

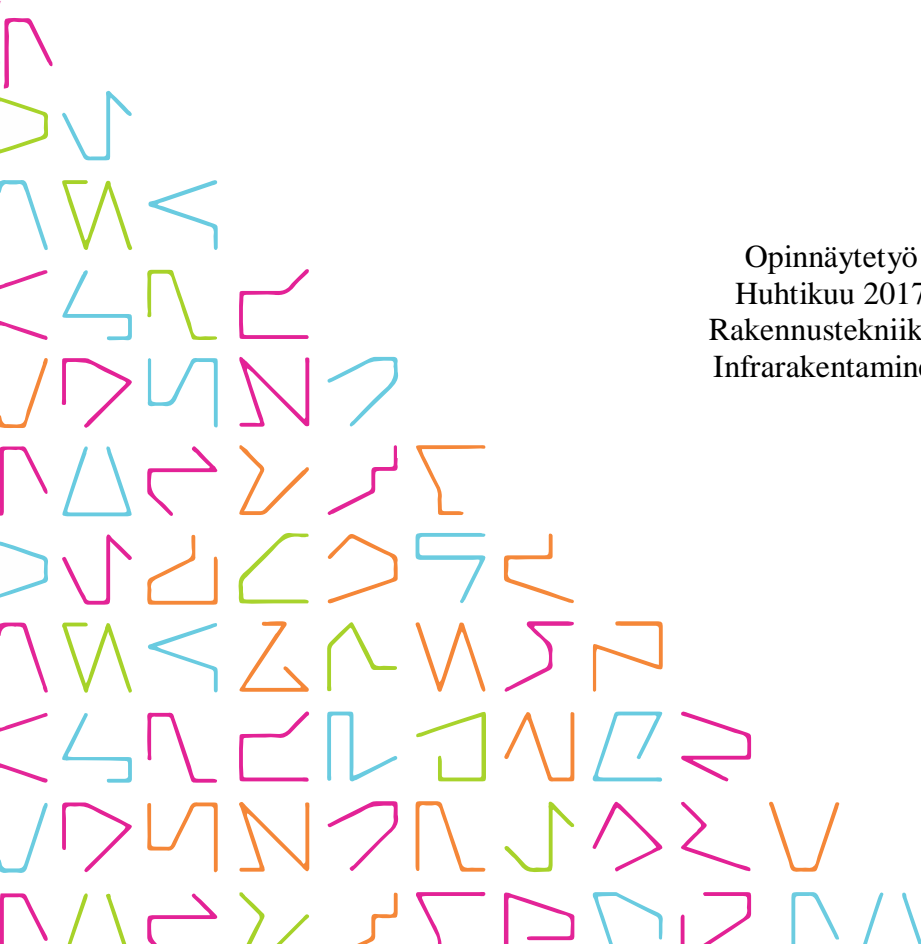


TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

RAUTATIEKISKON VERSE® MITTAUS JA NEUTRAALILÄMPÖTILATIETOJEN HALLINTA

Ville Nieminen

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2017
Rakennustekniikka
Infrarakentaminen



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikka
Infrarakentaminen

NIEMINEN VILLE:

Rautatiekiskon VERSE® mittaus ja neutraalilämpötilojen hallinta

Opinnäytetyö 39 sivua, joista liitteitä 9 sivua
Huhtikuu 2017

Opinnäytetyössä selvitetään VERSE® -mittauksen teoriaa sekä mihin mittaus perustuu ja miten tuloksia tulee hallita tehokkaasti. VERSE® on eräs kiskoa rikkomaton tapa mitata siinä vallitsevia lämpötilaeroista johtuvia jännityksiä. Opinnäytetyössä osoitetaan mittauksen tärkeys rautatieturvallisuuden kannalta. Lisäksi määritellään tulosten hallintaan rakennettava tietokanta osaksi käytössä olevaa Destia Rail Oy:n työnohjaus- ja raportointijärjestelmää sekä selvitetään suora tiedonsiirron mahdollisuus mittalaitteesta tietokantaan.

VERSE® -mittaus perustuu kiskon sisäisen jännitystilän selvittämiseen Hooken lain mukaan, jonka mukaan jännitys on verrannollinen lämpötilan muutoksen aiheuttamaan pituuden muutokseen. Opinnäytetyössä on osoitettu matemaattisesti tämän paikkansapitävyys.

Työssä on selvitetty myös mittauksen työsaavutuksia, jotka ovat muiden rautateillä tehtävien töiden lailla riippuvaisia työmenetelmien lisäksi junaliikenteen määrästä, keliolosuhteista ja sijainnista. Opinnäytetyössä on tehty ohjeistus mittauksen suorittamiseen ja tulosten käsittelyyn.

Opinnäytetyön lopputuloksena on tietopaketti mittausta suorittavalle varmistamaan osaltaan mittaustuloksen oikeellisuutta ja yhtenäinen ohjeistus tulosten käsittelyyn sekä arkistointiin. Työ toimii myös työnjohdon tukena työnsuunnitteluun. Opinnäytetyö sisältää salattuja liitteitä. Luottamuksellinen materiaali on poistettu julkisesta opinnäytetyön versiosta.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Engineering
Civil Engineering

NIEMINEN VILLE:

VERSE® Measuring and Management of Stress Free Temperature of Railway Tracks

Bachelor's thesis 39 pages, appendices 9 pages
April 2017

The thesis explains VERSE® measurement theory and how the results will be effectively managed. VERSE® is one of the non-destructive ways to measure the prevailing stresses due to temperature differences in the rail. The thesis shows the importance of the measurement in terms of railway safety. In addition, the database of measurement results was defined to Destia Rail Oy's long work counseling and reporting system. Possibility of a direct data transfer from the instrument to the database was solved.

VERSE® is based on the measurement of the internal stress state of the rail according to Hooke's law, whereby tension is proportional to the change in length due to temperature change. In the thesis has been demonstrated mathematically this to be true.

In the thesis were also clarified achievements of work, which are like any other tasks in the railways depending except the work methods also the volume of traffic, weather conditions and location.

The end result of this study is an information package for persons using the VERSE® measurement devices to help ensure the accuracy of measurement and uniform guidance of processing and analyzing the results. The work also serves as a support for work management planning. The thesis includes confidential appendices. Confidential material has been removed from the public version of the thesis.

Key words: railway, VERSE® -measuring, stress free temperature, continuously welded rail

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	JATKUVAKISKORAITEEN JÄNNITYKSET	7
2.1	Lämpötilaeron aiheuttama pituuden muutos	7
2.2	Ihanteellinen neutraalilämpötila.....	7
2.3	Pituuden muutoksesta aiheutuva jännitys ja voima	8
2.4	Jännityksestä aiheutuvien voimien hallinta	10
3	NEUTRAALILÄMPÖTILA.....	13
3.1	Syyt väärään neutraalilämpötilaan	16
3.2	Seuraukset hellekäyristä ja kiskon katkeamisista	16
3.3	Lyhyt- ja pitkäkiskoraiteiden lämpötilamuutokset	16
4	KISKON NEUTRALOINTI.....	17
5	VERSE® MITTAUKSEN PERUSTA.....	18
6	VERSE® mittaus	21
6.1	Mittalaitteisto	21
6.2	Mittauksen tekeminen	22
6.2.1	Edeltävät työt.....	22
6.2.2	Varsinainen mittaus	22
6.2.3	Jälkityöt.....	24
6.3	Työsaavutus	25
7	MITTAUSTULOKSET.....	26
8	POHDINTA	28
	LÄHTEET	29
	LIITTEET.....	30
	Liite 1. Business Case (LUOTTAMUKSELLINEN)	30
	Liite 2. Määrittely (LUOTTAMUKSELLINEN)	30
	Liite 3. Työsaavutukset (LUOTTAMUKSELLINEN)	30
	Liite 4. Mittausdata siirtämisen ohje (LUOTTAMUKSELLINEN).....	30
	Liite 5. Raportoinnin ohje (LUOTTAMUKSELLINEN).....	30

ERITYISSANASTO tai LYHENTEET JA TERMIT (valitse jompikumpi)

jatkuvakiskoraide	raide, jossa yhtenäinen kiskon pituus ylittää 300 metriä
lyhytkiskoraide	raide, jossa yhtenäinen kiskon pituus on 25 m tai alle
pitkäkiskoraide	raide, jossa yhtenäinen kiskon pituus on yli 25 m, mutta alle 50 m
neutraalilämpötila	lämpötila jolloin kisko ei sisällä lämpölaajenemisesta johtuvaa jännitystä
VERSE®	Vortok Internationalin tuotemerkki kiskon jännitystilamittausmenetelmästä
JETI	junaliikenteen ennakkotietojärjestelmä ratatyön ennakkosuunnitteluun
jatkoshitsaus	hitsausliitos kahden yhtenäisen kiskon liittämiseksi toisiinsa
jatkosrako	lyhyt- ja pitkäkiskoraiteilla peräkkäisten kiskojen välinen rako, joka sallii kiskon lämpötilamuutoksen aiheuttaman pituuden muutoksen syntymisen
päällysrakenne	radan rakenneosaa, johon kuuluu tukikerros ja raide
raide	koostuu ratapölkyistä, rataakiskoista, rataakiskojen kiinnitys- ja jatkososista sekä vaihteista ym. raiteen erikoisrakenteista
ratatyöstä vastaava	henkilö, joka vastaa ratatyön liikenneturvallisuudesta, pyytää liikenteenohjauksen luvan ratatyöhön ja ilmoittaa ratatyön päättymisestä.

1 JOHDANTO

Jatkuvakiskoraide on yksi tärkeimmistä rautatietekniikan kehitysvaiheista. Erityisen merkityksellistä on, ettei suuria, yli 160 km/h nopeuksia, voitaisi taloudellisesti toteuttaa ilman jatkuvaa päällysrakennetta. Jatkuvakiskoraide on raide, jossa yhtenäinen kiskon pituus on yli 300 metriä, kaikki kiskoajokset on jatkoshitsattuja ja vaihteet on jatkoshitsaamalla kiinnitetty jatkuvakiskoraiteeseen. Lämpötilan muutoksen aiheuttaman kiskon pituuden muutokset on estetty vaihteiden kieliä lukuun ottamatta. (Ratahallintokeskus 1998, 7)

Koska lämpötilamuutoksen aiheuttama pituuden muutos on estetty, aiheuttaa se kiskoon sisäisiä jännityksiä. Jännitykset voidaan kuitenkin hallita, mikäli ne eivät kasva liian suuriksi. Toisin sanoen lämpötilaerot pitää olla mahdollisimman pienet. Varsinaiseen kiskon lämpötilaan ei voida juurikaan vaikuttaa, mutta lämpötilaeroja voidaan minimoida asentamalla kisko tiettyssä lämpötilassa. Näin ollen lämpötilaero ei koskaan kasva tiettyä suuremmaksi.

Lämpötilaa, jolloin kiskossa ei ole sisäistä jännitystä, kutsutaan neutraalilämpötilaksi. Opinnäytetyön aiheena oleva VERSE® mittaus on yksi tapa selvittää tämä lämpötila katkaisematta kiskoa. VERSE® on englantilaisen Vortok International -yrityksen tavaramerkki. Opinnäytetyössä selvitetään mihin mittaus perustuu ja miten tuloksia tulee hallita tehokkaasti. Lisäksi osoitetaan mittauksen tärkeys rautatieturvallisuuden kannalta. Työssä määritellään tulosten hallintaan rakennettava tietokanta osaksi käytössä olevaa Destia Rail:n työnohjaus- ja raportointijärjestelmää sekä selvitetään suora tiedonsiirron mahdollisuus mittalaitteesta tietokantaan. Työn on tilannut Destia Rail Oy.

2 JATKUVAKISKORAITEEN JÄNNITYKSET

2.1 Lämpötilaeron aiheuttama pituuden muutos

Suomen ilmastossa rautatiekiskon lämpötila saattaa talvella laskea -35 asteeseen celsiusasta. Kesällä auringon paistaessa kiskoon voi lämpötila nousta jopa +55 asteeseen celsiusasta. Lämpötilaero voi olla ääripäiden välillä jopa 90 astetta (Ratahallintokeskus 1998, 9). Rautatiekiskot on valmistettu teräksestä, jonka lämpölaajenemiskerroin on 0,0115 mm/m/°C. Lämpölaajenemisesta johtuva pituuden muutos voidaan siis laskea kaavalla 1 (Ratahallintokeskus 1998, 15).

$$\Delta L = \alpha \Delta T L_0 \quad \text{kaava 1}$$

, jossa

$$\Delta L = \text{pituuden muutos [mm]}$$

$$\alpha = \text{lämpölaajenemiskerroin } \left[\frac{\text{mm/m}}{^\circ\text{C}} \right]$$

$$\Delta T = \text{lämpötilan muutos } [^\circ\text{C}]$$

$$L_0 = \text{pituus lähtötilanteessa [m]}$$

Eli pituuden muutos ΔL voi olla suurimmallaan Suomen olosuhteissa jopa

$$\Delta L = \frac{0,0115 \frac{\text{mm}}{\text{m}}}{^\circ\text{C}} \cdot (55^\circ\text{C} - (-35^\circ\text{C})) = 1,035 \text{ mm/m}$$

2.2 Ihanteellinen neutraalilämpötila

Koska jatkuvakiskoraiteessa pituuden muutos on estetty, kertyy kiskoon jännitystä. Kiskon jatkoshitsaus ja asennus on tehtävä tietyssä lämpötilassa, joka on aritmeettinen kiskon keskilämpötila korotettuna päällysrakennelisällä liian suuren puristusjäännityksen välttämiseksi $\pm 5^\circ\text{C}$. Suomessa päällysrakennelisäksi on sovittu $+7^\circ\text{C}$. Ihanteellinen

kiskolämpötila Suomen olosuhteissa on esitetty kaavassa 2. (Ratahallintokeskus 1998, 9)

$$T_N = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} + 7\text{ °C} \pm 2\text{ °C} \quad \text{kaava 2}$$

, jossa

$$T_N = \text{Ihanteellinen neutraalilämpötila [°C]}$$

$$T_{max} = \text{Kiskolämpötilan suurin arvo [°C]}$$

$$T_{min} = \text{Kiskolämpötilan pienin arvo [°C]}$$

Eli laskennallisesti ihanteellinen neutraalilämpötila on:

$$\begin{aligned} T_N &= \frac{55\text{ °C} + (-35\text{ °C})}{2} + 7\text{ °C} \pm 2\text{ °C} \\ &= 17\text{ °C} \pm 2\text{ °C} \end{aligned}$$

Kiskon neutraalilämpötila, eli lämpötila, jolloin kiskossa ei ole jännitystä, tulee olla +17 °C ± 5 °C eli välillä +12...+22 °C.

2.3 Pituuden muutoksesta aiheutuva jännitys ja voima

Kiskoon kohdistuu lämpölaajenemisen aiheuttamasta pituuden muutoksesta jännitystä Hooken lain (kaava 3) mukaisesti.

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{kaava 3}$$

, jossa

$$\sigma = \text{jännitys [Pa]}$$

$$E = \text{kimmokerroin [Pa]}$$

$$\varepsilon = \text{muodonmuutos}$$

Muodonmuutos voidaan ilmaista myös pituuden muutoksen suhteena kappaleen pituuteen (kaava 4).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{kaava 4}$$

Toisin sanoen jännitys voidaan ilmaista kaavan 5 mukaisesti.

$$\sigma = E \cdot \frac{\Delta L}{L} = E \cdot \frac{\alpha \Delta T L_0}{L_0} \quad \text{kaava 5}$$

Kiskossa käytettävän teräksen kimmokerroin on noin 210 MPa. Kun kaavaan sijoitetaan arvot olettaen suurin mahdollinen kiskon lämpötila, saadaan laskettua kiskossa oleva suurin mahdollinen puristusjännitys.

$$\begin{aligned} \sigma &= 210 \text{ MPa} \cdot \frac{0,0115 \frac{\text{mm}}{\text{m}}}{\text{°C}} \cdot \frac{(55 \text{ °C} - 12 \text{ °C}) \cdot 1000 \text{ mm}}{1000 \text{ mm}} \\ &\approx 104 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Jos tästä jännityksestä taas lasketaan kiskoon kohdistuva voima, kun UIC60 profiilisen kiskon poikkileikkauksen pinta-ala on noin 7700 mm² (Ratahallintokeskus 2002, 34). Jännitys on kaavan 6 mukaisesti voiman ja pinta-alan suhde.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{kaava 6}$$

$$F = \sigma \cdot A = 104 \text{ MPa} \cdot 7700 \text{ mm}^2 \approx 800 \text{ kN}$$

Vetojännitystä taas voi muodostua suuremmasta mahdollisesta lämpötilaerosta johtuen hieman enemmän, kuten seuraavassa laskennassa osoitetaan.

$$\sigma = 210 \text{ MPa} \cdot \frac{0,0115 \frac{\text{mm}}{\text{m}}}{\text{°C}} \cdot \frac{(22 \text{ °C} - (-35 \text{ °C})) \cdot 1000 \text{ mm}}{1000 \text{ mm}}$$

$$\approx 114 \text{ MPa}$$

Ratateknisten ohjeiden osassa 11 on esitetty taulukossa raiteeseen vaikuttavat suurimmat lämpövoimat. Raiteeseen kuuluu kaksi kiskoä, joten yllä olevat laskelmat täsmäävät taulukossa ilmoitettuihin arvoihin, kun ne kerrotaan kahdella. Voimat ovat huomattavasti suuremmat ja merkityksellisemmät jatkuvaraitteisella radalla. Lyhyt- ja pitkäkiskoraiteessa kiskon päät pääsevät liikkumaan eikä puristus tai vetojännitykset pääse kasvamaan jatkosrakojen ollessa kunnossa. Jännitystä syntyy kuitenkin jonkin verran kiskon kiinnitysten ja kitkan vastustaessa täysin vapaata lämpölaajenemista.

TAULUKKO 1. Raiteessa vaikuttavat suurimmat lämpövoimat. (Ratahallintokeskus 2002, 15)

Kiskopituus	Kiskoprofiili	vetoa (talvi) [kN]	puristusta (kesä) [kN]
Lk-raide	K43	91	91
	54 E1	114	114
Pk-raide	K43	350	350
	54 E1	437	437
	60 E1	485	485
Jk-raide	K43	1502	1133
	54 E1	1872	1412
	60 E1	2077	1567

2.4 Jännityksestä aiheutuvien voimien hallinta

Lämpötilan muutoksesta aiheutuvat voimat ovat niin suuria, että ne on hallittava jatkuvakiskoraiteella muilla tavoin, kuin kiskon päiden liikkeet estämällä. Yksinkertaistettuna voimat kumotaan, kun kisko kiinnitetään tiukasti pölkkyihin kiinni. Pölkkyt taas py-

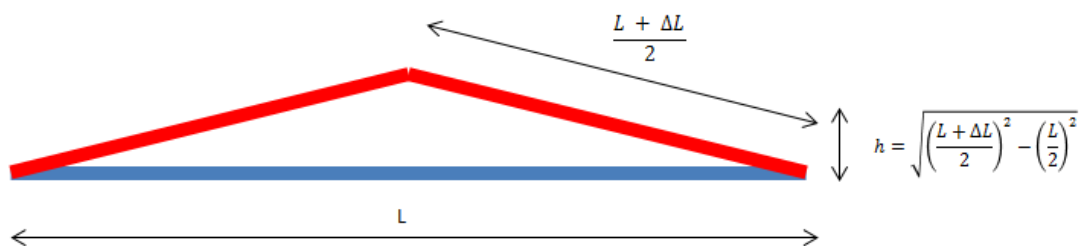
syvät paikallaan upotettuna raidesepeleihin. Raidesepelein rakeiden välillä oleva kitka estää liikkumisen, jolloin kiskon lämpölaajeneminen jää kiskon sisäiseksi jännitykseksi. Mikäli neutraalilämpötila poikkeaa ihanteellisesta neutraalilämpötilasta, saattaa se aiheuttaa lämpötilan noustessa aiheuttaa kiskon sivuttaisen siirtymisen eli hellekäyrän. Lämpötilan lasku taas aiheuttaa vetojännityksen, joka voi aiheuttaa kiskon katkeaman.

Ratateknisten ohjeiden mukaan lämpövoimien lisäksi myös junaliikenteestä kohdistuu jarrutus ja kiihdytysvoimia kiskoon, jotka tulee huomioida suunnittelussa. Mitoituksessa tulee myös olla varmuus. Betonin puristuskestävyys on betonipölkkyjen osalta noin 60 MPa. Jos voimat siirtyisivät suoraan sivulle, ei betoni kestäisi kuormitusta murtumatta. Voimat jakaantuvat eri suuntiin ja betonipölkyn pohjan ja raidesepelein välisellä kitkalla on suuri merkitys jatkuvakiskoraiteen toiminnassa.

Hellekäyrän muodostumisen aiheuttama kiskon sivuttaissuuntainen suuruus voidaan yksinkertaistetusti laskea siirtymän muodostamasta kolmiosta Pythagoraan lausekkeella (kaava 7). Kuvassa 1 on esitetty miten lämpötilasta aiheutuva pituuden muutos vaikuttaa sivuttaiseen siirtymään eli nuolikorkeuteen, joka on esitetty tunnuksella h . Sininen viiva kuvaa ylhäältä päin katsottuna kiskoa suorassa linjassa ja punainen sivulle siirtynyttä kiskoa.

$$a^2 = b^2 + c^2$$

kaava 7



KUVA 1. Kiskon sivuttaisen siirtymän suuruus suhteessa pituuden muutokseen.

Jos hellekäyrä muodostuu 20 m matkalle ja pituuden muutos on 10 mm, saadaan nuolikorkeus arvioitua seuraavasti:

$$\begin{aligned}
 h &= \sqrt{\left(\frac{L + \Delta L}{2}\right)^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \\
 &= \sqrt{\left(\frac{20000 \text{ mm} + 10 \text{ mm}}{2}\right)^2 - \left(\frac{20000 \text{ mm}}{2}\right)^2} \\
 &\approx 316 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

10 mm pituuden muutos aiheutuu 20 m matkalla, kun lämpötila nousee noin 30 astetta. Jos kisko pääsisi vapaasti liikkumaan, tulisi geometriaan yli 300 mm heitto sivulle. Rata teknisten ohjeiden mukaan sallittu nuolikorkeuden poikkeama liikennöitävällä radalla saa olla enintään 36 mm 20 m matkalla (Ratahallintokeskus 2004, 13).

Kaikki voima ei siirry kiskosta pölkkyyn vaakasuorasti, jolloin todellisuudessa siirtymät eivät ole yllä olevan oletuksen mukaisia. Myös kiskon siirtymä voi jakautua eri suuntiin, jolloin siirtymä yhteen suuntaan jää pienemmäksi. Laskelma on yksinkertaistettu esimerkki ääritapauksesta ja tarkoitettu selventämään siirtymän syntymistä ja suuruusluokkaa. Normaalityapauksessa kiskon sisäinen jännitys laskee sivuttaisen siirtymän syntyessä kiskon pituuden kasvun seurauksena. Jossain vaiheessa voima pienenee siihen pisteeseen, että vastavoimat riittävät kumoamaan siirtymän jatkumisen. Siirtymä ei siis juuri koskaan ole esitetyn suurimman mahdollisen arvon suuruinen.

3 NEUTRAALILÄMPÖTILA

Jatkuvakiskoraiteen väärä neutraalilämpötila on yksi mahdollisista hellekäyrän aiheuttajista. Muita mahdollisia syitä hellekäyrän (kuva 2) syntymiseen on esimerkiksi sepelin vajuus tai ratatöiden aiheuttama raidevastusten aleneminen, kuten hienoaineksen syntyminen sepelin joukkoon tukemisen seurauksena. (Ratahallintokeskus 1998, 33)



KUVA 2. Raiteeseen on syntynyt hellekäyrä Yhdysvalloissa (National Oceanic and Atmospheric Administration 2016).

Raiteen nurjahduksia tapahtuu Suomen rataverkolla vuosittain useita. Raiteen nurjahduksilla tarkoitetaan sellaisia virheitä raiteen jatkumossa ja raidegeometriassa, jotka edellyttävät raiteen sulkemista tai sallitun enimmäisnopeuden alentamista turvallisuuden ylläpitämiseksi. Raiteen nurjahduksiin sisältyvät esimerkiksi hellekäyrät, raiteiden painumat ja roudasta johtuvat kiskojen vauriot (Liikennevirasto 2016, 19). Liikennevirasto ylläpitää tilastoa rautateiden turvallisuusindikaattoreista, joissa kiskon nurjahtamiset määritellään onnettomuuksien riskitekijöihin liittyväksi tapahtumaksi. Taulukossa on kiskon nurjahdukset Liikenneviraston tilaston mukaan Suomessa vuosilta 2011 - 2015.

TAULUKKO 2. Raiteen nurjahdukset ja kiskon katkeamiset Suomessa vuosina 2011 - 2015. (Liikennevirasto 2016, 19)

	2011	2012	2013	2014	2015
Raiteen nurjahdukset	11	35	50	102	76
Kiskon katkeamat	51	62	25	51	35

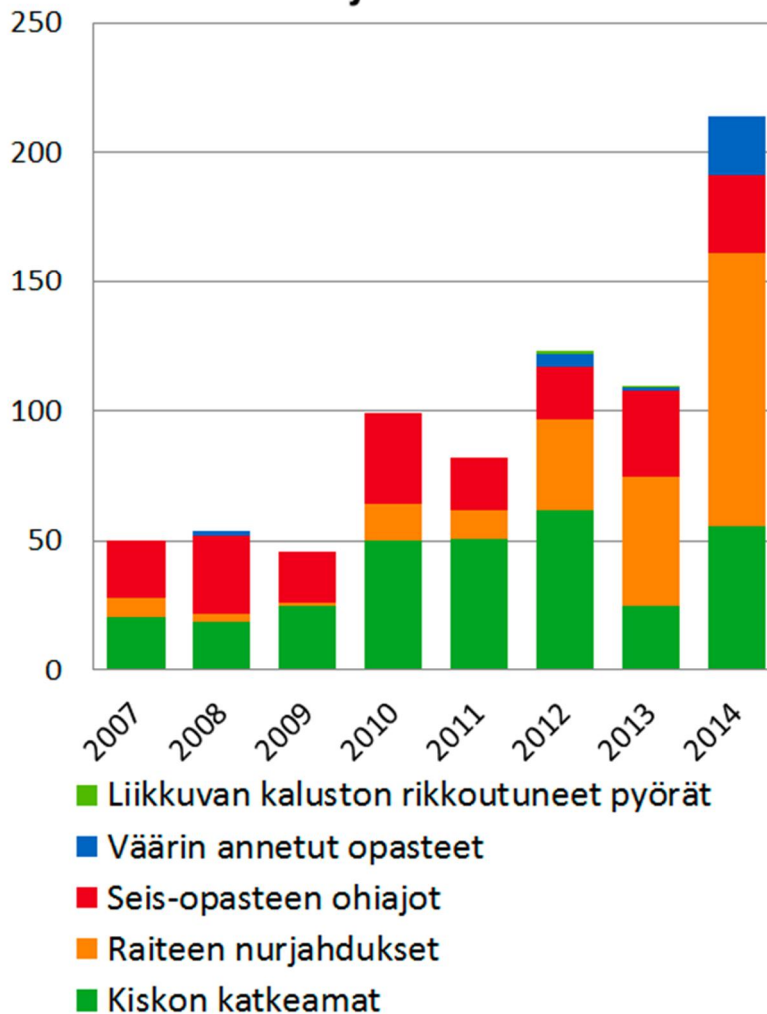
Väärä neutraalilämpötila on osasyynä myös talvella tapahtuviin kiskon katkeamisiin. 'Kiskon katkeamalla' tarkoitetaan kaikkia kiskoja, jotka ovat erottuneet kahteen tai useampaan osaan, tai kaikkia kiskoja, josta on irronnut pala metallia siten, että syntyy yli 50 millimetrin pituinen ja yli 10 millimetrin syvyinen lovi kiskon pintaan. (Liikennevirasto 2016, 19) Suuri vetojännitys yhdessä kiskossa olevan halkeaman tai murtuman kanssa saattaa aiheuttaa kiskon katkeamisen (kuva 3). Katkeama voi syntyä myös pelkän vetojännityksen tai pelkän kiskovian vaikutuksesta. Taulukossa on esitetty kiskon katkeamat vuosina 2011 - 2015. Kiskossa olevia vikoja paikannetaan vuosittain tehtävällä ultraäänitarkastuksella. Ultraäänitarkastuksella saadaan selville myös kiskon sisällä piileviä vikoja, kuten valmistusvirheitä ja halkeamia.



KUVA 3. Tyypillinen kiskon katkeama (Bucks free press 2016)

Kuvassa 4 on esitetty rautateiden vaaratilanteita ja riskitekijöitä vuosilta 2007 - 2014. Noin kolme neljästä vaaratilanteesta tai riskitekijästä on raiteen nurjahduksia ja kiskon katkeamia. Määrä on kasvanut edellisvuosista. Liikenteen turvallisuusviraston mukaan määrän kasvu saattaa johtua parantuneesta raportoinnista, penkereen tuennan epäonnistumisista sekä yleisestä radan kunnan heikkenemisestä. (Liikennevirasto 2016, 19)

Rautateiden vaaratilanteet ja riskitekijät 2007–2014



Lähde: Rautateiden yhteiset turvallisuusindikaattorit, ERAIL-tietokanta

KUVA 4. Rautateiden vaaratilanteet ja riskitekijät 2007 - 2014. (Liikennevirasto 2016, 19)

3.1 Syyt väärään neutraalilämpötilaan

Väärä neutraalilämpötila kiskossa voi johtua esimerkiksi asennusaikaisesta virheestä tai raiteen geometrian muuttumisesta. Asennusaikana virhe voi syntyä esimerkiksi kiskon lämpötilan ollessa jatkoshitsausta tehdessä neutraalilämpötila-alueen ulkopuolella. Hitsauksen yhteydessä kiskoa tulee jännittää, lämmittää tai ankkuroida niin, että kiskon neutraalilämpötila asettuu lähelle ihanteellista neutraalilämpötilaa.

3.2 Seuraukset hellekäyristä ja kiskon katkeamisista

Vuonna 2004 onnettomuustutkintakeskus sai valmiiksi 10 rautatieliikenteessä ollutta onnettomuuden tutkintaa. Kolmessa suistumistapauksessa syynä oli kiskoon muodostunut hellekäyrä. Suistuessaan vaunut vaurioittavat raidetta aiheuttaen jopa satojen tuhansien eurojen vahingot. Suistuminen aiheuttaa myös suuren henkilövahinkojen vaaran ja vaarallisia aineita kuljettaessa merkittävän ympäristön pilaantumisen vaaran.

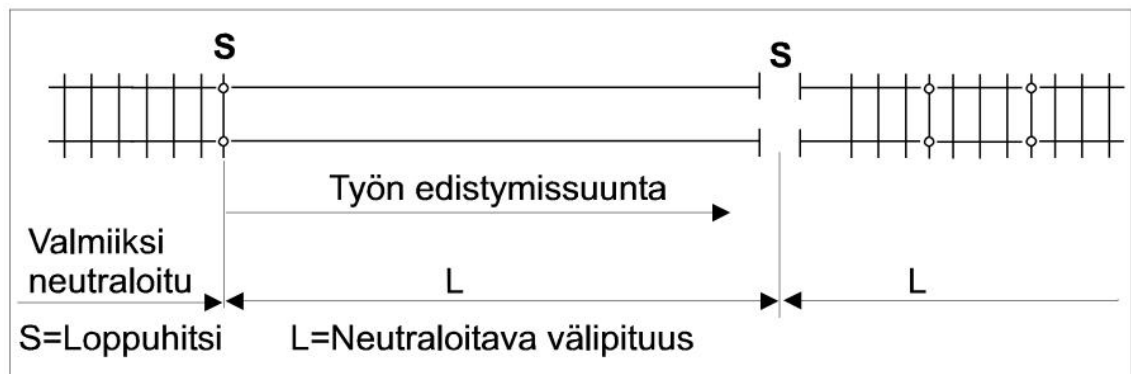
3.3 Lyhyt- ja pitkäkiskoraiteiden lämpötilamuutokset

Lyhyt- ja pitkäkiskoraiteissa ei neutraalilämpötila ole yhtä kriittinen, kuin jatkuvaraitteissa. Kisko ei ole yhtenäinen pitemmältä, kuin 300 m matkalta. Näiden kiskojen väliin jätetään kiskon pituudesta ja asennuslämpötilasta riippuva jatkosrako. Jatkosrako mahdollistaa kiskon laajenemisen lämpötilan noustessa, jolloin kiskon sisälle ei pääse syntymään suuria jännityksiä. Lyhyt- ja pitkäkiskoraiteissakin hellekäyrät ja kiskon katkeamat ovat mahdollisia jos esimerkiksi jatkosrako on liian lyhyt tai sidekisko ei pääse liikkumaan tarkoituksenmukaisesti.

4 KISKON NEUTRALOINTI

Kiskon neutralointi tarkoittaa jatkuvakiskoraiteen neutraalilämpötilan muuttamista ihanteelliseen neutraalilämpötilaan tai sen lähelle. Kiskon neutraalilämpötilan ollessa alle sallitun $+12\text{ }^{\circ}\text{C}$, muodostuu kiskoon liikaa vetojännitystä kylmällä ilmalla eli toisin sanoen sen pituus on liian lyhyt. Siinä tapauksessa pituutta pitää jatkaa. Jos neutraalilämpötila on taas yli sallitun $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$, on kiskossa liikaa puristusjännitystä kuumissa olosuhteissa ja sen neutralointi vaatii kiskon lyhentämistä.

Kuvassa 5 esitetään neutraloitava osuus ja työn eteneminen. Valmiiksi neutraloituun liitetyn kiskon loppuhitsi on tehty valmiiksi ja neutraloitavaa kiskoa nostellaan jännitysten vapauttamiseksi. Kun kisko on saavuttanut neutraalipituutensa, kiinnitetään kisko ja toinen pää hitsataan kiinni. Kiskon lämpötilasta riippuen pitää kiskoa joko lämmittää tai venyttää niin, että sen neutraalilämpötila asettuu ihanteellisen neutraalilämpötilan alueelle. Kiskon puristaminen ei ole mahdollista tässä vaiheessa, joten neutralointia ei voida suorittaa ihanteellisen neutraalilämpötila-alueen yläpuolella.



KUVA 5. Kiskon neutralointi. (Ratahallintokeskus 1998, 24)

5 VERSE® MITTAUKSEN PERUSTA

Edellä mainituista syistä johtuen on tärkeää, että kiskon neutraalilämpötila asettuu lähellä ihanteellista neutraalilämpötilaa. Yksi tapa mitata kiskon neutraalilämpötila kiskoa katkaisematta on VERSE® mittaus. Mittaus perustuu Hookeen lakiin. Oletetaan, että kiskon neutraalilämpötila on 20 astetta ja VERSE® mittaus tehdään samassa lämpötilassa. Lähtötilanteessa kiskossa ei siis ole jännitystä. Mittauksessa kiskoa nostetaan 10 kN voimalla ja mitataan nousukorkeutta. Kiskon massa on noin 60 kg/m Suomessa yleisimmin käytössä olevalla 60E1 kiskoprofiililla. Kun kisko on molemmista päistään kiinni, kasvaa sisäinen vetojännitys nostoa tehdessä.

Kappaleen paino voidaan ratkaista kaavalla 8.

$$G = mg \quad \text{kaava 8}$$

, jossa

$$G = \text{kappaleen paino [N]}$$

$$m = \text{kappaleen massa [kg]}$$

$$g = \text{putoamiskiihtyvyys } \left[\frac{m}{s^2}\right]$$

Ratkaistaan nostokohdassa oleva kiskon omapaino, kun gravitaatiokentän aiheuttama putoamiskiihtyvyys maassa on noin $9,81 \frac{m}{s^2}$:

$$G = 9,81 \frac{m}{s^2} \cdot \frac{60 \text{ kg}}{m} \cdot 10 \text{ m} \approx 6000 \text{ N}$$

Kiskon sisäiseen vetojännitykseen jää siis 4000 Newtonin suuruinen voima. Kun tiedetään kiskon poikkileikkauksen pinta-ala, voidaan laskea sisäinen jännitys siinä vaiheessa, kun kuormitus on maksimissaan.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{6000 \text{ N}}{7700 \text{ mm}^2} = 0,78 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Teräksen kimmokertoimen perusteella taas voidaan laskea kyseisen jännityksen aiheuttama pituuden muutos.

$$\begin{aligned}\Delta L &= L \cdot \frac{\sigma}{E} = 20000 \text{ mm} \cdot \frac{0,78 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \\ &= 0,074 \text{ mm}\end{aligned}$$

Pythagoran lausekkeella voidaan taas ratkaista pituuden muutoksen aiheuttama nuolikorkeuden muutos, eli tässä tapauksessa nousukorkeus.

$$\begin{aligned}h &= \sqrt{\left(\frac{L + \Delta L}{2}\right)^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{20000 \text{ mm} + 0,074 \text{ mm}}{2}\right)^2 - \left(\frac{20000 \text{ mm}}{2}\right)^2} \\ &= 27,2 \text{ mm}\end{aligned}$$

Eli kiskon ollessa neutraalilämpötilassa, on kiskon nostokorkeus VERSE® mittauksessa noin 27 mm, mikäli nosto aloitettaisiin kiskon ollessa vaakasuorassa. Todellisuudessa nousukorkeuteen vaikuttaa myös muut tekijät, kuten kiskon profiilin muoto ja omapaino saa kiskon taipumaan hieman vaakatasoa alemmaksi lähtötilanteessa.

Jos taas oletetaan, että kiskon neutraalilämpötila onkin 25 °C muiden muuttujien ollessa samat, vaikuttaa se nousukorkeuteen. Olemassa oleva puristusjännitys purkautuu nostettaessa, jolloin kokonaisuus on suurempi. Ratkaistaan ensin kymmenen asteen lämpölaajenemisen aiheuttama pituuden kasvu 20 metrin matkalla.

$$\Delta L = \frac{0,0115 \frac{\text{mm}}{\text{m}}}{^{\circ}\text{C}} \cdot 10 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot 20 \text{ m} = 2,3 \text{ mm}$$

Seuraavaksi voidaan ratkaista Pythagoraan lausekkeella arvio nuolikorkeuden muutoksesta:

$$\begin{aligned}
 h &= \sqrt{\left(\frac{L + \Delta L}{2}\right)^2 - \left(\frac{L}{2}\right)^2} \\
 &= \sqrt{\left(\frac{20000 \text{ mm} + 2,3 \text{ mm}}{2}\right)^2 - \left(\frac{20000 \text{ mm}}{2}\right)^2} \\
 &= 151,7 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Näin ollen kiskoa nostettaessa se on vapaa jännityksistä vasta, kun nostoa on tapahtunut 151,7 mm ja vasta tämän jälkeen tapahtuva nostokuormitus aiheuttaa sisälle vetojännitystä. Tosiasiassa kaikkia nousukorkeuteen vaikuttavia tekijöitä ei laskuesimerkissä ole otettu huomioon, joten mitat ovat oikeassa mittauksessa erisuuruisia. Mittaus perustuu kuitenkin siihen, että nousukorkeus on suurempi, jos kiskossa on olemassa oleva puristusjännitys.

Jos taas kiskon neutraalilämpötila onkin 15 °C muiden muuttujien ollessa samat, pitää ensin ratkaista jo vallitseva vetojännitys ensin:

$$\begin{aligned}
 \sigma &= 210 \frac{N}{\text{mm}^2} \cdot \frac{0,0115 \frac{\text{mm}}{\text{m}}}{\text{°C}} \cdot \frac{(20 \text{ °C} - 15 \text{ °C}) \cdot 1000 \text{ mm}}{20000 \text{ mm}} \\
 &\approx 0,604 \frac{N}{\text{mm}^2}
 \end{aligned}$$

Kiskon profiilin pinta-alan perusteella voidaan laskea vetojännityksen aiheuttama voima F :

$$F = \sigma \cdot A = 0,604 \frac{N}{\text{mm}^2} \cdot 7700 \text{ mm}^2 = 4650 \text{ N}$$

Tässä tapauksessa kiskon ollessa lähtötilanteessa vaakatasossa, ei 10 kN nostovoima riitä kumoamaan olemassa olevaa vetojännitystä ja kiskon omapainoa. Tosiasiassa nousua tapahtuu omapainon aiheuttaessa kiskon taipumaa vaakatasosta alaspäin lähtötilanteessa. Mittaus tulisi valmistajan ohjeen mukaan suorittaa aina 10 °C ihanteellisen neutraalilämpötilan alapuolella kiskon ollessa vetojännitettynä luotettavan tuloksen saamiseksi.

6 VERSE® mittaus

6.1 Mittalaitteisto

Mittalaitteisto koostuu kiskon nostamiseen tarvittavasta kehikosta, käsitietokoneesta, mittausyksiköstä akkuineen sekä nostoa mittaavasta anturista. Kehikko on varustettu hydraulisella tunkilla, jolla kiskon saadaan mittauksen vaatima 10 kN voima aikaiseksi. Kehikko on esitetty kuvassa 6. Keltaisessa salkussa on mittausyksikkö, johon muut laitteet kytketään.



KUVA 6. VERSE® mittalaitteisto.

Varsinaisen mittalaitteiston lisäksi tarvitaan lämpömittareita kiskon lämpötilan mittaamiseen, työntömitta, rulla- tai kelamitta, tunkki ja kiskon kiinnikkeiden irrottamiseen sopivat työkalut.

6.2 Mittauksen tekeminen

Töitä, joissa kajotaan radan päällysrakenteeseen, saa suorittaa vain neutraalilämpötila-alueella. Jos neutraalilämpötila ei ole tiedossa, voidaan työ suorittaa +5...+27 °C lämpötilassa. Suorilla ja yli 1000 m säteisissä kaarteissa alin työskentelylämpötila voi olla 0 °C. Päällysrakennetöiden yleisiä laatuvaatimuksia ja VERSE® mittalaitteiston valmistajan suosituksia noudattaen mittaus voidaan siis tehdä lämpötilan ollessa yli 0 °C ja alle 12 °C. Alle 1000 m säteisissä kaarteissa lämpötila tulee olla yli 5 °C ja alle 12 °C. Hissausmestarin päätöksellä edellä mainituista lämpötiloista voidaan poiketa.

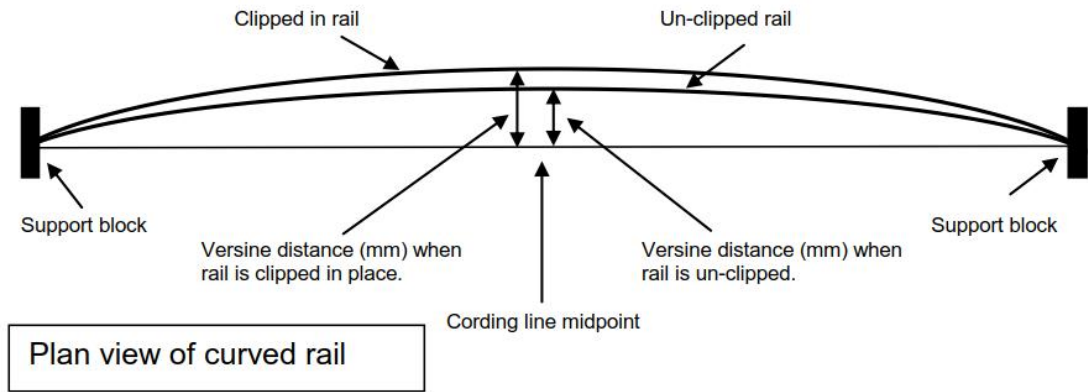
6.2.1 Edeltävät työt

Radanpidon turvallisuusohjeiden mukaisesti rautateillä tehtävä työ vaatii ennakkosuunnitelman tekemistä junaliikenteen ennakkotietojärjestelmään JETiin. Ennakkotyösuunnitelma tulee laatia vähintään 7 vuorokautta ennen työn suorittamista ja sen voi tehdä järjestelmän käyttöön koulutettu henkilö (Liikennevirasto 2016, 40). Lisäksi ratatyöstä vastaavan pätevyyden omaavan henkilön tulee tehdä ratatyöilmoitus liikenteenohjaukselle (Liikennevirasto 2016, 41). Näiden perusteella saadaan varsinaista työtä aloittaessa lupa aloittaa ratatyö.

Jos VERSE® mittaus on suunniteltu tehtäväksi kaarteessa, tulee kaarresäde selvittää ennen mittausa. Mittalaite laskee automaattisesti kaarresäteen pyydettyjen tietojen perusteella, mutta pyytää varmistamaan tuloksen oikeellisuuden.

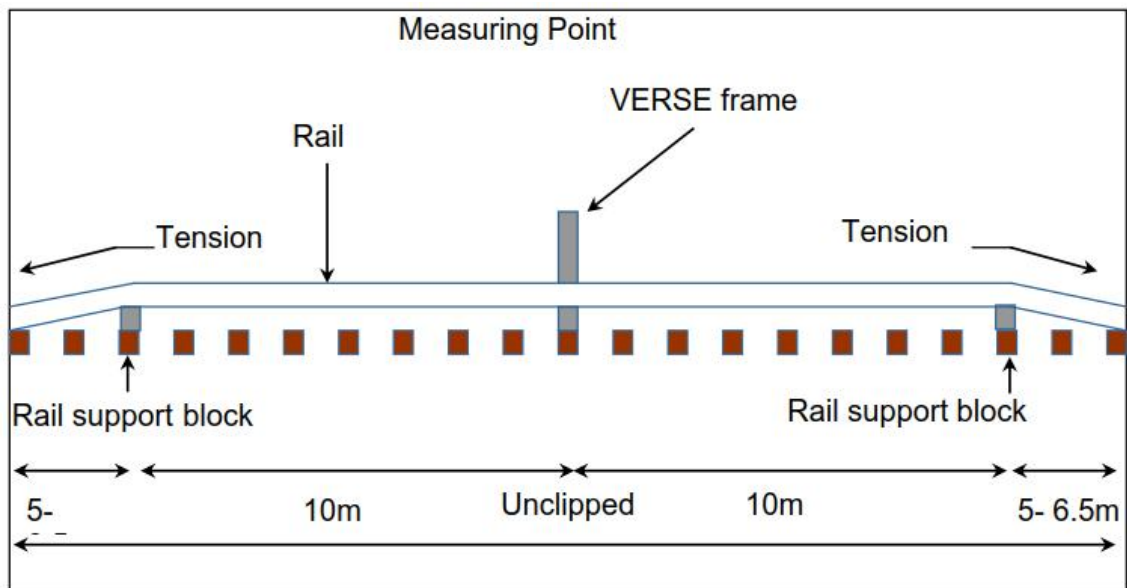
6.2.2 Varsinainen mittaus

Mittauksen voi suorittaa VERSE® laitteiston käyttöön koulutettu henkilö. Mittaus aloitetaan valitsemalla mittauspiste, joka merkataan liidulla kiskoon. Tästä pisteestä mitataan noin 10 m matka molempiin suuntiin kiskon alle asetettavia korokepaloja varten. Jos mittaus tehdään kaarteessa, tulee vielä mitata kaarresäde kuvan 7 mukaisesti. Ensimmäinen mitta otetaan ennen kiinnitysten irrotusta ja toinen kiskon ollessa vapaasti korokepalojen päällä. Annettujen mittojen perusteella VERSE® laitteisto laskee mittaus tulokseen kaarteiden jännityksistä johtuva korjauksen.



KUVA 7. Kaarresäteen mittaaminen (Vortok International 2013, 30)

Kiskon kiinnitykset avataan 30 metrin matkalta. Raskaamman UIC60 kiskon kiinnitykset tulee avata 33 metrin matkalta. Kiinnitysten avaamisen jälkeen kiskoa tunkataan ylös, jotta korokepalat saadaan asennettua paikalleen. Korokepalat tulee asettaa pölkyn ja kiskon väliin. Kisko tulisi siis olla ilmassa vapaasti kuvassa 8 esitetyn mukaisesti.



KUVA 8. Havainnekuva VERSE® mittausta varten ylösnostetusta kiskosta (Vortok International 2013, 8)

Tarkat etäisyydet tarvitaan, kun käsitetokoneeseen syötetään tietoja. Valmistajan mukaan yhden cm:n mittavirhe aiheuttaa 0,1 °C virheen neutraalilämpötilan mittaustulokseen.

Tuloksia varten tarvitaan myös tieto kiskon lämpötilasta sekä kiskon korkeudesta. Lämpötila tulee mitata kolmella kalibroidulla kiskolämpömittarilla, joiden tarkkuus tulee

olla vähintään 0,1 °C. Luotettavan tuloksen saamiseksi lämpömittarit pitää olla kiinnitettynä 15 minuutin ajan ennen lämpötilan lukemista. Lämpötila pitää mitata kiskon varjoisalta puolelta, eikä mittari saa olla suorassa auringonpaisteessa. Luotettavan neutraalilämpötilatuloksen saamiseksi kiskon lämpötilan muutos mittauksen aikana ei saa olla suuri. Kiskon korkeus voidaan mitata työntömitalla, jonka tarkkuus on vähintään 0,1 mm. Korkeuden mittauksessa 0,5 mm virhe aiheuttaa 0,3 °C virheen neutraalilämpötilan mittaustulokseen (Vortok International 2012, 20). Ratateknisten ohjeiden osan 19 mukaan kiskon lämpötilan mittaamiseen riittää kaksi lämpömittaria, joiden tarkkuus on vähintään ± 1 °C (Ratahallintokeskus 1998, 9).

Mittauskehikko kootaan mittauspisteelle ja johdot kiinnitetään ohjeiden mukaan. Käsitietokoneeseen syötetään mitatut lähtötiedot ja mittaus käynnistetään. Mittauksessa kisko aletaan nostaa mittakehikon hydraulisella tunkilla rauhallisesti ja tasaisesti. Mittaus suoritetaan kolme kertaa, jolloin laite laskee keskiarvon ja ilmoittaa kiskossa vallitsevan neutraalilämpötilan.

Mittaus voi epäonnistua, jos nostoa tehdään epätasaisesti ja liian nopeasti. Laite tallentaa noston aikana useita nousumittoja suhteessa nostovoimaan. Mikäli näitä mittapistettä ei ole riittävästi tai ne ovat toisistaan huomattavasti poikkeavia, ei neutraalilämpötilaa saada laskettua riittävällä tarkkuudella.

6.2.3 Jälkityöt

VERSE® mittauksessa kisko irrotetaan kiinnikkeistä eli radan rakenteeseen puututaan työn aikana. Aina, kun radan rakenteeseen on kajottu, tulee rata tarkastaa ennen liikenteelle luovutusta. Tarkastuksen voi suorittaa päällysrakennepätevyuden omaava henkilö. Pätevyyteen vaaditaan vähintään teknikon tason koulutus ja kolmen vuoden työkokemus radan päällysrakennetöistä. Lisäksi tulee olla suoritettuna päällysrakennepätevyyskurssi ja siihen liittyvä koe. Pätevyyden voi saada myös ilman teknikon koulutusta, jolloin vaaditaan vähintään kuuden vuoden työkokemus eri tehtävistä rautateillä (Liikennevirasto 2016, 87). Tarkastuksen yhteydessä tulee täyttää radan liikennöitävyyden pöytäkirja. Vasta, kun rata on todettu turvalliseksi liikennöidä uudelleen, voidaan liikenteenohjaukselle ilmoittaa ratatyö loppuneeksi.

6.3 Työsaavutus

VERSE® laitteiston valmistajan mukaan yhden mittauksen suorittamiseen kuluu 20 - 30 minuuttia riippuen kiskokiinnityksestä. Todellinen työsaavutus Suomen olosuhteissa on kuitenkin haastattelujen perusteella huomattavasti hitaampi. Jos tarkastellaan pelkkää työsuoritetta jättäen pois ennakoilmoitusten tekeminen ja tulosten käsittely, menee kiskon kiinnikkeitten irrottamiseen ja onnistuneen mittauksen suorittamiseen molempien kiskojen osalta noin 90 minuuttia työryhmän ollessa vähintään kolme henkilöä. Mittään estettä työn suorittamiselle yksin ei ole, jos henkilöllä on riittävät pätevyudet. Käytännössä yksin suoritettuna työ vaatii melko paljon aikaa, jolloin vilkkaammilla rataosilla riittävän pitkän työraon saaminen voi olla esteenä mittauksen tekemiselle. Mittaus on suoritettava yhdellä kertaa, sillä rata ei ole liikennöitävässä kunnossa mittauksen aikana.

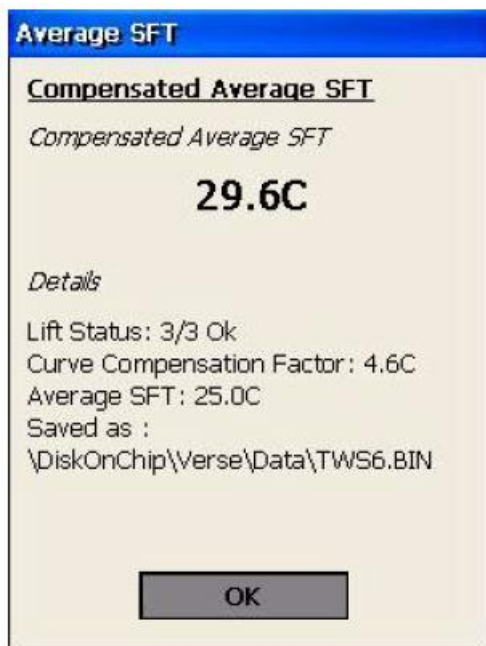
Jos mittauksia tehdään ilman pitkää siirtymistä toiseen paikkaan eikä junaliikennettä tarvitse huomioida (esimerkiksi rakennustyömaa), voidaan työpäivän aikana suorittaa jopa 10 mittausta. Yhdellä mittauksella saadaan selvitettyä neutraalilämpötila 300 m matkalta. Työpäivän aikana voidaan hyvissä olosuhteissa saada mitattua 1,5 km raidetta, jos neutraalilämpötila selvitetään molemmista kiskoista.

Mittauspaikat ovat usein jo käytössä olevalla rataosalla ja sijaitsevat mahdollisesti etäällä toisistaan. Autolla ei ole aina mahdollista päästä lähelle mittauspaikkaa. Työsuoritus voi siis olla säästä, sijainnista, ryhmän koosta ja työraoista riippuen yhdestä kymmeneen mittausta työvuorossa.

Varsinaisen mittaamisen jälkeen tulokset tulee siirtää tietokoneelle ja käsitellä raportoitavaan muotoon. Liitteessä on tarkemmin selvitetty tulosten siirtämisen, käsittelyn, analysoinnin ja varastoinnin mahdollisuuksia sekä työsaavutuksia. Ratatekniset ohjeet ja rautateiden kunnossapitosopimukset edellyttävät tietokannan ylläpitämistä kiskon neutraalilämpötilasta. Neutraalilämpötila tulee olla tiedossa jatkuvakiskoraiteen osalta koko Suomen rataverkon alueella. Kunnossapitäjän tulee selvittää neutraalilämpötila niiltä osin, kun tieto on puutteellista tai epäluotettavaa.

7 MITTAUSTULOKSET

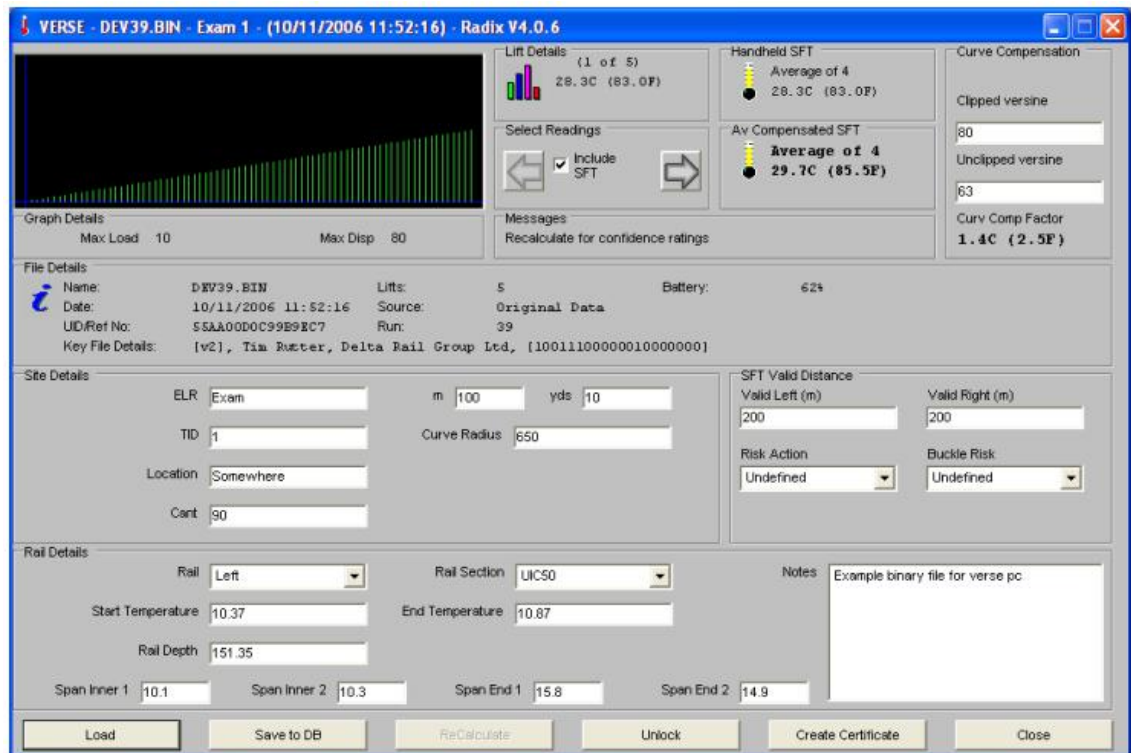
Jo mittausta tehdessä käsitietokone näyttää kiskon mitatun neutraalilämpötilan kuvan 9 mukaisesti. Tulokset tallentuvat käsitietokoneeseen ja ne voidaan siirtää edelleen tietokoneelle. Tietokoneella saatuja tuloksia voidaan edelleen käsitellä erilaisiin taulukko-
muotoihin. Lisäksi tietokoneella käytettävällä ohjelmistolla voidaan tarkastella muitakin tietoja, kuin pelkkää mitattua neutraalilämpötilaa.



KUVA 9. VERSE® mittauksen valmis mittaustulos käsitietokoneen näytöllä (Vortok International 2013).

VERSE® tietokoneohjelmisto näyttää käytännössä samat tiedot, mitä mittausvaiheessa käsitietokoneeseen on syötetty (kuva 10). Näitä tietoja ovat esimerkiksi tiedot sijainnista, raiteesta, kiskosta, lämpötilasta ja ajankohdasta. Lisäksi nähtävissä on mittauksen aikana kerätty data. Kerättyä dataa on kiskon nousu verrattuna käytettyyn nostovoimaan useasta eri pisteestä.

Ohjelmisto näyttää myös kuvaajaa mittauksesta, johon voidaan määritellä eri värejä kansallisten neutraalilämpötilojen mukaisesti selkeyttämään näkymää. Liian suuri tai pieni neutraalilämpötila voidaan esimerkiksi määritellä toistettavaksi punaisella värillä ja optimaalinen vihreänä, jolloin kuvaaja on helpommin tulkittavissa myös tarkemmin asiaan perehtymättömälle henkilölle.



KUVA 10. VERSE® tietokoneohjelmiston kuvankaappaus.

Mittauksesta tallennetaan myös tiedot laitteista, jolla mittaus on tehty. Valmistajan ohjeen mukaisesti laitteet on kalibroitava kerran vuodessa luotettavan mittaustuloksen varmistamiseksi. Sisällyttämällä tiedot käytetystä laitteesta voidaan todentaa niiden olevan mittauksen edellyttämässä tarkkuudessa, mikäli mittaustuloksissa ilmenee epäselvyyksiä myöhemmin.

8 POHDINTA

Jatkuvakiskoraiteilla kiskon neutraalilämpötila on olennainen tekijä radan kunnossa pysymisen kannalta. Suomessa lämpötilan vaihtelut ovat huomattavan suuria verrattuna moneen muuhun maahan. Jatkuvakiskoraide on edellytys nopealle liikennöitävyydelle ja sen kunnossapito on huomattavasti edullisempaa verrattuna lyhyt- ja pitkäkiskoraiteeseen, joten sen on todettu olevan paras vaihtoehto.

Väärä neutraalilämpötila ei yleensä aiheuta yksinään kiskon nurjahdusta tai katkeamista, mutta on aina osasyynä. Myös muu radan kunto on yhtä olennainen osa vaurioiden ehkäisyä, kuin oikea neutraalilämpötila. Jos neutraalilämpötila kiskossa on ihanteellinen, ei radan kunto ole niin kriittinen. Radan elinkaaren pidentämiseksi ja turvallisuuden takaamiseksi pitää sekä neutraalilämpötila että yleinen radan kunto olla kiitettävällä tasolla.

Syitä kiskon katkeamisiin ja hellekäyriin on pohdittu vuosittain julkaistavissa rautateiden turvallisuusindikaattorit käsikirjoissa. Todennäköisenä syynä määrien kasvamiselle on radan kunnan heikkeneminen ja raportoinnin paraneminen. Nykyisissä kunnossapitosopimuksissa edellytetään raportoimaan poikkeamia, jolloin useimmat niistä tulevat myös tietoon. Toisaalta liikenneväylien korjausvelka on noussut jatkuvasti johtaen huonossa kunnossa olevien rataosien kasvuun.

Kiskon neutraalilämpötilan selvittämisessä VERSE® mittaus on taloudellisesti tehokas tapa. Työsaavutukset ovat neutralointia paremmat eikä kiskoon synny ylimääräistä hitsiä. Vaikka käytännössä jatkohitsaus ei olekaan epäjatkuvuuskohta, se rikkoo silti kiskon yhtenäisen rakenteen. Hitsin kohta on myös herkempi vaurioitumaan. Mittaustulosten oikeellisuus ja niiden hallinta on olennainen osa rautatien kunnossapitoa. Helposti saatavissa oleva tieto kiskon neutraalilämpötilasta on tarpeellinen, kun päällysrakenteeseen vaikuttavia töitä suoritetaan.

LÄHTEET

Bucks free press, 2016. Gallery. Sanomalehden kuva-arkisto. Luettu 10.2.2017.
<http://www.bucksfreepress.co.uk/>

Kauppinen, M. 2011. Ratakiskon elinkaari.

Korkiakoski, A. työmaapäällikkö. 2016. Haastattelu 17.11.2016. Haastattelija Niemi-
nen, V. Laihia.

Liikennevirasto, 2016. Radanpidon turvallisuusohjeet (TURO).

Mäkelä, M., Soininen, L., Tuomola, S. & Öistämö, J. 2014. Tekniikan kaavasto. Tam-
mertekniikka.

National oceanic and atmospheric administration, 2016. U.S. climate resilience toolkit.
Land-Based transportation. Luettu 9.2.2017. <https://toolkit.climate.gov>.

Norokorpi, L., Penttinen M. & Peni-Nyman A. 2016. Rautatietojärjestelmien turvallisuus-
poikkeamat 2015.

Onnettomuustutkintakeskus, 2005. Onnettomuustutkintakeskuksen toimintakertomus
2004.

Pajunen, K. 2013. Rautateiden turvallisuusindikaattorit.

Ratahallintokeskus, 1998, Ratatekniset määräykset ja ohjeet osa 19: Jatkuvakiskoraiteet
ja vaihteet.

Ratahallintokeskus, 2002, Ratatekniset määräykset ja ohjeet osa 11: Radan päällysrä-
kenne.

Ratahallintokeskus, 2004, Ratatekniset määräykset ja ohjeet osa 13: Radan tarkastus.

Vortok International Ltd, 2003. An operators guide to VERSE. Käyttöohje.

Vortok International Ltd, 2015. VERSE koulutuksen materiaali.

LIITTEET

Liite 1. Business Case (LUOTTAMUKSELLINEN)

Liite 2. Määrittely (LUOTTAMUKSELLINEN)

Liite 3. Työsaavutukset (LUOTTAMUKSELLINEN)

Liite 4. Mittausdata siirtämisen ohje (LUOTTAMUKSELLINEN)

Liite 5. Raportoinnin ohje (LUOTTAMUKSELLINEN)