

# DC-kaapeleiden kuormitettavuustutkimus

KAAPELEIDEN DYNAAMINEN KUORMITETTAVUUS

Joona Ehrnrooth, Teemu Saareks & Tommi Siintoharju

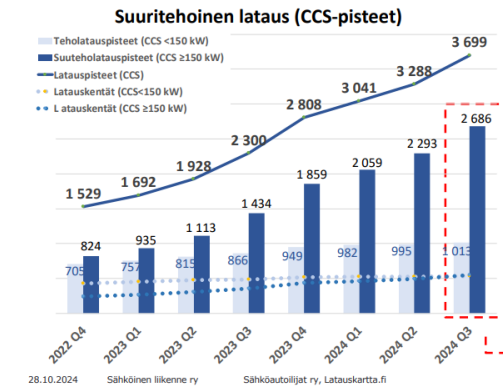


# Sisältö

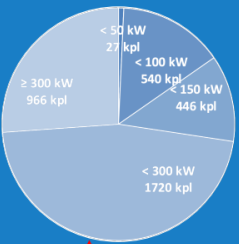
1. Johdanto
2. Teoriatausta
3. Mittausjärjestelmä
4. Mittaustulokset ja niiden käsittely
5. Havaintoja ja huomioita
6. Yhteenveto

# Tutkimuksen tausta – Teholatauksen tarve kasvaa

Q3/2024 - Sähköisen liikenteen tilannekatsaus  
Teho- ja suurteholatausverkosto



Latauspisteiden jakauma  
tehon mukaan



## ■ Suomessa

- Sähköautojen osuus henkilöautokannasta oli 9,5 prosenttia vuoden 2024 lokakuussa ja sähköiset kaupunkibussit ovat muodostuneet valtavirraksi. Sen sijaan raskaamman ammattiliikenteen sähköistyminen on vielä alkutekijöissään ja vaatii lisäsystejä.
- Suurteholatausasemien rooli liikenteen sähköistymisessä on merkittävä, erityisesti kun kyseessä on pitkän matkan liikkuminen ja raskaamman liikenteen sähköistäminen. Vuodesta 2021 alkaen on nähty merkittävää kasvua täyssähköautoille tarkoitettujen suurteholatausverkoston laajentumisessa. Odotusarvona on että ajoneuvojen lataustehot tulevat kasvamaan nykyisestä, mikä tarkoittaa käyttäjiltä myös odotuksia korkeammille lataustehoille latausasemilta. Latausteho on erityisen tärkeää raskaan liikenteen ajoneuvoille, kuten rekoille ja busseille, joissa suuret akut vaativat tehokkaampia latausratkaisuja.

## ■ Globaalisti

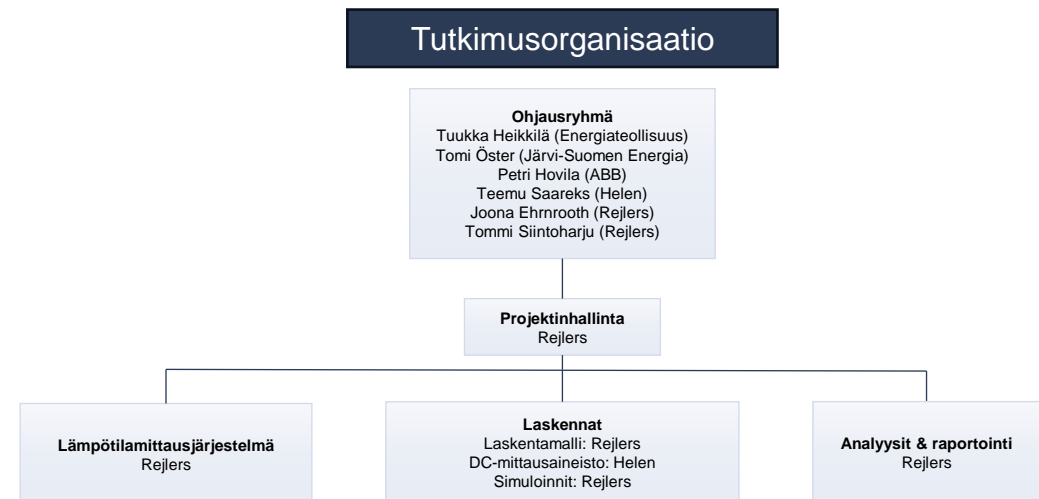
- IEA Global EV Outlookin mukaan suurteholatauspisteiden määrän arvioidaan kasvavan vuoden 2023 lopun n. 1 400 000 latauspisteestä vuoteen 2035 mennessä jo n. 9 200 000 latauspisteeseen.
- Mikäli kaikki vuoden 2035 suurteholatauspisteistä olisivat vastaavia kuin tässä tutkimuksessa tarkastellut ja kaapelointi toteutettaisiin latausjärjestelmän hetkelliset suuremmat maksimitehot mahdollistavalla paksummalla kaapelilla, pelkästään latauspisteiden syöttökaapeleihin tarvittava kuparin määrä olisi n. 247 300 tonnia, jos päästöjä aiheutuisi n. 3,0 miljoonaa kgCO<sub>2</sub>e.
- Mitoitukseltaan suurimman osan ajasta riittäviä poikkipinnaltaan pienempiä kaapeleita hyödyntämällä tarvittavan kuparin ja päästöjen määrää voitaisiin vähentää merkittävästi: kuparia tarvittaisiin n. 173 100 tonnia ja päästöjä aiheutuisi n. 2,1 miljoonaa kgCO<sub>2</sub>e eli noin 30 % vähemmän.

# Tutkimuksen tausta – Kaapeleiden koko kapasiteetti käyttöön

- SFS-standardi 6000-5-52 tarjoaa ohjeistuksia kaapeleiden mitoittamiseen mm. kuormitettavuuden näkökulmasta. Mitoitusohjeet ovat kuitenkin yleistettyjä ja melko konservatiivisia vaikkakin erilaisilla korjauskertoimilla esimerkiksi ympäristön lämpötilan ja maaperän lämmönjohtavuuden vaikutus voidaan ottaa jossain määrin huomioon, mutta nekin vaativat tietoa olosuhteista. Lisäksi mitoitus perustuu pahimpiin mahdollisiin tilanteisiin, käytännössä yleensä siis pitkäkestoiseen huippukuormitukseen.
- Todellisuudessa teholatauskentällä kuormitus vaihtelee merkittävästi. Tyypillisesti lataustapahtumien aikana kuormitusvirrat ovat hetkellisesti suuria, minkä jälkeen kaapeli pääsee jäähtymään.
  - Jotta nykyisistä jo maahan asennetuista kaapeleista sekä tulevaisuudessa asennettavista kaapeleista saataisiin kaapelin todellinen kapasiteetti optimaalisemmin käyttöön, olisi tärkeää selvittää mahdollisuudet syöttökaapeleiden dynaamiseen kuormitettavuuteen. Tekniikan hyödyntäminen voisi antaa mahdollisuuksia nostaa latauspisteeltä tarjottavaa lataustehoa turvallisesti.
- Tutkimuksen tarkoituksena oli tuottaa tietoa dynaamisen kuormitustenhallinnan hyödyntämisestä DC-kaapeleilla. AC-kaapeleihin liittyvää tutkimusta tehdään tämän hankkeen jatkotutkimuksena, mikäli tulokset tämän tutkimuksen osalta näyttävät potentiaalisilta.

# Tutkimusprojektin esittely

- Projekti yhdisti Rejlersin teknisen asiantuntijuuden sekä Helenin suurteholatauspalveluiden tuottamiseen liittyvät kehitystarpeet. Helen ja Rejlers ovat tehneet yhteistyötä useissa latausasemaprojekteissa vuodesta 2021 alkaen.
- Projektin rahoittajina toimivat Sähkö tutkimuspooli, Helen ja Rejlers Finland.
- Projektin kesto 4-12/2024
  - Mittaukset tuotantokäytössä 30.5.2024 alkaen
- Projektin järjestelyt ja toteutus
  - Helenin roolina
    - mahdollistaa latauskentän käyttö hankkeessa
    - toimittaa tietoja taustajärjestelmästä
    - järjestää tarvittaessa käyttäjiä kuormitustestauksiin
    - antaa näkemystä latauspalvelutuottajan näkökulmasta
  - Rejlersin roolina
    - rakentaa ja asentaa lämpötilamittausjärjestelmä
    - yhdistää ja analysoida mittausdataa
    - huolehtia projektin sujuvasta etenemisestä
    - dokumentoida ja visualisoida karttunutta tietoa



# Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus

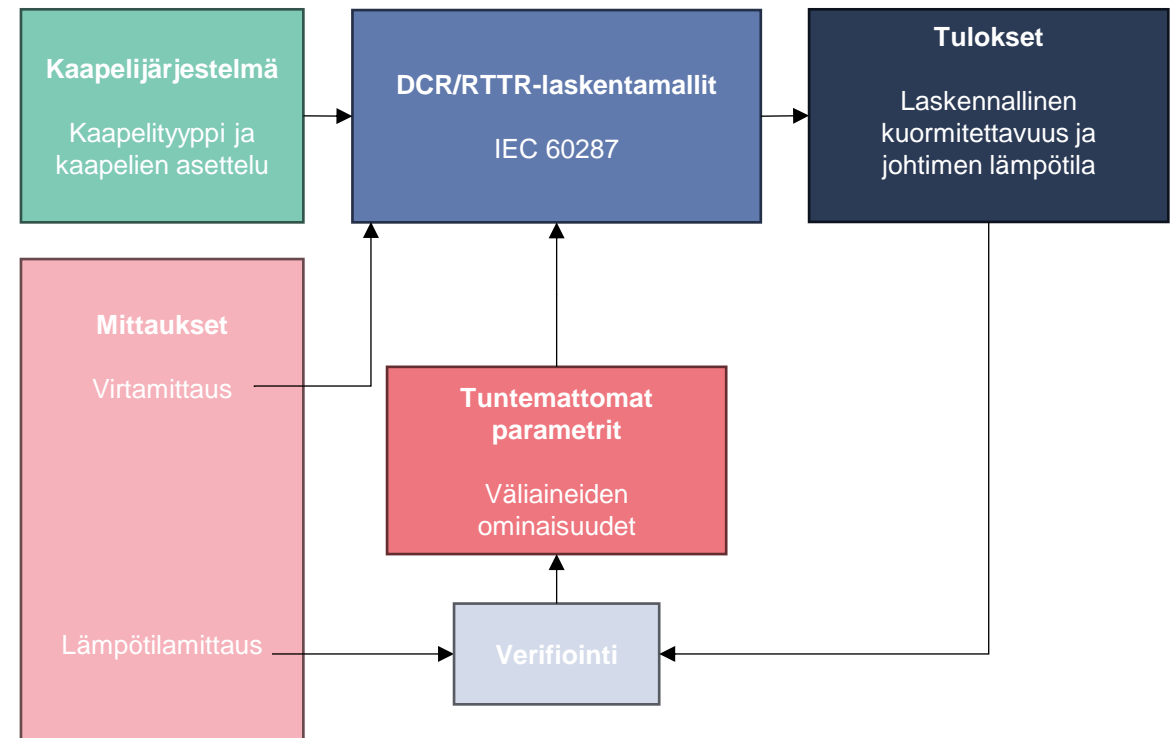
- DC-kaapeleiden lämpötilaperusteista kuormituksen hallintaa ei ole vielä hyödynnetty laajamittaisesti energiatoimialla, joten tutkimuksen keskeinen tavoite oli pilotoida dynaamisen kuormanhallinnan mahdollistavaa järjestelmää.
- Tutkimuksen tavoitteena oli
  - Luoda malli järjestelmän rakenteesta, jolla mittaukset voidaan toteuttaa
  - Luoda määrittelyt mittausdatan hyödyntämisestä DC-kaapelien kuormitettavuuden laskemiseksi
  - Luoda ymmärrys vaatimuksista lataustapahtuman tehon dynaamiselle hallinnalle kaapelien kuormitettavuuden näkökulmasta
  - Vertailla mittaus- ja laskentatuloksia simulointituloksiin
  - Selvittää mittausjärjestelyn kannattavuutta vaihtoehtoisin ratkaisuihin verrattuna
- Tutkimus toteutettiin tapaustutkimuksena, jossa käytössä olevalle latauskentälle asennettiin mittaus- ja tiedonsiirtojärjestelmät ja kohteesta kerättiin lämpötila- ja kuormitusdataa useiden kuukausien ajan. Lisäksi tutkimuksessa kehitettiin laskentamalli, jolla mittausdataa jalostettiin ennen tulosten analysointia soveltuvin menetelmin.

# DCR vai RTTR?

- DCR = dynamic cable rating
- RTTR = real-time thermal rating
- Molempia termejä käytetään yleisesti ja tarkoittavat käytännössä samaa asiaa eli kaapelin lämpötilan ja kuormituksen jatkuvaa seurantaan mittausdataan perustuen.
- Tavoitteena on mahdollistaa mittausten avulla kaapelin todellisen kapasiteetin optimaalisempi hyödyntäminen yleistettyjen, pahimpaan tilanteeseen perustuvien ja usein melko konservatiivisten mitoitusohjeiden sijaan.

# Teknologian kuvaus

- DCR-järjestelmät määrittävät kaapelin reaaliaikaisen kapasiteetin kaapelin lämpöominaisuuksien ja ympäristön lämpötilojen reaaliaikaisen mittauksen, piirin kuormituksen ja kaapelin lämpömallin perusteella.
- DCR-järjestelmä koostuu tyypillisesti kahdesta pääkomponentista:
  - **Lämpötilan valvonta**, joka tuottaa lämpötilatiedon maakaapelin läheisyydessä. Lämpötilatiedon mittaus on tyypillisesti DTS-tekniikkaan (Distributed Temperature Sensing) perustuva tai jälkiasennettu lämpötilanvalvontaratkaisu ennalta määrättyyn paikkaan kaapelin varrella.
  - **DCR-laskentamalli**, joka määrittää kaapelin johtimen lämpötilan valvotun lämpötilan ja kaapelin lämpöominaisuuksien perusteella.





# Lämpötilamittauksiin perustuvan kuormitettavuuden historia

Vuonna **1987** ranskalaisen sähköyhtiön insinööri esitteli tutkimuspaperin, jossa kerrottiin yhtiön tutkimuksesta liittyen valokuitukaapeleiden käyttöön tiedonsiirrossa 20 kV kaapelijärjestelmässä.

Vuonna 2003 Ranskassa toteutettiin testiohjelman puitteissa DTS- ja RTTR-järjestelmä 400 kV:n testiasennuksessa, joka sisälsi erilaisia kaapeli-asennusmenetelmiä sekä erilaisia lämpötilantureita.

Kanadalaisen sähköyhtiön insinöörit ottivat vuonna 2003 käyttöön DTS-järjestelmän useiden 120 kV:n kaapelipiirien valvomiseksi käyttäen FEM-analyysejä.

DTS-järjestelmiä käytetään yhä enemmän ongelmakohtien (hot spot) havaitsemiseen. Vuonna 2012 julkaistussa tutkimuksessa on esitelty kahta tällaista dynaamista järjestelmää, jotka on asennettu verkkoon Tanskassa. Muita vastaavia järjestelmiä kerrottiin olevan suunnitteilla.

Lämpötilan mittausta ja todellisen siirtokapasiteetin laskentaa käsitellään vuonna 2012 julkaistussa tapaustutkimuksessa. Tutkimuksessa todetaan, että IEC standardin mukaiset laskennat ja nimellisten oletettujen ympäristöparametrien huomioiminen johtaa konservatiivisiin laskentatuloksiin. Lämpötilamittausten käyttö, tarkempien paikkatietojen kerääminen ja uudelleenlaskenta FEM-menetelmällä mahdollistivat kaapeliyhteyden käyttäytymisen paremman ymmärtämisen.

Tutkimuksessa vuonna 2014 esiteltiin pilottiprojekti, jonka tavoitteena on määrittää optimaalinen virrankantokyky käytön aikana ja löytää lämpöpullonkaulat. Keinona on asentaa optisia kuitukaapeleita kaapelireitin varrelle kaapelin vaipan lämpötilan mittaamiseksi. **Tulokset osoittavat hyvän korrelaation, ja johtopäätöksenä on, että kaapelin lämpötilan valvonta voi olla arvokas työkalu tulevaisuuden verkon suunnittelussa.**

1980

1990

2000

2010

2020

SJ-järjestelmistä...

1990-luvun loppupuolella belgialainen kantaverkkoyhtiö Elia päätti integroida optiset kuidut  $\geq 110$  kV:n suurjännitekaapelijärjestelmiin lämpötilan valvontaa varten (pääasiassa käytetty ad-hoc lämpötilamittauksiin kaapelipiireissä).

Vuonna 1998 Isossa-Britanniassa toteutettiin vuoden mittainen kokeilujakso suurjännitekaapelijärjestelmässä. Asennus sisälsi 132 kV:n maanalaisen kaapelijärjestelmän, joka oli vain 500 metriä pitkä, mutta sisälsi 18 lämpövyöhykettä RTTR-ohjelmassa. Kaapelin pinnalle oli kiinnitetty optisia kuitukaapeleita.

Vuonna 1999 Donazzi et al. raportoivat RTTR-ohjelmiston kehittämisestä, jota käytettiin kenttäkokeissa monivyöhykeasennuksessa Italiassa.

... KJ- ja PJ-järjestelmiin?

Tutkimuksessa vuodelta 2010 konservatiivisiin oletuksiin perustuvaa alkuperäistä kaapelin virrankestävyyttä optimoitiin mittaamalla ja arvioimalla johtimen lämpötilaa.

Eräessä vuoden 2011 tutkimuksessa kuvataan, kuinka optisia kuituja hyödynnettiin sulautettuna jakeluverkon kaapeleihin. Teknologiaa käytettiin valvomaan kaapelin lämpötiloja kaapelireitin varrella ja saamaan tietoja osittaispurkauksista kaapeliliitoksissa.

Toisessa vuoden 2011 tutkimuksessa kuvataan, kuinka dynaamisia kuormitettavuusjärjestelmiä sovellettiin kolmeen 145 kV:n kaapelijärjestelmään, jotka siirtävät sähköä Rødstandin merituulipuistosta Tanskassa.

Vuonna 2011 kiinalainen sähköyhtiö raportoi epätavallisesta tapahtumasta ja kuvasi, kuinka OFDR-pohjainen DTS-järjestelmä auttoi tunnistamaan ja ratkaisemaan ongelman 220 kV:n kaapeliverkossa. Teknologian avulla havaittiin, että vesi oli vuotanut kaapelikaivossa olleeseen kytkentärasiaan.

# Laskentamallien muodostaminen

- Laskentamallit perustuvat standardiin IEC 60287. Niillä mallinnetaan lämmön syntymistä ja siirtymistä kaapelin sisällä ja kaapelin välittömässä läheisyydessä.
- Lämmön syntyminen pohjautuu kuormitusvirtaan  $I_c$  ja johtimen sähköiseen resistanssiin  $R_c$ .
- Lämmön siirtyminen pohjautuu kaapelin eri osien ja ulkoisen väliaineen lämpöresistansseihin  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  ja  $T_4$ .
- Yleisen kaapeliteorian mukainen lämpötilan ja kuormitusvirran kaapeleissa yhdistävä laskentakaava:

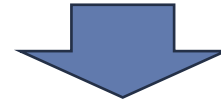
$$I_c = \sqrt{\frac{\theta_c - \theta_a + (v_4 - 1)\Delta\theta_x - v_4\Delta\theta_p - \Delta\theta_d}{R_c \left( T_1 + n_{ph}(1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)(n_{ph}T_3 + n_{cc}(T_{4i} + T_{4ii} + T_{4\mu}v_4)) + n_{cc}\lambda_4 \left( \frac{T_{4ii}}{2} + T_{4\mu}v_4 \right) \right)}}$$



# Laskentamallit

- Tässä tutkimuksessa laskentamalliin on tehty tarkasteltavan kaapelijärjestelmän ja käytetyn mittausjärjestelyn mahdollistamia yksinkertaistuksia.
  - Kaapelit eivät ole armeerattuja, joten  $T_2$  on nolla.
  - Koska lämpötilamittaukset ovat kaapelien ulkopinnoilla kiinni kaapeleissa, lämmön siirtymisellä kaapeleita ympäröivissä väliaineissa ei ole merkitystä mitattuihin lämpötiloihin. Näin ollen kaapelia ympäröivien väliaineiden ominaisuuksiin perustuvat  $T_4$  ja  $v_4$  voidaan jättää pois laskentamallista.
  - Kyseessä on DC-järjestelmä, joten häviökertoimet  $\lambda_1$ - $\lambda_4$  ja dielektristen häviöiden aiheuttama lämpötilan muutos  $\Delta\theta_d$  ovat nollia.
- Laskentakaavat yksinkertaistuvat siis oikealla olevien mukaiseksi.
  - Johtimen sallittu maksimikuormitettavuus muuttuu kaapelin ulkopinnalta mitatun lämpötilan muuttuessa.
  - Johtimen laskennallinen lämpötila muuttuu kaapelin ulkopinnalta mitatun lämpötilan ja/tai kuormitusvirran muuttuessa.

$$I_c = \sqrt{\frac{\theta_c - \theta_a + (v_4 - 1)\Delta\theta_x - v_4\Delta\theta_p - \Delta\theta_d}{R_c \left( T_1 + n_{ph}(1 + \lambda_1)T_2 + (1 + \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)(n_{ph}T_3 + n_{cc}(T_{4i} + T_{4ii} + T_{4\mu}v_4)) + n_{cc}\lambda_4 \left( \frac{T_{4ii}}{2} + T_{4\mu}v_4 \right) \right)}}$$



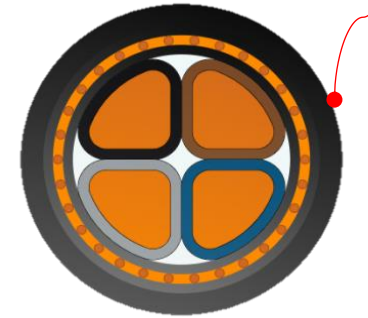
Johtimen sallittu  
maksimikuormitettavuus

$$I_c = \sqrt{\frac{\theta_{c(\max.)} - \theta_a}{R_c T_1 + R_c n_{ph} T_3}}$$



Johtimen laskennallinen  
lämpötila

$$\theta_c = \frac{I_c^2 R_{c20} (T_1 + n_{ph} T_3) - 20 I_c^2 R_{c20} \alpha_c (T_1 + n_{ph} T_3) + \theta_a}{1 - I_c^2 R_{c20} \alpha_c (T_1 + n_{ph} T_3)}$$



Mittausanturi

$I_c$  = kaapelin sallittu kuormitettavuus

$\theta_{c(\max.)}$  = johtimen lämpötila (sallittu max. 90 °C)

$\theta_a$  = ympäristön lämpötila (kaapelin ulkopinnan mitattu lämpötila)

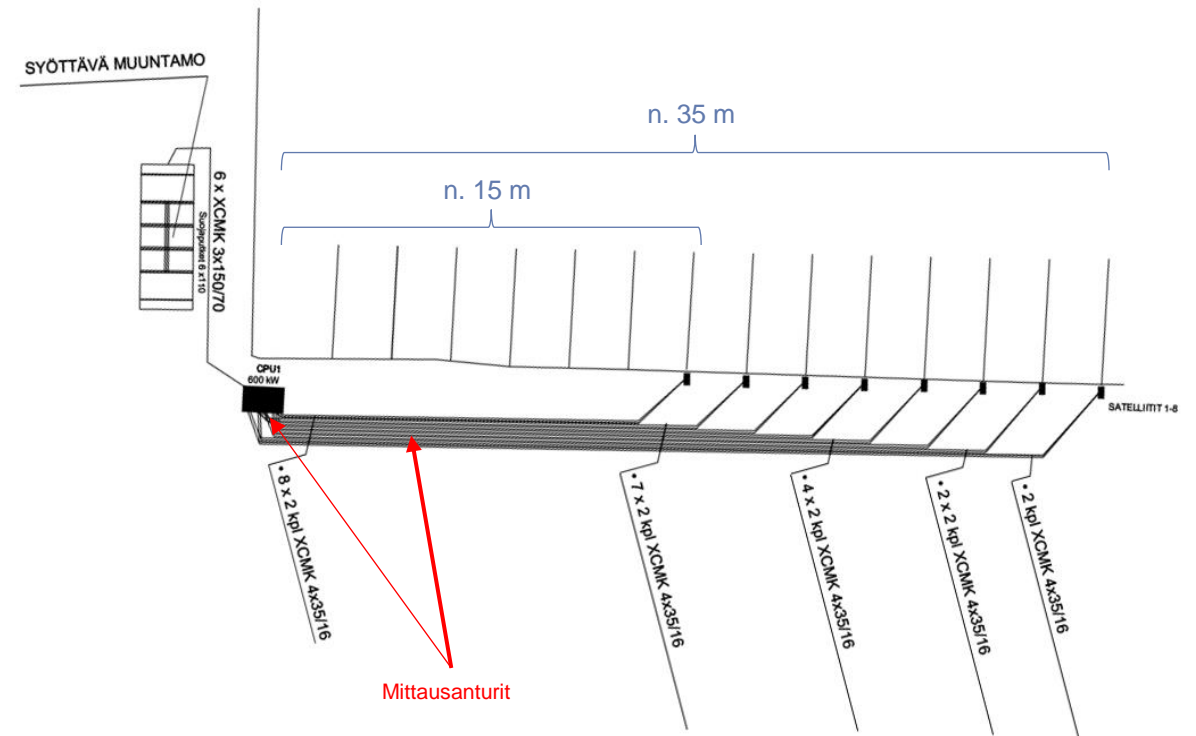
$R_c = R_{c20}(1 + \alpha_c(\theta_c - 20))$  = johtimen resistanssi per m (kupari 35mm<sup>2</sup>)

$T_1 = \frac{\rho_i}{2\pi} G_1$  = johdin— vaippa lämpöresistanssi

$T_3 = \frac{\rho_j}{2\pi} \ln\left(\frac{D_j}{D_j - 2t_3}\right)$  = ulkovaipan lämpöresistanssi

# Mittauskohde

- Mittaukset toteutettiin käytössä olevalla Helenin latauskentällä, joka sijaitsee eteläisessä Suomessa huoltoaseman yhteydessä vilkkaassa liikenteen solmukohdassa.
- Latausjärjestelmä koostuu syöttävästä muuntamosta, ohjausyksiköstä eli CPU:sta ja 8 lataussatelliitista sekä laitteiden välisistä kaapeloinneista viereisen kuvan mukaisesti.
  - Mittaukset ovat CPU:n ja satelliittien välissä DC-käytössä olevissa XCMK 4x35/16-kaapeleissa, jotka ovat maahan upotettuina sellaisenaan ilman putkituksia.
  - Syöttävän muuntamon ja CPU:n välisiä putkitettuja AC-kaapeleita XCMK 3x150/70 ei tarkasteltu.



# Mittauskohteen ominaisuuksia

- Tarkasteltavien XCMK 4x35/16 -kaapelien kuormitettavuus voidaan määrittää standardiin SFS 6000-5-52 pohjautuen.
  - Kaapelissa on 4 kuormitettua johdinta, joten standardin ohjeiden perusteella kuormitettavuuden lähtökohtana on käytetty kolmen kuormitetun kuparijohtimen PEX-eristettyä kaapelia, johon on lisäksi huomioitu yliaaltojen aiheuttama korjauskerroin mallintamaan neljättä johdinta.
  - Kaapelit ovat suoraan maassa, joten referenssiasennustapana on käytetty D2 ja maan lämpöresistiivisyytenä Suomelle tyypillisiä 1,0 km/W.
  - Yhden kaapelin kuormitettavuus on tällöin 120-199 A riippuen rinnakkaisten kuormitettujen kaapelien lukumäärästä ja etäisyydestä, jolloin yhden satelliitin kuormitettavuus on 240-399 A.

- Kempower-latausjärjestelmän ominaisuudet:  
max. virta per satelliitti 300/375 A @ +25 °C tai 500 A @ +25 °C, 10 min

**KEMPOWER** **CPU**

**Product code interpretation**

Kempower Power Unit consists of Power Cabinet and Power Modules.

**C502-D6-V3-C0** Kempower Power Cabinet C500 double • up to 6 dynamic outputs • Version 3 • unbranded

Item	Code	Description
Product type	C501	Kempower Power Cabinet C500 single <sup>[1]</sup> (four Power Module slots)
	C502	Kempower Power Cabinet C500 double <sup>[1]</sup> (eight Power Module slots)
Power distribution modules <sup>[2]</sup>	D4	Up to 4 adaptive dynamic outputs 150-1000 VDC
	D6	Up to 6 adaptive dynamic outputs 150-1000 VDC
	D8	Up to 8 non-adaptive dynamic outputs 150-500 VDC <sup>[3]</sup>
	R	Static power distribution <sup>[4]</sup>
Product version	V3	Version 3
Branding options <sup>[5]</sup>	C0	Unbranded; solid color RAL7047
	Cn	Branded; stickers in predefined areas of the unit. Number (n) indicates branding, e.g. C8.

<sup>[1]</sup> The rated current of a single charging output terminal using a power distribution module is limited to 200 A with 300 A charging cables.  
<sup>[2]</sup> 500 A (max. 10 min) in +25 °C. Requires at least 3 output terminals and a specific hardware configuration.  
 375 A continuous in +25 °C. Requires at least 2 output terminals and a specific hardware configuration.  
<sup>[3]</sup> Power curve according to figure 1.  
<sup>[4]</sup> Dynamic power distribution upgrade is available.  
<sup>[5]</sup> Branding according to Kempower Customer Branding Guidelines.

**PM550V2** Power Module Version 2 for Kempower Power Cabinet C500

Item	Code	Description
Product type	PM550V2	Power Module Version 2 for Kempower Power Unit C500 (50 kW in standard operation)

**KEMPOWER** **Satelliitit**

**Product code interpretation**

**ST-C-S-C-S-M-C0** Kempower Satellite Version 2 • 1 x CCS2 connector • 5 m charging cable • 200 A cable current • standard user interface • DC energy meter • unbranded

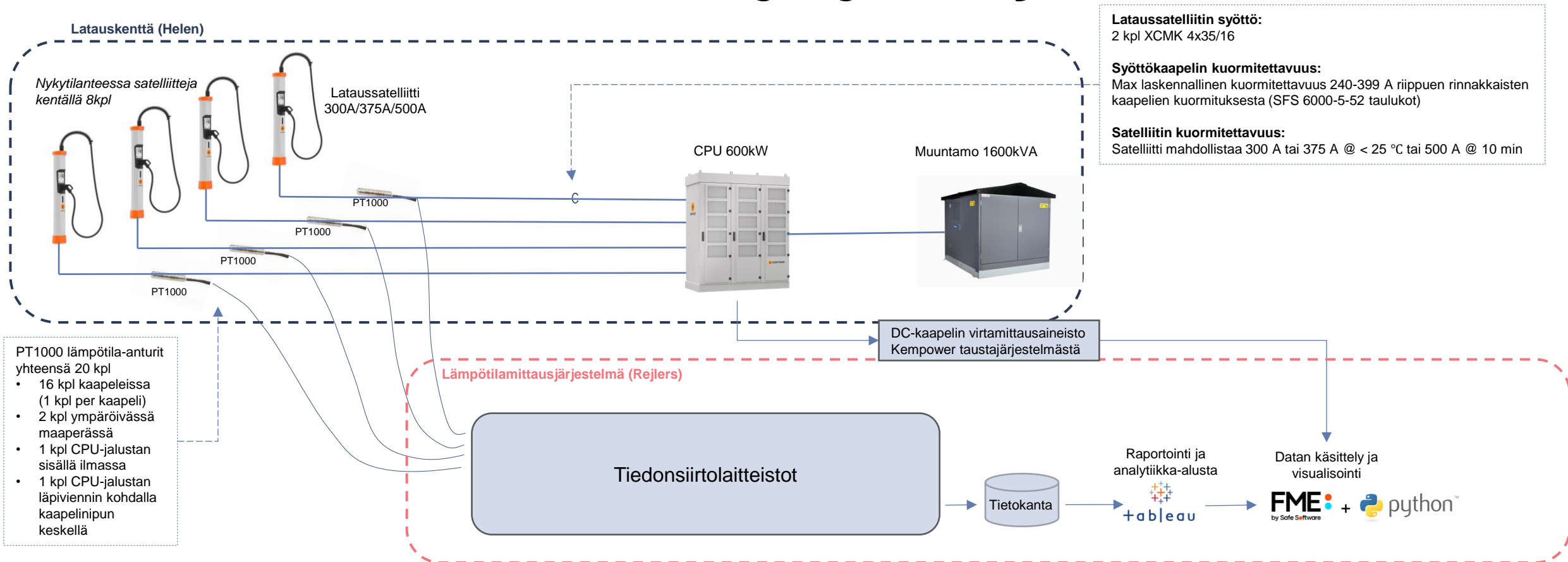
Item	Code	Description
Product type	ST	Kempower Satellite Version 2
Vehicle connector type	C	CCS2
	CC	2 x CCS2
	CD	CCS2 & CHADEMO
	X	CCS2/CHADEMO
		Allows up to 16 outputs per Power Unit, max. 8 outputs charging simultaneously
Charging cable length	S	5 m
	7	7 m
Nominal charging cable current	B	125 A (CHADEMO)
	C	200 A (CCS2)
	D	250 A (CCS2)
	E	300 A/500 A <sup>[1]</sup> (CCS2)
User interface and payment	S	Standard user interface
	O	Payter Apollo: Contactless payment with online PIN entry and verification
	P	Payter P68: Only contactless payments, no strong customer authentication (SCA) possibility
	W	Worldline Valina: Contactless payment with online PIN entry and verification, chip and magnetic stripe reader
Meter	M	Certified DC energy meter
Equipment stop	E	Equipment stop button
Branding options	C0	Unbranded; roof and base in black color, no stickers
	Cn	Branded; number (n) indicates branding, e.g. C8

<sup>[1]</sup> 500 A (max. 10 min) in +25 °C with a single charging output (only single cable satellite). Requires at least 3 output terminals connected together at the Power Unit and a specific hardware configuration.  
 375 A (continuous) in +25 °C with double charging outputs or vehicle connector type X. Requires at least 2 output terminals connected together at the Power Unit and a specific hardware configuration.

**General electrical specifications**

DC charging connector options	CCS2 IEC 62196-3, CHADEMO
Voltage	Max. 1000 VDC
Standby power	25 W

# Periaatekuva mittausjärjestelyistä

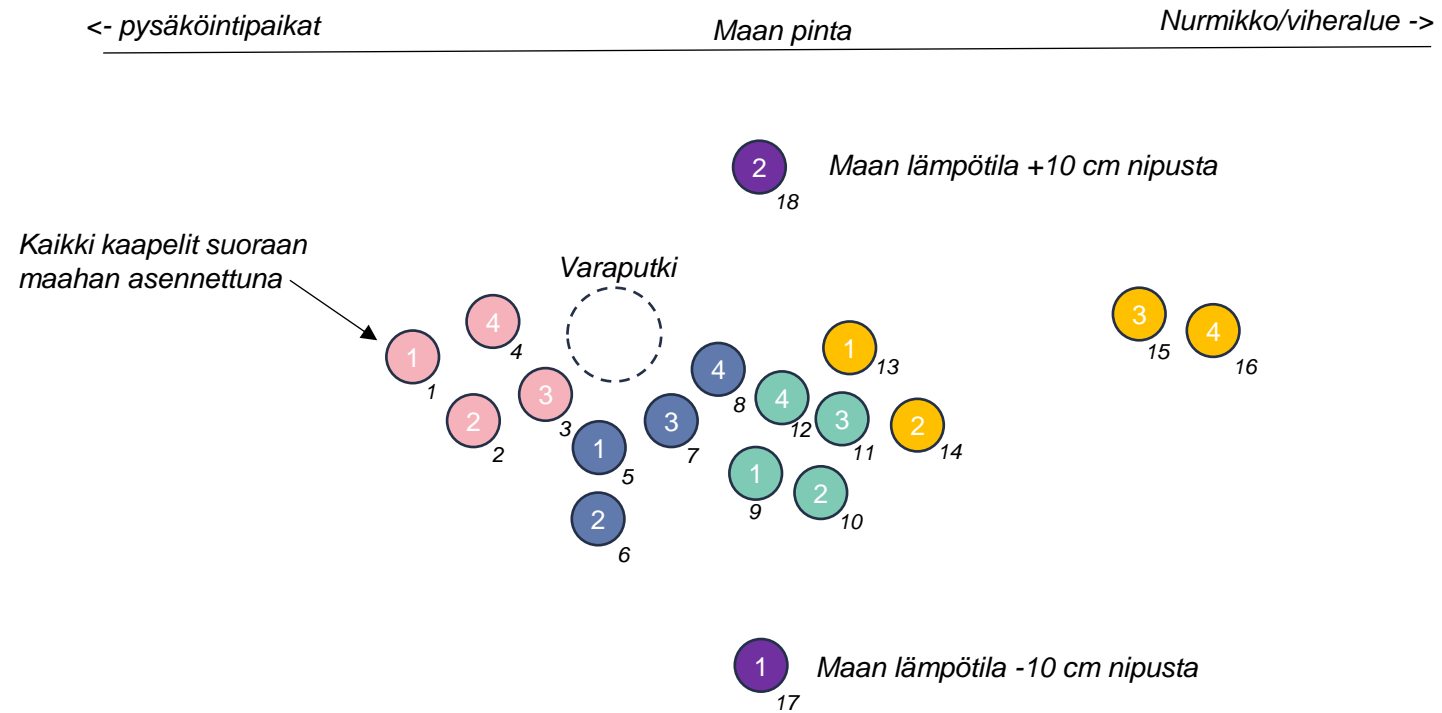




MITTAUSJÄRJESTELYT



Poikkileikkaus:



## MITTAUSJÄRJESTELYT



### Lämpötila-antureiden sijoittelu:

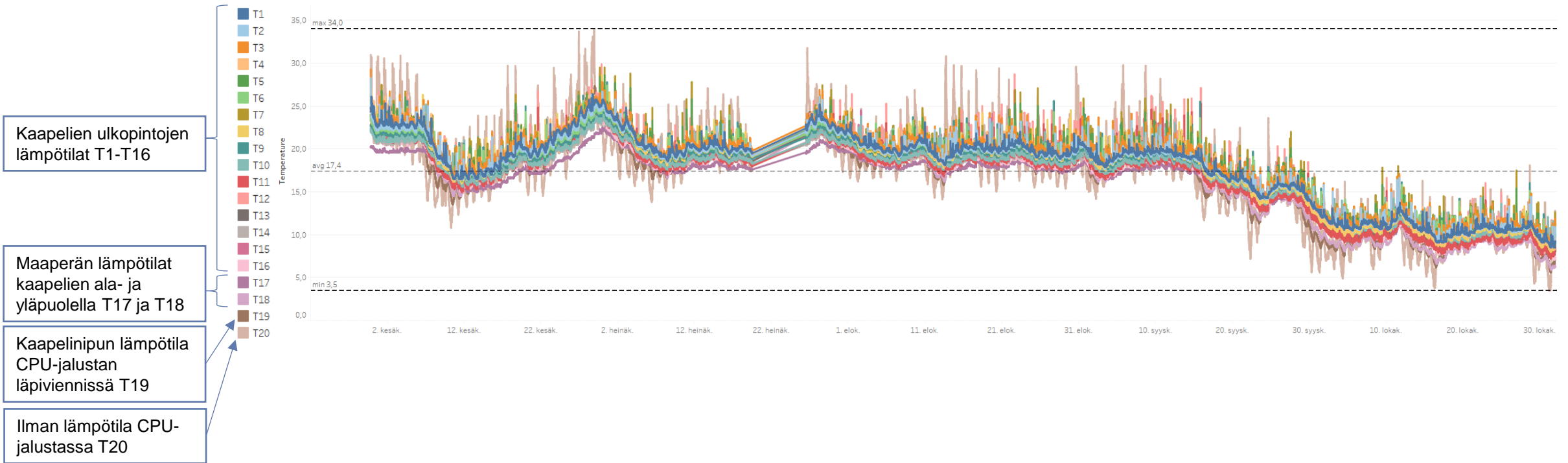
- 16kpl -> jokaisen kaapelin ulkokuoreen kiinnitettynä
- 1 kpl -> 10 cm kaapelipin alle
- 1 kpl -> 10cm kaapelipin päälle
- 1 kpl -> CPU-jalustan läpiviennin kohdalle kaapelipin keskelle
- 1 kpl -> CPU-jalustan ilman lämpötila



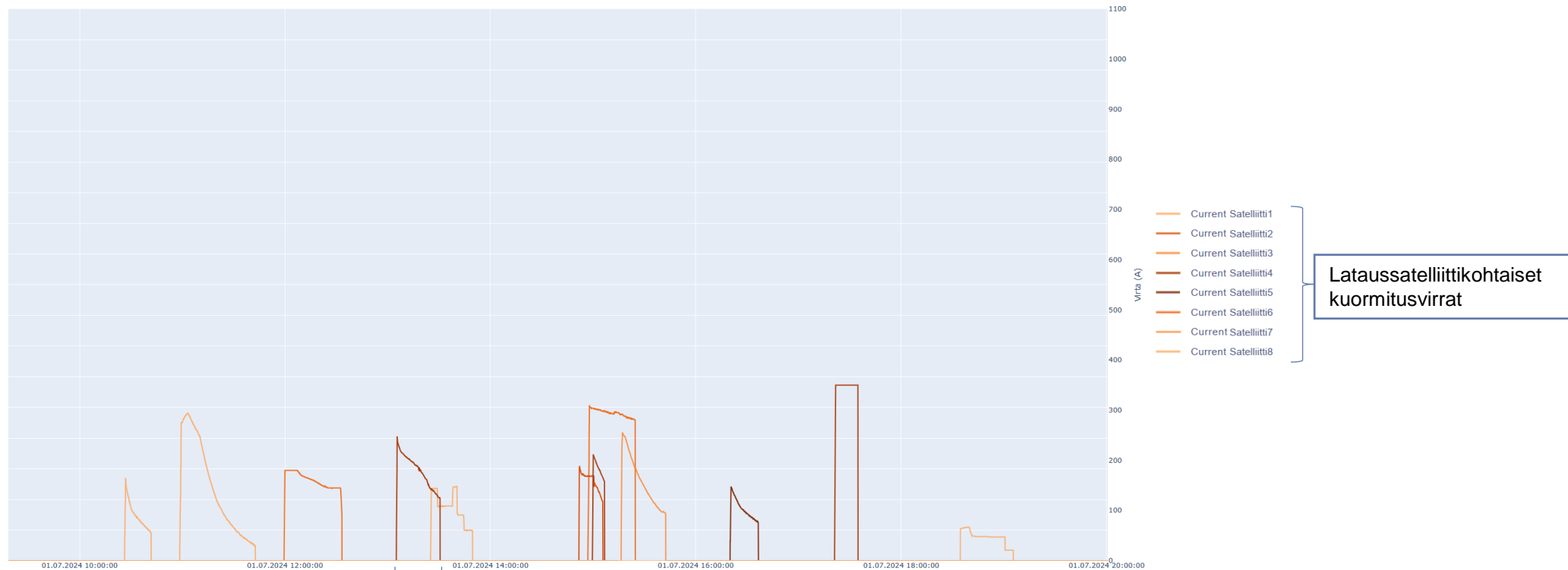
# Mitattu data

- **Lämpötilamittausaineisto**
  - Mittausdataa saadaan aikasarjana yhteensä 20 mittausanturista noin 1 minuutin välein. Mitatut kohdat ovat:
    - Kaapelien ulkopinnat (16 kpl),
    - Maaperä 10 cm kaapeliniipun alapuolella ja yläpuolella,
    - Ilman lämpötila CPU-jalustassa (1 kpl) ja kaapeliniipun keskellä CPU-jalustan läpiviennin kohdalla (1 kpl).
- **DC-virtamittausaineisto**
  - Mittausdataa kerätään latauslaitetoimittajan taustajärjestelmään aikasarjana lataustapahtumien mukaan eli tiheimmillään noin 5 sekunnin välein lataustapahtuman ollessa käynnissä.
    - Tässä tutkimuksessa DC-virtamittausaineisto saatiin yksittäisinä suurina aineistoina valituille aikaväleille, josta eroteltavissa tunnustekentän perusteella lataussatelliittien kuormitusvirrat (8 kpl).
- **Tulevaisuuden dynaamisen kuormanhallinnan sovelluksien toimivuuden kannalta tulisi olla mahdollista toteuttaa lähes reaaliaikaiset integraatiot datalähteisiin.**
- **Mittausanturit asennettiin jälkiasennuksena, joten etukäteen ei ollut varmaa tietoa, mitkä 2 kaapelia ovat ns. pareja eli syöttävät samoja lataussatelliitteja eikä myöskään tietoa siitä, mitkä kaapelit syöttävät mitäkin lataussatelliittia.**
- **Lämpötilamittausdatasta selvitettiin samoja lataussatelliitteja syöttävät kaapeliparit yksinkertaisen aikasarja-analyysin perusteella, koska mittausdata oli täsmälleen samoilta ajanhetkiltä.**
- **Lämpötilamittausdata ja DC-virtamittausdata yhdistettiin laskemalla erikseen jokaisen kaapelin lämpötilamittausaikasarjojen ja jokaisen lataussatelliitin virtamittausaikasarjojen ristikorrelaatioita, joiden perusteella saatiin selville suurimmat keskinäiset korrelaatiot, minkä perusteella kukin lataussatelliitti ja sitä syöttävä kaapelipari voitiin linkittää keskenään.**

# Lämpötilamittaukset



# DC-virtamittaukset



Esimerkki yksittäisestä lataustapahtumasta yksittäisellä lataussatelliitilla

# Laskennallisen datan muodostus

- Mitatun datan lisäksi tarkastelussa käytettiin myös laskennallista dataa, joka muodostettiin mitatun datan, vakioparametrien ja laskentamallin avulla.
- Vakioparametreja olivat käytetyn kaapelin XCMK 4x35/16 rakenteeseen liittyvät suureet:
  - kaapelin materiaaleihin liittyvät suureet  $R_{c20}$ ,  $\alpha_c$ ,  $\rho_i$  ja  $\rho_j$  sekä
  - kaapelin geometriaan liittyvät suureet  $G_1$ ,  $D_j$  ja  $t_3$ .
- Käytetty laskentamalli:

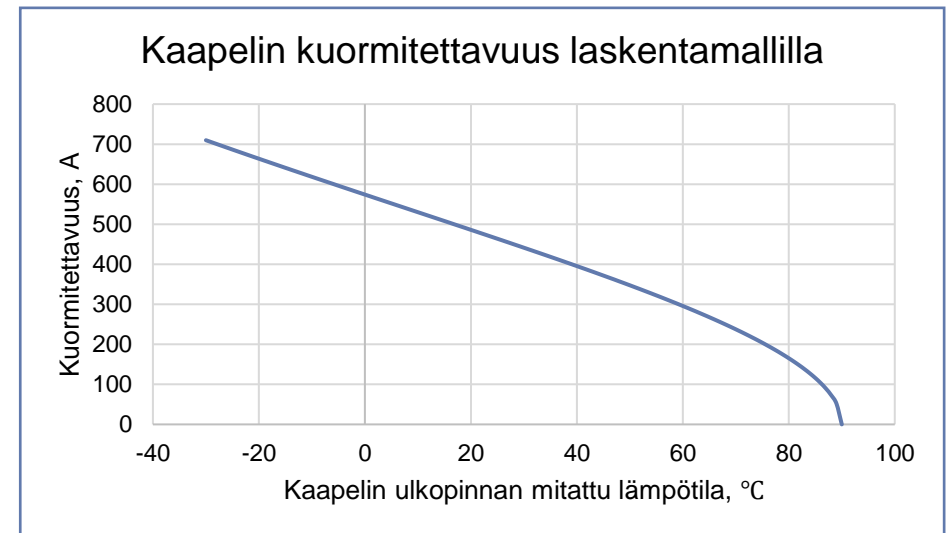
Dynaaminen  
kuormitettavuus (A)

$$I_c = \sqrt{\frac{\theta_c(\max) - \theta_a}{R_c T_1 + R_c n_{ph} T_3}}$$

$I_c$  = kaapelin sallittu kuormitettavuus tai mitattu kuormitusvirta  
 $\theta_c(\max)$  = johtimen lämpötila (sallittu max. 90 °C)  
 $\theta_a$  = ympäristön lämpötila (kaapelin ulkopinnan mitattu lämpötila)  
 $R_c = R_{c20}(1 + \alpha_c(\theta_c - 20))$   
 = johtimen resistanssi per m (kupari 35mm<sup>2</sup>)  
 $T_1 = \frac{\rho_i}{2\pi} G_1$  = johdin—vaippa lämpöresistanssi  
 $T_3 = \frac{\rho_j}{2\pi} \ln\left(\frac{D_j}{D_j - 2t_3}\right)$  = ulkovaipan lämpöresistanssi

Johtimen  
laskennallinen  
lämpötila (°C)

$$\theta_c = \frac{I_c^2 R_{c20} (T_1 + n_{ph} T_3) - 20 I_c^2 R_{c20} \alpha_c (T_1 + n_{ph} T_3) + \theta_a}{1 - I_c^2 R_{c20} \alpha_c (T_1 + n_{ph} T_3)}$$

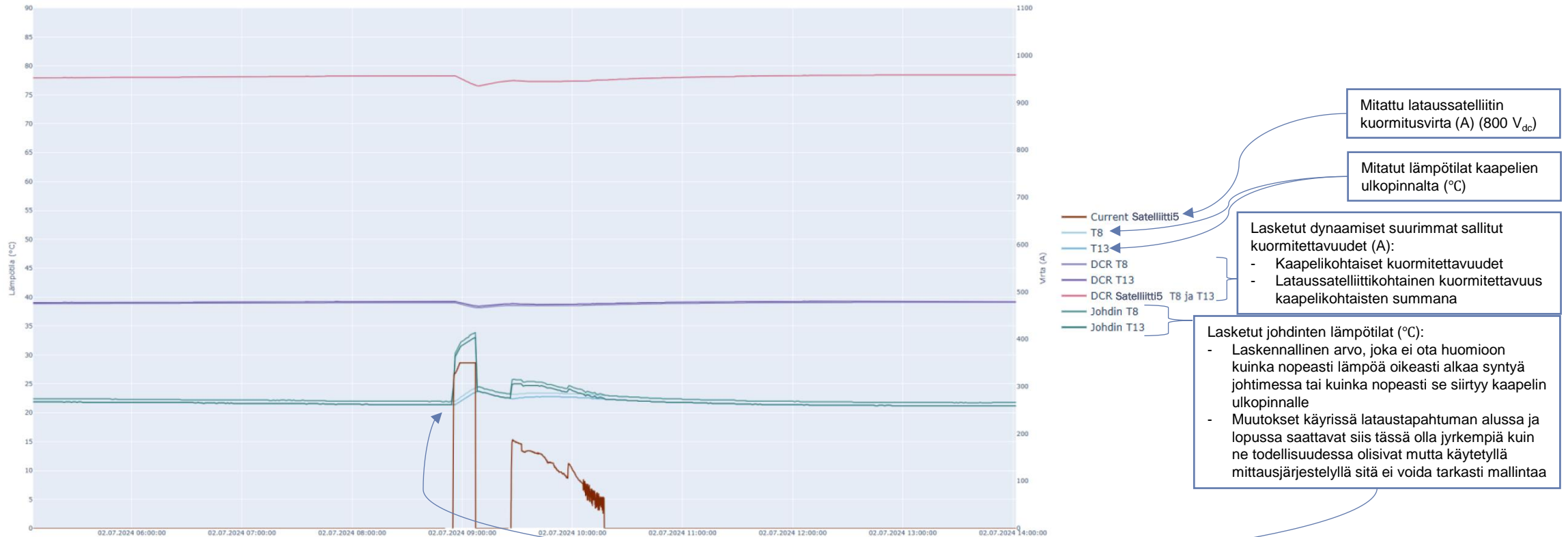


# Laskennallinen data

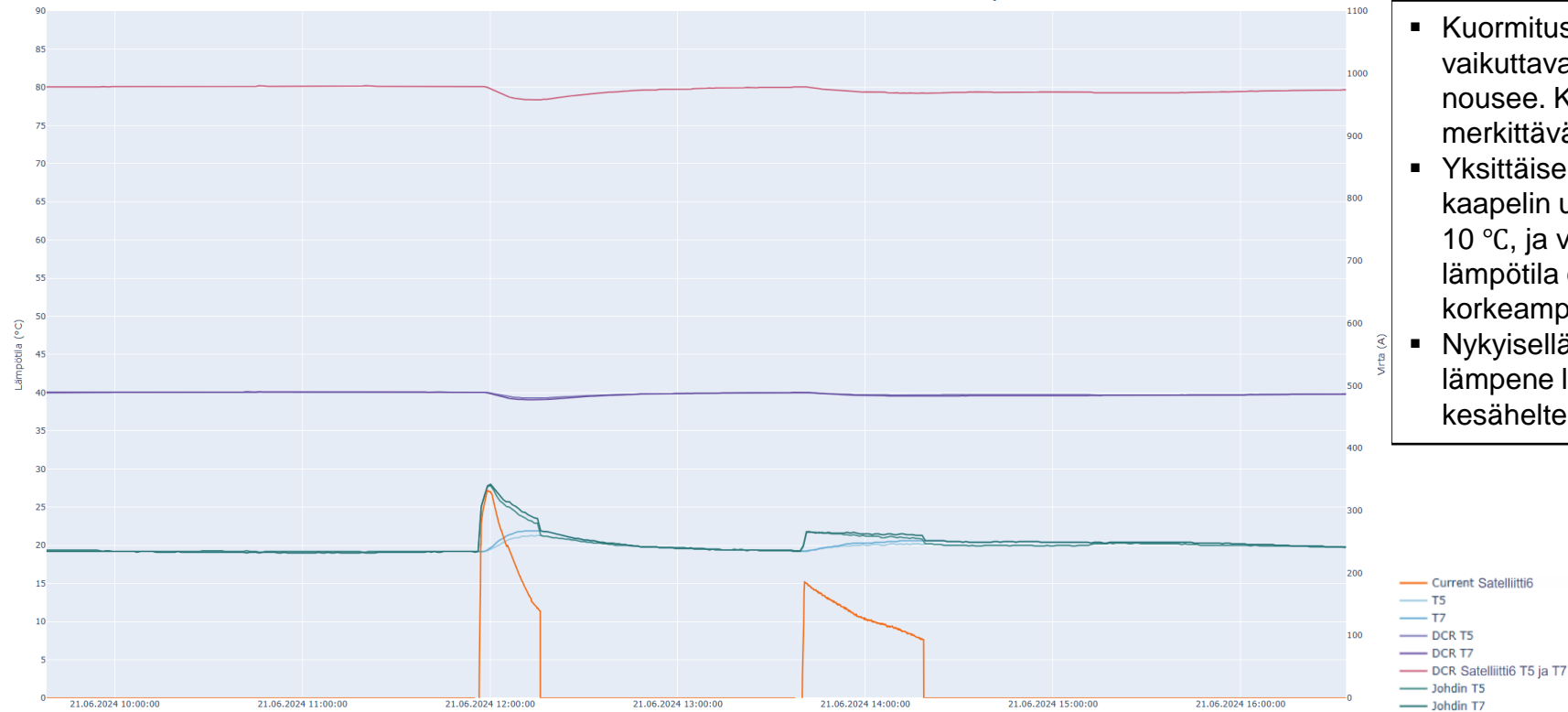
- Laskennallisen datan aikavälit ovat samoja kuin laskennan pohjana käytetyn mittausdatan pisimmät aikavälit.
- Dynaamiset sallitut kuormitettavuusarvot on laskettu seuraavasti:
  - Laskennassa on käytetty kaavaa  $I_c = \sqrt{\frac{\theta_{c(\max.)} - \theta_a}{R_c T_1 + R_c n_{ph} T_3}}$ , jossa  $\theta_a$  on kaapelin ulkopinnan lämpötilan mittausarvo.
  - Salittut kuormitettavuusarvot on laskettu jokaiselle kaapelille (yhteensä 16 kpl aikasarjoja).
  - Sallitut kuormitettavuusarvot on laskettu myös jokaiselle lataussatelliitille kahden satelliittiä syöttävän kaapelin summana (yhteensä 8 kpl aikasarjoja).
- Johdinten laskennalliset lämpötilat on laskettu seuraavasti:
  - Laskennassa käytetty kaavaa  $\theta_c = \frac{I_c^2 R_{c20} (T_1 + n_{ph} T_3) - 20 I_c^2 R_{c20} \alpha_c (T_1 + n_{ph} T_3) + \theta_a}{1 - I_c^2 R_{c20} \alpha_c (T_1 + n_{ph} T_3)}$ , jossa  $\theta_a$  on kaapelin ulkopinnan lämpötilan mittausarvo ja  $I_c$  on lataussatelliitin mitattu kuormitusvirta jaettuna kahdella (2 samanlaista kaapelia per satelliitti).
  - Johtimen laskennallinen lämpötila on laskettu jokaiselle kaapelille (yhteensä 16 kpl aikasarjoja).

# Tulosten visualisointi

Kaikki mitattu ja laskettu data yhdistettiin samaan interaktiiviseen visualisointiin, josta käyttäjä voi valita vapaasti tarkasteltavat suureet tai esimerkiksi kaikki yhteen lataussatelliittiin liittyvät suureet yhdellä valinnalla sekä valita tarkasteltavan aikavälin.

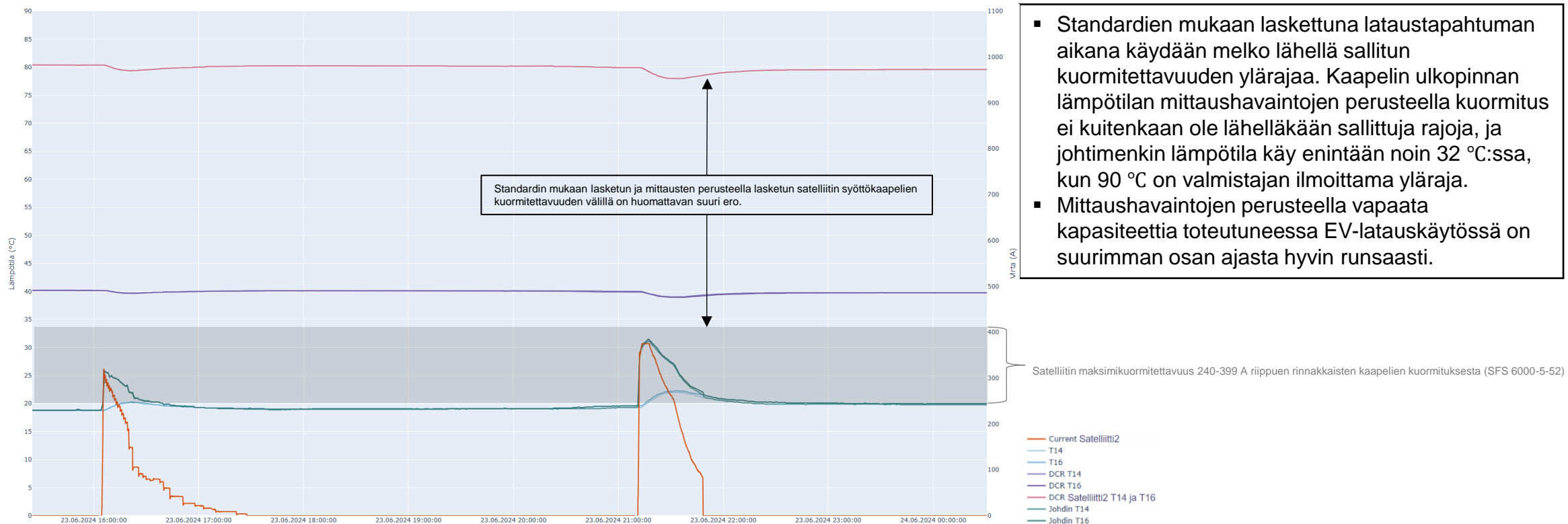


# Kuormitusvirta lämmittää kaapelia melko hitaasti



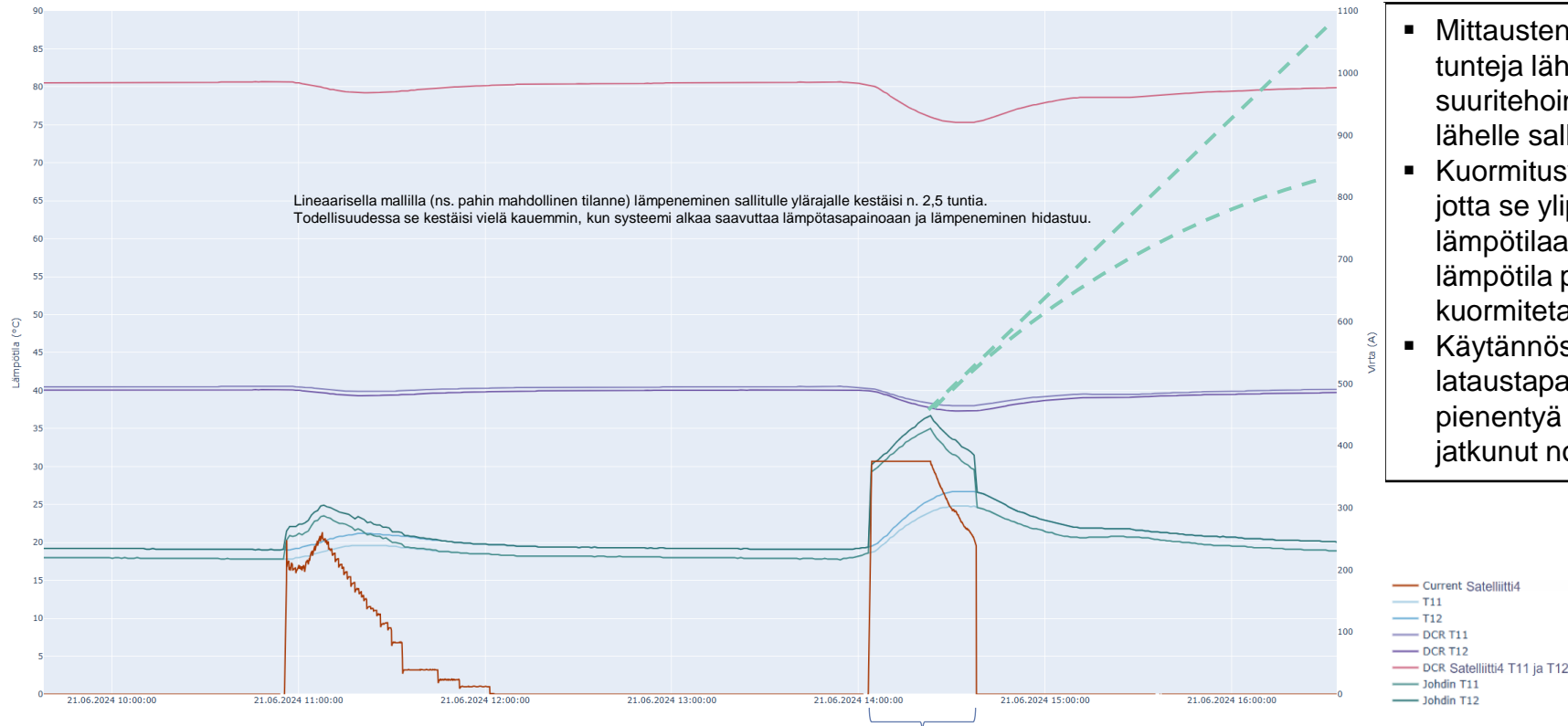
- Kuormitusvirran suuruus ja lataustapahtuman kesto vaikuttavat siihen, kuinka korkeaksi lämpötila nousee. Kuormitusvirta lämmittää kaapelia merkittävästi, mutta lopulta melko hitaasti.
- Yksittäisen lataustapahtuman aikana mitattu kaapelin ulkopinnan lämpötila nousee enintään 5-10 °C, ja virran ollessa suuri laskennallinen johtimen lämpötila on hetkellisesti enintään noin 10 °C korkeampi kuin mitattu ulkopinnan lämpötila.
- Nykyisellä latauskäyttötymisellä kaapelit eivät lämpene lähellekään sallittuja ylärajoja edes kesähelteillä.

# Vapaata kapasiteettia runsaasti





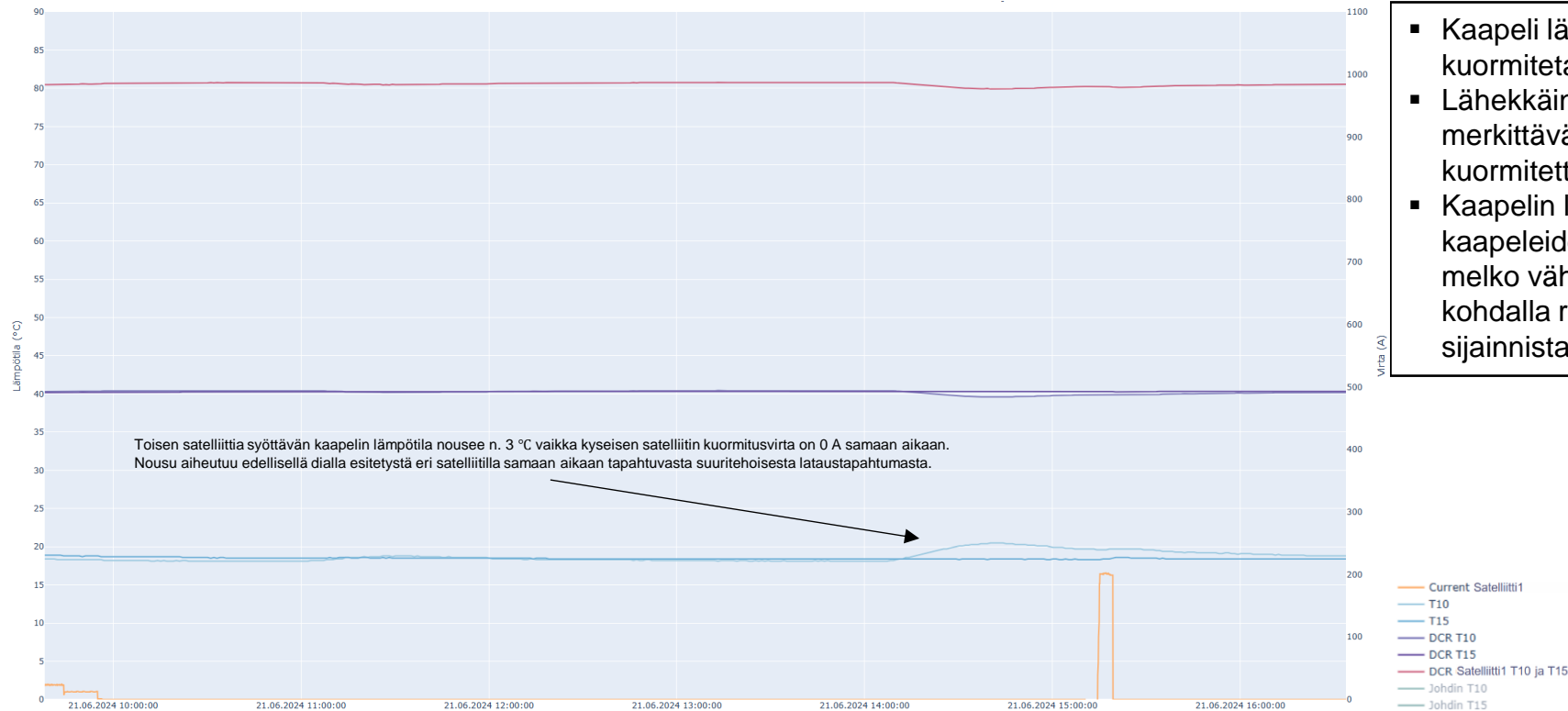
# Ylikuormitus edellyttäisi pitkäaikaista ja keskeytymätöntä suuritehoista latausta



- Mittausten ja laskentamallin perusteella vain useita tunteja lähes keskeytymättömästi jatkuva suuritehoinen lataus saisi kaapelit lämpiämään lähelle sallittuja ylärajoja.
- Kuormitusvirran tulee olla vähintään 200-300 A, jotta se ylipäätään kasvattaa kaapelin ulkopinnan lämpötilaa. Virran ollessa sitä pienempi mitattu lämpötila pysyy samana tai laskee vaikka kaapelia kuormitetaan.
- Käytännössä jokaisessa mitatussa lataustapahtumassa latausvirta alkaa kuitenkin pienentyä maksimista viimeistään, kun latausta on jatkunut noin 20-30 minuuttia.

Esimerkki pitkään maksimiteholla jatkuvasta lataustapahtumasta. Satelliitin mahdollistaman maksimivirran 375 A kesto noin 19 min ja koko lataustapahtuman kesto noin 33 min.

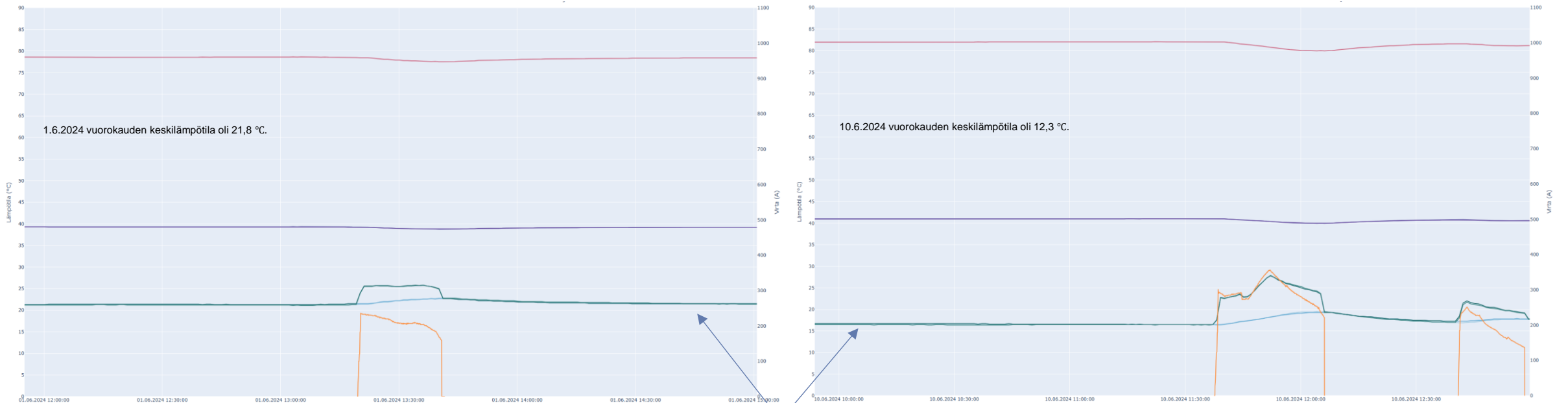
# Lähellä olevien muiden kaapelien kuormitus lämmittää kaapelia



- Kaapeli lämpenee vaikka juuri kyseistä kaapelia ei kuormiteta.
- Lähellä olevat kaapelit lämmittävät siis merkittävästi toisiaan ja siten vähentävät toistensa kuormitettavuutta kuten oletettiin tapahtuvan.
- Kaapelin lämpeneminen muiden kuormitettujen kaapeleiden vaikutuksesta näyttää kuitenkin olevan melko vähäistä ja ilmenee vain tiettyjen kaapelin kohdalla riippuen kaapelien keskinäisestä sijainnista.

# Ilman lämpötilallakin on merkitystä

- Tässä mittauskohteessa myös ilman lämpötila vaikuttaa merkittävästi kaapelien lämpötilaan, koska kaapelit asennettu melko korkealle maaperään (vain n. 30 cm maanpinnasta).
- Ohjeistuksien mukaisesti ne tulisi asentaa syvemmälle, jolloin ilman lämpötilan vaihtelun vaikutuskin kaapeleihin olisi oletettavasti vähäisempi.



Vasemmassa kuvassa ilman lämpötila on n. 9 °C korkeampi kuin oikeassa, jolloin kaapelin ulkopinnalta mitattu lämpötila on n. 5-6 °C korkeampi ilman kuormitusvirtojen vaikutusta.

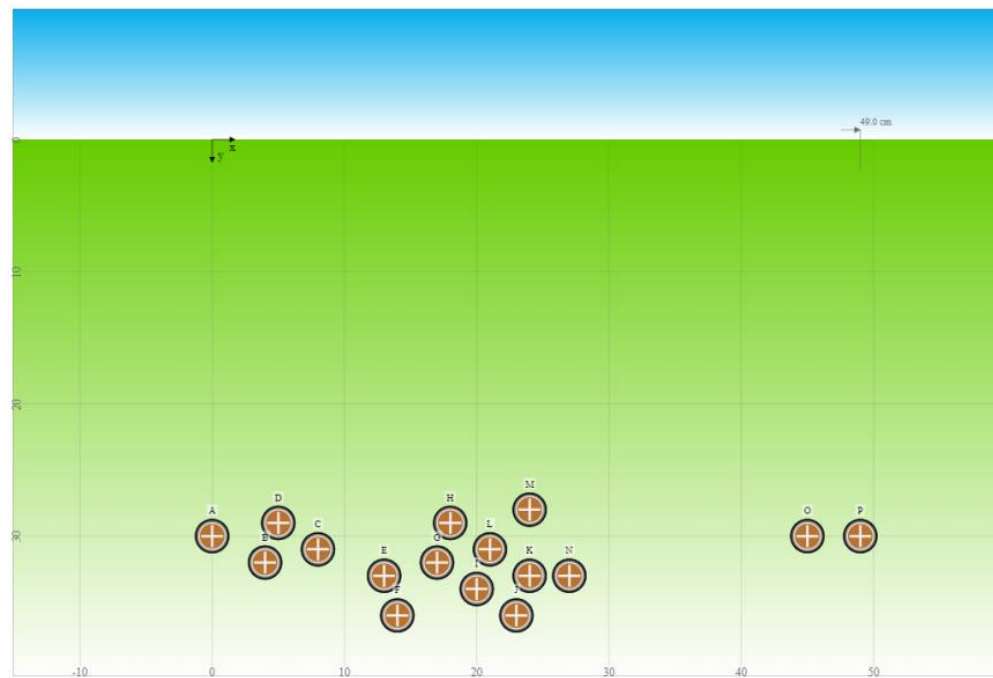
# Koonti mittaushavainnoista

- Kuormitusvirta lämmittää kaapeleita merkittävästi mutta melko hitaasti. Toteutuneella latauskäyttötymisellä kaapelit eivät lämpene lähellekään sallittuja ylärajoja edes kesähelteillä.
- Mittausten ja laskentojen perusteella kaapeleissa on vapaata kapasiteettia toteutuneessa sähköautojen latauskäytössä suurimman osan ajasta hyvin runsaasti.
- Vain useita tunteja jatkuva suuritehoinen lataus ilman useiden minuuttien taukoja aiheuttaisi kaapelien lämpiämisen lähelle sallittuja ylärajoja. Lisäksi kuormitusvirran tulisi olla jatkuvasti vähintään 200-300 A, jotta se ylipäätään kasvattaa kaapelin ulkopinnalta mitattua lämpötilaa eli tässä mittauskohteessa lämpö siirtyy varsin tehokkaasti kaapeleista ympäröivään maaperään.
- Useiden kaapelien ollessa kuormitettuna lähekkäin kaapeli voi lämmitä vaikka juuri kyseistä kaapelia ei kuormiteta. Lähekkäin olevat kaapelit lämmittävät siis merkittävästi toisiaan, joten lähellä olevien kaapelien kuormittaminen voi vähentää myös kaapelin kuormitettavuutta. Mitatut vaikutukset olivat tosin pääsääntöisesti melko vähäisiä suhteessa vapaaseen kapasiteettiin.
- Tässä mittauskohteessa myös ilman lämpötila vaikuttaa merkittävästi kaapelien lämpötilaan, mutta kesähelteilläkin vapaata kapasiteettia oli silti pääsääntöisesti runsaasti. Syynä ilman lämpötilan vaikuttavuuteen on luultavasti se, että kaapelit asennettu melko korkealle maaperään (vain n. 30 cm maanpinnasta). Ohjeistuksien mukaisesti ne tulisi asentaa syvemmälle, jolloin ilman lämpötilan vaihtelun vaikutuskin kaapeleihin olisi oletettavasti vähäisempi.

# Simuloinnit

- Todellisen maailman lämpötila- ja virtamittausten lisäksi vastaavaa kaapelijärjestelmää tarkasteltiin vertailuksi myös simuloinnin keinoin.
- Simulointiohjelmistona käytettiin selainpohjaista Cableizeria.
  - Kaapelijärjestelmästä rakennettiin simulointimalli huomioiden mm. kaapelien rakenteet sekä niiden sijainti maaperässä sillä tarkkuudella kuin se oli mahdollista lähtötietojen perusteella.
  - Maaperän ja muun ympäristön parametrit asetettiin lähtötietojen mukaisiksi ja eteläiselle Suomelle tyypillisiksi.
- Simuloitiin maksimikuormitustilannetta, jossa kaikkia kaapeleita kuormitettaisiin suurimpaan sallittuun lämpötilaan asti Cableizerin käyttämällä kuormitustenjakoalgoritimilla.
  - Vastaava tilanne on todellisuudessa havaitun käyttäytymisen perusteella hyvin epätodennäköinen.

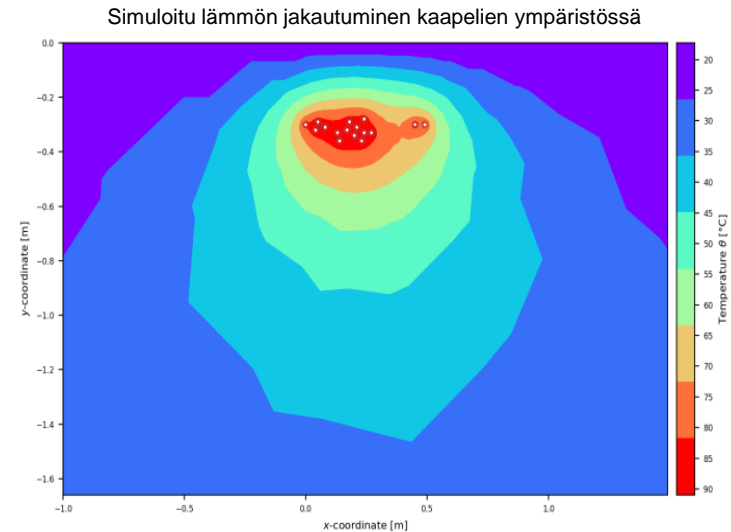
System	Object	Kuormitusvirta	Johtimen lämpötila   Ulkopinnan lämpötila	Losses [W/m]
		Current [A] $I_c$	Temp. [°C] $\theta_c$   $\theta_e$	
System A	XCMK 4x35/16	133.4	90.0   83.8	36.0
System B	XCMK 4x35/16	83.5	90.0   87.6	14.1
System C	XCMK 4x35/16	77.4	90.0   87.9	12.1
System D	XCMK 4x35/16	97.2	90.0   86.7	19.1
System E	XCMK 4x35/16	62.6	90.0   88.6	7.9
System F	XCMK 4x35/16	75.8	90.0   88.0	11.6
System G	XCMK 4x35/16	45.1	90.0   89.3	4.1
System H	XCMK 4x35/16	84.9	90.0   87.5	14.6
System I	XCMK 4x35/16	42.8	90.0   89.4	3.7
System J	XCMK 4x35/16	73.4	90.0   88.1	10.9
System K	XCMK 4x35/16	44.6	90.0   89.3	4.0
System L	XCMK 4x35/16	43.4	90.0   89.3	3.8
System M	XCMK 4x35/16	105.4	90.0   86.1	22.5
System N	XCMK 4x35/16	90.0	90.0   87.2	16.4
System O	XCMK 4x35/16	131.7	90.0   83.9	35.1
System P	XCMK 4x35/16	146.6	90.0   82.5	43.5



# Simuloinnit

- Simuloinneissa kaapelin johtimen ja ulkopinnan välinen lämpötilaero on enimmäkseen vain muutamia lämpöasteita.
  - Myös mittausdatan jalostamisessa käytetyllä laskentamallilla tapahtuu samoin, joten simuloinnit vahvistavat sen osalta käytetyn laskentamallin toimivuutta.
- Kuormitusvirran johtimessa aiheuttama lämpö siirtyy siis melko tehokkaasti ja nopeasti kaapelin kerrosten läpi ympäröivään maaperään tässä tapauksessa.
  - Toisaalta ympäristön lämpö siirtyy tehokkaasti myös kaapeliin, joten kaapelin lähellä oleva lämmönlähde, kuten toinen kuormitusvirran vaikutuksesta lämpenevä kaapeli, vaikuttaa merkittävästikin kaapelin kuormitettavuuteen riippumatta siitä kuormitetaanko juuri tarkasteltavaa kaapelia. Sama tapahtuu mittausten perusteella myös todellisuudessa.
- Myös simulointitulosten perusteella tietyn kuormitusvirran määrittämisen teoreettisen maksimilämpötilan saavuttaminen kestää vähintään useita kymmeniä minutteja, mikä vastaa mittaushavaintoja.

System	Object	Current [A]	Temp. [°C]	Losses [W/m]
		$I_c$	$\theta_c$   $\theta_o$	$W_{eye}$
System A	XCMK 4x35/16	133.4	90.0   83.8	36.0
System B	XCMK 4x35/16	83.5	90.0   87.6	14.1
System C	XCMK 4x35/16	77.4	90.0   87.9	12.1
System D	XCMK 4x35/16	97.2	90.0   86.7	19.1
System E	XCMK 4x35/16	62.6	90.0   88.6	7.9
System F	XCMK 4x35/16	75.8	90.0   88.0	11.6
System G	XCMK 4x35/16	45.1	90.0   89.3	4.1
System H	XCMK 4x35/16	84.9	90.0   87.5	14.6
System I	XCMK 4x35/16	42.8	90.0   89.4	3.7
System J	XCMK 4x35/16	73.4	90.0   88.1	10.9
System K	XCMK 4x35/16	44.6	90.0   89.3	4.0
System L	XCMK 4x35/16	43.4	90.0   89.3	3.8
System M	XCMK 4x35/16	105.4	90.0   86.1	22.5
System N	XCMK 4x35/16	90.0	90.0   87.2	16.4
System O	XCMK 4x35/16	131.7	90.0   83.9	35.1
System P	XCMK 4x35/16	146.6	90.0   82.5	43.5



# Vikatilanteet ja muut mitoitustekijät

- Dynaamisella kuormanhallinnalla voidaan optimoida kaapelin kapasiteetin käyttöä vain, kun kaapelin terminen kuormitettavuus on rajoittava tekijä.
  - Vikatilanteita ja suojauksen toimivuutta varten paksumman kaapelin käyttö voi olla edelleen perusteltua, vaikka kuormitettavuuden kannalta ohuempi kaapeli ja dynaaminen kuormanhallinta olisi riittävä ratkaisu.
  - Nopeissa ilmiöissä dynaaminen kuormanhallinta ja/tai suojalaitteet eivät välttämättä ehdi rajoittaa kuormitusta riittävän nopeasti tai vähintäänkin vaatimukset tiedonsiirrolle kasvavat aivan eri luokkaan.
  - Myös esimerkiksi jännitehäviön takia saatetaan joutua käyttämään paksumpaa kaapelia kohteesta riippuen.
- Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan tarkasteltu tarkemmin vikatilanteita tai niiden vaikutusta mitoitukseen. Vikatilanteita ei myöskään mittausjakson aikana mittauskohteessa tapahtunut eikä niiden tarkempi tarkastelu käytetyn mittausjärjestelyn aikaresoluutiolla olisi ollut edes mahdollista.

# Dynaamisen kuormanhallinnan muut sovelluskohteet

- Tutkimuksessa kehitetty mittausjärjestelmä ja käytetty yleinen laskentamalli on soveltuu myös AC-kaapeleille.
  - Suoraan tässä tutkimuksessa käytettyjä laskentakaavoja ei kuitenkaan voida käyttää, vaan AC-kaapeleilla laskentamalliin tulee sisällyttää useampia vaihtosähköilmiöihin liittyviä parametreja, ja lisäksi tulee huomioida muuttuvat kaapelityyppikohtaiset (ja sijaintiolosuhteikohtaiset) parametrit.
- Sähköisen liikenteen latauskenttien ja muiden vastaavien kuormitukseltaan vaihtelevien kohteiden lisäksi esimerkiksi sähkönjakeluverkoista voisi löytyä laajasti sovelluskohteita dynaamiselle kuormanhallinnalle, koska niissä kuormitus vaihtelee runsaasti mm. vuodenaikojen mukaan.
  - Kapasiteettitarve saattaa lähivuosina paikallisesti kasvaa nopeammin kuin verkonhaltijat pystyvät siihen järkevästi varautumaan. Tällöin nopeasti käyttöön otettava dynaaminen kuormanhallinta pistemäisillä mittauksilla ongelmakohtissa voisi tarjota väliaikaista tai pysyvääkin helpotusta kapasiteettipulaan mahdollistamalla olemassaolevan todellisen kapasiteetin optimaalisemman hyödyntämisen. Verrattuna esimerkiksi uuteen verkkoinvestointiin tällainen ratkaisu voi olla hyvinkin kustannustehokas tapa lisätä käytettävissä olevaa kapasiteettia.
  - Jakeluverkoissa huippukuormitusten syklit ovat tyypillisesti pitkäkestoisempia kuin sähköisen liikenteen latauskäytössä, joten tämän tutkimuksen havaintoihin peilaten ylikuormituksen riski on todennäköisempi. Toisaalta jakeluverkoissa mm. jännitteen raja-arvot saattavat ohjata mitoitusta useammin varsinkin pidemmällä siirtoetäisyyksillä.
  - Laajempia maantieteellisiä alueita tarkasteltaessa todellisten ongelmakohtien luotettava määrittäminen voi myös olla haasteellista, mikäli dokumentaatio on puutteellista. Sama asia koskee toki jo nykyisinkin kapasiteetin laskentamenetelmiä.



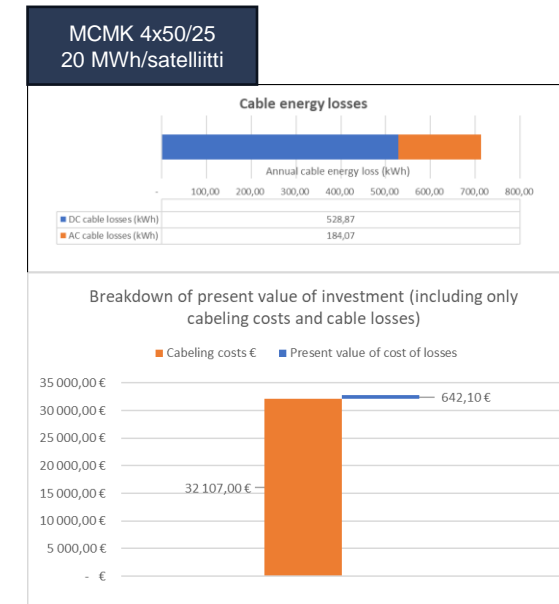
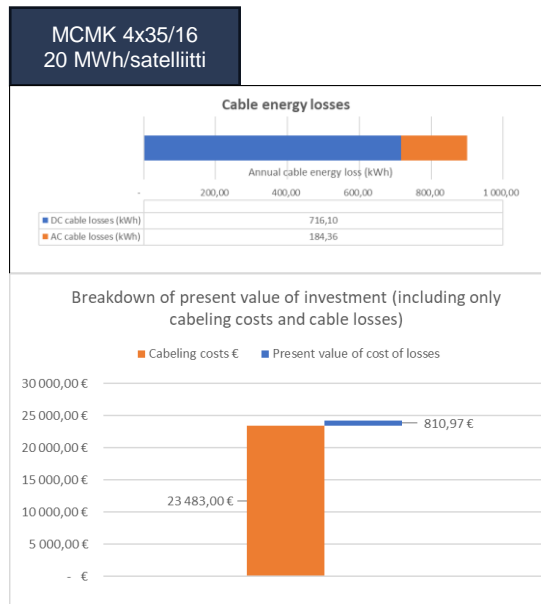
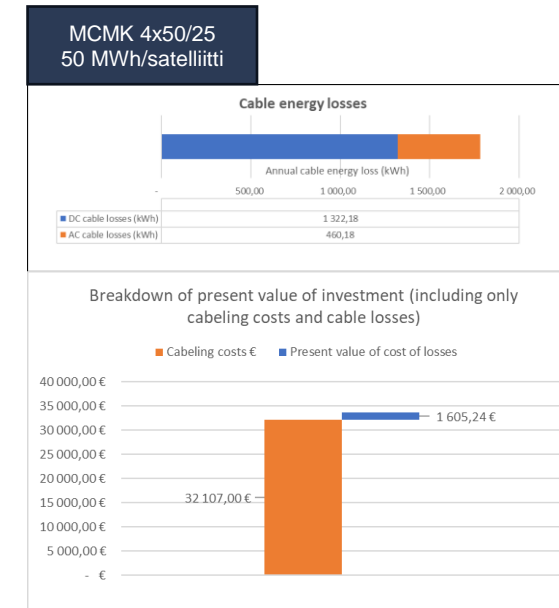
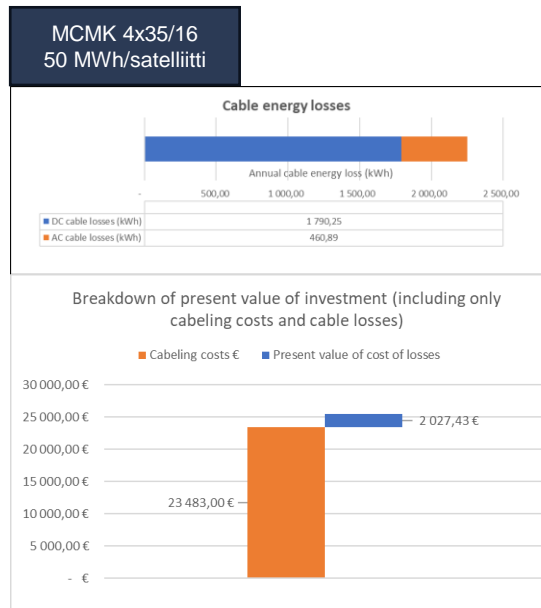
# Lämpötilamittausten toteutustapa

- DCR-järjestelmän vaatimia lämpötilamittauksia voidaan toteuttaa kahdella erilaisella tavalla.
  - Mittaus voi tapahtua pistemäisillä mittauksilla ennalta valituissa kohdissa kuten tässä tutkimuksessa tehtiin.
    - Pistemäisillä mittauksilla mittausten tulisi olla rajoittavimmissa ongelmakohtissa, joiden todellista sijaintia joudutaan aina jossain määrin arvioimaan.
    - Rajoittavimpia ongelmakohtia voivat olla esimerkiksi liittimet, kaapelinousut, putkitusten tai läpivientiaukkojen kohdat tai kohdat, joissa kaapeleita on muuten useita lähekkäin. Tämänkään tutkimuksen osalta ei voida varmuudella todeta, että mittaukset olisivat olleet rajoittavimmassa kohdassa, vaan mm. käytetyt mittausturien tyyppi aiheutti tiettyjä rajoituksia niiden sijoitteluun. Tässä tapauksessa kokonaisuuden kannalta rajoittavampia kohtia voisi esiintyä esimerkiksi auton liittimien päissä.
    - Keskeisenä haasteena pistemäisten mittausten käytössä onkin tunnistaa riittävän luotettavasti rajoittavimmat kohdat. Käytännössä jonkinlaista varmuusmarginaalia jouduttaneen silti jättämään jonkin verran mittaustavasta riippumatta.
  - Vaihtoehtona on toteuttaa mittaukset jatkuvasti koko kaapelireitin matkalta mittaussjohtimella, tyypillisesti esimerkiksi valokuidulla, mistä käytetään termiä DTS eli distributed temperature sensing. Mittausjohdin voi olla joko oma erillinen johtimensa tai se voi olla myös sulautettuna mitattavaan kaapeliin, mutta sellaiset ovat toistaiseksi melko harvinaisia.
    - Mittausjohtimella dynaamisen kuormanhallinnan toteuttamisen kustannukset voivat kasvaa merkittävästi varsinkin, jos se joudutaan tekemään jälkiasennuksena.
    - Mikäli dynaamisen kuormanhallinnan järjestelmän kustannukset ovat korkeat, sen rakentamisen sijaan paksumman kaapelin asentaminen saattaa näyttäytyä kustannustehokkaampana ratkaisuna. Lisähyötynä paksummasta kaapelista saadaan pienemmät häviökustannukset kaapelin elinkaaren aikana.

HAVAINTOJA JA HUOMIOITA

# Häviöt ja kustannusvertailu

- Dynaamisen kuormanhallinnan kustannustehokkuutta vertailtaessa oleellista on verrata elinkaarikustannuksia, joihin sisältyy kaapelien investointikustannukset ja käytön aikaiset häviökustannukset. Niiden ja DCR-järjestelmän lisäksi eri vaihtoehtojen kustannusrakenteiden oletetaan olevan muuten samat.
- Kustannusvertailun oletukset:
  - Lataussatelliitin syöttökaapelina joko MCMK 4x35/16 DCR-järjestelmällä tai MCMK 4x50/25
  - Lataussatelliitteja 8 kpl 3m välein ja pisimpien syöttökaapelien pituus 35m
    - Satelliitin vuotuinen latausenergia 50 MWh (ylempänä) ja 20 MWh (alempana)
  - Häviöenergian hintana 8 c/kWh, investoinnin pitoaikana 30 vuotta ja korkokantana 8 %
- Ohuemman kaapelin elinkaarikustannukset ovat ylempässä tapauksessa n. 8300 € ja alemmassa tapauksessa n. 8500 € pienemmät kuin paksumman kaapelin.
  - Ainakaan tässä tapauksessa paksumman kaapelin käyttö ei siis ole perusteltavissa pelkästään pienemmillä häviöillä, mikäli ohuempi kaapeli dynaamista kuormanhallintaa hyödyntäen on muuten toimiva ratkaisu.
- DCR-järjestelmän kustannukset tässä tapauksessa olivat n. 4000 €, joten sen mahdollistaessa ohuemman kaapelin käytön säästöä verrattuna paksumpaan kaapeliin tulisi n. 4300-4500 €.



# Mitattavat suureet ja digitaalinen malli

- Tässä pilottitutkimuksessa keskityttiin mittaamaan kaapelien ulkopintojen lämpötiloja ja analysoimaan kuormitettavuutta ja johdinten lämpötilaa niiden perusteella. Myös kaapeleita ympäröivästä maaperästä kerättiin vastaavat lämpötilamittaukset, mutta esimerkiksi maaperän kosteutta tai lämmönjohtavuutta ei suoraan mitattu.
- Käytännössä maaperän kosteus ja lämmönjohtavuus ovat kuitenkin tiedossa olevien kaapelien ominaisuuksien lisäksi juuri ne ominaisuudet, jotka vaikuttavat virran ja resistanssin vaikutuksesta kaapelissa syntyvän lämmön siirtymiseen pois kaapelista ja siten kaapelin kuormitettavuuteen. Vaihtoehtoisesti kaapelin lämpenemistä ja kuormitettavuutta voisi siis mallintaa myös niiden perusteella kaapelin ulkopinnan lämpötilan mittaamisen sijaan.
- Sopivia varmuusmarginaaleja käyttäen myös täysin digitaalinen malli dynaamiseen kuormitustenhallintaan voisi olla yksi keino hyödyntää kaapeleiden kapasiteettia nykyistä optimaalisemman.
  - Dynaaminen kuormitustenhallinta on mahdollista jossain määrin toteuttaa täysin ilman erillisiä uusia mittauksia, kunhan jonkinlainen tieto kuormitustilanteesta on käytettävissä. Useissa sovelluskohteissa sellainen on mahdollista saada esimerkiksi jo nykyisen käytönvalvontajärjestelmän avulla.
  - Mallin rakentamiseen tarvitaan lisäksi tiedot kaapelijärjestelmästä sisältäen mm. kaapelin ominaisuudet sekä vallitsevista ympäristöolosuhteista riittävällä tarkkuudella.
  - Mallia tulisi kuitenkin validoida riittävän samanlaisen kohteen mittaustuloksilla ennen sen laajempaa käyttöä.

# Yhteenveto lukuina

Paksumpaa kaapelia käyttäen ilman dynaamista kuormanhallintaa (MCMK 4x50/25)

- Yksittäisellä latauskentällä
  - Vertailukelpoinen kokonaiskustannus 33 700 €
    - Investointikustannukset 32 100 €
    - Häviökustannukset 1 600 €
    - Mittausjärjestelmän kustannukset 0 €
  - Kuparin määrä 26,9 kg
    - CO<sub>2</sub>-päästöt (kupari) 142 kgCO<sub>2</sub>e
- Globaalisti vuonna 2035 IEA latauspistemääräennusteilla
  - Kuparin määrä 247 300 t
    - CO<sub>2</sub>-päästöt (kupari) 3,0 milj. kgCO<sub>2</sub>e

Ohuempaa kaapelia käyttäen dynaamisella kuormanhallinnalla (MCMK 4x35/16)

- Yksittäisellä latauskentällä
  - Vertailukelpoinen kokonaiskustannus 29 400 € (-13 %)
    - Investointikustannukset 23 400 €
    - Häviökustannukset 2 000€
    - Mittausjärjestelmän kustannukset 4 000 €
  - Kuparin määrä 18,8 kg
    - CO<sub>2</sub>-päästöt (kupari) 100 kgCO<sub>2</sub>e
- Globaalisti vuonna 2035 IEA latauspistemääräennusteilla
  - Kuparin määrä 173 100 t (-30%)
    - CO<sub>2</sub>-päästöt (kupari) 2,1 milj. kgCO<sub>2</sub>e (-30 %)

# Johtopäätökset

## Mahdollisuuksia

- SFS 6000 -standardin mukainen mitoitus vaikuttaa mitaushavaintojen perusteella melko konservatiiviselta.
  - Teoreettisia ääriolosuhteita ei kuitenkaan päästy mitausjakson aikana tutkimaan, koska sellaisia ei havaintojen perusteella mitauskohteelle tyypillisellä todellisella käytöllä voida saavuttaa.
- Havaintojen perusteella kaapelien mitoituksen kannalta sähköisen liikenteen latauskäytössä voitaisiin pääsääntöisesti hyödyntää pienempääkin kaapelin poikkipinta-alaa, mikäli samalla hyödynnetään dynaamista kuormanhallintaa.
  - Ainakin tässä tapauksessa ohuemman kaapelin ja DCR-järjestelmän käyttö paksumman kaapelin sijaan olisi kustannustehokas ratkaisu.
  - Ohuempien kaapeleiden käyttö toisi säästöjä myös tarvittavan kuparin määrässä ja vähentäisi siten ilmastopäästöjä varsinkin globaalisti tarkasteluna.
- Dynaamista kuormanhallintaa voisi käyttää kapasiteetin optimaalisempaan hyödyntämiseen muissakin kohteissa, joissa kuormitus vaihtelee merkittävästi.
  - Pistemäinen mitaus ongelmakohdissa voi olla hyvinkin kustannustehokas ratkaisu kapasiteetin lisäämiseen, mikäli vaihtoehtona on kapasiteetin kasvattaminen esimerkiksi uudelleen kaapelioimalla.
  - Täysin uusissa asennuksissa myös esimerkiksi optisilla kuiduilla toteutettu mitaus koko reitille voi olla järkevä vaihtoehto varsinkin, jos olosuhteista ei ole etukäteen varmaa tietoa.
  - Esimerkiksi jakeluverkoissa kapasiteettitarve voi kasvaa yllättäen nopeammin kuin pystytään järkevästi ja kustannustehokkaasti reagoimaan esimerkiksi verkkovahvistusinvestoinnein. Tällöin jälkiasenteinen pistemäinen mitaus ongelmakohdissa voisi toimia nopeasti toteutettavana ratkaisuna joko väliaikaisesti tai jopa pysyvästi, mikäli muuta tarvetta verkkoinvestoinnille ei ole.

## Haasteita

- Mittausten toteutustapaan liittyy epävarmuuksia.
  - Pistemäisillä mittauksilla haasteena on tunnistaa rajoittavimmat ongelmakohdat eli hot spotit ja varmistaa, että mitaus tapahtuu niistä.
  - Mittausjärjestelmästä aiheutuu myös kustannuksia, joiden suuruus riippuu mm. mittausten toteutustavasta.
    - Tässä tapauksessa ohuemman ja paksumman kaapelivaihtoehdon kustannusero oli n. 8300 € ja mittausjärjestelyn kustannukset olivat n. 4000 €, joten dynaaminen kuormanhallintaratkaisu olisi merkittävästi edullisempi.
    - Lisähyötynä paksummalla kaapelilla myös häviöt ovat pienempiä, mutta tässä tapauksessa laskentojen perusteella pienemmät häviökustannukset eivät riitä kompensoimaan ohuemman kaapelin halvempia investointikustannuksia edes yhdessä mittausjärjestelmän kustannusten kanssa.
- Todellisessa käytössä reaaliaikaiseen mittaukseen perustuvaan mitoitukseen liittyy vaatimuksia tiedonsiirron ja datan hallinnan osalta.
  - Mittauksia on oltava riittävän usein, jotta ongelmatilanteet havaitaan ajoissa. Mittausdataa tulee siis runsaasti ja mitauskohteiden lisääntyessä määrä kasvaa moninkertaisesti.
  - Tiedonsiirron on oltava riittävän nopeaa ja varmaa. Esimerkiksi useiden tuntien viiveet eivät ole sopivia, vaan tiedonsiirron on oltava lähes reaaliaikaista, jotta ongelmatilanteisiin pystytään reagoimaan.
  - Mittausdataa voi tulla useista lähteistä, mm. lämpötilamittausantureista ja latauslaitetoimittajan taustajärjestelmästä. Todellista käyttöä varten datalähteiden tulisi mahdollistaa järjestelmien väliset lähes reaaliaikaiset integraatiot.
- Dynaaminen kuormanhallinta ei ole kaikkiin tapauksiin soveltuva ratkaisu eli vikatilanteiden kestoisuus tai muut tekijät kuten jännitehäviöt voivat edelleen ohjata käyttämään paksumpia kaapeleita. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin vain kaapeleiden termistä kuormitettavuutta jatkuvassa tilassa.

# Kiitos!



[teemu.saareks@helen.fi](mailto:teemu.saareks@helen.fi)



+358 50 501 2514



<http://www.helen.fi>



[joona.ehrnrooth@rejlers.fi](mailto:joona.ehrnrooth@rejlers.fi)



+358 50 463 5855



[www.rejlers.fi](http://www.rejlers.fi)