

DC-kaapeleiden kuormitettavuustutkimus

KAAPELEIDEN DYNAAMINEN KUORMITETTAVUUS

Energia-alan tutkimusseminaari 28.1.2025

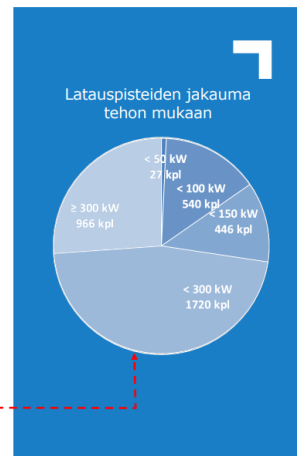
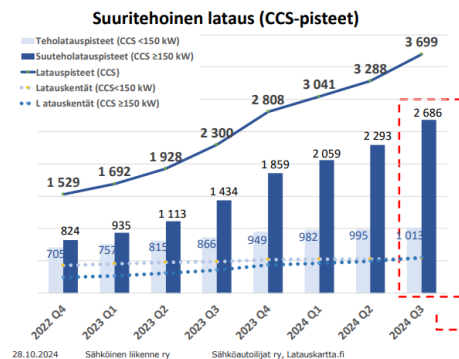
Joona Ehrnrooth, Teemu Saareks & Tommi Siintoharju



Tutkimuksen tausta

- Suurteholatauksen tarve kasvaa Suomessa ja globaalisti
 - Odotusarvona on, että ajoneuvojen lataustehot tulevat kasvamaan nykyisestä, mikä tarkoittaa käyttäjiltä myös odotuksia korkeammille lataustehoille latausasemilta.

Q3/2024 - Sähköisen liikenteen tilannekatsaus
Teho- ja suurteholatausverkosto



- Kaapeleiden koko kapasiteetti käyttöön
 - SFS-standardi 6000-5-52 tarjoaa ohjeistuksia kaapeleiden mitoittamiseen mm. kuormitettavuuden näkökulmasta. Mitoitusohjeet ovat kuitenkin melko konservatiivisia vaikkakin erilaisilla korjauskertoimilla esimerkiksi ympäristön lämpötilan ja maaperän lämmönjohtavuuden vaikutus voidaan ottaa jossain määrin huomioon.
 - Todellisuudessa tehollataus kentällä kuormitus vaihtelee merkittävästi. Tyypillisesti lataustapahtumien aikana kuormitusvirrat ovat hetkellisesti suuria, minkä jälkeen kaapeli pääsee jäähtymään.
 - Todellisen dynaamisen kuormitettavuuden selvittäminen mittaamalla mahdollistaisi nykyisten jo maahan asennetuista kaapelien, sekä tulevaisuudessa asennettavista kaapelien kapasiteetin optimaalisemman hyödyntämisen. Tekniikan hyödyntäminen voisi antaa mahdollisuuksia nostaa latauspisteeltä tarjottavaa lataustehoa turvallisesti.

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 Sähkötutkimuspooli, Helen ja Rejlers Finland.
- Projektin kesto 4-12/2024
 - Mittaukset tuotantokäytössä 30.5.2024 alkane
- 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.

REJLERS



Rejlersin pääasiallinen vastuu hankkeessa oli...

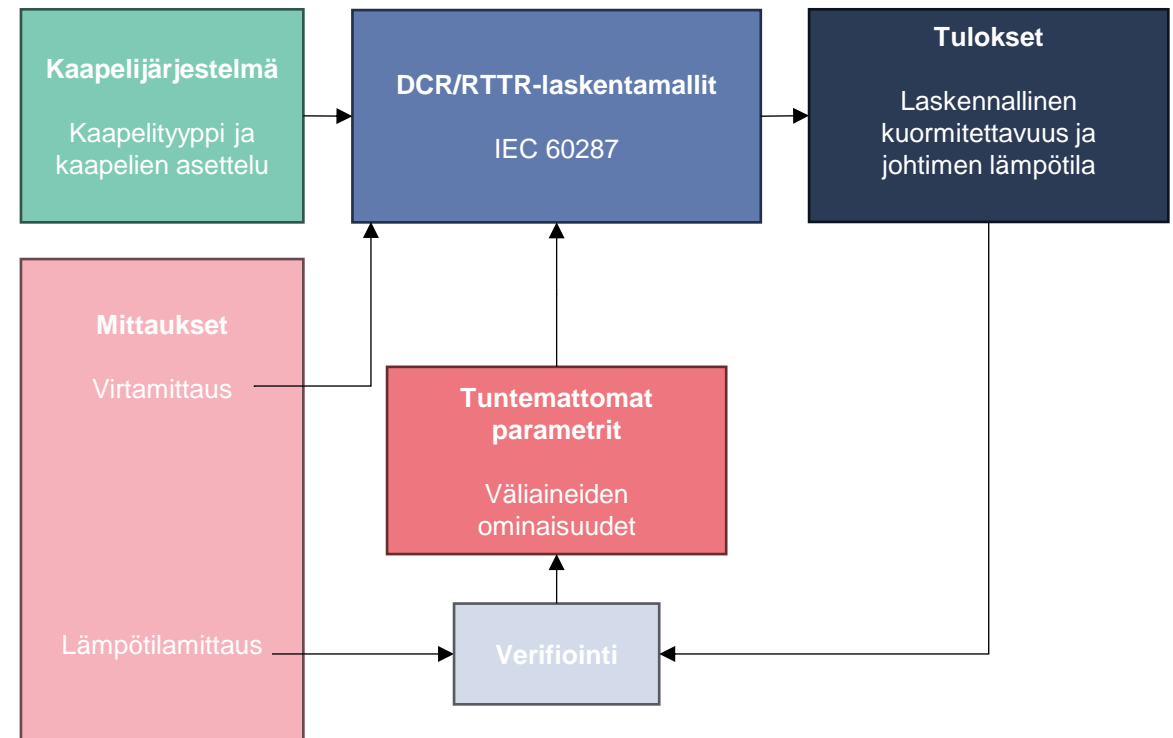
- rakentaa ja asentaa lämpötilamittausjärjestelmä
- yhdistää ja analysoida mittausdataa
- huolehtia projektin sujuvasta etenemisestä
- dokumentoida ja visualisoida karttunutta tietoa

Helenin pääasiallinen vastuu hankkeessa oli...

- mahdollistaa latauskentän käyttö hankkeessa
- toimittaa tietoja taustajärjestelmästä
- järjestää tarvittaessa käyttäjiä kuormitustestauksiin
- antaa näkemystä latauspalvelutuottajan näkökulmasta

Teknologian kuvaus

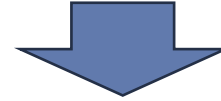
- DCR = dynamic cable rating, usein käytetty myös termiä RTTR = real-time thermal rating
- DCR-järjestelmät määrittävät kaapelin reaaliaikaisen kapasiteetin kaapelin lämpöominaisuuksien ja ympäristön lämpötilojen reaaliaikaisen mittauksen, piirin kuormituksen ja kaapelin lämpömallin perusteella.
- DCR-järjestelmä 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.



Laskentamalli

- Käytetty DCR-laskentamalli perustuu standardiin IEC 60287, ja sillä mallinetaan 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 laskentakaavaan 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 λ_1 - λ_4 ja dielektristen häviöiden aiheuttama lämpötilan muutos $\Delta\theta_a$ ovat nollia.

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



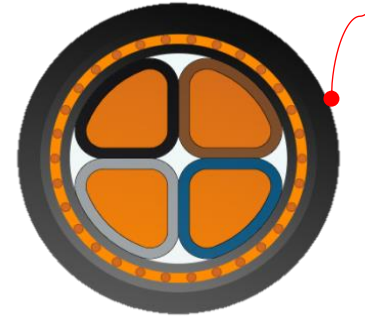
Johtimen sallittu
maksimikuormitettavuus

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



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)

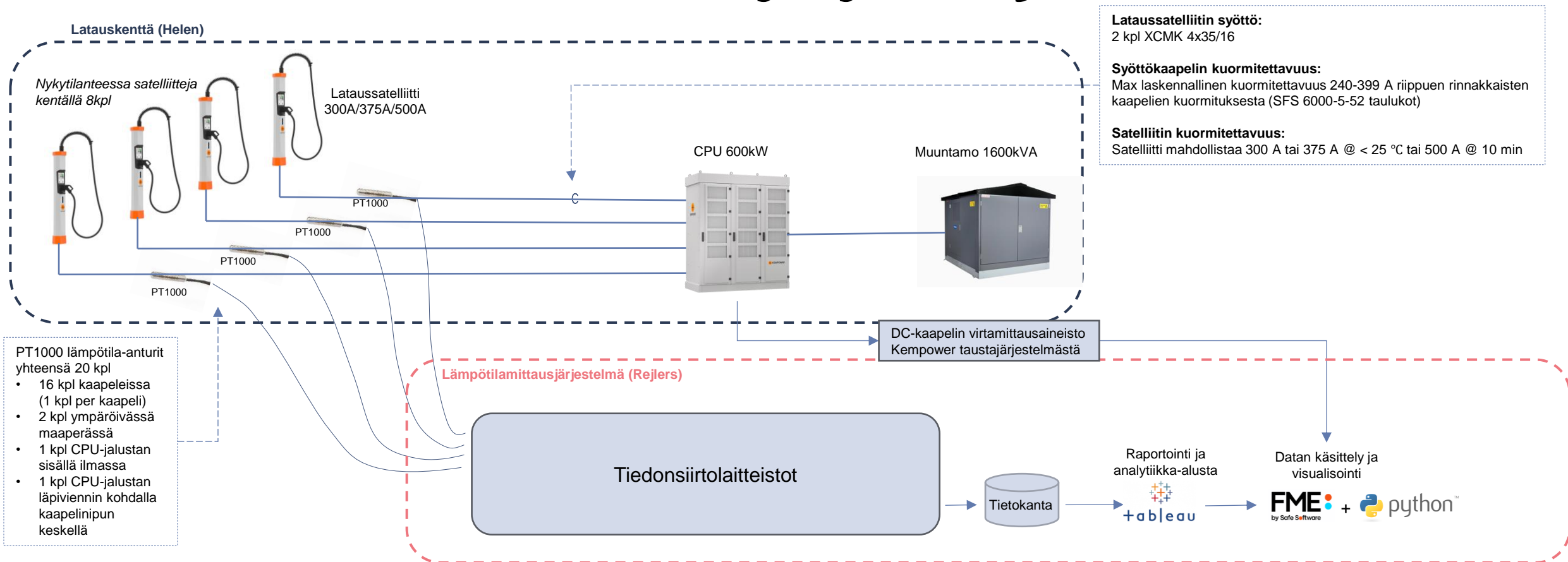
θ_a = ympäristön lämpötila (kaapelin ulkopinnan mitattu lämpötila)

$R_c = R_{c20}(1 + \alpha_c(\theta_c - 20))$ = johtimen resistanssi per m (kupari 35mm²)

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

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

Periaatekuva mittausjärjestelyistä

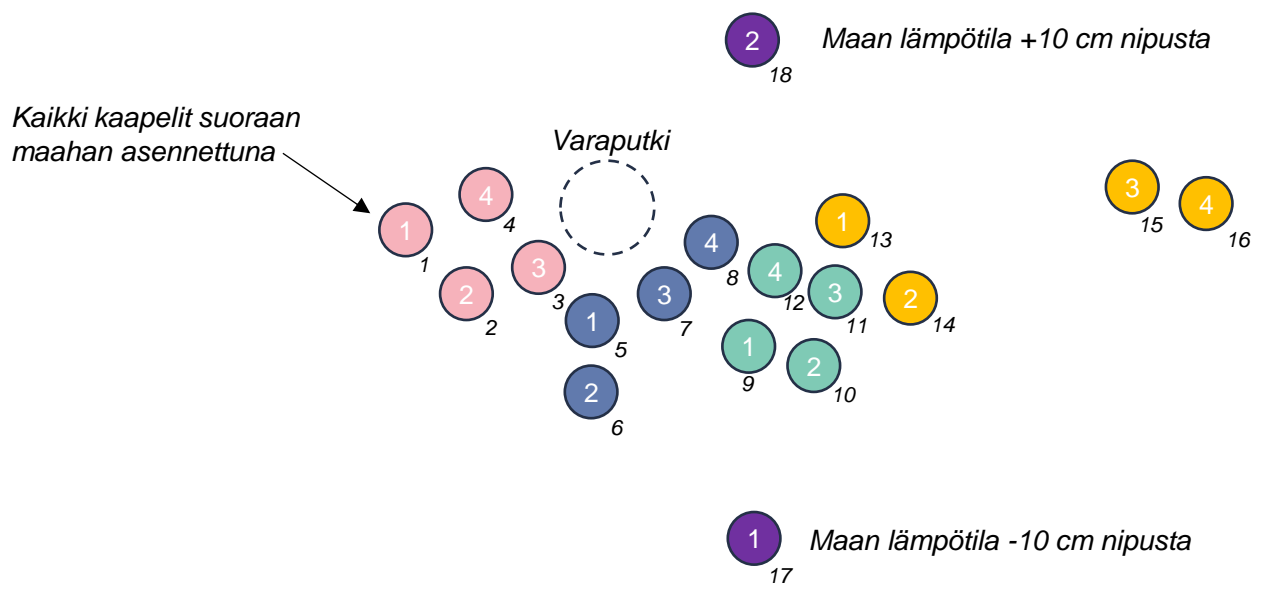


DC-KAAPELEIDEN KUORMITETTAVUUSTUTKIMUS

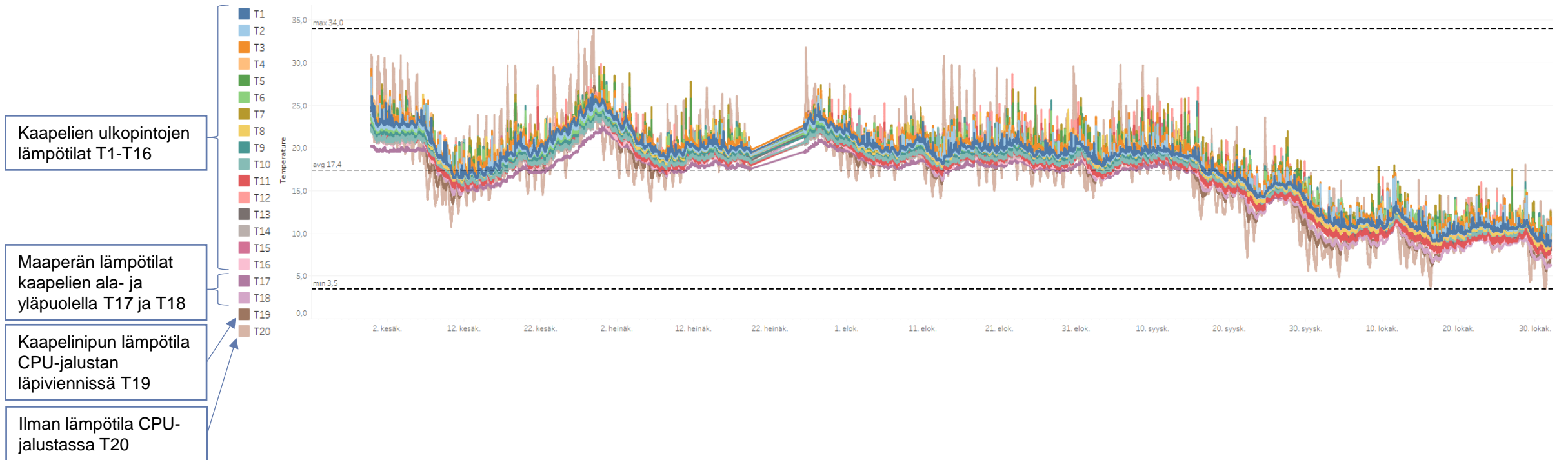


Poikkileikkaus:

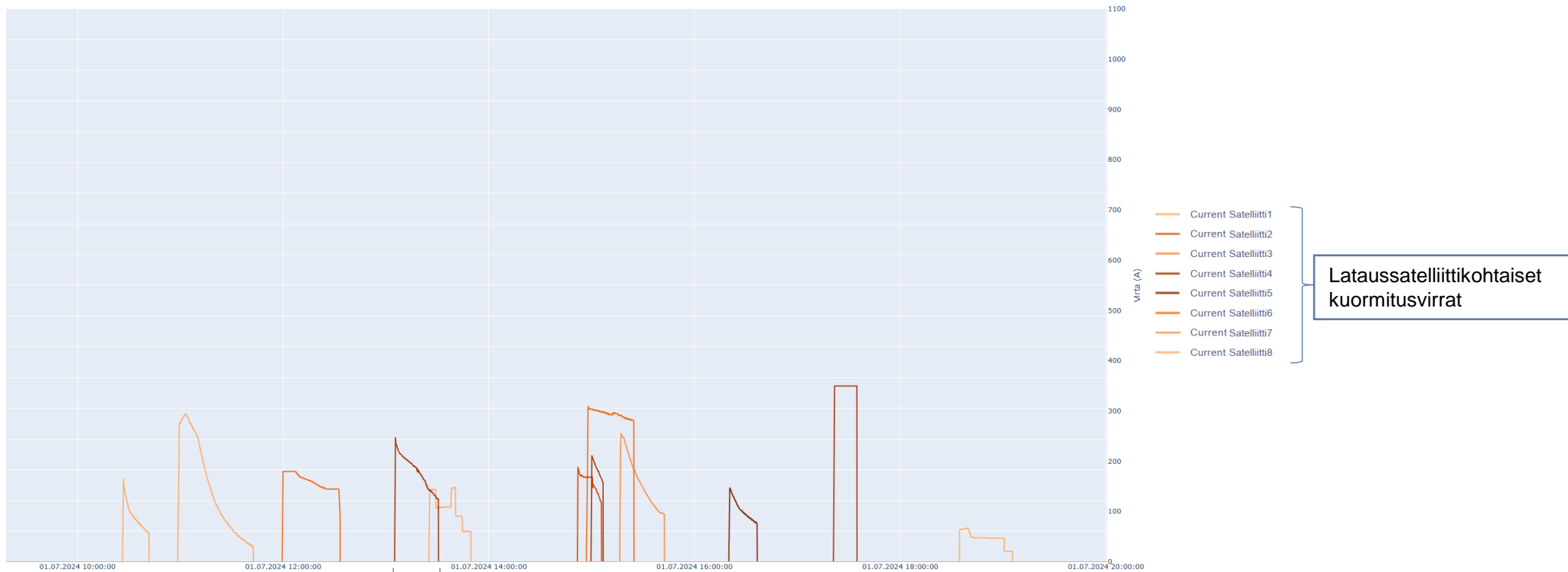
<- pysäköintipaikat Maan pinta Nurmikko/viheralue ->



Lämpötilamittaukset



DC-virtamittaukset



Esimerkki yksittäisestä lataustapahtumasta yksittäisellä lataussatelliitilla

Kuormitettavuuden laskenta

- Mitatun aikasarjadataan lisäksi tarkastelussa käytettiin myös laskennallista aikasarjadataa dynaamisesta kuormitettavuudesta, joka muodostettiin mitatun datan, vakioparametrien ja laskentamallin avulla.
- Vakioparametreja olivat käytetyn kaapelin XCMK 4x35/16 rakenteeseen liittyvät suureet:
 - kaapelin materiaaleihin liittyvät suureet R_{c20} , α_c , ρ_i ja ρ_j sekä
 - kaapelin geometriaan liittyvät suureet G_1 , D_j ja t_3 .

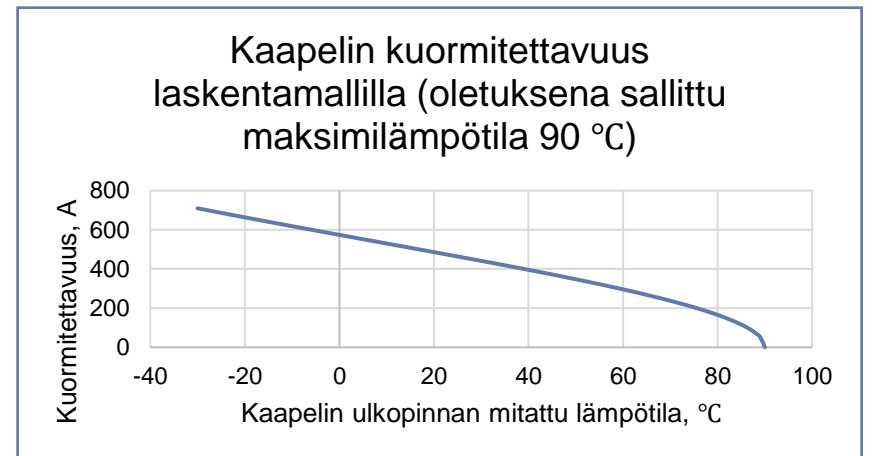
Dynaaminen
kuormitettavuus (A)

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

I_c = kaapelin sallittu kuormitettavuus tai mitattu kuormitusvirta
 $\theta_{c(\max)}$ = johtimen lämpötilä (sallittu max. 90 °C)
 θ_a = ympäristön lämpötilä (kaapelin ulkopinnan mitattu lämpötilä)
 R_c = $R_{c20}(1 + \alpha_c(\theta_c - 20))$
 = johtimen resistanssi per m (kupari 35mm²)
 $T_1 = \frac{\rho_i}{2\pi} G_1$ = johdin-vaippa lämpöresistanssi
 $T_3 = \frac{\rho_j}{2\pi} \ln\left(\frac{D_j}{D_j - 2t_3}\right)$ = ulkovaipan lämpöresistanssi

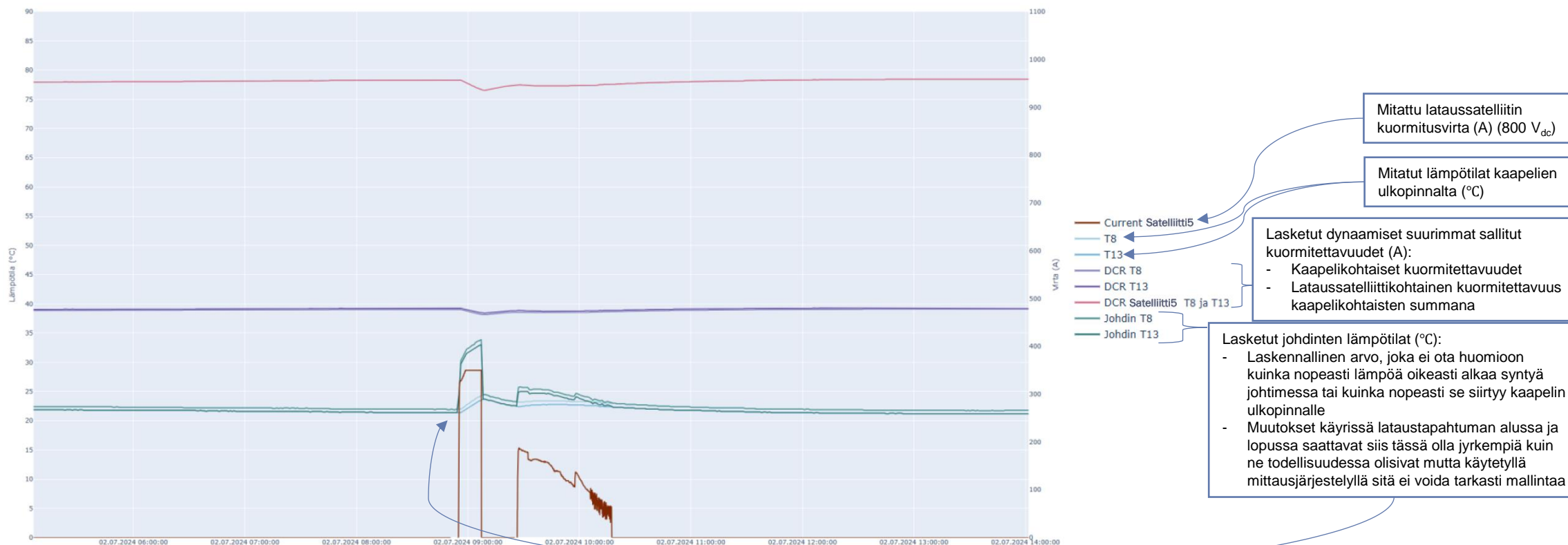
Johtimen
laskennallinen
lämpötilä (°C)

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

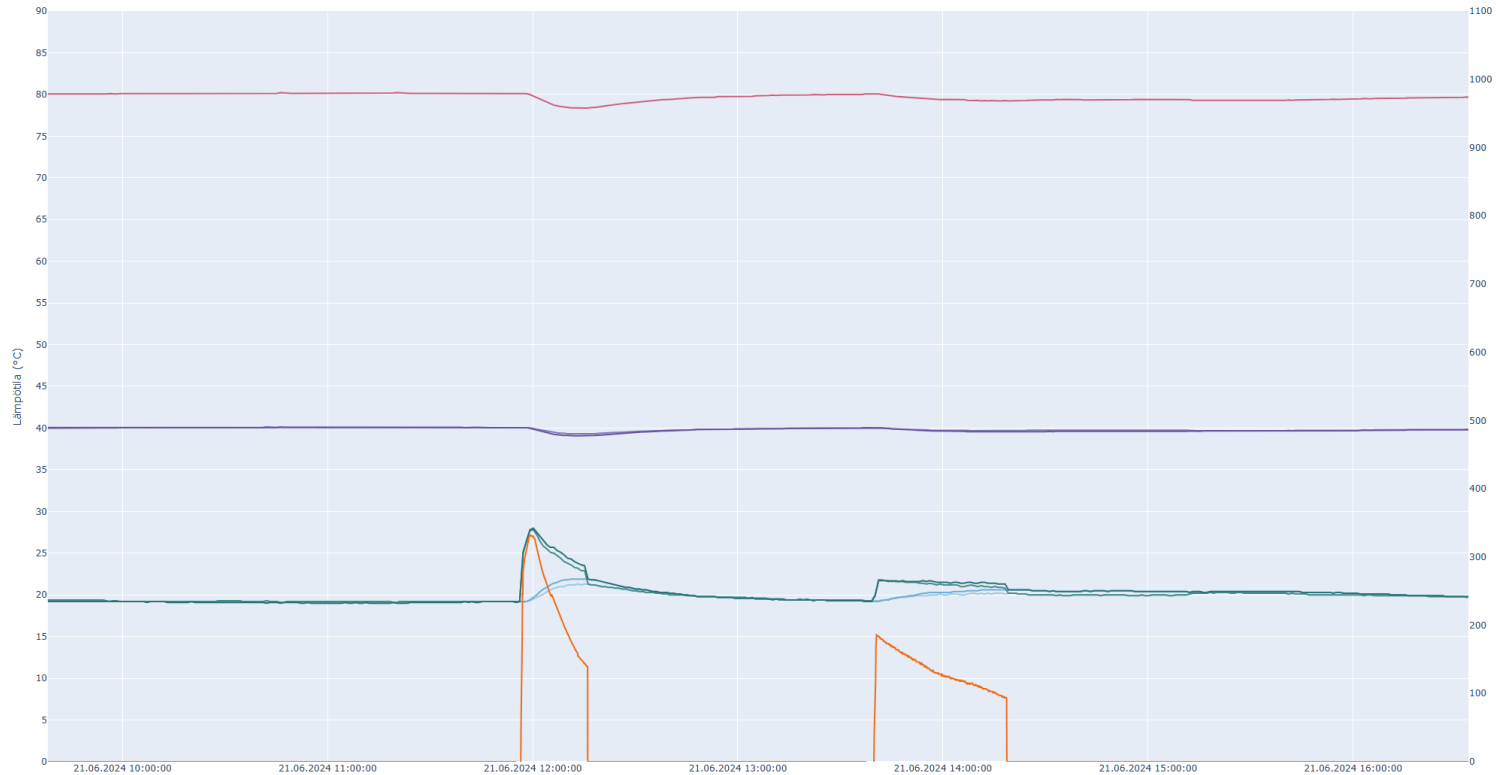


Tulosten visualisointi

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.



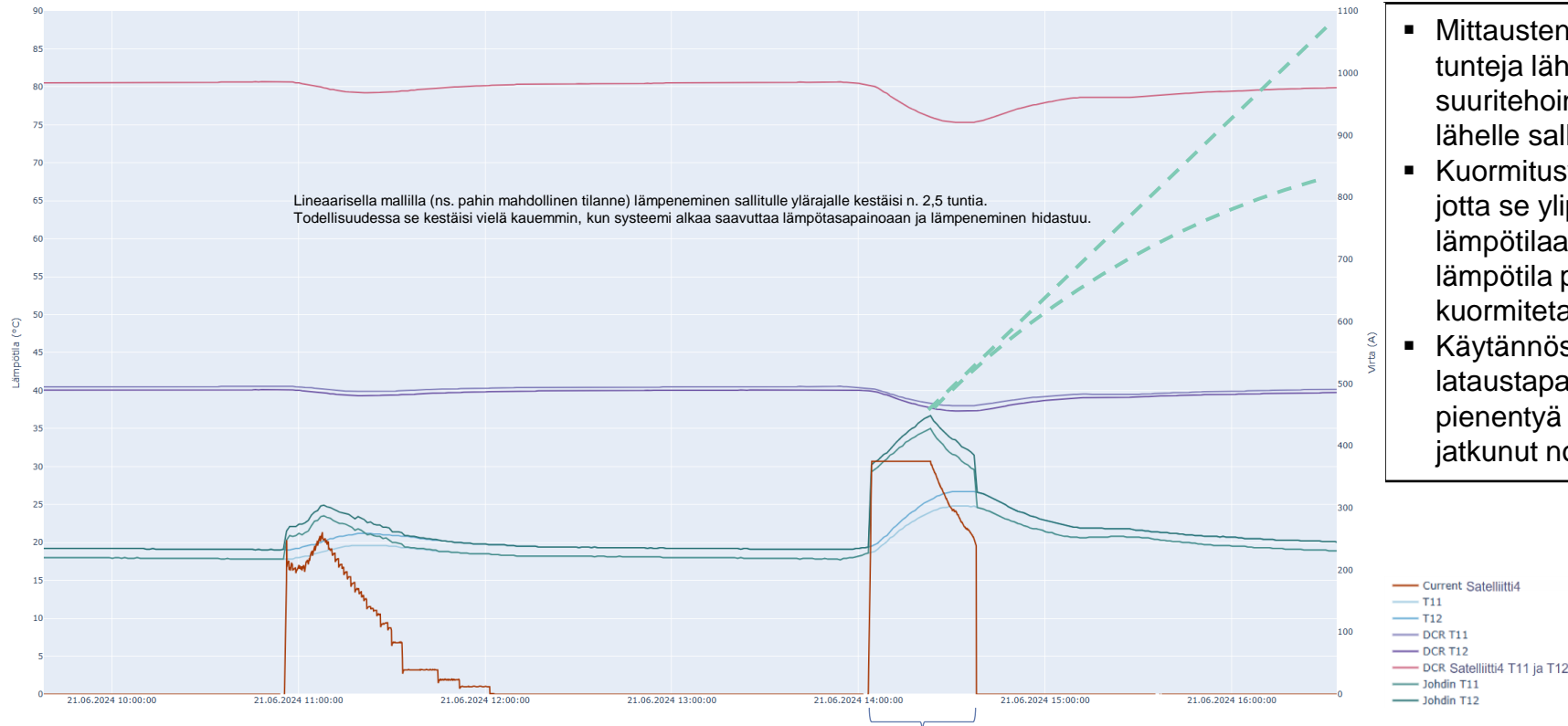
Kuormitusvirta lämmittää kaapelia melko hitaasti



- 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.

— Current Satelliitti6
— T5
— T7
— DCR T5
— DCR T7
— DCR Satelliitti6 T5 ja T7
— Johdin T5
— Johdin T7

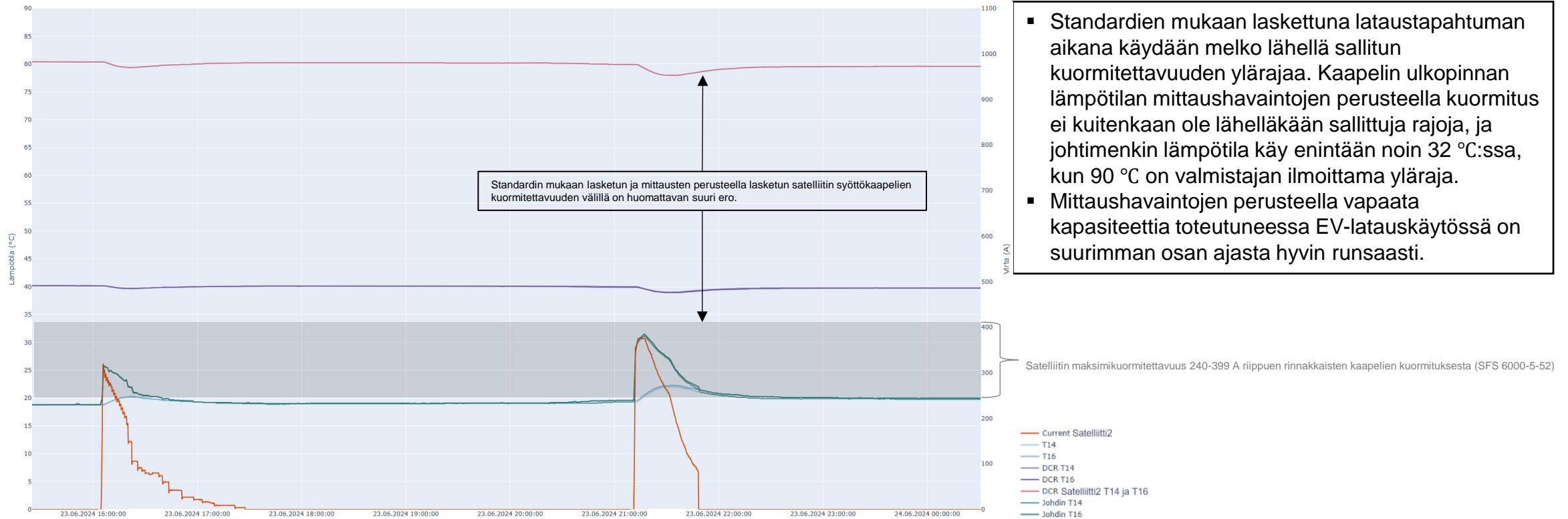
Ylikuormitus edellyttäisi pitkäaikaista ja keskeytymätöntä suuritehoista latausta



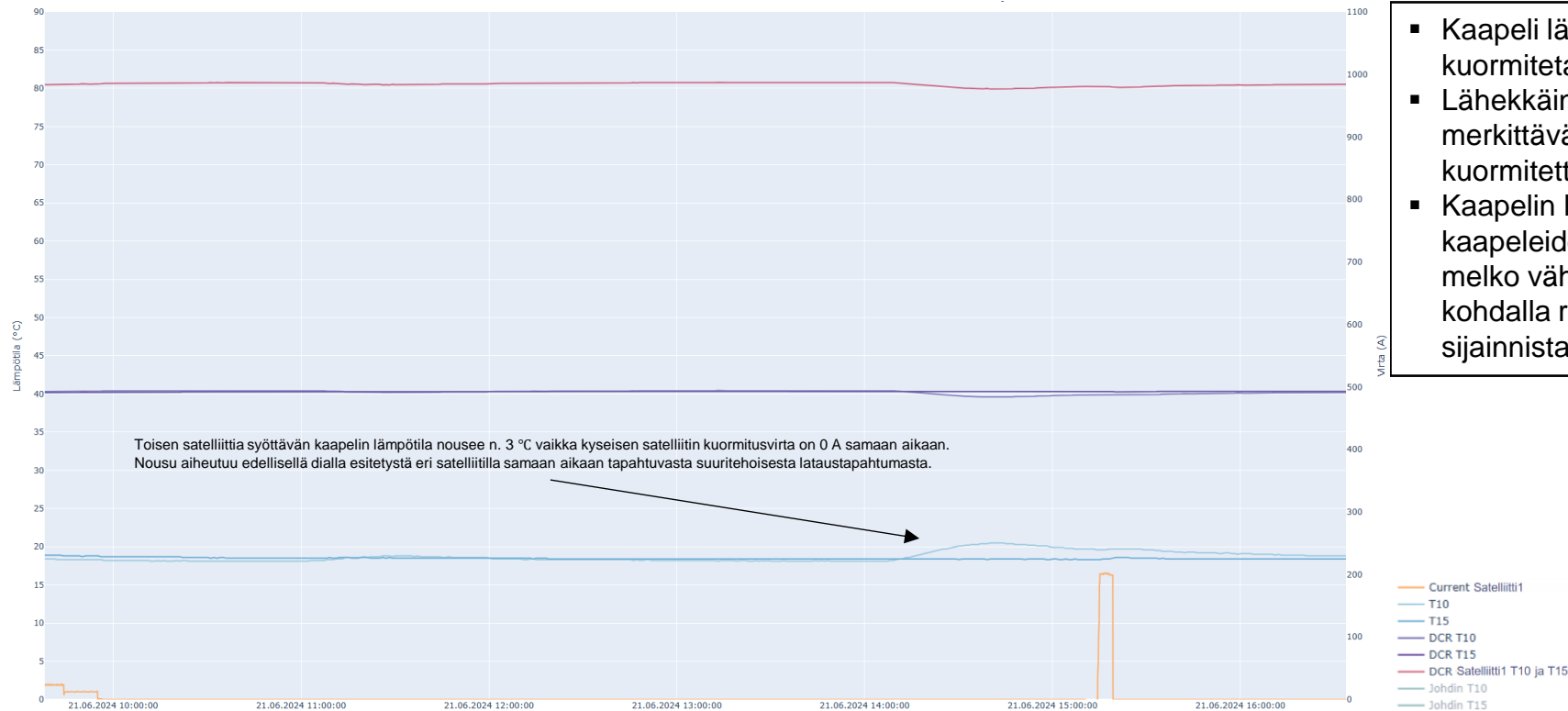
- Mittausten ja laskentamallin perusteella vain useita tunteja lähes keskeytymättömästi jatkuva suuritehoinen lataus saisi kaapelit lämpiämään lähelle sallittuja ylärajoja.
- Kuormitusvirran tulee olla vähintään 200-300 A, jotta se ylipäättään kasvattaa kaapelin ulkopinnan lämpötilaa. Virran ollessa 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.

Vapaata kapasiteettia runsaasti



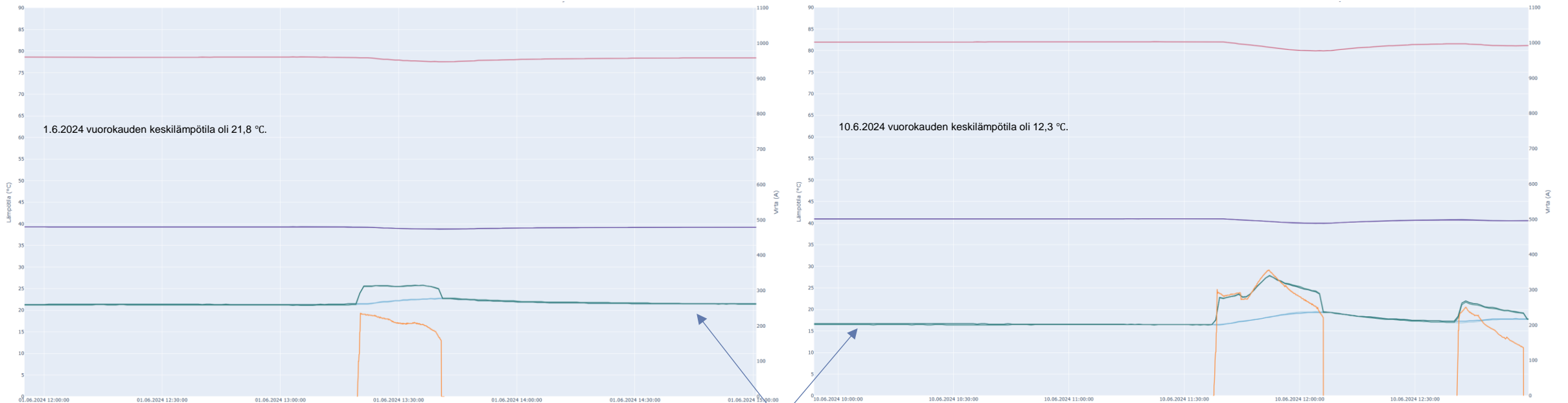
Lähellä olevien muiden kaapelien kuormitus lämmittää kaapelia



- 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.

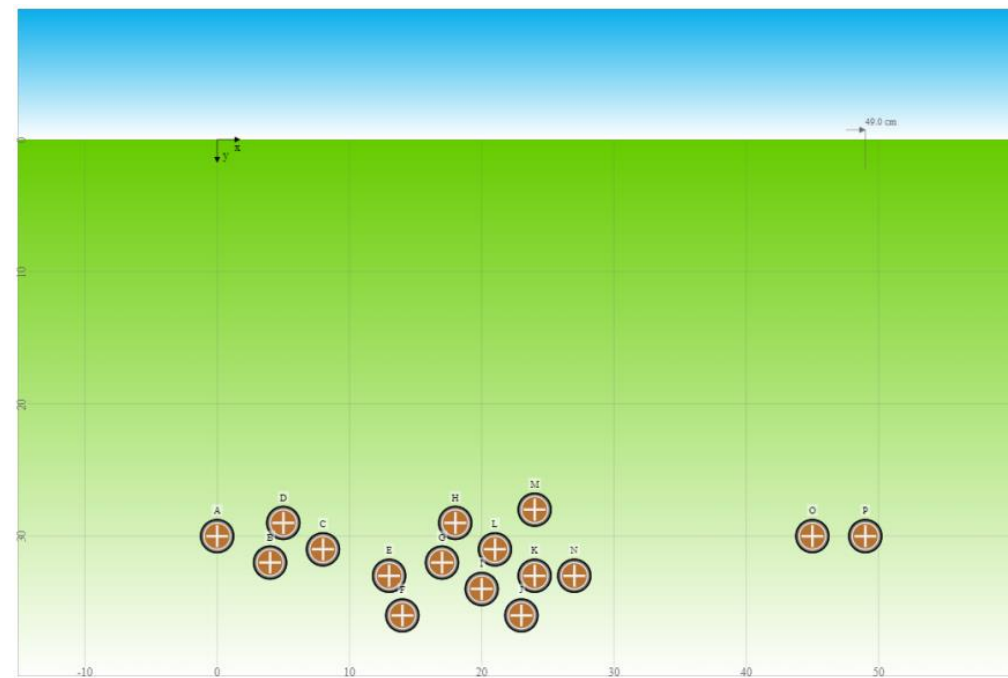


Vasemmassa kuvassa ilman lämpötila on n. 9 °C korkeampi kuin oikeassa, jolloin kaapelin ulkopinnalta mitattu lämpötila on n. 5-6 °C korkeampi ilman kuormitusvirtojen vaikutusta.

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.
- Simulointitulokset ja mittaushavainnot osoittavat kuitenkin pääpiirteissään samankaltaisia tuloksia.

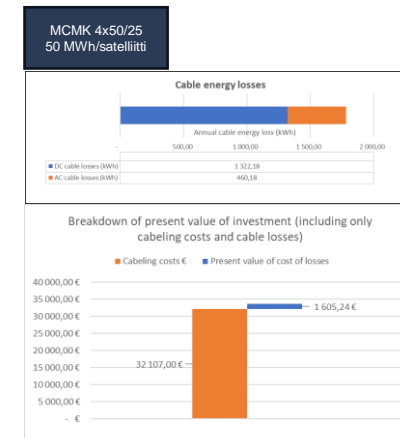
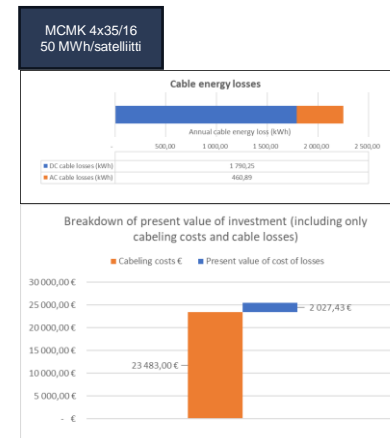
System	Object	Kuormitusvirta	Johtimen lämpötila Ulkopinnan lämpötila	Losses [W/m]
		Current [A] I_c	Temp. [°C] θ_c θ_e	
System A	XCMK 4x35/16	133.4	90.0 83.8	36.0
System B	XCMK 4x35/16	83.5	90.0 87.6	14.1
System C	XCMK 4x35/16	77.4	90.0 87.9	12.1
System D	XCMK 4x35/16	97.2	90.0 86.7	19.1
System E	XCMK 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



Huomioita tutkimuksesta

- Havaintojen perusteella SFS 6000 –standardin mukaan mitoitettujen kaapelien lämpötila ei tyypillisessä sähköisen liikenteen latauskäytössä käy lähelläkään valmistajan ilmoittamia sallittuja ylärajoja eli vapaata kapasiteettia on runsaasti.
 - Teoreettisia ääriolosuhteita ei kuitenkaan päästy mittauksilla tutkimaan, mutta sellaisia ei myöskään havaintojen perusteella mittauskohteelle tyypillisellä todellisella käytöllä voida saavuttaa.
- Dynaamisella kuormanhallinnalla voidaan optimoida kaapelin kapasiteetin käyttöä, kun kaapelin termien kuormitettavuus on rajoittava tekijä.
 - Tässä tutkimuksessa ei tarkasteltu tarkemmin esimerkiksi vikatilanteita tai muita tekijöitä, jotka voivat myös vaikuttaa mitoitukseen.
- Muita kannattavia sovelluskohteita lämpötilamittauksiin perustuvalla kaapelien dynaamiselle kuormitettavuudelle voisi löytyä esimerkiksi sähköjakeluverkon kohteista, joissa kuormitus vaihtelee voimakkaasti ja/tai tarvetta kapasiteetin kasvattamiselle ilmenee nopeammin kuin verkkoinvestoinneilla pystytään reagoimaan.

- Kumpikaan lämpötilamittausten toteutustapa ei ole täysin ongelmaton.
 - Tässä tutkimuksessa käytetyillä pistemäisillä mittauksilla haasteena on tunnistaa rajoittavimmat ongelmakohdat eli hot spotit ja varmistaa, että mittaus tapahtuu niistä.
 - DTS-tekniikalla esim. koko kaapelireitille optisella kuidulla toteutettu mittaus puolestaan voi olla huomattavasti kalliimpi varsinkin jälkiasennuksena.
 - Mittausjärjestelmästä aiheutuu aina kustannuksia ja paksumpien kaapelin lisähyötynä on mm. pienemmät häviöt, mutta ainakin tässä esimerkkikohteessa mittausjärjestelmä olisi silti kustannustehokkaampi vaihtoehto.



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
 - CO₂-päästöt (kupari) 142 kgCO₂e
- Globaalisti vuonna 2035 IEA latauspistemääräennusteilla
 - Kuparin määrä 247 300 t
 - CO₂-päästöt (kupari) 3,0 milj. kgCO₂e

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
 - CO₂-päästöt (kupari) 100 kgCO₂e
- Globaalisti vuonna 2035 IEA latauspistemääräennusteilla
 - Kuparin määrä 173 100 t (-30%)
 - CO₂-päästöt (kupari) 2,1 milj. kgCO₂e (-30 %)

Kiitos!



teemu.saareks@helen.fi



+358 50 501 2514



<http://www.helen.fi>



joona.ehrnrooth@rejlers.fi,
tommi.siintoharju@rejlers.fi



+358 50 463 5855



www.rejlers.fi