

Mirkka Korpi

XPS-ROUTALEVYJEN TOIMIVUUS RATARAKENTEESSA

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Elokuu 2024

TIIVISTELMÄ

Mirkka Korpi: XPS-routalevyjen toimivuus ratarakenteessa
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Elokuu 2024

Pääosa Suomen rataverkosta on rakennettu 1900-luvun alkupuolella sen aikaisten laatuvaatimusten mukaisesti. Liikenteen vaatimustason ja nopeuksien kasvaessa myös ratarakenteen laatuvaatimukset ovat muuttuneet, eikä rakenne vastaa nykyisiä vaatimuksia pääosalla rataverkosta. Jatkuvasta perusparannuksesta huolimatta aikanaan tehdyt ratkaisut aiheuttavat edelleen routahaittoja rataverkolla. Pohjamaan routimisesta aiheutuva epätasainen routanousu ja roudan sulamisvaiheessa tapahtuva sulamispehmeneminen vaikuttavat radan turvallisuuteen ja liikennöitävyyteen. Olemassa olevien ratojen routasuojauksen parantamiseen on käytetty routaeristelevyjä vuodesta 1970 lähtien. Vuodesta 1981 alkaen on siirrytty käyttämään yksinomaan suulakepuristetusta polystyreenistä valmistettuja XPS-routalevyjä. XPS-routalevyjen käyttö perustuu niiden hyvään lämmöneristävyyteen ja sen säilymiseen levyyn radassa kohdistuvasta suuresta kuormituksesta ja kosteusrasituksesta huolimatta.

Tämän diplomityön aiheena oli XPS-routalevyjen toimivuus ratarakenteessa. Työssä tutkittiin käytettyjen routalevyjen kunnan vaikutusta ratarakenteessa toteutuvaan routasuojaukseen sekä levyjen kestävyyttä oletetun käyttöajan ajan. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää routalevyjen kunnan vaikutus roudan tunkeutumissyvyyteen ja arvioida, voitaisiinko routalevyjä käyttää ratarakenteessa nykyistä pitempään. Kirjallisuusosiossa perehdyttiin roudan esiintymiseen ratarakenteessa sekä XPS-routalevyjen käyttöön ratarakenteen routasuojauksessa ja radan kuormitusympäristön routalevyihin kohdistamiin vaikutuksiin. Kokeellisessa osuudessa tutkittiin ratarakenteessa käytettyjen XPS-routalevyjen kuntoa Lielähti-Kokemäki ja Tampere-Seinäjäki rataosilta vaihtealueilta otetuista näytteistä. Routalevynäytteistä määritettiin vesipitoisuus, lämmönjohtavuus ja puristuslujuus. Routalevyn ominaisuuksien vaikutuksia roudan syvyyteen mallinnettiin TEMP/W-ohjelmalla.

Routalevynäytteille tehtyjen tutkimusten tuloksista havaittiin levyjen mekaanisen vaurioitumisen ja vesipitoisuuden välillä olevan yhteys, sillä rakenteeltaan ehjiltä vaikuttaneiden levyjen vesipitoisuus oli huomattavasti alhaisempi kuin vaurioituneiden levyjen. Puristuskokeissa huomattiin levyn ehjän rakenteen ja matalan vesipitoisuuden korreloivan myös korkean puristuslujuuden kanssa. Lämmönjohtavuuskokeiden perusteella routalevynäytteisiin ajan myötä imeytynyt kosteus oli kasvattanut levyjen lämmönjohtavuutta.

Routalevyjen lämmöneristävyyden heikentymisen vaikutusta roudan tunkeutumissyvyyteen tutkittiin TEMP/W-mallinnuksen avulla. Mallinnuksen perusteella routasuojausominaisuuksiltaan heikentyneestäkin levystä on selkeää hyötyä verrattuna tilanteeseen, jossa levyä ei ole ollenkaan. Työn lopuksi tehdyssä elinkaaritarkastelussa routalevyn kunnolla ei havaittu olevan säännönmukaista vaikutusta radan kunnossapitotarpeeseen tai geometriavirheiden kehittymiseen tarkastelluissa vaihteissa. Suurin osa tutkituista routalevyistä oli kestänyt mekaanista kuormitusta ja vastustanut kosteuden imeytymistä riittäväällä tavalla. Näissä levyissä voidaan olettaa olleen vielä käyttöikää jäljellä. Routalevyjen käyttöikävaatimus on 40 vuotta, joka ei tällä hetkellä toteudu vaihteenvaihtosyklin pituuden takia. Käyttöajan kasvattaminen kahteen vaihteenvaihtosykliin ei kuitenkaan ole kannattavaa, koska routalevytyksen kustannus suhteessa vaihteenvaihtoon kokonaiskustannuksiin on pieni eikä käytettyjen routalevyjen jättäminen rakenteeseen vaihteenvaihtoon yhteydessä tuo merkittäviä taloudellisia säästöjä.

Avainsanat: rautatie, XPS-routaeristelevy, routasuojaus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ABSTRACT

Mirkka Korpi: Functionality of XPS insulation boards in the track structure
Master of Science Thesis
Tampere University
Master's Degree Programme in Civil Engineering
August 2024

The majority of the Finnish railway network was constructed in the early 20th century according to the quality requirements of that time. As traffic requirements and speeds have increased, the quality requirements for the track structure have also changed, and the current structure does not meet these new requirements for most of the network. Despite ongoing improvements, past solutions continue to cause frost damage. Uneven frost heave and thawing during the melting phase affect the safety and operability of the tracks. Since 1970, frost insulation boards have been used to enhance frost protection on existing lines, with extruded polystyrene (XPS) boards being exclusively used since 1981. The use of XPS insulation boards is based on their excellent thermal insulation properties, which are maintained despite high load and moisture stress.

This thesis investigates functionality of XPS insulation boards in the track structures. The study examines the impact of the condition of used insulation boards on frost protection and their durability over the assumed service life. The aim is to determine how the condition of the insulation boards affects frost penetration depth and to assess whether the boards can be used longer than currently anticipated. The literature review explores the presence of frost in the railway field, the use of XPS insulation boards for frost protection and the effects of track load on these boards. In the experimental section, the condition of XPS insulation boards from the track between Lielähti-Kokemäki and Tampere-Seinäjoki was analyzed. The XPS specimens were tested for water content, thermal conductivity, and compressive strength. The effects of insulation board properties on frost depth were modeled using TEMP/W.

A correlation was found between mechanical damage to the XPS boards and water content; structurally intact specimens had significantly lower water content than damaged ones. Compression tests showed that intact specimens with low water content also had high compressive strength. Thermal conductivity tests indicated that moisture absorbed over time increased the thermal conductivity of the XPS boards.

The impact of reduced thermal insulation of XPS boards on frost penetration depth was studied using TEMP/W modeling. The results showed that even boards with diminished frost protection properties provided a clear advantage over having no boards at all. The life cycle review found that insulation boards did not significantly affect track maintenance needs or the development of geometry errors in the turnouts examined. Most of the studied XPS specimens were resistant to mechanical stress and moisture absorption, suggesting they still have a viable lifespan. The current service life requirement for XPS insulation boards is 40 years, which is not being met due to the length of the turnout change cycle. However, increasing the service life to two turnout change cycles is not profitable because the cost of installing XPS boards relative to the total cost of turnout change is small and leaving the used frost plates in the structure at the time of turnout change does not bring significant economic savings.

Keywords: railway, XPS insulation board, frost protection

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin Originality Check service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen yliopistossa tutkimuskeskus Terrassa Väyläviraston tilaamana. Työssä tutkittiin XPS-routalevyjen pitkäaikaistoimivuutta ratarakenteessa käytetyistä routalevyistä. Tutkimus itselleni täysin uuden aiheen parissa oli monipuolinen ja opettavainen kokemus.

Haluan kiittää Hannu Siiraa Väylävirastosta asiantuntevista kommentteista ja ohjauksesta työhön liittyen. Suuret kiitokset yliopistossa työtäni ohjanneille Heikki Luomalalle ja Pauli Kolisojalle rakentavasta ja kannustavasta palautteesta työn aikana. Kiitos Marko Hapolle, Pauli Karjalalle ja Riku Fagerströmille routalevynäytteiden tutkimisesta.

Kiitos Tampereen yliopistolle 10 yhteisestä vuodesta, erityisen onnellinen olen kaikista ihmisistä, joita olen elämäni saanut. Kiitos samaan aikaan diplomityön kanssa ahertaneille, teidän ansiostanne yliopistolle oli aina mukava tulla. Suurimmat kiitokset puolisolleni ja perheelleni kaikesta tuesta ja kannustuksesta työn tekemisen aikana.

Tampereella, 26.8.2024

Mirkka Korpi

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. ROUTA RATARAKENTEES SA	3
2.1 Roudantuminen	3
2.2 Roudan syvyyden laskentamenetelmät	4
2.2.1 Roudan syvyyteen vaikuttavat tekijät	4
2.2.2 Stefanin menetelmä	5
2.2.3 Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin sekä Beskowin menetelmän yhdistelmä	6
2.3 Routiminen	7
2.3.1 Routimisen mekanismi	7
2.3.2 In-situ routanousu	8
2.3.3 Jäälinsin muodostuminen	8
2.4 Radan rakenne	9
2.5 Roudaongelmat Suomen rataverkolla	11
3. RATARAKENTEEN ROUTASUOJAUS	15
3.1 Routasuojauksen suunnittelu	15
3.2 Routamitoitus	16
3.2.1 Lähtökohdat	16
3.2.2 Routalevyjen käyttö	17
3.2.3 Routamitoitus esimerkki	19
3.3 Routalevyjen asennus	20
3.3.1 Asennusmäärät ja valmistajat	20
3.3.2 Asennustavat	21
3.4 XPS-routalevyjen valmistus ja käytetyt ponneaineet	22
3.5 XPS-routalevyiltä vaaditut ominaisuudet	23
3.6 Radan kuormitusympäristön vaikutus XPS-routalevyihin	26
3.6.1 Kosteuden imeytyminen	26
3.6.2 Kosteuden imeytymisen vaikutus lämmönjohtavuuteen	28
3.6.3 Mekaanisen kuormituksen kestävyys	32
4. LABORATORIOKOKKEET KÄYTETYILLE XPS-LEVYILLE	37
4.1 Lähtötiedot	37
4.2 Vesipitoisuus	40
4.3 Lämmönjohtavuus	43
4.4 Puristuslujuus	46
5. ROUDAN SYVYYDEN MALLINNUS	52
5.1 TEMP/W-laskentaohjelma	52
5.2 Laskentaparametrit	52
5.3 Laskentatapaukset ja -tulokset	55
6. ELINKAARITARKASTELU	59
6.1 Elinkaariajattelu	59

6.2	Kunnossapitotarve.....	60
6.3	Kuormituskestävyys.....	64
6.4	Lämmönjohtavuuden kasvu.....	65
6.5	Käyttöikä.....	68
7.	PÄÄTELMÄT	69
	LÄHTEET	72
	LIITE A: KOOSTE GEOMETRIAVIRHEISTÄ JA TUENTATIEDOISTA.....	76

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Roudan peruskäsitteet (Ehrola 1996, s. 83).</i>	4
Kuva 2.	<i>Radan rakenne ja siihen liittyviä nimityksiä (Liikennevirasto 2018, s. 8).</i>	10
Kuva 3.	<i>Routaeristelevyjä on asennettu laajalti Suomen rataverkolle. (Väylävirasto 2024a).</i>	12
Kuva 4.	<i>Routapaikkarekisteriin ilmoitetut nopeusrajoitukset, kiillaukset ja tarkkailtavat kohteet kartalla vuosina 2011 (vasemmalla) ja 2023 (Liikennevirasto 2011, s. 19; Väylävirasto 2024b, s. 14).</i>	14
Kuva 5.	<i>Routaeristämättömän radan routimattomien rakennekerrosten kokonaispaksuus perustuen ilmastotilastoihin kaudelta 1978–2007. (Liikennevirasto 2018, liite 1).</i>	16
Kuva 6.	<i>Vasemmalla mitoituspakkasmäärä F50 (h°C) kauden 1978–2007 lämpötilahavaintojen perusteella (Liikennevirasto 2018, liite 1). Oikealla vuoden keskilämpötila (°C) vertailukaudella 1991–2020 (Ilmatieteenlaitos 2024).</i>	18
Kuva 7.	<i>Routimattoman kerrospaksuuden mitoitus 100 mm routalevyllä vuotuisen ilman keskilämpötilan ja mitoittavan pakkasmäärän perusteella. (Liikennevirasto 2018, liite 1)</i>	19
Kuva 8.	<i>Routaeristerekisterin mukaiset levyjen asennusmäärät vuosittain 1974–2023. (Väylävirasto 2024c.)</i>	21
Kuva 9.	<i>Kaivamalla asennettavan routalevyn sijainti rakenteessa (InfraRYL 2023).</i>	22
Kuva 10.	<i>Kosteuden jakautuminen polystyreenilevyissä. (Gandahl 1986, Flygare et al. 1989, s. 21 mukaan)</i>	28
Kuva 11.	<i>Kosteuspitoisuuden ja lämmönjohtavuuden korrelaatio vuosina 1966–1988 tutkittujen levynäytteiden perusteella. (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 51.)</i>	30
Kuva 12.	<i>Viipaloitujen koekappaleiden 10 °C keskilämpötilassa määritetyt lämmönjohtavuudet kosteuspitoisuuden suhteen (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 53).</i>	31
Kuva 13.	<i>Viipaloitujen koekappaleiden -5 °C keskilämpötilassa määritetyt lämmönjohtavuudet kosteuspitoisuuden suhteen (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 53).</i>	32
Kuva 14.	<i>Dowin valmistamien levyjen halkeamia ja sepelin painaumia levyjen pinnassa (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 62).</i>	34
Kuva 15.	<i>Eri levytyypeille ominaiset jännitys-kokoonpuristumakäyrät puristuskokeessa (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 74).</i>	35
Kuva 16.	<i>Ylärivissä levynäytteet 13–15 ja alarivissä tunnistamatta jääneitä heikkokuntoisia levynäytteitä.</i>	37
Kuva 17.	<i>Vasemmalla levynäytteet 9 & 10 Äetsästä ja oikealla levynäytteet 5 & 6 Heinoosta.</i>	38
Kuva 18.	<i>Vasemmalla levynäyte 24 ja oikealla levyt 26 & 27.</i>	38
Kuva 19.	<i>Vasemmalla valkeiden tunnistamattomien levyjen sivupintoja ja oikealla ylhäältä alas tunnistamaton, Finnfoamin, Basfin ja Dowin levyn sivupinta.</i>	39
Kuva 20.	<i>Lämpövirtalevylaitteen toimintaperiaate (Vinha et al. 2005, s. 24).</i>	43
Kuva 21.	<i>Koekappaleen 3 pinnasta erottui sepelirakeiden painaumia. Kappaleeseen lisättiin hiekkaa ja kappale käärittiin kelmuun ennen lämmönjohtavuuskoetta.</i>	44
Kuva 22.	<i>Koekappaleiden lämmönjohtavuuden ja kosteuspitoisuuden suhde ja regressiosuora tunnistamattomien levyjen tutkimustuloksille.</i>	46
Kuva 23.	<i>Koekappale 8 puristuskokeen aikana ja heti kokeen jälkeen.</i>	47

Kuva 24.	<i>Koekappale 25 ennen puristuskokeen alkamista.....</i>	48
Kuva 25.	<i>Koekappale 25 heti puristuskokeen jälkeen.</i>	48
Kuva 26.	<i>Finfoamin levyjen jännitys-kokoonpuristumakäyrät puristuskokeessa.</i>	49
Kuva 27.	<i>Basfin ja Dowin levyjen jännitys-kokoonpuristumakäyrät puristuskokeessa.</i>	49
Kuva 28.	<i>Muiden levyjen jännitys-kokoonpuristumakäyrät puristuskokeessa.</i>	50
Kuva 29.	<i>Laskentakohteen geometria TEMP/W-ohjelmassa.....</i>	53
Kuva 30.	<i>Pakkasmäärän jakautuminen pakkaskauden kuukausille (Kivikoski ja Saarelainen 2000, katso Soininen 2013, s. 60).</i>	54
Kuva 31.	<i>Roudan tunkeutuminen pohjamaahan ilman routalevyä.</i>	56
Kuva 32.	<i>Roudan tunkeutuminen pohjamaahan routamitoituksessa käytetyillä routalevyn parametreilla.</i>	56
Kuva 33.	<i>Roudan tunkeutuminen pohjamaahan heikentyneen levynäytteen 13 parametreilla.</i>	57
Kuva 34.	<i>Infran elinkaareen liittyviä yleisiä määritelmiä (Korkiala-Tanttu et al. 2005, Suomela 2019 mukaan).</i>	59
Kuva 35.	<i>Radantarkastusvaunu MEERI on suunniteltu ja rakennettu MERMECin toimesta Italiassa (Rautatietekniikka 3/2022, s. 52).</i>	61
Kuva 36.	<i>Geometriavirheraportit ja tuentatiedot väliltä Kuivasjärvi-Pohjois-Louko.....</i>	63
Kuva 37.	<i>Geometriavirheraportit ja tuentatiedot väliltä Lielähti-Ahvenus.</i>	63
Kuva 38.	<i>Myöhästymisen vuosikustannus suhteessa myöhästymisminuutteihin rataosalla Tampere-Seinäjoki.</i>	67

LYHENTEET JA MERKINNÄT

<i>CFC</i>	<i>Kloorihiilivedyt eli freonit</i>
<i>EPS</i>	<i>Expanded Polystyrene (suom. muottipaisutettu polystyreeni)</i>
<i>GWP</i>	<i>Global warming potential (suom. lämmityspotentiaali)</i>
<i>HCFC</i>	<i>Halogenoidut kloorihiilivedyt</i>
<i>XPS</i>	<i>Extruded Polystyrene (suom. suulakepuristettu polystyreeni)</i>

1. JOHDANTO

Routimisella on haitallisia vaikutuksia rautatieympäristössä. Epätasainen routanousu ja roudan sulamisvaiheessa tapahtuva sulamispehmeneminen aiheuttavat raiteeseen geometriavirheitä, jotka voivat heikentää rautatieliikenteen välityskykyä ja palvelutasoa sekä lisätä radan kunnossapitotarvetta. Raiteen tasaisuus on edellytys myös suurille liikennöintinopeuksille. Routanousun hallinta on tärkeää raiteen pystysuuntaisten muodonmuutosten välttämiseksi, joten ratarakenne rakennetaan routimattomista materiaaleista ja ratarakenteen paksuus mitoitetaan siten, että estetään pohjamaan routiminen.

Olemassa olevien ratojen routasuojauksen parantamiseen on käytetty routaeristelevyjä, joiden avulla estetään roudan tunkeutuminen pohjamaahan mitoitustalvena. Routalevyjä käyttämällä voidaan pohjamaan routiminen estää selvästi ohuemmillä rakennekerroksilla kuin pelkästä maamateriaalista rakennetussa radassa. Suomessa polystyreenieristeiden käyttö ratarakenteessa on aloitettu 1970-luvulla. Alkuvuosina käytettiin muottipaisutettuja EPS-solumuovilevyjä, joiden lämmönjohtavuuden huomattiin kuitenkin koerakenteissa kasvaneen merkittävästi niihin imeytyneen huomattavan vesimäärän takia. Vuodesta 1981 lähtien on siirrytty käyttämään yksinomaan suulakepuristetusta polystyreenistä (XPS) valmistettuja routalevyjä, koska XPS-levyjen hyvän lämmöneristävyuden havaittiin säilyvän koerakenteessa ratarakenteen suuresta kuormituksesta huolimatta. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 31.)

Käytettyjä routalevyjä on korvattu uusilla vaihteiden vaihtojen yhteydessä keskimäärin 25–30 vuotta asennuksen jälkeen. Tässä diplomityössä tutkitaan käytettyjen routalevyjen kunnan vaikutusta ratarakenteessa toteutuvaan routasuojaukseen sekä levyjen kestävyyttä oletetun käyttöajan ajan. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää routalevyjen kunnan vaikutus roudan tunkeutumissyvyyteen. Lisäksi arvioidaan, voitaisiinko routalevyjä käyttää ratarakenteessa pitempään, esimerkiksi kahden vaihteenvaihtosyklin ajan. Laboratoriossa testataan lämmönjohtavuus ja puristuslujuus routalevynäytteistä, jotka on otettu Lielähti-Kokemäki ja Tampere-Seinäjoki rataosuuksilta syksyllä 2023. Työssä mallinnetaan TEMP/W-ohjelmalla ratarakenteen routaantumissyvyyksiä verraten uuden levyn routasuojaukseen käytettyyn levyyn. Lisäksi tarkastellaan XPS-routalevyjen elinkaarta ratarakenteessa, sillä levyjen heikentyminen voi johtaa tiheneviin ja oletettua suurempiin routaongelmiin.

Työn alussa syvennytään routaan ilmiönä ja roudan esiintymiseen sekä siitä aiheutuviin haasteisiin ratarakenteessa. Kolmannessa luvussa käsitellään ratarakenteen routasuojauksen suunnittelua, routalevyjen käyttöä koskevia vaatimuksia ja radan kuormitusympäristön vaikutusta routalevyjen ominaisuuksiin. Seuraavissa luvuissa kerrotaan käytettyjen routalevyjen tutkimusprosessista ja saaduista tuloksista, sekä roudan syvyyden mallinnuksesta. Työn lopuksi arvioidaan routalevyjen elinkaaren aikaista kunnossapitotarvetta, levyjen heikentymisestä johtuvia ongelmia ja käyttöiän kasvattamisen mahdollisuuksia.

Kuva 1. Roudan peruskäsitteet (Ehrola 1996, s. 83).

Maan katsotaan roudaantuvan, kun sen sisältämä huokosvesi jäätyy. Puhtaan veden jäätympiste yhden ilmakehän paineessa on 0 °C, mutta käytännössä maavesi jäätyy tätä alhaisemmassa lämpötilassa. Huokosveden epäpuhtaudet ja maalajin hienorakeisuus alentavat veden jäätymlämpötilaa. (Saarelainen 1990, s. 278.) Roudaantuminen alkaa, kun ilman lämpötila maan pinnalla laskee alle 0 °C:n. Tällöin käynnistyy lämpövirtaus lämpimästä maasta kohti kylmempää ilmaa. Lämpövirtaus on sitä nopeampaa, mitä suurempi on ilman ja maan lämpötilojen ero. (Ehrola 1996, s. 84.)

Maasta jäätymissä aikana poistuva lämpövirtaus voidaan jakaa osakomponentteihin vapautuvan lämmön alkuperän mukaan. Osakomponentit ovat jäätyvän maan jäähtymislämpö, jäätyvässä maassa olevan veden jäätymlämpö, sulana pysyvän maan jäähtymislämpö, jäätyvään maahan imeytyvän veden lämpökonvektio ja jäätymlämpö sekä geoterminen lämpö. (Ehrola 1996, s. 90.) Nurmikolun ja Kolisojan (2002) esittämän maan jäätymissä prosessia kuvaavan lämpötaseyhtälön (2.1) mukaisesti alueelta poistuva lämpö on yhtä suuri kuin edellä mainittujen osakomponenttien summa.

$$Q_- = Q_+ + Q_v + Q_g + Q_f + Q_c \quad (2.1)$$

jossa tasealueen sisään tulevaa energiaa ovat sulana säilyvän maan jäähtymislämpö (Q_+), routivaan maahan imeytyvän veden jäätymlämpö (Q_v) ja geoterminen lämpö (Q_g). Tasealueen sisällä vapautuvaa energiaa ovat jäätyvän maan ja sen sisältämän veden jäätymlämpö (Q_f) sekä jäähtymislämpö (Q_c) ja Q_- on tasealueelta ylöspäin poistuva lämpö. Lämpötaseyhtälö on analyyttisten roudan syvyyden laskentamenetelmien perusta. Erilaiset laskentamenetelmät huomioivat lämpömäärän osakomponentteja ja niihin vaikuttavia tekijöitä eri tarkkuudella ja eri tavoin. (Nurmikolu 2015, s. 58.)

2.2 Roudan syvyyden laskentamenetelmät

2.2.1 Roudan syvyyteen vaikuttavat tekijät

Roudan syvyyteen vaikuttavat sekä jäätyvän maan rakenteelliset että ilmastolliset tekijät. Maan faasinmuutoslämpö, tilavuuslämpökapasiteetti ja lämmönjohtavuus riippuvat sen fysikaalisista ominaisuuksista. Faasinmuutoslämpö tarkoittaa maan jäätymissä vapautuvaa tai sulamisessa kuluvaan lämpömäärää painoyksikköä kohti. Tilavuuslämpökapasiteetilla tarkoitetaan lämpömäärää, joka tarvitaan muuttamaan maa-aineksen lämpötilaa yksikön verran tilavuusyksikköä kohti. Lämmönjohtavuus, eli maan kyky johtaa lämpöä, riippuu maa-aineksen tiheydestä, lämpötilasta, huokoisuudesta ja vesipitoisuudesta. (Saarelainen 1990, s. 275.) Rakennemateriaalin vesipitoisuudella on merkittävä vaikutus rakennekerroksen jäätymissä vastukseen ja lämmönjohtavuuteen.

Vesipitoisuuden kasvaessa veden jäätymislämpö lisääntyy ja siten myös kerroksen jäätymisvastus suurenee. Myös kerroksen lämmönjohtavuus kasvaa vesipitoisuuden kasvaessa. Tällöin jäätyneestä maaperästä vapautuvan lämmön pois virtaaminen helpottuu. (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 59.)

Ilmastotekijöiden vaikutus roudan syvyyteen on huomattava ja kylmemmässä ilmastossa routa tunkeutuu syvemmälle. Ilmastotekijöistä merkittävin on pakkasmäärä, jonka lisäksi vuoden keskilämpötila ja alueellinen pakkaskauden pituus vaikuttavat roudan tunkeutumissyvyyteen. Luonnollisessa ympäristössä lumen eristävä vaikutus pienentää roudan tunkeutuvuutta. (Ehrola 1996, s. 89, 94.) Radan kunnossapito kuitenkin vähentää lumen vaikutusta, kun ratarakenteen päällä on korkeintaan ohut lumikerros. Raiteen vieressä voi sen sijaan olla paljonkin lunta, mikä toimii tehokkaana eristeenä.

2.2.2 Stefanin menetelmä

Pelkistetyin vaihtoehto roudan syvyyden laskemiseksi on niin kutsuttu Stefanin menetelmä (1890), joka huomioi lämpömäärän osakomponenteista vain jäätyvän maan jäätymislämmön. Stefanin menetelmässä oletetaan ensinnäkin maanpinnan lämpötilan laskevan äkillisesti pakkaskauden keskimääräiseen lämpötilaan ja pysyvän tämän jälkeen vakiona. Toinen oletus on, että maan lämpötila kasvaa suoraviivaisesti maanpinnan lämpötilasta routarajalle asti, jonka alapuolella lämpötila oletetaan vakioksi. Kun lämpömäärän muutokset laajennetaan koskemaan koko pakkaskautta, saadaan roudan maksimisyvyyden laskentaan niin sanottu Stefanin yhtälö

$$z_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot F}{q_f}} \quad (2.2)$$

jossa z_f on suurin roudan syvyys [m], λ_f on jäätyneen maan lämmönjohtavuus [W/Km], F = pakkasmäärä [Kh] ja q_f = maaperän jäätymislämpö [Wh/m³].

Stefanin yhtälö voidaan esittää lyhyemmin routaantumiskertoimen k avulla muodossa

$$z_f = k \cdot \sqrt{F}, \text{ jossa } k = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f}{q_f}} \quad (2.3)$$

Stefanin kaava antaa yleensä todellista suuremman roudan syvyyden, sillä se jättää huomiotta routaantuvaan maahan lämpöä tuovia, ja sitä kautta roudan syvyyttä pienentäviä lämpötaseyhtälön osakomponentteja. Stefanin menetelmän tarkkuus kasvaa kosteassa maaperässä, missä jäätyminen aikana vapautuvasta lämpömäärästä huomattava osa koostuu veden jäätymislämmöstä. Stefanin menetelmää voidaan pitää roudan syvyyden laskentamallien perustana ja sitä on sittemmin kehitetty erilaisilla parannuksilla. (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 15–18.)

2.2.3 Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin sekä Beskowin menetelmän yhdistelmä

Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin (myöhemmin Watzingerin) menetelmä (1965) on kehitetty Stefanin menetelmästä. Lähtöoletuksiltaan menetelmät vastaavat toisiaan, ja lisäksi Watzingerin menetelmässä oletetaan maaperän lämpötila ilman vuotuista keskilämpötilaa vastaavaksi ennen pakkaskauden alkua. Lisäyksenä Stefanin yhtälöön Watzingerin menetelmässä huomioidaan jäähtyvän maan jäätymislämpö eli maan tilavuuslämpökapasiteetti routaantumisprosessin aikana vapautuvana lämpömäärän osakomponenttina. Watzingerin mallin mukainen roudan syvyys lasketaan seuraavalla kaavalla

$$z_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot F}{q_f + C_u \cdot T_u - 0,5 \cdot C_f \cdot T_f}} \quad (2.4)$$

jossa C_u on sulan maan tilavuuslämpökapasiteetti [Wh/m³K], T_u on maaperän lämpötila jäätymisprosessin alussa eli vuotuinen ilman keskilämpötila [°C], C_f on jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetti [Wh/m³K] ja T_f on maanpinnan lämpötila jäätymisprosessin aikana eli pakkaskauden keskilämpötila [°C]. (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 19–20.)

Beskow vei Stefanin yhtälöä eteenpäin huomioimalla sulana säilyvän maan jäähtymislämmön menetelmässään (1935). Stefanin mallista poiketen Beskowin mallissa routarajan alapuolista lämpötilaa ei oleteta vakioksi vaan syvyyden suhteen lineaarisesti kasvavaksi. Tällöin sulasta maasta suuntautuu kohti routarajaa lämpövirtaus, johon voidaan ajatella sisältyvän jäätyttömän maan jäähtymislämmön lisäksi geoterminen lämpö. (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 21.) Vapautuvan lämpömäärän roudan etenemistä hidastava vaikutus on Beskowin mallissa huomioitu pakkasmäärän redusointitekijällä

$$F_{red} = F - S \cdot G_+ \cdot t \cdot \lambda_u \cdot \frac{z_f}{\lambda_f} \quad (2.5)$$

jossa G_+ on mallissa vakioksi oletettu lämpötilagradientti routarajan alla [°C/m], t on pakkaskauden kesto [h] ja S on pakkaskauden aikaisen lämpötilagradientin ja roudan syvyyden vaihtelun huomioiva kokeellinen kerroin, jonka keskimääräiseksi arvoksi yleensä oletetaan 0,7. (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 22.) Beskowin lisäyksen jälkeen Stefanin yhtälö (kaava 2.2) saadaan muotoon

$$z_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot F_{red}}{q_f}} \quad (2.6)$$

Edellä esitetyt Watzingerin ja Beskowin menetelmien lisäykset yhdistämällä saadaan roudan syvyyden laskentakaavaksi

$$z_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot \left(F - S \cdot G_+ \cdot t \cdot \lambda_u \cdot \frac{z_f}{\lambda_f} \right)}{q_f + C_u \cdot T_u - 0,5 \cdot C_f \cdot T_f}} \quad (2.7)$$

Yllä oleva kaava soveltuu sellaisenaan vain homogeenisen rakenteen roudan syvyyden laskentaan. Ratarakenne koostuu useista kerroksista, joiden lämmönjohtavuus ja tilavuuslämpökapasiteetti vaihtelevat. Kerroksellisessa rakenteessa kunkin kerroksen jäätymiseen tarvittava pakkasmäärä tulee laskea erikseen osittaispakkasmäärämenetelmällä, jotta saadaan selville alimman kerroksen jäätymiseen käytettävissä oleva pakkasmäärä. (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 26–27.) Suomessa ratarakenteen roudan syvyyden mitoitusohje perustuu Watzingerin, Kindemin, Michelsenin sekä Beskowin menetelmien yhdistelmään kerrokselliseen rakenteeseen sovellettuna (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 84). Ratarakenteen routamitoitusta käsitellään tarkemmin luvussa 3.1.

2.3 Routiminen

2.3.1 Routimisen mekanismi

Routimisella tarkoitetaan sellaista maan jäätymistä, jonka yhteydessä maan tilavuus kasvaa. Maan tilavuuden kasvu saa aikaan yläpuolisen maanpinnan kohoamisen eli routanousun. Lisäksi routimisessa syntyy ulkopuoliseen rakenteeseen kohdistuva voimavaikutus, jota kutsutaan routavoimaksi tai -paineeksi. (Saarelainen 1990, s. 282.) Routimistapahtuman pääasiallinen aiheuttaja on jäätymisvyöhykkeeseen sulasta maasta imeytyvän veden jäätyminen jäälinsseiksi. Maamateriaalia, jossa tapahtuu suotuisissa kosteus- ja jäätymisolosuhteissa merkittävää jäälinsin muodostumista, kutsutaan routivaksi. Routimattomassa maassa sen sijaan ei tapahdu merkittävää jäälinsien muodostumista missään luonnollisissa olosuhteissa. Kaikki routanousu ei välttämättä aiheudu jäälinsien muodostumisesta, sillä huokosveden in-situ jäätymisestä johtuvaa routanousua voi esiintyä routimattomassakin maassa. (Nurmikolu 2004, s. 78–79.)

Kolme yleisesti hyväksytyä routimistapahtuman perusedellytyksiä ovat

- maalaji on routiva
- routivan maakerroksen tulee jäätyä eli lämpötilan laskea alle 0 °C
- vettä on riittävästi saatavilla jäälinsin muodostumispaikalle

Lisäksi routimispaineen tulee ylittää yläpuolisten maakerrosten ja rakenteiden aiheuttama kuormitus (Nurmikolu 2015, s. 65). Mikäli yksikin näistä edellytyksistä puuttuu tai toteutuu puutteellisesti, routimista ei tapahdu ollenkaan tai routiminen rajoittuu (Ehrola 1996, s. 98).

2.3.2 In-situ routanousu

Ilman lämpötilan laskiessa äkillisesti alle 0 °C, lämpimästä maasta käynnistyy lämpövirtaus kohti kylmempää ilmaa ja routaraja alkaa tunkeutua maaperään. Kun maan jäätyminen etenee riittävän nopeasti, jäätymisvyöhykkeeseen ei ehdi imeytyä tarpeeksi vettä jäälinssien muodostumiseksi. Mikäli maaperä on vedellä kyllästynyt, sen sisältämä huokosvesi jäätyy ja laajetessaan voi aiheuttaa maan tilavuuden kasvua eli in-situ routanousua. Edellytyksenä in-situ routanousulle on, ettei vesi jäätymislaajenemisen myötä mahdu alkuperäiseen huokostilaan eikä myöskään pääse poistumaan jäätyvän veden puristamana sivuille tai alaspäin. (Konrad & Morgenstern 1980; Nurmikolu 2004, s. 79.)

Routimattomaan maahan ei synny jäälinssijä, mutta huokosveden tilavuuden kasvusta aiheutuvaa in-situ routanousua voi esiintyä vedellä kyllästyneessä routimattomassakin maassa. Ratarakenteen kerrokset voivat olla vedellä kyllästyneitä heikentyneen tai toimimattoman kuivatuksen takia. Ratarakenne on myös pinnaltaan avoin ja rakenteiden alapinta voi olla tiivis tai jäässä, joten sulamis- ja sadevedet pääsevät ja jäävät helposti rakenteeseen täydentämään huokosten kyllästysastetta. Ratarakenteessa in-situ routanousu on huomioitava raiteen suurten tasaisuusvaatimusten takia. Jäälinssien aiheuttamaan routanousuun verrattuna sen merkitys on kuitenkin vähäinen. (Nurmikolu 2004, s. 79.)

2.3.3 Jäälinssin muodostuminen

Routimisprosessissa tapahtuvaa veden imeytymistä jäätymisvyöhykkeeseen ja jäälinssin muodostumista on tutkittu laajasti. Nykyisin yleinen käsitys routimisen kehittymiselle perustuu niin sanotun osittain jäätyneen vyöhykkeen (*frozen fringe*) olemassaoloon. Jäätymisvyöhyke muodostuu jäätyneen ja sulan maan väliin jäätymisrintaman alarajalle. Jäälinssit muodostuvat osittain jäätyneeseen vyöhykkeeseen, jossa on jäätymätöntä vettä alle 0 °C lämpötilassa. Jäätymätön vesikerros toimii vettä läpäisevänä kerroksena, jonka kautta vesi virtaa syntyvään jäälinssiin. Tämän jäätymättömän vesikerroksen olemassaolo on edellytys routimiselle. Jäätymättömän veden määrä jäätyneessä maassa riippuu voimakkaasti olosuhdetekijöistä kuten lämpötilasta ja paineesta sekä useista maan fysikaaliskemiallisista ominaisuuksista. (Ehrola 1996, s. 98–99; Kujala 1994 s. 16.)

Maarakeiden pintavoimilla on merkittävä vaikutus jäätymättömän veden olemassaoloon. Pintavoimien takia maarakeiden pinnoille on kiinnittynyt vesikerroksia, jotka jäätyvät selvästi alle 0 °C lämpötilassa. Lähimmäksi maaraetta sitoutuneet adsorptiovesikerrokset ovat lujemmin kiinnittyneet maarakeen pintaan ja jäätyvät alemmissa lämpötiloissa kuin ulommat adsorptiovesikerrokset. Hienorakeisissa maalajeissa huokospinta-ala on suuri, minkä takia maarakeiden pinnalle sitoutuu suurempi vesimäärä kuin karkearakeisissa maalajeissa. Routimisen kannalta olennaista on sekä jäätymisvyöhykkeessä oleva että sinne sulana olevista maakerroksista alipaineen vaikutuksesta virtaava vesi. (Ehrola 1996, s. 99–100; Saarinen 2008, s. 35.)

Jäälinsien muodostuminen edellyttää tilapäistä vakaata olosuhdetta, joka voi syntyä, kun maan jäätyminen etenee riittävän hitaasti. Tällöin jäätyneen ja sulan maan väliin jäätymisrintaman alarajalle syntyy hyvin ohut jäätymisvyöhyke, jonka yläpuolelle jäälinsit muodostuvat. Pitkään paikallaan pysyvä routaraja mahdollistaa jäälinsien kasvun niin pitkään kuin vettä on saatavilla. Sen sijaan maan jäätyminen nopea eteneminen pienentää routimista, kun jäälinsien kasvumahdollisuus lyhenee ja linssi jää ohueksi. Kun maan jäätyminen jatkuu, muodostuu uusi jäätymisvyöhyke syvemmälle maahan ja uuden jäälinsin muodostuminen alkaa. (Ehrola 1996, s. 99–100.)

2.4 Radan rakenne

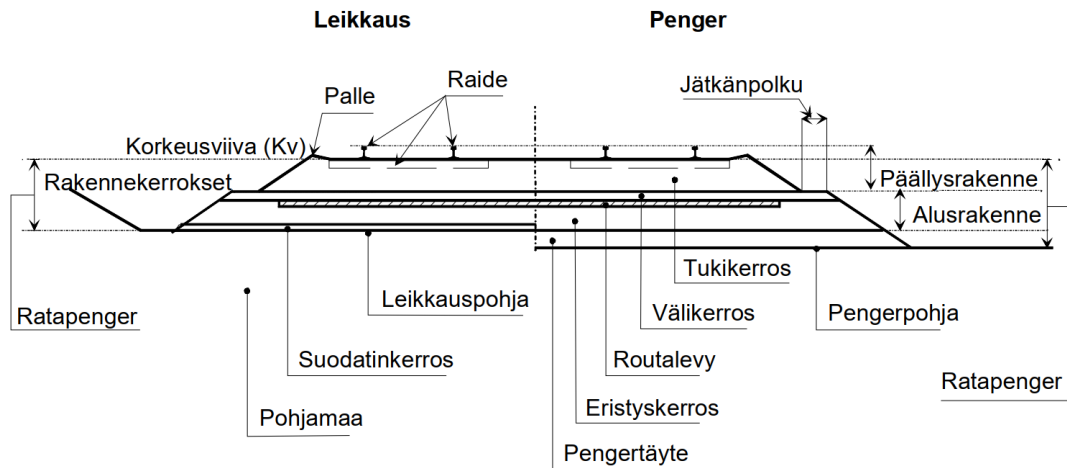
Radan rakennekerrokset jaetaan alus- ja päällysrakenteeseen. Raide ja tukikerros kuuluvat päällysrakenteeseen. Alusrakenne koostuu väli- ja eristyskerroksesta sekä mahdollisesta suodatinkerroksesta. Radat jaetaan viiteen alusrakenneluokkaan suurimman sallitun liikennöintinopeuden perusteella. Alusrakenneluokan määrää henkilö- tai tavaraliikenne sen mukaan, kumman vaatimustaso on korkeampi. (Liikennevirasto 2018, s. 6–8, 16.) Alusrakenneluokat ovat esitettynä taulukossa 1.

Taulukko 1. *Radan alusrakenneluokat (muokattu lähteestä Liikennevirasto 2018, s. 16).*

Alusrakenneluokka	Henkilöliikenteen suurin sallittu nopeus, V [km/h]	Tavaraliikenteen suurin sallittu nopeus 225 kN akselipainolla, V [km/h]	Tavaraliikenteen suurin sallittu nopeus 250 kN akselipainolla, V [km/h]
0	≤ 50	≤ 40	≤ 40
1	≤ 120	≤ 100	≤ 60
2	≤ 200	≤ 100	≤ 80
3	≤ 250	≤ 120	≤ 100
4	> 250	> 120	> 100

Rakennekerrosten lisäksi ratapenkereeseen voi kuulua pohjamaan luonnollisia korkeusvaihteluita tasoittava ja rakentamista helpottava pengertäyte. Pengertäytteen

tulee tarjota tasalaatuinen ja ominaisuuksiltaan luonnonmaapohjaa vastaava alusta sitä ylemmille rakennekerroksille. (Kolisoja 2022.) Kuvassa 2 on esitetty tyypillinen kaksiraiteisen radan poikkileikkaus. Kuvan vasemmalla puolella rata on rakennettu leikkaukseen ja oikealla puolella penkereelle.



Kuva 2. Radan rakenne ja siihen liittyviä nimityksiä (Liikennevirasto 2018, s. 8).

Raiteeseen kuuluvat ratapölkkyt ja -kiskot, kiskojen kiinnitys- ja jatkososat sekä vaihteet ja muut raiteen erikoisrakenteet (Liikennevirasto 2018, s. 7). Tukikerros muodostaa raiteelle tasaisen, kuormituskestävän ja yhdessä muiden rakennekerrosten kanssa jäykkyydeltään sopivan alustan, jotta raide pysyy geometrisesti oikeassa asemassa ja asennossa. Tukikerros jakaa ja vaimentaa toistuvasta liikennekuormituksesta aiheutuvat jännitykset alempien kerrosten sallimalle tasolle. Tukikerrosmaterialin hyvä vedenläpäisevyys on tärkeää rakenteen tehokkaan kuivatuksen mahdollistamiseksi. (Väylävirasto 2023, s. 14–15, Luomala 2022.) Tukikerroksessa käytettävälle materiaalille on asetettu rakeisuus-, muotoarvo- ja lujuusvaatimuksia. Ensisijaisesti tukikerros tehdään raidesepeleistä. (InfraRYL 2023.)

Välikerros tarjoaa tukikerrokselle tasaisen, kestävän ja vettä läpäisevän alustan. Välikerros lisää rakenteen kantavuutta ja yhdessä muiden rakennekerrosten kanssa ehkäisee alla olevien maakerrosten routimisesta aiheutuvia haitallisia muodonmuutoksia radassa. Välikerros estää tuki- ja eristyskerroksen sekoittumista toisiinsa. (Kolisoja 2022.) Välikerros rakennetaan routimattomasta hiekasta, sorasta tai kalliomurskeesta yhtenä 300 mm:n kerroksena sulan maan aikana (InfraRYL 2023).

Eristyskerros muodostaa välikerrokselle tasaisen ja kantavan pohjan sekä siirtää ja jakaa junaliikenteestä aiheutuvaa kuormitusta alemmas pohjamaalle. Yhdessä muiden rakennekerrosten kanssa eristyskerros pienentää tai estää pohjamaan routimisesta aiheutuvia haitallisia muodonmuutoksia radassa. Lisäksi eristyskerros estää

välikerroksen ja pohjamaan sekoittumista toisiinsa sekä pysäyttää kapillaarisen veden nousun kerroksen alaosaan. (Liikennevirasto 2018, s. 6.) Eristyskerroksessa käytetään routimattomia materiaaleja, ensisijaisesti koko eristyskerros rakennetaan sen yläosan rakeisuusvaatimukset täyttävästä sorasta. Mikäli eristyskerroksessa käytetään kalliomurskettä, rakennetaan väli- ja eristyskerros yhtenä kerroksena. (InfraRYL 2023). Routamitoitus määrää käytännössä eristyskerroksen paksuuden (Kolisjoja 2022). Olemassa olevan ratarakenteen lämmöneristävyyden parantamiseksi ja pohjamaan routimisen ehkäisemiseksi eristyskerroksen pintaan voidaan asentaa routaeristys suulakepuristetusta routalevyistä (Liikennevirasto 2018, s. 7).

Suodatinkerroksen tehtävänä on estää leikkauksessa eristyskerroksen ja pohjamaan sekoittuminen ja yhdessä muiden rakennekerrosten kanssa ehkäistä pohjamaan routimisesta aiheutuvia haitallisia muodonmuutoksia radassa (Kolisjoja 2022). Suodatinkerroksen tarve lasketaan eristyskerroksen ja pohjamaan raekokosuhteen perusteella (InfraRYL 2023).

2.5 Routaongelmat Suomen rataverkolla

Merkittävä osa Suomen rataverkosta on rakennettu ennen kuin ratarakenteille ja niissä käytetyille materiaaleille on ollut läheskään nykyisten kaltaisia ohjeita ja vaatimuksia. Ensimmäinen rataosuus Helsingistä Hämeenlinnaan on avattu liikenteelle jo 1860-luvulla, ja pääosa rataverkosta on valmistunut 1800-luvun viimeisten ja 1900-luvun ensimmäisten vuosikymmenien aikana (Uimonen 2008, s. 16). Alkuun radan rakentamisessa pyrittiin massatöiden minimointiin ja rakennekerroksissa on saatettu käyttää myös routivia materiaaleja. Silloiset tyyppilliset maksiminopeudet olivat vain noin 25–35 km/h ja talvella nopeuksia rajoitettiin tätäkin alhaisemmiksi. Erillisiä alusrakennekerroksia ei ollut vaan pohjamaan ja pengertäytteen päälle rakennettiin vain 0,35–0,50 metrin sorakerros raidetta tukemaan. Kevennetyt rakenteet mahdollistivat rataverkon melko nopean laajenemisen alhaisilla perustamiskustannuksilla, mutta kulkunopeuden kustannuksella. (Saarinen 2008, s. 23–24; Pylkkänen & Nurmikolu 2015, s. 10–12.)

Routimista ehkäistiin 1900-luvun alkupuoliskolla muun muassa kohottamalla radan korkeusviivaa, radesorakerrosta kasvattamalla, maakivien poistolla radan alta ja vaihtamalla radan rakenteen routivia hienoainespitoisia maalajeja vähemmän routiviin. Tehdyillä toimenpiteillä ei kuitenkaan saatu routimishaittoja poistettua. Säästäväisyys ohjasi radan rakennus- ja kunnossapitotöitä eikä liikennöintiä pidetty turvallisena kuin alhaisilla nopeuksilla. Rautatieliikenteessä oli kuitenkin jatkuvaa painetta nopeuden nostolle. 1950-luvulle tultaessa rautatieliikenne oli suurissa vaikeuksissa, kun kalusto

olisi mahdollistanut liikennöintinopeuksien kasvattamisen, mutta rataverkko oli sotien jälkeen erittäin huonossa kunnossa. (Saarinen 2008, s. 26; Pylkkänen & Nurmikolu 2015, s. 12–13.)

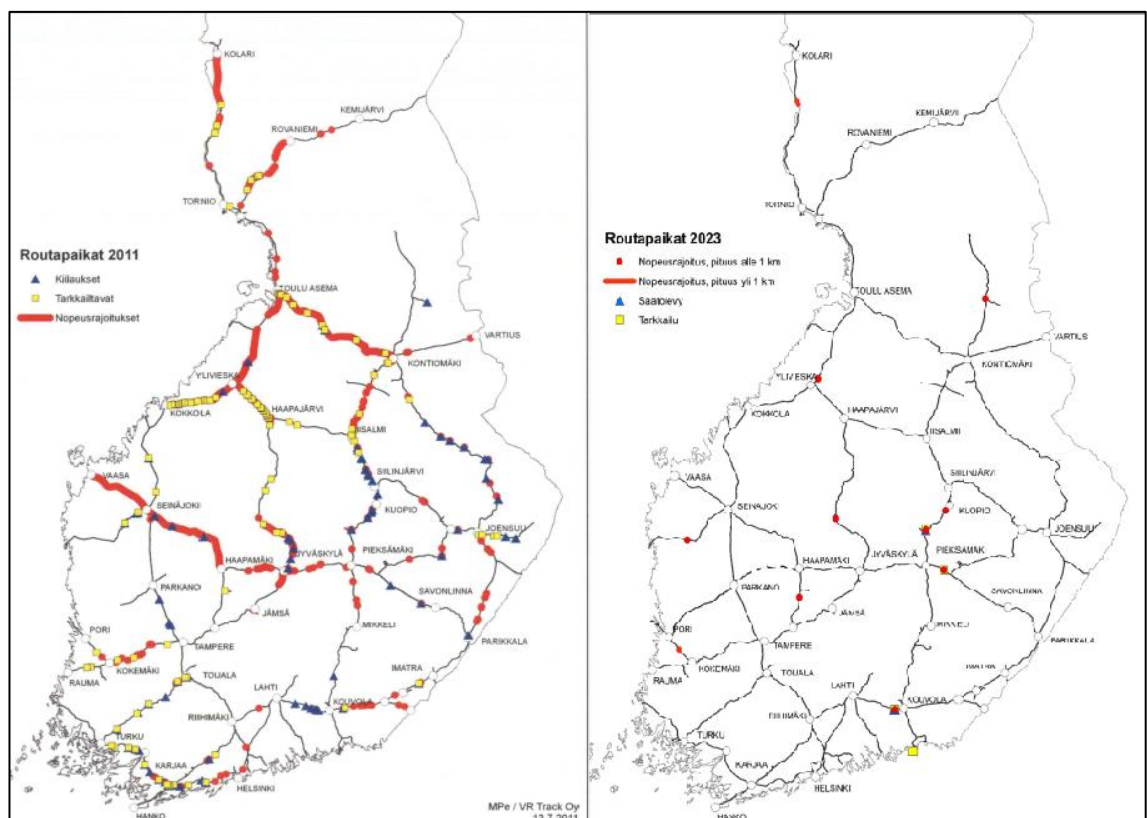
Ratoja perusparannettiin useasti 1950- ja 1960-luvuilla. Routahaittoja pyrittiin poistamaan perusparannuksen yhteydessä muun muassa korvaamalla routivia maalajeja hiekka- ja sorakerroksilla, parantamalla radan kuivatusta ja rakentamalla siirtymäkiiloja. Liikenteen asettamat vaatimukset kasvoivat radan parannustöiden vaatimustasoa nopeammin ja kertaalleen perusparannettuja ratoja parannettiin uudestaan 1960-luvun lopussa. (Saarinen 2008, s. 28.) Perusparannusten toteuttaminen edellytti ratateknisten määräysten ja ohjeiden kehittämistä nopeudennostotavoitteita vastaaviksi (Pylkkänen & Nurmikolu 2015, s. 14). Tukikerroksen alapuoliset väli- ja eristyskerrosrakenteet otettiin käyttöön 1960-luvulla. Samalla materiaalivaatimuksia tarkennettiin, esimerkiksi rakennekerrosten alla ohjeistettiin käyttämään penkereen yläosan korkeusviivasta 1,2–1,8 metrin syvyyteen vain routimatonta pengertäytettä. Eristyskerroksessa tuli käyttää routimatonta hiekkaa tai soraa. Routaeristelevyjien käyttö aloitettiin 1970-luvulla ratarakenteen routimisen ehkäisemiseksi. (Saarinen 2008, s. 26–28.) Routalevyjen käytöstä on tullut yleistä olemassa olevien ratojen routasuojauksessa. Kuvaan 3 on merkitty vihreällä värillä routaeristetyt rataosat.



Kuva 3. Routaeristelevyjä on asennettu laajalti Suomen rataverkolle. (Väylävirasto 2024a).

Vanhoja rakenteita on uusittu ja routahaittoja pyritty poistamaan vuosien saatossa. Mitään vakiintunutta tapaa ei vanhan rakenteen uusimiselle ole ollut. Vaatimusten kasvaessa alusrakenne on yleensä muuttunut leveämmäksi ja paksummaksi. Tämän takia alkuperäisiä raidesorakerroksia saattaa olla useiden kymmenien senttimetrien syvyydessä nykyisen raidesepelin alla. (Saarinen 2008, s. 28–30.) Vuosien mittaan routivaa maa-ainesta on päässyt rakenteisiin pohjamaan ja alusrakenteen sekoittuessa. Lisäksi routimisherkyys on kasvanut rakennekerros materiaalien jauhautuessa ja hienontuessa. Rakennemateriaalien vaihtelu ja muut epäjatkuvuuskohdat synnyttävät haitallista epätasaista routanousua ja samalla raidegeometriavirheitä. (Väylävirasto 2024b, s. 1.)

Aikanaan tehdyt ratkaisut aiheuttavat haasteita radanpidolle nykyäänkin. Jatkuvasta perusparannuksesta huolimatta routahaittoja esiintyy olemassa olevilla radoilla 2000-luvullakin. Suomen rataverkolla on etenkin kovina pakkastalvina vuosina 2010 ja 2011 ollut erityisen runsaasti roudan vuoksi asetettuja nopeusrajoituksia, epätasaisuuksien korjaamisen vuoksi tehtyjä kiilauksia ja tarkkailtavia kohteita. (Pylkkänen & Nurmikolu 2015, s. 15.) Näiden vuosien jälkeisinä lauhempina talvina routahaitat ovat olleet huomattavasti vähäisempiä. Lisäksi viime vuosina tehdyillä routakorjauksilla routanopeusrajoitusten pituus on kääntynyt laskuun. (Väylävirasto 2024b, s. 13). Keväällä 2011 ja keväällä 2023 voimassa olleita routarajoituksia on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. *Routapaikkarekisteriin ilmoitetut nopeusrajoitukset, kiilaukset ja tarkkailtavat kohteet kartalla vuosina 2011 (vasemmalla) ja 2023 (Liikennevirasto 2011, s. 19; Väylävirasto 2024b, s. 14).*

Väyläviraston hallinnoimaan routapaikkarekisteriin kerätään tietoa rataverkolla esiintyvistä routapaikoista, jotka aiheuttavat ongelmia radan kunnossapidon tai liikennöinnin kannalta (Väylävirasto 2024b, s. 2). Routapaikkailmoitusten yhteydessä kunnossapitäjien tulee arvioida mahdollisia syitä, jotka aiheuttavat kyseisen alueen routimisen. Syitä voivat olla radan rakenteeseen liittyvät ongelmat, raiteen epäjatkuvuuskohdat ja ilmastotekniset olosuhteet. Rakenteeseen liittyviä puutteita ovat esimerkiksi routivan pohjamaan sekoittuminen rakennekerrokseen ja vanhat, vettyneet routaeristeet, teknisiä epäjatkuvuuskohtia kalliroleikkaukset ja tunneleiden suut ja ilmastoteknisiä tekijöitä pakkasmäärä ja pitkät pakkasjaksot. Vuonna 2023 yleisimmät routavaurioiden syyt liittyivät pohjasuhteisiin, tosin neljäsosan routavaurioista syitä ei ole osattu nimetä. (Väylävirasto 2024b, s. 15–16.) Routapaikkarekisterin tietojen avulla routakorjauksia pystytään priorisoimaan toistuvasti routiviin kohteisiin (Väylävirasto 2024b, s. 22.)

Ratojen routimisesta seuraa sekä liikenteellistä haittaa että lisääntyviä kunnossapidon kustannuksia. Routapaikoille asetetut nopeusrajoitukset vaikuttavat etenkin henkilöliikenteen aikatauluihin ja tärkeimpien rataosien myöhästymiset voivat kertaantua koko liikenneverkolle. Liikenteellisen haitan suuruutta voidaan hahmottaa myöhästymisminuuttien avulla. Teoreettisella myöhästymisellä tarkoitetaan suurimman sallitun nopeuden ja routanopeusrajoituksen välisen eron aiheuttamaa viivästymistä junan kulkuun minuutteina. Teoreettiset myöhästymisminuutit voidaan laskea routapaikka- ja ratavälikohtaisesti. Liikenteellisen haitan merkittävyys riippuu radan liikenteellisistä olosuhteista, eivätkä samansuuruiset routavauriot aiheuta yhtä suurta kunnossapitotarvetta eri rataosuksilla. Korkeammalla kunnossapitotasolla sallitaan pienempiä poikkeamia, jolloin raidegeometriavirheiden raja ylittyy herkemmin ja korjaustarve kasvaa. (Väylävirasto 2024b, s. 16; Soininen 2013, s. 33.)

3. RATARAKENTEEN ROUTASUOJAUS

3.1 Routasuojauksen suunnittelu

Ratarakenteen routasuojauksen suunnittelussa tavoitteena on routanoususta aiheutuvan raiteen epätasaisuuden suuruuden ja toistuvuuden hallinta, sillä raiteen tasaisuus on sujuvan raideliikenteen edellytys. Käytännössä epätasaisuuden suuruuden hallinta tarkoittaa ratarakenteen mitoittamista siten, että routa ei pääse mitoitusaltvena tunkeutumaan routivaan maahan eikä liikennettä haittaavia routavauriota pääse tapahtumaan. Epätasaisuuden toistuvuutta hallitaan mitoitusaltven ankaruuden valinnalla. Mitoittavan pakkasmäärän tilastollinen toistumistiheys vastaa todennäköisyyttä, jolla routimista sallitaan tapahtuvaksi. (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 9)

Mitoitusmenetelmät perustuvat joko roudan syvyyden tai sallitun routanousun suuruuden laskentaan. Raideliikenteessä tasaisuusvaatimus on niin suuri, ettei routanousua lähtökohtaisesti sallita. Sallitun routanousun mitoitusoptimointi ei ole kannattavaa, koska radan rakennekustannuksissa saavutettava hyöty on vähäinen verrattuna routahaittojen liikennevaikutuksiin ja kunnossapidon kustannuksiin. Lisäksi radan eristäminen jälkikäteen on erityisen hankalaa, koska jatkuvan liikennöinnin takia riittävän pitkän yhtäjaksoisen työraon saaminen on useilla rataosuuksilla vaikeaa. Tästä syystä ratarakenteen routamitoituksessa on perusteltua käyttää roudan syvyyden laskentaan perustuvaa mitoitusmenetelmää. Roudan syvyyteen perustuvien mitoitusmenetelmien käytön lähtökohta on, ettei routimista sallita. Mitoitusmenetelmissä radan routimattomien rakennekerrosten paksuus mitoitetaan sellaiseksi, että routa ei pääse ollenkaan tunkeutumaan routivaan maahan mitoitusaltvena. (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 9.)

Nurmikolu & Kolisoja (2002) tekivät routamitoitusohjeen laadintaa varten herkkyytstarkasteluja eri parametrien vaikutuksesta laskennalliseen roudan syvyyteen. Sulassa maassa routarajan alapuolinen lämpötilagradientti aiheuttaa lämmön virtaamisen ylöspäin routarajalle. Lämpötilagradientin suuruus riippuu lämpötilaerosta routarajan alapuolella eli kesäkaudella maahan varastoituneen lämmön määrästä. Mitä suurempi lämpötilagradientti on, sitä suurempi on sulasta maasta virtaavan lämmön määrä. Beskowin menetelmässä sulasta maasta routarajalle virtaava jäähtymislämpö on huomioitu pakkasmäärän redusointitekijällä. Herkkyytstarkasteluissa lämpötilagradientin suuruudella huomattiin olevan merkittävä vaikutus Beskowin menetelmällä laskettuun roudan syvyyteen. Lämpötilagradientin on todettu olevan verrannollinen vuotuisen

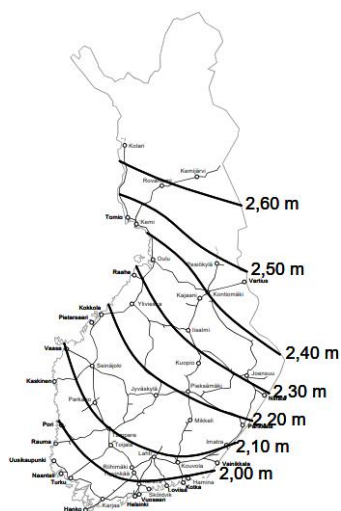
ilman keskilämpötilaan, minkä takia keskilämpötila on otettu routamitoituksen tapauskohtaisesti valittavaksi parametriksi. (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 56–57, 84.)

Myös pakkasmäärä on merkittävästi roudan syvyyteen vaikuttava tekijä. Pakkasmäärän suuruus vaihtelee runsaasti vuosittain talven ankaruuden mukaan. Mitoittavan pakkasmäärän tilastollisen toistumistiheyden valinnalla saadaan lisättyä mitoittamiseen varmuutta. Routamitoituksessa käytettävät rakennekerrosten materiaaliparametrit ovat kirjallisuudesta selvitettyjä oletusarvoja, joihin ei ole lisätty varmuuskerrointa. (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 84.) Routamitoitus tehdään ratateknisten ohjeiden (RATO) osan 3 mukaisesti. Roudan syvyyteen vaikuttavat tekijät on huomioitu valmiiksi ohjeen mitoituskäyrästä.

3.2 Routamitoitus

3.2.1 Lähtökohdat

Routamitoituksessa pohjamaa luokitellaan joko routivaksi tai routimattomaksi Liikenneviraston (nyk. Väylävirasto) ohjeen ”Geotekniset tutkimukset ja mittaukset” mukaisesti. Radan routasuojauksen parantaminen tulisi ensisijaisesti toteuttaa vaihtamalla routivat materiaalit routimattomiin eli kasvattamalla rakenteen routimatonta syvyyttä. Routasuojausta tarvitaan vain, jos rata on rakennettu routivalle pohjamaalle. Routimattomalla pohjamaalla rakennekerrosten paksuutta voidaan ohentaa, jos pohjamaa on tasalaatuinen ja täyttää rakennekerrosten materiaalivaatimukset. Radan routimattomien rakennekerrosten kokonaispaksuuden tulee olla kuvan 5 mukainen, kun radan alusrakenneluokka on 2, 3 tai 4. (Liikennevirasto 2018, s. 22.)



Kuva 5. Routaeristämättömän radan routimattomien rakennekerrosten kokonaispaksuus perustuen ilmastotilastoihin kaudelta 1978–2007. (Liikennevirasto 2018, liite 1)

Alusrakenneluokissa 0 ja 1 raideliikenteen vaatimustaso on matalampi, joten alusrakenneluokan 1 radoilla routimattomien rakennekerrosten kokonaispaksuus saa olla 0,2 m ja alusrakenneluokan 0 radoilla 0,6 m kuvan 5 mukaisia mittoja pienempi. Jos radan väli- ja eristyskerroksen materiaalina käytetään murskattua kiviainesta, kuvan 5 mukaisia routimattoman radan rakennepaksuuksia on kasvatettava 15 prosentilla. Alusrakenneluokakohtaiset kiviaineksista rakennettävien siirtymäkiilojen kaltevuudet on esitetty InfraRYLissä. (Liikennevirasto 2018, s. 22.)

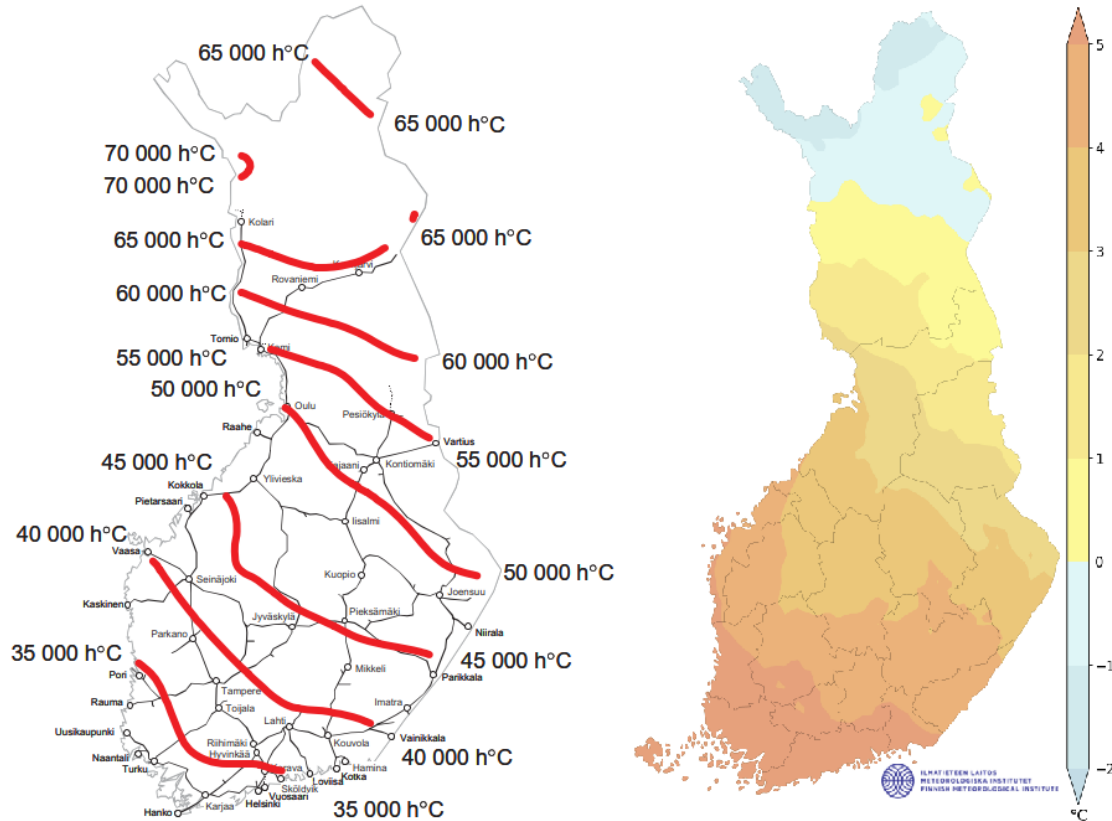
3.2.2 Routalevyjen käyttö

Radan routasuojaus voidaan toteuttaa myös korvaamalla osa routimattomasta maamateriaalista XPS-routalevyillä, jolloin routasuojaus saavutetaan ohuemalla kokonaisrakennepaksuudella. Routalevyjen käyttö perustuu niiden hyvään lämmöneristävyyteen ja sen säilymiseen levyyn radassa kohdistuvasta suuresta kuormituksesta huolimatta. Routalevy hidastaa sekä yläpuolelta tulevan routarintaman etenemistä routivaan pohjamaahan että maahan varastoituneen lämmön poistumista ratapenkereestä pakkaskauden aikana. Rakenteen routavastukseksi nimitetään pakkasmäärää, joka vaaditaan jäädyttämään tietyn paksuinen rakenne. Ratarakenteen routiminen estetään mitoittamalla routimattomien kerrosten paksuus siten, että niiden yhteenlaskettu routavastus on yhtä suuri kuin mitoittava pakkassumma. Routalevyjen avulla voidaan ohuemilla rakennekerroksilla lisätä routavastus sellaiselle tasolle, että routaraja ei pääse tunkeutumaan rakennekerrosten alapuoliseen routivaan pohjamaahan. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 17–21.)

Routalevyjen käyttö edellyttää aina Väyläviraston lupaa kaikissa kohteissa. Uusien ratojen rakennekerrokset tehdään routimattomista materiaaleista eikä routalevyjä lähtökohtaisesti käytetä. Routalevyt asennetaan välikerroksen alle ja routalevytetty osuus tulee aina päättää siirtymäkiilaan. Routalevyjen nimellispaksuudet ovat 40, 60, 80, 100 ja 120 mm, joista 40 mm levyä voidaan käyttää vain siirtymärakenteissa. Routalevyjen alapuolella on oltava vähintään 300 mm kerros routimatonta luonnonmateriaalia tai 450 mm kerros murskattua kiviainesta. Lisäksi etäisyys routalevyn alapinnasta ylimpään pohjavedenpintaan tulee olla suurempi kuin routalevyn alla olevan materiaalin kapillaarinen nousukorkeus. (Liikennevirasto 2018, s. 22–23.)

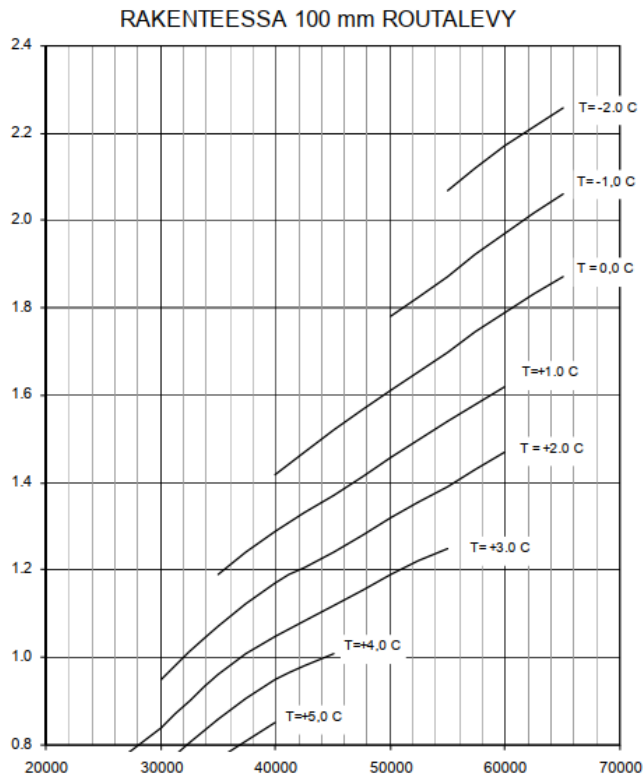
Routaeristettävien ratojen mitoitus tehdään mitoituskäyrästöjen avulla mitoituspakkasmäärän sekä vuotuisen ilman keskilämpötilan perusteella. Pakkasmäärän toistumistiheys valitaan tapauskohtaisesti rataosan alusrakenneluokan perusteella. Routaeristettävän radan mitoituksessa käytettävät pakkasmäärän toistumisjaksot ovat 5, 20 ja 50 vuotta. Alusrakenneluokissa 2–4 mitoituspakkasmäärän

toistumisjaksona käytetään 50 vuotta sekä ratalinjalla että vaihdealueella. (Liikennevirasto 2018, s. 22.) Kuvassa 6 vasemmalla on esitetty kerran 50 vuodessa toistuva suurin pakkasmäärä kauden 1978–2007 perusteella ja oikealla vuoden keskilämpötilat vertailujaksolla 1991–2020.



Kuva 6. Vasemmalla mitoituspakkasmäärä F_{50} ($h^{\circ}C$) kauden 1978–2007 lämpötilahavaintojen perusteella (Liikennevirasto 2018, liite 1). Oikealla vuoden keskilämpötila ($^{\circ}C$) vertailukaudella 1991–2020 (Ilmatieteenlaitos 2024).

Nurmikolan & Kolisojan (2001) XPS-routalevyjen käyttäytymisestä ratarakenteessa tehdyn tutkimuksen perusteella levyjen mitoitustämmönjohtavuudeksi on valittu kymmenen tilavuusprosentin mitoitettavaa kosteuspitoisuutta vastaava $0,050 \text{ W/Km}$ ja levyn kuivatiheydeksi 40 kg/m^3 . Lisäksi routalevyjen nimellispaksuudesta on vähennetty 10 mm kompensoimaan levyyn kohdistuvia rasituksien, kuten sepelirakeiden tunkeutumisen ja levyn kokoonpuristumisen, vaikutuksia. Routalevyjen materiaaliparametrit on huomioitu mitoituskäyrästöissä. (Nurmikola & Kolisoja 2002, s. 85.) Mitoituskäyrästöt on esitetty RATO:n osan 3 liitteessä 1 kaikille routalevyypaksuuksille. Kuvassa 7 on esimerkki rakenteen mitoituksesta 100 mm paksuisella routalevyllä. Mitoituskäyrästöissä on y-akselilla routimattomien rakennekerrosten kokonaispaksuus [m] ja x-akselilla mitoitettava pakkasmäärä [Kh]. (Liikennevirasto 2018, liite 1.)



Kuva 7. Routimattoman kerrospaksuuden mitoitus 100 mm routalevyllä vuotuisen ilman keskilämpötilan ja mitoittavan pakkasmäärän perusteella. (Liikennevirasto 2018, liite 1)

3.2.3 Routimitoitusesimerkki

Mitoitusesimerkkinä käytetään tavanomaista routasuojauskohdetta, joka sijaitsee Seinäjoen seudulla. Kohde kuuluu alusrakenneluokkaan 2, joten routamitoitusohjeen mukaan mitoittava pakkasmäärä on kerran 50 vuodessa toistuva pakkasmäärä. Kuvasta 6 voidaan lukea mitoituspakkasmääräksi 42 000 h°C ja vuotuiseksi ilman keskilämpötilaksi 3,5 °C. Näiden lähtötietojen avulla routimattoman rakenteen kokonaispaksuus saadaan määritettyä RATO 3:n mitoituskäyrästä (esimerkkikuvat 5 ja 7). Tulokset on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Routalevypaksuus ja routimattoman rakenteen kokonaispaksuus. (muokattu lähteestä Liikennevirasto 2018, liite 1)

Routalevypaksuus (mm)	Routimattoman rakenteen kokonaispaksuus (K) vähintään (m)
0	2,15
40	1,65
60	1,39
80	1,18
100	1,04
120	0,92

Taulukon 2 tuloksista voidaan valita sopivin paksuus sekä routalevyille että alusrakenteelle. Tukikerrospaksuus on pääsääntöisesti 0,55 metriä. Jos routimattoman alusrakenteen paksuus on esimerkiksi 0,8 m, tarvitsee kohteeseen asentaa 60 mm paksuinen routalevy, jolloin routimattoman rakenteen kokonaispaksuus on 1,41 m. Alusrakennepaksuuden ollessa pienempi, vaaditaan routasuojaukseen paksumpi routalevy.

3.3 Routalevyjen asennus

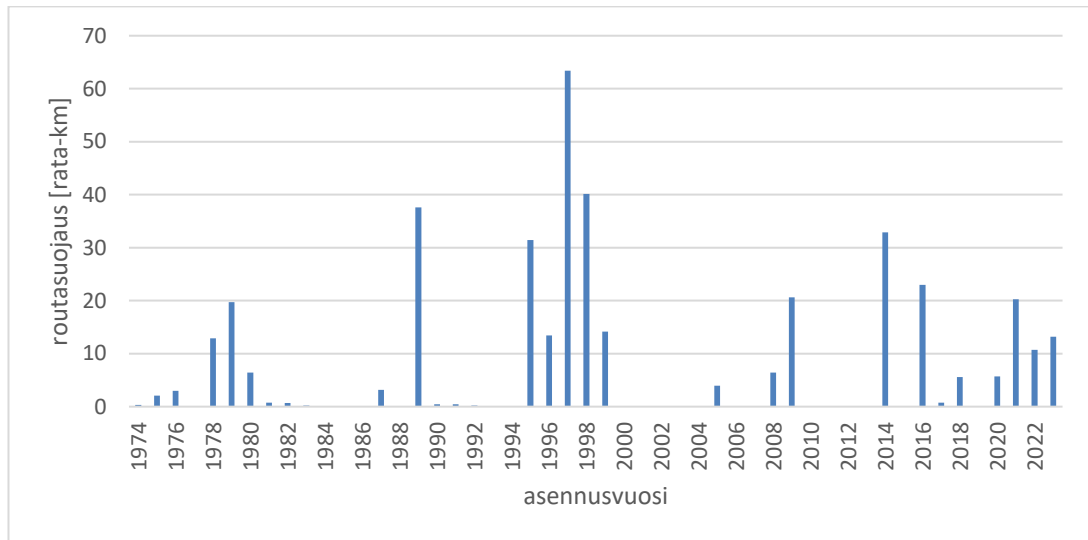
3.3.1 Asennusmäärät ja valmistajat

Routaeristelevyjä on käytetty Suomessa ratarakenteessa vuodesta 1970 lähtien. Levyt ovat joko muottipaisutetusta polystyreenistä valmistettuja EPS-levyjä tai suulakepuristetusta polystyreenistä valmistettuja XPS-levyjä. Aluksi käytettiin pääasiassa EPS-levyjä, joita on asennettu arviolta lähes 200 ratakilometrille vuosina 1971–1980 (Myyrä 1983). EPS-levyjen käytöstä kuitenkin luovuttiin jo 1980-luvulla, kun koerakenteissa todettiin EPS-levyjen kosteudenvastuskyvyn heikentyneen kuormituksen takia. Vuodesta 1981 lähtien on asennettu ainoastaan XPS-levyjä. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 31.)

Suomessa on käytetty kolmen materiaalivalmistajan XPS-levyjä. 1980-luvulla asennettiin eniten suomalaisen Finnfoamin valmistamia vaaleankeltaisesta väristään tunnettuja levyjä. Muita levytoimittajia ovat saksalainen vihreistä levyistään tunnettu Basf ja yhdysvaltalaislähtöinen sinisistä levyistään tunnettu Dow Chemical Company (Dow). Vuosittaisista asennusmääristä, -kohteista ja levytyypeistä ei ole kerätty tietoa järjestelmällisesti. Nurmikolun & Kolisojan vuonna 2001 tekemän selvityksen perusteella levyjä olisi asennettu eniten vuosina 1993 ja 1998–1999. Yhteensä levyjä olisi hankittu vuosina 1981–2000 noin 337 000 m³, joka vastaa noin 1050 ratakilometriä. Selvityksen tiedot perustuvat levyjen hankintamääriin ja hankinnasta tehtyihin puitesopimuksiin, jotka ovat osittain ristiriitaisia ja siten määrissä on epävarmuutta. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 31–32.)

Väyläviraston routaeristerekisteriin on koottu tietoa asennetuista routalevyistä rataosittain ja -kilometreittäin, asennusvuoden, levypaksuuden ja -tyypin sekä valmistajien osalta. Pääsääntöisesti asennetuista levyistä on ilmoitettu rataosa ja levytyksen pituus ratakilometreinä. Muita tietoja on rekisterissä vaihtelevasti, esimerkiksi levyjen valmistajat on ilmoitettu vain viime vuosien osalta. Vuosina 2021–2023 on asennettu vain Finnfoamin valmistamia XPS-routalevyjä. Routaeristerekisterin mukaan levyjä on asennettu yhteensä 886 rkm, joista asennusvuosi on ilmoitettu vain 394 rkm

osalta. Routaeristerekisterin mukaiset asennusmäärät vuosittain on koottu kuvaan 8. (Väylävirasto 2024c.)

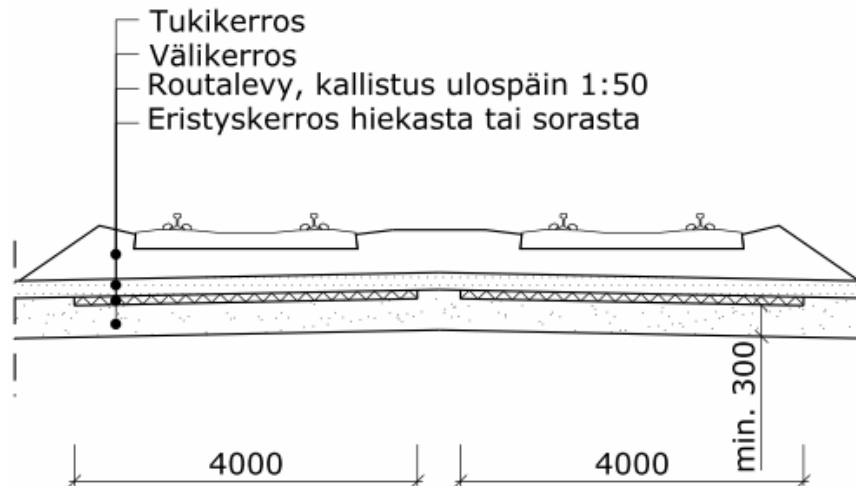


Kuva 8. Routaeristerekisterin mukaiset levyjen asennusmäärät vuosittain 1974–2023. (Väylävirasto 2024c.)

Pylväskaavion asennusmäärät ovat vain suuntaa antavia, sillä yhteensä 493 rkm routalevytyksen osalta asennusvuosi ei ole tiedossa. Routaeristykseen määrä on laskettu routaeristerekisterissä ilmoitettujen levytyksen alku- ja loppupisteiden mukaan. Routaeristerekisteriin on tallennettu asennustietoja yli 20 vuotta pidemmältä ajanjaksolta kuin Nurmikolun ja Kolisojan vuonna 2001 tekemään selvitykseen, mutta silti routaeristerekisterin asennusmäärä on pienempi. Voidaan siis todeta, että rekisterin tiedot ovat puutteellisia ja esitetyt määrät todellista pienempiä.

3.3.2 Asennustavat

Routalevyjen asentaminen ohjeistetaan kahdella eri tavalla InfraRYL:ssä. Routalevyt voidaan asentaa kaivamalla välikerroksen alapintaan tai sepelin seulonnan yhteydessä tukikerroksen alapintaan. Välikerroksen alle asentaminen suojaa routalevyjä sepelirakeiden tunkeutumiselta routalevyn sisään, joka heikentäisi levyn eristyskykyä. Routalevyjen asentaminen välikerroksen alle on mahdollista vain uutta rataa rakennettaessa tai silloin, kun levyjä asennettaessa tukikerros on purettu ja raiteen osat on väliaikaisesti poistettu esimerkiksi vaihtenvaihdon yhteydessä (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 28). Luomala et al. (2023) mainitsevat kolmannen viime vuosina perusparannus- ja päällysrakenteen vaihtokohteissa yleisesti käytetyn asennusmenetelmän, jossa routalevy asennetaan tukikerroksen alapintaan kaivamalla. Kyseinen asennustapa ei ole Väyläviraston ohjeiden mukainen. Kuvassa 9 on esitetty kaivamalla välikerroksen alapintaan asennettavan routalevyn sijainti ratarakenteessa.



Kuva 9. Kaivamalla asennettavan routalevyn sijainti rakenteessa (InfraRYL 2023).

Kuvan 9 mukaisesti levyt asennetaan vähintään 300 mm paksuisen tasatun ja tiivistetyn eristyskerroksen päälle (InfraRYL 2023). Välikerroksen ja tukikerroksen massa painavat levyn tukevasti asennusalustaa vasten, vaikka alusta ei olisi täysin tasainen. Kuitenkin levyn mekaanisen vaurioitumisen ehkäisemiseksi asennusalustan tulisi olla mahdollisimman tasainen. (Luomala et al. 2023, s. 36–37.)

3.4 XPS-routalevyjen valmistus ja käytetyt ponneaineet

Ratarakenteessa on sallittua käyttää ainoastaan suulakepuristetusta polystyreenistä valmistettuja routaeristelevyjä, joiden englanninkielisestä nimestä *extruded polystyrene* tulee yleisesti käytetty lyhenne XPS. Suulakepuristetun polystyreenin valmistus perustuu massan paisuttavaan ponneaineeseen. Aluksi polystyreeni ja muut lisäaineet sulatetaan korkeassa lämpötilassa, minkä jälkeen massan painetta nostetaan. Polymeerisulaan liuotetaan ponneainetta, joka käyttäytyy korotetussa paineessa nesteen tavoin. Paineen alentuessa ponneaineen tiheys pienenee ja tilavuus kasvaa. Seoksen puristuessa ulos syöttöaukosta, paine laskee nopeasti ja ponneaine paisuttaa polystyreeniseoksen välittömästi. Samalla polystyreenin lämpötila laskee, jolloin sen viskositeetti kasvaa ja rakenne jäähmettyy. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 12; Vinha 2014, s. 265.)

Sulan massan viskositeetti määrää vaahdotusprosessin onnistumisen. Liian alhainen viskositeetti johtaa solun hallitsemattomaan kasvuun, jolloin solurakenne luhistuu. Liian korkea sulaviskositeetti taas aiheuttaa epätäydellisen vaahtoamisen, jolloin ei saavuteta haluttua alhaista tiheyttä. Vaahdotusprosessi on onnistunut, kun solurakenne on yhtenäinen ja suljettu. XPS-eristeen tilavuudesta 97 % on ilmaa ja 3 % raaka-ainetta. Valmistusprosessissa levyn pinnalle syntyy yhtenäinen vettä hylkivä polystyreenikerros, jota nimitetään pintanahkaksi. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 12; Vinha 2014, s. 265.)

Valmistusmenetelmän takia XPS-levyjen rakenne muodostuu erittäin tiiviiksi, suljetuksi ja tasaiseksi. Solujen väliin ei jää hiushuokosia eikä ilmakäytäviä. (Kunnas 2013, s. 67.) Valmistusmenetelmällä on mahdollista säädellä suljettujen kennojen kokoa, suuntaa ja seinämien vahvuutta, jotka vaikuttavat levyjen mekaanisiin ominaisuuksiin. XPS-eristeet ovat lahoamattomia ja homehtumattomia ja kestävät hyvin maaperässä normaalisti esiintyviä suoloja, happoja ja emäksiä. XPS-levyt eivät johda kapillaarisesti vettä eivätkä vaurioidu pakkasessa. (Jääskeläinen 2009, s. 158; Vinha 2014, s. 266.) XPS-eristeet säilyttävät muotonsa noin 100 °C lämpötilaan saakka ja niiden leimahduspiste on noin 350 °C lämpötilassa (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 11).

Valmistusprosessin onnistumisen lisäksi ponneaine vaikuttaa myös XPS-levyn lämmönjohtavuuteen, koska ponneaine jää valmistusprosessissa kaasuksi levyn sisään muodostuviin umpinaiisiin soluihin. Kaasua levyn sisällä kutsutaan myös solukaasuksi. Vuoteen 1989 saakka XPS-levyjen valmistuksessa käytettiin ponneaineena otsonikerrosta tuhoavia kloorifluorihilivetyjä eli CFC-yhdisteitä. Niiden käyttökiellon jälkeen tilalle tulivat osittain halogenoidut kloorifluorihilivedyt eli HCFC-yhdisteet, joiden otsonia tuhoava vaikutus oli huomattavasti pienempi, joskin edelleen merkittävä. Näillä solukaasuilla on selkeästi ilmaa heikompi lämmönjohtavuus, joka kasvatti XPS-levyjen lämmöneristävyttä. Raskasmolekyylikaasuilla paisutetun levyn lämmönjohtavuus kuivana 10 °C lämpötilassa oli noin 0,027 W/Km (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 50). XPS-levyjen käyttöolosuhteista riippumatta lämmöneristävyys heikkenee ajan myötä kaasuseoksen hitaasti diffundoituessa ulos soluista ja niiden lopulta täytyessä ilmalla. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 11; Flygare et al. 1989, s. 14).

Nykyisin ponnekaasuna käytetään hiilidioksidia, joka ei aiheuta otsonikatoa. Hiilidioksidi aiheuttaa kuitenkin kasvihuonekaasuilmäotä, mutta sen ilmaston lämmityspotentiaali (GWP) on huomattavasti pienempi kuin aiemmin käytettyjen CFC- ja HCFC-yhdisteiden. GWP on indeksi, joka mittaa kaasujen suhteellisesti sitomaa lämpöenergiaa ilmakehässä elinkaarensa aikana (SYKE 2024). Hiilidioksidin lämmönjohtavuus on noin puolet ilman lämmönjohtavuudesta. Hiilidioksidi poistuu levyistä muutaman viikon kuluessa valmistuksesta ja korvautuu ilmalla (Kunnas 2013, s. 67). Verrattuna CFC-kaasuihin hiilidioksidin poistuminen eristelevyn soluista on hyvin nopeaa, jolloin myös hiilidioksidin lämmönjohtavuusarvon merkitys koko levyn lämmöneristävyden kannalta on CFC-kaasuja pienempi. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 34.)

3.5 XPS-routalevyiltä vaaditut ominaisuudet

XPS-eristeet soveltuvat ominaisuuksiltaan niin rakennusten perustusten, putkistojen, teiden kuin radankin routasuojaukseen. Jääskeläinen (2009) määritteli ihanteellisen

routaeristeen omaavan hyvän lämmöneristyskyvyn, kestävän suurta puristusta ja sietävän pitkäaikaisesti kosteutta ilman, että sen eristyskyky laskee. Kaikkia edellä mainittuja ominaisuuksia vaaditaan ratarakenteessa käytettäviltä routaeristelevyiltä. Ratarakenteessa käytettäviin routaeristeisiin kohdistuu huomattava syklinen kuormitus, jonka vuoksi eristeeltä vaaditaan erityisen suurta kuormituskestävyyttä (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 11).

Nurmikolu & Kolisoja (2001) tutkivat XPS-routalevyjen materiaaliominaisuuksia sekä mekaanisen kuormituksen kestävyyttä. Tutkimuksen ja kirjallisuusselvityksen pohjalta luotiin edelleen voimassa olevat XPS-routalevyjen tekniset toimitusehdot (Ratahallintokeskus 2002). Tekniset toimitusehdot sisältävät vaatimukset XPS-routalevyjen ominaisuuksille ratarakenteessa. Routalevyjen ominaisuuksien testaamisessa sekä laadunvalvonnassa noudatetaan standardia SFS-EN 13164 ”Lämmöneristetuotteet rakentamiseen. Tehdasvalmisteiset suulakepuristetut polystyreenituotteet (XPS)”. XPS-routalevyjen käyttöikävaatimus on 40 vuotta (Liikennevirasto 2018, s. 11). Taulukkoon 3 on koottu teknisissä toimitusehdoissa routalevyiltä vaaditut ominaisuudet ja vertailuksi Finnfoamin radan eristykseen tarkoitetulle VR-levylle ilmoittamat ominaisuudet sekä niiden testausstandardit.

Taulukko 3. XPS-routalevyiltä vaaditut ja Finnfoamin VR-levylle ilmoittamat ominaisuudet sekä testausstandardit. (Ratahallintokeskus 2002, Finnfoam 2022)

Ominaisuus	Vaatus	Yksikkö	Finnfoam, VR-levy	Testaus-standardi
Pituus l	4000	mm	4000	EN 822
Leveys b	540/600 ¹⁾	mm	540	EN 822
Paksuus d	40...100	mm	40...120	EN 823
Suorakulmaisuus S_b				EN 824
Tasomaisuus S_{max}				EN 825
Lämmönjohtavuus λ	< 0,037	W/Km	0,035–0,038	EN 12667
Puristuslujuus σ_m / 10 % kokoonpuristumaa vastaava puristusjännitys σ_{10}	500	kPa	500	EN 826
Syklisen rasituksen kestävyys	< 5	%	3,3 ³⁾	SP-method 2687
Vedenimeytyminen upotettuna W_{it}	≤ 1,5	til-%	≤ 0,7	EN 12087 (2A)
Vedenimeytyminen diffuusion vaikutuksesta W_{dV}	≤ 3...5,5 ²⁾	til-%	≤ 1	EN 12088
Jäätymis-sulamiskestävyys	≤ 2	til-%	≤ 1	EN 12091

¹⁾ Paksuudeltaan 60–100 mm levyjen pitkillä sivuilla tulee olla 60 mm syvyinen puoliponttaus, jolloin levyn etenemä on 540 mm.

²⁾ Diffuusiokokeessa levyyn imeytyvälle kosteuspitaisuudelle on esitetty erilliset raja-arvot nimellispaksuuden mukaan.

³⁾ Tuotekortin mukaan määritetty SFS-EN 14934 liitteen D menetelmällä.

Routalevyn nimellispituudessa sallitaan korkeintaan 10 mm poikkeama ja nimellislevydessä 8 mm poikkeama. Teknisten toimitusehtojen mukaan routalevyjen paksuudet ovat 40, 60, 80 ja 100 mm. Paksuudesta sallitaan enintään 2 mm poikkeama alaspäin ja 3 mm poikkeama ylöspäin. Routalevyjä valmistetaan myös 120 mm paksuisina (Finfoam 2022). Levyn suorakulmaisuus määritetään pituus- ja leveyssuunnassa, poikkeama saa olla enintään 5 mm/m. Levyn pituus- ja leveyssuuntainen tasomaisuus voi poiketa enintään 28 mm pituussuunnassa ja 7 mm leveyssuunnassa. (Ratahallintokeskus 2002.)

Routalevyn lämmönjohtavuus määritetään lämpövirtalevylaitteella käyttämättömästä levystä, jota on varastoitu valmistuksesta alkaen vähintään 60 päivää ja enintään 2 vuotta. Puristuslujuus tai kymmenen prosentin kokoonpuristumaa vastaava puristusjännitys määritetään vähintään 45 päivää valmistuksesta alkaen varastoidusta levystä. Koetulos on näytepalan koon mukaan vähintään kolmen tai viiden mittauksen keskiarvo. Syklisen kuormituksen kestävyuden määrittämiseksi on luotu ruotsalainen standardi SP-method 2687, johon myös standardin SFS-EN 14934 ”Lämmöneriste- ja kevennettuotteet maa- ja vesirakentamiseen. Tehdasvalmisteiset suulakepuristetut polystyreenituotteet (XPS)” liitteen D menetelmä perustuu. Puristusmuodonmuutokset määritetään väsytestissä, joka tehdään jaksoittaisina kantimuotoisina puristuskuormitusykleinä. Tuloksena on näytteen suhteellinen puristusmuodonmuutos 2 miljoonan kuormitusyklin jälkeen. Kokeessa koekappaleeseen muodostuvan kokoonpuristuman tulee olla pienempi kuin 5 %. Routalevyä on valmistuksesta alkaen varastoitava vähintään 45 päivää ennen koetta. (Ratahallintokeskus 2002, SFS 14934:2007, s. 29–34.)

Vedenimeytyminen levyyn kokonaisupotuksessa ja diffuusion vaikutuksesta ilmoitetaan vähintään kahden mittaustuloksen keskiarvona. Diffuusiokokeessa levyyn imeytyvä kosteuspitoisuus ei saa ylittää levyn nimellispaksuudesta riippuvaa raja-arvoa.

Taulukko 4. *Raja-arvot routalevyyn diffuusiokokeessa imeytyvälle kosteuspitoisuudelle levyn nimellispaksuuden mukaan. (Ratahallintokeskus 2002.)*

Levyn nimellispaksuus d [mm]	40	60	80	100
Kosteuspitoisuus [til-%]	≤ 5,5	≤ 4,6	≤ 3,8	≤ 3,0

Lisäksi XPS-levyjen tulee täyttää lainsäädännön vaatimukset vaarallisten aineiden vapautumiselle. (Ratahallintokeskus 2002.) XPS-routalevyt CE-merkitään standardin SFS-EN 13164 mukaisesti. Suoritustasoilmoituksessa tulee ilmoittaa tuotteen ominaisuudet teknisissä toimitusehdoissa esitettyjä vaatimuksia laajemmin. Standardin SFS-EN 13164 taulukkoon 9 (s. 19) on koottu testattavia ominaisuuksia, koekappaleiden vaatimuksia, testimenetelmiä ja testauksen erityisehtoja.

3.6 Radan kuormitusympäristön vaikutus XPS-routalevyihin

3.6.1 Kosteuden imeytyminen

Kosteuden imeytymistä polystyreenilevyihin on tutkittu pitkäaikaisilla upottamiskokeilla laboratoriossa. Duskow (1997) seurasi kokonaan veden alle upotettuihin levynäytteisiin imeytyvää kosteutta 12 kuukauden ajan. Näytteiden keskimääräinen vesipitoisuus oli koejakson päättymisen jälkeen 1,54 tilavuusprosenttia. Huomionarvoista on, että suurin osa kosteudesta imeytyi levyihin jo ensimmäisen kuukauden aikana, jonka jälkeen muutokset olivat hyvin pieniä. Tulosten perusteella voidaan olettaa, että polystyreenilevyjen vesipitoisuus ei pelkästään upottamalla nousisi yli kahden tilavuusprosentin. Duskow tutki EPS-levyjä, mutta XPS-levyjen voidaan olettaa kestävän kosteutta upotuksessa vähintään yhtä hyvin.

Pakkala & Lahdensivu (2014) tutkivat neljän vuoden mittaisissa upotuskokeissa veden imeytymistä routaeristemateriaaleihin ja pakkasrasituksen (*frost attack*) vaikutusta veden imeytymiseen. Testauksessa noudatettiin standardin SFS-EN 12087 ”Lämmöneristetuotteet rakentamiskäyttöön. Vedenimukyvyyn määrittäminen pitkäaikaisessa upotuksessa” menetelmää 2A muokaten menetelmää vastaamaan olosuhteita, joissa routaeriste on altistunut hyvin suurelle kosteusrasitukselle. Kappaleet punnittiin säännöllisesti ja osa kappaleista jäädytettiin punnitusten yhteydessä ja sulatettiin upottamalla takaisin veteen. XPS-levyissä jäätyminen-sulamissykliä ei huomattu kasvattavan vesipitoisuutta. Veden imeytyminen levyihin vaihteli 0,25–0,90 tilavuusprosentin välillä ja hidastui selkeästi jo kahden ensimmäisen kuukauden upotuksen jälkeen. Suurin yksittäinen tekijä, joka vaikutti veden imeytymiseen XPS-levyihin, oli levyjen valmistusajankohta. Vanhimmat, 18 kuukautta ennen koetta valmistetut levyt, imivät alle puolet siitä vesimäärästä, mitä uusimmat yhden kuukauden ikäiset levyt. Sen sijaan samassa tutkimuksessa olleista EPS-levyistä havaittiin jäätyminen-sulamissykliä myötä huomattavasti kohonneita vesipitoisuuksia (5–6,5 til-%). Myös Niu et al. (2021) ovat tutkineet upotettujen XPS-levyjen vedenimukykyä jäätyminen-sulamissykliä vaikutuksesta. Tutkimuksen mukaan pakkasrasitus kasvatti XPS-levyjen vesipitoisuutta huomattavan vähän, vain 0,06–0,10 tilavuusprosenttia.

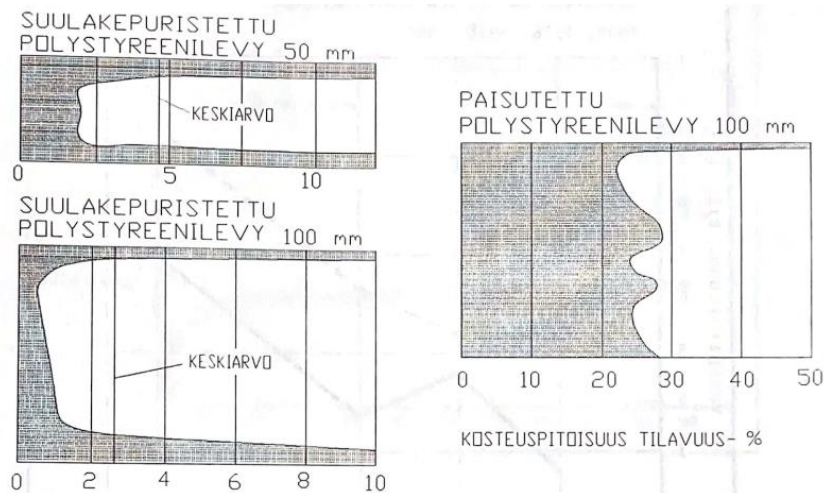
Ratarakenteessa routalevyt ovat kosteudelle altistuneita koko niiden käyttöajan ajan. Ehjä routaeristelevy kuitenkin pystyy vastustamaan nestemäisen veden imeytymistä melko tehokkaasti. Pääsääntöisesti vesi imeytyy polystyreenilevyihin vesihöyryn diffuusiona ja tiivistyy solujen välillä oleviin pieniin huokosiin. Asteittain vesihöyry tunkeutuu myös soluseinämien lävitse, mutta tunkeutuminen hidastuu sisempiin kerroksiin tultaessa, jolloin kosteuden imeytyminen levyyn vähenee ajan myötä. Levyn rakenteen

vaurioituessa siihen pääsee kuitenkin tunkeutumaan nestemäistä vettä moninkertaisesti, kun vesi pääsee huokosten lisäksi varastoitumaan vaurioituneisiin soluihin. (Duskow 1997.)

Tie- ja ratarakenteisiin asennettujen routalevyjen pitkäaikaisseurannat ovat osoittaneet, että routalevyjen kosteuspitoisuus kasvaa ajan myötä. Kosteuspitoisuuden on todettu myös vaihtelevan vuodenajan ja sääolosuhteen mukaan. Riihimäen koealueella mitattujen XPS-levyjen kosteuspitoisuus pysyi alle kahden tilavuusprosentin kahdeksan vuoden tarkkailuajanjaksolla. Samalla alueella kaikista EPS-levyistä mitattiin yli kymmenen tilavuusprosentin kosteuspitoisuuksia samalla ajanjaksolla. Helsingin-Jorvaksen moottoritiellä mitattiin kosteuden kerääntymistä XPS-levyyn yli 20 vuoden seurantaajaksolla. Suojaamattoman eristelevyn kosteuspitoisuus lisääntyi noin 0,55 tilavuusprosenttia vuodessa. Tierakenteeseen asennettujen levyjen kosteuspitoisuuden kasvun todettiin olevan melko lineaarista levyjen käyttöiän suhteen, keskimäärin levyjen kosteuspitoisuus on ensimmäisinä parina vuotena kasvanut noin yhden tilavuusprosentin ja sen jälkeen noin 0,2 tilavuusprosenttia vuodessa. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 37–39.)

Turengin ratapihalta (Ketonen et al. 1999) otetuista tukikerroksen alle kahdelle eri syvyydelle asennetuista XPS-routalevyistä mitattiin vesipitoisuuksia yhdeksän vuoden käyttöiän jälkeen. Dowin Styrofoam-levyn kosteuspitoisuus oli 0,45 m syvyydellä 2,93 tilavuusprosenttia, joka tarkoittaa 0,33 tilavuusprosentin vuosittaista vesipitoisuuden kasvua. Vastaavasti 0,55 m syvyyteen asennetun Styrofoam-levyn kosteuspitoisuus oli 2,23 tilavuusprosenttia eli vesipitoisuus oli kasvanut 0,25 tilavuusprosenttia vuodessa. Finnfoamin vuonna 1989 valmistetut levyt todettiin laadultaan heikoiksi ja pahoin vettyneiksi. Levyjen vesipitoisuus oli 0,45 m asennussyvyydellä kuusinkertainen ja 0,55 m asennussyvyydellä nelinkertainen Styrofoam-levyyn verrattuna.

Imeytynyt kosteus jakaantuu eri tavalla muottipaisutetuissa (EPS) ja suulakepuristetuissa (XPS) levyissä. EPS-levy kostuu tasaisesti lähes koko paksuudeltaan ja XPS-levyn pinnoissa kosteuspitoisuus on huomattavasti suurempi kuin levyn sisemmissä osissa. (Flygare et al. 1989, s. 20.) Eristävyyden säilymisen kannalta XPS-levyn pinnoille jäävä kosteus on EPS-levyn tasaista kostumista toivottavampaa (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 40). XPS-levyyn sitoutuvan kosteuden määrän on arvioitu olevan kääntäen verrannollinen eristeen paksuuden neliöön (Flygare et al. 1989, s. 20). Eli paksumpaan levyyn imeytyvä keskimääräinen kosteuspitoisuus olisi ohuempaa levyä pienempi. Kosteuden jakautumista eri levytyyppeihin on havainnollistettu kuvassa 10.



Kuva 10. Kosteuden jakautuminen polystyreenilevyissä. (Gandahl 1986, Flygare et al. 1989, s. 21 mukaan)

Oletuksena nykyiset laatuvaatimukset täyttävän XPS-levyn kosteuspitoisuuden kasvuvauhdille sekä tie- että ratarakenteessa voitaneen pitää noin 0,25–0,30 tilavuusprosenttia vuodessa. Tämä tarkoittaisi vaaditun 40 käyttövuoden aikana kertyvän 10–12 tilavuusprosentin vesipitoisuutta. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 43.)

Nurmikolu & Kolisoja (2001) tutkivat syksyllä 2000 Riihimäen ja Luumäen välisellä rataosuudella routasuojauksessa käytettyjen Finnfoamin, Basfin ja Dowin valmistamien routaeristelevyjen ominaisuuksia laboratoriokokeissa. Levyt oli asennettu vuosien 1989 ja 1997 välillä eli niiden käyttöikä oli noin 3–10 vuotta. Levynäytteiden vesipitoisuudet vaihtelivat 0,9–21,8 tilavuusprosentin välillä ja silmämääräisesti heikompikuntoisten levyjen vesipitoisuus oli suurempi. Heikkolaatuisimmat levyt olivat Finnfoamin valmistamia vuosina 1989–1990 asennettuja levyjä. Jo aiemmin (Ketonen et al. 1999) totesivat samanikäisten Finnfoamin levyjen olleen heikkolaatuisia. Laatuongelmien taustalla oli ponnekaasun vaihtuminen CFC-yhdisteistä HCFC-yhdisteisiin (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 13.) Heikoimpia levyä lukuun ottamatta näytteiden todettiin vastustaneen kosteutta tyydyttävällä tavalla, joskin hajonta on ollut melko suurta. Mittaukset tukivat aiemmin esitettyä seurantatutkimuksiin perustuvaa arviota vesipitoisuuden 0,25–0,30 tilavuusprosentin vuosittaisesta kasvusta. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 58–59, 63–64.)

3.6.2 Kosteuden imeytymisen vaikutus lämmönjohtavuuteen

Routalevyn lämmöneristyskyky heikkenee lähtökohtaisesti vesipitoisuuden kasvun myötä. Veden imeytyminen levyn huokosrakenteeseen kasvattaa lämmönjohtavuutta, koska vedellä on suhteellisen korkea lämmönjohtavuus (0,60 W/Km). Veden imeytyminen siten vähentää merkittävästi routalevyn lämmöneristävyyttä. Routalevy on

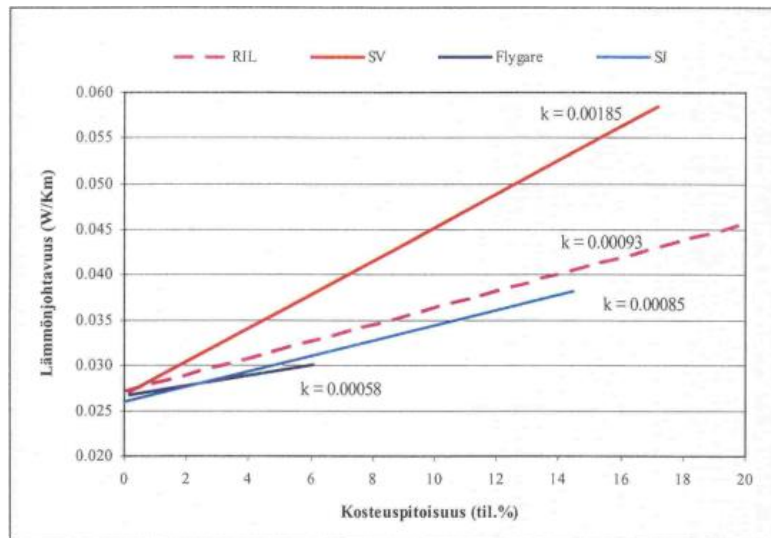
ratarakenteessa sateen, sulavan lumen, jään ja muun kosteuden rasittamana. (Pakkala & Lahdensivu 2014.) Kosteuden merkitys kasvaa alle 0 °C lämpötilassa, kun routalevyn huokosissa oleva vesi jäätyy. Jään lämmönjohtavuus on noin nelinkertainen veden lämmönjohtavuuteen verrattuna. (Flygare et al.1989, s. 23.)

Kosteuspitoisuuden ja lämmönjohtavuuden riippuvuutta toisistaan on pidetty melko lineaarisena. Tällöin kostean levyn lämmönjohtavuudelle saadaan:

$$\lambda_m = \lambda_k + k \cdot w \quad (3.1)$$

jossa λ_m on kostean levyn lämmönjohtavuus [W/Km], λ_k on kuivan levyn lämmönjohtavuus [W/Km], k on levyn kosteuspitoisuuden vaikutusta lämmönjohtavuuteen kuvaava kerroin ja w on levyn kosteuspitoisuus [til-%]. RIL:in käsikirjassa ”Lämmön- ja kosteudeneristys” (1984, s.166) korrelaatiokerroin k arvoksi on esitetty 0,00093, mikä tarkoittaa, että kosteuspitoisuuden kasvaessa yhden tilavuusprosentin, eristeen lämmönjohtavuus lisääntyy 0,00093 W/Km. Korrelaatiokerroin on vakio, kun eristeen vesipitoisuus on korkeintaan 20 tilavuusprosenttia. Tätä suuremmassa kosteuspitoisuudessa eristeen lämmönjohtavuus kasvaisi merkittävästi enemmän. (RIL 1984, s. 166.)

Nurmikolu & Kolisoja (2001) ovat koonneet eri lähteistä vuosina 1966–1988 tutkittuja XPS-levyn kosteuspitoisuuden ja lämmönjohtavuuden arvoja ja määrittäneet regressiosuorat tutkimustuloksille. Määritetyissä kosteuspitoisuuden ja lämmönjohtavuuden korrelaatiota kuvaavissa kertoimissa on melko suuria eroja, pienimmän kertoimen 0,00058 ollessa alle kolmasosan suurimmasta kertoimesta 0,00185. Tutkittujen levyjen iän perusteella ponneaineena on käytetty CFC-12-kaasua, jonka takia levyjen alkuperäinen lämmönjohtavuus on nykyistä pienempi noin 0,027 W/Km. Lisäksi tutkittujen XPS-levyjen lämmönjohtavuus on heikentynyt myös kaasun diffundoituessa ulos levyn soluista, eikä tämän vaikutusta voida erottaa saaduista tuloksista. Näin ollen määritetyt regressiosuorat eivät täysin sovellu nykyisten levyjen lämmönjohtavuuden heikentymisen arviointiin. Regressiosuorat eri lähteissä esitetyille lämmönjohtavuuden ja kosteuspitoisuuden yhteyksille on esitetty kuvassa 11. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 44–45.)



Kuva 11. Kosteuspitoisuuden ja lämmönjohtavuuden korrelaatio vuosina 1966–1988 tutkittujen levynäytteiden perusteella. (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 51.)

Kuvassa 11 esitetty lyhenne RIL tarkoittaa RIL:n käsikirjassa (1984) esitettyä arvoa, SV tarkoittaa Ruotsin teistä vuosina 1968–88 otettuja näytteitä, Flygare tarkoittaa Flygare et al. (1989) esittämiä mittaustuloksia ja SJ tarkoittaa Ruotsin rautateiltä otettuja näytteitä vuosilta 1970–1977. (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 51.)

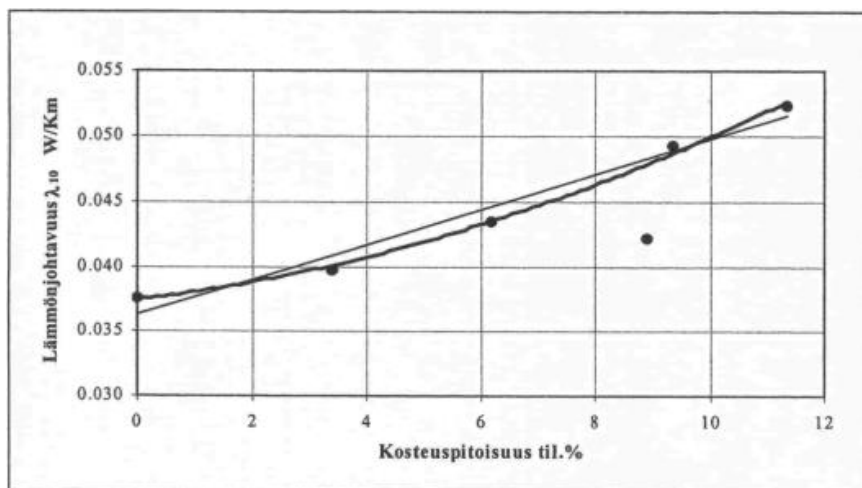
Riihimäen ja Luumäen väliseltä rataosuudelta syksyllä 2000 otetuista routalevynäytteistä määritettiin vesipitoisuuden lisäksi viidestä levynäytteestä lämmönjohtavuus. Lämmönjohtavuusarvot mitattiin sekä 10 °C ja -5 °C lämpötilassa. Lämmönjohtavuuskokeissa olleista näytteistä suurin kosteuspitoisuus oli 7,6 tilavuusprosenttia ja tämän näytteen lämmönjohtavuusarvo myös suurin 0,0615 W/Km (10 °C lämpötilassa) ja 0,0741 W/Km (-5 °C lämpötilassa). Kaikista kostuneimman näytteen vesipitoisuus oli 21,8 tilavuusprosenttia. Kaavan 3.1 ja kuvan 11 regressiosuorien perusteella arvioituna kyseisen näytteen lämmönjohtavuus olisi -5 °C lämpötilassa 0,0883 W/Km eli kosteuspitoisuus olisi merkittävästi heikentänyt levyn eristävyttä. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 63–65.)

Muiden mitattujen näytteiden lämmönjohtavuudet 10 °C lämpötilassa olivat välillä 0,029–0,036 W/Km ja -5 °C lämpötilassa välillä 0,029–0,038 W/Km. Eri lämpötiloissa tehdyistä mittauksista havaittiin, että suhteellisen kuivien kappaleiden lämmönjohtavuus oli hieman pienempi kylmemmässä keskilämpötilassa mitattuna. Kosteampien kappaleiden osalta tilanne oli päinvastainen johtuen jään vettä suuremmasta lämmönjohtavuudesta. Levyt oli asennettu vuosien 1989–1997 aikana eli ponnekaasuna on käytetty HCFC-kaasua. Levyjen alkuperäiset lämmönjohtavuudet eivät ole tiedossa, ja niissä on voinut olla jonkin verran valmistajakohtaista hajontaa. Lämmönjohtavuusarvot eri

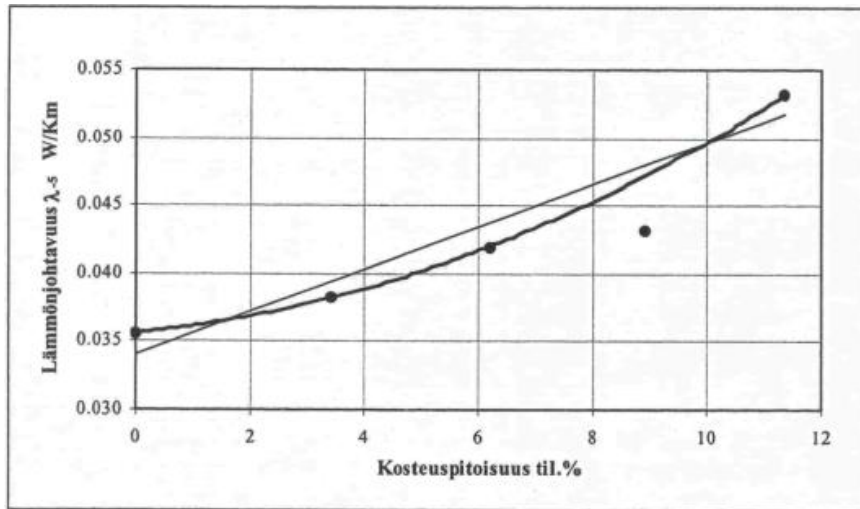
kosteuspitoisuuksissakaan eivät siten ole täysin vertailukelpoiset. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 63–65.)

Nykyisin käytössä olevien hiilidioksidilla paisutettujen XPS-levyjen mitoituslämmönjohtavuuden selvittämiseksi Nurmikolu & Kolisoja (2002) tutkivat kosteuspitoisuuden vaikutusta hiilidioksidilla paisutettuun Basfin vuonna 1999 valmistamaan Styrodur C-RHS-levyyn. Levyyn yritettiin ensin imeyttää vettä upotettuna sekä paineen että alipaineen avulla. Nestemäisen veden heikon tunkeutumisen takia imeyttämistä varten rakennettiin laitteisto, jossa aikaansaatiin voimakas vesihöyryn diffuusio. Näytekappaleet viipaloitiin veden imeytymisen lisäämiseksi ja viipaloituihin kappaleisiin kerääntyi kosteutta noin 3–4 tilavuusprosenttia vuorokaudessa. Näytekappaleista mitattiin lämmönjohtavuudet sekä +10 °C että -5 °C lämpötiloissa näytteiden kosteuspitoisuuden suhteen.

Tuloksien perusteella laadituista trendikäyristä huomattiin polynomisen riippuvuuden kuvaavan kosteuspitoisuuden vaikutusta levyn lämmönjohtavuuteen lineaarista paremmin. Yksi mittaushavainto poikkesi selkeästi muiden perusteella odotettavissa olevasta lämmönjohtavuudesta alaspäin. Tämän arveltiin johtuvan siitä, että kyseisen näytteen viipaleet käännettiin diffuusiolaitteistossa veden imeyttämisen ollessa puolivälissä, jolloin kosteuden jakautumisen oletettiin olevan tässä näytteessä muita tasaisempaa. (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 51–54.)



Kuva 12. Viipaloitujen koekappaleiden 10 °C keskilämpötilassa määritetyt lämmönjohtavuudet kosteuspitoisuuden suhteen (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 53).



Kuva 13. Viipaloitujen koekappaleiden -5 °C keskilämpötilassa määritetyt lämmönjohtavuudet kosteuspitoisuuden suhteen (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 53).

XPS-levyyn on arvioitu imeytyvän kosteutta noin kymmenen tilavuusprosenttia 40 vuoden käyttöiän aikana. Kuvien 12 ja 13 kuvaajien perusteella tätä vastaava lämmönjohtavuus on 0,050 W/Km. Ratarakenteessa XPS-levyjen kosteuspitoisuus kasvaa etenkin niiden pintaosissa (katso kuva 10). Näytekappaleiden kosteusjakauma oli tasaisempi viipaloinnin ja keinotekoisien diffuusioaltistuksen seurauksena. Yksittäisen käännetyin näyttöön alhaisemman lämmönjohtavuuden perusteella epäiltiin, että tietyllä kosteuspitoisuudella lämmönjohtavuus tasaisesti kostuneessa kappaleessa on pienempi kuin epätasaisesti kostuneessa kappaleessa, jossa kosteus voi muodostaa yhtenäisiä märkiä alueita, niin kutsuttuja kosteuskanavia, joissa lämmön johtuminen on huomattavan suurta. Kosteuden jakautumisen vaikutuksen XPS-levyn lämmönjohtavuuteen on etenkin pakkaslämpötiloissa arveltu olevan suurempi kuin levyjä keinotekoisesti kostuttamalla mitattu. (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 54–55.)

3.6.3 Mekaanisen kuormituksen kestävyys

Routalevyihin kohdistuu yläpuolisten rakenteiden aiheuttamaa staattista kuormitusta ja raideliikenteestä aiheutuvaa syklistä kuormitusta. Erityisesti liikennekuormituksen takia routalevyiltä vaaditaan suurta kuormituskestävyyttä, jonka vuoksi ratarakenteessa on sallittua käyttää ainoastaan suuren puristuslujuuden omaavia XPS-routalevyjä. Kuormituskestävyysvaatimukset pohjautuvat levyn lämmöneristävyys säilymiseen sen käyttöiän ajan. Levyn tulisi puristua kokoon mahdollisimman vähän liikennekuormituksen alaisena ja sen pinnan tulisi riittävästi vastustaa sepelirakeiden painautumista levyyn, jotta levyn eristävä paksuus ei merkittävästi ohentuisi eikä veden tunkeutuminen vaurioituneen pinnan kautta levyyn helpottuisi. Lisäksi levyn tulisi kestää liikennekuormituksesta sekä alapuolisten rakennekerrosten ja pohjamaan epätasaisesta

painumisesta aiheutuvaa taivutusrasitusta ilman, että levyyn syntyy halkeamia. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 46.)

Kouvolan ja Korian välisellä rataosuudella 1999 mitattujen ratarakenteen jännitysten perusteella mallinnetun jännitysjakauman mukaan routalevyyn kohdistuisi 0,35 m syvyydellä pölkyn alapinnasta 110 kPa:n pystysuuntainen jännitys 250 kN:n akselikuormalla. Geotrack-malli tuotti 292 kN:n akselikuormalla 90 kPa:n jännityksen. Eron arveltiin johtuvan ainakin Geotrack-mallissa käytetystä pienemmästä ratapölkkyvälistä. Lisäksi on huomioitava, että todellisessa tilanteessa junan pyörästä ratarakenteeseen välittyvän kuormituksen suuruuteen vaikuttavat useat tekijät, kuten raiteen epätasaisuus ja kaluston sekä tukikerroksen kunto. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 46–48.)

Yan et al. (2016) tutkivat XPS-eristeen muodonmuutoskäyttäytymistä dynaamisen kuormituksen alla in-situ mittauksissa. Mittaustulosten korrelaatiokäyrä osoitti XPS-levyn palautuvan muodonmuutoksen kasvavan lineaarisesti suhteessa sitä kuormittavaan dynaamisen jännitystasoon (dynamic stress level). XPS-levyjen muodonmuutos suurnopeusjunaa vastaavan dynaamisen kuormituksen alaisena oli vain 0,08 mm, jolloin sen vaikutus radan epäjatkuvuuskohtien syntymiseen oli merkityksettömän pieni. Tutkitun 10 cm paksun XPS-eristeen puristuslujuus oli vain 304 kPa eli se ei täyttänyt suomalaisia vaatimuksia. Levy oli asennettu 0,7 m syvyydelle päällysrakenteen yläpinnasta ja myös radan rakennekerrokset sekä muut olosuhteet erosivat suomalaisista.

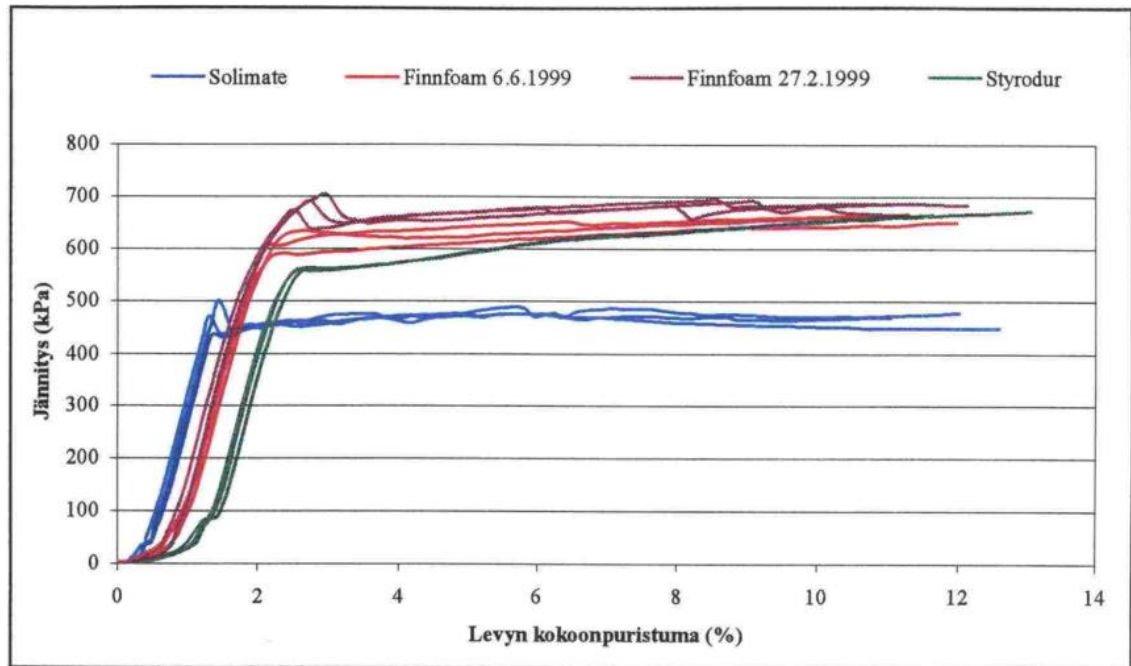
Riihimäen ja Luumäen väliseltä rataosuudelta syksyllä 2000 otettujen levynäytteiden mekaanista vaurioitumista kuten sepelin tunkeutumaa ja halkeamia arvioitiin silmämääräisesti. Levyt oli asennettu vuosina 1989–1997. Kaikkien näytepalojen yläpinnoissa havaittiin selviä sepelirakeiden tunkeutumisen muodostamia painaumia, joista syvimmat ulottuivat noin 20 mm levyn sisään. Suuressa osassa näytepaloista painaumia oli myös levyn alapinnalla asennuksessa niiden alle jääneiden sepelirakeiden takia. Painaumia ei sen sijaan havaittu näytteistä kohteissa, joissa levyn alla oli pelkkää soraa. Levyissä esiintyi sekä raiteen suuntaisia että raidetta vastaan kohtisuoria halkeamia levyjen alapinnoilla. Levyjen mekaaniset vauriot olivat heikentäneet myös niiden lämmöneristävyyttä, sillä osaan näytteistä oli imeytynyt runsaasti kosteutta ja niiden lämmönjohtavuus oli selkeästi kasvanut. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 59–62.) Levyjen vaurioitumista on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Dowin valmistamien levyjen halkeamia ja sepelin painaumia levyjen pinnassa (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 62).

Eristeen mekaanisen kuormituksen kestävyttä voidaan arvioida sen puristuslujuuden ja syklisen rasituksen kestävyuden avulla. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 49.) XPS-routalevyjen puristuslujuus kasvaa voimakkaasti heti levyn valmistuksen jälkeisinä päivinä. Lisäksi porneaineen poistuminen levyn soluista vähitellen kasvattaa puristuslujuutta. Tämä puristuslujuuden ajan myötä tapahtuva lisääntyminen, niin kutsuttu levyn ”kypsyminen”, on ominaista kaikille XPS-levytyypeille. Puristuslujuuden on havaittu vaihtelevan levyn eri kohdissa etenkin leveyssuunnassa. Tyypillistä on, että levyn toinen reuna on toista lujempi ja keskellä levyä puristuslujuus on hyvin lähellä kaikkien tulosten keskiarvoa. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 72–74.)

XPS-levyjen puristuskokeissa saatavista jännitys-kokoonpuristumakäyristä voi erottua selvä murtokohta tai levyn käyttäytyminen voi olla kimmoista, jolloin murtokohtaa ei ole havaittavissa (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 50.) Eri levytyypeille ominaisia jännitys-kokoonpuristumakäyriä on esitetty kuvassa 15 pohjautuen vuonna 2000 tehtyihin staattisiin puristuskokeisiin. Dowin Solimate-levyn muita levyjä heikompia tuloksia selittää levyn tuoreus, sillä se oli puristuskokeissa vain noin kuukauden ikäinen. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 74–75.)



Kuva 15. Eri levytyypeille ominaiset jännitys-kokoonpuristumakäyrät puristuskokeessa (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 74).

Kokoonpuristettaessa polystyreenilevyn vaurioituminen alkaa mekaanisen rasituksen ylittäessä myötörajan. Levy alkaa puristua kokoon ilman selvää murtumista. Vaurioituminen alkaa levyn heikoimmasta kohdasta ja etenee ympäröiviin soluihin. (Duskow 1997.) Eri levytyypeillä vaurioituminen voi näkyä eri tavalla. Levynäytteestä voi erottua selkeästi kokoonpuristunut vauriovyöhyke tai vaurioitunut osa voi hapertua niin, että siitä irtoaa pientä purua. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 73–74.)

XPS-routalevyyn kohdistuu sen käyttöiän aikana raidesepelin välityksellä miljoonia kuormituspulsseja yli kulkevien junien akseleista. Levyyn kohdistuvaa syklistä kuormitusta simuloidaan laboratoriokokeella, jossa levyä kuormitetaan sileiden teräslevyjen välissä 2 miljoonaa kertaa. Levyn väsymiskestävyyttä arvioidaan kokeessa syntyvällä pysyvällä kokoonpuristumalla, jonka tulee olla alle 5 %. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 51.) Nurmikolu & Kolisoja (2001) tutkivat XPS-levyjen väsymiskäyttäytymistä syklisessä rasituskokeessa useilla eri kuormitustasoilla. Kuormituskokeita tehtiin sekä kuormittamalla näytettä teräslevyjen välissä että kohdistamalla kuormitus näytteeseen raidesepelikerroksen välityksellä. Kaikki testatut levytyypit täyttivät vaatimukset syklisen rasituksen kestosta. Raidesepelin välityksellä kuormitettuihin levyihin muodostui vain vähäisiä kokoonpuristumia. Sepelirakeet kuitenkin tunkeutuivat levyjen pintaan aiheuttaen jopa 20 mm syvyisiä painaumuksia, jotka vastasivat muodoltaan radasta otettujen näytteiden pinnassa olleita painaumuksia. Yhtä levyä kuormitettiin sepelillä sekä ylä- että alapuolelta, jolloin painaumuksia muodostui myös levyn alapintaan ja epätasaisen

alustan takia levyyn muodostui myös epämääräisen suuntaisia ja muotoisia halkeamia. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 75–78.)

Kokeissa havaittiin kuormitustason korottamisen suurentavan kaikkien XPS-levyjen pysyvää kokoonpuristumaa, vaikka kuormituspulssimäärä pysyi vakiona. Kuormitustason nostaminen kasvatti levyn kokoonpuristumaa myös silloin, kun kuormituspulssimäärää vähennettiin, jolloin levyyn kohdistuva kumulatiivinen kuormitus säilyi samana. Väsymiskokeessa muodostuvaan pysyvään kokoonpuristumaan vaikuttavista tekijöistä selkeästi merkittävin on levyn puristuslujuus. Finnfoam-levyille vuosina 1997–1999 tehtyjen laadunvalvontakokeiden perusteella levyn puristuslujuuden ja väsymiskokeessa muodostuneen pysyvän kokoonpuristuman välisessä yhteydessä on melko huomattavaa hajontaa. Siten levyn väsymiskäyttäytymistä ei voida ennustaa pelkästään levyn puristuslujuuden perusteella. (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 79–85.)

4. LABORATORIOKOKEET KÄYTETYILLE XPS-LEVYILLE

4.1 Lähtötiedot

Lielähti-Kokemäki ja Tampere-Seinäjoki rataosilla uusittiin routalevytyistä vaihteiden vaihtojen yhteydessä syksyllä 2023. Rataosilla aiemmin käytössä olleista routalevyistä otettiin levynäytteitä yhteensä kahdeksalta liikennepaikalta ja näytteet toimitettiin tutkittavaksi Tampereen yliopistolle tutkimuskeskus TERRA:an. Tämän diplomityön käynnistyessä tammikuussa 2024 routalevynäytteistä määritettiin vesipitoisuus, lämmönjohtavuus sekä puristuslujuus routalevyjen ominaisuuksien ja kunnan heikentymisen arvioimiseksi.

Routalevynäytteet tunnistettiin niihin kirjoitettujen liikennepaikkojen lyhenteiden ja vaihteiden numeroiden perusteella, mutta levynäytteiden ottoaikkojen tarkkaa sijaintia ei ole dokumentoitu. Lielähti-Kokemäki väliltä toimitettiin tutkittavaksi 12 levynäytettä, joiden yleiskunto oli silmämääräisesti tarkasteltuna hyvä. Tampere-Seinäjoki väliltä saatiin tutkittavaksi 16 levynäytettä, joiden merkintöjen perusteella pääteltiin olevan peräisin kahdeksasta levystä. Nämä levynäytteet olivat kunnoltaan vaihtelevia, levyjen pinnassa oli vaurioita ja osa levyistä oli vettyneen tuntuisia. Lisäksi tunnistamatta jäi erittäin huonokuntoisia levyjen palasia ja yksi hyväkuntoinen levynäyte ilman vaihdemerkintää. Levyjen kuntoa ja merkintöjä on esitetty kuvissa 16 ja 17.



Kuva 16. Ylärivissä levynäytteet 13–15 ja alarivissä tunnistamatta jääneitä heikkokuntoisia levynäytteitä.



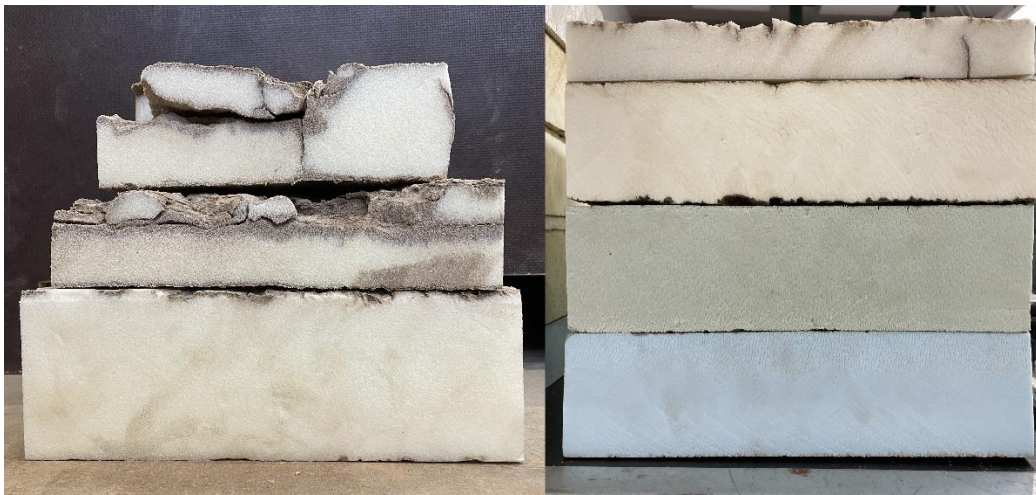
Kuva 17. Vasemmalla levynäytteet 9 & 10 Äetsästä ja oikealla levynäytteet 5 & 6 Heinoosta.

Tutkitut routalevyt oli asennettu vuosina 1993–1998. Haastattelun (Lehto 2024) mukaan levyt oli asennettu suoraan tukikerroksen alapintaan. Useissa levynäytteissä oli havaittavissa selkeäreunaista sepelirakeiden tunkeutumaa. Kuitenkaan osan levynäytteistä pinnoissa ei ollut lähes ollenkaan vaurioita tai painaumia olivat huomattavasti sepelirakeiden kokoa pienempiä. Levyjen ja raideseppelin välissä on todennäköisesti ollut ohut suojaehkakerros. Mustosen (1991, s. 32) mukaan eristelevy on aikaisemmin ohjeistettu asentamaan ratarakenteeseen mahdollisimman korkealle, mutta ei kuitenkaan suoraan kosketukseen tukikerroksen raidepelin kanssa. Levyt on ohjeistettu suojaamaan 10 cm kerroksella kivetöntä hiekkaa tai soraa. Jossain rakenteissa levyjen päälle on myös asennettu suodatinkangas (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 59). Levyjen mekaanisia vaurioita on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Vasemmalla levynäyte 24 ja oikealla levyt 26 & 27.

Levynäytteet jaettiin valmistajien mukaan neljään eri ryhmään. Vihreitä Basfin valmistamia levyjä löytyi kaksi, sinisiä Dowin valmistamia levyjä kolme, vaaleankeltaisia Finnfoamin valmistamia levyjä kymmenen ja valkeita levynäytteitä oli 13, jotka olivat merkintöjen perusteella peräisin kuudesta eri levystä. Basfin, Dowin ja Finnfoamin levyt tunnistettiin värin lisäksi niihin painatettujen tunnuksien avulla. Valkeista levyistä ei löytynyt merkintöjä valmistajasta ja ne erosivat muista levyistä myös koostumukseltaan. Valkeiden levyjen sivupinnasta erottui ikään kuin pieniä kiteitä ja levyn pinta tuntui hieman karhealta. Valkeiden levyjen pinnan rakenne oli osittain rikkoutunut ja niissä oli myös pitkiä levyn tason suuntaisia halkeamia. Muiden levyjen pinnat olivat tasaisia ja sileän tuntuisia. Levyjen pintoja on esitelty kuvassa 19. Kuvassa vasemmalla ovat levyt 20, 21 ja 23 ylhäältä alas lueteltuna ja oikealla näyte kaikkien valmistajien levyistä.



Kuva 19. Vasemmalla valkeiden tunnistamattomien levyjen sivupintoja ja oikealla ylhäältä alas tunnistamaton, Finnfoamin, Basfin ja Dowin levyjen sivupinta.

Ketonen et al. (1999) kuvaili Turengin ratapihalta Finnfoamin valmistamista routalevyistä otettuja heikkolaatuisia näytteitä väriltään valkeiksi. Turengissa käytetyt Finnfoamin levyt olivat 1990-luvun alun ensimmäisiä freonivapaita eristeitä, joissa polystyreenin vaahdotuksessa oli käytetty CFC-kaasujen sijasta HCFC-kaasua. Solukaasun vaihtuminen on todennäköisesti aiheuttanut Turengissa käytettyjen routalevyjen laadun heikentymisen. Myös tunnistamattomien levyjen muita heikompi laatu voisi johtua solukaasun vaihtumisesta, mutta tästä ei kuitenkaan saada varmuutta, koska levyjen valmistaja ei ole tiedossa. Suurin osa valkeista levyistä oli paksuudeltaan vain 40 mm, joita on nykyisin sallittua käyttää vain siirtymärakenteissa. Lisäksi valkeita levyjä oli 70 mm paksuisia, jotka eivät vastaa sallittuja nimellispaksuuksia. Siten kyseessä voisi olla myös erä levyjä joltakin sellaiselta valmistajalta, jonka levyjä ei ole tyypillisesti käytetty ratarakenteessa.

Levynäytteistä kerätyt lähtötiedot on koottu taulukkoon 5. Levyjen sijaintia vaihteissa kuvaavat kirjaimet K, R ja EJ. K tarkoittaa kielisovitusaluetta, R risteysaluetta ja EJ eristysjatkosta. Lähtökohtaisesti risteysalueella levyt ovat suurimman rasituksen alaisina, mutta levyjen kunnosta ei löydetty selkeää eroa eri sijaintien välillä.

Taulukko 5. Tutkittujen levynäytteiden lähtötietoja.

	Liikenne- paikka	Vaihte	Asennus- vuosi	Valmistaja	Pituus [cm]	Leveys [cm]	Paksuus [cm]
1	Siuro	SIU V0001 (R)	1994	Finnfoam	85	54	8
2	Siuro	SIU V0001 (K)	1994	Finnfoam	120	54	8
3	Suoniemi	SNM V0002 (R)	1996	Finnfoam	73	54	8
4	Suoniemi	SNM V0002 (K)	1996	Finnfoam	78	54	8
5	Heinoo	HNO V0001 (R)	1998	Finnfoam	101	54	8
6	Heinoo	HNO V0001 (K)	1998	Finnfoam	103	54	8
7	Vammala	VMA V0003 (R)	1997	Finnfoam	102	54	10
8	Vammala	VMA V0003 (K)	1997	Finnfoam	130	54	10
9	Äetsä	ÄS V0001 (R)	1996	Finnfoam	88	54	8
10	Äetsä	ÄS V0001 (K)	1996	Finnfoam	81	54	8
11	Äetsä	ÄS V0002 (R)	1997	Basf	113	54	8
12	Äetsä	ÄS V0002 (K)	1997	Dow	134	54	8
13	Jalasjärvi	V764 (K)	1994	muu	31	31	4
14	Jalasjärvi	V764 (K)	1994	muu	42	32	4
15	Jalasjärvi	V764 (K)	1994	muu	42	21	4
16	Jalasjärvi	V764 (K)	1994	muu	64	46	4
17	Jalasjärvi	V764 (K)	1994	muu	34	35	4
18	Jalasjärvi	V762 (R)	1994	muu	68	58	4
19	Jalasjärvi	V762 (R)	1994	muu	37	58	4
20	Kuivasjärvi	V564 (EJ)	1993	muu	39	42	7
21	Kuivasjärvi	V564 (EJ)	1993	muu	41	49	7
22	Kuivasjärvi	V563 (EJ)	1993	muu	83	58	10
23	Kuivasjärvi	V563 (EJ)	1993	muu	92	58	10
24	Kuivasjärvi	V563 (R)	1993	Basf	85	54	8
25	Kuivasjärvi	V562 (R)	1993	muu	76	58	7
26	Peräseinäjoki	V811 (-)	1994	Dow	99	54	12
27	Peräseinäjoki	V811 (R)	1994	Dow	132	54	12
28	Tuntematon	-	-	muu	106	58	10

4.2 Vesipitoisuus

Levynäytteet punnittiin ensimmäisen kerran märkinä heti niiden saavuttua Tampereen yliopiston rakennushalliin syksyllä 2023. Toimitetut levynäytteet olivat kauttaaltaan märkiä ja kuraisia pinnoiltaan, koska vaihteidenvaihtotöitä oli tehty kovassa sateessa (Lehto 2024). Levyjä ei puhdistettu tai kuivattu ennen ensimmäistä punnitusta. Punnituksen jälkeen levyt koottiin kahdelle kuormalavalle, joista toinen käärittiin osittain

muovikelmuun. Levyjä ei ole erikseen kuivatettu ja niiden kuivuminen on ollut epätasaista. Toinen punnitus tehtiin 18.1.2024. Ennen punnitusta levyistä varisi jonkin verran kuivaa hiekkaa ja kiviä pinnalta pois niitä siirreltäessä. Levyjä ei kuitenkaan erikseen puhdistettu ennen toistakaan punnitusta.

XPS-routalevyn kuivatiheys on tavallisesti noin 40 kg/m^3 (Nurmikolu & Kolisoja 2002, s. 85). Tutkittujen levyjen tiheydet olivat pääasiassa tätä suurempia, joten voitaneen olettaa levyjen olleen vielä osittain kostuneita toisessakin punnituksessa. Levyjen kasvanut tiheys voi osittain johtua myös niihin veden ohella imeytyneestä hienoaineksesta, joka ei haihdu levyn kuivuessa. Tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava, että pieni osa levyistä poistuneesta painosta on levyjen pinnalta poistunutta vettä ja hiekkaa sekä hienoainesta. Lisäksi tilavuuden ja siten myös tiheyden laskennassa on epätarkkuutta, sillä tilavuutta ei ole määritetty esimerkiksi levynäytteitä upottamalla. Tilavuus laskettiin levyjen pituuden, leveyden ja paksuuden mukaan approksimoimalla, koska levyt eivät olleet tasaisen suorakulmaisen särmiön muotoisia.

Levynäytteiden vesipitoisuus laskettiin ensin niistä poistuneen veden massan perusteella (w_m). Lisäksi vesipitoisuus (w_1) laskettiin levyjen ensimmäisen punnituksen massasta lasketun tiheyden perusteella olettaen, että levyihin jäänyt vesi oli suurin tiheyttä kasvattanut tekijä. Veden tiheydeksi oletettiin 1000 kg/m^3 eikä hienoaineksen osuutta otettu huomioon. Jälkimmäisellä tavalla laskettuna osan levynäytteistä vesipitoisuus oli huomattavasti suurempi, joka vahvistaa oletusta siitä, että levynäytteet eivät olleet täysin kuivuneita toisessa punnituksessa. Levynäytteiden vesipitoisuudet on koottu taulukkoon 6. Vertailun vuoksi taulukossa esitetään sekä märän ja kuivan painon erotukseen perustuva vesipitoisuus (w_m) että levynäytteiden tiheyteen perustuva vesipitoisuus (w_1), joista jälkimmäinen kuvaa paremmin todellista tilannetta.

Taulukko 6. Levynäytteiden vesipitoisuuksien laskenta.

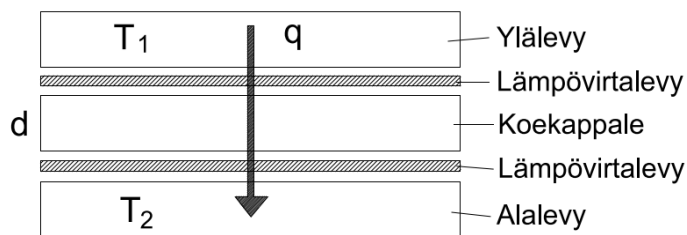
	Valmistaja	Tilavuus s [dm ³]	Paino m_1 [g]	Paino m_2 [g]	Vesipitoisuus w_m [til-%]	Tiheys ρ_1 [kg/m ³]	Vesipitoisuus w_1 [til-%]
1	Finnfoam	36,7	4 095	2 551	4,2 %	111,5	7,2 %
2	Finnfoam	51,8	4 597	3 005	3,1 %	88,7	4,9 %
3	Finnfoam	31,5	2 388	1 564	2,6 %	75,7	3,6 %
4	Finnfoam	33,7	3 753	2 094	4,9 %	111,4	7,1 %
5	Finnfoam	43,6	5 428	2 795	6,0 %	124,4	8,4 %
6	Finnfoam	44,5	4 326	2 268	4,6 %	97,2	5,7 %
7	Finnfoam	55,1	3 684	2 999	1,2 %	66,9	2,7 %
8	Finnfoam	70,2	4 994	3 723	1,8 %	71,1	3,1 %
9	Finnfoam	38,0	3 510	2 107	3,7 %	92,3	5,2 %
10	Finnfoam	35,0	4 028	2 095	5,5 %	115,1	7,5 %
11	Basf	48,8	3 510	2 107	2,9 %	71,9	3,2 %
12	Dow	57,9	4 451	2 868	2,7 %	76,9	3,7 %
13	muu	3,8	1 464	695	20,0 %	380,9	34,1 %
14	muu	5,4	1 904	930	18,1 %	354,2	31,4 %
15	muu	3,5	1 086	483	17,1 %	307,8	26,8 %
16	muu	11,8	4 313	2 049	19,2 %	366,3	32,6 %
17	muu	4,8	1 357	744	12,9 %	285,1	24,5 %
18	muu	15,8	4 441	2 225	14,0 %	281,5	24,2 %
19	muu	8,6	2 178	1 319	10,0 %	253,7	21,4 %
20	muu	11,5	3 991	1 605	20,8 %	348,1	30,8 %
21	muu	14,1	4 762	1 935	20,1 %	338,6	29,9 %
22	muu	48,1	5 661	3 671	4,1 %	117,6	7,8 %
23	muu	53,4	8 201	5 350	5,3 %	153,7	11,4 %
24	Basf	36,7	7 119	3 455	10,0 %	193,9	15,4 %
25	muu	30,9	7 906	4 533	10,9 %	256,2	21,6 %
26	Dow	64,2	4 965	3 850	1,7 %	77,4	3,7 %
27	Dow	85,5	-	5 829	-	-	-
28	muu	61,5	10 436	6 867	5,8 %	169,7	13,0 %

Vesipitoisuudella ja levyjen mekaanisella vaurioitumisella on näytteiden perusteella yhteys. Rakenteeltaan ehjiltä vaikuttaneiden levyjen vesipitoisuus oli huomattavasti alhaisempi kuin vaurioituneiden levyjen. Levyjen vesipitoisuudet vaihtelivat suuresti, Finnfoamin levyllä 7 oli alhaisin vesipitoisuus (2,7 til-%) ja tunnistamattomalla levynäytteellä 13 korkein vesipitoisuus (34,1 til-%). Routamitoituksessa huomioidun kymmenen tilavuusprosentin vesipitoisuuden ylittivät Basfin levynäytteen 24 lisäksi vain valkeat tunnistamattoman valmistajan levyt. Finnfoamin, Basfin ja Dowin levyjen voidaankin todeta vastustaneen kosteutta melko hyvin. Aikaisemmin kirjallisuusselvityksessä on todettu, että suurin osa vedestä imeytyy levyyn yleensä jo ensimmäisten vuosien aikana asennuksesta ja levyn kosteus pitoisuus kasvaa noin 0,25–0,30 prosenttia vuodessa (Nurmikolu & Kolisoja 2001, s. 43). Tutkittujen levyjen

käyttöikä on ollut noin 25–30 vuotta, joten laskennallista käyttöikää olisi ollut vielä 10–15 vuotta jäljellä. Levyjen kosteuspitoisuus olisi oletuksen mukaan kasvanut vielä 2,5–4,5 prosenttia tuona aikana, jolloin suurimman osan tutkituista levyistä kosteuspitoisuus olisi silti jäänyt alle mitoitettun kymmenen tilavuusprosentin.

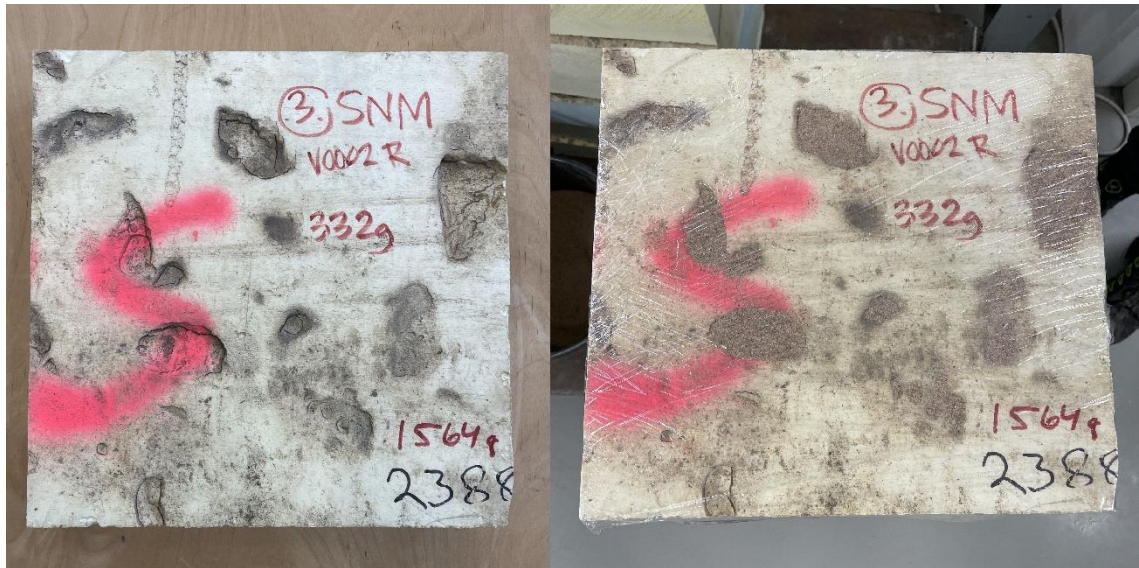
4.3 Lämmönjohtavuus

Levynäytteiden lämmönjohtavuus määritettiin LaserComp FOX304 -merkkisellä lämpövirtalevylaitteella. Laitteen mittaustarkkuus on $\pm 1\%$, mutta kalibroinnin epävarmuuden vuoksi absoluuttinen tarkkuus on $\pm 3\%$. Lämpövirtalevylaitteen pääosat ovat ylä- ja alalevy, kaksi lämpövirtalevyä sekä suojakuori. Lämpövirtalevyt ovat kiinteästi ylä- ja alalevyihin laminoituina. Mitattava kappale asetetaan ylä- ja alalevyn väliin kuvan 20 mukaisesti. Ylä- ja alalevyn lämpötilat säädetään eri suuruiseksi, jolloin niiden välille muodostuu lämpötilagradientti. Ylä- ja alalevyn välille syntyvän lämpövirran suuruus mitataan lämpövirtalevyillä. Koska laitteessa on kaksi lämpövirtalevyä, saadaan tuloksena kaksi lämmönjohtavuuden arvoa. Koekappaleen lämmönjohtavuus ilmoitetaan näiden keskiarvona lämpötilassa T_m , joka on koekappaleen ylä- ja alapintojen lämpötilojen keskiarvo. (Vinha et al. 2005, s. 23, 24, 30.)



Kuva 20. Lämpövirtalevylaitteen toimintaperiaate (Vinha et al. 2005, s. 24).

Lämmönjohtavuuden määrittämistä varten routalevynäytteistä tehtiin koepalat pöytäsiirteillä. Levynäytteiden pinnat puhdistettiin ennen koepalojen tekoa. Koepalojen koko oli noin $300 \times 300 \text{ mm}^2$ tai pienempi, jos levynäytteen kunnosta tai koosta johtuen ei pystytty tekemään tämän suuruista tasaista koepalaa. Koepalojen paksuudet olivat alkuperäisten levynäytteiden paksuuksia lukuun ottamatta 120 mm paksuisia levynäytteitä 26 ja 27. Nämä levynäytteet oli halkaistava kahdeksi noin 60 mm paksuksi kappaleeksi, koska lämpövirtalevylaitteistoon ei voitu laittaa yli 105 mm paksuisia kappaleita. Levynäytteiden 13–16 todettiin olevan saman levyn osia ja koekappale tehtiin vain näytteestä 16. Koska levyt olivat eri muotoisia ja kuntoisia, koepaloja ei voitu ottaa järjestelmällisesti tietystä kohtaa levyä, vaan osa paloista oli levyjen keskeltä ja osa reunasta tehtyjä. Osa koepaloista pinnan epätasaisuuksia tasattiin lisäämällä niihin hiekkaa, jolla pyrittiin jäljentämään levyjen käyttöolosuhteita ratarakenteessa.



Kuva 21. Koekappaleen 3 pinnasta erottui sepelirakeiden painaamia.
Kappaleeseen lisättiin hiekkaa ja kappale käärrettiin kelmuun ennen
lämmönjohtavuuskoetta.

Asennusvuosien perusteella levyjen valmistuksessa on todennäköisesti käytetty ponnekaasuna HCFC-yhdisteitä, joten levyjen alkuperäinen lämmönjohtavuus on ollut nykyisiä hiilidioksidilla paisutettuja levyjä pienempi, noin 0,027 W/Km. Käyttöänsä aikana ponnekaasu hitaasti korvautuu ilmalla, joten alkuperäinen ponnekaasu ei enää vaikuta saatuihin tuloksiin. Lämmönjohtavuuskokeiden tulokset on esitetty taulukossa 7.

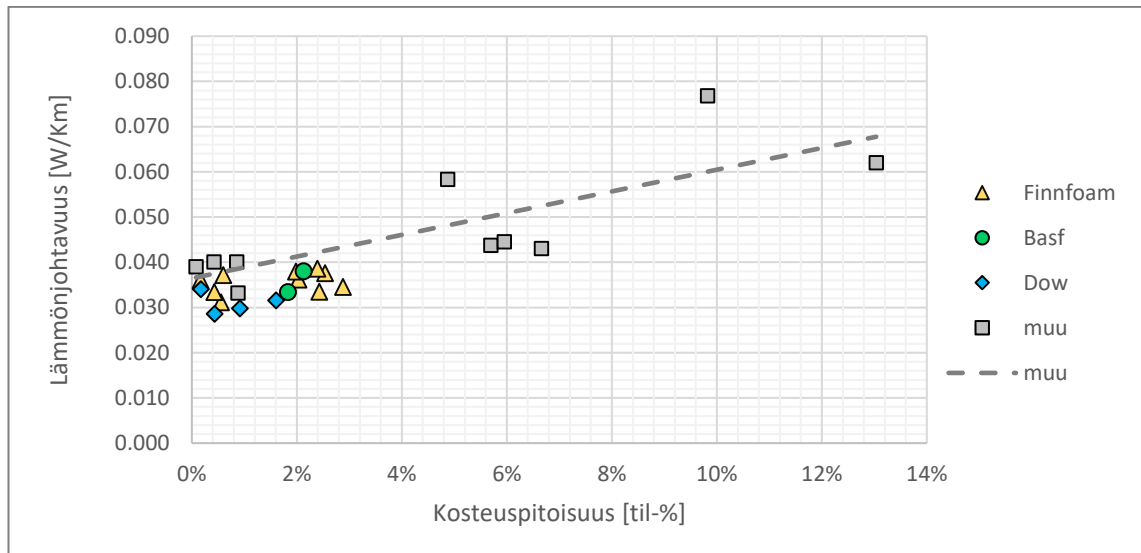
Taulukko 7. Koekappaleiden paino ja tiheys ennen hiekan lisäämistä sekä lisätyn hiekan tilavuus ja mitattu lämmönjohtavuus.

	Valmistaja	Paino <i>m</i> [g]	Tiheys [kg/m ³]	Vesipitoisuus [til-%]	Hiekan tilavuus [cm ³]	Lämmön- johtavuus λ [W/Km]
1	Finfoam	455	65,4	2,5 %	24	0,038
2	Finfoam	460	68,8	2,9 %	68	0,035
3	Finfoam	318	45,6	0,6 %	36	0,031
4	Finfoam	412	60,3	2,0 %	-	0,036
5	Finfoam	443	64,3	2,4 %	-	0,033
6	Finfoam	299	44,3	0,4 %	20	0,033
7	Finfoam	354	41,7	0,2 %	-	0,036
8	Finfoam	381	46,0	0,6 %	82	0,037
9	Finfoam	438	63,9	2,4 %	-	0,039
10	Finfoam	419	59,8	2,0 %	48	0,038
11	Basf	416	58,3	1,8 %	-	0,033
12	Dow	331	49,1	0,9 %	-	0,030
16	muu	166	48,8	0,9 %	-	0,033
17	muu	218	106,6	6,7 %	68	0,043
18	muu	298	88,7	4,9 %	92	0,058
19	muu	248	138,2	9,8 %	38	0,077
20	muu	302	96,9	5,7 %	-	0,044
21	muu	737	170,3	13,0 %	124	0,062
22	muu	318	40,8	0,1 %	37	0,039
23	muu	359	44,2	0,4 %	53	0,040
24	Basf	428	61,3	2,1 %	100	0,038
25	muu	611	99,5	6,0 %	-	0,045
26	Dow	226	44,3	0,4 %	-	0,029
27 A	Dow	224	41,7	0,2 %	307	0,034
27 B	Dow	282	56,1	1,6 %	73	0,032
28	muu	400	48,6	0,9 %	57	0,040

Koekappaleiden tiheydet olivat pääasiassa pienempiä kuin kokonaisten levynäytteiden, joka tukee aiempaa oletusta siitä, että levyissä on ollut vielä jäljellä kosteutta toisen punnituksen ajankohtana ja levynäytteille punnitusten perusteella määritetyt vesipitoisuudet ovat todellista pienempiä. Kuitenkin osan koekappaleista tiheys on levynäytettä suurempi, jolloin koekappale lienee sattumalta tehty erittäin kosteasta kohtaa levyä. Koska levyjä varastoitiin päällekkäin, ei niiden keskiosasta ole päässyt haihtumaan vettä yhtä tehokkaasti kuin reunoista. Toisaalta kirjallisuusselvityksen mukaan XPS-levyt kostuvat enemmän pinnoistaan kuin eristeen keskeltä, joten reunastakin otettu koepala on voinut olla erityisen kostea.

Koepaloista mitatut lämmönjohtavuudet vaihtelivat 0,029–0,077 W/Km välillä. Suurin osa tuloksista on hyvin lähellä nykyistä uudelle levyille asetettua 0,037 W/Km vaatimusta ja vain tunnistamattomien valkeiden levyjen lämmönjohtavuus ylitti 0,040 W/Km. Tulokset

eivät kuitenkaan täysin kuvaa levyjen lämmönjohtavuutta ratarakenteessa, sillä levyistä on päässyt haihtumaan runsaasti kosteutta ennen mittauksia. Levynäytteistä mitattua vesipitoisuutta ja koekappaleiden lämmönjohtavuuskokeiden tuloksia ei siten ole järkevää yhdistää. Sen sijaan tarkasteltiin koekappaleiden tiheyden perusteella lasketun vesipitoisuuden ja lämmönjohtavuuden yhteyttä. Koekappaleiden vesipitoisuuden ja lämmönjohtavuuden suhde toisiinsa levyvalmistajittain on esitetty kuvassa 22.



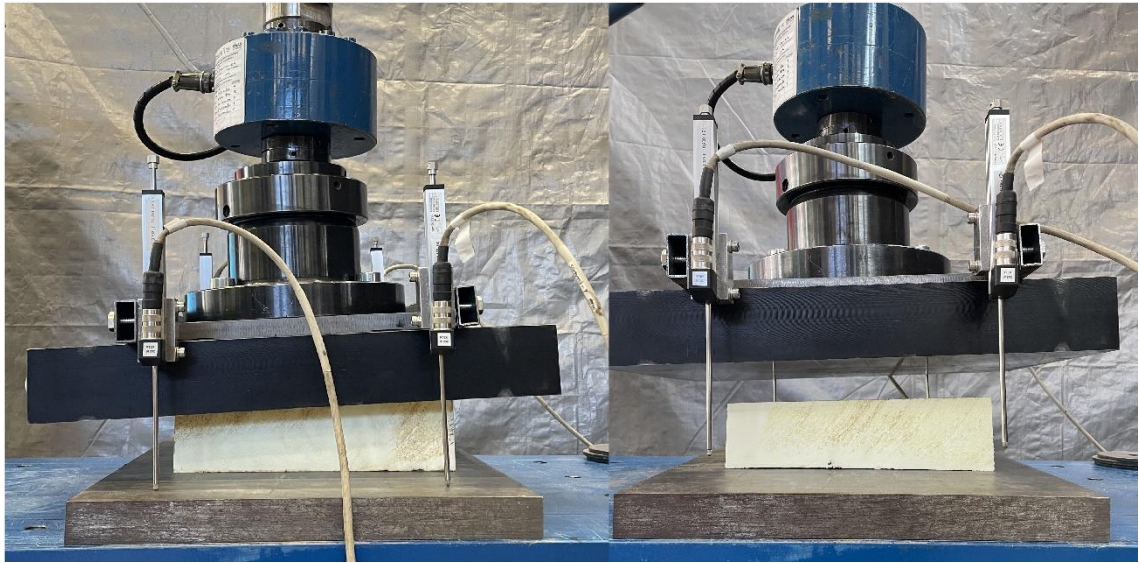
Kuva 22. Koekappaleiden lämmönjohtavuuden ja kosteuspitoisuuden suhde ja regressiosuora tunnistamattomien levyjen tutkimustuloksille.

Kuvan 22 kaaviosta huomataan, että Finnfoamin, Basfin ja Dowin levyjen lämmönjohtavuuskokeiden tulokset olivat hyvin lähellä toisiaan, eikä tuloksista pystytä erottelemaan kosteuspitoisuuden vaikutusta lämmönjohtavuuteen. Tunnistamattomien levyjen lämmönjohtavuus sen sijaan kasvoi selvästi kosteuspitoisuuden kasvaessa. Tuloksille saatiin niiden hajonnasta huolimatta sovitettua regressiosuora, jonka kulmakerroin k on 0,0024. Kulmakerroin on selkeästi suurempi kuin luvussa 3.6.2 kuvassa 11 esitettyjen aiempiin tutkimustuloksiin perustuvien lämmönjohtavuuden ja kosteuspitoisuuden regressiosuorien. Oletetaan, että levyjen lämmönjohtavuus on asennushetkellä ollut 0,027 W/Km ja sen kasvaneen 0,0024 W/Km jokaista tilavuusprosenttia kosteutta kohden. Tällöin 34,1 tilavuusprosenttia kosteutta sisältäneen levynäytteen 13 lämmönjohtavuus olisi noin 0,1 W/Km.

4.4 Puristuslujuus

Tutkittavien routalevyjen puristuslujuus (σ_m) tai kymmenen prosentin kokoonpuristumaa vastaava puristusjännitys (σ_{10}) määritettiin soveltuvin osin standardin SFS-EN 826 (2013, kumottu 2022) ”Thermal insulating products for building applications.

Determination of compressive behaviour” mukaisesti. Kokeissa käytettiin samoja koepaloja kuin lämmönjohtavuuskokeissa. Koepalojen puristus aloitettiin 0,25 kN voimalla ja puristusta jatkettiin niin pitkään, että koekappaleen muodonmuutos oli vähintään 10 %, sillä selkeää murtumiskohtaa ei pystytty havaitsemaan. Puristus tehtiin vakionopeudella niin, että tunkin siirtymä minuutissa oli korkeintaan 0,1 kertaa näytteen paksuus millimetreinä (± 25 %). Koepalojen kokoonpuristumista mitattiin neljällä siirtymäanturilla, jotka oli asennettu kuormituslevyn kulmiin. Laskettu kokoonpuristuman suuruus on siirtymäanturien lukemien keskiarvo. Kuvassa 23 on esitetty koekappaleen 8 kokoonpuristuminen sekä kuormituslevyn etupuolen siirtymäanturit.



Kuva 23. Koekappale 8 puristuskokeen aikana ja heti kokeen jälkeen.

Tyypillisesti rakenteeltaan ehjät koekappaleet puristuivat siten, että jokin reunoista petti ensin ja kuormituslevy lähti kallistumaan koekappaleen mukana. Halkeilleissa koekappaleissa siirtymä kasvoi alkuun nopeasti pienelläkin voimalla halkeaman puristuessa yhteen, jonka jälkeen kokoonpuristuminen hidastui. Haljennut koekappale 25 on esitetty kuvassa 24 ennen ja kuvassa 25 jälkeen puristuksen.



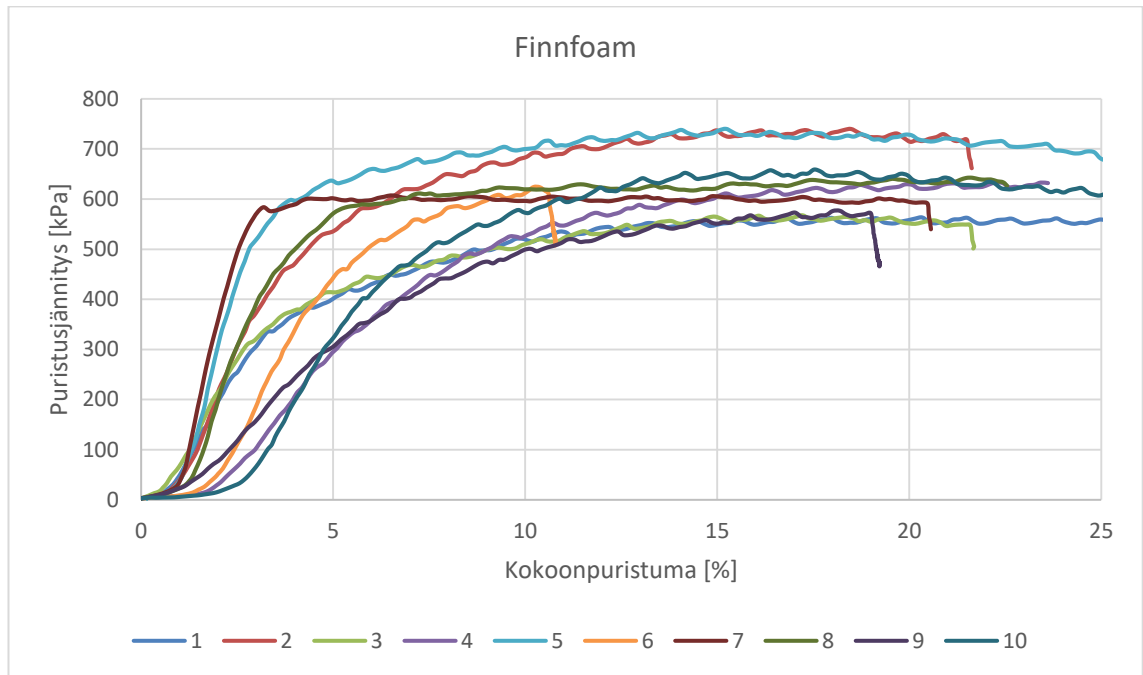
Kuva 24. Koekappale 25 ennen puristuskokeen alkamista.



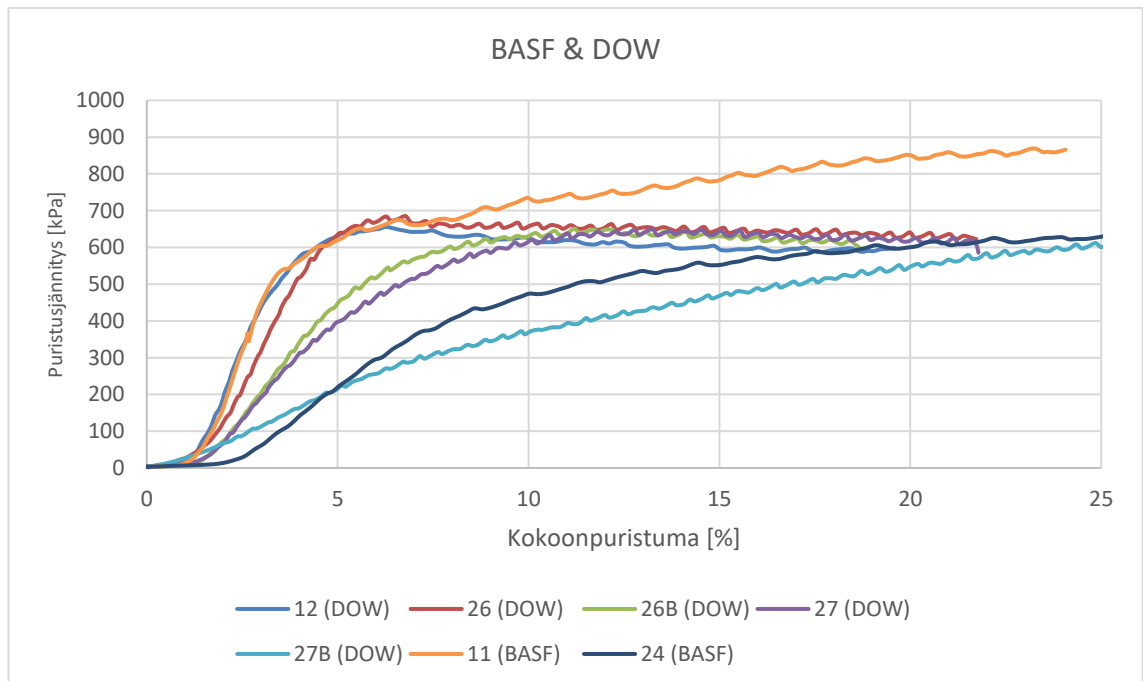
Kuva 25. Koekappale 25 heti puristuskokeen jälkeen.

Levyihin ei muodostunut puristuskokeissa selkeitä vauriovyöhykkeitä, mikä johtune ainakin kahdesta syystä. Ensinnäkin lähes kaikkien levyjen pinnassa oli jo jonkinlaista epätasaisuutta, ja osan levyistä rakenne oli rikkoutunut laajemmalla alueella, joten vauriovyöhykkeen havaitseminen oli haastavaa. Toiseksi kuormituslevy oli kiinni nivelessä, joka mahdollisti kuormituslevyn kallistumisen koekappaleessa tapahtuvan muodonmuutoksen mukana (katso kuva 23) ja muodonmuutoksen kasvun suuremmaksi

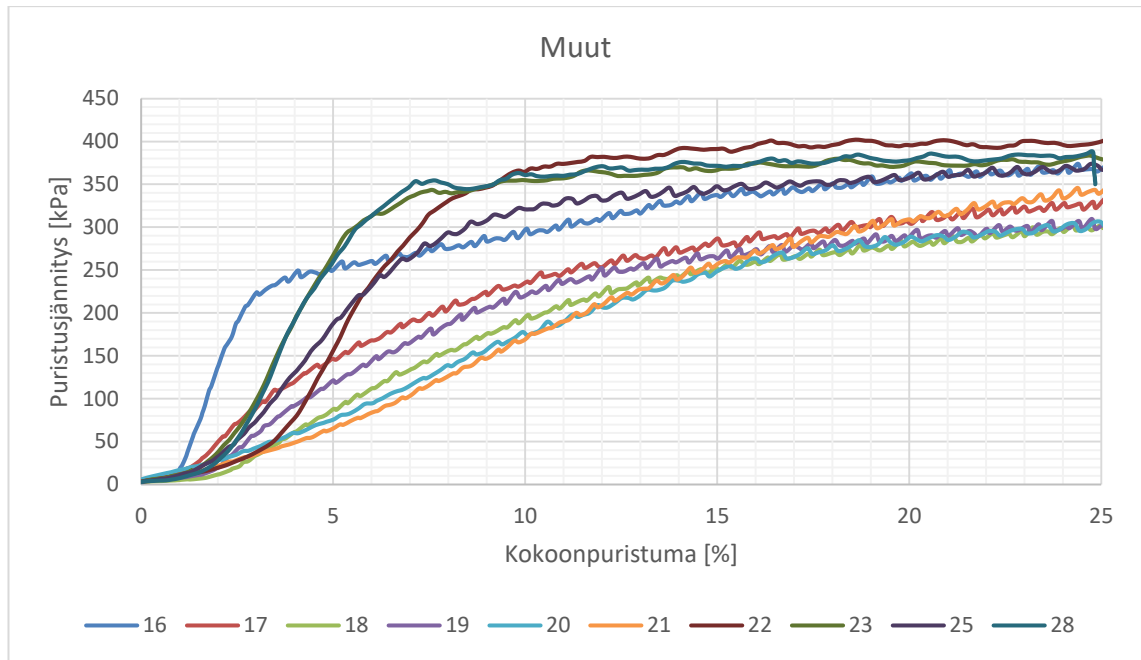
kohdassa, jossa levy antoi periksi. Puristuskokeiden tulokset on esitetty levyjen valmistajien mukaan kuvissa 26–28.



Kuva 26. Finnfoamin levyjen jännitys-kokoonpuristumakäyrät puristuskokeessa.



Kuva 27. Basfin ja Dowin levyjen jännitys-kokoonpuristumakäyrät puristuskokeessa.



Kuva 28. Muiden levyjen jännitys-kokoonpuristumakäyrät puristuskokeessa.

Kuvien 26–28 kuvaajista huomataan, että eri levytyyppien koekappaleet käyttäytyivät puristuskokeessa hyvin samalla tavalla. Kuvassa 15 (luvussa 3.6.3) esitetyt eri levytyypeille ominaiset jännitys-kokoonpuristumakäyrät eivät toteutuneet näissä puristuskokissa. Vain Finnfoamin levystä 7 on havaittavissa jonkinlainen murtokohta 3,4 prosentin kokoonpuristuman kohdalla, tämänkin koekappaleen kokoonpuristuman kasvaessa myös jännitys kasvoi vielä myötörajan ylittymisen jälkeenkin. Standardin SFS-EN 826 mukaan murtokohdan puuttuessa määritetään puristuslujuuden sijasta kymmenen prosentin kokoonpuristumaa vastaava puristusjännitys. Levynäytteen 7 puristuslujuus olisi murtokohdan mukaan 576,0 kPa ja kymmenen prosentin kokoonpuristumaa vastaava puristusjännitys 607,2 kPa. Vertailtavuuden vuoksi kaikista levynäytteistä laskettiin kymmenen prosentin kokoonpuristumaa vastaava puristusjännitys. Tulokset on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. *Kymmenen prosentin kokoonpuristumaa vastaava puristusjännitys valmistajittain.*

Finn-foam	σ_{10} [kPa]	BASF & DOW	σ_{10} [kPa]	Muut	σ_{10} [kPa]
1	517,0	11	734,7	16	298,3
2	684,0	24	543,6	17	236,7
3	508,6	12	624,1	18	197,7
4	528,6	26A	659,7	19	225,1
5	700,6	26B	639,2	20	174,2
6	615,8	27A	610,5	21	169,1
7	607,2	27B	372,2	22	364,6
8	619,6			23	355,0
9	498,7			25	320,9
10	573,4			28	360,9

Finfoamin levynäytteiden puristuslujuudet vaihtelivat välillä 498,7–700,6 kPa, Basfin olivat 543,6 kPa ja 734,7 kPa ja Dowin välillä 372,2–659,7 kPa. Näistä näytteistä vain kaksi alitti levyille asetetun 500 kPa:n puristuslujuusvaatimuksen. Dowin levynäytteet 26 ja 27 oli halkaistu lämmönjohtavuuskoetta varten ja yksi heikompi tulos selittynee kyseisen koekappaleen pinnan suurehkolla epätasaisuudella suhteessa sen paksuuteen (levynäytteet kuvassa 18). Muun valmistajan levyjen puristuslujuudet olivat 169,1–364,6 kPa. Näistä levyistä silmämääräisesti ehjimmäkään eivät saavuttaneet vaadittua tasoa ja rakenteeltaan selvästi rikkoutuneiden levyjen puristuslujuus jäi alle puoleen ehjien levyjen tasosta. Nämä levyt eivät lähtökohtaisesti kestä vaurioitumatta 225 kN:n akselipainoa. Lisäksi heikko puristuslujuus vaikuttaa myös levyn lämmöneristävyyteen eristävän paksuuden pienentyessä levyn kokoonpuristumisen myötä.

5. ROUDAN SYVYYDEN MALLINNUKSEEN

5.1 TEMP/W-laskentaohjelma

Tässä työssä roudan syvyyden mallinnukseen käytettiin elementtimenetelmään perustuvaa GeoStudio 2021 –ohjelmiston TEMP/W-ohjelmaa. TEMP/W-ohjelma soveltuu maaperän lämpöolojen muutosten mallintamiseen esimerkiksi ilman lämpötilamuutosten tai rakentamistoimenpiteiden vaikutuksesta. Ohjelmalla voidaan mallintaa lämmön siirtymistä erilaisissa huokoisissa ja kiinteissä materiaaleissa (GEO-SLOPE International Ltd. 2014). Lämpö voi siirtyä maaperässä kolmella eri tapaa: johtamalla, säteilemällä tai konvektion avulla. Tämän työn laskentatapauksissa kaiken lämmön oletetaan siirtyvän johtamalla, vaikka hyvin karkearakeisessa materiaaleissa, kuten sepelissä tai louheessa myös konvektiolla voisi olla merkitystä lämmön siirtymisessä. (Nurmikolu 2004, s. 39.)

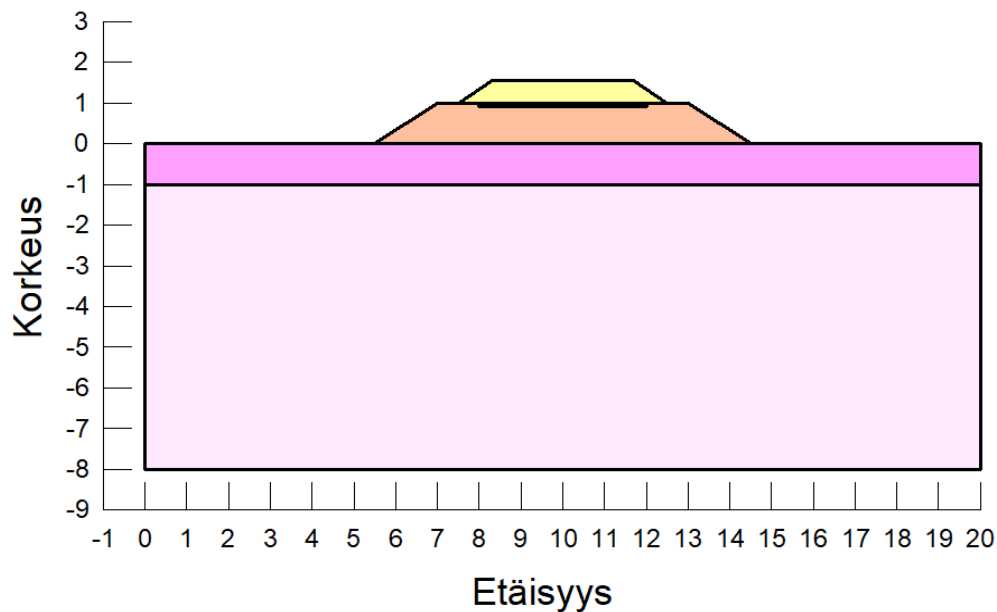
Aiemmin TEMP/W-ohjelmalla on tutkittu routalevyn asennussyvyyden vaikutusta roudan tunkeutumissyvyyteen. Soininen (2013) tutki diplomityössään roudan syvyyttä lumettomassa tilanteessa varioiden asennussyvyyden lisäksi routalevyn paksuutta ja kohteen pakkasmäärää. Luomala et al. (2023) huomioivat tutkimuksessaan myös lumen sekä pohjaveden pinnan tason vaikutuksen roudan syvyyteen. Molemmissa tutkimuksissa todettiin, ettei routalevyn asennussyvyys ole roudan tunkeutumissyvyyden kannalta määräävä tekijä.

Tässä työssä tavoitteena on selvittää routalevyn ominaisuuksien heikentymisen vaikutusta roudan tunkeutumissyvyyteen. Laskentatapaukset on muodostettu käytetyille levyjen tehtyjen lämmönjohtavuuskokeiden tuloksien perusteella.

5.2 Laskentaparametrit

TEMP/W-ohjelman laskentatapauksissa tutkittiin tilannetta, jossa routalevy asennetaan yksiraiteisen radan rakenteeseen. Aiemmin tutkittujen käytettyjen routalevyjen asennussyvyyttä mukailen myös mallinnustapauksissa routalevy sijoitettiin suoraan tukikerroksen alle. Tarkasteltavan ratapenkereen oletettiin sijaitsevan Tampereen ja Seinäjoen välillä, jolloin ilmasto-olosuhteet ovat melko lähellä aiemmin tutkittujen levyjen keskimääräisiä olosuhteita. Ratapenger oli kaikissa tapauksissa rakennekerrosmateriaaleiltaan ja pohjamaaltaan samanlainen. Kohteen tukikerroksen oletettiin olevan sepeliä, alusrakenteen hiekkaa ja pohjamaan sora-moreenia.

Radan pengerleveydeksi oletettiin 6,0 m ja pengerkorkeudeksi 1,55 m. Tukikerroksen paksuus oli 0,55 m ja alusrakenteen paksuus yhden metrin. Routalevyn paksuus oli kaikissa tapauksissa 100 mm. Pohjamaakerrosten paksuus oli 8 m ja mallin leveys 20 m. Pohjavedenpinnan oletettiin olevan yhden metrin syvyydessä maanpinnasta, jolloin osa pohjamaasta oli kyllästyneessä ja osa kuivatetussa tilassa. Luvussa 2.1 esitetyn kuvan 5 mukaan routaeristämättömän radan rakennekerrosten paksuuden tulisi olla vähintään 2,1 m tarkasteltavassa kohteessa. Ratarakenne oli lähtökohtaisesti routiva ennen routaeristeen asentamista. TEMP/W-ohjelmassa mallinnettu ratarakenne on esitetty kuvassa 29. Tukikerroksen sepeli on kuvattu keltaisella, XPS-routalevy mustalla ja alusrakenne oranssilla värillä. Pohjamaan kuivatettu kerros on tummempi ja pohjaveden pinnan alapuolinen vaaleanpunainen kerros vedellä kyllästynyt.



Kuva 29. Laskentakohteen geometria TEMP/W-ohjelmassa.

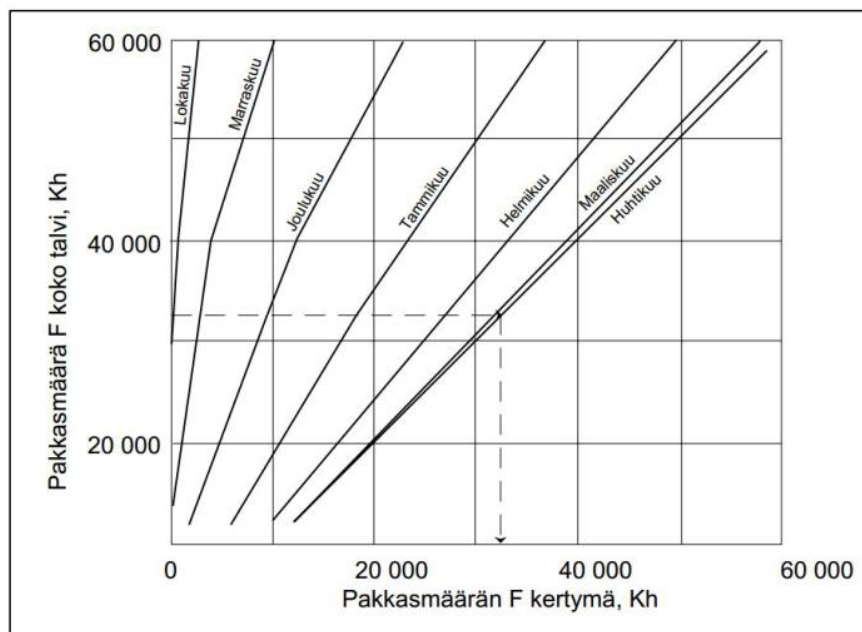
Mallinnuksen lähtötiedoiksi tarvittiin rakennekerrosmateriaalien, pohjamaan ja XPS-routalevyjen lämmönjohtavuudet ja tilavuuslämpökapasiteetit sulana ja jäätyneenä sekä materiaalien tilavuusvesipitoisuudet. Valitut maamateriaalien parametrit pohjautuvat Nurmikolun ja Kolisojan (2002) ratarakenteen routamitoitusta varten määrittämiin materiaaliparametreihin, joita myös Soininen (2013) sekä Luomala et al. (2023) ovat tutkimuksissaan hyödyntäneet. XPS-routalevyjen lämmönjohtavuutta ja vesipitoisuutta varioitiin eri laskentatapauksissa. Laskennassa käytetyt materiaaliparametrit on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Laskennassa käytetyt materiaaliparametrit.

Materiaali	Lämmönjohtavuus sulana λ_u [W/m°C]	Lämmönjohtavuus jäätyneenä λ_f [W/m°C]	Tilavuuslämpökapasiteetti sulana c_u [kJ/m³°C]	Tilavuuslämpökapasiteetti jäätyneenä c_f [kJ/m³°C]	Tilavuusvesipitoisuus w [til-%]
Tukikerrossepeli	1,5	1,1	1340	1270	3,2
XPS-routalevy	*	*	40	40	*
Alusrakenne (Hk)	1,5	1,7	1830	1630	9,5
Pohjamaa (kuivatettu)	1,6	1,8	2230	1830	15
Pohjamaa (kylästetty)	1,6	1,8	2230	1830	40

*XPS-routalevyn parametreja varioitiin eri laskentatapauksissa

Radan alusrakenneluokaksi oletettiin 2 tai 3, joten laskennassa käytettiin pakkasmäärää F50 eli kerran 50 vuodessa toistuvaa pakkasmäärää. Kuvan 6 pakkasmääräkartan mukaan Tampereen ja Seinäjoen välillä mitoittava pakkasmäärä on noin 40 000 h°C. Pakkasmäärä jaettiin talvikauden kuukausille kuvan 30 avulla. Kuvassa pakkasmäärät on ilmoitettu kelvintunteina (Kh), jotka voidaan yhtä suuren asteikkovälin takia suoraan muuttaa celsius-tunneiksi (h°C).



Kuva 30. Pakkasmäärän jakautuminen pakkaskauden kuukausille (Kivikoski ja Saarelainen 2000, katso Soininen 2013, s. 60).

Kuukausittainen pakkasmäärä jaettiin kuukauden pituudella, jolloin saatiin kuukauden keskilämpötila. Laskennassa kaikkien kuukausien pituutena käytettiin 30 päivää. Mitoittavan pakkasmäärän F50 mukaiset talvikuukausien keskilämpötilat on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. Talvikuukausien keskilämpötilat.

Kuukausi	Keskilämpötila [°C]
loka	-0,69
marras	-4,86
joulu	-11,11
tammi	-15,97
helmi	-13,89
maalis	-7,64
huhti	-1,39

Laskennassa oletettiin maanpinnan lämpötilan ennen laskennan aloitusta vastaavan kohteen ilman vuotuista keskilämpötilaa. Maanpinnan lämpötilaksi asetettiin +4,5 °C ja kahdeksan metrin syvyydellä lämpötilan arvioitiin olevan +5,0 °C. Mallinnuksessa ei huomioitu lumen eristävää vaikutusta maanpinnassa eikä syvältä maasta ylöspäin suuntautuvaa geotermistä lämpövuota. Todellisuudessa lumella on merkittävä vaikutus roudan tunkeutumiseen ratapenkereen sivuilla, mutta sen mallintamiseen liittyy useita epävarmuustekijöitä. Tämän työn laskentatapauksissa pyrittiin yksinkertaiseen perustapaukseen, jotta laskentatuloksissa näkyisi routalevyn ominaisuuksien vaikutus roudan tunkeutumissyvyyteen. Laskennassa käytettiin elementtiverkon tiheytenä 0,05 m, jolla todettiin saatavan riittävän tarkkoja tuloksia. Aluksi elementtiverkon tiheytenä kokeiltiin 0,2 m, jolloin laskenta oli nopeaa, mutta tulosten tarkkuus kärsi.

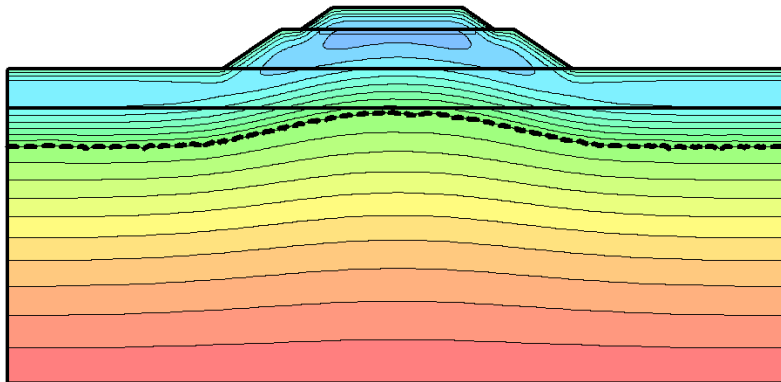
5.3 Laskentatapaukset ja -tulokset

Roudan syvyys laskettiin ilman routalevyä ja routalevyn kanssa viidessä erilaisessa tapauksessa. Laskentatapauksissa varioitiin routalevyn lämmönjohtavuutta ja tilavuusvesipitoisuutta, jotta saataisiin esiin levyn heikentyneiden ominaisuuksien vaikutus roudan tunkeutumissyvyyteen. Laskentatapauksiin valittiin uusi vaatimukset täyttävä levy, RATO 3:n routamitoituksessa käytetty levy ja tutkituista käytetyistä levyistä eniten heikentyneet näytteet. Käytetyistä routalevyistä suurin mitattu lämmönjohtavuus (0,077 W/m°C) oli koekappaleella 19, jonka vesipitoisuus oli 9,8 tilavuusprosenttia. Levynäytteistä suurin vesipitoisuus oli näytteellä 13 (34,1 til-%), mutta siitä ei tehty koekappaletta lämmönjohtavuskokeeseen. Levynäytteen 13 lämmönjohtavuudeksi arvioitiin luvussa 4.3 esitetyn regressiosuoran perusteella 0,1 W/m°C. Levynäytteestä 13 laskettiin myös toinen tapaus, jossa levyn lämmönjohtavuus pidettiin ennallaan, vaikka levyn kosteuspitoisuutta pienennettiin huomattavasti.

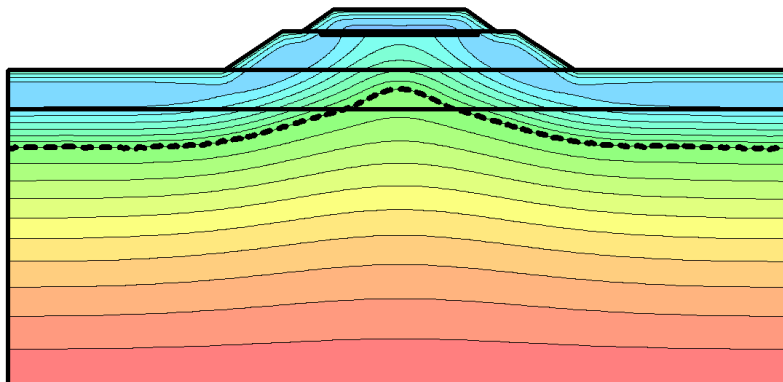
Laskenta aloitettiin selvittämällä pohjamaan ja XPS-routalevyjen kosteuspitoisuuden vaikutusta roudan tunkeutumissyvyyteen. Radan rakennekerrosten oletettiin olevan

kuivatettuja eikä niiden parametrejä muutettu. Pohjamaakerrosta tarkasteltiin ensin täysin vedellä kyllästyneenä pohjaveden pinnan ollessa ratapenkereen alapinnassa. Toisessa tilanteessa pohjamaan yläreunassa oli yhden metrin paksuinen kuivakuorikerros, jonka alapuolinen pohjamaa oli vedellä kyllästynyt. Roudan huomattiin tunkeutuvan kuivassa pohjamaassa merkittävästi syvemmälle kuin vedellä kyllästyneessä. Samansuuntainen havainto oli aiemmin tehty Luomala et al. (2023) tutkimuksessa. Sen sijaan routalevyn kosteuspitoisuudella ei ollut vaikutusta tuloksena saatuun roudan syvyyteen. Tämä johtunee routalevyn hyvin vähäisestä absoluuttisen vesimäärän muutoksesta ja siten vain pienestä ominaislämpökapasiteetin muutoksesta.

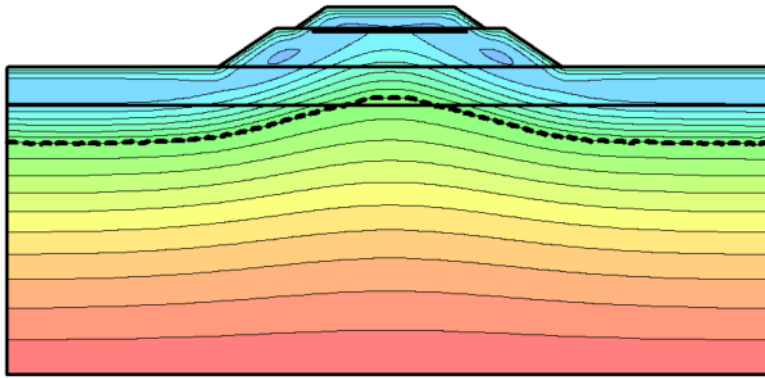
Laskenta suoritettiin kaikilla routalevyn parametreilla pohjamaan täysin kyllästyneessä sekä osittain kuivatetussa tilanteessa. Jokaisesta laskentatapauksesta etsittiin roudan maksimisyvyys pohjamaassa mitoituspakkasmäärän mukaisena talvena. Kaikissa tapauksissa roudan syvyys oli suurimmillaan laskennan lopuksi. Routarajan syvyydet 180 päivän kuluttua ilman routalevyä, mitoitusarvoisen levyn parametreilla sekä heikentyneen levnäytteen 13 parametreilla on esitetty kuvissa 31–33.



Kuva 31. Roudan tunkeutuminen pohjamaahan ilman routalevyä.



Kuva 32. Roudan tunkeutuminen pohjamaahan routamitoituksessa käytetyillä routalevyn parametreilla.



Kuva 33. Roudan tunkeutuminen pohjamaahan heikentyneen levynäytteen 13 parametreilla.

Kuvien laskentatapauksissa pohjamaassa on ylimpänä yhden metrin kuivakuorikerros. Routarajana laskennassa pidettiin lämpötilan nollarajan eli niin kutsutun kriittisen isotermin sijaintia. Kuvissa 31–33 roudan tunkeutumissyvyys on esitetty mustalla katkoviivalla. Roudan syvyydet laskettiin raiteen keskilinjasta. Kuvista huomataan routalevyn eristävä vaikutus etenkin raiteen keskellä. Nollaraja laskee kuitenkin jyrkästi ratapenkereen sivujen kohdalla. Todellisessa tilanteessa lumen eristävä vaikutus loiventaisi roudan syvyyden kasvua radan keskilinjän ulkopuolella. Laskennan tulokset on koottu taulukkoon 11.

Taulukko 11. XPS-routalevyjen laskentatapaukset ja mallinnetut roudan syvyydet.

XPS-routalevyjen laskentatapaukset	Lämmönjohtavuus λ [W/m°C]	Tilavuuslämpökapasiteetti c [kJ/m ³ °C]	Tilavuusvesipitoisuus w [til-%]	Roudan syvyys kyllästyneessä pohjamaassa [m]	Roudan syvyys osittain kuivatetussa pohjamaassa [m]
Ei levyä				0,6	1,1
Uusi levy	0,037	40	0	0	0,35
Mitoitusarvo (RATO 3)	0,050	40	10	0,1	0,45
Levynäyte 19	0,077	40	9,8	0,2	0,65
Levynäyte 13	0,1	40	34	0,25	0,75
Levynäyte 13 (kuiva)	0,1	40	0	0,25	0,75

Taulukossa 11 on esitetty pohjamaahan asti tunkeutuneen roudan syvyys kaikissa laskentatapauksissa sekä kyllästyneessä että osittain kuivatetussa pohjamaassa. Roudan kokonaissyvyys saadaan, kun taulukon lukemaan lisätään pengerkorkeus 1,55 metriä. Tuloksista huomataan, että kyllästyneessä pohjamaassa roudan syvyydet ovat huomattavan paljon pienempiä kuin osittain kuivatetussa pohjamaassa. Kyllästyneessä pohjamaassa myös laskentatapausten väliset erot roudan syvyydessä tasoittuvat. Osittain kuivatetussa pohjamaassa roudan syvyys kasvaa routalevyn

lämmöneristävyyden heikentyessä noin kolminkertaista tahtia kyllästyneeseen pohjamaahan verrattuna. Huomionarvoista on, että routasuojauksen kannalta huonostakin levystä on selkeää hyötyä verrattuna tilanteeseen, jossa levyä ei ole ollenkaan.

Tuloksia verrattiin myös RATO 3:n routamitoituskäyrästäöihin. Luvussa 3.2.2 esitetyn kuvan 7 perusteella routimattomien rakennekerrosten vaadittu paksuus olisi vain noin 0,9 m, kun paikkakunnan vuoden keskilämpötila on 4,5 °C ja pakkasmäärä 40 000 h°C ja rakenteeseen on asennettu 100 mm routalevy. TEMP/W-laskennan tuloksissa ja RATO 3:n mukaisessa routamitoituksessa on melko huomattava ero. Mallinnuksessa tehdyt yksinkertaistukset ja parametrivalinnat sekä erilainen laskentamenetelmä selittänevät eroavaisuuksia. Mallinnuksessa ei esimerkiksi huomioitu syvältä maasta ylöspäin suuntautuvaa geotermistä lämpövuota.

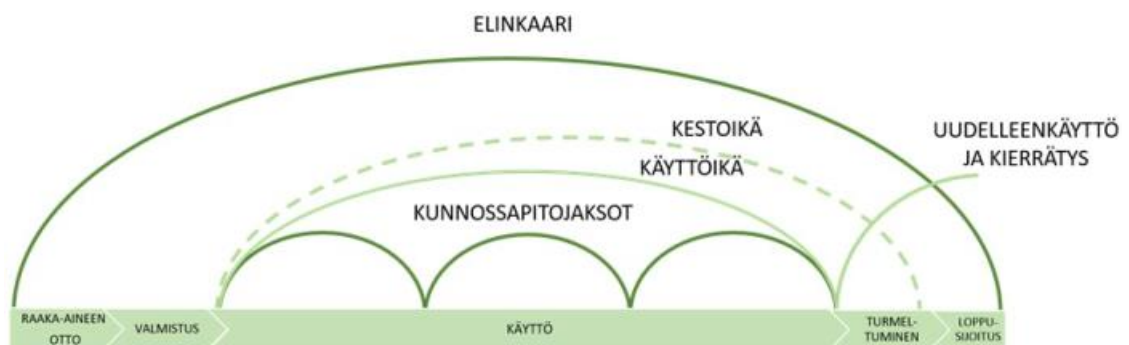
RATO 3:n käyrästäöä hyödynnettiin heikoimman levyn aiheuttamien routaongelmien taajuuden arvioinnissa. TEMP/W-laskennan tuloksissa roudan syvyyden ero mitoitusarvoisen levyn ja heikoimman levyn 13 välillä osittain kuivatetussa pohjamaassa on 0,3 m. Roudan syvyyseron vaikutusta arvioitiin kuvasta 7 ikään kuin käänteisesti jatkamalla keskilämpötilakäyrää kuvan alareunasta alaspäin pakkasmäärän pienenemisen suuntaan niin pitkään, että vaadittu routimattomien kerrosten paksuus olisi 0,6 m. Tämän oletuksen perusteella pohjamaa alkaisi routaantua jo noin 27 000 h°C pakkasmäärällä.

RATO 3:n liitteen 1 mitoituspakkasmääräkäyrästäöjen (s. 8–10) mukaan Tampereen pohjoispuolella kerran 20 vuodessa toistuva pakkasmäärä F20 olisi noin 33 000 h°C ja kerran viidessä vuodessa toistuva pakkasmäärä F5 noin 24 000 h°C. Siten heikentyneet levyt aiheuttaisivat routaongelmia radassa useammin kuin 20 vuoden välein eli noin kahdesti levyjen käyttöiän aikana. On huomioitava, että edellä esitettyyn menetelmään sisältyy paljon arviointia ja oletuksia ja tulos on korkeintaan suuntaa antava.

6. ELINKAARITARKASTELU

6.1 Elinkaariajattelu

Elinkaarella tarkoitetaan ajanjaksoa, joka sisältää rakenteen tai muun tuotteen kaikki vaiheet materiaalien hankinnasta loppusijoitukseen. Elinkaari käsittää rakentamisen, käyttöön kunnossapitajaksoineen ja kestoiän päässä olevan tuotteen loppusijoituksen. (Korkiala-Tanttu et al. 2006, s. 3.) Kestoiällä tarkoitetaan aikaa, jona tuote on käyttökelpoinen. Kestoiän päätyttyä tuote ei enää täytä sille asetettuja vaatimuksia ja sen käytöstä aiheutuu lisäkustannuksia kunnon heikentymisen takia. Käyttöikä on tuotteen ikä, jonka aikana se täyttää asetetut vaatimukset. Tuotteen käyttöikä ja siten elinkaari voi jatkua myös uudelleenkäytön tai kierrätyksen myötä. (Korkiala-Tanttu et al. 2005, s. 9.) Infrarakenteen elinkaaren vaiheet ja siihen liittyvät käsitteet on esitetty kuvassa 34.



Kuva 34. Infran elinkaareen liittyviä yleisiä määritelmiä (Korkiala-Tanttu et al. 2005, Suomela 2019 mukaan).

Rakennetun omaisuuden koko elinkaaren aikaisten vaikutusten arviointia kutsutaan elinkaariajatteluksi. Elinkaarta voidaan tarkastella toimivuuden, taloudellisuuden ja ekologisuuden näkökulmasta. Tuotteen ja toiminnan tulee kaikissa vaiheissa täyttää asetetut vaatimukset, elinkaaren aikaiset kustannukset tulee minimoida ja ympäristövaikutusten olla mahdollisimman pienet. Elinkaaren hallinta on näiden kolmen osatekijän kokonaisuuden ohjaamista. Infrarakenteiden, -materiaalien ja -tuotteiden käyttöikä on tyypillisesti pitkä, joten elinkaaritarkastelussa on erityisen tärkeää huomioida ylläpidon- ja korjausten aiheuttamat kustannus- ja ympäristövaikutukset. Pitkän käyttöiän takia väylärakenteiden elinkaaritarkastelua ei yleensä ole järkevää ulottaa koskemaan koko rakenteen elinikää. Tarkoituksenmukaisempaa on rajoittaa tarkastelu koskemaan esimerkiksi rakenteen perusrakenteen käyttöikäjaksoa. (Suomela 2019, s. 11, 21; Korkiala-Tanttu et al. 2005, s. 14.)

Elinkaaritarkastelun yhtenä tavoitteena on optimoida tuotteen käyttöikä oikea-aikaisesti tehtävillä kunnossapitotoimilla. Radanpidossa huolellisella korjaustoimenpiteiden suunnittelulla eli valitsemalla kohteeseen sopivin korjaustoimenpide ja materiaalit, voidaan huomattavasti vaikuttaa rakenteen elinkaarikustannuksiin. Rataympäristö on syy-seuraussuhteiltaan monimutkainen kokonaisuus ja elinkaaritaloudellisissa tarkasteluissa tulisi huomioida myös kunnossapidosta ja korjauksista välillisesti aiheutuvat kustannukset. Välillisiä kustannuksia muodostuu muun muassa raideliikenteen myöhästymisistä, aikataulumuutoksista, korvaavien kuljetusten järjestämisestä sekä radan suorituskyvyn alenemisesta. Lisäksi välillisiä kustannuksia voi syntyä raideliikenteen imagon kärsimisen johtaessa asiakkaiden menettämiseen. Kustannuslaskelmiin pitäisi sisällyttää myös elinkaaren aikana yhteiskunnalle aiheutuvat kustannukset ja toisaalta huomioida niin sanottuina positiivisina kustannuksina tehdyn toimenpiteen aikaansaamat hyödyt. (Soininen 2013, s. 76–77; Kuula-Väisänen & Nurmikolu 2012, s. 25, 95)

Tässä luvussa tarkastellaan XPS-routalevyjen elinkaarta ratarakenteessa. Tarkastelussa keskitytään levyjen käyttöiän aikaisiin tapahtumiin eikä huomioida levyjen valmistusta tai loppusijoitusta. Tarkastelu on jaettu kunnossapitotoimiin, levyjen kuormituskestävyyden heikentymisen vaikutuksiin ja lämmönjohtavuuden kasvusta johtuviin ongelmiin. Lisäksi pyritään vastaamaan tutkimuskysymykseen routalevyjen käyttöiän pidentämisestä. Routalevyille ei voida suoraan kohdistaa kunnossapitotoimia, mutta ne vaikuttavat radan kunnossapitotarpeeseen. Mekaaninen vaurioituminen sekä heikentää levyn lämmöneristävyttä että voi aiheuttaa pumppaavaa vaikutusta ratarakenteeseen palautuvan painuman myötä. Routalevyjen lämmönjohtavuus kasvaa niiden käyttöiän aikana ja levyn vaurioituminen kiihdyttää kasvua. Levyjen heikentyminen voi johtaa tiheneviin ja oletettua suurempiin routaongelmiin.

6.2 Kunnossapitotarve

Routalevyjen on todettu lisäävän radan kunnossapitotarvetta. Sauni (2018) tutki diplomityössään datalouhintaa hyödyntäen radan kuormituskestävyyttä ja havaitsi, että raiteen korkeuspoikkeaman kasvua tapahtuu erityisen paljon routalevykohteissa. Luomala et al. (2023) huomasivat korkeuspoikkeamien keskihajonnan kasvavan routalevytetyllä alueella ympäröivää rataa nopeammin. Tavanomaista suurempi ja nopeasti kasvava korkeuspoikkeamien keskihajonta johtaa vääjäämättä tavallista aikaisemmin ilmenevään kunnossapitotarpeeseen. Lisäksi routalevyt aiheuttavat niin sanottua korkeuspoikkeamien huojuntaa, jonka takia raidetta ei saada tuennan avulla yhtä tasaiseksi kuin routalevyttämättömällä alueella. (Luomala et al. 2023 s. 11–15.)

Routalevyjen asennuksessa olisi tärkeää kiinnittää huomiota alustan tasaisuuteen ja routimattomuuteen, jotta ehkäistäisiin levyistä aiheutuvia geometriavirheitä ja niiden korjaamiseksi tarvittavia kunnossapitotoimia (Luomala et al. 2023 s. 36–37).

Kunnossapidon ohjaamiseksi tehdään radantarkistuksia, joiden taajuus määräytyy radan kunnossapitotason perusteella. Radantarkistuksia tehdään tarkastusvaunulla, liikkuvasta kalustosta ja kävelytarkastuksena, joiden lisäksi tehdään vaihteiden tarkastuksia. Ratojen tarkastuksen tavoitteena on saada riittävän ajoissa tieto alkamassa olevista virheistä ja puutteista, jotka voisivat kehittyessään johtaa turvallisuuden vaarantumiseen tai radan käytettävyyden rajoituksiin. Tarkastusvaunulla mitataan koneellisesti raiteen geometrista kuntoa ja sähköradan ajolangan asemaa raiteeseen nähden ja tarkistetaan raiteelle ja ajolangalle asetettujen turvallisuusvaatimusten täytyminen. Tarkastuksessa raiteesta mitattavia suureita ovat raideleveys, kallistus, korkeuspoikkeama, kierous ja nuolikorkeus. Mitattaville suureille on määritelty virheluokat kunnossapitotason mukaan. (Ratahallintokeskus 2004, s. 15–19.)

Rataosan kunnossapitotasoon vaikuttavat radan liikenteelliset tarpeet, päällysrakenne ja maksiminopeus. Liikenteellisistä tarpeista tärkeimmät ovat vuosittain kuljetettavat bruttotonnit ja henkilöliikenteen matkustajamäärä. Kunnossapitotasoa on yhteensä kahdeksan ja ne ovat vaativuusjärjestyksessä 1AA-6. (Ratahallintokeskus 2004, s. 16–17.) Tampere-Seinäjoki-rataosa kuuluu kunnossapitotasoon 1A ja Tampere-Pori väli tasoon 1, joten jälkimmäisen virherajat ovat suuremmat. Tässä työssä tarkasteltiin virheiden suuruutta vaihdegeometriaraporteista vuosilta 2021–2023. Vuoden 2021 alusta koneellinen radantarkistus on tehty MEERI-vaunulla, jonka mittaustulokset eivät ole verrannollisia aiempiin radantarkistuspitoituksiin (Hannikainen 2023).



Kuva 35. Radantarkastusvaunu MEERI on suunniteltu ja rakennettu MERMECin toimesta Italiassa (Rautatietekniikka 3/2022, s. 52).

Vaihdegeometriaraporteista taulukoitiin D-luokan virheiden pituus metreinä sekä mittauspäivämäärä virheen kehittymisen seuraamiseksi. Tuloksista kokeiltiin tehdä kuvaajia, joissa virhemetrit esitettiin y-akselilla ja aika x-akselilla. Tarkoituksena oli saada esiin lineaarisesti kasvava poikkeama, jonka kulmakerroin olisi sitä isompi, mitä heikkokuntoisempi routaeriste vaihteessa on. Tällöin voitaisiin vertailla eri levyjen vaikutusta virheiden syntyyn. Rataosien välistä vertailtavuutta kuitenkin hankaloittaa eri kunnossapitotasot, sillä korkeammalla kunnossapitotasolla raidegeometriavirheiden raja ylittyä herkemmin.

Aiempien tutkimusten perusteella oletettiin, että routalevyt vaikuttaisivat pääasiassa korkeuspoikkeaman syntyyn. Vaihdegeometriaraporteista ei pystytty erottamaan pelkkää korkeuspoikkeamaa, sillä raporttiin tulostuu vain suurin radantarkastuksessa mitatuista virheistä. On myös todennäköistä, että routalevyn aiheuttama korkeuspoikkeama edesauttaa myös jonkin toisen virhetyypin kasvua. Kaikki mitatut virheet taulukoitiin virhetyypistä riippumatta. Tuloksista huomattiin heti, etteivät virheet kasva lineaarisesti ja niiden suuruudessa on heilahtelua kumpaankin suuntaan. Kaikista huomattavimmat poikkeamat selittynevät kuitenkin sillä, että tarkastusvaunu on väistänyt junaa poikkeavalle raiteelle. Virheiden suuruus vaihteli lähes kaikissa vaihteissa, eikä eri kuntoisten routalevyjen aiheuttamaa virheiden nopeuden kasvua pystytty erottamaan tuloksista.

Virheen suuruuden kasvun lisäksi toinen oletamus oli, että routalevyt lisäisi vaihteiden kunnossapidon eli tuennan tarvetta, ja että tuentatarve levyjen heikentyessä kasvaisi entisestään. Lisäksi oletettiin, että tuenta korjaisi vaihteen geometriavirheet, ja tuennan jälkeen virheet lähtisivät uudestaan kasvuun. Tuentamäärien ja tuennan vaikutusten tarkastelemiseksi tuentatiedot vuosilta 2021–2023 yhdistettiin virheistä koottuihin taulukoihin. Taulukot ovat kokonaisina liitteenä A.

vaihde	8.2.2021	7.4.2021	3.5.2021	23.6.2021	12.7.2021	30.8.2021	22.11.2021	16.2.2022	26.4.2022	20.6.2022	1.8.2022	4.10.2022	21.11.2022	6.2.2023	2.5.2023	28.6.2023	24.7.2023	18.9.2023	27.11.2023	29.1.2024
KIS V0561	0,00	0,00	3,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
KIS V0563	3,25	4,75	ei	6,00	6,50	5,00	4,75	8,50	4,25	3,75	4,00	3,25	2,00	3,00	3,00	7,25	5,25	5,50	0,00	0,00
KIS V0564	1,25	3,25	1,75	2,75	3,00	1,75	2,25	1,75	3,25	1,50	3,00	1,25	2,00	0,00	1,00	2,75	1,75	1,50	0,00	0,00
KIS V0562	1,00	2,25	2,00	3,50	4,50	1,25	0,75	0,00	1,50	0,25	2,00	1,75	0,75	0,00	0,00	0,75	1,00	1,25	0,00	0,00
RLÄ V0611	1,50	1,75	9,00	2,25	1,50	1,00	0,00	0,00	2,00	0,25	0,00	0,00	0,00	1,00	1,50	1,50	1,50	1,75	2,00	1,50
RLÄ V0612	1,75	2,75	2,00	2,00	3,00	2,50	1,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,50	1,00	0,25	2,75	2,50	1,75	2,00	2,50	1,75
MD V0661	0,00	0,00	0,00	0,25	0,50	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	1,00	0,50	1,25	1,50	1,50	0,75	0,50
MD V0663	0,25	0,50	ei	3,25	3,25	4,75	3,25	3,50	4,25	5,25	3,50	3,25	2,25	2,75	1,50	4,50	2,00	2,00	0,50	0,75
MD V0664	0,50	0,00	3,00	0,00	0,50	0,00	0,25	0,00	0,25	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	2,00	2,25	2,25	6,25	2,75	0,00
MD V0662	0,00	0,25	0,25	0,25	1,00	0,75	1,50	0,75	0,75	0,00	1,25	0,00	1,00	0,50	1,50	2,50	2,25	2,25	2,00	1,75
YLV V0711	0,00	1,25	0,00	2,25	2,25	0,50	0,25	2,25	2,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1,75	0,75	2,00	3,25	1,25	0,00	0,50
YLV V0712	0,50	0,25	2,75	0,25	0,50	1,00	0,50	1,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,75	0,50
JAL V0761	0,50	1,00	3,50	2,75	2,25	1,75	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00
JAL V0763	0,50	0,50	ei	0,75	0,75	1,25	0,00	0,00	1,75	1,50	1,75	1,75	1,75	3,25	3,00	2,75	2,50	4,00	4,50	4,00
JAL V0764	2,75	4,25	4,00	2,00	3,50	4,50	4,00	3,00	2,75	2,25	0,00	2,00	2,25	3,50	2,75	2,00	4,75	3,25	1,00	0,00
JAL V0762	3,00	2,00	2,75	0,00	0,50	1,75	0,00	0,50	2,25	1,00	0,00	0,00	0,00	1,25	2,50	7,50	3,50	4,50	0,00	0,00
PSJ V0811	1,75	3,25	13,00	3,25	2,75	3,25	3,50	4,25	4,50	2,00	4,75	5,00	4,75	4,75	4,75	2,00	1,50	4,00	0,00	0,00
PSJ V0812	4,50	4,25	5,50	4,25	5,75	8,25	3,50	14,50	6,25	6,00	9,50	6,50	5,00	2,50	1,75	3,25	3,50	4,75	1,50	1,00
PLU V0871	4,00	4,50	5,75	5,75	6,25	3,50	2,50	3,75	4,75	0,25	0,75	0,75	0,00	1,00	1,50	2,25	1,75	1,25	1,25	1,25

Kuva 36. Geometriavirheraportit ja tuentatiedot väliltä Kuivasjärvi-Pohjois-Louko.

vaihde	19.5.2021	23.7.2021	22.9.2021	4.5.2022	29.7.2022	28.9.2022	19.4.2023	4.8.2023	10.10.2023
LLH V0702	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
KAU V0102	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
NOA V0001	0,00	5,00	4,00	4,00	4,25	0,00	3,00	6,00	0,00
NOA V0002	4,75	6,00	6,25	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SIU V0001	6,25	3,50	6,75	0,50	0,00	0,00	0,50	0,00	2,75
SIU V0002	0,00	0,25	0,25	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
SNM V0001	1,75	1,75	3,50	4,25	0,00	1,25	1,25	1,00	1,50
SNM V0002	1,75	0,00	1,50	2,00	2,25	2,50	5,25	2,25	0,00
KRU V0001	0,00	0,00	0,00	2,50	0,00	2,00	5,00	2,50	0,00
KRU V0002	2,25	2,25	1,75	2,00	3,00	3,00	2,00	4,25	4,00
HNO V0001	0,50	0,25	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	3,75
HNO V0002	1,25	0,75	2,00	1,75	0,00	1,00	1,25	1,00	1,25
VMA V0001	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,25	0,00	0,00
VMA V0003	3,25	4,00	3,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,75
VMA V0006	0,50	0,00	0,50	0,50	0,00	0,00	0,75	1,00	0,00
VMA V0002	0,00	0,00	0,00	5,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
ÄS V0001	0,75	1,00	1,25	1,25	0,25	0,00	0,00	0,00	1,75
ÄS V0002	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00

Kuva 37. Geometriavirheraportit ja tuentatiedot väliltä Lielähti-Äetsä.

Tampere-Seinäjoki-rataosalta tiedot on esitetty väliltä Kuivasjärvi-Pohjois-Louko kuvassa 36 ja Tampere-Pori-rataosan väliltä Lielähti-Äetsä kuvassa 37. Kuviin on merkitty sinisellä katkoviivalla vaihteet, joista on toimitettu routalevynäytteet tutkittavaksi. Muiden kuin sinisellä merkittyjen vaihteiden routasuojauksesta ei ole tietoa, mutta todennäköisesti osassa näistäkin vaihteista on routalevyt. Radantarkistusten välissä tehdyt tuennat on merkitty mustilla ruuduilla. Kuvista nähdään, että lähes kaikkia routalevytettyjä vaihteita on tuettu vähintään kerran tarkasteluaihana. Tampere-Seinäjoki välillä routalevytettyjä vaihteita on tuettu keskimäärin 1,7 kertaa ja Tampere-Pori välillä keskimäärin 0,8 kertaa tarkasteluaihana. Tampere-Seinäjoki väliltä otetut routalevynäytteet olivat selkeästi heikompiuntoisia kuin Tampere-Pori väliltä otetut näytteet. Ero tuentojen määrässä voi kuitenkin selittyä levyjen kunnan sijaan Tampere-Seinäjoki-rataosan korkeammalla kunnossapitotasolla. Kummallakin rataosalla vaihteita on tuettu tarkastelujakson aikana korkeintaan kolmesti, mutta osaa vaihteista ei ole tuettu kertaakaan. Tarkastelujakson lyhyden takia ei voida päätellä, onko tarkasteltujen vaihteiden tuennan tarve ollut tasaista vai mahdollisesti kiihtyvää tai aaltomaista routalevyjen käyttöä aikana.

Geometriavirheraporttien ja tuentatietojen perusteella routalevyn kunnolla ei ole selkeästi havaittavaa säännönmukaista vaikutusta radan kunnossapitotarpeeseen. Tarkastellut vaihteet eivät erotu muista kyseisten rataosien vaihteista tuentojen määrän

tai virhemetriä perusteella. Routalevytettyjen vaihteiden virheiden pituus ja kasvunopeus vaihtelivat runsaasti, kuten myös muiden vaihteiden. Lisäksi tuentojen osalta huomionarvoista on, että virheet eivät välttämättä poistuneet niiden jälkeenkään, ja toisaalta virheiden suuruudessa tapahtui muutoksia myös ilman tuentoja.

6.3 Kuormituskestävyys

Ratarakenteessa routalevyyn kohdistuu suuri yläpuolisten rakenteiden sekä raideliikenteen aiheuttama kuormitus koko sen käyttöajan. Routalevyiltä vaaditaan suurta puristuslujuutta, jotta levyn rakenne pysyy ehjänä ja sen lämmöneristävyys säilyy kuormituksen alaisena. Routalevy vaikuttaa myös ratarakenteen toimintaan, sillä se lisää merkittävästi ratarakenteen joustoa, vaikka rakenne olisi muuten jäykkä (Sauni 2018, s. 70). Ratarakenteen jäykkyyden pieneneminen routalevytyksen vaikutuksesta vähentää mahdollisesti myös rakenteen kuormituskestävyyttä. Routalevyjen käytön tulisikin olla tarkoituksenmukaista ja aloitus- ja päättymäkohtiin tulisi rakentaa kunnolliset siirtymäkiilat epäjatkuvuuskohtien välttämiseksi. (Luomala et al. 2015, s. 83.)

Joustavana rakenneosana routalevy osaltaan lisää radan palautuvaa painumaa (Luomala et al. 2023, s. 33). Olemassa olevilla maanvaraisesti perustetuilla radoilla ratapölkystä mitattu radan palautuva pystysuuntainen siirtymä saa mitoitusakselipainon suuruisen kuormituksen vaikutuksesta olla korkeintaan 8 mm pohjamaan ollessa turvetta ja muissa tapauksissa 4 mm (Liikennevirasto 2018, s. 18). Luvussa 3.6.3 esitetyn perusteella routalevyyn arvioidaan kohdistuvan 110 kPa:n suuruinen pystysuuntainen jännitys 250 kN:n akselikuormalla.

Tutkittujen käytettyjen routalevyjen aiheuttaman palautuvan painuman suuruutta tarkasteltiin kuvien 26–28 jännitys-kokoonpuristumakäyriltä. Oletuksena oli, että puristuslujuudeltaan heikoimmat levyt saattaisivat aiheuttaa yli 4 mm pystysuuntaisia siirtymiä. Lähes kaikissa levyissä esiintyi puristuskokeen alussa tavallista suurempaa kokoonpuristumaa, joka todennäköisesti johtui levyjen pinnan epätasaisuudesta sekä levyn tason suuntaisista halkeamista osassa levyistä. Ratarakenteessa rakennekerrosten paino pitää levyjen halkeilleet pinnat kiinni toisissaan, ja levyjen yläpuoliset rakennekerrokset ovat asettuneet kiinni levyjen pintaan. Kokoonpuristumaa ei siten todellisessa tilanteessa tapahdu vielä yhtä pienillä jännityksillä kuin puristuskokeessa.

Suurimmat kokoonpuristumat 110 kPa:n jännityksellä muodostuivat tuntemattomiin levyihin 18, 20 ja 21, joiden rakenne oli selkeästi vaurioitunut (kuva 19). Kun levyjen jännitys-kokoonpuristumakäyriltä jätettiin huomioimatta alun pienellä voimalla nopeasti

kasvava kokoonpuristuma, levyjen kokoonpuristumat olivat noin 3,4–5,3 prosenttia, joka vastaa kyseisten levyjen paksuuksilla 1,3–3,7 millimetriä. Muiden levytyyppien kokoonpuristumat olivat suurimmillaankin vain 1–1,5 prosentin välillä, joka vastaa 0,8–1,0 millimetrin pystysuuntaista siirtymää. Levyille luvussa 4.4 (taulukko 8) määritetyt puristuslujuudet korreloivat melko hyvin levyistä aiheutuvan palautuvan painuman kanssa.

Routalevyn asennussyvyys vaikuttaa siihen kohdistuvan junaliikenteen kuormituksen suuruuteen. Välikerroksen alle asennettuun routalevyyn kohdistuu suoraan tukikerroksen alle asennettua levyä pienempi kuormitus. Tällöin myös levystä aiheutuva kimmainen muodonmuutos on pienempi, mikä osaltaan vähentää raideseppelin kulumista. Nykyiset laatuvaatimukset täyttävän raideseppelin on todettu kestävän liikennekuormituksen aiheuttamia rasituksia varsin hyvin, eikä routalevyn rakenteeseen tuoman lisäjouston ajatella lyhentävän tukikerroksen elinkaarta. Aiempien tutkimusten ja tässä työssä tehtyjen havaintojen perusteella vaatimusten mukainen XPS-routalevy kestää päällysrakenteen elinkaaren ajan molemmilla asennussyvyyksillä kuormitusmäärästä riippumatta. (Luomala et al. 2023, s. 33, 47.)

6.4 Lämmönjohtavuuden kasvu

Routalevyjen lämmönjohtavuus kasvaa ajan myötä levyjen vesipitoisuuden kasvaessa. Aikaisemmin routaeristeet pyrittiin asentamaan ratarakenteeseen mahdollisimman korkealle, jotta saavutettaisiin paras eristysteho (Mustonen 1991, s. 32). Routasuojauksen kannalta asennussyvyyden merkitys on kuitenkin vähäinen etenkin penkereen keskellä (Luomala et al. 2023, s. 27). Toisaalta kenttätutkimuksessa on huomattu lähemmäs ratarakenteen pintaa asennettuihin routalevyihin imeytyvän enemmän vettä kuin syvemmälle asennettuihin levyihin (Ketonen et al. 1999). Veden imeytyminen kasvattaa levyjen lämmönjohtavuutta, joten korkeampi asennustapa todennäköisemmin heikentää kuin kasvattaa levyjen eristystehoa. Syvämpi asennustapa myös suojaa levyjä tukikerroksen raideseppelin aiheuttamilta vaurioilta. Levyn pinnan vaurioituessa veden pääsy levyyn helpottuu huomattavasti.

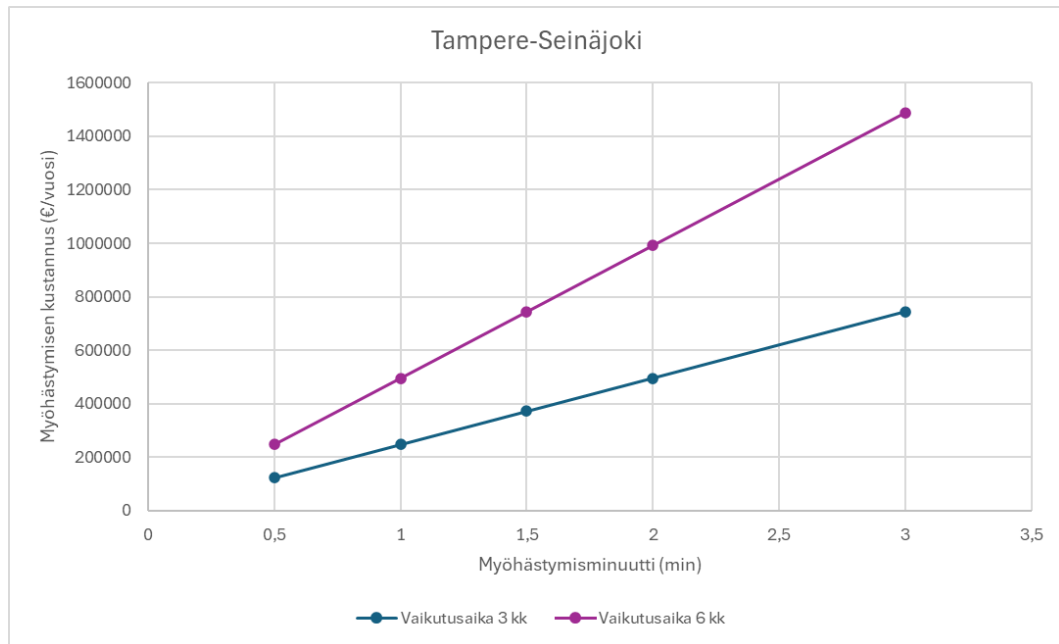
Lämmönjohtavuuden kasvu heikentää routalevyn toimintaa eristeenä, jolloin routa pääsee tunkeutumaan rakenteessa syvemmälle ja mahdollisesti routivaan pohjamaahan saakka. Pohjamaan routimisesta aiheutuva epätasainen routanousu vaikuttaa radan turvallisuuteen ja liikennöitävyyteen. Routapaikoilla raiteen pituussuuntaisia epätasaisuuksia ja kallistusvirheitä pyritään pienentämään kiilauksella. Mikäli routimista ei pystytä hallitsemaan kiilaamalla, täytyy raiteen suurinta sallittua nopeutta alentaa. (Ratahallintokeskus 2000, s. 32–34.) Nopeusrajoituksilla voi olla merkittävä vaikutus

henkilöliikenteen aikatauluihin ja myöhästymiset tärkeimmillä rataosilla voivat kertaantua jopa koko liikenneverkolle. Myöhästyminen voi johtaa vaihtoyhteyksien katkeamisiin tai vaihtoyhteyksien odottaessa ketjuuntua muille rataosille. Suurin osa Suomen rataverkosta on yksiraiteista, mikä lisää rataverkon häiriöherkkyyttä. Liikenteen häiriintyessä junakohtaukset liikennepaikoilla menevät sekaisin ja ratakapasiteetin ollessa täydessä käytössä tilannetta on vaikeaa saada normalisoitua. (Liikennevirasto 2011). Vaikutukset tavaraliikenteelle ovat pienemmät, sillä tavaraliikenteen nopeudet ovat pääsääntöisesti henkilöliikennettä alempia ja aikataulut väljempiä.

Liikenneviraston nopeusrajoituslaskurilla voidaan vertailla eri suuruisten ja pituisten nopeusrajoitusten aiheuttamaa junan kulun hidastumista minuuteissa. Kalliomäki (2023) on diplomityössään tutkinut junien myöhästymisen aiheuttamia kustannuksia myöhästymisminuuttien suhteen. Nopeusrajoituksen pienentyessä junan kulun hidastuminen kasvaa eksponentiaalisesti. Mikäli juna ei saa kurottua kiinni aikataulua asemien välissä, myöhästyminen aiheuttaa haittoja ja kustannuksia. Vuosittaiset kustannukset myöhästymisminuuttien suhteen voidaan esittää kaavalla 6.4 (muokattu lähteestä Kalliomäki 2023, s. 52).

$$K = (s_t \cdot k_t + s_y \cdot k_y) \cdot x \cdot t \cdot a \quad (6.4)$$

jossa K on myöhästymisestä aiheutuva kustannus [€], s_t on työasiamatkojen osuus [%], k_t on työasiamatkojen kustannus [€/min], s_y on yksityisten matkojen osuus [%], k_y on yksityisten matkojen kustannus [€/min], x on matkojen määrä, t on myöhästymisaika [min] ja a on myöhästymisten vaikutusaika [kk/12kk]. Työasiamatkojen ja yksityisten matkojen kustannuksia kuvataan matka-aikasäästön perusarvoilla, jotka ovat työasiamatkoille 20,88 €/hlö/h eli 0,348 €/hlö/min ja yksityisille matkoille 6,65 €/hlö/h eli 0,111 €/hlö/min (Väylävirasto 2020, s. 19). Vuonna 2023 Tampere-Seinäjoki välillä tehtiin 3,44 miljoonaa kaukoliikenteen matkaa, joista 75 prosentin oletetaan olevan työasiamatkoja ja 25 prosentin yksityisiä matkoja (Väylävirasto 2024d). Myöhästymiskustannus on laskettu vertailun vuoksi kolmen ja kuuden kuukauden pituisille nopeusrajoituksille, kun myöhästyminen määränpäästä on 0,5–3 minuuttia.



Kuva 38. Myöhästymisen vuosikustannus suhteessa myöhästymisminuutteihin rataosalla Tampere-Seinäjoki.

Kuvasta 38 huomataan, että jo muutaman minuutin säännöllinen myöhästyminen yhdellä rataosalla aiheuttaa huomattavia lisäkustannuksia. Rataosan matkojen määrällä, työasiamatkojen osuudella ja myöhästymisten kestolla on keskeinen vaikutus syntyviin laskennallisiin kustannuksiin. Puolen vuoden myöhästymisten kustannus on luonnollisesti kaksinkertainen kolmen kuukauden ajan aiheutuviin myöhästymisiin nähden. Laskennassa huomioitiin vain yhdellä rataosalla myöhästymisistä aiheutuvat kustannukset, mutta myöhästymisten todelliset kustannukset lienevät selkeästi suuremmat välillisten vaikutusten takia. Tampere-Seinäjoki-rataosuus on pääasiassa yksiraiteinen, joten se on myös herkkä häiriöille. Lisäksi rataosa on osa päärataa ja matkustajamäärältään merkittävä myös suhteessa kaikkiin kaukoliikenteen matkoihin (15,116 milj. vuonna 2023) (Väylävirasto 2024d). Näin ollen rataosalla on suuri riski myöhästymisten kertautumiseen muille rataosille ja siten kustannuksien kasvulle. Myöhästymisistä aiheutuvat laskennalliset kustannukset ovat niin merkittäviä, että niitä on pyrittävä ehkäisemään kaikin mahdollisin keinoin.

Luvussa 5.3 arvioitiin, että lämmöneristävydeltään heikoimmat levyt aiheuttaisivat vakavia roudaongelmia radassa keskimäärin kahdesti niiden käyttöiän aikana. Levyjen eristävyden heikentyminen on oletettavasti tapahtunut pikkuhiljaa niiden käyttöiän aikana ja alkuun routasuojaus on ollut riittävä myös ankarimmille talville. Myöhästymiskustannuksia pohdittaessa on muistettava, etteivät suinkaan kaikki roudaongelmat ja niistä seuraavat nopeusrajoitukset liity routalevyihin. Lähtökohtaisesti routalevytyksellä voidaan parantaa vain sellaisia kohteita, joissa roudaongelmien

aiheuttaja on riittämätön radan rakennekerrospaksuus (Sauni 2018, s. 114–115; Luomala et al. 2023, s. 50). Routavaurioita aiheutuu kuitenkin monenlaisista radan epäjatkuvuuskohdista ja radan rakenteen puutteista (Väylävirasto 2024b, s. 15).

6.5 Käyttöikä

RATO 3:n (2018, s. 11) mukaan routalevyjen käyttöikävaatimus on 40 vuotta, mutta käytettyjä routalevyjä on korvattu uusilla vaihteiden vaihtojen yhteydessä keskimäärin 25–30 vuotta asennuksen jälkeen. Tässä työssä oli tavoitteena selvittää, voitaisiinko routalevyjen käyttöikää kasvattaa kahteen vaihtenvaihtosykliin. Tutkituista routalevyistä tehtyjen kokeiden ja havaintojen perusteella suurin osa levyistä oli kestänyt mekaanista kuormitusta ja vastustanut kosteuden imeytymistä riittävällä tavalla. Näissä levyissä voidaan olettaa olleen vielä käyttöikää jäljellä.

Routalevyjen elinkaaren aikaiset kustannukset muodostuvat materiaalista, asennuksesta, kunnossapidosta ja loppusijoituksesta. Elinkaarikustannukset ovat pienimmät, kun routalevy asennetaan välikerroksen alle ja levy on rakenteessa koko 40 vuoden käyttöikävaatimuksen ajan (Luomala et al. 2023, s. 48–49). Ihku-kustannuslaskentapalvelun mukaan routalevy maksaisi asennettuna noin 25 €/m². Esimerkiksi pitkän 1:18-vaihteen asennuksen yhteydessä tehty routalevytyks maksaa noin 10 000 euroa, kun taas pitkän vaihteen vaihto materiaaleineen maksaa noin 400 000–500 000 euroa (Sauni 2024). Routalevytyksen kustannus suhteessa vaihtenvaihdon kokonaiskustannuksiin on pieni eikä käytettyjen routalevyjen jättäminen rakenteeseen vaihtenvaihdon yhteydessä tuo merkittäviä taloudellisia säästöjä. Tämän takia käyttöiän kasvattamisesta saatava hyöty on kohtuullisen pieni suhteessa riskeihin, kuten routasuojauksen merkittävään heikentymiseen ja tuentatarpeen kasvuun. Routalevyyn käyttöikää voitaisiin luonnollisesti kasvattaa pidentämällä vaihtenvaihtosykliä. Routalevytyksellä ei kuitenkaan voida vaikuttaa vaihteen käyttöikään, vaan sen määrittää esimerkiksi liikenteen aiheuttama vaihteen kuluminen.

Jätteen määrän vähentämiseksi routalevyjen käyttöikä kannattaisi hyödyntää täysin, sillä tällä hetkellä käyttöiän päätyttyä levyt hävitetään polttamalla energiaksi. Tulevaisuudessa Väyläviraston tavoitteena on jätehierarkian mukaisesti vähentää jätteen syntymistä, edistää materiaalien uudelleenkäyttöä tai toissijaisesti kierrätystä ja vasta viime kädessä hyödyntää energiana. Routalevyjen kierrättäminen takaisin valmistajalle olisi jo nyt mahdollista, mutta ainakin toistaiseksi todettu taloudellisesti kannattamattomaksi. (Siira 2024.)

7. PÄÄTELMÄT

Pääosa Suomen rataverkosta on rakennettu ennen kuin ratarakenteille ja niissä käytetyille materiaaleille on ollut nykyisen kaltaisia laatuvaatimuksia. 1900-luvun alkupuoliskolla liikennenopeedet olivat alhaisia ja säästäväisyys ohjasi radan rakennus- ja kunnossapitotöitä. Aikanaan tehdyt ratkaisut aiheuttavat edelleen haasteita radanpidolle. Jatkuvasta perusparannuksesta huolimatta routahaitoista ei olla päästy eroon 2000-luvullakaan. Nykyisin radan routasuojauksessa routimattomien rakennekerrosten paksuus mitoitetaan sellaiseksi, että routa ei pääse ollenkaan tunkeutumaan routivaan pohjamaahan mitoitustalvena. Radan routasuojaus voidaan toteuttaa myös korvaamalla osa routimattomasta maamateriaalista XPS-routalevyillä, jolloin routasuojaus saavutetaan ohuemmalla kokonaisrakennepaksuudella.

XPS-routalevyjen käyttö perustuu niiden hyvään lämmöneristävyyteen ja sen säilymiseen levyyn radassa kohdistuvasta suuresta kuormituksesta ja kosteusrasituksesta huolimatta. Tie- ja ratarakenteisiin asennettujen routalevyjen pitkäaikaisseurannat ovat osoittaneet, että routalevyjen kosteuspitoisuus kasvaa noin 0,25–0,30 tilavuusprosenttia vuodessa, joka tarkoittaisi vaaditun 40 käyttövuoden aikana kertyvän 10–12 tilavuusprosentin vesipitoisuutta. Veden imeytyminen levyyn huokosrakenteeseen heikentää levyn lämmöneristyskykyä. Mekaanisen vaurioitumisen ehkäisemiseksi XPS-levyiltä vaaditaan suurta puristuslujuutta, sillä rakenteen vaurioituessa levyyn pääsisi tunkeutumaan kosteutta moninkertaisesti.

Käytettyjen XPS-routalevyjen kunnan vaikutusta routasuojausominaisuuksiin tutkittiin Lielähti-Kokemäki ja Tampere-Seinäjoki rataosilta vaihdealueilta otetuista näytteistä. Levynäytteitä saatiin Finnfoamin, Basfin, Dowin ja muun tunnistamattoman valmistajan levyistä. Silmämääräisesti arvioituna pääosa levyistä oli hyväkuntoisia, vaikka osasta levyjä erottui sepelin tunkeutumaa ja levyn tason suuntaisia halkeamia. Tunnistamattoman valmistajan levyt olivat kunnoltaan heikoimpia ja niiden pinnan rakenne oli osittain rikkoutunut. Levyjen mekaanisen vaurioitumisen ja vesipitoisuuden välillä huomattiin olevan yhteys, sillä rakenteeltaan ehjiltä vaikuttaneiden levyjen vesipitoisuus oli huomattavasti alhaisempi kuin vaurioituneiden levyjen. Pienin mitattu vesipitoisuus oli vain 2,7 tilavuusprosenttia ja suurin 34,1 tilavuusprosenttia. Puristuskokeissa huomattiin levyn ehjän rakenteen ja matalan vesipitoisuuden korreloivan myös korkean puristuslujuuden kanssa. Suuressa osassa levyistä puristuslujuus oli kuormituksesta huolimatta säilynyt yli 500 kPa:n mitoitusvaatimuksen.

Lämmönjohtavuuskokeiden tulokset olivat suurimmaksi osaksi hyvin lähellä nykyistä uudelle levyille asetettua 0,037 W/Km vaatimusta. Tulokset eivät kuitenkaan täysin kuvaa levyjen lämmönjohtavuutta ratarakenteessa, sillä levyistä oli päässyt haihtumaan merkittävästi kosteutta ennen mittauksia. Lämmönjohtavuuden ja kosteuspitoisuuden kasvun yhteys saatiin esiin vain tunnistamattomien levyjen tuloksista. Koekappaleiden kosteuspitoisuus oli lämmönjohtavuuden mittaushetkellä 0,1–13 tilavuusprosenttia ja lämmönjohtavuudet 0,033–0,077 W/Km. Tuloksista määritetyn regressiosuoran kulmakerroin on 0,0024, joka tarkoittaa 0,0024 W/Km lämmönjohtavuuden kasvua levyn kosteuspitoisuuden kasvaessa yhden tilavuusprosentin.

Routalevyjen lämmöneristävyuden heikentymisen vaikutusta roudan tunkeutumissyvyyteen tutkittiin TEMP/W-mallinnuksen avulla. Laskentatapauksiin luotiin yksinkertaistettu malli, jossa ei huomioitu esimerkiksi lumen ja geotermisen lämmön vaikutusta. Mallinnuksen perusteella ilman routalevyä routa tunkeutuisi 1,1 m syvyydelle, RATO 3:n routamitoituksen mukaisilla levyn parametreillä 0,45 m syvyydelle ja heikentyneen levyn arvoilla 0,75 m syvyydelle pohjamaahan. Huomionarvoista on, että routasuojauksen kannalta huonostakin levystä on selkeää hyötyä verrattuna tilanteeseen, jossa levyä ei ole ollenkaan. Mallinnuksen tulokset ja RATO 3:n mukainen routamitoitus erosivat melko paljon toisistaan. Pohjamaan kyllästysaste vaikutti tuloksiin merkittävästi, vesipitoisuuden kasvaessa veden jäätymislämpö lisääntyy ja siten myös kerroksen jäätymisvastus suurenee. Roudan huomattiinkin tunkeutuvan kuivassa pohjamaassa merkittävästi syvemmälle kuin vedellä kyllästyneessä.

Pohjamaan routimisesta aiheutuva epätasainen routanousu vaikuttaa radan turvallisuuteen ja liikennöitävyyteen. Raiteen suurinta sallittua nopeutta täytyy alentaa, mikäli routimista ei pystytä hallitsemaan raidetta kiilaamalla. Nopeusrajoituksista aiheutuvat myöhästymiset heijastuvat pahimmillaan koko liikenneverkolle. Erityisesti yksiraiteiset osuudet lisäävät rataverkon häiriöherkkyyttä. Muutamankin minuutin säännöllinen myöhästyminen yhdellä rataosalla aiheuttaa huomattavia lisäkustannuksia. Rataosan matkojen määrällä, työasiamatkojen osuudella ja myöhästymisten kestolla on keskeinen vaikutus syntyviin kustannuksiin.

Routalevytyksestä aiheutuvaa radan kunnossapitotarvetta tutkittiin vaihdegeometriaraporttien ja tuentatietojen perusteella. Raporteista taulukoitiin D-luokan virheiden kehittymistä kronologisesti, ja lähtöoletuksena oli saada esiin lineaarisesti kasvava poikkeama, jonka kulmakerroin olisi sitä isompi, mitä heikkokuntoisempi routaeriste vaihteessa on. Routalevytyksen oletettiin myös kasvattavan vaihteiden tuennan tarvetta, ja että tuentatarve levyjen heikentyessä kasvaisi entisestään. Vaihdegeometriaraporttien ja tuentatietojen perusteella routalevyn

kunnolla ei ole selkeästi havaittavaa säännönmukaista vaikutusta radan kunnossapitotarpeeseen tai geometriavirheiden kehittymiseen tarkastelluissa vaihteissa.

Tässä työssä oli tavoitteena selvittää, voitaisiinko routalevyjen käyttöikää kasvattaa kahteen vaihtenvaihtosykliin. Suurin osa tutkituista routalevyistä oli kestänyt mekaanista kuormitusta ja vastustanut kosteuden imeytymistä riittävällä tavalla. Näissä levyissä voidaan olettaa olleen vielä käyttöikää jäljellä. Routalevyjen käyttöikävaatimus on 40 vuotta, joka ei tällä hetkellä toteudu vaihtenvaihtosyklin pituuden takia. Käyttöiän kasvattaminen kahteen vaihtenvaihtosykliin ei kuitenkaan ole kannattavaa, koska routalevytyksen kustannus suhteessa vaihtenvaihdon kokonaiskustannuksiin on pieni eikä käytettyjen routalevyjen jättäminen rakenteeseen vaihtenvaihdon yhteydessä tuo merkittäviä taloudellisia säästöjä.

LÄHTEET

- Duskov, M. (1997). Materials research on EPS20 and EPS15 under representative conditions in pavement structures. *Geotextiles and geomembranes* 15 (1), pp. 147–181.
- Ehrola, E. (1996). Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Helsinki, Rakennustieto Oy. 365 s.
- Finnfoam (2022). Finnfoam VR-levy tuotekortti 20.4.2022. Saatavissa (viitattu 27.5.2024): <https://finnfoam.fi/tuotteet/finnfoam-eristelevyt/raideliikenne/>
- Flygare, P., Kivikoski, H. & Niskala, N. (1989). Maakosketuksessa olevat lämmöneristeet: kenttätutkimus. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 105 s.
- GEO-SLOPE International Ltd. (2014). Thermal Modeling with TEMP/W. Calgary, Alberta, Canada. 164 s.
- Hannikainen, T. (2023). Koneellinen radantarkastus valtion rataverkolla. Tampereen yliopisto, Rautatiesuunnittelun erikoisopintojakson (2022–2023) opetusmateriaali.
- Ilmatieteenlaitos (2024). Vuositulastot: Vuoden keskilämpötila ja vuosisade 1991–2020. Saatavissa (viitattu 19.2.2024): <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/vuositulastot>
- InfraRYL (2023). Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Rakennustieto Oy, InfraRYL 2023/2.
- Jääskeläinen, R. (2009). Pohjarakennuksen perusteet. Tammertekniikka. 233 s.
- Ketonen, P., Levomäki, M., Mustonen, J., Reihe, H. ja Valtonen, J. (1999). Esiselvitys routalevyistä. 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Teknillinen korkeakoulu, tielaboratorio.
- Kolisoja, P. (2022). Radan alusrakenne. Tampereen yliopisto, Rautatiesuunnittelun erikoisopintojakson (2022–2023) opetusmateriaali.
- Konrad, J.-M. & Morgenstern, N. R. 1980. A mechanistic theory of ice lens formation in fine grained soil. *Canadian Geotechnical Journal*, vol 17, pp. 473–486.
- Korkiala-Tanttu, L., Törnqvist, J., Eskola, P., Pienimäki, M., Spoof, H. & Mroueh, U-M. (2005). Elinkaaritarkastelut tienpidon hankintoihin, Tiehallinnon selvityksiä 13/2005.
- Korkiala-Tanttu, L., Tenhunen, J., Eskola, P., Häkkinen, T., Hiltunen, M. & Tuominen, A. (2006). Väylärakentamisen ympäristövaikutukset ja ekoindikaattorit; ehdotus arviointijärjestelmäksi. Tiehallinnon selvityksiä 22/2006.

- Kunnas, T. (2013). Routasuojaus: rakennukset ja infrarakenteet. Helsinki. Suomen rakennusinsinöörien liitto.
- Kuula-Väisänen, P. & Nurmikolu, A. (2012). Kirjallisuusselvitys ratarakenteiden elinkaaritaloudellisuuden arvioinnista. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 1/2012. 104 s.
- Lehto, A. (2024). Vaihtevaihtotöiden valvoja Ari Lehdon haastattelu 15.1.2024.
- Liikennevirasto (2011). Roudan hallintaraportti 2011. VR Track Oy, Rautatiesuunnittelu, Helsinki. 30 s.
- Liikennevirasto (2018). Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3: Radan rakenne. Liikenneviraston ohjeita 13/2018.
- Luomala, H., Peltokangas, O., Rantala, T. & Nurmikolu, A. (2015). Radan kokonaisjäykkyyden mittaaminen ja modifiointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 19/2015.
- Luomala, H. (2022). Tukikerroksen mitoitus ja elinkaari. Tampereen yliopisto, Rautatiesuunnittelun erikoisopintojakson (2022–2023) opetusmateriaali.
- Luomala, H., Peltomäki, M. & Silvast, M. (2023). Tutkimus routalevyn asennussyvyydestä. Väyläviraston julkaisuja 22/2023.
- Mustonen, J. (1991). Lämpöeristeiden käyttö rautatierakenteissa. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto. 122 s.
- Myyrä, V. (1983). Solumuovin käyttö radan eristämiseen. Rakennustekniikka nro. 6/1983.
- Niu, F. et al. (2021). Performance degradation of polymer material under freeze-thaw cycles: A case study of extruded polystyrene board. Polymer testing 2021–04, Vol.96.
- Nurmikolu, A. (2004). Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2004. 193 s. + liitt.
- Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. (2001). XPS-Routaeristelevyt ratarakenteessa. Helsinki, Ratahallintokeskus, Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 2/2001. 97 s. + liitt. 20 s.
- Nurmikolu, A. & Kolisoja, P. (2002). Ratarakenteen routasuojaus. Helsinki, Ratahallintokeskus, Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 1/2002. 101 s. + liitt. 14 s.
- Pakkala, T. A. & Lahdensivu, J. (2014). Long-term water absorption tests for frost insulation materials taking into account frost attack. Case Studies in Construction Materials. 2014–01, Vol.1 (C), p. 40–45.

- Pylkkänen, K. & Nurmikolu, A. (2015). Routa ja routiminen ratarakenteessa. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2015. 210 s. + liitt.
- Ratahallintokeskus (2000). Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO) osa 15: Radan kunnossapito. 1693/731/00. 63 s.
- Ratahallintokeskus (2002). XPS-routalevyjen tekniset toimitusehdot. 279/731/02.
- Ratahallintokeskus (2004). Ratatekniset määräykset ja ohjeet (RAMO) osa 13: Radan tarkastus. 1953/731/2004. 51 s.
- RIL (1984). Lämmön- ja kosteudeneristys. RIL 155. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto. 389 s.
- Saarelainen, S. (1990). Jäätäneen maan fysiikka ja mekaniikka. RIL 157-2, Geomekaniikka 2, Suomen rakennusinsinöörien liitto, Helsinki. s. 273–288.
- Saarinen, M. (2008). Ratojen alusrakenteissa käytettyjen materiaalien routimisherkyys. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto.
- Sauni, M. (2018). Radan kuormituskestävyyden arviointi tiedonlouhintamenetelmillä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. 138 s. + liitt.
- Sauni, M. (2024). TkT Mikko Saunin haastattelu 26.4.2024.
- SFS-EN 826 (2013, kumottu 2022). Thermal insulating products for building applications. Determination of compressive behaviour. Suomen standardisoimisliitto, Helsinki. 14 s.
- SFS-EN 12087 (1997, kumottu 2013). Lämmöneristetuotteet rakentamiskäyttöön. Vedenimukyvyn määrittäminen pitkäaikaisessa upotuksessa. Suomen standardisoimisliitto, Helsinki. 9 s.
- SFS-EN 13164 + A1 (2015). Lämmöneristetuotteet rakentamiseen. Tehdasvalmisteiset suulakepuristetut polystyreenituotteet (XPS). Suomen standardisoimisliitto, Helsinki. 93 s.
- SFS-EN 14934 (2007). Lämmöneriste- ja kevennettuotteet maa- ja vesirakentamiseen. Tehdas-valmisteiset suulakepuristetut polystyreenituotteet (XPS). Suomen standardisoimisliitto, Helsinki. 47 s.
- Siira, H. (2024). Väyläviraston asiantuntija Hannu Siiran haastattelu 13.8.2024.
- Soininen, S. (2013). Ratojen routaongelmat Suomessa. Diplomityö. Aalto-yliopisto. 93 s. + liitt.
- Suomela, S. (2019). Elinkaarinäkökulman huomioiminen infra-alan hankkeiden hankinnassa. Diplomityö. Aalto-yliopisto. 62 s. + liitt.

SYKE (2024). F-kaasut ja otsonikerrosta heikentävät aineet. Suomen ympäristökeskus. Saatavissa (viitattu 20.4.2024): <https://www.ymparisto.fi/fi/luvat-ja-veloitteet/f-kaasut-ja-otsonikerrosta-heikentavat-aineet>

Uimonen, S. (2008). Suomen infrastruktuuripääoma: Rautatiet. VATT-keskustelualoitteita 439. Helsinki. Valtion taloudellinen tutkimuskeskus.

Vinha, J. (2014). Rakennusfysiikka 1, Rakennusfysikaalinen suunnittelu ja tutkimukset. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto. 500 s.

Vinha, J., Valovirta, I., Korpi, M., Mikkilä A. ja Kivelä, P. (2005). Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikan osasto, Talonrakennustekniikan laboratorio.

Väylävirasto (2020). Tie- ja rautatieliikenteen hankearviointin yksikköarvot 2018 (päivitetty 1.4.2022). Väyläviraston ohjeita 40/2020.

Väylävirasto (2023). Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 11: Radan päällysrakenne. Väyläviraston ohjeita 23/2023.

Väylävirasto (2024a). Väylämappi-karttapalvelu. Saatavissa Väyläviraston Extranet-palvelusta.

Väylävirasto (2024b). Roudan hallintaraportti 2023. Sweco Finland Oy. Saatavissa Väyläviraston Extranet-palvelusta.

Väylävirasto (2024c). Routraeristerekisteri. Saatavissa Väyläviraston Extranet-palvelusta.

Väylävirasto (2024d). Rautatietilastot. Saatavissa (viitattu 16.8.2024): <https://vayla.fi/vaylista/aineistot/tilastot/ratatilastot>

Yan, H., Cai, D., Yao, J., Cui, Y. ja Chen, F. (2016) Engineering Test Research of XPS Insulation Structure Applied in High Speed Railway of Seasonal Frozen Soil Roadbed. Procedia engineering. Volume 143, pp. 1549–1526.

LIITE A: KOOSTE GEOMETRIAVIRHEISTÄ JA TUENTATIEDOISTA

Tampere-Pori												
ratakilometrit	vaihde	19.5.2021	23.7.2021	22.9.2021	4.5.2022	29.7.2022	28.9.2022	19.4.2023	4.8.2023	10.10.2023	tuenta- kerrat	
194+0002 194+0050	LLH V0702	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
199+0426 199+0474	KAU V0102	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2	
203+0040 203+0088	NOA V0001	0,00	5,00	4,00	4,00	4,25	0,00	3,00	6,00	0,00	3	
204+0335 204+0383	NOA V0002	4,75	6,00	6,25	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
212+0645 212+0693	SIU V0001	6,25	3,50	6,75	0,50	0,00	0,00	0,50	0,00	2,75	1	
213+0680 213+0728	SIU V0002	0,00	0,25	0,25	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2	
220+0087 220+0135	SNM V0001	1,75	1,75	3,50	4,25	0,00	1,25	1,25	1,00	1,50	2	
221+0178 221+0226	SNM V0002	1,75	0,00	1,50	2,00	2,25	2,50	5,25	2,25	0,00	1	
230+0331 230+0379	KRU V0001	0,00	0,00	0,00	2,50	0,00	2,00	5,00	2,50	0,00	1	
231+0550 231+0598	KRU V0002	2,25	2,25	1,75	2,00	3,00	3,00	2,00	4,25	4,00		
237+0407 237+0455	HNO V0001	0,50	0,25	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	3,75	1	
238+0476 238+0524	HNO V0002	1,25	0,75	2,00	1,75	0,00	1,00	1,25	1,00	1,25	3	
244+0962 245+0037	VMA V0001	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5,25	0,00	0,00		
245+0040 245+0088	VMA V0003	3,25	4,00	3,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,75		
246+0105 246+0180	VMA V0006	0,50	0,00	0,50	0,50	0,00	0,00	0,75	1,00	0,00		
246+0181 246+0225	VMA V0002	0,00	0,00	0,00	5,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00		
257+0275 257+0323	ÄS V0001	0,75	1,00	1,25	1,25	0,25	0,00	0,00	0,00	1,75	1	
258+0607 258+0655	ÄS V0002	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00	1	
270+0204 270+0251	AHV V0001	0,50	0,75	1,25	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
271+0257 271+0305	AHV V0002	0,00	0,00	0,00	0,75	0,50	0,25	0,00	0,00	0,00		
283+0430 283+0510	KKI V0001	0,00	0,00	0,00	4,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
284+0885 284+0965	KKI V0002	0,00	2,25	2,00	3,75	3,50	5,25	4,00	3,00	3,00		
295+0207 295+0292	HVA V0001	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1	
295+0284 295+0332	HVA V0003	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1	
296+0401 296+0449	HVA V0006	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1	
296+0506 296+0586	HVA V0002	0,00	4,25	3,25	3,50	3,50	4,25	0,00	0,00	0,00	1	
307+0454 307+0534	NAL V0001	0,00	0,00	0,25	1,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
308+0650 308+0730	NAL V0002	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
321+0126 321+0174	PRI V0813	0,00	1,25	0,00	0,00	2,25	1,00	1,75	2,25	2,00		

		Tampere-Seinäjoki																		tuenta- kerrat		
ratakilometrit	vaihde	8.2.2021	7.4.2021	3.5.2021	23.6.2021	12.7.2021	30.8.2021	22.11.2021	16.2.2022	26.4.2022	20.6.2022	18.8.2022	4.10.2022	21.11.2022	6.2.2023	2.5.2023	28.6.2023	24.7.2023	18.9.2023		27.11.2023	29.1.2024
193+0093 193+0198	LLH V0717	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2,75	2,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,00	2,25	2,00	0,00	0
193+1011 194+0071	LLH V0706	2,25	3,25	3,25	2,75	2,50	5,00	3,50	0,00	5,25	7,25	7,25	5,75	6,75	3,75	5,00	5,50	5,75	4,50	4,75	2,50	0
200+0097 200+0177	YLÖ V0111	1,25	3,75	1,25	5,00	5,75	5,00	4,75	4,00	4,50	3,50	5,75	4,50	5,50	4,50	2,50	4,50	5,50	4,00	4,75	3,75	1
201+0331 201+0411	YLÖ V0112	0,00	0,00	1,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	1,00	0,50	0,75	0,75	1,00	1,25	1,25	1,25	1,50	1,50	1,25	0
208+0588 208+0688	LAK V0161	0,25	0,75	5,25	2,50	1,75	2,50	2,00	2,50	2,25	1,50	3,00	3,00	4,75	3,50	2,25	2,75	3,25	2,75	3,00	2,25	1
209+0780 209+0840	LAK V0162	6,00	5,50	2,50	7,25	9,25	9,75	7,75	8,25	5,75	7,75	8,00	8,25	12,75	4,25	2,75	3,75	6,00	3,75	5,50	3,50	1
215+0690 215+0770	MJJ V0211	1,00	1,50	0,00	1,75	1,75	1,75	1,50	1,50	2,00	1,75	1,75	2,00	2,25	1,50	1,75	2,25	2,25	3,50	2,00	2,00	0
216+0866 216+0946	MJJ V0212	0,00	0,25	2,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,25	0,75	1,50	0,50	0,00	1,25	0,75	0,00	1,50	3,00	0,00	0,75	0
224+0118 224+0194	KRR V0261	1,25	2,00	5,75	2,00	2,75	4,25	3,25	1,75	2,75	2,50	4,50	5,00	5,50	4,00	2,00	3,00	4,75	4,00	5,00	3,50	0
224+0196 224+0272	KRR V0263	0,50	0,75	0,75	3,25	3,25	2,00	2,50	2,50	1,50	1,00	3,00	1,25	2,50	2,25	1,75	1,00	2,50	2,50	2,50	2,25	1
225+0338 225+0414	KRR V0264	1,25	1,50	0,25	2,50	2,75	2,00	2,00	3,00	3,00	2,00	2,25	3,00	3,50	4,00	3,00	5,00	4,25	3,75	1,25	1,75	0
225+0471 225+0547	KRR V0262	0,00	1,00	1,50	2,00	1,25	0,75	0,00	1,25	1,75	1,75	2,25	2,25	2,50	6,50	5,00	6,50	7,25	5,75	4,00	3,25	0
234+0959 235+0039	STÖ V0311	1,25	1,25	2,00	0,25	0,50	0,75	0,25	0,75	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	1,25	1,00	1,50	1,75	2,00	2,00	0
236+0167 236+0247	STÖ V0312	1,75	1,25	0,00	1,25	1,75	0,75	1,25	0,25	1,25	0,00	1,25	0,00	1,25	0,00	1,25	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	0
244+0303 244+0383	VJR V0361	0,75	1,50	2,00	3,50	5,00	5,50	2,75	0,00	3,00	5,50	6,75	5,75	5,00	2,50	2,25	3,75	6,25	4,75	5,75	2,50	1
245+0471 245+0551	VJR V0362	1,75	2,00	4,25	1,25	1,50	1,00	1,00	1,75	0,75	0,00	0,75	0,00	1,50	2,25	1,50	0,00	2,25	1,50	1,50	0,25	1
254+0117 254+0197	PKK V0001	0,50	1,00	1,75	2,00	1,75	1,75	1,75	1,75	2,25	1,75	2,00	2,75	2,75	2,50	3,00	3,25	2,00	2,00	1,25	0,50	2
255+0292 255+0372	PKK V0002	1,50	1,00	0,00	1,75	2,00	2,25	2,00	1,25	1,50	0,50	1,50	0,00	1,50	1,50	1,50	0,25	2,50	1,75	1,75	1,00	0
261+0910 261+0986	PKO V0461	1,50	2,00	2,50	0,25	0,50	0,25	2,25	1,00	1,75	0,00	2,75	2,25	1,25	1,50	4,00	4,25	2,75	3,00	4,50	2,25	3
261+0985 262+0060	PKO V0463	2,75	10,50	ei	5,75	5,25	5,25	9,00	7,50	7,75	6,00	4,75	3,50	0,00	1,25	2,00	2,75	2,75	3,75	7,75	6,50	0
263+0162 263+0242	PKO V0464	1,75	0,00	ei	6,50	7,00	7,00	3,00	7,00	8,00	3,50	4,50	3,00	3,00	2,50	3,00	4,00	4,75	4,25	3,75	2,25	1
263+0402 263+0482	PKO V0462	0,75	1,25	0,00	0,50	0,50	2,75	0,50	0,50	3,50	3,25	3,50	1,25	0,00	1,25	0,50	2,00	4,50	2,00	0,00	0,00	0
268+0158 268+0238	LMK V0511	1,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	0,75	0,00	0,00	0,00	0
269+0333 269+0413	LMK V0512	0,00	1,25	2,00	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00	0,50	0,50	0,75	0,00	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0
275+0640 275+0715	KIS V0561	0,00	0,00	3,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2
275+0718 275+0793	KIS V0563	3,25	4,75	ei	6,00	6,50	5,00	4,75	8,50	4,25	3,75	4,00	3,25	2,00	3,00	3,00	7,25	5,25	5,50	0,00	0,00	1
276+0862 276+0937	KIS V0564	1,25	3,25	1,75	2,75	3,00	1,75	2,25	1,75	3,25	1,50	3,00	1,25	2,00	0,00	1,00	2,75	1,75	1,50	0,00	0,00	2
276+0939 277+0014	KIS V0562	1,00	2,25	2,00	3,50	4,50	1,25	0,75	0,00	1,50	0,25	2,00	1,75	0,75	0,00	0,00	0,75	1,00	1,25	0,00	0,00	2
283+0665 283+0745	RLÄ V0611	1,50	1,75	9,00	2,25	1,50	1,00	0,00	0,00	2,00	0,25	0,00	0,00	0,00	1,00	1,50	1,50	1,50	1,75	2,00	1,50	1
284+0944 285+0024	RLÄ V0612	1,75	2,75	2,00	2,00	3,00	2,50	1,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,50	1,00	0,25	2,75	2,50	1,75	2,00	2,50	1,75	0
291+0131 291+0210	MD V0661	0,00	0,00	0,00	0,25	0,50	0,50	0,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50	1,00	0,50	1,25	1,50	1,50	0,75	0,50	0
291+0212 291+0287	MD V0663	0,25	0,50	ei	3,25	3,25	4,75	3,25	3,50	4,25	5,25	3,50	3,25	2,25	2,75	1,50	4,50	2,00	2,00	0,50	0,75	2
292+0355 292+0430	MD V0664	0,50	0,00	3,00	0,00	0,50	0,00	0,25	0,00	0,25	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00	2,00	2,00	2,25	2,25	6,25	2,75	0
292+0432 292+0507	MD V0662	0,00	0,25	0,25	0,25	1,00	0,75	1,50	0,75	0,75	0,00	1,25	0,00	1,00	0,50	1,50	2,50	2,25	2,25	2,00	1,75	2
301+0125 301+0205	YLV V0711	0,00	1,25	0,00	2,25	2,25	0,50	0,25	2,25	2,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1,75	0,75	2,00	3,25	1,25	0,00	0,50	0
302+0710 302+0790	YLV V0712	0,50	0,25	2,75	0,25	0,50	1,00	0,50	1,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,75	0,50	1
309+0407 309+0482	JAL V0761	0,50	1,00	3,50	2,75	2,25	1,75	1,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0
309+0485 309+0560	JAL V0763	0,50	0,50	ei	0,75	0,75	1,25	0,00	0,00	1,75	1,50	1,75	1,75	1,75	3,25	3,00	2,75	2,50	4,00	4,50	4,00	1
310+0632 310+0707	JAL V0764	2,75	4,25	4,00	2,00	3,50	4,50	4,00	3,00	2,75	2,25	0,00	0,00	2,25	3,50	2,75	2,00	4,75	3,25	1,00	0,00	3
310+0709 310+0782	JAL V0762	3,00	2,00	2,75	0,00	0,50	1,75	0,00	0,00	0,50	2,25	1,00	0,00	0,00	1,25	2,50	7,50	3,50	4,50	0,00	0,00	1
317+0810 317+0890	PSJ V0811	1,75	3,25	13,00	3,25	2,75	3,25	3,50	4,25	4,50	2,00	4,75	5,00	4,75	4,75	4,75	2,00	1,50	4,00	0,00	0,00	1
319+0074 319+0154	PSJ V0812	4,50	4,25	5,50	4,25	5,75	8,25	3,50	14,50	6,25	6,00	9,50	6,50	5,00	2,50	1,75	3,25	3,50	4,75	1,50	1,00	3
329+0300 329+0387	PLU V0871	4,00	4,50	5,75	5,75	6,25	3,50	2,50	3,75	4,75	0,25	0,75	0,75	0,00	1,00	1,50	2,25	1,75	1,25	1,25	1,25	1