



Jerry de Carvalho

Pikaraitiotiepysäkkien sähkötekni- set suojausmenetelmät

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

16.12.2022

Tiivistelmä

Tekijä: Jerry de Carvalho
Otsikko: Pikaraitiotiepysäkkien sähkötekniset suojausmenetelmät
Sivumäärä: 50 sivua + 8 liitettä
Aika: 16.12.2022

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine: Automaatiotekniikka
Ohjaajat: Projektipäällikkö Jore Aitamurto
Lehtori Kristian Junno

Tässä insinööriyössä esiteltiin Raide-Jokerin projektin pikaraitiotiepysäkkien sisältämää kokonaisvaltaista sähkösuojaustekniikkaa. Insinööriyön tutkimuksen kohteena oli selvittää, kuinka pikaraitiotielinjan pysäkeillä on varmennuttu matkustajien, eläinten ja omaisuuden turvallisuudesta sähköisiä vaaratekijöitä vastaan. Tutkimuksessa syvennytään maadoituksen käytännöllisiin ratkaisuihin, joilla tuodaan ilmi turvallisuuden toiminnallisuutta.

Insinööriyön alussa esitellään Raide-Jokerin projektia, projektin allianssimallia sekä NRC Group Finland- yritystä, joille insinööriyö on yhteisesti toteutettu. Insinööriyön keskivaiheesta loppuun paneudutaan pikaraitiotiepysäkkien sähköisten uhkatekijöiden selvittämiseen ja maadoitusjärjestelmän toimintaperiaatteisiin sekä niiden käytännöllisiin toteutustapoihin.

Insinööriyössä syvennyttiin maadoituksien tarpeellisuuteen pikaraitioteiden suojauksessa ja tuotiin ilmi automaattisen poiskytkennän menetelmät, joilla matkustajien henkisuojaus on toteutettu standardien mukaisesti. Insinööriyössä todistettiin, kuinka Raide-Jokerin pikaraitiotielinjalla tavanomaisten sähköriskitekijöiden lisäksi suojaudutaan esimerkiksi ukkos-, ja hajavirtailmiön haitallisilta vaikutuksilta.

Avainsanat: pikaraitiotie, raitiotiemaadoitus, hajavirrat

Abstract

Author: Jerry de Carvalho
Title: Electrical Safety Methods of Light Rail Stops
Number of Pages: 50 pages + 8 appendices
Date: 16th of December 2022

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Electrical and automation engineering
Professional Major: Automation engineering
Supervisors: Jore Aitamurto, Project Manager
Kristian Junno, Lecturer

The aim of this thesis is to display the electric safety solutions of the light railway passenger stops at the Jokeri Light Rail project. The research was conducted for NRC Group and partners to disclose the electrotechnical solutions following the SFS-EN 50122 and other standards needed to provide an explanation to how passengers, animals and property are protected from electric shocks and unwanted touch voltages or other hazardous events at light rail stops.

The thesis consists of an introduction to the Jokeri Light Rail project that is followed by a brief risk analysis on what are the common electrical risk at light rail stops to underline the frames of the research. Furthermore, the thesis catalogues different safety devices used to prevent hazardous electrical dangers and explains their electromechanical aptitude in the light rail domain. Finally, the thesis targets to show the usefulness of the light rails independent grounding network that works to prevent faulty hazards in light rail stops.

This thesis was conducted via research within available and private documents. Additionally, since the limitation to the amount of necessary study material some of the information was required from professional interviews conducted during this thesis work. Also, the appropriate electrical measurements were made and displayed to prove the claims in this thesis.

The thesis concluded that by preventing the hazardous unwanted contact voltages with the appropriate voltage limiting and circuit breaking devices, and with the sufficient limitation of stray currents, and the effective separation of the tramway and main grounding systems, the light rail stops at Jokeri Light Rail can be handed over to the customer with sufficient safety requirements.

Keywords: Light Rail, Grounding, Earthing

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Raide-Jokeri	1
1.2	Allianssimalli	4
1.3	Sähkö- ja tekniset järjestelmät	6
1.4	NRC Group	7
2	Pikaraitiotiepysäkkien sähköturvallisuuden lähtökohdat	8
2.1	Sähköturvallisuuden standardit	8
2.2	Pikaraitiotiepysäkkien aluerajaus	10
2.3	Pysäkin yleinen turvallisuus	11
2.4	Ajolangan putoaminen	12
2.5	Raitiotielinjan vaaraulottuma eli VATU	14
2.6	Turvaetäisyys ajolangasta	17
2.7	Raitiotien maadoitusjärjestelmä	18
3	Pikaraitiotiepysäkkien sähköiset suojausmenetelmät	19
3.1	Pysäkkikeskukset	19
3.1.1	Pysäkkien maadoituselektrodit	22
3.1.2	Pysäkkikeskuksen sähkölaitteiden suojaus	27
3.1.3	Suojalaitteet	29
3.1.4	Sähkölaitteiden käyttöönottomittaukset	32
3.2	Kosketusjännitteeltä suojaus (VLD)	33
3.2.1	Paluuvirtapiiri ja hajavirrat	37
3.2.2	Askeljännitteiden syntyminen	39
3.3	Ukkossuojaus	41
4	Pohdintaa	44
5	Yhteenveto	45
	Lähteet	47
	Liitteet	
	Liite 1. Pysäkkien maadoitus periaatekaavio	
	Liite 2. Raitiotien maadoitusperiaate	
	Liite 3. Kiskoyhdistykset periaatekuva	

Liite 4. Pysäkkikeskuksen maadoitusperiaate, kun pysäkkikeskus on pysäkki- tai VATU-alueen ulkopuolella

Liite 5. Pysäkkikeskuksen maadoitusperiaate, kun pysäkkikeskus on pysäkki- tai VATU-alueella

Liite 6. ABB:n DS203NC: 3P+N RCBOs in 4 modules vikavirtasuojalaitteiden tyyppien laukaisurajat.

Liite 7. Pikaraitiotiepysäkin maadoitusten hahmotus kuva

Liite 8. Pysäkkikeskuksen pääpiirikaavio

Lyhenteet

EB	<i>Earthing Bridge</i> . Maadoituskisko, jota käytetään potentiaalintasaukseen.
EMC	<i>Electromagnetic compatability</i> . Sähkömagneettinen yhteensopiavuus.
HKL	Helsingin Kaupungin Liikennelaitos.
K	Kelvin. SI-järjestelmän mukainen lämmön mittausyksikkö.
MEB	<i>Main Earthing Bridge</i> . Pääpotentiaalintasauskisko.
PEN	<i>Protective earth, neutral</i> . Yhdistetty maadoitus- ja nollajohdin.
Pysäkki	Pikaraitiotiepysäkki.
PK	Pysäkkikeskus. Pikaraitiotiepysäkin pääkeskus ja kaupunkisähköverkon alakeskus.
R-J	Raide-Jokeri.
RMJ	Raitiotiepysäkin maadoitusjärjestelmä. Maadoitusjärjestelmä, joka on galvaanisesti erotettu verkkoyhtiön sähköverkon maadoitusjärjestelmästä.
RSJ	Ratasähköjärjestelmä. Raitiotien oma sähköpiiri ajolangan ja paluuvirtakiskon välillä, jota syötetään sähkönsyöttöasemalta.
RSV	Raitiotiesähköverkko. Raitiotien sähköjärjestelmä, joka on galvaanisesti erotettu yleisen jakeluverkon sähköjärjestelmästä.
SAH	Sähkö- ja tekniset järjestelmät. Toimii Raide-Jokerin allianssimallin sähköjä ja teknisien järjestelmien toteuttavana osapuolena.

SH	Jännitteisen virroittimen vaikutusalueen ylin korkeus. VATU-alueen alakäsite.
SSA	Sähkönsyöttöasema.
VA	Volttiampeeria. Näennäisteho.
VATU	Ratajohdon vaaraulottuma ja alue, jonka sisäpuolelle ajojohdon osat voi rikkoutumisen hetkellä aiheuttaa sähköiskun vaaran.
VIVA	Virroittimen vaara-alue, joka sisältää virroittimen dynaamiset liikkeet ja sähköturvallisuuden vaatimat suojaetäisyydet.
VDC	<i>Volts direct current</i> . Tasajännite.
VLD-F	<i>Voltage Limiting Device -Fault</i> . Jännitettä rajoittava suojalaite.
µs	Millisekuntia

1. Johdanto

Tämä insinööriyö on tehty Raide-Jokeri-allianssille NRC Group Finland Oy:n alaisuudessa. Insinööriyön ensimmäisessä osuudessa on esitelty rakennushanke ja sen eri osapuolet yhteisessä allianssissa. Työn toisessa kappaleessa on käsitelty pikaraitiotien turvallisuuden lähtökohdat ja sen maadoitusjärjestelmä, jonka näkökulmasta lähdettiin tarkastelemaan pikaraitiotiepysäkkien (pysäkki) turvallisuutta. Kolmas kappale syventyi pysäkin maadoitusjärjestelmään kytkettäviin sähköisiin suojalaitteisiin ja esitteli niiden toimintatavat pysäkkien matkustajien henkeä ja terveyttä sekä omaisuutta suojaavana menetelmänä.

Insinööriyöhön referoitiin turvallisuutta koskevia standardeja ja esiteltiin mitausmenetelmiä sekä esimerkkilaskelmia, joilla Raide-Jokerin (R-J) pikaraitiotiepysäkkien turvallisuutta on todennettu. Tämän insinööriyön tavoitteena oli selvittää, miksi pikaraitiotielle rakennettava maadoitusjärjestelmä on olennainen osa pysäkkiensuojaustoimintaa.

Insinööriyössä haastateltiin alan eri asiantuntijoita ja suunnittelijoita. Työn koamisessa hyödynnettiin julkisesti saatavilla olevia asiakirjoja ja standardeja sekä luvanvaraisesti esiteltiin hankkeen sisäisten materiaalien pohjalta perusteluja valituille suojausmenetelmille.

Insinööriyön kokonaisvaltainen tavoite oli tuoda esille, miten sähkölaitteille asennetut maadoitusjärjestelmät toimivat, ja luoda ohjeistus, jota R-J:n hankkeen osapuolet voivat hyödyntää tulevaisuuden pikaraitiotiehankeissa tai esimerkiksi uusien työntekijöiden koulutuksessa ja perehdytyksessä.

1.1 Raide-Jokeri

Suomessa kasvavien kaupunkien nopea kehitys ja populaation kasvu ovat luoneet tarpeen edistää vastuullista julkista liikennettä. Valtakunnallisella tasolla

trendikkääksi ratkaisuksi on noussut raitioliikenteen laajennus-, ja rakennushankkeet, ja siksi myös Helsingin kaupunki hyväksyi 19.3.2018 raitioliikenteen kehittämissuunnitelman, jonka tarkoituksena on parantaa ja laajentaa raitioliikennettä kantakaupunkialueella. Hankkeen tavoitteelliset lähtökohdat ovat parantaa kaupungin raitioliikenteen nopeutta, sujuvuutta, luotettavuutta ja häiriöttömyyttä. (1 s. 100.)

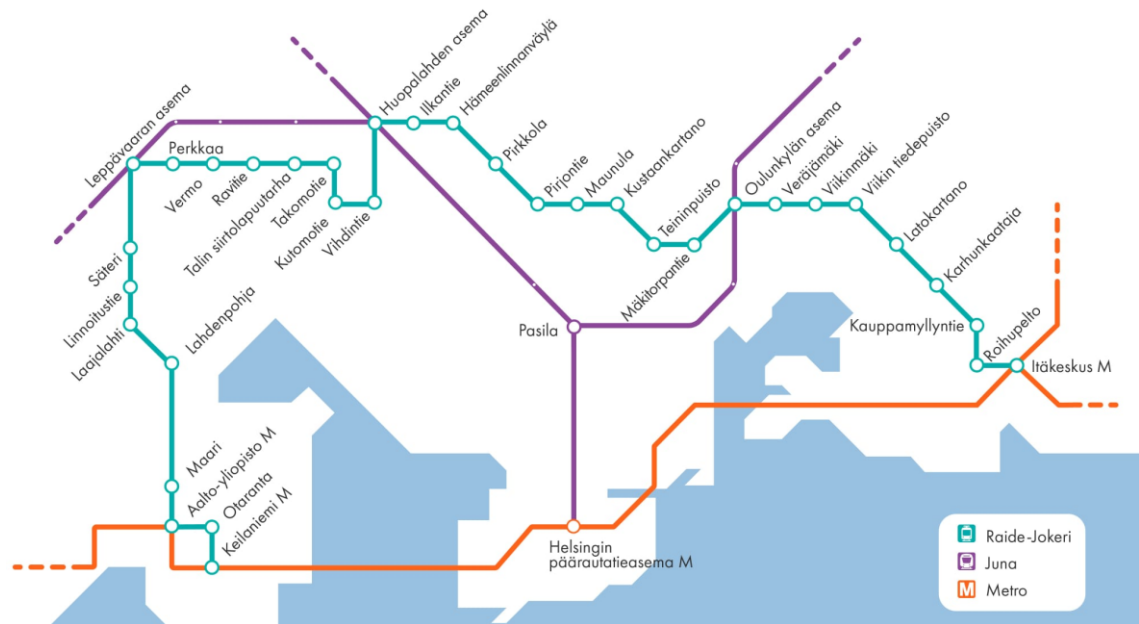
Kehitysohjelmaan kuuluu useita raitioliikenteen rakennus- ja korjaushankkeita, joista merkittävimmissä raitiovaunujen keskinopeutta kasvattavassa roolissa on Raide-Jokerin pikaraitiotien rakennushanke. Raide-Jokeri (R-J) alkoi jo kuitenkin ennen raitioliikenteen parannushanketta vuonna 2015. Helsingin kaupungin kehittämissuunnitelman R-J:lle rakentuva pikaraitiotielinja on harppaus kohti hankkeen tavoitteita, sillä raitiovaunun keskinopeudeksi on laskettu 25 km/h, kun kantakaupungin perinteiset raitiovaunut liikennöivät perusparannusten jälkeen vain alle 17 km/h:n keskinopeudella. (2, s. 100; 3, s. 5.)

Raide-Jokeri on itsessään historiallinen rakennushanke, sillä se on ensimmäinen raitiovaunulinja Espoon kaupungille. 25 km pituisen pikaraitiotien rakennusprojekti rakentuu Espoon Keilaniemen ja Helsingin Itäkeskuksen välille korvaamaan kaupunkien yhteistä runkolinjaa, jota on tähän asti liikennöity telibussilla 550. Nykyinen kaupunkien välistä poikittaisliikennettä liikennöivä telibussi ei kykene vastaamaan kasvavaan matkustajamäärää, jonka uskotaan olevan vuonna 2030 yli 90 000 matkustajaa arkipäivisin. Pääkaupunkiseudulle on enustettu vuoteen 2050 mennessä kahden miljoonan asukkaan ja yli miljoonan työpaikan kasvua. Rakentaminen tulee tiivistymään, mikä puolestaan korostaa julkisen liikenteen merkittävyyttä ja kestävästä joukkoliikenteen tarpeenmukaisuutta, kuten pyöräilyä, sähköpotkulautailua ja raitiovaunujen käyttöä. Raide-Jokerin linja tulee vahvistamaan pääkaupunkiseudun poikittaisliikennettä ja yhdistämään esikaupungin keskuksia. Verkostomaisuus luo hyviä solmukohtia, jotka vetovoimallaan houkuttelevat uutta liiketoimintaa alueelle. (2.)

Muutoksen myötä tähän asti operoitu telibussilinjan matkustajakapasiteetti tullaan kaksin- tai jopa kolminkertaistaman pikaraitiotielinjan liikennöinnin

alkaessa. Vaunut ovat tšekkiläisen valmistajan Skoda Transtechin Otanmäellä valmistamia Arctic XL-vaunuja, joihin mahtuu 214 matkustajaa kerralla. Vaunuja on tilattu 29 kappaletta, ja ne on suunniteltu raiteiden kiskopyörien väliltään sel-laisiksi, että niitä voidaan operoida myös muualla Helsingin raitiotieverkostossa. (2.)

Raide-Jokeria liikennöidään pääosin omalla kaistalla, joka on tyypillistä pikarai-tiotielle. Omalla kaistalla liikennöinti mahdollistaa linjan sujuvan ja häiritsemättö-män liikennöinnin. Muuta liikennettä risteävissä kohdissa pikaraitiotielle ohja-taan liikennevaloetus muuhun liikenteeseen nähden. Vaunun keskinopeus tu-lee olemaan 25 km/h, mutta paikoittain pikaraitiotievaunu voi kulkea jopa 70 km/h. Radan varrelle rakentuu 35 pysäkkiparia keskimäärin noin 780 m välein. Kantakaupungin perinteisiin raitiotiepysäkkien 300–500 m:n tavoitteellisiin py-säkkiväleihin verrattaessa pikaraitiotiepysäkkien välimatkat ovat suurempia. Raitioliikenteen kehittämissuunnitelmassa tavoitetta kuvailtiin 500–600 m:n pysäkki-väleillä. Pikaraitiotieliikenteen liikennöintiperiaatteena on, että jokaisella pikarai-tiotiepysäkillä olisi riittävä käyttäjämäärä perusteltavaa pysähtymistä varten. Vaunu tulee pysähtymään jokaisella pysäkillä. Kuvassa 1 on esitettyä Raide-Jokeri-linjan kartta. (1, s. 17; 2; 3, s. 32.)



Kuva 1. Raide-Jokeri-linjan kartta. Karttaan on osoitettu Espoon ja pääkaupunkiseudun tärkeimpiä solmukohtia ja Raide-Jokeri-linjalle rakentuvat pysäkit. (2.)

Itäkeskuksen päähän vanhan metrovarikon viereen valmistui myös uusi Varikkohalli, johon oli suunniteltu mahtuvan 29 raitiovaunuyksikköä vaunujen huolto- ja puhdistustarpeisiin. Varikon tilat toimivat talvella vaunujen vuorokautisena su-latuspaikkana jäältä, jotta vaunut eivät jäätyisi. Varikon on suunniteltu toimivan jouhevasti ja sinne on rakentunut noin 4 km korkeustasoltaan mahdollisimman vähän muuttuvaa raitiotietä. Varikolla on kuusi huoltoraidetta erilaisille huoltotar-peille esimerkiksi pesu-, kevythuolto-, perushuolto- ja raskashuoltoraide, joihin vaunut voidaan ohjata tarpeen mukaan. (3, s. 42–45.)

1.2 Allianssimalli

Raide-Jokeri alkoi vuonna 2015, kun Helsingin kaupungin, Espoon kaupungin, Liikenneviraston ja Helsingin seudun liikenne -kuntayhtymän toimeksiannosta WSP Finland Oy ja Ramboll Finland Oy laativat yhteisen hankesuunnitelman. Hanke päätettiin toteuttaa allianssimallisena projektina, jolloin tilaaja ja palveluntuottajat vastaavat yhdessä hankkeen kokonaisvaltaisesta toteutuksesta. Allianssimallisessa hankkeessa projektin tuottamat tulokset ja tappiot kuuluvat

yhteisen tulosvastuun piiriin. Tämä on viisas valinta projektityypille, jossa on paljon tuntemattomia riskitekijöitä. Allianssimaisessa urakassa interaktiivinen kanssakäynti työmaalta suoraan suunnittelijoihin edesauttaa tehostamaan eri rakennusvaiheita sekä niissä syntyvien ongelmien ratkaisuja. Esimerkkinä allianssimaiselle hanketoteutukselle on toiminut Tampereen Raitiotieallianssi. (5).

Raide-Jokeri-hankkeen suunnittelusta vastasivat yhdessä Ramboll Finland Oy, Sweco Finland Oy ja Sitowise Group Oyj. Hankkeen urakoitsijaksi valittiin YIT Suomi Oy ja NRC Group Finland Oy, jotka yhdessä vastasivat hankkeen rakentamisesta. Pikaraitiotielinjan pääasialliset rakentamisvastuualueet jaettiin siten, että YIT vastasi raitiotien varrella olevista maa-, perustus-, vesijohto-, viemäriverkosto- ja saneeraustöistä, kun taas NRC puolestaan rakensi raidekiskot ja radan kokonaisvaltaiset sähkötekniset rakenteet. Hankkeen rakentaminen aloitettiin vuonna 2019, ja sen on määrä kestää vuoden 2023 loppuun asti. (3.)

Allianssissa Helsingin kaupunkia edustavat liikelaitos HKL, nykyisin yhtiötetty Kaupunkiliikenne Oy, kaupunkiympäristön toimiala. (3; 6). Kuvassa 2 on esitetty yhteisten tahojen luoma allianssimalli, joka on graafinen esitys osapuolten päävastuualueista.



Kuva 2. Graafisesti esitys Raide-Jokerin-allianssimallin tahojen päävastuualueista (4).

1.3 Sähkö- ja tekniset järjestelmät

Raide-Jokerin-pikaraitiotielinjan projektissa sähkörakentamisesta vastaa Sähkö ja tekniset järjestelmät (SAH). SAH voidaan jakaa karkeasti kahteen osaan: pikaraitiotievaunujen tehonsyöttöön sekä ohjaus- ja turvajärjestelmiin. Vaunujen sähkönsyöttöjärjestelmä sisältää ajojohdinjärjestelmän rakentamisen ja syöttöasemien (SSA) kaluston asentamisen ja käyttöönoton. SSA:t jakautuvat 20 kV:n keskijännitekojeistoihin ja –750 VDC:n (*Voltage Direct Current*) kojeistotiloihin ja laitteisiin. Syöttöasemat on liitetty 20 kV:n keskijänniteverkkoon. Asemat on rakennettu kahdennusperiaatteella, jolloin sen päämuuntajia syötetään rinnan kytetyillä vahvistuskaapeleilla. Tällä varmennutaan raitiovaunujen liikennöinnistä, jos jokin asema on poissa käytöstä. (6.)

Syöttöasemille sijoitetaan valokaaren sammuttavat kojeistot, päämuuntajat, virtamuuntajat, kytkimet sekä radan syötön ohjausjärjestelmän laitteita. Sähkönsyöttöasemia rakentuu Raide-Jokerille yhteensä 16 kappaletta, joista yksi on varikolla. (6.)

Turva- ja ohjausjärjestelmät eli niin sanottu ”vahvavirta” rakentavat puolestaan nimensä mukaan kaiken sen, mikä rakentuu raitiotien ympärille ja mikä kattaa järjestelmän kokonaisvaltaisen toiminnan, ohjattavuuden ja turvallisuuden. Tähän kuuluu useita rakentamisen ja käyttöönoton osa-alueita, joista alle on mainittu rakentamisen päävastuualueet:

- Vaihdealueet. Linjalle rakentuu yhteensä seitsemän vaihdealuetta, joista kaksi sijoitetaan linjan molempiin päihin ja viisi varalle tärkeiden solmukohtien välille. Päissä olevat vaihdealueet ovat valvomo-ohjattuja, kun taas muut ovat käsin ohjattavissa paikallisista I/O-pääteistä poikkeustiloja varten.
- Roihupellon uusi raitiovarikkohalli.
- Raitiotielinjan maadoitusjärjestelmät. Maadoitettaviin kohteisiin kuuluvat kauttaaltaan koko raitiolinjan pituudelta muun muassa tukimuurien, siltojen, teräsbetonirakenteisten pintojen, metallisten aitojen, kisko- ja raideyhdistyksien sekä tunnelien ja alikulkutunnelien maadoitettavat osat.
- Pysäkkien sähkölaitteet. Pysäkin vastuualueelle kuuluvat muun muassa tietoliikennelaitteiden, kameroiden ja sähköisten toimilaitteiden rakentaminen sekä maadoitusten toteutus. Tästä hyvä esimerkki on pysäkkien välille rakentuva koko linjan läpi kiertyvä tietoliikenneverkosto sekä kaupungeittain kiertävät verkostot, joihin liikennöintitiedotteet sekä tilannetiedot päivittyvät live-tilassa. Järjestelmä toimii ”Ring”-topologiamallisena valokuitu-tietoliikennejärjestelmänä.
- Liikennevalojärjestelmät. Raide-Jokerin varrelle rakennetaan useita uusia liikennevaloristeyksiä. (3; 7.)

1.4 NRC Group

NRC Group on Pohjoismaiden johtava raideinfra-alan toimija, joka jakautuu Norjan, Ruotsin ja Suomen maakohtaisiin alueisiin. Yhtiön pääkonttori sijaitsee Norjassa Lysakerissa. Norjalainen pörssi-yhtiö osti entisen VR Track Oy:n vuonna 2018. NRC:n tytäryhtiö NRC Group Finland Oy on yksi Pohjoismaiden

suurimpia rata- ja raitiotieliikenneinfran rakentajia ja kunnossapitäjä. Yhtiö tarjoaa myös lukuisia erilaisia kone- ja rakennuspalveluja rautateiden ja raideinfran alalla. (9.)

Suomessa raitiotien sähkörata- ja vahvavirtajärjestelmien sekä niiden syöttö- asemien rakentamisesta vastaa työhön erikoistunut Raitiotiedivisioona. NRC:n Raitiotiedivisioonalla on useita projekteja Suomessa muun muassa Raide-Jokeri-allianssi, Kruunusillat-allianssi ja Tampereen raitiotieallianssi. NRC Group Finland on yli tuhannen työntekijän yritys, joka jakautuu kunnossapidon-, sähkö- rakentamisen- rautatierakentamisen, materiaalien-, sekä raitiotiedivisioonaan. Pohjoismaissa yhtiöllä on hieman yli 2 000 työntekijää ja konsernin liikevaihto oli 6 387 miljoonaa euroa kesällä 2022. (9; 10.)

2 Pikaraitiotiepysäkkien sähköturvallisuuden lähtökohdat

2.1 Sähköturvallisuuden standardit

Tyypillisesti kun puhutaan erilaisista vaaratekijöistä, on ajateltava todennäköisyyksiä eri skenaarioille. Kaikkeen ei voida aina varautua, ja siksi on tunnistettava nimenomaan tyypilliset riskitekijät tietyillä suljetuilla alueilla. Raitiotien sähköisen järjestelmän riskien hallinnassa on tunnistettava ne tyypilliset vaaratekijät, jotka yleisesti kohdentuvat rautatie- ja raitiotieverkostoihin. NRC Group on Raide-Jokeri-hankkeen riskien arvioinnissa pyrkinyt tunnistamaan ratasähköjärjestelmille hyvin tyypilliset sähkön aiheuttamat riskit, joita myös tässä insinöörityössä tullaan käsittelemään. Tyypillisimmät riskit on listattu seuraavasti:

- oikosulkuvirtatilanne, jossa ajojohdinjärjestelmän ajolanka putoaa jännitteellisenä maahan
- avojohteinen sähköinen ajolanka
- vaarallisten kosketusjännitteiden syntyminen sähkölaitteiden vikaantuessa
- hajavirtojen purkautuminen niille määrittelemättömiin paikkoihin tasisähköjärjestelmässä

- salaman iskeytymistä ratasähköjärjestelmään. (10.)

Jotta kyseisiltä riskitekijöiltä voidaan suojautua oikein menetelmin, on raitiotien sähköisten järjestelmien rakentamis- ja suunnitteluvaiheessa noudatettava niille määriteltyjä kansainvälisiä SFS-EN standardeja. Koska Raide-Jokerin-pikaraitiotie toimii tasajännitejärjestelmänä ovat sen suunnittelun runkona toimineet pääosin siksi SFS EN-50122:n (16.) mukaiset maasta erotetun tasasähköjärjestelmän mukaiset vaatimukset. Raitiotielinjaa ei tietysti yksinomaan voida rakentaa pelkästään yhden standardin pohjalta, sillä ratalinjan ympärille rakentuva tekniikka on monimuotoista ja toimii useilla eri jännitearvoilla. Seuraavassa luettelossa on raitiotiejärjestelmien sähkörakentamiseen liittyvät tärkeimmät standardit, joiden pohjalta pikaraitiotien turvallisuus perustuu:

- SFS 6000, Sähköasennukset osa 1; Pienjänniteasennukset (12)
- SFS 6001, Sähköasennukset; Suurjänniteasennukset ja ilmajohdot (13)
- SFS 6002, Sähköasennukset osa 2; Sähköturvallisuus (14)
- SFS – EN 50119, *Railway applications- Fixed installations -Electric traction overhead contact lines* (15)
- SFS – EN 50122 – 1, *Railway applications – Fixed installations – Part 1: Protective provisions relating to electrical safety and earthing* (16)
- SFS – EN 50122 – 2, *Railway applications _ Fixed installations _ Part 2: Provisions against the effects of stray currents caused by d.c. tractions system* (17)
- EN 50162; *Protection against stray current from direct current systems* (18)
- SFS – EN 50163, *Railway applications – Supply Voltages of tractions systems* (12, s.12; 19).

Raide-Jokerilla on SAH:n puolesta teetetty useita ohjekortteja sähköturvallisuusmääräyksien ja ratkaisujen pohjalta, jotta standardien asettamista ohjeistuksesta ei lähtökohtaisesti poikettaisi. Projektilla on kuitenkin käytäntö, jossa standardeista poikettaessa on niiden ratkaisusta esitettävä poikkeamaraportti. Kyseisessä dokumentissa on käytävä ilmi poikkeuksen kuvaus, syy miksi poikkeama on syntynyt, poikkeaman aiheuttaja, korjaussuunnitelma ja se, miten suojaus on todennettu toimivaksi sekä turvalliseksi. Riskien kartoituksen jälkeen

allianssi vastaa poikkeaman tarkastuksesta ja varmennustarkastuksesta. Varmennustarkastuksen lausunnolla varmistetaan allianssin yhtenevä mielipide laitteiston turvallisuudesta tarkastavan tahon kanssa. Viime kädessä lopullisen hyväksynnän laitteiston turvallisuudesta tekee käytönjohtaja, joka vastaa laitteiston turvallisuudesta. (21; 22.)

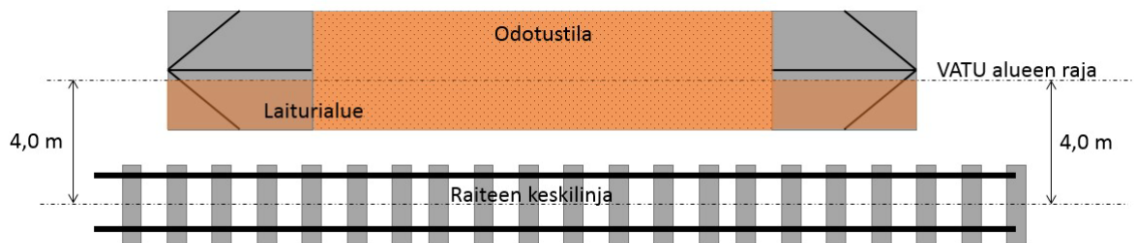
2.2 Pikaraitiotiepysäkkien aluerajaus

Sähköteknisestä lähtökulmasta katsottuna pikaraitiotiepysäkiksi luokitellaan sellainen alue, jolta matkustajat voivat normaalitilanteessa turvallisesti poistua, jolla he voivat odottaa ja jolta astua raitiovaunun kyytiin. Raide-Jokerilla raitiotiepysäkit ovat tunnistettavissa niiden maasta noin kolmenkymmenen senttimetrin korkeudelle korotetuista tasaisista ja kirjavista kivetyksistä, neliskanttisista pysäkkipylväistä sekä pysäkillä olevien leveiden odotuskatosten perusteelta. Kuvassa 3 on esitetty Raide-Jokerin pysäkin laiturialue. (22.)



Kuva 3. Raide-Jokerin pikaraitiotiepysäkki.

Laiturialueen maasta korotettua tasaista pintaa kutsutaan palvelualueeksi tai vastaavasti laiturialueeksi. Palvelualue on suunnitelmalliselta periaatteeltaan vähintään 45 m:n pituinen ja 3,8 m leveä. Palvelualueelle on rakennettu yksi tai useampi luiskaosuus, jossa kivetys nousee pysäkille johtavan maapinnan tasosta edellä mainittuun laiturialuekorkeuteen. Tasaisella korotuksella on pyritty parantamaan pysäkin esteettömyyttä kantakaupungin pienempiin raitiotiepysäkkeihin verrattaessa. Aluetta, jossa matkustajat odottavat raitiovaunua ja jossa esiintyy ihmisten pakkautumista ruuhkatunteina, kutsutaan odotustilaksi. Odotustilalla ei ole tarkkoja rajoja, mutta sen sisään yleensä rajautuu vähintään raitiopysäkin katos sekä yksi infonäyttö. PRP:n laiturialueen aluerajauksen hahmottelu on esitelty kuvassa 4. (1. s. 17; 21, s. 11–12.)



Kuva 4. Laiturialueen periaatteellinen aluerajaus (22, s. 12).

Odotustilan lisäksi laiturialueeseen kuuluvat pysäkin luiskat, portaat tai muut kulkuväylät sekä niiden kaiteet tai paikoittain muut fyysiset rakenteet, jotka ulottuvat pysäkin laiturialueelle. (22.)

2.3 Pysäkin yleinen turvallisuus

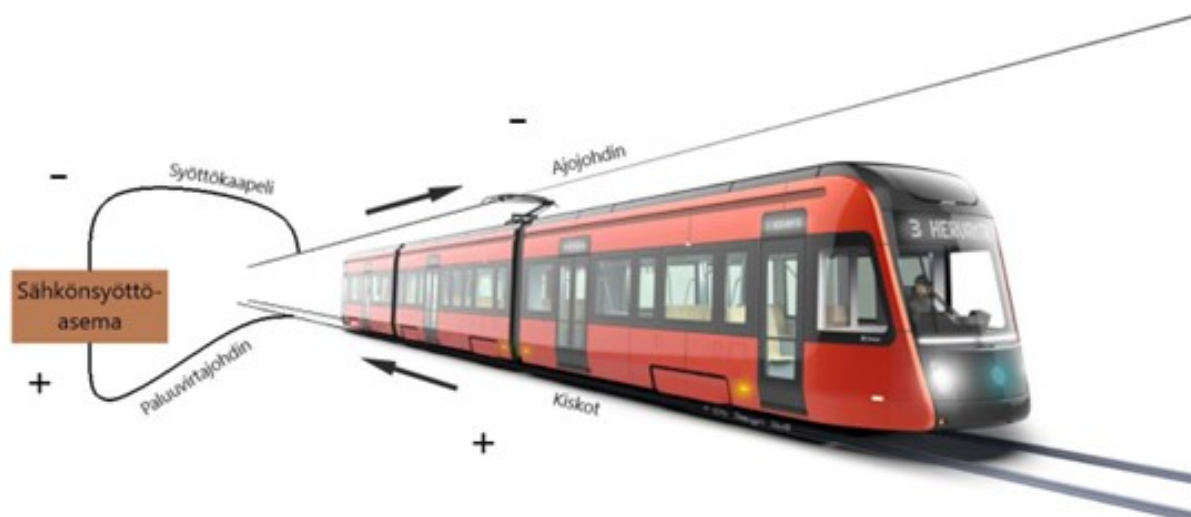
Raide-Jokerin pikaraitiotielinjan vaunuilla on muuhun liikenteeseen nähden etuajo-oikeus. Tästä syystä raitiotietä ylittävät kohdat ja varsinkin pysäkkien suojatiet ovat pääsääntöisesti varusteltu selkein liikenneohjausvarustein, kuten liikennevaloilla ja liikennemerkeillä. Liikenteenohjaus on suunnattu raitiovaunujen kuljettajille, autoilijoille, pyöräilijöille ja jalankulkijoille. Pysäkkien sijaitessa kahden ajoradan välissä on pysäkkien laiturialueen reunoilla sijaitsevilla kaiteilla haluttu

estää matkustajien kaatuminen ajoradalle tai matkustajien joutuminen raitiovaunun katvealueeseen. (2, s. 74–76; 23.)

Matkustajien henkilö- ja liikenteenturvallisuuden, sekä oikeusturvan näkökulmista on raitiolinjan varrelle asennettu kameravalvontajärjestelmä. Kamerajärjestelmän valvomosta voidaan tarkastella raitiotieliikenteen sujuvuutta ja ajantasaisen liikenteen tilannekuvaa. (2, s. 74–76; 23.)

2.4 Ajolangan putoaminen

Raide-Jokerin pikaraitiotien ajojohdinjärjestelmä rakennetaan standardin SFS-EN 50122 (16) mukaisesti maasta erotettuna tasasähköjärjestelmänä. Tätä tasasähköistä järjestelmää nimitetään ratasähköjärjestelmäksi (RSJ), jonka nimellisarvo on -750 VDC standardin SFS-EN 50163 (19) mukaisesti. RSJ:ssä syöttävä negatiivinen napa on kytketty ajolankaan ja positiivinen napa puolestaan SSA:n paluuvirtayhdistykseen. Järjestelmässä tasasähkö siirretään tasasuuntaajan miinusnavalta prosessilaitteiden ja kaapeleiden läpi ajojohtimeen ja siitä virroittimen kautta vaunun käyttöön. Vaunun pyörät kytkevät vaunun sähköisesti kiskoon, joka taas on yhdistetty sähkönsyöttöaseman tasasuuntaajan plusnapaan. (6; 24.)



Kuva 5. Graafinen esitys ratasähköjärjestelmästä (5).

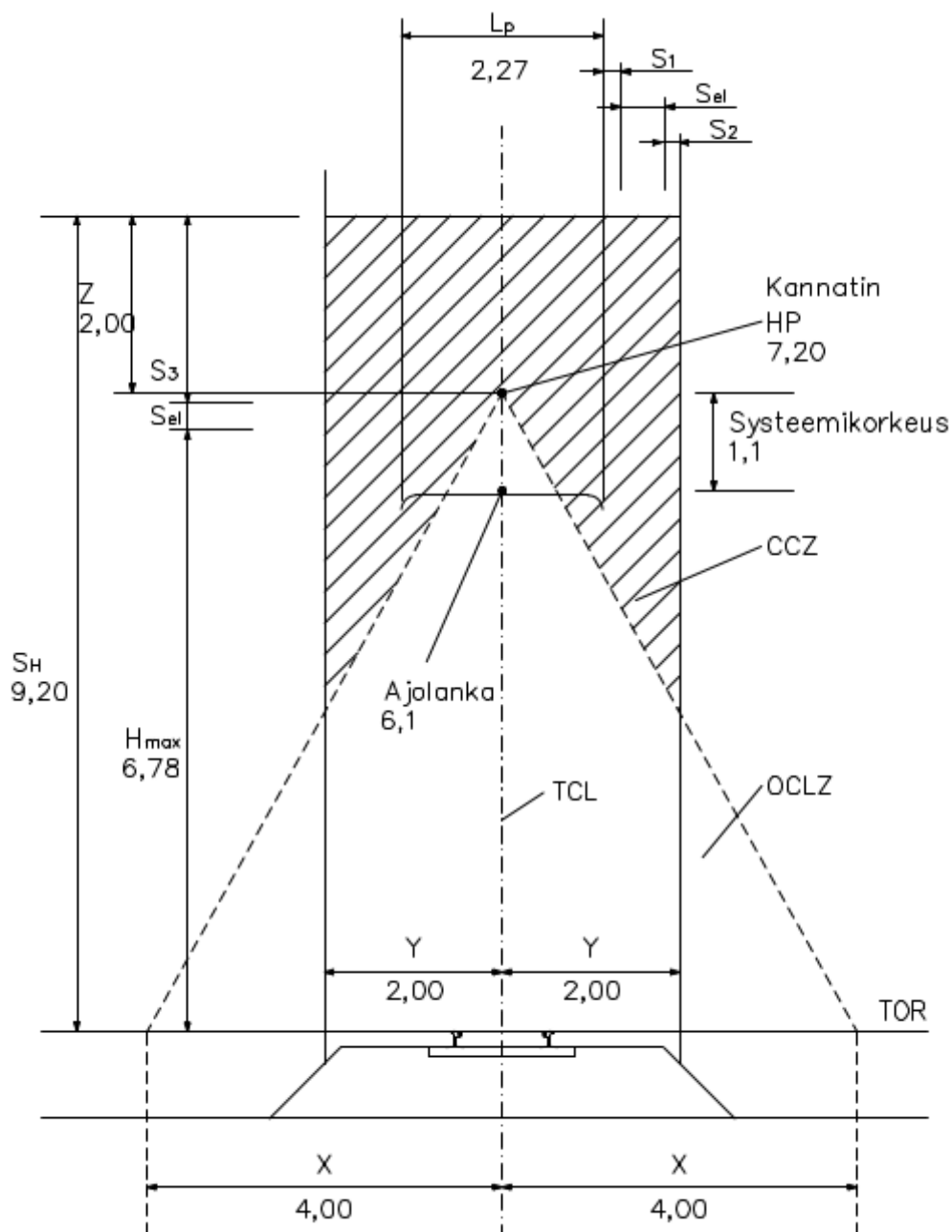
Ajojohdinjärjestelmän ajolanka on jaettu omiin syöttöosuuksiin, joita kutsutaan kytkentäryhmiiksi. KytKentäryhmät ovat erillään toisistaan syöttöpylväiden kohdilla ajojohdinlankoja erottavalla ryhmityseristimellä. Raitiovaunun ajaessa syöttöpylvään kohdalle on vaunun virroitin hetkellisesti yhdistämässä kahta kytkentää ja kahta ryhmää "siltaavan" erottimen läpi. (6.)

Syöttöasemien katkaisijat on asetettu 4000 A:iin yksittäisen lähdön nimellisvirran ollessa 2000–4000 A suhteessa kuormitusvirtaan. Ajolankaa syötetään molempiin suuntiin, joten ajolangan kytkentäryhmiin kohdistuva mahdollinen oikosulkuvirta on kaksinkertainen päämuuntajien syöttävään oikosulkuvirtaan nähden. Kahdensuuntaisen oikosulkuvirran hetkellisvaikutus voi standardin SFS-EN 50136 (19) mukaan olla teoriassa hetkellisesti jopa viisinkertainen kuormitusvirtoihin nähden eli tässä tilanteessa ≥ 40 kA. Tästä syystä SSA:n suojaavien katkaisijoiden avautumispainikekeston on kestettävä yli 40 kA:n hetkellinen oikosulkuvirta ja releiden toimittava mahdollisimman nopeasti oikosulkuvirtatilan-teen ehkäisemiseksi. Suojalaitteet ovat tasajännitteelle tarkoitettavia ylijännitesuojia, jotka laukeamishetkellä kytkevät kuormitusvirran pois päältä 50–200

millisekunnissa. Oikosulkusuojaus toimii virran nousunopeuden eli virran derivaatan ollessa riittävän suuri. (24; 25.)

2.5 Raitiotielinjan vaaraulottuma eli VATU

Poikkeustilanne, jossa ajojohtimen katkeaminen ja tipahtaminen sähköä johtavan rakenteen päälle tai läheisyyteen, voi synnyttää vaarallisen kosketusjännitteen. Tämänkaltaisen tilanteen vaaraa pidetään niin todennäköisenä, että sitä varten on suunniteltu oma vaaraulottuma-alue (VATU). VATU-alueen leveysraja mitataan poikkileikkaussuuntaisesti 4,0 m raiteen keskilinjasta molemmin puolin raidetta. VATU-alueen korkeusraja puolestaan mitataan 2,0 m ratajohdon ajojohtimen korkeimman jännitteisen avojohtimen yläpuolelle. (16, s. 19.) Kuvassa 6 on osoitettu graafisesti VATU-alueen kokonaisvaltainen vaikutusalue.



Kuva 6. Kuvassa on VATU-alueen graafinen kuvaus, jossa alueeksi määrittyy ajolangan virroittimen vaikutusalue sen tippuessa (kuvassa: CCZ). Vaaraulottuman kärki käytännössä määrittyy avojohtimen kannattimen kohdalta. (16, s. 19).

Käytännössä raitiovaunun yläpuolelle jäävä osuus on aina virroittimen vaikutusalueen ylämpään korkeuteen (SH) asti, jota mielletään virroittimen vaara-alueena eli VIVA-vaikutusalueena. Kuvassa 6 tämä on demonstroitu vinottaisin

hajaviivoin kiskoselän leveyden mukaisesti aina ajolangan kannattimeen (SH) asti. Leveydeltään alue on kiskon keskikohdasta 2 m poikkileikkaussuuntaisesti molempiin suuntiin. (26, s. 2.)

Kaksiraiteisella rataosuudella vaunujen väliin jäävä tila on kauttaaltaan VATU:n sisäpuolelle rajattua aluetta. Vaikutusaluetta pidetään samana kautta radan, pois lukien sellaiset kohdat, joissa ajolangan sijasta on käytetty kiinteää ajojohdinta. Tällainen tila voi olla esimerkiksi tunneli tai alikulkusilta, jossa kiintoajojohdinten putoaminen on luotettavasti estetty standardin SFS-EN 50122-1 (18) mukaisesti esimerkiksi tukieristimien kautta tunnelin kattoon pulttaamalla. Ajojohdinten jännitteisenä katkeamista ja putoamista VATU-alueen ulkopuolelle pidetään niin pienenä riskinä, ettei sen ulkopuolelle jäävän alueen turvaamistoimenpiteisiin olla ryhdytty. Kuvan 6 lyhenteet on selitetty taulukossa 1. (16, s. 17.)

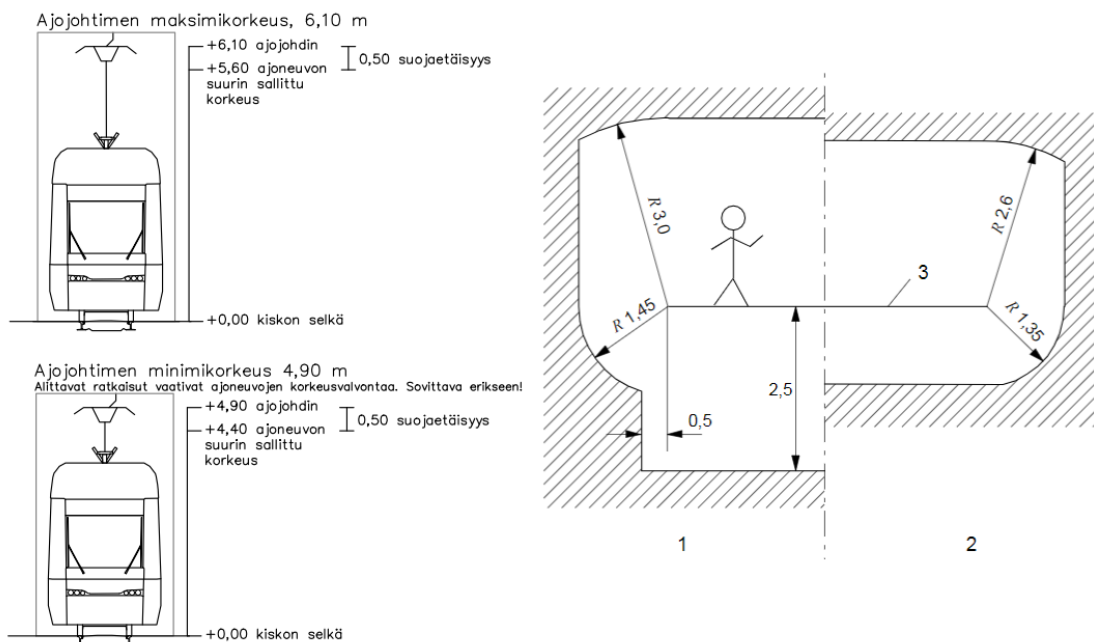
Taulukko 1. VATU-alueen lyhenteiden selitykset.

Lyhenne	Tarkoitus
TOR	Kiskon yläpinta
HP	Ajojohdinten korkein piste
OCLZ	Ajojohdinten vaikutusalue
CCZ	Virroittimen vaikutusalue
TCL	Raiteen keskilinja
X	OCLZ:n horisontaalinen maksimi vaikutusalue keskilinjasta
Y	Virroittimen horisontaalinen maksimivaikutusalue keskilinjasta
Z	Etäisyys välillä HP ja SH
S1	Virroittimen sivuttaiset heilahdukset
S2	Sivuttainen turvaväli rikkoutuneelle virroittimelle
S3	Pystysuuntainen turvaväli rikkoutuneelle virroittimelle

Sel	Sähköinen erityisväli SFS- EN50119
S _H	Virroittimen vaikutusalueen ylin korkeus
L _p	Virroittimen kokonaisleveys
H _{max}	Virroittimen ylin ulottuma

2.6 Turvaetäisyys ajolangasta

Raide-Jokeri-linjan pysäkeillä matkustajat tulevat olemaan lähempänä eristämättömää avojohtoa kuin muualla raitiolinjalla. Jotta pienjännitteinen avojohteinen ajolanka ei olisi liian lähellä matkustajia, on sen oltava vähintään 3 m:n korkeudessa maanpinnalta pienjännitealueella. Tämä on esitetty standardin SFS-EN 50122-1 (18) vähimmäisvaatimuksena. Koska R-J rakentuu korkeusasteikolla varsin muuttumattomalle maaperälle, on sen ajolangan korkeuden vaihtelu keskimäärin vähäistä. Ajolangan nimelliskorkeudeksi on päätetty 5,1 m:n korkeus mitattuna kiskon yläpinnasta (ks. kuva 7). Korkeimmassa kohdassa ajojohdin on 6,1 m:n korkeudessa ja alimmillaan 4,9 m:n korkeudessa. Ajolanka on rakennettu kannattimien varaan ja pyrkii myötäilemään ajolinjan nimelliskorkeutta virroittimen koskettaessa sitä. Laiturialueen korokkeella ajolangan korkeus on Raide-jokerilla minimissään 4,3 metrin korkeudessa laiturialueen tasalta mitattaessa. (16, s. 22–23; 27.)



Kuva 7. Ajolangan korkeusmitat standardin EN-SFS 50122-1:n (16) mukaan.

Kuvassa 7 on johtimen suurin ja pienin asennuskorkeus Raide-Jokerilla ja standardin asettamat turvaetäisyydet avojohdosta standardista EN-SFS 50122-1 (16). Kuvan oikeanpuoleinen ensimmäinen alue (numerolla 1) aluerajaus merkkää julkisia alueita, toinen (numerolla 2) pääsyrajoitteisia alueita ja kolmas (numerolla 3) fyysistä seisoma-alustaa. (16, s. 22–23; 27.)

2.7 Raitiotien maadoitusjärjestelmä

Pysäkkialueilla on useita pintoja, joiden valmistusmateriaaleina on käytetty sähköä johtavia materiaaleja, kuten metallia ja betonia. Tästä syystä kaikki sähköä johtavat rakenteet on maadoitettava potentiaalintasausta varten. Kosketeltavia maadoitettavia rakenteita ovat ainakin pysäkin pysäkkikeskus (PK), pylväät, liikenneportaalit, roska-astiat, pysäkin odotustilan katos, kaiteet ja mahdolliset muut yli 15-metriset rakenteet, jotka ulottuvat VATU-alueelle. Standardin SFS-EN 50122-1 (17) esittämänä poikkeuksena voidaan maadoittamattomaksi jättää sellaiset kohteet, joita lähestyessä voidaan huomata jokaisesta ilmansuunnasta, että ajojohdin koskettaa kohdetta poikkeustilanteessa. Käytännössä tämä tarkoittaa ylhäältäpäin katsottuna pistemäisiä kohteita. (22, s. 36.)

Raidejokerin pysäkkien maadoitusten toteuttamiseen on suunniteltu ohje Pysäkin maadoitus periaatekaavio (28), jonka pohjalta maadoitusverkosto laaditaan (ks. liitteet 1 ja 2). Pysäkillä maadoitusjärjestelmä toimii tähtipistemaadoitukseksi, jolloin sen kaikki maadoitetut johtavat pinnat on maadoitettu samaan maadoituspisteeseen. Maadoitukset kytketään pysäkkilaiturilla olevien kaapelikaivojen sisällä maadoituskiskoihin, josta ne edelleen kytketään pysäkkikeskuksessa sijaitsevaan pääpotentiaalintauskiskoon, niin sanottuun MEB 2 -kiskoon (*Main Earthing Bridge*). MEB 2 on puolestaan kytketty erotusmuuntajan toisiopuolen synteettisestä nollapisteestä keskuksen PE-kiskoon, joka on puolestaan suorassa yhteydessä maahan maadoituselektrodin muodossa. Kyseistä maadoitusjärjestelmää kutsutaan raitiotien maadoitusjärjestelmäksi (RMJ). (28.)

Mahdollisten vaarallisten kosketusjännitteiden syntyessä RMJ toimii välittömänä yhteytenä pysäkillä olevien sähkölaitteiden ja maanpotentiaalivälissä suojapotentiaalina. R-J:n pikaraitiotiepysäkeillä on tehty ohjeistus, jonka mukaan kahden eri sähköverkon välisille laitteille on jätettävä vähintään 2,5 metrin välinen etäisyys, jotta matkustaja ei voi samanaikaisesti koskettaa molempia. Tällä ehkäistään mahdollinen järjestelmien välinen potentiaalierojen purkautuminen ihmisen kehon läpi vaarallisen sähkövirran muodossa. (22, s.37.)

RMJ on aina erotettu muista maadoitusjärjestelmistä ja on täysin itsenäinen sähköjärjestelmä. RMJ:n ja sähköverkkoyhtiön erotus toisistaan on toteutettu myös siksi, etteivät järjestelmien sisäiset vikaantumiset ja vaaralliset jännitteet pääse siirtymään toiseen järjestelmään vikatilanteiden ilmetessä. (28.) Seuraavassa luvussa 3 käsitellään RMJ:ään liittyviä suojausmenetelmiä tarkemmin.

3 Pikaraitiotiepysäkkien sähköiset suojausmenetelmät

3.1 Pysäkkikeskukset

Jokaisella pikaraitiotiepysäkillä on oma sähkökeskus, jota kutsutaan pysäkkikeskukseksi (PK). Pysäkkikeskus tyypillisesti muistuttaa jakeluverkon

ulkotilakeskusta, joka on maan pinnasta nostetun betonijalan päällä oleva keskus. PK sijaitsee joko pysäkkilaiturilla tai lähellä sijaitsevan jakeluverkon keskuksen vieressä yleensä kevyen liikenteen väylän reunalla. Keskuksilla on oma yksilöivä nimikilpi, jossa on pysäkkikeskuksen sijainnille R-J:n linjalla spesifioiva tunnus, esimerkiksi PK-11. PK-tunnuksen jälkeen seuraa kaksilukuinen juokseva luku, joka kertoo pysäkkikeskuksen paikan Raide-Jokeri-linjalla aina Espoon Keilaniemestä (PK-01) Itäkeskuksen väliaikaiselle päätepysäkillä (PK37) asti. PK:t toimivat kaupunkien verkkoyhtiöiden alakeskuksina pysäkillä oleville sähkölaitteille ja syöttävät pysäkin sähkölaitteita. Kuvassa 8 on esitetty kaksi eri pysäkkikeskusta.



Kuva 8. Raide-Jokeri-linjalla olevia pysäkkikeskuksia.

Kuvan 8 vasemmalla puolella on Helsingin Latokartanon pysäkin PK-33. PK:n sisälle on sijoitettu mittaus-, suoja- ja ohjauslaitteita sekä erotusmuuntaja. Kuvassa oikealla on Mäkitorpan pysäkin PK-27 Norrtäljentiellä.

Käytettäessä raitiotiejärjestelmän ulkopuolista sähköjärjestelmää on pysäkillä tuodut syöttökaapelit vähintään kaksoiseristettävä muista rakenteista. Tämä on SFS EN-50122 (18) mukainen vähimmäisvaatimus, jolla voidaan todeta, että

järjestelmien välinen eristys on riittävä. Käytännössä pysäkillä tämä on toteutettu käyttämällä pysäkillä johtavien kaapelireittien putkituksissa vähintään A-suojausluokan eristeistä PVC-putkea ja pysäkeillä olevien kaapelireittien putkituksissa vähintään DVR-tyyppistä tuplaputkea. (22, s. 42.)

Pysäkkikeskusten sisälle sijoitetaan ensisijaisesti niitä laitteita, joilla taataan matkustajien henkilösuojaus ja omaisuussuojaus. Esimerkiksi pysäkin sisään rakennettu erotusmuuntaja erottaa sähköiset vaaratekijät galvaanisesti erottamalla pysäkin oman sähköverkon jakeluverkon sähköverkosta. Liitteessä 8 on keskivaiheilla sijaitsevan Takomotien PK-14:n pääkaavio, josta ilmenee erotuksen periaate (ks. liite 8.). (28.)

Liitteessä 8 näkyy, kuinka verkkoyhtiön kolmivaiheisen liittymiskaapelin AXMK 4X35S-vaihejohtimet on kytketty pääsulakkeisiin (-OF1). Pääsulakkeiden rinnalle kytketään terminen ylijännitesuoja (-OYJS1). Sulakkeilta eteenpäin vaihejohtimet on liitetty pääkytkimen (-OQ1), verkkoyhtiön energianmittauksen (-OP1) ja moottorinsuojakytkimen (-OF2) jälkeen vähintään 2kV:n rungosta eristetyin ja vähintään 10kVA:n erotuksella tehdyn erotusmuuntajan ensiöpuolen käämeihin. Erotusmuuntajan toisiopuolelta lähtevä sähkönsyöttö toimii pysäkin omana TN-sähköjärjestelmänä, jotta kaupungin sähköverkko on turvattu laitteistojen vikaantuessa ja vaarallisten jännitteiden syntyessä. Toisiopuolen 3-vaiheinen TN-järjestelmä jakautuu muuntajalta TN-S-järjestelmäksi, jossa järjestelmän nolla (N) ja potentiaalintasaus (PE) eivät ole yhteydessä keskenään sähkölaitteilla tai jännitteille alttiiden osien päässä. (29, s. 54.)

PK:n erotusmuuntajaa edeltävä puoli mielletään nimityksellä ”jakeluverkkoyhtiön puoli”, sillä rakenteeltaan se palvelee keskuksen syöttävän piirin suojausta ja käyttötehon mittausta. Verkkoyhtiön puolen laitteistoa suojataan SFS-EN 6000 (12) mukaisen syöttävän verkon suojausvaatimuksilla, jossa pääsulakkeet toimivat piirin oikosulkuvirtasuojana ja ylikuormitussuojina sekä moottorinsuojakytkin ja lämpöreleet toimivat liittymän kaapelien ylijännite-, sekä lämpösuojina. Pysäkkikeskus voidaan turvallisesti kytkeä irti syöttöjännitteestä pääkytkimestä,

joka katkaisee erotusmuuntajan syötön esimerkiksi huoltotoimenpiteiden ajaksi. (29, s. 11.)

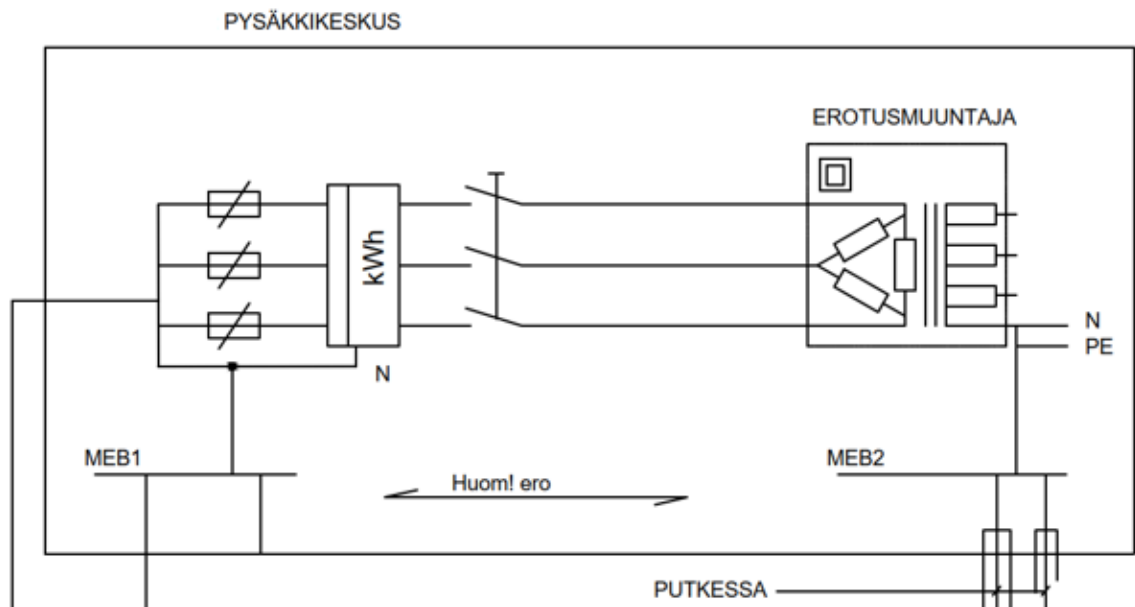
3.1.1 Pysäkkien maadoituselektrodit

Pysäkkikeskuksen ja pysäkkilaiturin maadoittamisen kannalta tärkeää on kosketusjännitteiden purkaminen maadoituselektrodien muodossa. Rakennusten ulkopuolisissa liittymissä, joissa käytetään PEN-johdinta, on liittymille rakennettu omat maadoituselektrodit. Pienjänniteliittymien maadoituksissa on käytettävä EN-SFS 6000-5-52 (33) edellyttämää maadoituselektrodia ja siten myös RMJ:ssä edellytetään maadoituselektrodin käyttöä. Maadoituselektrodien tehtävä on parantaa maan ja rakenteiden välistä jatkuvuutta. (30.)

Maadoituselektrodit ovat yleensä maahan tai perustukseen upotettavia johteita, jotka ovat poikkipinnaltaan vähintään 16-neliöistä kuparia tai 90-neliöistä terästä. Lisävaatimuksena edellä mainittuun, koska pysäkkikeskuksen sisälle on asennettu erotusmuuntaja, on sen maadoitus- ja lisämaadoituselektrodi toteutettu 25 neliöisellä paljaalla kupariköydellä EN-SFS 6001 (13) vaatimusten mukaisesti. R-J:lla perusmaadoituselektrodit upotetaan maahan vaakasuuntaisesti ja ne ovat vähintään 20 m:n pituisia. Elektrodit ovat mitoitettu siten, että ne kestävät liittymäkaapelin mahdollisen kaksoisoikosulkuvirrat tai useamman vaihde- ja nollajohtimen välisen oikosulkuvirran. Poikkipintavaatimukseltaan elektrodien on kestettävä niihin kohdistuvat sähkövirran vaikutukset ajan kuluessa. (30.)

Maa-asennuksena elektrodin on kestettävä maan kosteuden aiheuttamaa korroosiota eli kuparin syöpymistä. Jos maadoituselektrodin liitoskohta jää maahan, täytyy sen liitos tiivistää vedeltä. Elektrodien on myös kestettävä pakkasen aiheuttamat lämpölaajennusilmiöön liittyvät haittatekijät. Maa-asennuksessa tämä on pääasiassa toteutettu asettelemalla kupariköysi s-muotoon elektrodin liitoskohdan lähelle, jotta lämpölaajeneminen ei aiheuta liitokseen vetorasitusta. Elektrodit on aina asennettava routimisrajan alapuolelle eli alle 70 cm:n syvyyteen, jotta lämpölaajenemisilmiö jää mahdollisimman vähäiseksi. (30, s. 35–37, 128–139.)

Pysäkillä on kaksi eri maadoituselektrodia asennettuna siten, etteivät jakeluverkon ja pysäkin maadoitusjärjestelmät yhdisty. Niiden välille tulee jättää aiemmin mainittu 2,5 m:n minimi etäisyys. Toinen maadoituselektrodi on sähköverkon pääpotentiaalintasauskiskolle MEB 1 ja toinen raitomaadoitusjärjestelmän kiskolle MEB 2. Koska edellä mainittu elektrodien välinen kosketeltava etäisyys ei toteudu pysäkkikeskuksen betonisessa jalassa, on niistä vähintään toisen elektrodin kuljettava kaksieristeisessä putkessa riittävän etäisyyden päähän. R-J:lla tämä on pääsääntöisesti toteutettu siten, että RMJ:n maadoituselektrodi sijoitetaan fyysisesti pysäkkialueelle raitiotiekatoksen edustalle. Maadoituselektrodi kytketään pysäkkilaiturilla sijaitsevassa kaapelikaivossa olevaan EB-kiskoon (*Earthing Bridge*), joka puolestaan parantaa laiturialueen kosketusjännitteiden tasausta. (11; 30, s. 128–139.) Seuraavassa kuvassa 9 on esitettyä pysäkkikeskuksen maadoituskaavio.



Kuva 9. Pysäkkikeskuksen maadoituskaavio. Kuvakaappaus liitteestä 4.

Kuvassa 9 ulkoviivat kuvaavat keskuksen runkoa, joka on kytketty jakeluverkon päämaadoituskiskoon MEB 1. Lisäksi päämaadoituskiskoon on liitetty

jakeluverkon lisämaadoituselektrodi, joka kulkee maassa liittymiskaapelin rinnalla tai silmukkamaisena ratkaisuna. Päämaadoituskiskoon MEB 2 on kytketty RMJ:n maadoitettavat osat. RMJ:n maadoituselektrodi on yleensä sijoitettu pysäkin laituritilan alle ”syvämaadoituselektrodiksi” riittävän elektrodien välimatkan ja maksimaalisen kosketussuojan takaamiseksi. (Liite 4.) Pysäkkikeskuksen runkoa ei aina kytketä jakeluverkkoyhtiön maadoituspuolelle, vaan rungon maadoitus on katsottava tilannekohtaisesti. Jos PK sijaitsee pysäkkilaiturilla ja VATU-alueen sisällä, on sen runko silloin maadoitettava RMJ:n maadoituskiskoon MEB 2. Mikäli ajolanka sattuu tippumaan keskuksen päälle tai sen välittömään läheisyyteen, pysyy sen oikosulkuvirta RMJ:n vaikutusalueella. (31.)

Raide-Jokerilla haasteena maadoituselektrodien toteutuksessa on ollut kaupunkialueiden kohteet, joissa perusmaadoituselektrodia ei olla päästy käyttämään, vaan perusmaadoituselektrodin sijasta on jouduttu käyttämään syvämaadoitusperiaatetta. Syvämaadoituselektrodin käyttö poikkeaa perusmaadoituksesta sen pystysuuntaisesta asennustavasta tavallisen vaakasuuntaisen tai rengasmallisen asennustavan sijaan. Paikkakohtaisesti köysi työnnetään pystysuuntaisesti 1,5–2,5 m:n syvyyteen halkaisijaltaan 1,5 cm teräksisen maadoitussauvan avulla. Maadoituksen toteutustapana syvämaadoitussauvat ovat työläämpiä ja haastavampia toteuttaa. (30.)

Rautateillä sähkölaitteiden maadoituselektrodien väliseksi resistanssiksi on sovittu $< 10 \Omega$, joka perustuu ennalta saatuihin riittäviin maadoitusmittausarvoihin, joilla suojalaitteiden toiminallisuudesta on varmennuttu. Suomalaisen maaperän ominaisjohtavuus on Keski-Eurooppaan verrattaessa merkittävästi suurempi, joten maadoituksille ei löydy suoranaisia kansainvälisiä ohjeistuksia muuta kuin sovittuja tavoitearvoja. Jos Suomessa haluttaisiin päästä samanlaisiin arvoihin, tarkoittaisi se käytännössä massiivisia rakennusinvestointeja. (11; 30.)

R-J:lla pysäkkikeskuksien sekä syöttö-, että erotinpylväiden elektrodien maadoitusarvoksi on sovittu yhdessä tilaajan kanssa alle 100Ω . Väyläviraston ohjeistukseksi kyseisten pylväiden maadoitusarvoksi rautateillä on edellä mainittu 10

Ω . Poikkeuksena raitioteihin rautatien maadoitusjärjestelmän paluuvirtakisko on suoraan yhteydessä maahan, kun taas raitiotiellä tämä on maasta täysin eristetty. Rautatiellä taas pylväillä on lähes aina suora yhteys maahan ja paluuvirtakiskoon, mikä edesauttaa $< 10 \Omega$ raja-arvon saavuttamista. Sääntö ei kuitenkaan päde sähköistämättömillä rautatieosuuksilla, joissa vastusarvoksi päätettiin vuonna 2004 VR-Rata AB:n ja Väyläviraston yhteispäätöksellä $< 100 \Omega$. Tämä johtui siitä, ettei sähköistämättömillä rataosuuksilla ei ollut aikaisemmin otettu huomioon pylväsmaadoituksia ja siksi pylväiden sekä maan väliset resistiivisyydet olivat huonoimmillaan $> 10 \text{ k}\Omega$:n arvossa. Raitiotie vastaa rakenteeltaan sähköistämätöntä rataosaa ja siten R-J:llä on sovittu $< 100 \Omega$:n maadoitusarvosta elektrodeja mitattaessa. (11.) Seuraavassa kuvassa 10 on esimerkki pysäkkikeskuksen maan resistiivisyyden ja pysäkin MEB 2-kiskon välisestä resistanssista.



Kuva 10. Kuvassa on maadoitusarvon mittaamisessa käytettävä Chauvin Arnoux'n ca 6470N Terca 3 -mallista maan ominaisresistanssia mittaavaa laite.

Kuvan 10 mittauksessa on käytetty 3-pistemaadoitustekniikkaa, jossa PK:n maadoituselektrodista katsottuna on kytketty 2 sauvaa maahan, toinen 48 m:n päähän ja toinen 36 m:n päähän keskukselta. 3-pistemittauksessa etäisyys on aina 62 % ja 100 % mitattavasta kohteesta (31.)

3.1.2 Pysäkkikeskuksen sähkölaitteiden suojaus

Valittaessa johtojärjestelmiä on suojauskeinoja mietittävä usealta eri kannalta, esimerkiksi kuka pääsee kosketusetäisyyteen sähkölaitteista tai mitkä kaikki suojalaitteet ovat tarpeellisia lämmön ja oikosulkuvirran kannalta? R-J:lla pysäkkikeskuksissa keskuksien kaikki laitteet ovat lukittujen metalliovien takana, joissa on IP-44-luokan kosketussuojaukset. Lisäksi keskuksen sisäpuolella liittymiskaapelia suojaa IP-20-luokan kosketussuoja, jotta paljaat jännitteiset osat ovat turvassa vahingon aiheuttamalta kosketukselta. Pysäkkikeskuksien ulkopintojen maalikerrokset eivät aja pelkästään niiden esteettistä tarkoitusta, vaan ne suojaavat keskuksia korroosiolta sekä toimivat myös sähköä eristävänä kerroksena.

Pysäkkikeskuksien syöttökaapelina on käytetty kolmivaiheista AXMK-alumini-kaapelia. Jakeluverkon pisteen ja keskuksen välisiltä oikosulkuvirroilta suojattaessa keskuksien pääsulakkeiden koot vaihtelevat aina 3 x 35 A:n, 3 x 50 A:n ja 3 x 63 A:n välillä keskuksien näennäiskuormitusten mukaan. Keskuksien ylikuormitussuojaksi on valittu viidessä sekunnissa laukeavat gG-tyyppiset kahvapääsulakkeet, jotka on valittu seuraavien laskukaavojen perusteella. Tarvittava näennäisteho voidaan myös määritellä erotusmuuntajan tyyppikilvestä. (32, s. 7–16.)

Pysäkkikeskuksien kuormitusvirrat ovat laskettu riittävän liittymän näennäistehon mukaan. Näennäisteho lasketaan seuraavan kaavan 1 mukaan.

$$S = \frac{P}{\cos\varphi} \quad (1)$$

$\cos\varphi$ on virran ja jännitteen välinen vaihdekulma kosinissa.
 P on sähkölaitteiden ottama teho [W]
 S on sähkölaitteiden näennäisteho [VA]

Näennäistehosta voidaan puolestaan laskea keskukselle syöttävän verkkoyhtiön kaapelin nimellisvirta kaavan 2 mukaan, jonka perusteella voidaan valita sopivan pääsulakkeen koko.

$$I_N = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_p} \quad (2)$$

I_N on nimellisvirta [A]

U_p on pääjännite [V]

Nimellisvirran tuloksesta pohjalta voidaan syöttökaapelin sulakkeet valita pienimmän kuormitettavuuden perusteella alla olevasta taulukosta 2, joka on SFS-EN 6000-5-52:n (33) mukaisen johtimen kuormitettavuuden vähimmäisarvoille esitetyn kahvasulakkeen pienintä mahdollista oikosulkuvirtaa vastaava sulakkeen koko. (32.)

Taulukko 2. Kahvasulakkeiden edellyttämät pienimmät oikosulkuvirrat (32 s. 71).

gG-tyyppisen sulakkeen mitoitusvirta (A)	Johtimien kuormitettavuus vähintään (A)
6	8
10	13,5
16	18
20	22
25	28
32	35
35	39
40	44
50	55
63	70
80	88
100	110
125	138
160	177
200	221

3.1.3 Suojalaitteet

Pysäkkien sähkölaitteet ovat kytketty pysäkkikeskuksen sisällä olevan erotusmuuntajan toisiopuolen käämeihin. Kyseistä puolta kutsutaan ratasähköverkoksi (RSV), jossa sähkölaitteet on kytketty TN-C-S-järjestelmään. Sähkölaitteiden ryhmyksiä suunniteltaessa on sähkölaitteiden sijainnit suunniteltu niin, ettei yhden suojalaitteen taakse tule useita eri pysäkkien toimilaitteita, vaan jokainen laite on omassa suojausryhmässään. Tätä kutsutaan selektiivisyydeksi, jolla pystytään rajaamaan vikatilanteessa aiheutuneet sähköhäiriöt mahdollisimman pienelle alueelle. Selektiivisyys myös edesauttaa sähkölaitteiden huoltotoimpiteitä ja selkeyttää sähköisten ongelmien paikantamista niiden ilmaantuessa. (29, s. 43–45; 33, s. 10.)

Sähkölaitteiden suojausta on lisätty käyttämällä kaksoiseristettyjä materiaaleja ja tuplakotelointia esimerkiksi raitiotiekatoksien sisäpuolella. Sähkölaitteiden erillinen tuplaeristäminen ei ole standardin SFS-EN 50122:n (16) mukaisen suojausluokituksen vaatimuksen mukaista, vaan ainoastaan toimilaitteiden syöttö- ja maadoituskaapeleissa on toteutettava kaapelien tuplaeristäminen maasta. R-J:llä tätä vaatimusta on haluttu kuitenkin tulkita niin sanottuna ”tuplavarmennuksena”, joten kaikki toimilaitteet ovat kotelointiluokitukseltaan vähintään kaksoiseristettyjä. (17, s. 43; 25.)

Pysäkin kosketusalttiimmat laitteet ovat lisäksi lisäsuojattu standardin SFS 6000-1 lukujen 131. ja 132. (13) mukaisten vaatimusten perusteella vikavirtasuojakatkaisijoilla, jotta raitiotiesähköverkosta erotus tapahtuu mahdollisimman nopeasti vikavirran hetkellä (12). Seuraavassa taulukossa 3 on eritelty ryhmäkohtaiset pysäkillä olevat sähkölaitteet sekä niitä suojaavat suojalaitteet.

Taulukko 3. PK:n sähkölaitteet ja niiden suojalaitteet.

Ryhmän nimi	Ryhmätunnus	Ryhmän suoja-laite
Varalla	-1F1	B10/30mA Johdonsuojakatkaisija
Varalla	-2F1	B10/30mA Johdonsuojakatkaisija
Matkustajainfonäyttö 1	-3F1	B10/30mA Vikavirtasuojakytkin
Matkustajainfonäyttö 2	-4F1	B10/30mA Vikavirtasuojakytkin
Maksujärjestelmä varaus	-5F1	B10/30mA Vikavirtasuojakytkin
Maksujärjestelmä varaus	-6F1	B10/30mA Vikavirtasuojakytkin
Varaus 1	-7F1	B10/30mA Johdonsuojakatkaisija
Varaus 2	-8F1	B10/30mA Johdonsuojakatkaisija
Varaus 3	-9F1	B10/30mA Vikavirtasuojakytkin
Varaus 4	-10F1	B10/30mA Vikavirtasuojakytkin
Tietoliikenneosa lämmitys	-11F1	B10/30mA Johdonsuojakatkaisija
Tietoliikenneosa UPS HEL	-12F1	B10/30mA Johdonsuojakatkaisija
Tietoliikenneosa varalla 1	-13F1	B10/30mA Johdonsuojakatkaisija
Tietoliikenneosa varalla 2	-14F1	B10/30mA Johdonsuojakatkaisija
Tietoliikenneosa Ei-UPS HEL	-15F1	B10/30mA Johdonsuojakatkaisija
Mainosnäyttö JCDECAUXS, Varaus mainosnäyttö 1	-21F1	C20/30mA Vikavirtasuojakytkin

Mainosnäyttö JCDECAUXS, Varaus mainosnäyttö 2	-22F1	C20/30mA Vikavirtasuojakytkin
Raitiotiepysäkki valaistus ja infonäyttö	-28F1	B16/30mA Johdonsuojakatkaisija
Varalla	-29F1	B16/30mA Johdonsuojakatkaisija
Bussipysäkin valaistus ja infonäyttö	-30F1	B16/30mA Johdonsuojakatkaisija
Varalla	-31F1	B16/30mA Johdonsuojakatkaisija
Varalla	-32F1	Tyhjä
Varalla	-33F1	Tyhjä

Pysäkeillä kaapeloinnin minimipoikkipinta-alaksi on valittu 2,5-neliöinen kupari-kaapeli MCMK 2 x 2,5 + 2,5, jossa on 2,5-neliöinen konsentrinen johdinkerros, joka yhdistetään pysäkin maadoitusjärjestelmän PE-kiskoon. Näin saadaan kaikki jännitteelle alttiit osat kytkettyä järjestelmän vikasuojauksen automaattisen poiskytkennän piiriin. Lisäksi konsentrinen kaapelikuori toimii kaapelien EMC-suojauksena. Jos sähkölaite on kaukana ja oikosulkuvirran laskelmallinen arvo ei takaa ryhmälle tarvittavaa poiskytkentää, niin silloin voidaan vaihtoehtoisesti käyttää MCMK 2 x 6 + 6-kaapelia tai vaihtaa pienempään johdonsuojakatkaisijaan. (29, s. 11.)

Pysäkin raitiotiekatoksilla ja pysäkin ajokaistojen molemmilla puolilla sijaitsevilla bussikatoksilla on lisäksi omat paikalliset alakeskuksensa, joihin on sisällytetty B 10 / 16 A:n pääkytkin pysäkkikeskukselta tulevalle syöttökaapelille, paikallinen C 10 / 30 mA:n vikavirtasuojakytkin ja viikkokello. Viikkokellolla ohjataan mainostaulujen ja katoksen valaistusta. Paikallisilla vikavirtasuojilla on varmennuttu katoksen paikallisista suojauksesta niin sanotusti tuplavarmentein. Seuraavassa kuvassa 11 on malliasennus katoksen alakeskuksesta.



Kuva 11. Kuvassa näkyy Talin Siirtolapuutarhan pysäkin PK-13 bussikatoksen alakeskus, joka sijaitsee valaistun mainosvitriinin takana katoksen sisällä.

3.1.4 Sähkölaitteiden käyttöönottomittaukset

Pelkästään laskemalla todennetut sähkölaitteiden ryhmäsuojaukset eivät takaa varmuutta järjestelmän todelliselle sähköturvallisuudelle, vaan turvallisuudesta on saatava erillinen varmuus. Laskuja tehtäessä suunnitteluvaiheessa on haastavaa tulkita asennusten lopullisia muutoksia ja kaikkia ulkoisia tekijöitä ei vielä tiedetä, mitkä voisivat vaikuttaa laskutuloksiin. Esimerkiksi kaavassa 2 esitetty "c"-skalaariarvo jännitteen alenemalle, jota voidaan pitää normaalijakaumaan perustuvana yleispätevänä ohjeena. Jännitteen alenemaan vaikuttaa myös

maahan asennettujen kaapeliputkissa rinnakkain olevien kaapelien välinen indusoituminen. (32).

Pikaraitiotiepysäkkien sähköasennuksia tehtäessä asetusten laatimista ohjeistuksista ja niiden seuraamisesta on varmennuttu käyttämällä asennuskohtaisia ohjekortteja. Sähkölaitteiden turvallisuus todennetaan käytännössä mittaamalla ja valokuvaamalla toteutetut työt. R-J:lla mittaukset dokumentoidaan käyttöönottomittauspöytäkirjoilla. Käyttöönottomittaukset on suoritettu niille tarkoitetulla FLUKE-1663-tyyppisellä asennustesterillä. Kaikista pysäkkikeskuksista tehdään seuraavat alla olevan luettelman mukaiset mittaukset, jotka lisätään erillisinä liitetietoina käyttöönottopöytäkirjaan:

- aistinvarainen tarkastuspöytäkirja
- kaapelimittauspöytäkirja, joka sisältää kaikkien sähkölaitteiden suojaohjelmien jatkuvuus-, oikosulkuvirta- ja eristysvastusmittausarvot
- erotusmuuntajan mittauspöytäkirja, jossa on 3-vaiheisen erotusmuuntajan ensiö-, ja toisiopuolen väliset eristysvastukset, sekä erotusmuuntajan toisiopuolen käämien oikosulkuvirta mittauksien tulokset
- vikavirtasuojalaitteiden mittauspöytäkirja, jossa on todennettuna ryhmien vikavirtasuojalaitteiden todelliset laukaisu ajat ja -virrat. (21.)

3.2 Kosketusjännitteeltä suojaus (VLD)

Pysäkeillä olevat matkustajat on suojattava vaarallisilta kosketusjännitteiltä, joita voi syntyä jännitteelle alttiiden osien välille. Vaara voi sattua sähkölaitteiden viikaantuessa tai hetkellisten kuormitusten aikana. Kosketusjännitteen U_t suuruutta noudatetaan SFS EN-50122-1 (16) standardin vaatimuksien mukaisesti taulukon 4, jossa standardin asettama maksimikosketusjännite on esitetty ajan funktiona DC-järjestelmissä. (16.)

Taulukko 4. SFS EN 50122-1 mukainen vaatimus tasasähköjärjestelmän maksimikosketusjännitteestä ajan funktiona (16 s. 60).

t (s)	U_{te} max (V)
>300	120
300	150
1	160
0,9	165
0,8	170
0,7	175
<0,7	350
0,6	360
0,5	385
0,4	420
0,3	460
0,2	520
0,1	625
0,05	735
0,02	870

Raide-Jokerilla ratasähkön suojalaitteiden poiskytkentä ajaksi on sallittu 0,2 s, joten sen ylin sallittu kosketusjännite on taulukon 4 mukaan 520 VDC. Jotta vaatimukseen päästään, niin kaikkien pysäkkialueen maadoitusjärjestelmään kytkettyjen laitteiden on oltava suorassa yhteydessä VLD-O *Voltage limiting device - Operation*-tyyppiseen vaarallisia AC- ja DC-jännitteitä rajoittavaan laitteeseen. Näin vältetään suurien kosketusjännitteiden syntymiseltä matkustajien ja johtavien pintojen välillä. (16, s. 42–45.)

Raide-Jokerilla raitiolinjan varrelle asennetaan pysäkkialueille VLD-F *Voltage limiting device - Faults*-tyyppinen HLV *Hybrid Voltage limiter* - jännitelaitte, joka

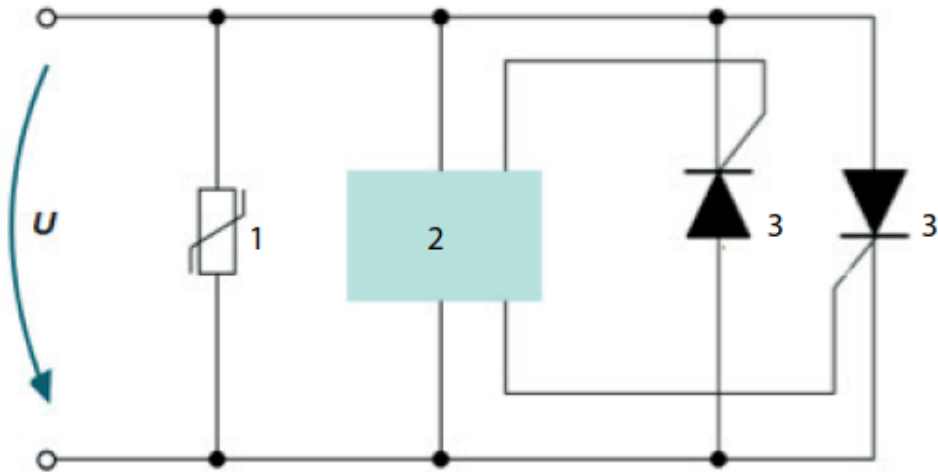
yhdistää pysäkin maadoitusjärjestelmän paluuvirtapiiriin eli paluuvirtakiskoon. VLD-laite kytketään paluuvirtakiskoon 1 x 95-neliöisellä halkaisevalla hienosäikeisellä kuparikaapelilla kaksoiseristetyn putken sisällä. Paluuvirtakiskon sijaitessa kauempana kuin 40 metriä täytyy VLD-laite liittää 2 x 95-neliöisellä kuparikaapelilla paluuvirtakiskoon. Kaapelien neliömäärä on laskettu kestäämään –750 VDC:n ratajohdon oikosulkuvirran. Kuparikaapelien päät kytketään kaapelikengillä paluuvirtakiskoon pulttiliitoksella kiskoon asennettavan kiskokotelon sisällä, jotta varmennutaan kaapeliliitoksen kosketuspinnan riittävydestä. (16, s. 42–45.)

VLD-laite sijoitetaan linjalle aina keskimäärin 125 m:n etäisyydellä toisistaan, kuitenkin siten, etteivät välit ylitä 150:tä metriä (ks. liite 3). Suuret välimatkat kasvattavat kosketusjännitteiden poiskytkentäaika, joka ei saa ylittää 0,2 sekuntia. Pysäkkialueella on myös oltava aina vähintään yksi VLD-laite. Kuvassa 12 on esitetty pysäkin kaapelikaivon maadoituskisko, johon on kytketty VLD. (16, s. 42–45.)



Kuva 12. VLD-laite kaapelikaivossa.

VLD-laitteen metallioksidinen ylijännitesuoja poistaa laitteen terminaalien kärkiin syntyvän lyhytkestoisen, enintään muutaman μs mittaisen aaltomaisen ylijännitteen, kuten salaman tai muun korkean samankaltaisen jännitepiikin. Jos terminaleihin kohdistuvat vikajännitteet ovat pitkäkestoisia, esimerkiksi useiden μs :n mittaisia, niin tyristorien laukaisurajat aktivoituvat asettaen tyristorien päät ekvipotentiaaliin keskenään ja vikavirrat johtuvat raidevirtapiiriin paluuvirtakiskoon. Tällaisessa vikatilanteessa paluuvirtapiirissä kulkevat oikosulkuvirrat tavoittavat SSA:n suojalaitteiston, joka katkaisee raidevirtapiiriin sähkönsyötön. Laukaisu-elektronikka vertailee VLD-laitteen terminaleihin kohdistuvaa jännitettä ja asettaa tyristorit takaisin johtamattomaan tilaan vikavirran hävitessä. (34, s. 1–4.) Alla olevassa kuvassa 13 on esitetty VLD-laitteen toiminnan piirikaavio.



Kuvan 13. Kuvassa on VLD-laitteen virtapiirikaavio. 1 Metallioksidiyljännitesuoja. 2 Laukaisuun tarvittava elektroninen piiri. 3. Vastakkain kytketyt tyristorit (34, s. 5).

Jos kestänyt vika on pitkäkestoinen, on hyvinkin mahdollista, että VLD-laite vaurioituu ajan myötä ja täytyy korvata. Vaikka kulunut VLD-laite takaa yhä kosketusjännitteistä aiheutuvien jännitteiden purkamisen kiskoon, sen kyky ehkäistä hajavirtojen läpivirtausta paluuvirtakiskosta raitiomaadoitusjärjestelmään heikentyy ajan myötä. Käytännössä vikatilaa käynyt laite täytyy poistaa virtapiiristä tai vähintään mitata uudestaan. VLD-laitteen mittaaminen tapahtuu asettamalla sen yli väliaikainen siltakytkentä ja irrottamalla laite järjestelmästä. VLD-laitetta mittaavan laitteen on oltava vaatimukseltaan vähintään Megger MIT 1025:n kaltainen, ja mittausalue toteutettava 500 V:n jännitteen, 100 V minuutissa, nousunopeudella. Laitteesta täytyy todeta 0,5–2 M Ω :n resistanssi noin 96–120 V:n laukaisurajaan asti. Testiä on toistettava vähintään kaksi kertaa ja uudelleen mittalaitteen päät toisin päin kytkettynä. Näin VLD voidaan todeta toimintakelpoiseksi, jos edellä mainitut mittausarvot saadaan todettua kaikista mittauksista. (34, s. 12.)

3.2.1 Paluuvirtapiiri ja hajavirrat

Raide-Jokerin raitiotien sähköjärjestelmän paluuvirtakisko on eristetty fyysisestä maasta niin sanotusta "vesimaasta", jotta mahdolliset tasajännitteen

aiheuttamat hajavirrat eivät pääse kiertämään niille toivomattomista paikoista. Hajavirrat ovat yleisiä tasajännitteisille järjestelmille ja aiheuttavat korroosiota varsinkin erinäisissä sähköä johtavissa saumakohdissa, jotka on asennettu paljaana maahan. Tästä syystä maan alle jäävät metalliset putkistojärjestelmät ja rakenteet on rakennettava vähintään 1,5 m:n päähän uloimman raiteen kohdalta, jotta paluuvirtakiskon ja rakenteen väliin jää riittävä maaeristys. Muussa tapauksessa rakenteet on eristettävä. Jos ulkorakenteisissa kohteissa maan eristystä ei tehdä oikein, voivat hajavirtojen aiheuttamat rakenteet kärsiä korroosion aiheuttamaa kulumaa. (15.)

Kiskojen eristämisen tärkein tehtävä on ehkäistä hajavirtojen vaikutusta raitiotien viereisissä metallirakenteissa. Kumisen eristeen lisäksi kiskon alle asennetaan kammiokumi, joka ehkäisee muun muassa metelin ja tärinän vaikutusta. Kiskojalan ympärille asennetaan kumieriste, joka ehkäisee hajavirtojen virtauskohtien syntymistä. Kiskoihin käytetty kumimateriaalin eristetaso ja sen poikkipinta on suunniteltu kestämään mahdolliset hajavirrat SFS EN-50122-2 (17) vaatimusten mukaisesti. Sepelirataosuuksilla ei käytetä eristepaloja vaan raidekiskot lepäävät kumisten liuskojen päällä. (35.) Kuvassa 14 on esitelty raidekiskojen eristystavat erilaisilla rataosuuksilla.



Kuva 14. Kuvassa on esitetty kiskojen eristys maasta erilaisissa rataosuuksissa.

Kuvan 14 vasemmassa laidassa on vesimaasta eristetty Vignole-mallinen kisko, keskellä on betonivalusta ja asfaltista erotettu urakisko-osuus, joka on upotettu kumieristeeseen. Oikeassa laidassa on sepelialueen Vignole-kisko, joka on kumipalalla eristettynä raidepölkkyjen päällä.

Hajavirta ilmiö johtuu kahden eri potentiaalissa olevan metallisen rakenteen ollessa keskenään sähköisessä kontaktissa ja samaan aikaan samassa elektrolyytissä. Raitiotiellä ajovaunun aiheuttama sähköpiiri luo potentiaalieron paluuvirtakiskon ja maassa menevän putkiston välille raitiovaunun liikkeessä tarkasteltavan rataosuuden yli. Rataosuudella maa toimii piirin keskeisenä elektrolyytinä. Metallien välillä tapahtuu kemiallinen reaktio, kun jalomman metallin, esimerkiksi kuparin, ionit reagoivat epäjalomman metallin, esimerkiksi teräksen kaltaisten rautaseoksien, atomien kanssa. Epäjalompi metalli käyttäytyy johdeparin anodina ja alkaa syöpymään suhteessa siitä läpi virtaavaan sähkövarauksen verran. Tämä kemiallinen reaktio pohjautuu Michael Faradayn elektrolyysilakiin, jonka mukaan hajavirran vaikutus teräsrakenteessa pystyy hapettamaan yhden ampeerin suuruisella jatkuvalla virralla jopa 9,1 kg suuruisen massan vuodessa. (37, s. 604.)

Hajavirtaa syntyy aina, mutta hyvällä eristyksellä voidaan sen haittavaikutuksia rajoittaa tehokkaasti. Pienetkin ongelmat paluuvirtakiskon eristämisessä kulminoivat hajavirtojen vaikutusta vuosien kuluessa. Hajavirtojen aiheuttama syöpyminen tapahtuu pääsääntöisesti aina elektrodien virtauskohdissa ja etenkin liitoskohdissa. Tästä syystä kaikki kiskoihin liitettävät yhdistyskohdat ja niiden momentit on asennusvaiheessa tarkastettava huolella, jottei syöpymisreaktiota edesauteta tahattomasti. Hajavirrat noudattavat virranjakolakia äärellisen eristyksen suhteessa. (16.)

3.2.2 Askeljännitteiden syntyminen

Pikaraitiotiepysäkille saapuva matkustaja ei välttämättä mieti, miten positiivisen paljaan paluuvirtakiskon pinnasta voisi saada sähköiskun siihen astuessaan, mutta kysymys on noussut puheenaiheeksi SAH:in kahvipöydässä.

”Hajavirrat eivät ole vaarallisia ihmisille” (25).

Lyhyt ja ytimekäs toteaminen Swecon suunnittelijalta J. hänen kuvaillessa hajavirtojen vaikutusta pysäkeillä. Raitiovaunujen liikkeessä on matkustajan mahdollista olla kosketuksissa kiskon paluuvirtapiiriin askeljännitteen muodossa. Kiskon ominaiskonduktanssi on kuitenkin niin suuri verrattaessa ihmisen ominaisvastusarvoon, että syntyvän virran jakautumislakiin perustuva askeljännite jää lopulta mitättömän pieneksi, lähes olemattomaksi. Samankaltaisesti hajavirrat eivät suoraan kohdista minkäänlaista hengenvaaraa niiden kokoluokan ollessa muutamien mA:n kokoisia impulssimaisia satunnaisia virtoja. Tämä pätee myös tilanteessa, jossa pysäkillä sijaitseva VLD-laite on vikaantunut. (25.)

Raitiotievaunun ylittäessä kohdan hajavirtojen täydellinen eliminointi ei ole kuitenkaan täysin mahdollista, sillä eristettyjenkin materiaalien välille syntyy pieniä potentiaalieroja. Standardissa SFS-EN 50122-2 (17) on annettu kiskoihin kohdistuville hajavirroille per pituusyksikköä keskiarvo, jota mittausvaiheessa ei saa ylittää. Jos mittavalla rataosuudella ei päästä toivottuihin arvioihin, on sen eristämisen tarkastettava. Yksiraiteisella osuudella tämä on 2,5 mA / m ja kaksiraiteisella osuudella 5 mA / m. (18.)

Materiaaliturvallisuuden takaamiseksi on raitiotielinjan rataosuudella syntyvät hajavirrat mitattava. Mittaus tapahtuu kiskoimpedanssia mitattaessa maata vasten, kun yhtenäistä rataa on rakennettu noin 1–2 km:n verran. Tällöin kiskoon saadaan riittävän suuri virta mittaustarkkuuden varmistamiseksi. Kääntöpuoleisesti liian pitkä rataosuus voi antaa epätarkan tuloksen, joten mittaukset ovat toteutettu myös jo raiteiden rakennusvaiheessa kiskojen ollessa lyhyinä noin muutaman metrin pituisina pätkinä. Lyhyistä mittaussuosuksista saatuja tuloksia voidaan näin ollen pitää referenssiarvoina, joilla varmennutaan lopullisten mittauksien tarkkuudesta. (21.)

3.3 Ukkossuojaus

Joka sekunti maapallolla on käynnissä keskimäärin 1000 ukonilmaa ja purkauksia tapahtuu satoja salamoiden muodossa. Ukkosen aiheuttamat maan ja ionosfäärin väliset purkaukset eli salamat ovat jossain määrin raitiotie- ja rautatiejärjestelmissä vikoja aiheuttava sääilmiö. Kuten korkeat rakennukset, avojohdinjärjestelmät voivat tulla alttiiksi salamaniskuille korkeiden pylväiden ollessa ukkosen esipurkautumisalueella. Suora salamanisku tai lähistölle iskeytyneen salaman indusoituminen raitiovaunun ajojohdinjärjestelmään aiheuttavat paikallisia ylijännitteitä ajojohdinjärjestelmissä, mitkä leviävät 300 m / μ s järjestelmän johdoissa, elleivät ne pääse purkautumaan maahan. Suoran iskun aiheuttamat ylijännitteet voivat olla hyvinkin suuria, jopa useita miljoonia voltteja, ja hetkellinen terminen vaikutus jopa 30 000 K:n luokkaa. (37, s. 11–12.)

Johtimeen iskenyt salama aiheuttaa johtimessa syöksyjännitteen, joka etenee johtimessa syöksyvirtapulssimaisina kulkuaaltoina aina johtimen epäjatkuuuskohtaan asti. Tällaisia epäjatkuuuskohtia voivat olla esimerkiksi maadoituselektrodien päätepisteet, erotusmuuntajat, ajojohdinten ryhmäeristimet, kaapelin liitoskohdat tai kaapelipäätteet. Yleisen aaltoteorian mukaan salaman muodostama impulssi kaksinkertaistuu kohdatessaan epäjatkuuuskohdan ja heijastuu siitä takaisin. Tästä syystä kaikkien ratajohtoryhmien päihin pitää asentaa vähintään yksi ylijännitesuojalaite, joka ei päästä salaman ylijännitettä kasvamaan heijastumisen vaikutuksesta vaan purkaa sen maahan siirtymällä johtavaan tilaan. Ylijännitesuojien tehtävä on siis toimia salaman ohjattuna läpilyöntipisteinä maahan. (11.)

Ylijännitesuojat asennetaan kaksiosaisen radan molempiin syöttökaapeleiden lähtöihin ja niiden toinen pää kytketään syöttöpylvään juuressa olevaan syvämaadoituselektrodiin. Pylväiden juurelle asennettu syvämaadoituselektrodi toimii ikään kuin suorimpana reittinä maahan salaman iskiessä. Maadoituselektrodit ovat salaman niihin iskeytyessä kovan rasituksen alla, ja niiden toiminnallisuus on ajoittain siksi myös tarkastettava. (11; 38.) Alla olevassa kuvassa 15 on Raide-Jokerin syöttöpylväälle asennettu Siemensin valmistama ylijännitesuoja.



Kuva 15. Siemensin valmistama 3EB4-tyyppin ylijännitesuoja (39).

Kulkuaaltojen käyttäytyessä hieman eri lailla kuin sähköpiirille laskettu tasajännite, on sitä tarkasteltava aaltoimpedanssinsa mukaan, jolloin sen etenemisessä syntyvien häviöiden suuruuteen vaikuttaa sen etäisyys maasta ja muista johtimista sekä johdinjärjestelmän rakenteista. Maadoitusjohdoissa salaman etenemisnopeus on vain kolmasosan valonnopeudesta. Johtimien pituus tai poikkipinta ei varsinaisesti vaikuta aaltoimpedanssin suuruuteen. Tutkitusti ilmaan asennetun avojohtimen impedanssi on keskimäärin 300–500 Ω :n luokkaa. Johdon päässä tai epäjatkuvuuskohdassa kulkuaallon impulssi kaksinkertaistuu eli salaman amplitudi myös kaksinkertaistuu. Tästä syystä varsinkin maadoituksissa on suositettava monihaaraisia rengasmaisia elektrodeja, jotta maadoituksen heijastumisilmiö jäisi mahdollisimman vähäiseksi (37, s. 11–27; 38.)

Salamien aiheuttamaa vaikutusta ratasähköverkossa on mahdotonta täydellisesti ennalta arvioida, sillä salama voi levitä esimerkiksi takaiskun muodossa pysäkkikeskuksen vaihdejohtimiin raitiotiemaadoituskiskon kautta. Takaisku on ilmiö, jossa maadoitettavien osien ja vaihdejohtimien välille syntynyt potentiaaliero on kasvanut maadoituksessa niin suureksi, että näiden kahden välinen jännitelujuus ylittyy ja syntyy läpilyöntivirtaus maadoituksesta vaihdejohtimiin.

Pysäkillä oleva erotusmuuntaja suojaa jakeluverkon puolta takaiskulta lähestulkoon täydellisesti. Takaiskun vaikutuksen piiriin jää siten kuitenkin suojalaitteiden perässä olevat laitteet, joiden vika- ja johdonsuojaksi on valittu 30 mA:n nimellislaukaisuvirralla toimivia suojalaitteita. (11.) Seuraavassa laskukaavassa 3 tarkastellaan ohmin lakiin perustuen, onko alle 100 Ω:n maadoituskiskoon liitetty vikavirtasuojalaiteryhmä suojassa mahdollisten takaiskujen vaikutukselta.

$$V = I * R \quad (3)$$

V on voltteja
 I on virtaa
 R on resistanssia

Noin 50 voltin kosketusjännitteellä ihmisen ihon jännitesietoisuus ylittyy, jolloin kaikki suuremmat jännitteet voidaan katsoa vaaralliseksi. Seuraavissa epäyhtälöissä lasketaan suojalaitteiden toiminnan kannalta vähimmäisvastusarvo pysäkkikeskuksen maadoituselektrodille, kun poissulkuaika saa olla enintään 200 μs. Haetaan taulukosta (liite 6) laukaisuaikaan lisättävä k-kerroin. (37; 40, s. 46)

$$V \geq I_{n\Delta} * k * R \quad (4)$$

V on vaarallinen kosketusjännite (50V)
 $I_{n\Delta}$ on vikavirtasuojan nimellislaukaisurajavirta (30mA)
 k on liitteen 6 mukainen vikalaitteen korjauskerroin.
 R on maadoituksen resistanssiarvo.
 muutettuna ratkaisuksi maadoituksen maksiresistanssi.

$$R \leq \frac{50V}{5 * 0,03A} \quad (5)$$

$$R \leq 333,3\Omega \quad (6)$$

Aikaisemmin todettu tilaajan kanssa sovittu elektrodin maadoitusarvo < 100 Ω toteutuu. Samalla kaavalla on laskettu pysäkkien johdonsuojasulakkeiden maadoitusvastusarvot (11, s. 3).

Tästä syystä pikaraitiotiepysäkkien pylväät on maadoitettu suorana johtamaan pysäkkikaivojen välityksellä sekä maahan että VLD-laitteen kautta

paluukiskoon. VLD-laite toimii pysäkillä sijaitsevien maadoitettavien osien tärkeimpänä ukkossuojauksena sen purkaessa salaman vaikutusta paluuvirtakiskoon ja sitä kautta sähkönsyöttöasemien katkaisimiin. (34.)

4 Pohdintaa

Raide-Jokeri-allianssin pikaraitiotiepysäkkien maadoittamisessa ongelmalliseksi muodostui se, ettei alun suunnitteluvaiheessa ollut sellaista selkeää ohjetta saatavilla, josta olisi voinut ymmärtää VATU-alueen aiheuttaman kaksiosaisen maadoituksen ja erottamisen tarpeen. Tieto ei ollut kaikille yleisesti saatavilla vaan piilossa standardeissa ja ammattilaisten kokemuspohjaisen tietämyksen varassa. Yleisesti suunnittelijoilla sekä aliurakoitsijoilla oli täten hankala hahmottaa, mitä maadoitusjärjestelmien välinen erottaminen tarkoittaa käytännössä. Liitteen 7 tyyppinen maadoitusohje auttaa hahmottamaan maadoittamista käytännössä.

Liitteestä 7 voi hahmottaa, miten pysäkille (VATU-alueen sisäpuolelle) tuotu keskus täytyy muuttaa sisäiseltä rakenteeltaan, jotta toimiva maadoittaminen on mahdollista. Jos keskuksen lisäksi tuodaan muita keskuksia, kuten liikennevalo, ulkovalo tai sähköjakeluverkon keskuksia, on keskuksien välinen 2,5 m:n vähimmäismitta otettava huomioon. Suunnittelijoilla on tapana yleisen esteettisyyden nimissä suunnitella keskuksat lähelle toisiaan, kuten aikaisemmassa luvun 3 kuvassa 8 näkyi. Jos näin kuitenkin tehtäisiin pysäkeillä, olisi keskuksien rungot kaksoiseristettävä, rakennettava johtamattomasta materiaalista, kuten kovamuovista, ja varmennuttava riittävän pienestä elektrodien maadoitusvastusarvosta. Pienet maadoitusarvot voivat pahimmassa tapauksessa johtaa järeisiin ja erittäin kalliisiin maadoittamistoimenpiteisiin.

5 Yhteenveto

Tässä insinööriyössä tutkittiin pikaraitiotiepysäkkien kokonaisvaltaisia suojausmenetelmiä, joilla todistetaan luotettava matkustajien, eläinten ja omaisuuden suojaus. Työn tarkoituksena oli tuoda ilmi pysäkkien maadoituksiin liittyvät yleisimmät standardit ja tarkastella, miten maadoitukset on käytännössä toteutettu pysäkeillä, jotta suojausmenetelmät toimivat määräyksissä osoitetulla tavalla.

Insinööriyössä osoitettiin, että pikaraitioteiden omalla raitiomaadoitusjärjestelmällä on selkeä merkitys turvallisuuden toteutumiselle vaarallisten vikavirta- ja kosketusjännitteiden ilmentymishetkillä. Tarkasteltaessa mainittuja pysäkkialueelle tyypillisiä vaaratekijöitä insinööriyössä pyrittiin osoittamaan, että niillä kaikilla on omat suojausmenetelmänsä mutta kuitenkin yhdistävä tekijä: niiden suojamaadoittaminen. Raitioteiden maadoitusjärjestelmien toiminta ei ole muihin maadoitusjärjestelmiin verrattaessa luonteeltaan erityisen poikkeava, sillä pääsääntöisesti maadoitusverkon tehtävä on toimia vika- ja oikosulkuvirtoja ohjaavana potentiaalintasauksena, jonka jälkeen suojalaitteiden pääperiaatteena on puolestaan katkaista vikaantuneen piirin jännitesyöttö. Näiden kahden yhdistelmää sovelletaan yleisesti maadoitusverkkojen sähkörakentamisessa.

Tutkimuksessa ilmeni poikkeavaksi elementiksi tasajännitteen aiheuttama hajavirtailmiö ja sen edellyttämä eristysuojaus, joka tekee järjestelmästä itsenäisen ja muusta erotettavan sekä toiminnalliselta kannaltaan erikoisen.

Insinööriyön haasteena oli pysäkeille tehtävien mittaustöiden keskeneräisyys, minkä takia esimerkiksi kosketusjännitteiden simuloinnin mittauksia ei päästy esittelemään tässä insinööriyössä käytännönläheisemmästä näkökulmasta. Työn aloituspalaverissa yhdeksi lähtökohdaksi sovittiin käytännönläheinen esittely pikaraitiotiepysäkeille toteutetuista maadoitusratkaisuista. Käytännönläheisiä perusteluja ratkaisuille osoittautui kuitenkin olevan vähemmän, kuin mitä ehkä aluksi ymmärrettiin, joten insinööriyön perustelutyö jäi enemmän standardien ja laskujen osoitettavaksi. Aiheeseen viittaavia standardeja löytyi

puolestaan paljon, ja niitä on tuotukin paljon enemmän esille kuin mitä työn alussa oli suunniteltu.

Insinööriyön tutkimustulosten pohjalta korostui, että raitiotieverkon maadoitusten rakentamisen huolellinen seurata on ehdotonta. Raide-Jokerin projektissa pikaraitiotiepysäkkien rakentamisen rakennusohjeiden seuraaminen, dokumentointi, mittaaminen ja maadoitusten kuvaaminen ovat keskeisemmät tavat pyrkiä todentamaan, että laitteistot on rakennettu turvallisesti. Standardeja noudattamalla yritys takaa pysäkkien sähkölaitteiden turvallisuuden tarvitsematta erityisemmin esittää perusteluja suojuksille, mikä toimii yrityksen omana oikeusturvana. Yrityksien näkökulmasta on huomattavasti yksinkertaisempaa noudattaa standardien asettamia ohjeistuksia kuin alkaa perustella niiden turvallisuutta tiilajalle erikseen.

Mielestäni tässä insinööriyössä on kattavasti käyty läpi erilaisia mahdollisia sähköisiä vaaratekijöitä erilaisten skenaarioiden kannalta. Työtä olisi voinut laajentaa myös perustelemaan tarkemmin syöttöasemien raidevirtapiirin kuormitus- ja oikosulkuvirtojen sulkujärjestelmiä, mutta tämän insinööriyön aluerajauksessa työn päätavoitteena oli tuoda ilmi pikaraitiotiepysäkkien turvallisuuden ratkaisuja.

Lähteet

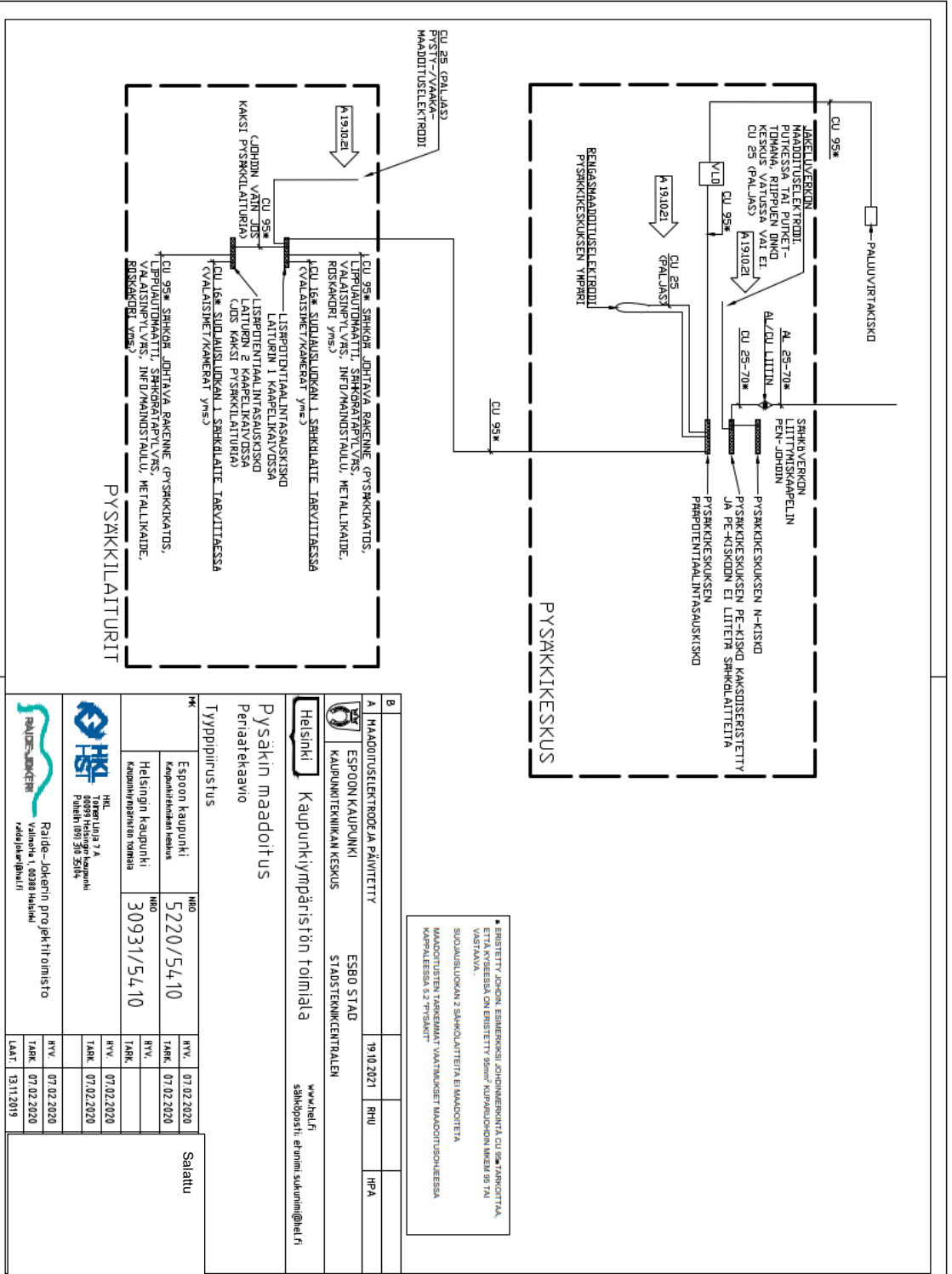
- 1 Silvo, Anton. 2021. Raitioteiden pysäkkien ja jalankulkijaylityksen kehittämistoimenpiteet. Verkkoaineisto. Helsingin Kaupunki & Kaupunkiympäristön julkaisuja. <<https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/aineistot/aineistoja-05-21.pdf>>. 31.05.2021. Luettu 11.12.2022.
- 2 Raide-Jokeri Hankesuunnitelma. 2015. Verkkoaineisto. Espoon ja Helsingin kaupungit. <<https://raidejokeri.info/wp-content/uploads/2016/01/hankesuunnitelma.pdf>>. 30.01.2016. Luettu 11.12.2022.
- 3 Silvo, Anton & Rätty, Lauri. 2017. Raitioliikenteen kehittämissuunnitelma. Verkkoaineisto. Helsingin Kaupunki & Kaupunkiympäristön julkaisuja. <<https://www.hel.fi/static/liitteet/kaupunkiymparisto/julkaisut/julkaisut/julkaisu-09-17.pdf>>. 01.09.2017. Luettu 11.12.2022.
- 4 Mikä Raide-Jokeri. 2018. Verkkoaineisto. Raide-Jokeri-allianssi. <<https://raidejokeri.info/mika-raide-jokeri/>>. Päivitetty 21.11.2022. Luettu 11.12.2022.
- 5 Tampereen raitiotieallianssi. 2015. Verkkoaineisto. Tampereen Raitioallianssi. <<https://raitiotieallianssi.fi/tampereen-raiotie/>>. Päivitetty 08.12.2022. Luettu 11.12.2022.
- 6 Onkinen, Paavo. 2021. Allianssiperehdytysmateriaali. Yrityksen sisäinen asiakirja. Raide-Jokeri-allianssi.
- 7 Vilberg, K. 2019. Raide-Jokerin Pikaraitiotie, Sähkötekniset järjestelmät, Syöttöasemat. Raide-Jokeri-allianssi. Yrityksen sisäinen asiakirja.
- 8 Gröhn, Arttu. 2022. Työmaamestari, NRC Group Oy, Helsinki. Keskustelu 17.8.2022.
- 9 NRC Group. 2022. Verkkoaineisto. NRC Group Oy <<https://nrc-group.com/>>. Päivitetty 24.11.2022. Luettu 11.12.2022.
- 10 *Result Report – 2nd quarter and 1st half year*. NRC Group. 2022 Yhtiön tulostiedote. NRC Group Oy. 18.08.2022.
- 11 Junno, Kristian. 2022. Riskien arviointi. Luentomoniste. Metropolia Ammattikorkeakoulu.

- 12 Männikkö, Jorma. 2021. Syvämaadoitukset ukkosuojauksen kannalta. Yrityksen sisäinen asiakirja. Sweco Oy.
- 13 SFS 6000. Sähköasennukset osa 1. Pienjänniteasennukset. 2017. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.
- 14 SFS 6001. Sähköasennukset. Suurjänniteasennukset ja ilmajohdot. 2017. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.
- 15 SFS 6002. Sähköasennukset osa 2. Sähköturvallisuus. 2017. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.
- 16 SFS-EN 50119. Railway applications. Fixed installations. Electric traction overhead contact lines. 2020. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.
- 17 SFS-EN 50122-1. Railway applications. Fixed installations part 1. Protective provisions relating to electrical safety and earthing. 2011. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.
- 18 SFS-EN 50122-2. Railway applications. Fixed installations part 2. Provisions against the effects of stray currents caused by d.c. traction systems. 2011. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.
- 19 EN 50612. Protection against stray current from direct current systems. 2005. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.
- 20 EN 50613. Railway applications. Supply Voltages of traction systems. 2003. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.
- 21 Ratia, Kyösti. 2020. Sähköturvallisuuden Riskien Arviointi. Yrityksen sisäinen asiakirja. Raide-Jokeri-allianssi.
- 22 Aitamurto, Jore. 2022. Projektipäällikkö, NRC Group Oy, Helsinki. Keskustelu. 17.8.2022.
- 23 Huhtamäki, Raimo. 2020. Raide-Jokeri Pikaraitiotie, Sähkö- ja tekniset järjestelmät, maadoitus- ja sähköturvallisuusohje. Yrityksen sisäinen asiakirja. Raide-Jokeri-allianssi.
- 24 Häkkinen, Ensio. 2021. Turvallisuussuunnitelma, Avarn riskienhallintasuunnitelma, kameravalvonnat. Yrityksen sisäinen asiakirja. Avarn Security Oy.
- 25 Hautamäki, Valtteri. 2022. Projekti-insinööri, NRC Group Oy, Helsinki. Keskustelu. 4.11.2022.

- 26 Männikkö, Jorma. 2022. Sähkösuunnittelija, Sweco Infa and Rail Oy, Helsinki. Keskustelu 17.09.22.
- 27 Lahtinen, Tero. 2022. Raide-Jokerin sähköturvallisuuden eritysratkaisut – ohje kunnossapitäjälle. Yrityksen sisäinen asiakirja. Sweco Oy.
- 28 Mäkelä, Noora. 2018. Ajojohtimen korkeusvaihtoehdot. Yrityksen sisäinen asiakirja. Raide-Jokeri-allianssi.
- 29 Huhtamäki, Raimo. 2020. Raitiotien maadoitusperiaate, Asennusperiaate. Yrityksen sisäinen asiakirja. Raide-Jokeri-allianssi.
- 30 SFS-6000-1. Pienjännitesähköasennukset osa 1. Peruseriaatteet, yleisten ominaisuuksien määrittely ja määritelmät. 2012. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.
- 31 Mäkinen, Pertti. Maadoituskirja. 2019. Helsinki: Painokurki.
- 32 Onkinen, Paavo. Pysäkkialueen maadoitustyöt. 2020. Yrityksen sisäinen asiakirja. Raide-Jokeri-allianssi.
- 33 SFS 6000-5-52. Pienjänniteasennukset. 2012. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.
- 34 Hietala, Niko. 2015. Johdon mitoitus ja suojaus. Lahden Ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.
- 35 Voltage Limiting Device. 2018. ABB Switzerland Ltd. Yrityksen sisäinen asiakirja. Raide-Jokeri-allianssi.
- 36 SFS – EN 50122 – 2. Railway applications. Fixed installations part 2. Provisions against the effects of stary currents caused by d.c. tractions systems. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.
- 37 Vaarnas, Kalle. 1973. Otava Iso Fokus, Elektrolyysi. Helsinki: Kustantamo Otava.
- 38 Elovaara, Jarmo; Lavikainen, Risto; Pasanen, Lauri; Tertsunen, Sirpa; Vehmainen, Kari; Ylönen, Tuomo. 1994. Ylijännitesuojaus. Espoo: Sähköurakoitsijaliiton koulutus ja kustannus.

- 39 Salama ja ukkonen. 2022. Ilmatieteen Laitos. Verkkoaineisto. <<https://www.ilmatieteenlaitos.fi/salama-ja-ukkonen#0>>. Päivitetty 10.12.2022. Luettu 11.12.2022.
- 40 Siemens Surge Arrester 3EB4. 2022. Verkkoaineisto. <<https://www.directindustry.com/prod/siemens-high-voltage-power-transmission/product-32878-2231673.html>>. Päivitetty 02.2.2022. Luettu 11.12.2022.
- 41 Ahoranta, Jukka. Sähkötekniikka. 2012. Helsinki: Sanoma Pro.
- 42 Pandrol. 2022. Verkkoaineisto. <<https://www.pandrol.com/product/q-track/>>. Päivitetty 10.10.2022. Luettu 11.12.2022.
- 43 SFS-EN 60909-0. Short-circuit currents in three-phase a.c. systems part 0. Calculation of currents. 2016. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto.

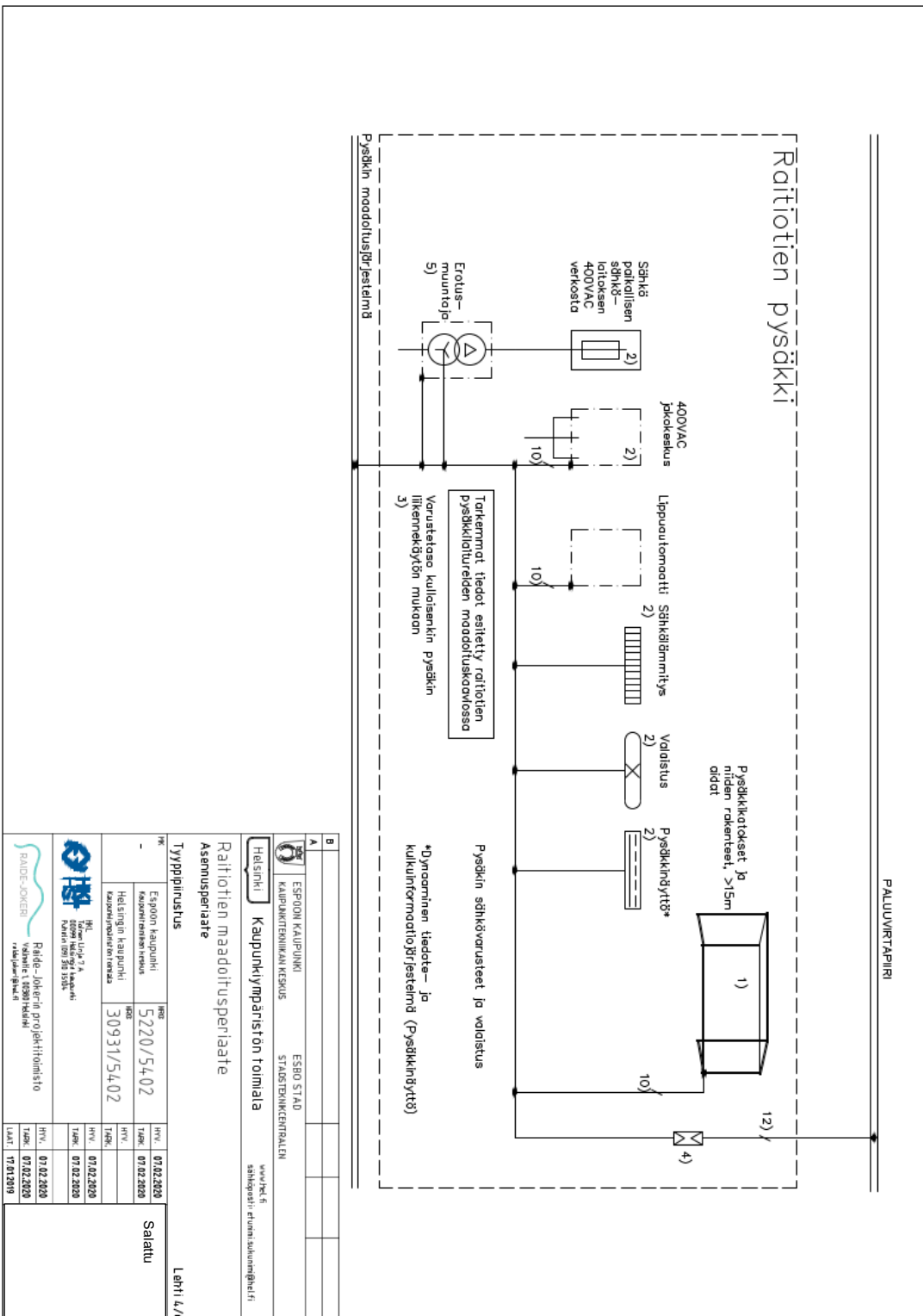
Liite 1. Pysäkkien maadoitus periaatekaavio



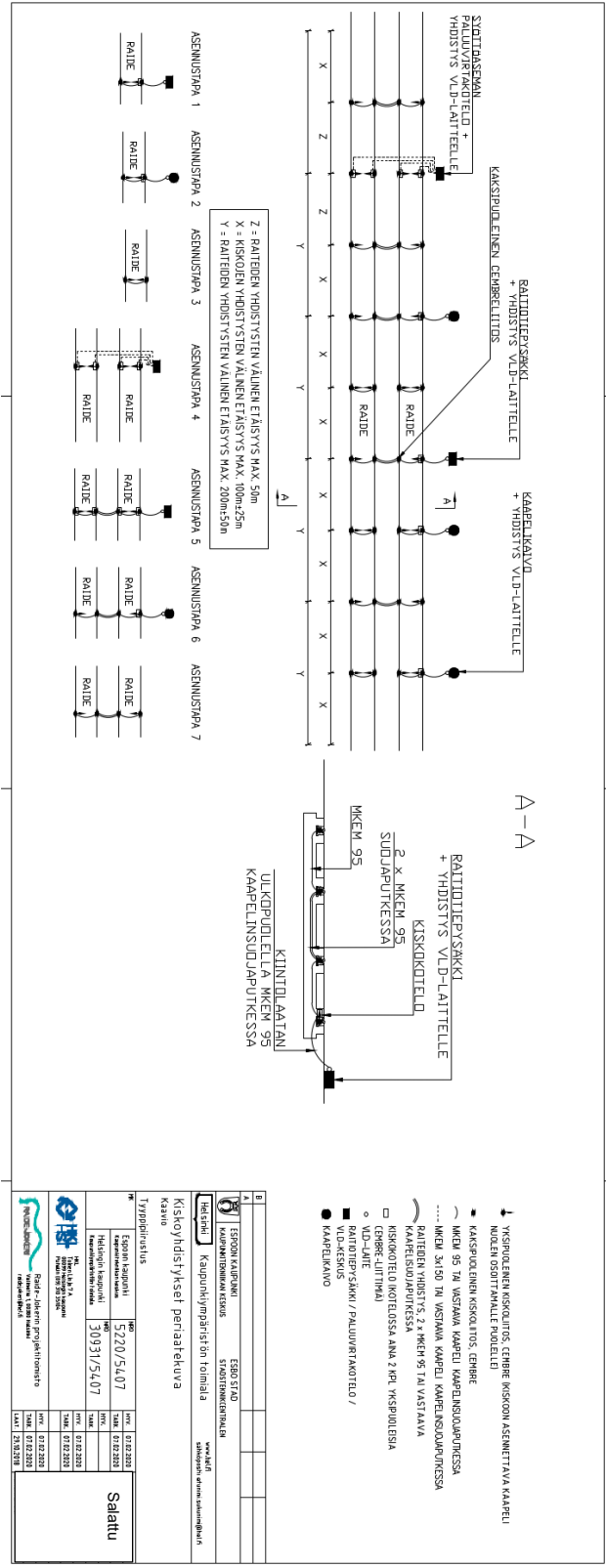
• ENNETTY JONKIN ESIMERKSI JONKINENKUNTA CU 95* TÄRKEÄTÄÄ ETTÄ KÄYSSÄ ON ENNETTY 950V KUPARIDODIN KENNIN TAI VASTAVA.
SUOJAUSLUOKAN 2 SÄHKÖLÄITTEITÄ EI MAADOITETA MAADOITUSTEN TÄRKEÄTÄ VÄÄTÄMUKSET MAADOITUSOHJEISSA KAPPALEISSA 5.2 "PIEÄÄT"

B1		MAADOITUSELEKTRODI JA PÄÄTETTY		19.10.2021		RHU		HPA	
A		ESPOON KAUPUNKI		ESBO STAD					
		KAUPUNKITEKNIIKAN KESKUS		STAOSTEKNIKKENTRALEN					
Helsinki		Kaupunkiympäristön toimiala		www.hel.fi		sähköposti: etnimi.suuronni@hel.fi			
Pysäkin maadoitus Periaatekaavio									
Tyypipiirustus									
Espoon kaupunki		HNO		5220/5410		HYV.		07.02.2020	
Kaupunkitekninen osasto		HNO		30931/5410		TARK.		07.02.2020	
Helsingin kaupunki		HNO				HYV.			
Kaupunkiympäristön toimiala		HNO				TARK.		07.02.2020	
HIL		Toukokuu 7 A				HYV.		07.02.2020	
00090 Helsingin kaupunki		Puhelin 09 31 56 5014				TARK.		07.02.2020	
RAIDE-JOHDE		Raide-Johde:n projekti omisto				TARK.		07.02.2020	
Valiokunta 1, 00380 Helsinki						LAAT.		13.11.2019	

Liite 2. Raitiotien maadoitusperiaate



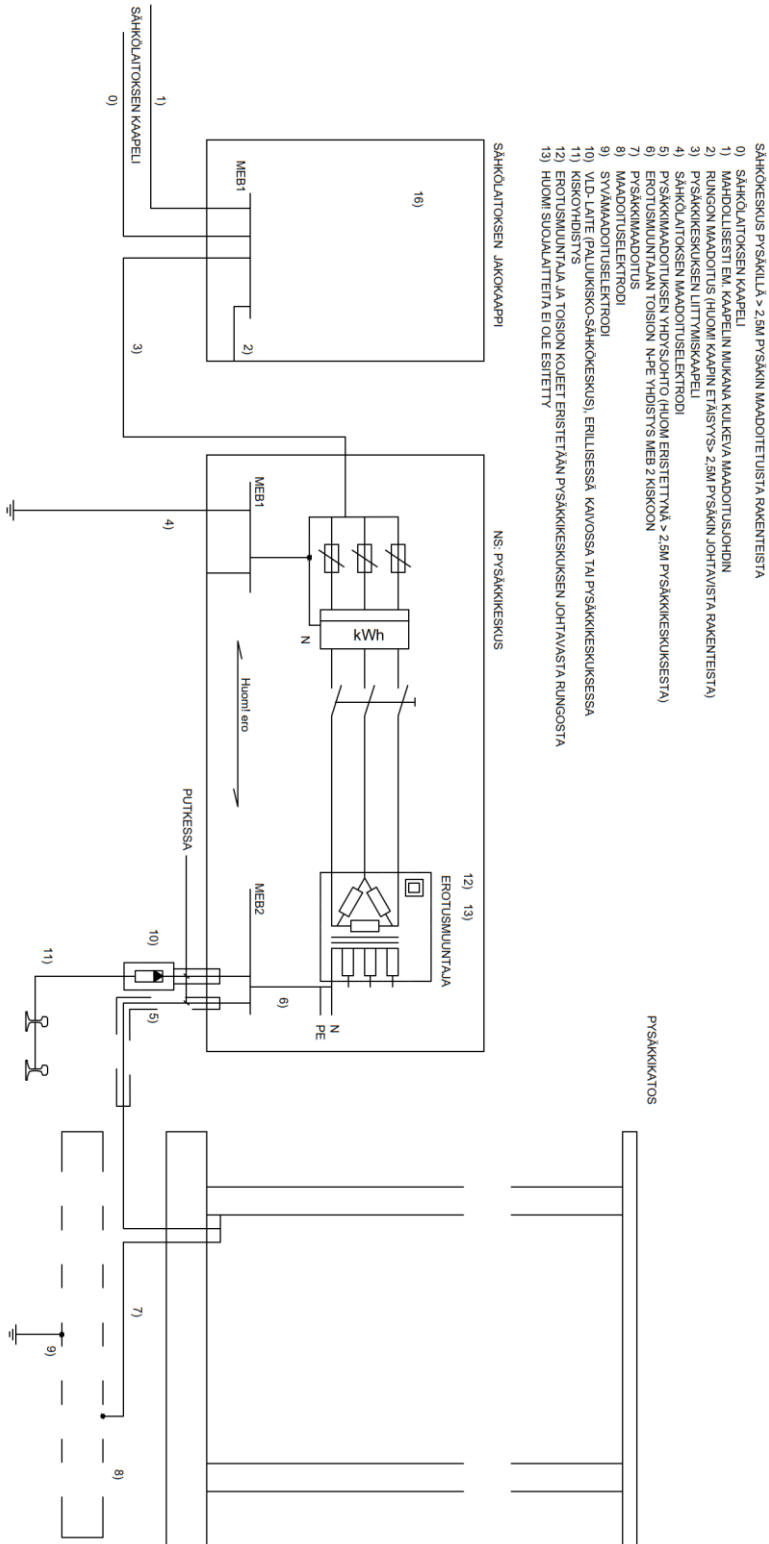
Liite 3. Kiskoyhdistykset periaatekuva



A	ESKON KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
B	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
C	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
D	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
E	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
F	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
G	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
H	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
I	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
J	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
K	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
L	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
M	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
N	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
O	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
P	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
Q	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
R	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
S	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
T	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
U	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
V	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
W	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
X	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
Y	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
Z	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
aa	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ab	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ac	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ad	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ae	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
af	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ag	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ah	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ai	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
aj	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ak	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
al	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
am	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
an	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ao	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ap	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
aq	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ar	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
as	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
at	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
au	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
av	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
aw	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ax	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ay	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
az	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ba	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bb	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bc	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bd	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
be	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bf	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bg	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bh	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bi	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bj	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bk	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bl	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bm	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bn	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bo	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bp	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bq	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
br	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bs	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bt	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bu	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bv	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bv	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bw	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bx	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
by	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
bz	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ca	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cb	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cc	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cd	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ce	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cf	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cg	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ch	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ci	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cj	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ck	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cl	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cm	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cn	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
co	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cp	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cq	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cr	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cs	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ct	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cu	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cv	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cv	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cw	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cx	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cy	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
cz	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
da	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
db	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
dc	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
dd	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
de	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
df	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
dg	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
dh	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
di	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
dj	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
dk	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
dl	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
dm	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
dn	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
do	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
dp	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
dq	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
dr	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ds	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
dt	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
du	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
dv	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
dv	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
dw	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
dx	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
dy	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
dz	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ea	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
eb	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ec	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ed	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ee	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ef	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
eg	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
eh	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ei	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ej	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ek	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
el	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
em	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
en	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
eo	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ep	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
eq	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
er	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
es	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
et	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
eu	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ev	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ev	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ew	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ex	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ey	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ez	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fa	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fb	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fc	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fd	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fe	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ff	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fg	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fh	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fi	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fj	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fk	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fl	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fm	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fn	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fo	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fp	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fq	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fr	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fs	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
ft	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fu	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fv	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fv	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fw	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fx	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
fy	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	
gz	KÄYTTÖNÄ	ESKON ELO	

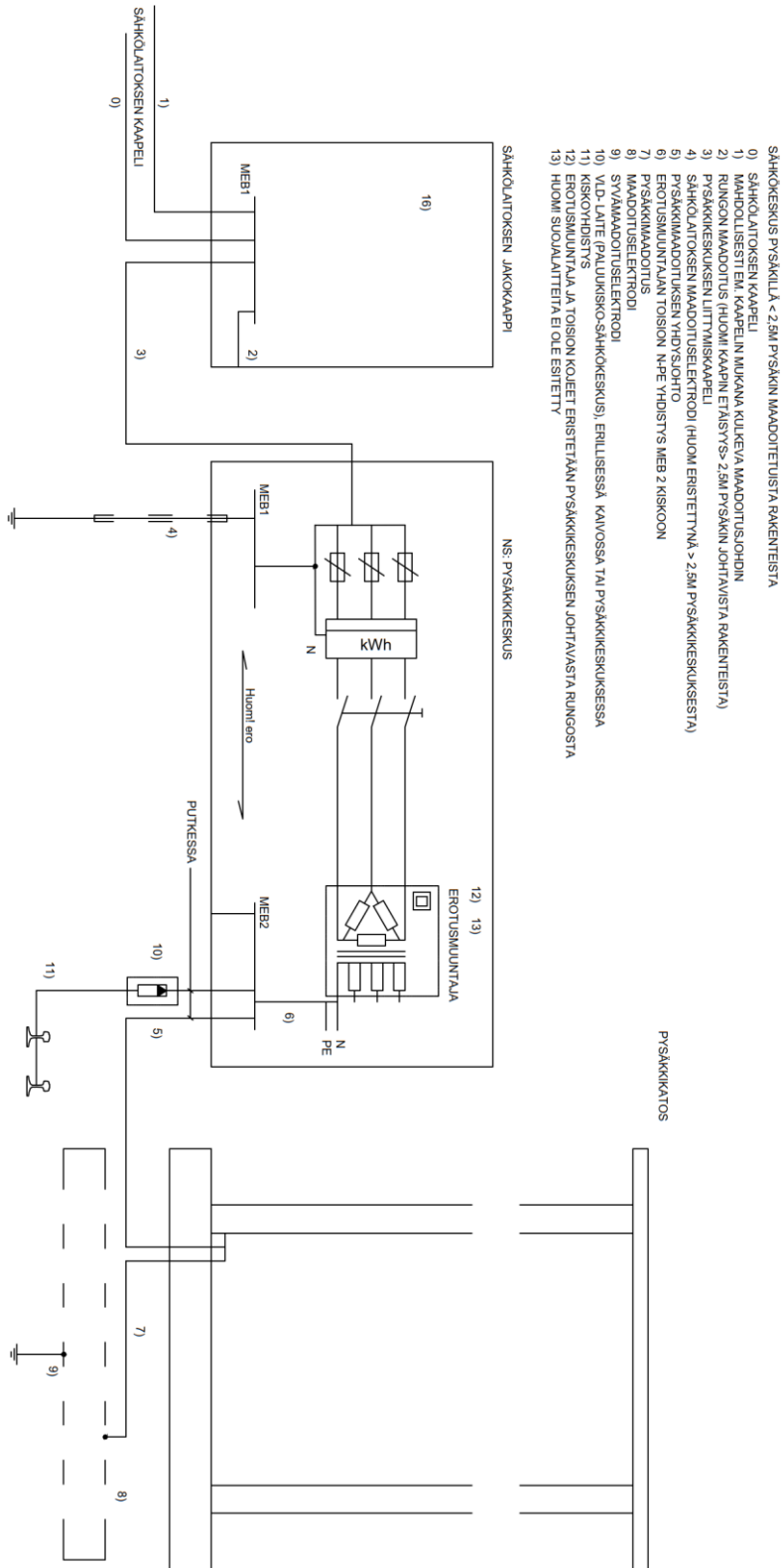
Salttu

Liite 4. Pysäkkikeskuksen maadoitusperiaate, kun pysäkkikeskus on pysäkki- tai VATU-alueen ulkopuolella:



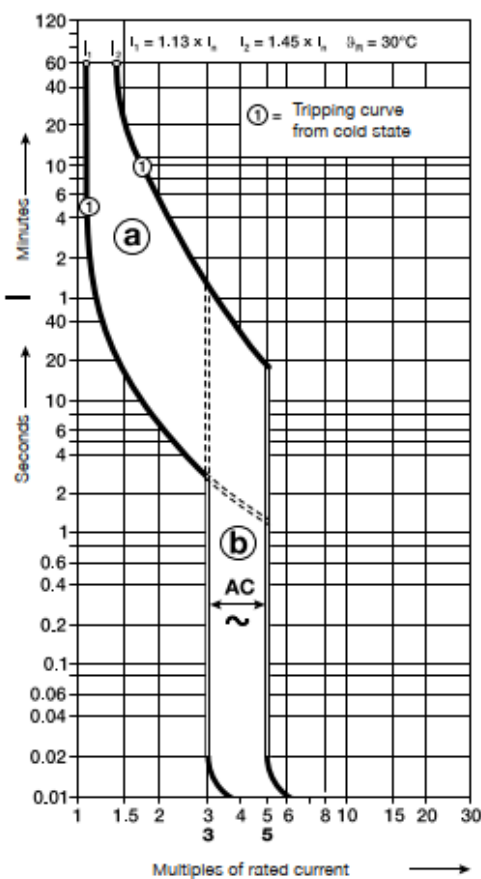
- SÄHKÖKESKUS PYSÄKILLÄ > 2,5M PYSÄKIN MAADOITUSTIUSTA RAKENTEISTA
- 0) SÄHKÖLÄITÖKSEN KAAPPELI
 - 1) MAADOITUSJÄRJESTELYN KÄYTTÖALUEEN ULKOSELTÄ TUOVA SÄHKÖLÄITÖKSEN KAAPPELI
 - 2) RINGON LÄHEISYYS HUOMIO KÄYTTÖALUEEN ULKOSELTÄ TUOVA SÄHKÖLÄITÖKSEN KAAPPELI
 - 3) PYSÄKKIKESKUKSEN LITTYMISKAAPELI
 - 4) SÄHKÖLÄITÖKSEN MAADOITUSELEKTRODI
 - 5) PYSÄKKI MAADOITUKSEN YHDYSIHTO (HUOM ERISTETTÄÄ > 2,5M PYSÄKKIKESKUKSESTA)
 - 6) EROTUSMUNNTAAN TOISION N-PE YHDISTYS MEB 2 KIRKON
 - 7) PYSÄKKI MAADOITUS
 - 8) MAADOITUSELEKTRODI
 - 9) SYVÄMAADOITUSELEKTRODI
 - 10) VLD-LATTE (PALUUKKO-SÄHKÖKESKUS) ERILLISESSÄ KÄIVÖSSÄ TAI PYSÄKKIKESKUKSESSA
 - 11) KIRKOHIDISTYS
 - 12) EROTUSMUNNTA JA TOISION KOJEET ERISTETTÄÄN PYSÄKKIKESKUKSEN JOHTAVASTA RINGOSTA
 - 13) HUOMI SUOJALAITTEITA EI OLE ESITETTY

Liite 5. Pysäkkikeskuksen maadoitusperiaate, kun pysäkkikeskus on pysäkki- tai VATU-alueella:

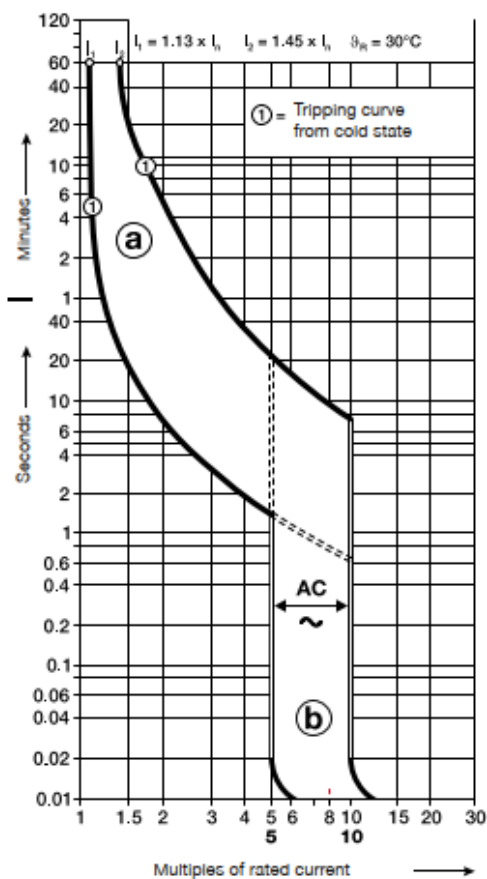


Liite 6. ABB:n DS203NC: 3P+N RCBOs in 4 modules vikavirta-suoja-laitteiden tyyppien laukaisurajat.

Characteristic B
IEC/EN 61009-1

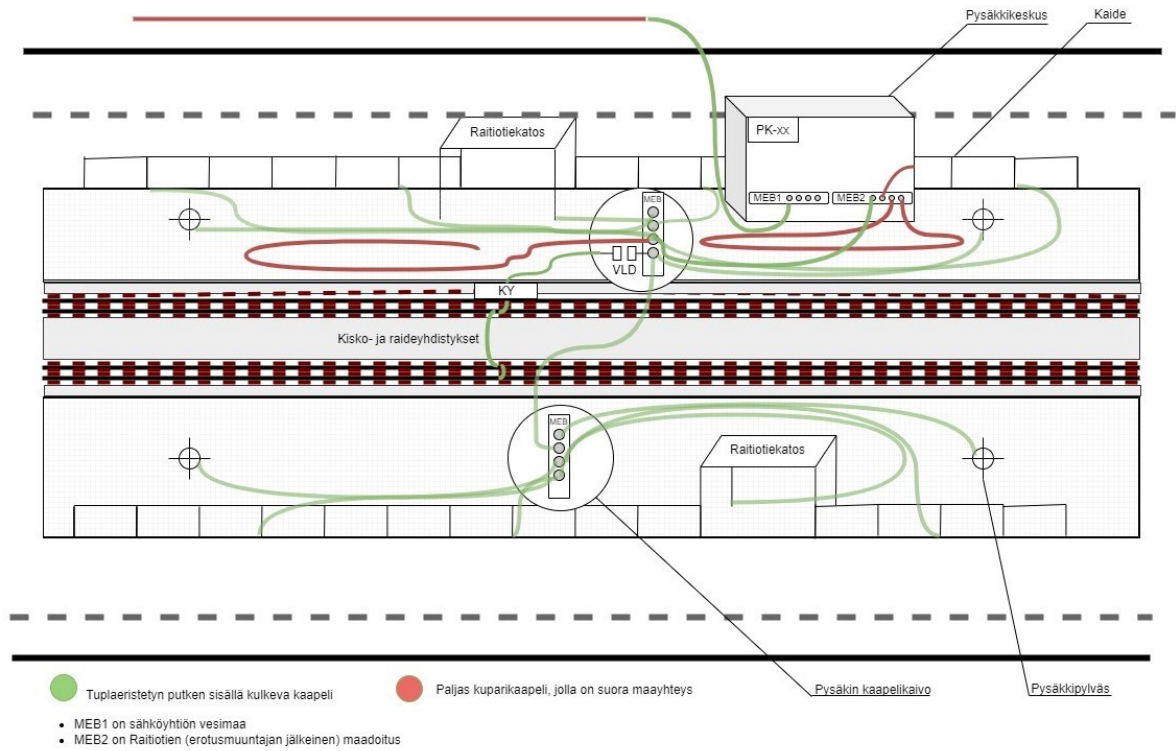


Characteristic C
IEC/EN 61009-1

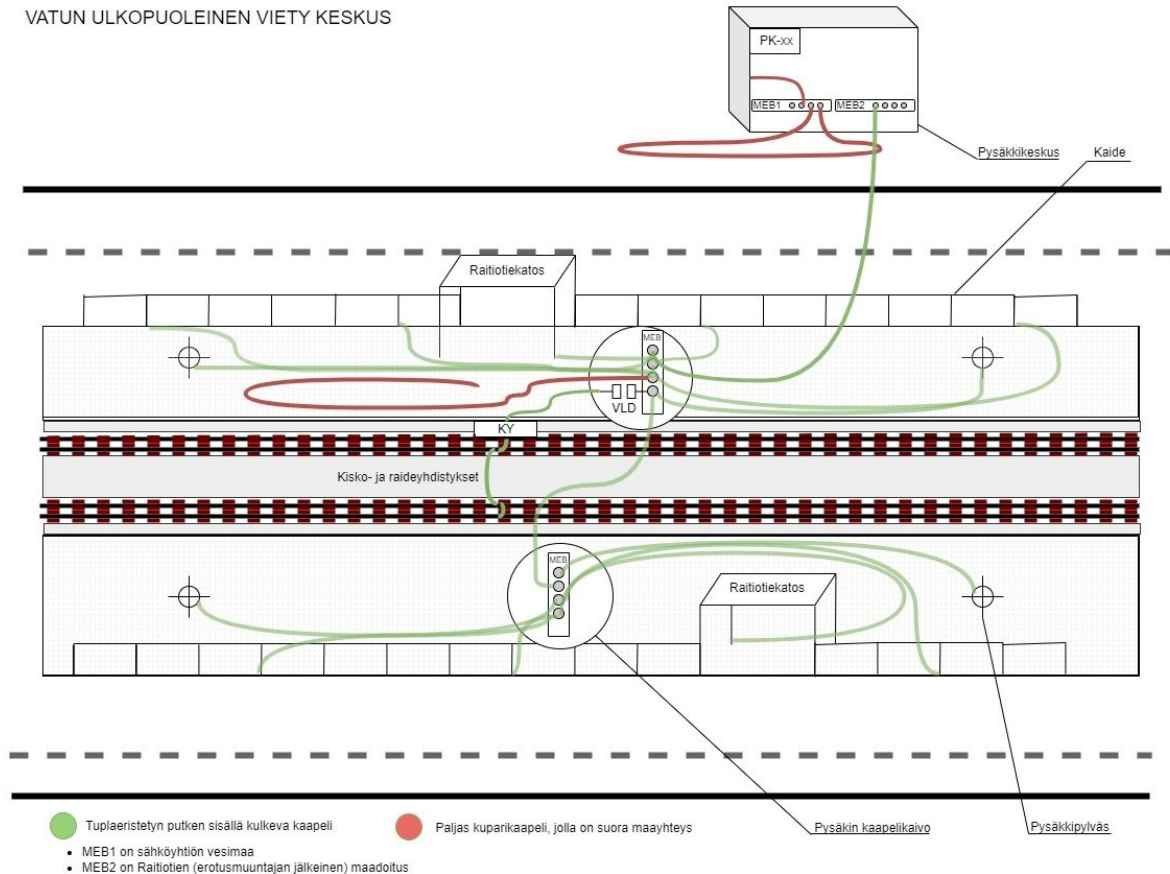


Liite 7. Pikaraitiotiepysäkin maadoitusten hahmotus kuva

VATUN SISÄPUOLELLE TUOTU KESKUS



VATUN ULKOPUOLEINEN VIETY KESKUS



Liite 8. Pysäkkikeskuksen pääpiirikaavio

