen, vanhenemisen tasaisuus ja vauriot. Näillä pystytään seuraamaan eristeiden vanhenemista ja ennakoida paremmin muuntajan käyttöikää ja -varmuutta.

Muuntajan sydäimestä pystytään mahdollisesti selvittämään lämpeneminen, joka johtuu kiertävistä virroista, sekä mahdollisesta kipinöinnistä. Käämikytimestä pystytään selvittämään nokeentumista ja mekaanisia vikoja. Voidaan siis todeta, että muuntajan perushuollolla pystytään selvittämään muuntajan kunto läpikotaisin.

### 3.2 Tehomuuntajan avaava perushuolto

Perushuolto suoritetaan usein huolto paikalla, joka on Omexomin tapauksessa Hikiällä. Muuntajat kuljetetaan huolto paikalle lavetilla. Omexom tekee huoltoja myös käyttö paikalla tilanteissa, jossa ei ole mahdollista kuljettaa muuntajaa. Kentällä tehtävissä huolloissa tehdään samat toimenpiteen kuin huolto paikallakin. Kuvassa 7. ollaan Hikiän huolto paikalla nostamassa muuntajaa kiskokärryille.



Kuva 7. Muuntajan nosto kiskokärryille

#### 3.2.1 Aktiiviosan säiliöstä nosto

Hallissa nostetaan muuntajan aktiiviosa säiliöstä käyttämällä siltanosturia. Nosturin koko on yksi rajoittava tekijä, mikäli on kyse isosta muuntajasta. Mikäli nosturi ja tilat eivät riitä, on huolto suoritettava käyttö paikalla. Tämän jälkeen aktiiviosa tarkastetaan mahdollisten vaurioiden varalta, jotka ovat voineet syntyä käytön tai kuljetusten ai-

kana. Nokeentuminen aktiiviosassa voi viitata kipinöintiin ja lämpenemiseen esimerkiksi johdin- tai kiskoliitoksissa. Lisäksi käämien liikkuminen voi aiheuttaa oikosulkuvoimia, mikä voi viitata käämien löystymiseen. Aktiiviosasta poistetaan roskat ja epäpuhtaudet pesemällä se puhtaalla muuntajaöljyllä. Kun aktiiviosa on nostettu säiliöstä, pidetään katselmus, johon osallistuvat myös asiakkaan edustajat. Tukirakenteet, jotka tukevat muuntajan aktiiviosaa, tarkastetaan ja korjataan tarvittaessa.

### 3.2.2 Käämitysten kiristys

Perushuollon yhteydessä muuntajan käämit kiristetään ennen aktiiviosan kuivauksen aloittamista ja myös sen jälkeen. Tällä toimenpiteellä pyritään palauttamaan muuntajan oikosulkulujuus alkuperäiselle tasolle, mikäli käämit ja muut aktiiviosan rakenteet ovat löystyneet käytön aikana.



Kuva 8. Käämien kiristäminen tunkeilla

Käämien kiristäminen tapahtuu puristuspalkissa olevien pystypuristustankojen avulla. Näitä tankoja käytetään kiristämällä muttereita, jotka sijaitsevat käämien päissä. Joissakin muuntajissa käämitystä voidaan kiristää myös asettamalla tunkki käämin ja puristuspalkin väliin ja lisäämällä prespaania.

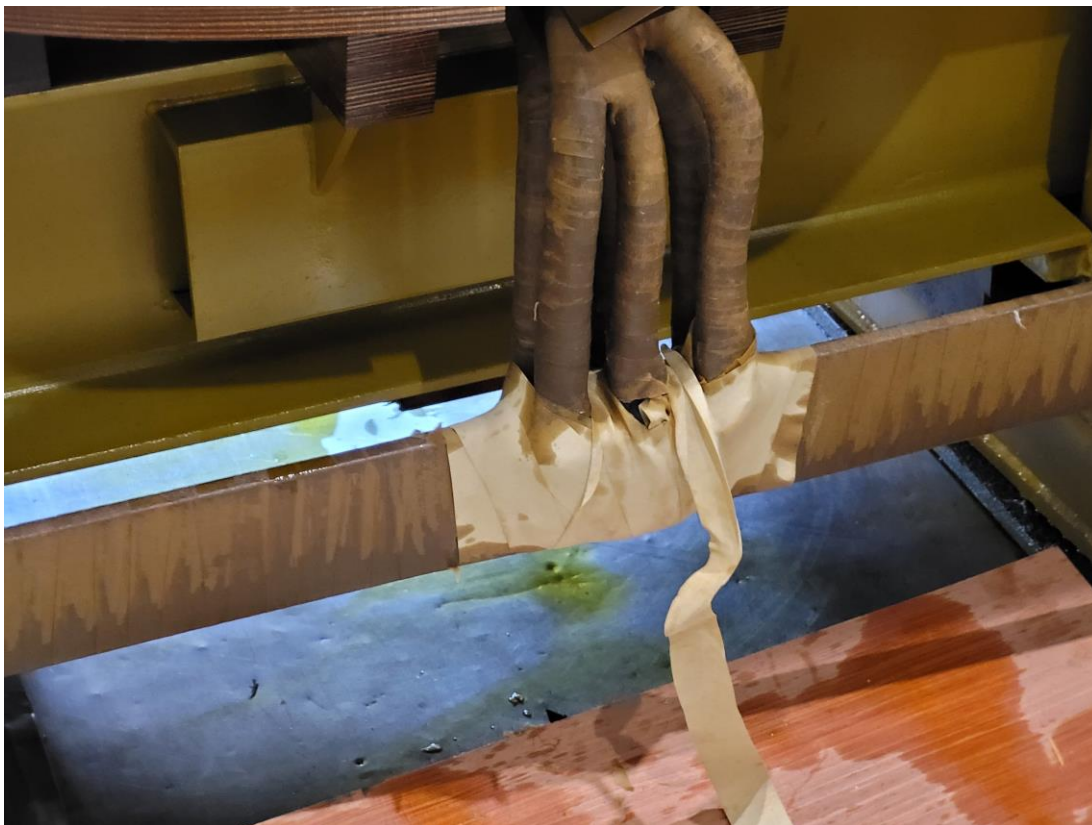
Käämien löystyminen voidaan havaita esimerkiksi vyyhtivälikkeiden löysyyden perusteella. Muuntaja kokee erilaisia rasituksia käytön aikana, kuten oikosulkutilanteissa, verkkoon ja verkosta kytkettäessä sekä kuormituksen vaihdellessa. Näiden rasitusten seurauksena käämien tuki voi löystyä ja muuntajan kyky selviytyä käytön aikaisista rasituksista heikkenee, erityisesti iän myötä. Tämä löystyminen voi aiheuttaa käämien liikahtelua, mikä puolestaan voi johtaa vaurioitumiseen.

### 3.2.3 Muuntajan sisäiset liitokset

Kun tarkastellaan alajänniteliitoksia, niiden eristykset puretaan ja pulttiliitokset kiristetään huolellisesti. Alla olevissa kuvissa 9 ja 10. on tämä työvaihe meneillään. Tarvittaessa nämä liitokset korjataan ja eristetään uudelleen varmistaen niiden asianmukainen kunto.



Kuva 9. Alajännitepuolen kiskoliitos



Kuva 10. Liitoksen uudelleen eristäminen

Yläjänniteliitosten eristysten tarkastelussa menetellään hieman eri tavalla. Noin 10 prosenttia yläjänniteliitosten eristyksistä puretaan, ja loppujen kunto arvioidaan päällimmäisen eristyskerroksen kunnon perusteella. Kuvassa 11. on purettu yläjänniteliitos. Tämä menetelmä perustuu siihen, että päällimmäinen eristyskerros toimii ensisijaisena suojana ja antaa merkkejä mahdollisista vaurioista tai kulumisesta. Taloudellisista ja käytännön syistä ei ole kannattavaa purkaa kaikkia yläjännitepuolen eristeitä.

Eristeiden tutkimisessa otetaan huomioon useita tekijöitä. Eristeiden paikoillaan pysyminen on erityisen tärkeää, jotta ne voivat suorittaa tehtävänsä luotettavasti. Eristeiden on myös kestävä ajan kulumista tasaisesti, jotta ne eivät menetä tehokkuuttaan tai heikennä eristystä. Mahdolliset vauriot, kuten repeämät, halkeamat tai kulumisjäljet, arvioidaan ja tarvittaessa korjataan asianmukaisesti.





Kuva 11. Yläjännitepuolen liitos

Kaiken kaikkiaan näiden tarkastustoimenpiteiden tavoitteena on varmistaa, että alajännite- ja yläjänniteliitokset ovat optimaaliset ja eristeissä ei ole rikkoja. Tarkastus ja tarvittaessa korjaustoimenpiteet auttavat ehkäisemään mahdollisia vikoja tai vaurioita.

#### 3.2.4 Muuntajasydän

Muuntajasydäimestä ja eristyspalkeista mitataan eristykset. Muuntajasydäimestä voidaan tehdä korjaustoimenpiteitä, jos se on mahdollista ilman sydämen ja sen tukirakenteiden purkamista. Puristuspalkeista varmistetaan, että pulttien ja palkkien maadoitukset ovat kunnossa.

#### 3.2.5 Käämikytkinhuolto

Erityyppisistä käämikytkimistä riippumatta niiden huoltotoimenpiteet ovat pääosin samat. Kuitenkin erilaisten mekaanisten toimintojen ja rakenteellisten erojen vuoksi

huoltotyön suoritustapa voi vaihdella. Tärkeimmät huoltotoimenpiteet sisältävät öljyn suodatuksen, tehokytkimen puhdistuksen, tehokytkinsylinterin puhdistuksen, koskettimien tarkastuksen, askelvastusten tarkastuksen, tiivisteiden tarkastuksen sekä paine-/virtausreleen tarkastuksen.

Hiiltyneen öljyn ja muun lian puhdistamiseksi tehokytkin pyyhitään räteillä ja harjalla, samoin tehdään tehokytkinsylinterille. Tehokytkimen liikkuvien ja kiinteiden koskettimien pinnat tarkastetaan niiden paksuuden ja kunnan osalta, ja tarvittaessa ne vaihdetaan. Askelvastukset mitataan ja niiden arvoja verrataan valmistajan ohjearvoihin. Tiivisteiden kunto tarkistetaan ja ne vaihdetaan mieluiten aina huoltotoimenpiteiden yhteydessä. Käämikytkimen suojalaitteena toimiva paine-/virtausrele testataan varmistaen, että se laukeaa, kun käämikytkimen paine tai öljynvirtaus ylittää releen asetusarvon.

### 3.2.6 Muuntaja-, paisuntasäiliö ja tiivisteet

Muuntajassa esiintyy erilaisia tiivisteitä läpivienneissä, kannessa, luukuissa, putkistossa, venttiileissä, kojeissa, käämi- ja väliottokytkimessä sekä venttiilin karoissa. Huoltotoimenpiteiden aikana kaikki kumikorkki- tai kumitiivisteet uusitaan, koska ne voivat kulumisen tai vanhenemisen myötä menettää tehokkuutensa. Lisäksi tarkastellaan muita tiivisteitä ja korvataan kaikki rikkoutuneet tai vaurioituneet tiivisteet tarpeen mukaan. Tällainen huolellinen tiivisteiden tarkastus ja korvaaminen varmistavat, että muuntaja pysyy tiiviinä ja vähentää vuotojen riskiä.

Huoltotoimenpiteisiin kuuluu myös muuntaja- ja paisuntasäiliön tarkastus ja puhdistus. Näiden säiliöiden kunnan arviointi on tärkeää, koska ne ovat ulkoinen suoja muuntajassa ja niiden eheyden varmistaminen on olennaista. Mahdolliset korroosioauriot korjataan, jotta säiliöt säilyvät luotettavina ja pitkäikäisinä. Perushuoltoon sisältyy lisäksi ulkopuolinen pintakäsittely, joka suoritetaan kevyellä maalaamisella. Tämä parantaa muuntajan ulkonäköä ja suojaa sitä ympäristövaikutuksilta, kuten korroosiolta.

### 3.2.7 Muuntajan kuivaus

Muuntajan aktiiviosan kuivaamiseen on käytettävissä kaksi pääasiallista menetelmää: tyhjö-lämpömenetelmä ja kerosiinikuivaus. Näiden menetelmien avulla voidaan poistaa kosteutta paperieristyksestä ja hidastaa sen vanhenemista. Tyhjö-lämpömenetelmässä muuntajan säiliöstä tyhjennetään öljy, ja siihen luodaan tyhjiö. Muuntajaa lämmitetään kuivausuunissa useita vuorokausia. Kuivaus auttaa myös saamaan käämit entistä kireämmälle, sillä kosteana puuosat ovat turvonneena.

Toinen vaihtoehtoinen menetelmä on aktiiviosan kerosiinikuivaus. Tässä menetelmässä kerosiinihöyry tiivistyy muuntajan aktiiviosan pinnoille ja luovuttaa lämpöenergiaa, joka lämmittää muuntajaa. Tiivistynyt kerosiini pesee samalla epäpuhtaudet pois pinnoilta. Kerosiinikuivausmenetelmä on tyhjö-lämpömenetelmää nopeampi. Perushuollon lopputuloksen kannalta ei ole käytännön eroa näiden kahden menetelmän välillä, ja eri toimittajat voivat käyttää joko toista tai molempia menetelmiä tilanteesta riippuen. Omexom käyttää tyhjö-lämpömenetelmää pääasiallisena kuivaustapana huoltopaikalla.

Muuntajaa voidaan kuivauksen yhteydessä lämmittää myös ulkopuolisella lämmityksellä. Tämä voidaan toteuttaa syöttämällä käämeihin tasavirtaa tai käyttämällä LFH eli Low-frequency heating lämmitysmenetelmää, jossa käämeihin syötetään pienitaajuista vaihtovirtaa. Tätä menetelmää käyttäessä tulee myös käyttää kuumaöljysuihkusta tai vastaavaa metodia, millä muuntajan muut sisäiset rakenteet saadaan lämmitettyä haluttuun lämpötilaan.

Kun muuntajaa lämmitetään ulkopuolisella lämmityksellä, on tärkeää seurata sen lämpenemistä käämin resistanssin mittauksella. Näin voidaan varmistaa, ettei johdineristys vahingoitu liian korkealla johtimen lämpötilalla. Tasavirtalämmityslaitteisto on yksinkertainen, kompakti ja hinnaltaan edullisempi verrattuna LFH-lämmitykseen. Tasavirta- ja LFH-lämmitys tulevat kysymykseen lähinnä suurimpien 220 kV ja 400 LFH muuntajien kuivauksen yhteydessä.

### 3.2.8 Suojalaitteet, läpiviennit, ulkoinen johdotus, apukaapit ja -kotelot

Suojalaitteet huolletaan, niiden toimintaa tarkastetaan ja tarvittaessa ne vaihdetaan uusiin. On myös mahdollista, että muuntajaan lisätään suojalaitteita perushuollossa, mikäli asiakas näin haluaa. Läpiviennit tarkastetaan huolellisesti. Mikäli huomataan, että posliiniosissa on havaittavissa rikkoutumista, öljyanalyysi kertoo huonosta kunnosta tai mittaustulokset ovat huonot, ne vaihdetaan uusiin. Läpiviennin sisään on sijoitettu metallilevyjä, jotka tekevät sen rakenteesta kapasitiivisen. Uloimmasta levystä otetaan ulosotto, jota käytetään mittauspisteenä. Läpiviennistä mitataan häviökulma ja kapasitanssi, sekä niistä otetaan öljynäytteet, mikäli mahdollista. Muuntajan ulkoinen johdotus tarkistetaan ja kiinnitykset uusitaan. Apukaapit ja -kotelot puhdistetaan ja komponenttien kunto tarkastetaan. Tarvittaessa myös kaapelointi, komponentit ja kaapit uusitaan.

### 3.2.9 Radiaattorit

Radiaattorit tarkastetaan ja varmistamaan, etteivät ne vuoda. Myös radiaattorien läpivientiventtiilit tarkastetaan ja uusitaan tiivisteet. Tarvittaessa radiaattoreihin voidaan tehdä vuotokorjauksia tai uusia kokonaan, tämä on kuitenkin harvinaista.

### 3.2.10 Öljyn käsittely

Öljy suodatetaan ja tyhjiö käsitellään öljynsuodatuslaitteilla. Öljyyn kertyy vanhetessaan kosteutta, epäpuhtauksia ja liuenneita kaasuja. Nämä poistetaan suodatuksessa. Käsittelyn jälkeen öljyn sähkönlujuus paranee. Tyypillisesti 110 kV muuntajan öljyn käsittely kestää noin 16 tuntia.

## 3.3 Perushuollossa suoritettavat sähköiset mittaukset

Huollon jälkeen suoritetaan sähköiset mittaukset. Mittauksilla on monta erilaista käytettyä nimeä, yksi näistä on varmistusmittaus. Näitä mittauksia ovat mm. muuntosuhteen mittaaminen jokaisessa käämikytkimen asennossa, kytkentäryhmän tarkastus, käämien

tasavirtavastusten mittausta, DRM mittausta, eristysvastusmittaus ja yläjännitekäämin vaiheiden tyhjäkäyntivirran mittausta pienellä jännitteellä, yleensä 230V.

### 3.3.1 Muuntosuhteen mittausta

Muuntosuhteen mittausta eli TTR, Transformer turns ratio, mittaustaella selvitetään nimensä mukaisesti muuntajan muuntosuhde. Muuntosuhdemittaus suoritetaan jokaisessa käämikytkimen asennossa. Muuntosuhde mitataan muuntajan perushuollon yhteydessä ja yleisin tapa suorittaa se on yläjännitepuolelta alajännitepuolelle, jotta vältytään korkeilta jännitteiltä mittarilla. Tulokset saavat vaihdella nimellisarvoihin verrattuna maksimissaan 0,5 %. Mitattuja tuloksia verrataan muuntajan tyyppikilvessä oleviin arvoihin. (OMICRON, 2022, s.14–15; IEC-60076-1; IEEE C57.152)

### 3.3.2 Käämien vastusmittaus

Muuntajasta mitataan käämien resistanssit perushuollon yhteydessä. Käämien resistanssien mittaustaella muuntajasta voidaan havaita mahdollisia kontaktivikoja läpivienneissä, kierroksien välisiä oikosulkuja ja rikkinäisiä johtimia. Mitattaessa resistanssit käämikytkimen jokaisessa asennossa voidaan samalla tarkkailla käämikytkimen kuntoa. Käämien vastusten mittausta on hyvinkin yksinkertaista ja siitä saadaan huomattava määrä tietoa.

Mittaus tapahtuu syöttämällä tasavirtaa käämiin, tästä syystä mittausta voidaan kutsua myös tasavirtavastusten mittaukseksi. Käämistä saadaan määritettyä resistanssiarvo mittaamalla käämiin vaikuttava jännite ja virta. Käämejä mitattaessa on erityisen tärkeää ladata se käämin ”kyllästymiseen asti”, eli siihen asti, kun arvot tasaantuvat. Resistanssiarvot ovat hyvinkin pieniä ja mittarin tulee havaita pienetkin erot.

Käämityksiä mitattaessa vastusten tulosten ei pitäisi poiketa yli 1 % verrattuna vertausarvoon. Lisäksi vaiheiden erot tulisi olla alle 2–3 %. Mittauksia verrattaessa tulee huomioida lämpötilasta johtuva korjauskerroin. Tavallinen viittaus on esimerkiksi 75 °C.

(OMICRON, 2022, s.12–13)

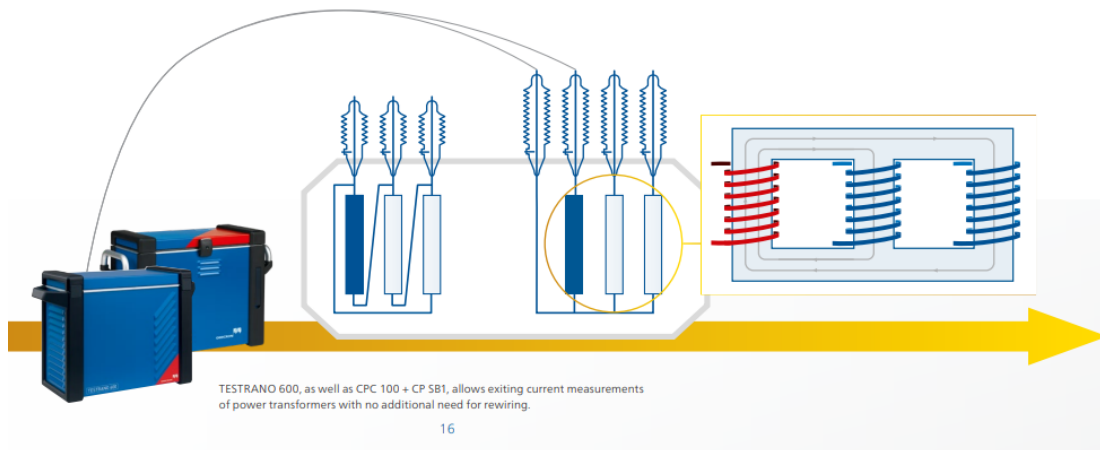
### 3.3.3 Eristysvastusmittaus

Eristysvastusmittauksessa mitataan käämien välistä tai käämien ja rungon välistä vastusarvoa. Mittaus on tärkeä perushuollossa, sillä esimerkiksi kosteus eristeissä vaikuttaa mittaustuloksiin ja kuivauksen myötä arvojen tulisi olla hyvät. Mittaus indikoi myös muita vakavia vaurioita tai heikkenemistä muuntajan eristeissä. Muuntajassa tapahtuvia osittaispurkauksia eristysvastusmittaus ei kuitenkaan havaitse, joten pelkästään sillä ei voida saada kattavaa arviota muuntajan kunnosta.

Perushuollon jälkeen mittaus tapahtuu syöttämällä mitattavaan muuntajaan tasajännitettä. Jännitteestä syntyy muuntajan eristeisiin vuotovirtaa, jonka mittalaite tunnistaa ja laskee eristysvastusarvon. Suurjännitemuuntajille vastuksen tulisi olla yli gigaohmin luokkaa. Lämpötila vaikuttaa mittaustulokseen ja luotettavan arvon saamiseksi olosuhteet tulisivat olla mahdollisimman lähellä 20 °C. Testijännite on tyypillisesti 1–10kV muuntajan koosta riippuen. (Aro & kump. 2015, 191–193; CIGRE 2011, 55; IEEE C57-152 2015)

### 3.3.4 Tyhjäkäyntivirran mittaus

Tyhjäkäyntivirran- eli magnetointivirran mittaus koostuu suurimmaksi osaksi rautasydämen magnetointivirrasta. Tyhjäkäyntivirran mittauksella ja vertaamalla vaiheiden tuloksia toisiinsa, sekä vertailemalla aikaisempia tuloksia voidaan tarkkailla rautasydämen kuntoa. Mittauksella voidaan myös vertailla kierrossulkuja sekä käämikytkimien kontaktien ja johdotusten kuntoa. Kierrosoikosulkujen havaitsemiseksi mittaus tulee suorittaa korkealla jännitteellä. (OMICRON, 2022, s. 16–17; Aura & Tonteri, 2009, s. 273–274)



Kuva 12. Tyhjäkäyntivirran mittaaminen (OMICRON, 2022, s. 16)

### 3.3.5 DRM-mittaus

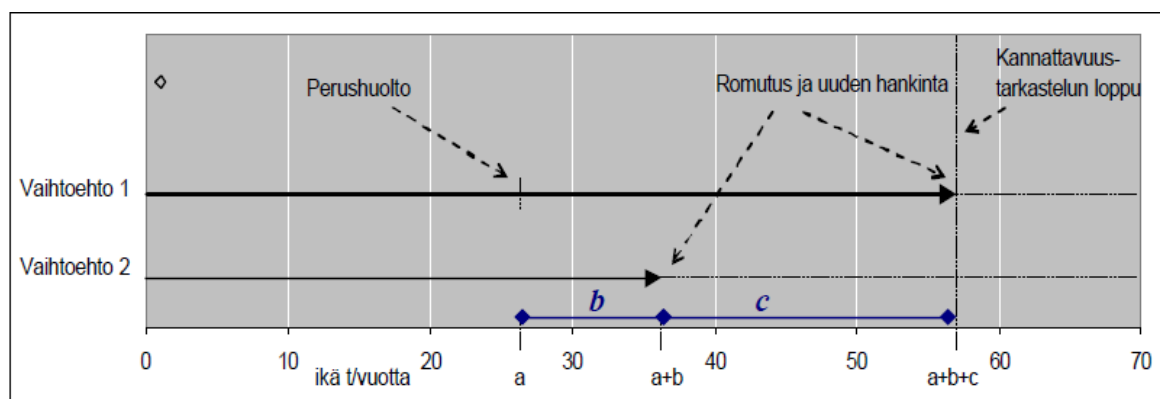
DRM-mittaus, eli ”dynamic contact resistance measurement” suoritetaan poikkeuksetta muuntajan perushuollon mittauksissa. DRM-mittauksia voidaan käyttää muihinkin mittauksiin, kuten mittaamaan valokaarikosketin kulumista avaamalla katkaisijaa. Muuntajan mittauksessa DRM-mittauksella pystytään selvittämään käämikytkimen tai väliottokytkimen oikeaa toimintaa. Käytännössä mittauksessa testataan, ettei muuntajassa tule katkoa käämikytkintä ajettaessa. Ennen moderneja mittalaitteita mittaus on suoritettu jopa hehkulampulla, joka on katkeamattomana palaessaan osoittanut toiminnan.

### 3.3.6 Läpivientivirtamuuntajien muuntosuhde ja napaisuuden tarkastus

Muuntajasta mitataan myös läpivientien virtamuuntajat. Näistä selvitetään muuntosuhde, joka voi olla esimerkiksi 500:1. Samassa yhteydessä näistä tarkastetaan myös napaisuus.

### 3.4 Taloudellinen kannattavuus

Muuntajan perushuoltoa harkittaessa, taloudellinen kannattavuus on iso tekijä päätöksenteossa. Taloudelliset vaikutukset ovat laaja käsite, eikä niihin syvennytä tässä opinäytetyössä vaan käydään pintapuolisesti läpi. Investoinnin kannattavuuteen vaikuttaa monet eri tekijät, näitä ovat esimerkiksi perusinvestointi, saatavat nettotulot, pitoaika, romuarvo ja laskentakorko. Perusinvestoinnilla tarkoitetaan kaikkia kustannuksia, joita investoinnissa syntyy ennen hankkeen valmistumista käyttöön. Alla olevasta kuvasta näkee perushuollon vaikutuksen muuntajan elinikään.



Kuva 13. Vaihtoehto 1: muuntaja huolletaan. Vaihtoehto 2: muuntajaa ei huolleta. (Otso Takala, 2005)

Perushuolto lisää keskimäärin muuntajan luotettavaa käyttöikää noin 20 vuotta. Eli jos muuntajan huolto suoritetaan esimerkiksi 25 vuoden iässä ja normaalisti käyttöikä tulisi vastaan 35 vuoden kohdalla, voidaan muuntajan luotettavaa käyttöä jatkaa jopa 55 vuoteen asti.

#### 3.4.1 Sääolosuhteet ja käyttöaste

Sääolosuhteet Suomen leveysasteella ovat reilusti otollisemmat muuntajalle verrattuna lämpimämpiin maihin. Usein talvella muuntajaa kuormitetaan eniten, jolloin on myös paras jäähdytys kylmän ulkoilman vuoksi. Kesällä taas kuormitus on usein pienempi, jolloin lämmöt eivät sen vuoksi nouse merkittävästi. Muuntajan elinikä voi olla jopa



puolet pidempi hyvissä olosuhteissa verrattuna huonoihin. Tämä on yksi syy, minkä takia suomessa on otollista huoltaa muuntajia.

Muuntajan käyttö- ja kuormitusaste ovat myös merkittävässä roolissa muuntajan elin-iän arvioimisessa. Mikäli muuntajaa ajetaan koko ajan nimellisteholla ja se käy kuu-mana, elinikä on merkittävästi lyhyempi, kun esimerkiksi sellaisessa muuntajassa, joka seisoo puolet ajasta ja ajaa 50 % kuormalla. Tämä johtuu siitä, että eristepaperi vanhenee nopeammin kuumassa. (Aro & kump., 2015, s. 184–186)

#### 3.4.2 Uuden muuntajan toimitusaika ja muuntajan sijainti

Tietyissä tilanteissa muuntajat ovat sijoitettu erittäin hankaliin kohteisiin, esimerkiksi maan alle. Joissain tapauksissa uuden muuntajan hankkiminen voi vaatia kokonaan uuden sähköaseman rakentamista maan pinnalle. Näissä tapauksissa perushuollolla voidaan lykätä kalliita investointeja ja suunnitella tulevaisuus pidemmällä marginaa-lilla.

Uusien muuntajien toimitusajat ovat erittäin pitkiä. Tällä hetkellä ei ole ollenkaan ta-vatonta, että muuntajan toimitusaika on 16-36kk tilauksesta. Perushuolto voidaan to-teuttaa murto-osassa tästä ajasta, keskimäärin huolto kestää kokonaisuudessaan 6 viik-koa. Tarvittaessa tapauskohtaisesti sitä pystytään tarkastelemaan lyhyemmäksi riip-puen muuntajan kunnosta ja sijainnista.

#### 3.4.3 Hankintahinta sekä kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöt

Voimakkaan inflaation ja materiaalivaikeuksien vuoksi uusien muuntajien hankinta-hinnat ovat nousseet räjähdysmäisesti viimeisen 15 vuoden aikana. Perushuollon kus-tannukset ovat noin 10–15 % uuden muuntajan kustannuksista.

Uudessa muuntajassa voi olla hieman pienemmät kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöt, mutta se ei ole aina välttämättä niin. Kuten taulukosta 1 huomaamme valtaosa muun-tajan kokonaiskustannuksista ja päästöistä tulee käytönaikaisista häviöistä, joten nii-den painoarvo on merkittävä.

Vertailun vuoksi seuraavaksi esitetään eräiden vanhojen Strömbergin valmistamien 110kV muuntajien laskennalliset tehot ja häviöt ja vertaillaan niitä uudempiin muuntajiin.

Taulukko 1. Muuntajien häviöitä nimelliskuormalla (Strömberg 1982 s. 237, ABB 2000 s. 319, Hitachi Energy 2023)

<b>1982</b>	Tyhjäkäyntihäviöt, P0 (kW)	Kuormitushäviöt, Pk (kW)
16MVA	16,1	88
25MVA	21,8	121
31,5MVA	24,5	136
40MVA	33,5	178
50MVA	32,7	212
<b>2000</b>	Tyhjäkäyntihäviöt, P0 (kW)	Kuormitushäviöt, Pk (kW)
16MVA	11	74
25MVA	15,5	100
31,5MVA	18	122
40MVA	23,5	146
50MVA	27	175
<b>Nykyhetki</b>	Tyhjäkäyntihäviöt, P0 (kW)	Kuormitushäviöt, Pk (kW)
16MVA	9,5	52
25MVA	12	80
31,5MVA	16	87
40MVA	18	109
50MVA	28	150

Kuten taulukoista voimme todeta, muuntajien häviöt ovat pienentyneet merkittävästi paremman teknologian ja uusien vaatimusten myötä.

## 4 UUDEN MUUNTAJAN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET JA HIILIJALANJÄLKI

### 4.1 Hiilijalanjälki ja päästökerroin

Hiilijalanjälki kuvaa, jonkun rajattavissa olevan asiakokonaisuuden aiheuttamaa kuormaa ilmastolle. Ilmastokuormaa aiheutuu kasvihuonekaasujen, kuten metaanin, hiilidioksidin ja typpioksiduulin päästöistä maapallon ilmakehään. Laskuissa ilmaistu hiilijalanjälki ilmaistaan hiilidioksidiekvivalenteina ja eri kaasuille on annettu erilaiset kertoimet vaikutusten huomioinnissa. Tärkeää hiilijalanjäljessä on ottaa huomioon kaikki kokonaisuuteen liittyvät päästöt koko elinkaaren aikana. Tietyissä tapauksissa se voidaan kuitenkin ilmaista esimerkiksi vuotta kohden.

Päästökerroin taas kuvaa syntyvien päästöjen määrää suhteessa tuotteen tai palvelun määrään. Päästökertoimet ovat merkittävässä osassa hiilijalanjäljen laskemista ja sen määrittämistä. Ne voivat kuvata monia eri asioita, joissain tapauksissa niitä käytetään ainoastaan hiilidioksidipäästöihin ja taas toisaalta ne voivat sisältää kaikki mahdolliset kasvihuonekaasupäästöt. (OpenCO2, 2023, CO2-termit tutuiksi, kohta ”mikä on hiilijalanjälki ja mikä on päästökerroin”)

#### 4.1.1 CO<sub>2</sub>-ekvivalentti ja GWP

Hiilidioksidiekvivalentti kuvaa kasvihuonepäästöjen yhteenlaskettua ilmastoa lämmittävää vaikutusta. Erilaisilla kasvihuonekaasuilla on eri hiilidioksidikertoimia ja näitä kuvataan lyhenteellä GWP (Global Warming Potential). Työssä listataan muuntajissa käytettäviä materiaaleja ja kaasuja ja annetaan näiden kertoimet. IPCC eli hallitusten välinen ilmastopaneeli määrittää ja julkaisee GWP-arvot raporteissaan.

Perusidealtaan asteikko toimii siten, että hiilidioksidin ilmastoa lämmittävä arvo on 1. GWP ilmoitetaan tietylle ajanjaksolle ja hiilijalanjälkeä laskiessa käytetään 100

vuotta. Esimerkiksi metaanin vaikutus suhteessa hiilidioksidiin on 28-kertainen. (OpenCO2 2023, CO<sub>2</sub>-termit tutuiksi, kohta ”mitä CO<sub>2</sub>-ekvivalentti tarkoittaa?”)

## 4.2 Uuden muuntajan hiilijalanjälki

Hiilijalanjäljen laskeminen tapahtuu kertomalla kulutetun materiaalin määrä, käytetty energia tai kuljettu matka niiden päästökertoimilla. Hiilijalanjälki esitetään hiilidioksidiekvivalenteina ja massan ilmoittamiseen voidaan käyttää grammoja, kiloja tai tonneja. Tässä työssä hiilijalanjälki ilmoitetaan tonneina. On tärkeää huomata, että hiilijalanjäljen laskeminen voi olla monimutkaista, ja eri lähteet voivat tarjota erilaisia päästökertoimia ja laskentamenetelmiä.

### 4.2.1 Laskennan rajaaminen

Hiilijalanjäljen laskenta aloitettiin rajaamalla laskettavat päästölähteet, sekä käytettävät laskentatyökalut. Muuntajaan käytettävien materiaalien kuljetukset tehtaalle rajattiin pois, sillä ne olisivat hyvin hankalat arvioida, mutta itse muuntajien haalaus ja kuljetus käyttökohteeseen otettiin huomioon. Muuntajien kuljetuksiin päätettiin etäisyydeksi 400 km. Muuntajien päästöissä ei huomioitu esimerkiksi eliniän aikana tehtäviä tarkastushuoltoja, sillä niiden merkitys olisi laskentaan hyvin pieni ja päästöjen arvioiminen lähes mahdotonta. Muuntajien romutusvaiheessa tulevien kierrätettävien materiaalien kuljetus jatkokäsittelyyn rajataan pois, koska se vaihtelee suuresti ja ei ole juurikaan merkityksellinen kokonaisuuden kannalta. Tämän lisäksi jatkokäsittelyiden materiaalien kuljetusten päästöt voidaan tulkita kuuluvan kierrätyksestä vastaavalle taholle.

### 4.2.2 Työkalut

Työkaluina käytetään CarbonAppia, sekä vertailun vuoksi itse tehtyjä laskuja omalla laskentatyökalulla ja kaavoilla. Muuntajahuollossa syntyviä päästöjä pyritään myös

arvioimaan mahdollisimman tarkasti, arvot perustuvat opinnäytetyössä tehtyihin laskuihin. Ympäristöllisissä näkökulmissa tulee myös ottaa huomioon esimerkiksi muuntajaöljyn uusiokäyttö, joka on huomattavasti ympäristöystävällisempää verrattuna öljyn uusimiseen.

#### 4.2.3 CarbonApp

CarbonApp on Omexomilla käytössä oleva hiilijalanjälkilaskuri. Sovelluksessa on valmiina paljon dataa, jota voi hyödyntää esimerkiksi projektien päästöjen laskemiseen. Sovellus antaa dataa raaka-aineiden, tuotannon, kuljetusten ja käytön päästöistä. Opinnäytetyössä käytetään esimerkkinä 40MVA ja 63MVA muuntajia. Muuntajille on annettu arviot niiden painosta, kuljetusetäisyydestä, sekä tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöistä. Laskennassa on arvioitu uuden muuntajan käyttöiäksi 25 vuotta ja vertailuna 45 vuotta.

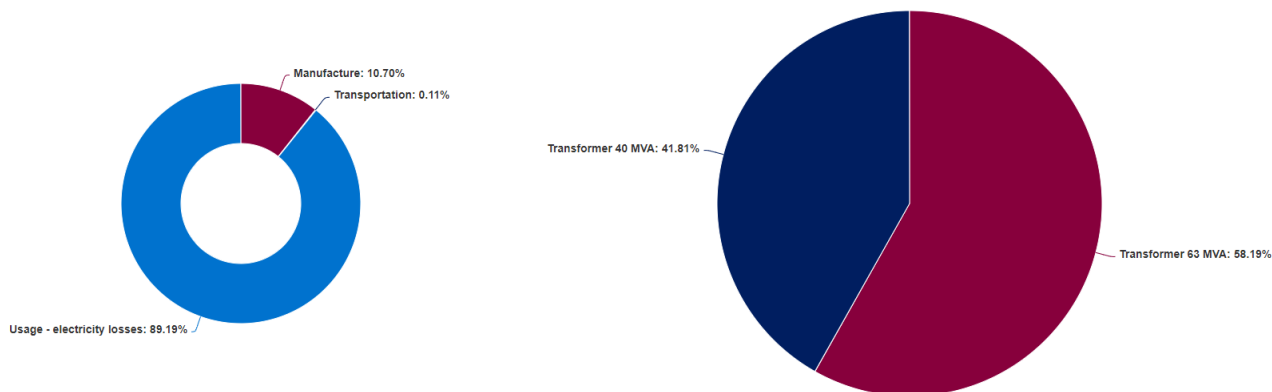
#### 4.2.4 Laskurin tulokset ja eliniän vaikutus päästöihin

Laskenta aloitettiin luomalla projekti CarbonAppiin, jossa asetettiin projektin elinkaareksi 25 vuotta ja lisättiin siihen yksi 63 MVA ja yksi 40MVA muuntaja. Paino arviointiin vertailemalla vastaavia muuntajia ja otettiin niiden keskiarvot. Myös tyhjäkäyntihäviöt ja kuormitushäviöt ovat arvioita ja vaihtelevat muuntajien välillä. Muuntajien kuljetukseksi asetettiin 400 km, joka käsittää matkan tehtaalta kohteeseen. Kyseinen arvo on arvio Suomen sisällä ja havainnollistaa hyvin, kuinka pieni merkitys kuljetuksella on koko muuntajan elinkaaren päästöihin. Monessa tapauksessa muuntajat kuljetetaan merirahtina toiselta puolelta maailmaa esim. Koreasta tai jopa kauempaa. Alla olevassa kuvassa näemme käytetyt arvot.

Sorting Material 		Quantity All	Lifetime (years)	No load losses (kW)	Load losses (kW)	Transport (km)
Transformer 40 MVA	kg	65,000.0	25	30.00	160.00	400.0
Transformer 63 MVA	kg	85,000.0	25	45.00	200.00	400.0

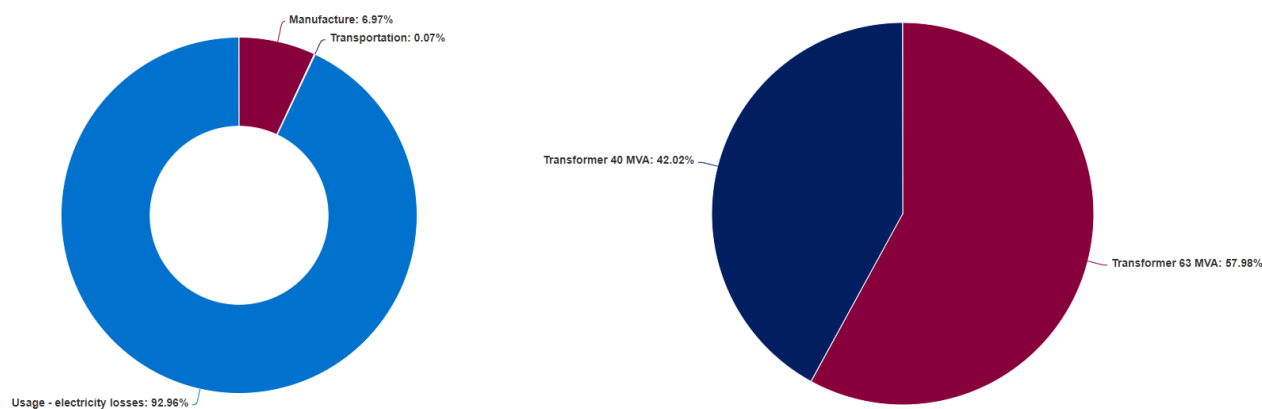
Kuva 14. Käytetyt oloarvot muuntajille

Seuraavissa kuvissa näkyy päästöjen jakauma. Ylivoimaisesti isoin hiilijalanjälki tulee käytönaikaisista häviöistä. Myös tuotanto on merkittävässä osassa päästöjä. Kuljetuksen vaikutus tässä on hyvin pieni, mutta kuitenkin huomioitava. Verrattaessa 40MVA muuntajaa 63MVA muuntajaan, huomataan, että Päästöjen jakauma on noin 42 % ja 58 %, joka on hyvin lähellä muuntajien tehon eron suhdetta.



Kuva 15. 25 vuoden elinkaarella muuntajan päästöjakauma

Laskurin mukaan kokonaispäästöt ovat 3 977.17 tCO<sub>2</sub>ekv, tästä määrästä 1662.79tCO<sub>2</sub>ekv on 65 tonnia painavasta 40MVA muuntajasta ja loput 2314.38tCO<sub>2</sub>ekv on 85 tonnia painavasta 63MVA muuntajasta. 40 vuoden käyttöiässä käytettiin muuten täysin samoja arvoja. Suhteessa valmistuksen ilmastokuormitus pienenee, mitä pidempään muuntaja on käytössä, joka pienentää kokonaisuudessaan ilmastokuormitusta.



Kuva 16. 40 vuoden elinkaarella muuntajan päästöjakauma

Kokonaispäästöt ovat 6105.53 tCO<sub>2</sub>ekv, tästä määrästä 2565.73tCO<sub>2</sub>ekv on 65 tonnia painavasta 40MVA muuntajasta ja loput 3539.80tCO<sub>2</sub>ekv on 85 tonnia painavasta 63MVA muuntajasta.

Näistä tuloksista voidaan päätellä, että on kannattavaa pitää muuntaja mahdollisimman kauan verkossa, jotta saadaan vähennettyä valmistuksen osuutta kokonaispäästöistä. Myöhemmin työssä tutkitaan perushuollon päästöjä ja sen kannattavuutta, mutta käytännössä siitä aiheutuvat päästöt ovat erittäin vähäiset muuntajan elinikää ajatellen.

#### 4.3 Omat laskumenetelmät ja rajaus

Vertailun vuoksi lasketaan uuden muuntajan valmistamisen hiilijalanjälki omilla laskukaavoilla ja vertaillaan tuloksia CarbonApin antamiin arvoihin. Laskennoissa otetaan huomioon mahdollisimman hyvin kaikki päästöihin vaikuttavat tekijät. Laskeminen tapahtuu kertomalla kulutetun materiaalin määrä tai kuljettu matka niiden päästökertoimilla.

Laskentaan mukaan otetut tekijät:

- Valmistus (Materiaalit, energiankulutus)
- Tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt
- Logistiikka
- Kierrätyksen päästöt ja ”negatiiviset päästöt”

Negatiiviset päästöt tarkoittavat uudelleen kierrätettävien materiaalien ”hyvitystä” päästöihin. Muuntajasta jopa 95 % materiaaleista on kierrätettävissä, joten kierrättämisen vaikutus on merkittävä. Laskuissa ei ole tarkkaa arvoa esimerkiksi tehtaan veden- ja sähkön kulutukselle, sillä ne vaihtelevat huomattavasti. Perustuen vanhaan kirjallisuuteen on kuitenkin arvioitu suuntaa antavat arvot.

#### 4.3.1 Käytettävät päästökertoimet ja jakaumat

Muuntajien tyypillinen materiaalien jakauma vaihtelee, mutta on pääsääntöisesti hyvin samantyyppinen. Laskuissa käytettävät materiaalijakaumat ja päästökertoimet ovat seuraavat:

- Muuntajan sydänteräs 40 %
- Kupari 15 %
- Eristemateriaalit 5 %
- Muuntajaöljy 20 %
- Terässäiliöt 20 %

Näille materiaaleille on seuraavassa taulukossa 2 esitetty päästökertoimet kilogrammaa kohden. Materiaalien hiilijalanjälki saadaan jakamalla muuntajan paino kyseisen materiaalin määrällä ja kertomalla tämä annetun materiaalin päästökertoimella. (Kulasek ym., 2020, s. 54)

Taulukko 2. Muuntajan materiaalien päästökertoimia

<b>Materiaali</b>	<b>Päästökerroin kgCO<sub>2</sub>ekv /kg</b>
Teräs (Kaikki muut rautaosat paitsi sydän)	2,5
Muuntajan sydänteräs	2,77
Kupari	4,74
Eristemateriaalit	0,82



Alla olevissa taulukoissa 3 ja 4. ovat laskut muuntajien materiaalien hiilijalanjäljestä. Käytetyt kaavat ovat annettu myöhemmin.

Taulukko 3. 40 MVA Muuntajan materiaalipäästöt

40MVA esimerkkimuuntaja				
Materiaali	Paino KG	Päästöker- roin	Päästöt (tCO <sub>2</sub> ekv)	Osuus materiaalipääs- töistä
Teräs (Kaikki muut rauta- osat paitsi sydän)	13000	2,5	32,5	19,22 %
Muuntajan sydänteräs	26000	2,77	72,02	42,58 %
Kupari	9750	4,74	46,215	27,33 %
Mineraaliöljy	13000	1,21	15,73	9,30 %
Eristemateriaalit	3250	0,82	2,665	1,58 %
<b>Yhteensä</b>	<b>65000</b>		<b>169,13</b>	<b>100,00 %</b>

Kuten taulukosta voi päätellä, muuntajan materiaalipäästöistä suurin osa tulee metalleista, mutta tämä on myös luonnollista, sillä valtaosa materiaaleista on metalleja, jos öljyä ei oteta huomioon jopa 95 %.

Materiaalien päästöjen kohdalla käytetty kaava on:

$\text{kokonaispaino t} * \text{materiaalin osuus} * \text{päästökerroin} = \text{materiaalista aiheutuvat päästöt tCO2ekv.}$

Esim. kupari 63MVA muuntajassa:  $85 \text{ t} * 0,15 * 4,74 = 60,435 \text{ tCO2ekv.}$

Taulukko 4. 63 MVA Muuntajan materiaalipäästöt

63MVA esimerkkimuuntaja

Materiaali	Paino KG	Päästökerroin	Päästöt (tCO2ekv)	Osuus materiaalipäästöistä
Teräs (Kaikki muut rautaosat paitsi sydän)	17000	2,5	42,5	19,22 %
Muuntajan sydänteräs	34000	2,77	94,18	42,58 %
Kupari	12750	4,74	60,435	27,33 %
Mineraaliöljy	17000	1,21	20,57	9,30 %
Eristemateriaalit	4250	0,82	3,485	1,58 %
<b>Yhteensä</b>	<b>85000</b>		<b>221,17</b>	<b>100,00 %</b>

#### 4.3.2 Sähkön- ja vedenkulutuksen päästöt

Laitosten sähkön ja vedenkulutuksessa käytetään esimerkkinä suomessa toimivaa kansainvälistä muuntajatehdasta ja päästökertoimina käytetään Suomen keskiarvollisia päästökertoimia vedessä ja sähkössä. Mahdollisimman tarkka arvo saadaan laskemalla vuoden sähkönkulutus jaettuna vuodessa valmistettujen muuntajatonni perusteella ja kertomalla tämä arvo muuntajan painolla. Vuosina 2019–2021 Suomessa sähkön-tuotannon yhteistuotanto on jaettu energiamenetelmällä ja tällä laskettu päästöt ovat 77 kg CO<sub>2</sub>/MWh. Tässä ei oteta huomioon ulkomailta tuotua sähköä, mutta käytämme arvoa laskuissa. (Tilastokeskus 2023)

Veden päästökerroin on kokonaisuuden kannalta niin merkityksetön, että jätämme sen pois laskuista. Tehtaan vuotuisina arvoina käytetään 8083MWh sähkönkulutusta ja 10 281 435 kg valmistettuja muuntajakiloja. (OpenCO<sub>2</sub>, veden tuotanto, Netta Rintala 2021, s.34)

$$8083 \text{ MWh} * 77 \text{ kgCO}_2\text{ekv. /MWh} = 622\,391 \text{ kgCO}_2\text{ekv.} = 622,4 \text{ tCO}_2\text{ekv.}$$

$$622,4 \text{ tCO}_2\text{ekv.} / 10281,44 \text{ t} = 0,060535 \text{ tCO}_2\text{ekv. /muuntajatonni}$$

Tonnikohtainen päästö kerrotaan muuntajan painolla, jolloin saadaan yhden muuntajan valmistamisen sähkönkulutuksen hiilijalanjälki, alla on laskut kummastakin muuntajasta.

$$0,0605\text{tCO}_2\text{ekv.} * 65 \text{ t} = 3,93 \text{ tCO}_2\text{ekv.}$$

$$0,0605\text{tCO}_2\text{ekv.} * 85 \text{ t} = 5,15 \text{ tCO}_2 \text{ ekv.}$$

Yhteensä muuntajien valmistuksen hiilijalanjäljet ovat siis

## 40MVA

$$3,93 \text{ tCO}_2\text{ekv.} + 169,13 \text{ tCO}_2\text{ekv.} = 173,06 \text{ tCO}_2\text{ekv.}$$

## 63MVA

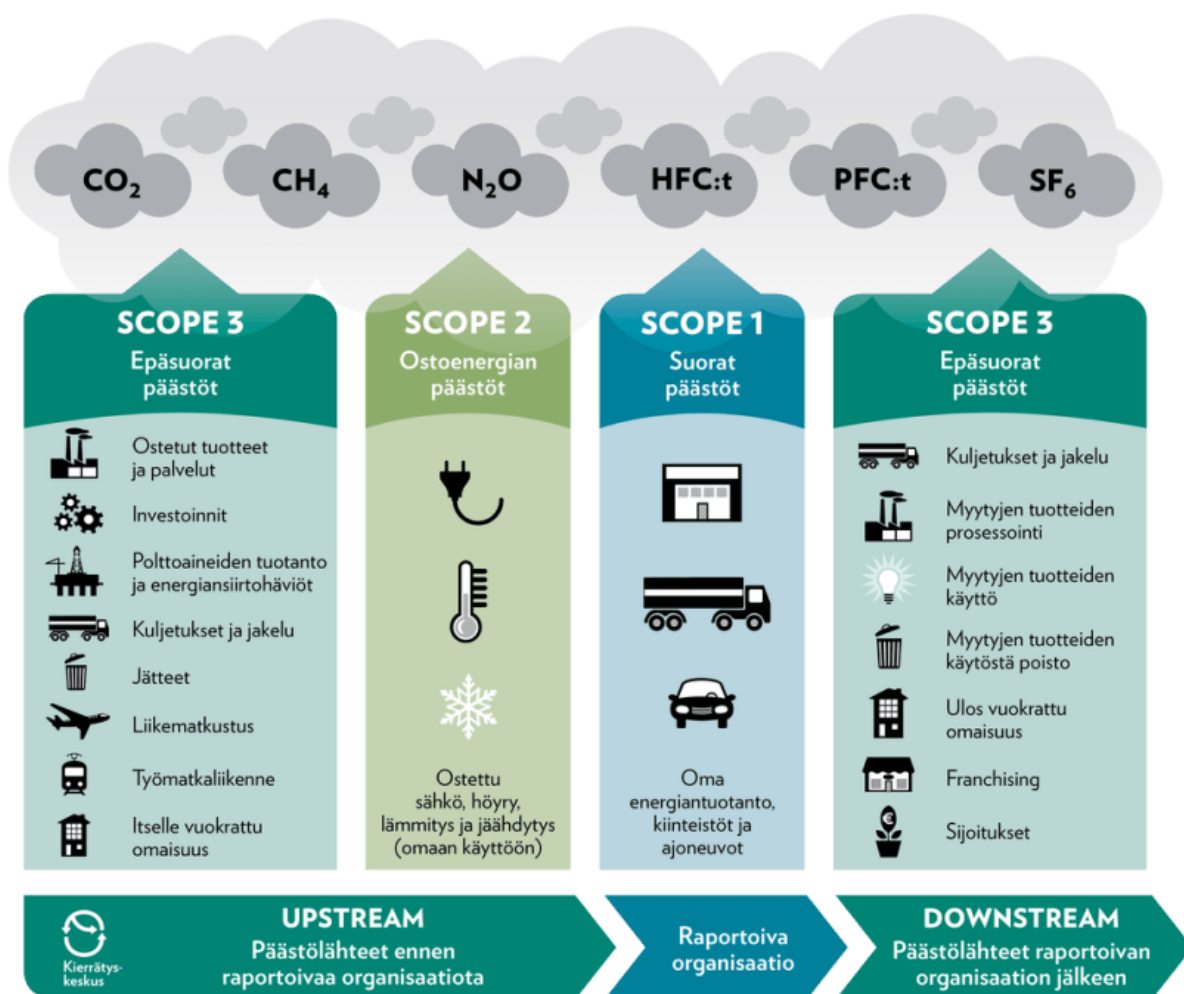
$$5,15 \text{ tCO}_2\text{ekv.} + 221,17 \text{ tCO}_2\text{ekv.} = 226,32 \text{ tCO}_2\text{ekv.}$$

Vertailun vuoksi CarbonApin tulokset valmistukseen ovat 156.07 tCO<sub>2</sub>ekv. 40MVA ja 269.63 tCO<sub>2</sub>ekv. 63MVA muuntajalle. Omien laskujen ja CarbonApin tuloksilla on siis heittoa ±10–20 %. Tulos vaihtelee sillä käytetyt arvot ovat arvioita ja esimerkiksi sähkönkulutus ja materiaali-jakaumat voivat olla hyvinkin erilaiset riippuen olosuhteista. Voidaan kuitenkin todeta, että tulokset ovat riittävän lähellä omia laskelmia ja näin ollen niitä voidaan käyttää luotettavana lähteenä tässä opinnäytetyössä.

Näin ollen voimme luottaa, että muutkin arvot ovat hyvin lähellä totuutta, emmekä keskity laskemaan esimerkiksi logistiikka, kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöitä vaan luotamme sovelluksen dataan.

## 5 PERUSHUOLLON YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET JA HIILIJALANJÄLKI

Tässä osassa selvitetään ja lasketaan perinpohjaisesti muuntajahuollon vaikutukset ympäristöön. Perushuollon ympäristöpäästöt ovat hyvin alhaiset, sillä käytännössä muuntajaan ei juurikaan vaihdeta uusia materiaaleja. Esimerkiksi vanhat öljyt uusiokäytetään suodattamalla. Isoimmat kulut syntyvät materiaalien haalauksesta ja sähkökulutuksesta. Perushuollon hiilijalanjälkeä laskettaessa, täytyy ensiksi päättää mitkä kaikki asiat huomioidaan. Seuraavassa kuvassa 17. on esimerkki minkä pohjalta voi lähteä arvioimaan syntyviä investoinnin päästöjä. Päästöjä, joita tässä työssä huomioidaan ovat, itse perushuollossa syntyvät päästöt, logistiikasta syntyvät päästöt, materiaalipäästöt ja eliniän pidentymisen vaikutus päästöihin pitkällä aikavälillä.



Kuva 17. Hiilijalanjälkilaskennan Scope -luokat (Ekokompassi 2023)

## 5.1 Laskennan rajausta ja lähtötietojen keräys

Laskennan rajauksessa on tärkeää huomioida mahdollisimman moni vaikuttava tekijä. Perushuollon hiilijalanjälkilaskenta tehdään kolmesta eri luokasta, nämä ovat suorat, ostetut ja epäsuorat päästöt eli Scope 1, Scope 2 ja Scope 3. Kuva 17 havainnollistaa hyvin näitä.

- Scope 1-luokka tarkoittaa itse huollosta syntyviä suoria hiilidioksidipäästöjä
- Scope 2-luokka tarkoittaa ostetun sähkön ja veden synnyttämiä päästöjä
- Scope 3-luokka tarkoittaa muita epäsuoria päästöjä, joita huollosta syntyy ennen ja jälkeen perushuollon. (Ekokompassi 2023)

Laskenta alkaa lähtötietojen keräämisellä. Tässä on käytetty apuna henkilöhaastatte-  
luja ja itsenäistä perehtymistä yrityksen tekemään perushuoltoon. Tietotaitoa ja osaa-  
mista löytyy vuosikymmenien ajalta kokeneilta ja ammattitaitoisilta kollegoilta, joten  
tämä vaihe ei tuottanut vaikeuksia. Lähtötietojen kerääminen vaatii aikaa ja huolelli-  
suutta, mutta kunnolla toteutettuna helpottaa itse laskentaa merkittävästi.

### 5.1.1 Suorat hiilidioksidipäästöt ja ostoenergian päästöt (Scope 1 ja Scope 2)

Scope 1 suoriin hiilidioksidipäästöihin luokitellaan kaikki päästöt, jotka ovat suoraan  
yhteydessä itse huoltoon. Tähän sisällytetään työssä:

- Muuntajan haalaus
- Muuntajan maantiekuljetus (200 km per suunta)
- Muuntajan purku kuljetuskuntoon (Korinostin ja 500 km ajoa huoltoautolla)
- Kuivausprosessi lämpö-tyhjiömenetelmällä
- Maalaus ja pesu (40 litraa maalia)
- Kaaeloinnit (15 kg kaapelia)
- Trukista syntyvät päästöt (8 h)
- Huoltoautot
- Ajoneuvonosturi (8 h)

Scope 2 ostoenergian päästöihin sisällytetään:

-Ostettu sähkö (sisältäen lämmitys, jäähdytys)

-Ostettu vesi

### 5.1.2 Epäsuorat hiilidioksidipäästöt (Scope 3)

Epäsuorilla hiilidioksidipäästöillä tarkoitetaan päästöjä, jotka eivät synny suoraan huollosta, mutta ovat kuitenkin seurausta siitä. Epäsuorat päästöt jakautuvat kahteen osaan. Ensimmäinen osa epäsuorista päästöistä syntyy ennen huoltoa aiheutuvista hiilidioksidipäästöistä ja toinen puoli huollon jälkeisistä päästöistä. Perushuollossa epäsuoriin päästöihin luokitellaan esimerkiksi työntekijöiden työmatkaliikenne, käytettävät vuokralaitteet ja syntyvät jätteet. Epäsuorissa päästöissä voi periaatteessa mennä kuinka syvälle hyvänsä, esimerkiksi käytetyn polttoaineen tuotantoon tai sähkön energian siirtohäviöihin. Työssä käytetään päästökertoimia, joissa on otettu huomioon kyseisiä seikkoja, eikä täten lähdetä itse laskemaan niitä auki sen enempää.

### 5.2 Perushuollon sähkönkulutus

Huollon sähkönkulutuksessa otetaan huomioon huollon suora sähkönkulutus ja tehdään arvio lämmitykseen ja valaistukseen käytetystä sähköstä. Sähkön kulutuksessa tulee huomioida, että Omexom käyttää sertifioitua päästötöntä sähköä. Tästä huolimatta lasketaan sähkönkulutus ja arvioidaan se Suomen sähkön keskimääräisillä CO2 päästöillä. Sähkönkulutuksessa pyritään huomioimaan kaikki mahdollinen sähkönkulutus, mutta tulee ottaa huomioon, että esimerkiksi lämmitykseen tai valaistukseen käytetty sähkö per muuntaja vaihtelee ja työssä on käytetty keskiarvollisia arvoja.

Arviot lämmityksen ja valaistuksen sähkönkulutuksesta perustuvat vähentämällä laitteiden käyttämä sähkönkulutus kokonaisvuosikulutuksesta. Jäljelle jäävä osuutta voidaan pitää lämmityksen ja valaistuksen kulutuksena. Tämä tulos jaetaan arviolla vuosittaisista perushuolloista. Tulee ottaa kuitenkin huomioon, että huoltohallissa tehdään paljon muitakin töitä, kun perushuoltoja.

Aloitetaan itse huollon sähkönkulutuksella, jonka jälkeen siirrytään lämmitykseen ja valaistukseen. Seuraavaksi eritelty kohteet:

- Pesu  
 $5,5\text{kW} * 3 \text{ h} = 16,5 \text{ kWh}$
  
- Alipainepumppu Leybold  
 $5,5\text{kW} * 16 \text{ h} = 88 \text{ kWh}$
  
- Paineilmakompressori  
vaihtelee, noin 24 kWh
  
- Kuivaus  
9vrk noin 10 000 kWh
  
- Öljynsuodatus laitteisto  
 $180\text{kW} * 16 \text{ h} = 2800 \text{ kWh}$
  
- Alipainepumppu  
9vrk noin 350 kWh

Yht. 13 278,5 kWh = 13,28 MWh



### 5.2.1 Huoltohallin lämmitys ja valaistus

Seuraavaksi arvioidaan käytetty sähköteho lämmitykseen ja valaistukseen. Valaisimia hallissa on 86kpl ja ne ovat vielä toistaiseksi 2x58W loisteputkia. Tähän on tulossa kuitenkin muutos ja valaisimet vaihdetaan ledeiksi lähiaikoina. Valaistuksen kuluttama sähkö on siis

$$58W * 172 = 9976W$$

hallissa pidetään valoja päällä noin 8 h per arkipäivä, joka tekee 80 kWh päivässä.

Lämmityksen kuluja arvioidessa selvitettiin ensiksi koko huoltotilojen vuosittainen sähkönkulutus, joka oli 580MWh. Tämän jälkeen annettiin arvio perushuoltojen määrästä vuosittain, joka oli 12. Tulee ottaa huomioon, että määrä vaihtelee vuosittain merkittävästi. Yhteen perushuoltoon kului sähköenergiaa 13,28MWh ja tämä kerrottuna 12 saamme tulokseksi 160MWh. Seuraavaksi koko vuoden kulutuksesta vähennetään perushuolloista aiheutuvat kulut ja tästä saadaan 420MWh.

Jos tämä jaetaan päiväkohtaiseen määrään, saadaan 1,15MWh. Voidaan arvioida, että tästä määrästä lämmitys on noin 70 %. Tällöin päivittäinen sähkönkulutus olisi

$$805 \text{ kWh} + 80 \text{ kWh} = 885 \text{ kWh}$$

Karkeasti laskettuna voidaan ajatella, että huoltoon käytetään 20 työpäivää huoltopäivällä. tällöin valaistukseen ja lämmitykseen kuluu sähköä 17,7MWh. Tulos ei tietenkään ole aukoton, mutta hyvinkin suuntaa antava.

### 5.2.2 Kokonaiskulutus ja sen hiilijalanjälki

Huollossa kuluvalle sähkölle voimme laskea kokonaiskulutukseksi

$$13,3 \text{ MWh} + 17,7 \text{ MWh} = 31 \text{ MWh}$$

Jos laskemme sähkönkulutuksesta syntyvät CO<sub>2</sub> päästöt Suomessa sähköntuotannon keskiarvopäästöillä, eli 77 kgCO<sub>2</sub>/MWh, huollosta aiheutuvat päästöt ovat

$$77\text{kg} * 31\text{MWh} = 2387\text{kgCO}_2\text{ekv.}$$

Hikiällä käytetään sertifioitua päästötöntä sähköä, joten todellisuudessa voimme pitää lukua nollassa.

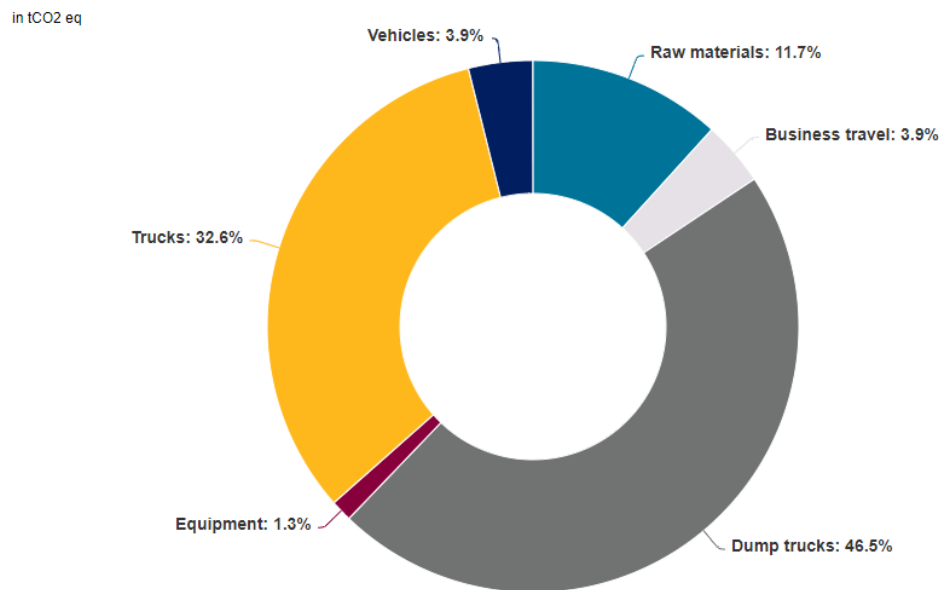
### 5.3 Huollon päästöjen laskeminen, käytetyt materiaalit, koneet ja ajoneuvot

Käytettyjä materiaaleja on hyvin vähän, sillä suurin osa materiaaleista uudelleen käytetään eikä vaihdeta. Materiaaleja, joita muuntajaan lisätään ovat ulkoinen kaapelointi, maalaus ja tarvittaessa apukaappi. Arvot syötetään CarbonAppiin ja laskentatyökalu hoitaa itse laskennan järjestelmään syötettyjen vakioiden avulla.

Isoimmat päästöt huollosta syntyvät koneista ja ajoneuvoista. Näihin sisältyvät trukki, muuntajan haalaus, muuntajan maantiekuljetus, nosturiauto, huoltoauto ja työmatkajot. Vaikka isoimmat päästöt näistä aiheutuvatkin, ne ovat hyvinkin marginaalisia muuntajan elinkaaren kokonaiskuvan kannalta. Laskuissa esiintyvät arvot ovat myös arvoitu hieman yläkanttiin, jotta voidaan olla varmoja riittävydestä.

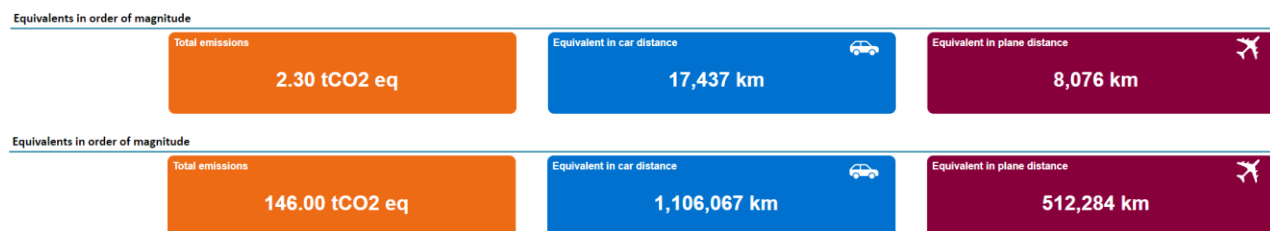
### 5.4 Laskentatyökalun tulokset

CarbonAppiin on syötetty kaikki aikaisemmissa kappaleissa mainitut arvot. Huollolle on arvioitu kuluvan noin 500 h asentajan työtunteja ja on annettu arvio, että keskimääräinen työmatka on 10 km, tästä tulee taulukon kohta, Business travel. Kohdassa vehicles ovat huoltoautolla suoritettavat työt, sekä esim. ulkopuolisten maalareiden arvioidut matkat. Alla oleva kuva 18 havainnollistaa arvot.



Kuva 18. Perushuollon CO<sub>2</sub> päästöjen jakauma

Kuten voimme huomata datan visualisoinnista, reilusti suurin osa päästöistä syntyy kuorma-autoista. Kohta trucks käsittää itse muuntajan maantiekuljetuksen lavetilla (yht. 400 km) ja dump trucks käsittää käytetyn nosturiauton.



Kuva 19. Perushuollon kokonaispäästöt ja uuden muuntajan valmistuksen päästöt. Havainnollistavat vertailut

Yhteensä päästöjä perushuollolle tuli 2,30tCO<sub>2</sub>ekv, huomioimatta sähkönkulutusta. Yllä olevasta kuvasta voimme huomata mitä arvo vastaa ajetuissa kilometreissä, jotta arvo on helpompi suhteuttaa. Kuten kuvasta 19 huomaamme, uuden 40MVA muuntajan valmistuksesta aiheutuvat päästöt vastaavat noin 1,1 miljoonaa ajokilometriä. Näistä tuloksista, voimme huomata, että perushuollon hiilidioksidipäästöt ovat hyvin pienet verrattuna uuden muuntajan valmistamiseen.

$$2,30\text{tCO}_2\text{ekv.} / 146.0\text{tCO}_2\text{ekv.} = 0,015 = 1,5 \%$$

Käytetty arvo 429,9 tCO<sub>2</sub>ekv. tulee Kuten laskusta voimme huomata, muuntajan perushuollosta aiheutuvat päästöt ovat ainoastaan 1,5 prosenttia uuden muuntajan valmistamisesta. Uuden muuntajan päästöt voivat olla myös todellisuudessa paljon suuremmat, mikäli uusi muuntaja kuljetetaan suomen ulkopuolelta.

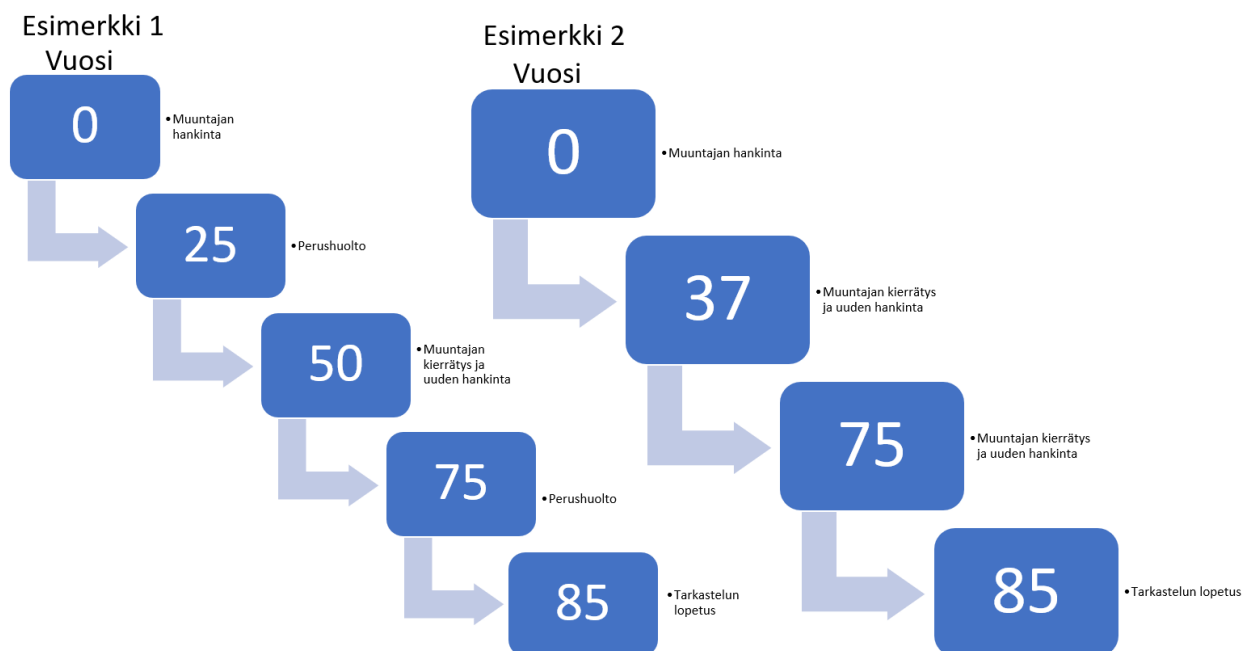
### 5.5 Perushuollon ympäristövaikutukset pitkällä aikavälillä

Tulevaisuutta ei voida tietää, mutta sen arviointi on tärkeää. Tähän kohtaan on otettu pitkän aikavälin vertailut. Aikajana, jota käytetään, on 85 vuotta. Vertailussa pyritään ottamaan huomioon kaikki tekijät mahdollisimman hyvin ja vertailu suoritetaan 40MVA muuntajalla.

Laskuissa ei pystytä ennustamaan tulevaisuuden standardeja tai esimerkiksi muuntajien häviöitä, mutta niitä pyritään arvioimaan käyttäen hyväksi tämänhetkisiä trendejä. Tietenkään hyötysuhteet eivät todennäköisesti enää tule pienemään lähellekään niin paljoa kuin historiassa, joten huolto saattaa tulevaisuudessa olla, jopa vielä kannattavampaa.

Seuraavassa kuvaajassa 20. on havainnollistettu aikajanaa, jota vertailussa tullaan käyttämään. Käytetyt oloarvot perustuvat keskiarvoihin muuntajan elinkaaressa. Kuvaaja ei ota huomioon perushuollon muita hyviä puolia, kuten toimintavarmempaa käyttöä. Muuntajien eliniässä on oletettu, ettei isoja vikaantumisia tule ja määräaikaishuollot ovat suoritettu asianmukaisesti. Elinkaareen vaikuttaa myös vahvasti muuntajan käyttöaste ja kuormitus.

## Perushuollon pitkän aikavälin vaikutus tehomuuntajan elinkaareen



Kuva 20. Pitkän kannattavuustarkastelun aikajana

Seuraavaksi lasketaan kummankin vaihtoehdon hiilijalanjälkeä, Laskennat suoritetaan käyttämällä CarbonAppia ja omia laskuja perushuollosta. Häviöiden kehitystä arvioidaan tutkituilla trendeillä historiasta, mutta huomioidaan myös kehityksen hidastuminen kohti tulevaa. Työn aikajanaa voisi ajatella esimerkiksi 1970-luvulta 2050-luvulle.

Muuntajien hyötysuhteita on vaikea arvioida tarkkaan, mutta vertaillen historiallisesti voimme arvioida, että uusien muuntajien häviöt pienenevät noin 10 % kymmenessä vuodessa ja käyttävät lähtöarvona aina edellisen kymmenen vuoden arvoa, eli käytännössä alkuperäisistä häviöistä tulee yksi potenssi lisää per 10 vuotta. Tämän idean näemme kaavasta 1. Käytetään lähtöarvoina 33kW tyhjäkäyntihäviöitä ja 178 kW kuormitushäviöitä, jotka ovat tyypilliset 70 ja 80 luvun muuntajille.

Käytetty kaava häviöiden pienenemisen arviointiin:

$$H_e * H_k \quad (1)$$

jossa  $H_e$  on edellisen vuosikymmenen häviöt ja  $H_k$  on käytettävä häviökerroin

Suomen sähköverkossa muuntajia ei käytännössä ajeta jatkuvasti nimelliskuormalla, vaan huomattavasti pienemmällä. Usein asemat on mitoitettu siten, että muuntajia kuormitetaan noin 50 % teholla tai alle. Voimalaitoksilla ja teollisuudessa muuntajia kuormitetaan usein kuitenkin enemmän, kun kanta- ja jakeluverkossa. Tästä syystä laskut suoritetaan myös 50 % kuormituksella. Tyhjäkäyntihäviöt pysyvät samassa, mutta kuormitushäviöt laskevat alla olevan 2 kaavan mukaan.

$$P_k = \left(\frac{S}{S_n}\right)^2 * P_{kn} \quad (2)$$

jossa  $P_k$  on kuormitushäviö,  $S$  on teho,  $S_n$  on nimellisteho ja  $P_{kn}$  on nimellinen kuormitushäviö

Taulukoissa on annettu myös kuormitukset 75 % kuormalla ja 100 % kuormalla, jotta voidaan tarvittaessa laskea tapauskohtaisesti käyttäen niitä.

Kyseisiä kaavoja hyödyntäen on saatu seuraavat taulukot:

Taulukko 5. Arvio uusien muuntajien päästöjen alenemisesta

## 40MVA esimerkki muuntajan häviöt nimelliskuormalla

Valmistus (v)	Tyhjäkäyntihäviöt, P0 (kW)	Kuormitushäviöt, Pk (kW)
0	33,00	178,00
10	29,70	160,20
20	26,73	144,18
30	24,06	129,76
40	21,65	116,79
50	19,49	105,11
60	17,54	94,60
70	15,78	85,14
80	14,21	76,62
90	12,78	68,96

## 40MVA esimerkki muuntajan häviöt 75 % kuormalla

Valmistus (v)	Tyhjäkäyntihäviöt, P0 (kW)	Kuormitushäviöt, Pk (kW)
0	33,00	100,13
10	29,70	90,11
20	26,73	81,10
30	24,06	72,99
40	21,65	65,69
50	19,49	59,12
60	17,54	53,21
70	15,78	47,89
80	14,21	43,10
90	12,78	38,79

## 40MVA esimerkki muuntajan häviöt 50 % kuormalla

Valmistus (v)	Tyhjäkäyntihäviöt, P0 (kW)	Kuormitushäviöt, Pk (kW)
0	33,00	44,50
10	29,70	40,05
20	26,73	36,05
30	24,06	32,44
40	21,65	29,20
50	19,49	26,28
60	17,54	23,65
70	15,78	21,28
80	14,21	19,16
90	12,78	17,24

## 5.6 Esimerkki 1

Ensimmäisessä esimerkissä muuntajille suoritetaan perushuolto 25 vuoden iässä ja muuntajan elinkaareksi on arvioitu 50 vuotta. Joissain tapauksissa muuntajien elin-  
kaari voi olla vielä pidempikin riippuen käytöstä, mutta tilanne voi olla myös toiseen  
suuntaan.

Ensiksi asetetaan laskuriin ensimmäisen 50 vuoden päästöt, jotka esiintyvät alla ole-  
vista taulukoista.

Taulukko 6. Ensimmäisen 50 vuoden arvot

Paino (kg)	Tyhjäkäyntihäviöt, PO (kW)	Kuormitushäviöt, Pk (kW)	Kuljetus (km)	Käyttö-aika	Lasketut päästöt (tCO <sub>2</sub> ekv.)
60 000	33	44,5	400	50	2042,1

Tämän jälkeen tulee uuden muuntajan hankinta ja lasketaan loput 35 vuotta arvoilla:

Taulukko 7. Seuraavan 35 vuoden arvot

Paino (kg)	Tyhjäkäyntihäviöt, PO (kW)	Kuormitushäviöt, Pk (kW)	Kuljetus (km)	Käyttö-aika	Lasketut päästöt (tCO <sub>2</sub> ekv.)
60 000	19,5	26,28	400	50	930,4

Lopullinen arvo saadaan laskettua kahden muuntajan ja kahden perushuollon päästö-  
jen summalla.

$$2,3\text{tCO}_2\text{ekv.} + 2,3\text{tCO}_2\text{ekv.} + 930,4\text{tCO}_2\text{ekv.} + 2042,1\text{tCO}_2\text{ekv.} = 2977,1\text{tCO}_2\text{ekv.}$$

### 5.6.1 Esimerkki 2

Toisessa esimerkissä muuntajille ei suoriteta perushuoltoa. Ilman perushuoltoa  
muuntajan iäksi on arvioitu 37 vuotta, mutta tämäkin voi vaihdella.

Samalla periaatteella, kuin äsken asetetaan laskuriin ensimmäisen 37 vuoden päästöt.



Taulukko 8. Ensimmäiset 37 vuotta

Paino (kg)	Tyhjäkäyntihäviöt, P0 (kW)	Kuormitushäviöt, Pk (kW)	Kuljetus (km)	Käyttöaika (v)	Lasketut päästöt (tCO <sub>2</sub> ekv.)
60 000	33	44,5	400	37	1549,7

Tämän jälkeen lasketaan uuden muuntajan hankinta ja arvioidaan häviöiden pieneminen taulukon 9. mukaisesti

Taulukko 9. Uusi muuntaja seuraavat 38 vuotta

Paino (kg)	Tyhjäkäyntihäviöt, P0 (kW)	Kuormitushäviöt, Pk (kW)	Kuljetus (km)	Käyttöaika (v)	Lasketut päästöt (tCO <sub>2</sub> ekv.)
60 000	22,35	30,13	400	38	1122,2

Tämän jälkeen lasketaan viimeisen muuntajan hankinta

Taulukko 10. Viimeinen muuntaja 10 vuotta

Paino (kg)	Tyhjäkäyntihäviöt, P0 (kW)	Kuormitushäviöt, Pk (kW)	Kuljetus (km)	Käyttöaika (v)	Lasketut päästöt (tCO <sub>2</sub> ekv.)
60 000	15	20,19	400	10	318,1

Yhteensä laskettuna päästöt ovat siis:

$$1549,7\text{tCO}_2\text{ekv.} + 1122,2\text{tCO}_2\text{ekv.} + 318,1\text{tCO}_2\text{ekv.} = 2990,0\text{tCO}_2\text{ekv.}$$

## 5.7 Laskujen vertailu

Tuloksia vertaillen voidaan taulukosta todeta, että erittäin pitkällä aikavälillä muuntajien perushuoltaminen ei juurikaan vaikuta isossa kuvassa hiilidioksidipäästöihin. Täytyy kuitenkin huomioida, että muuntajien hyötysuhteet eivät tule loputtomasti paranemaan, jollei keksitä kokonaan uutta teknologiaa ja tulevaisuudessa huoltaminen voi taten olla entistäkin kannattavampaa. Taloudellisiin asioihin opinnäytetyössä ei oteta laajasti kantaa, mutta voidaan kuitenkin todeta, että muuntajien huoltaminen on

taloudellisesti kannattavampaa, kuin aina uuden hankkiminen. Huolto lisää myös käyttövarmuutta, joka on monesti todella tärkeässä roolissa esimerkiksi teollisuuslaitoksissa.

Kokonaispäästöt 85 vuoden tarkastelujaksolla

Kuormitus	Perushuoltoja suoritetaan (tCO <sub>2</sub> ekv.)	Perushuoltoja ei suoriteta (tCO <sub>2</sub> ekv.)	Ero (tCO <sub>2</sub> ekv.)
50 %	2977,1	2990	12,9

Taulukko 11. Esimerkkien kokonaispäästöt

Tuloksia vertaillaessa voidaan huomata, että 50 % kuormituksella olevat muuntajat ovat ympäristön näkökulmasta järkevämpiä huoltaa. Huoltaminen vähensi hiilijalanjälkeä melkein 13 tCO<sub>2</sub>ekv. ja oikeasti huomioiden kaikki mahdolliset epäsuorat päästöt ja ympäristörasitteet paljon enemmän. Jos uusi muuntaja kuljetetaan esimerkiksi Aasiasta, päästöt nousevat merkittävästi.

Tällä hetkellä suurin osa verkkopuolella olevista muuntajista toimii noin 50 % kuormituksella tai alle. Kovemmilla kuormilla muuntajat ovat usein teollisuudessa ja voimalaitoksilla. Työssä laskettavat tehomuuntajat käytännössä juuri ovat näitä sähköverkkopuolella olevia muuntajia. Teollisuuslaitoksissa olevien muuntajien rakenne, käyttöympäristö ja -tapa poikkeavat huomattavasti verkkopuolen muuntajista, joten teollisuuden muuntajat tulisi tarkastella erikseen tapauskohtaisesti.

## 6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Perushuollon ympäristövaikutuksia ei ole aikaisemmin tutkittu ja tietoa oli rajallisesti. Ongelmaksi muodostui esimerkiksi käytettävien arvojen selvittely, vaikutukset eri asioihin ja kokonaisuuden yhteen vetäminen. Konsernin CO<sub>2</sub>-päästöjen vähennystavoite vuoteen 2030 mennessä vuoden 2018 tasolta lähtien on scope 1+2:n osalta -55% ja scope 3 -20%. Perushuoltojen optimoiminen edesauttaa tavoitteiden saavuttamista.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että muuntajan perushuolto on useissa tilanteissa kannattavaa ja sen hiilijalanjälki on pystytty minimoimaan. Isoimpia hiilijalanjälkeä laskevia tekijöitä ovat materiaalien uudelleenkäyttö, esimerkkinä muuntajaöljyn suodattaminen ja uusiokäyttö. Toinen iso tekijä on päästötön sähkö, jota kaikki ostettu sähkö huoltohallissa on. Ainoa isompi syy miksi uuden muuntajan hankinta voi olla tietyissä tapauksissa ympäristöllisesti järkevää ovat pienentyneet häviöt.

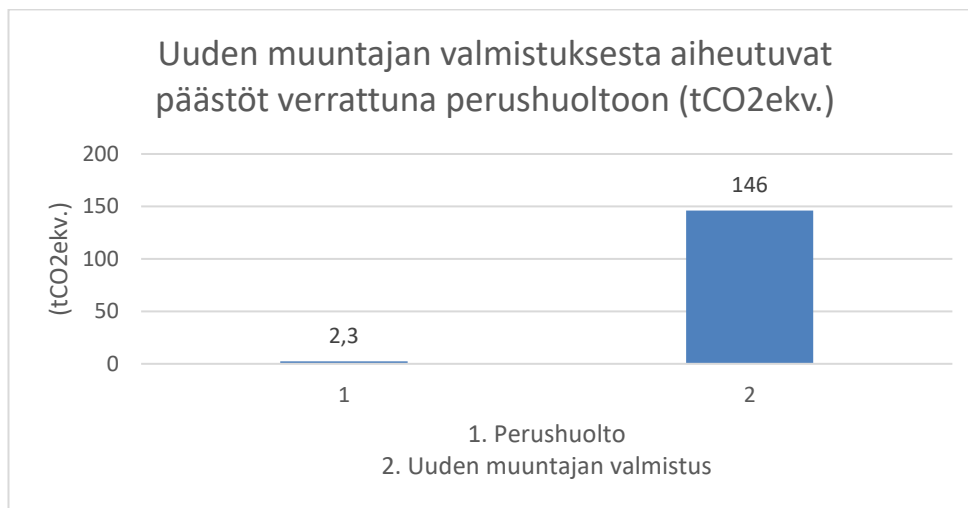
Puhuttaessa isojen kanta- ja jakeluverkkomuuntajien elinikäisistä päästöistä, saattaa helposti tuntua, että yksittäisillä tonneilla ei ole mitään väliä, mutta on hyvä kuitenkin muistaa, että isossa mittakaavassa kaikki kertaantuu. Omexom on onnistunut hyvin minimoimaan kaikkia aiheutuvia päästöjä ja jatkaa edelleen aktiivisesti kohti hiilineutraalia yritystä.

Kanta- ja jakeluverkon muuntajien isoimmat päästöt aiheutuvat tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöistä. Mitä enemmän sähköä tuotetaan puhtaasti esimerkiksi tuuli- ja aurinkovoimalla, sitä pienemmiksi muuntajien ympäristövaikutukset saadaan ja perushuoltamisen kannattavuus lisääntyy entisestään. Kuten alla olevasta taulukosta 12. voimme todeta, uuden muuntajan valmistaminen on merkittävästi kuormittavampaa ilmastolle, verrattuna muuntajan huoltamiseen.

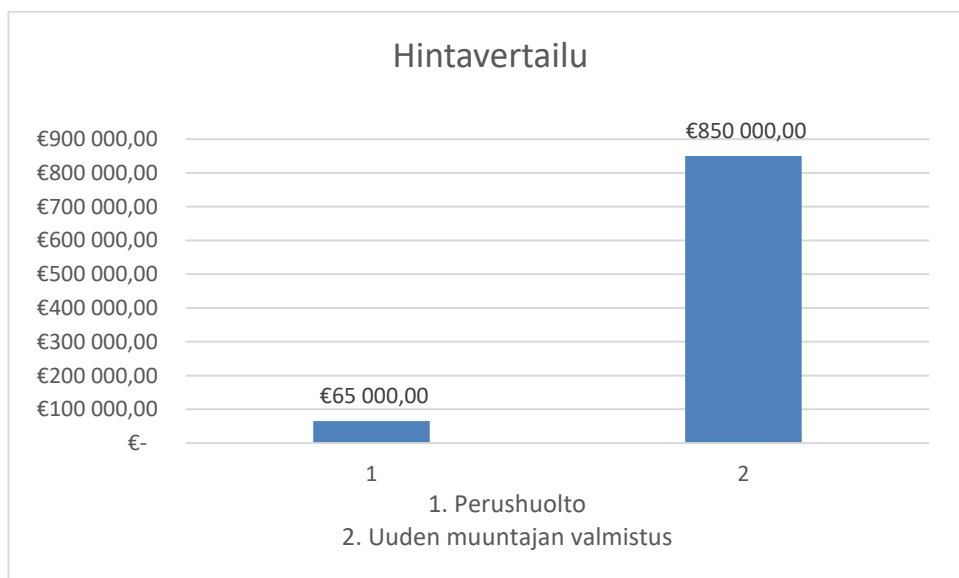
Taloudellisesta näkökulmasta huollon kiinnostavuutta lisää esimerkiksi isojen investointien lykkääminen, käyttövarmuus, pitkät toimitusajat uusissa muuntajissa, huollon nopeus ja monta muuta. Kuten alla olevasta taulukosta 13. voimme huomata, että huolto on vain murto-osan uuden hinnasta.

Uuden 40MVA muuntajan hinta kaikkineen pyörii noin 700 000 € - 1 000 000 € tunnassa, vertailun vuoksi muuntajahuolto maksaa keskimäärin 60 000–70 000 €.

Taulukko 12. Perushuolto ja uusi muuntaja



Taulukko 13 Hintavertailu



## LÄHTEET

ABB. (2000). Teknisiä tietoja ja taulukoita

ABB. (2004). Transformer Handbook

Aura, L. & Tonteri, A. J. (2009). Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 3.–6. uud. P. Helsinki: WSOYpro Oy

Aura, L. & Tonteri, A. J. (1996). Sähkökoneet ja tehoelektroniiikan perusteet. Helsinki: WSOY

Aro Martti; Elovaara, Jarmo; Karttunen, Matti; Nousiainen, Kirsi; Palva, Veikko. (2015) Suurjännitetekniikka

Ekokompassi. (2023). Yrityksen hiilijalanjälki

Fingrid. (2014). Eastlink-2 toinen tasasähköyhteys Suomen ja Viron välillä

Hitachi Energy. (2023). Sisäinen tiedoksianto, julkaisematon.

Hyvönen, P. Pykälä, M. L. Hokkanen, A, Halme, J. & Aro, M. (2005). Jakelumuntajien kunnan selvitys. Espoo: Teknillinen korkeakoulu

IEC-60076-1. (2011). Standardi

IEEEC57.152. (2013). Standardi

Jari, S. (2023). Henkilökohtainen tiedonanto

Korpinen, L. (2003). Muuntajat ja sähkölaitteet. Opetusmateriaali. [www.leenakorpi.fi](http://www.leenakorpi.fi)

Kulasek, K. Lindgren, E. Johansson, E. Jul, M. Flood, J. Oliva, M. (2020). Towards net zero emissions - The role of circularity in transformers.

<https://transformers-magazine.com/files/51-58-Towards-net-zero-emission.pdf>

Swift Supplies. (2023). Kuva 2, Prespaanieriste, haettu osoitteesta 23.5.2023

<https://www.swiftsupplies.com.au/presspahn-transformer-insulation-paper-1000mm-wide-per-metre>

Indiamart. (2023). Kuva 3, haettu osoitteesta 23.5.2023

<https://www.indiamart.com/proddetail/crgo-laminations-22088218062.html>

Netta Rintala. (2021). Uuden muuntajan hiilijalanjälki

Nynas Naphthenics AB. (2004). Transformer oil handbook. ISBN 91-631-4982-6

OMICRON. (2022). Diagnostic testing and monitoring of power transformers

OpenCO2. (2023). CO2-termit tutuiksi

Otso Takala. (2005). Suurjännitetehtömuuntajien huoltojen vaikutus niiden käyttövarmuuteen ja elinikään

Strömberg. (1982). teknisiä tietoja ja taulukoita.

Tilastokeskus. (2023). Sähkön ja lämmön tuotannon ominaishiilidioksidipäästöt ja liukuvat keskiarvot (energiamenetelmä, g CO<sub>2</sub> / kWh)