



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden korkeakoulu

Suvi Soininen

Ratojen routaongelmat Suomessa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 6.5.2013

Valvoja: Professori Leena Korkiala-Tanttu

Ohjaajat: DI Jaakko Heikkilä, DI Kari-Matti Malmivaara

Tekijä Suvi Soininen

Työn nimi Ratojen routaongelmat Suomessa

Laitos Yhdyskunta- ja ympäristötekniikka

Professori Pohjarakennus ja maamekaniikka**Professuurikoodi** Rak-50

Työn valvoja Prof. Leena Korkiala-Tanttu

Työn ohjaaja(t)/Työn tarkastaja(t) DI Jaakko Heikkilä, DI Kari-Matti Malmivaara

Päivämäärä 6.5.2013**Sivumäärä** 93+4**Kieli** Suomi

Tiivistelmä

Tämän diplomityön kirjallisuusselvityksen tavoitteena oli perehtyä Suomen rataverkon routaongelmien syihin, ongelmien vaikutuksiin ja käytettyihin routakorjaustoimenpiteisiin sekä niiden valinnan perusteisiin ja kustannuksiin. Valtaosa rataverkostamme on rakennettu aikana, jolloin ratarakenteiden materiaaleille ja routasuojaukselle ei asetettu nykypäivän mukaisia vaatimuksia. Routavaurioista aiheutuvat viivästykset raideliikenteessä ovatkin olleet viime vuosina yleisiä. Radoilla routaongelmia aiheutuu kerrosroudasta, jota syntyy, kun routivaan maalajiin alkaa muodostua jäälinssettä lämpötilan laskiessa alle nollan asteen. Raiteille asetettujen tiukkojen tasaisuusvaatimusten vuoksi radoilla on merkitystä myös *in-situ routanousulla*, jota esiintyy myös routimattomissa maalajeissa. Routakorjaustoimenpiteiden suorittamiseen käytettävissä oleva rahamäärä on tiukasti rajattu, joten routavaurioiden oikeiden syiden tunnistaminen ja korjaustoimenpiteiden tapauskohtainen kohdistaminen on ensiarvoisen tärkeää. Korjaustoimenpiteiden suunnittelussa ja toteutuksessa tulee pyrkiä elinkaaritaloudellisuuteen sekä kustannustehokkuuteen.

Työn laskennallisen osion tavoitteena oli tutkia, miten ratarakenteeseen asennetun routaeristelevyn paksuus ja sijainti vaikuttavat roudan tunkeutumiseen Etelä- Suomessa Kirkkonummella ja Pohjois-Suomessa Oulussa. Laskennat suoritettiin GeoStudio 2007 – ohjelmiston ohjelmalla TEMP/W. Routalevy asennettiin laskentatapauksissa joko välittömästi tukikerroksen alle tai eristyskerroksen yläpintaan. Laskennassa käytettiin routalevypaksuuksia 40 mm, 80 mm sekä 120 mm ja mitoittavana pakkasmääränä pakkasmäärää F50. Laskentatulokset osoittivat, että kun käytettiin levypaksuuksia 40 mm ja 80 mm, routalevyn sijainti ratarakenteessa ei vaikuttanut roudan maksimisyvyyteen. Suurimmalla laskennassa käytetyllä levypaksuudella 120 mm routa tunkeutui sitä syvemmälle, mitä syvemmälle levy oli asennettu. Lisäksi mallinnusosion tavoitteena oli selvittää, miten syvä massanvaihto routalevyn alle tulee tehdä erilaisissa laskentatapauksissa, mikäli radan alusrakennekerros materiaali on routivaa. Laskennassa käytettiin routalevypaksuuksia 40 mm, 60 mm, 80 mm, 100 mm sekä 120 mm ja mitoittavina pakkasmäärinä pakkasmääriä F10, F20 ja F50. Routalevyn alle tarvittavan massanvaihdon syvyydet vaihtelivat suuresti. Ratateknisissä ohjeissa esitetty massanvaihdon minimisyvyys 300 mm oli riittävä vain osassa Kirkkonummen laskentatapauksissa. Oulun kohteessa vaadittavat massanvaihdon syvyydet olivat selkeästi Kirkkonummen kohdetta suurempia.

Avainsanat Routa, rautatie, routakorjaustoimenpide, routaeristelevy, alusrakenne, päällysrakenne, lämpömallinnus, elinkaarialyysi



Author Suvi Soinen

Title of thesis Frost-related problems on Finnish railways

Department Transportation and Environmental Engineering

Professorship Soil Mechanics and Foundation
Engineering

Code of professorship Rak-50

Thesis supervisor Professor of Practice Leena Korkiala-Tanttu

Thesis advisor(s) / Thesis examiner(s) Jaakko Heikkilä (M.Sc.), Kari-Matti Malmivaara (M.Sc.)

Date 6.5.2013

Number of pages
93+4

Language Finnish

Abstract

The objective of this study was to look into the problems caused by frost action on Finnish railways. One aim of this study was also to research the most common methods of railway track maintenance used to reduce the problems caused by frost heaving. Factors affecting the selection of maintenance methods and their costs were also examined. The majority of Finland's rail network was built before the 1950's. Back then the quality requirements for the substructure materials and frost protection were less strict. Frost action occurs in frost-susceptible soils when temperatures drop below zero and ice lenses begin to form. Frost heave may also occur in non-frost-susceptible soil. This phenomenon is referred to as *in-situ frost heave* and it must also be taken into consideration because no frost heave is allowed on main railways. Differential frost heave causes disturbance to the railway traffic in the form of speed restrictions. The funding available for track maintenance is very limited and therefore it is of great importance to identify the frost prone areas and determine the causes causing frost action. In order to make track maintenance cost-effective and sustainable the frost heave diminishing actions must be planned carefully.

Frost depth modelling was carried out with the finite element program TEMP/W. A series of calculations were done in order to determine whether the position of the insulation slab has an influence on the depth of frost penetration. The insulation slab was placed either directly beneath the layer of track ballast or on top of the frost protection layer. Varying insulation slab thicknesses and freezing indexes were used in the modelling. The calculation results showed that when the insulation thicknesses of 40 mm and 80 mm were used, there were no substantial differences in the maximum frost penetration depths. When the insulation thickness of 120 mm was used, differences occurred. The deeper the insulation was placed, the deeper the frost line penetrated. One goal of the numerical modelling was also to determine the depth of frost penetration beneath the insulation slab in case if the substructure materials were frost-susceptible. The frost-susceptible soil must be replaced with non-frost-susceptible substructure materials. Based on the numerical results obtained, it can be concluded that a greater amount of the frost susceptible soil must be replaced in Northern Finland than in Southern Finland.

Keywords Frost, railway, track maintenance method, frost insulation slab, substructure, superstructure, thermal modelling, life cycle cost analysis

Alkusanat

Tämä diplomityö tehtiin Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulun pohjarakennuksen ja maamekaniikan oppituolille. Työn tilaajana ja rahoittajana toimi Liikennevirasto ja työ suoritettiin WSP Finland Oy:ssä.

Työn valvojana toimi professori Leena Korkiala-Tanttu. Häntä haluan kiittää työn tarkastamisesta sekä arvokkaista neuvoista ja kommentteista. Työtä ohjasivat diplomi-insinöörit Jaakko Heikkilä Arcus Oy:stä ja Kari-Matti ”Ville” Malmivaara WSP Finland Oy:stä. Heitä haluan kiittää saamastani ohjauksesta ja asiantuntevasta palautteesta. Kiitokset kuuluvat myös Liikenneviraston Erkki Mäkelälle työn tilaamisesta sekä rahoituksen järjestämisestä.

Kiitoksen ansaitsevat myös työkaverini WSP Finland Oy:ssä viihtyisän työilmapiirin luomisesta sekä mielenkiinnosta työni edistymistä kohtaan.

Erityiskiitokset haluan osoittaa ystäväilleni ja läheisilleni kaikesta heiltä saamastani tuesta ja kannustuksesta opiskelujeni aikana.

Espoossa 6.5.2013

Suvi Soininen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	1
Merkinnät	3
Lyhenteet	4
1 Johdanto	5
2 Radan rakenne	7
2.1 Radan rakennekerrokset	7
2.2 Parannettavan radan rakenteen routivuusluokitus	9
3 Routa ilmiönä	10
3.1 Yleistä	10
3.2 Perinteisen routimisen mekanismi	10
3.3 Jäälinsin muodostuminen	10
3.4 In-situ routanousu	14
3.5 Maan lämpötekniset ominaisuudet	14
3.5.1 Yleistä	14
3.5.2 Lämmönjohtavuus	14
3.5.3 Lämpökapasiteetti	17
3.5.4 Olomuodonmuutoslämpö	18
3.6 Roudan rakennetyypit	19
3.7 Roudan vaikutus maan geoteknisiin ominaisuuksiin	20
3.8 Routimiskriteerit	21
3.9 Roudan syvyys	23
3.10 Lumen eristävä vaikutus	25
3.11 Routiiko maa?	26
3.11.1 Maanäytteet	26
3.11.2 Routanousukoe	26
3.11.3 Maatutkaluotaus	27
3.11.4 Routaseuranta-asemat	29
4 Routaongelmat radoilla	30
4.1 Routaongelmien yhteiskunnalliset vaikutukset	30
4.2 Ongelmien laajuus ja vakavuus	31
4.3 Kunnossapitäjien havaitsemat epätasaisuudet	33
4.4 Routaongelmien syiden analysointi	34
4.4.1 Tukikerrosmateriaalin hienoneminen	35
4.5 Ongelmien havaitseminen ja seuranta	37
4.5.1 Seuranta	37
4.5.2 Radantarkastus	37
4.5.3 Routapaikkarekisteri	40
5 Routaongelmien korjaustoimenpiteet	42
5.1 Olemassa olevien ratojen routavaurioiden korjaaminen	42
5.2 Radan kuivatuksen parantaminen	42
5.2.1 Yleistä radan kuivatuksesta	42
5.2.2 Kuivatuksen parannustoimenpiteet	44
5.3 Tukikerroksen seulonta ja vaihtaminen	46
5.4 Routaeristelevyt	46
5.5 Massanvaihto	48

5.6	Routakiilaus.....	48
5.7	Raiteen tuenta.....	49
5.8	Korjaustoimenpiteen valinta	49
6	Roudan syvyyden mallinnus laskentaohjelmalla	51
6.1	Laskentaohjelman teoria	51
6.1.1	Yleistä	51
6.1.2	Numeerinen mallinnus geotekniikassa	51
6.1.3	TEMP/W:n lämpötekniiset yhtälöt.....	52
6.2	Roudan syvyyden laskenta TEMP/W:llä	54
6.2.1	Yleistä	54
6.2.2	Laskentatapaus 1 - Routalevy asennetaan tukikerroksen alle	55
6.2.3	Laskentatapaus 2 - Routalevy asennetaan eristyskerroksen yläpintaan ...	56
6.3	Mallinnuksessa käytetyt parametrit ja laskennan kulku	56
6.3.1	Laskentaparametrien määrittäminen.....	56
6.3.2	Laskennan kulku.....	61
7	Laskennan tulokset.....	64
7.1	Routalevyn sijainnin vaikutus roudan tunkeutumiseen	64
7.2	Roudan syvyys eristämättömässä ja eristetyssä ratarakenteessa	68
7.2.1	Roudan syvyys eristämättömässä ratarakenteessa.....	68
7.2.2	Roudan syvyys Kirkkonummella eristetyssä ratarakenteessa.....	69
7.2.3	Roudan syvyys Oulussa eristetyssä ratarakenteessa.....	71
7.3	Routalevyn alle tehtävän massanvaihdon syvyys.....	73
7.4	Laskentatulosten arviointi	74
8	Routakorjausten kustannukset ja elinkaaritarkastelu	76
8.1	Elinkaariajattelu ratamaailmassa ja välilliset kustannukset	76
8.2	Elinkaaritaloutteen perustuva routaongelman korjaussuunnittelu.....	79
8.3	Tukikerroksen korjaustoimenpiteiden kustannukset	80
8.3.1	Sepelin seulonta ja vaihto	80
8.3.2	Tuenta	82
8.4	Routalevytyksen kustannukset	82
8.5	Massanvaihdon kustannukset.....	83
8.6	Kuivatuksen parantamisen kustannukset	84
8.6.1	Ojien perkaus, maaojan teko	84
9	Johtopäätökset.....	85
9.1	Ratojen routaongelmat	85
9.2	Roudan syvyyden laskenta TEMP/W:llä	86
	Lähdeluettelo	88
	Liitteet	

Merkinnät

C	lämpökapasiteetti [J/ m ³ K]
D ₁₅	rakeisuudeltaan karkeamman materiaalin (eristyskerrosmateriaali) läpäisyprosenttia 15 vastaava raekoko
F	talven pakkasmäärä [Kh]
F _{kk}	kuukauden pakkasmäärä [Kh]
GradT	osittain jäätyneen vyöhykkeen lämpötilagradientti [K/mm]
L	jäätyislämpö [J/kg]
Q	virtaama [m ² /s]
R	terminen eristävyys [Kh]
SP	segregaatiopotentiaali [mm ² /Kh]
T	absoluuttinen lämpötila [K]
T _{dj}	vuorokauden keskilämpötila päivälle j [°C]
T _f	jäätymispiste [°C]
T _{kk}	kuukauden keskilämpötila [°C]
V _i	jään ominaistilavuus [m ³ /kg]
V _w	veden ominaistilavuus [m ³ /kg]
Z	roudan syvyys [m]
c _f	jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetti [J/m ³ °C]
c _u	sulan maan tilavuuslämpökapasiteetti [J/m ³ °C]
d ₈₅	rakeisuudeltaan hienomman materiaalin (pohjamaa) läpäisyprosenttia 85 vastaava raekoko
h	lumipeitteen paksuus [m]
h _c	kapillaarinen nousukorkeus [m]
k	vedenläpäisevyyskerroin [m/s]
k	maalajista riippuva kerroin [mm/√Kh]
k _x	lämmönjohtavuuskerroin x-suuntaan [W/mK]
k _y	lämmönjohtavuuskerroin y-suuntaan [W/mK]
k _z	lämmönjohtavuuskerroin z-suuntaan [W/mK]
n	maan huokoisuus [-]
p _i	jään paine [Pa]
p _w	veden paine [Pa]
q	lämpövuoto [W/m ²]
q _g	lämmön kehittyminen [W/m ³]
t	aika [s]
t _{kk}	kuukauden pituus [h]
v	veden virtaus jäälinsin muodostumistasolle [mm/h]
w	vesipitoisuus painoprosentteina [paino-%]
w _v	vesipitoisuus tilavuusprosentteina [til-%]
λ	lämmönjohtavuus [W/mK]
λ _f	jäätyneen maan lämmönjohtavuus [W/mK]
λ _s	lumen lämmönjohtavuus [W/mK]
λ _u	sulan maan lämmönjohtavuus [W/mK]
ρ _d	sulan maan kuivairtoteheys [kg/m ³]
ρ _{df}	jäätyneen maan kuivairtoteheys [kg/m ³]
ρ _s	lumen tiheys [g/cms ³ °C]
ρ _w	veden tiheys sulassa tilassa [kg/m ³]

Lyhenteet

EMMA	Radantarkastusvaunu
EPS	Expanded polystyrene
FEM	Elementtimenetelmä (Finite Element Method)
GKPT	Geometrisen kunnan palvelutaso
GPR	Ground Penetrating Radar
InfraRYL	Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset
ISSMFE	International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering
JUSE	Junien kulun seurantajärjestelmä
MBRT	Miljoonaa bruttotonnia
RARELI	Tutkimusohjelma, Ratojen ja routaongelmien korjaustoimenpiteiden ja routasuojauksen elinkaaritaloudelliset perusteet
RATO	Ratatekniset ohjeet
RDM	Raidemetri
RHK	Ratahallintokeskus
XPS	Extruded polystyrene

1 Johdanto

Suomen rataverkon routaongelmat ovat olleet julkisuudessa korostuneesti esillä kuluneina viime vuosina. Rataverkkoa on rakennettu 1850-luvulta lähtien ja liikennöinti aloitettiin ensimmäistä kertaa vuonna 1862 Helsingin ja Hämeenlinnan välisellä rataosuudella. Olemassa olevat radat on rakennettu rakentamisen aikaisten ohjeiden mukaisesti, eivätkä esimerkiksi alusrakennepaksuudet tai -materiaalit välttämättä täytä nykypäivän routimattoman ratarakenteen vaatimuksia. Lisäksi yhteiskunnan kehittyessä ratojen nopeustasoja ja junien akselipainoja on nostettu. Ratarakenteet ja rakenteissa käytetyt materiaalit ovat myös ikääntyneet, joten ne eivät enää käyttydy suunnitellulla tavalla. Raiteen tasaisuusvaatimusten kasvaessa jatkuvasti routimisen on oltava hallinnassa.

Routiminen on monimuotoinen prosessi, johon vaikuttavat muun muassa monet maalajiominaisuudet sekä ilmastotekijät. Tässä työssä käydään läpi routimisen teoriaa sekä roudan syntyyn vaikuttavia tekijöitä. Radoilla routanousua aiheuttaa perinteisenä pidetty routiminen, jossa routivissa maalajeissa muodostuu jäälinssiä ilman lämpötilan laskiessa alle nollan asteen. Jäälinssit alkavat kasvaa, kun jäätymisvyöhykkeeseen kulkeutuu lisävettä ympäröivästä maasta. Radoilla merkitystä on myös *in-situ routanousulla*, jota tapahtuu routimattomissakin maalajeissa. *In-situ routanousussa* maamateriaalin sisältämä huokosvesi jäätyy paikalleen maapartikkeleiden välisiin tyhjätiloihin ja laajenee. Erityisesti kallioleikkauksissa routaongelmia voi aiheutua, kun kallioleikkauksen reunoille ja leikkauksen pohjalle kertyvä vesi jäätyy ja syntyy paannejäätä. Tässä työssä routimisen käsitettä on laajennettu siten, että siihen sisällytetään perinteisen routimisen lisäksi myös *in-situ routanoususta* sekä roudan sulamispehmenemisestä aiheutuvat ongelmat.

Uusia ratoja rakennetaan Suomessa suhteellisen vähän, joten olemassa olevien ratojen kunnossapidon merkitys on suuri. Radan rakennekerrosten ja pohjamaan routimisen vuoksi rataverkolle on pahimpaan routa-aikaan talvisin ja keväisin asetettava nopeusrajoituksia, jotka aiheuttavat junaliikenteelle viivästyksiä ja siten raideliikenteen imagon alenemista. Myös routakorjaustoimenpiteet aiheuttavat muutoksia raideliikenteen aikatauluihin. Raideverkon ominaispiirteenä on, ettei junaliikennettä voida siirtää korvaaville reiteille routakorjaustoimenpiteiden ajaksi, joten korjausten suorittaminen on hyvin haasteellista. Ratamaailmassa korjaustoimenpiteet on tehtävä liikenteen sallimissa työraoissa siten, että matkustajille korjauksista aiheutuva liikenteellinen haitta on mahdollisimman pieni. Eri kulkumuotojen välinen kilpailu on kovaa, joten on tärkeää, että raideliikenne koetaan läpi vuoden luotettavaksi ja houkuttelevaksi tavaksi matkustaa.

Routakorjaustoimenpiteiden suunnittelu ja toteuttaminen on haastavaa, sillä korjauksiin käytettävissä oleva rahamäärä on tiukasti rajattu. Korjauskohteet on valittava siten, että saavutetaan mahdollisimman suuri liikenteellinen hyöty mahdollisimman

kustannustehokkaasti ja elinkaaritaloudellisesti. Tässä työssä tarkastellaan erilaisia routakorjaustoimenpiteitä, niiden valinnan perusteita sekä toimenpiteiden kustannusten muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä. Työssä esitetyt routakorjaustoimenpiteiden kustannukset pohjautuvat asiantuntija-arvioon ja kustannusten suuruus perustuu vuoden 2012 markkinatilanteeseen. Routavaurioiden korjaustoimenpiteiden suunnittelua ja onnistunutta kohdentamista varten on ensiarvoisen tärkeää ymmärtää routimisen taustalla vaikuttavat mekanismit ja selvittää, aiheutuuko routiminen ongelmista radan tukikerroksessa, alusrakenteessa vai pohjamaassa. Tässä työssä käydään läpi yleisimpiä ratojen routaongelmien syitä. Lisäksi esitellään routaongelmien paikantamiseen Suomessa käytettyjä menetelmiä.

Tämän diplomityön tavoitteena on perehtyä kirjallisuusselvityksen avulla Suomen rataverkolla esiintyvien routaongelmien laajuuteen, ongelmien syihin ja yhteiskunnallisiin vaikutuksiin sekä käytettyihin routakorjaustoimenpiteisiin ja niiden valinnan perusteisiin. Lisäksi työn tavoitteena on tutkia laskennallisesti, miten ratarakenteeseen asennettavan routalevyn paksuus ja sijainti rakenteessa vaikuttavat roudan tunkeutumiseen erilaisissa laskentatapauksissa. Saatuja laskentatuloksia verrataan Ratateknisten ohjeiden (RATO) osan 3 ”Radan rakenne” mukaiseen routalevymitoitukseen. Työn yhtenä tavoitteena on myös tutkia, miten syvä massanvaihto routalevyn alle tarvitaan, kun radan alusrakenne on routivaa materiaalia. RATO 3:ssa on määritetty, että routalevyn alla olevan luonnonmateriaaleista tehdyn routimattoman alusrakennekerroksen vähimmäispaksuus on 300 mm. Tässä työssä saatuja laskentatuloksia verrataan routimattoman kerroksen vähimmäispaksuuden arvoon ja selvitetään, onko paksuuden ohjearvo riittävä tarkasteluun valituissa laskentatapauksissa.

Tässä työssä roudan syvyyden laskenta tehdään GeoStudio 2007 –ohjelmiston lämpömallinnusohjelmalla TEMP/W. Mallinnus on rajattu koskemaan kahta esimerkkiratapengertä, joista toisen oletetaan sijaitsevan Etelä-Suomessa Kirkkonummella ja toisen Pohjois-Suomessa Oulussa. Radan rakennekerros materiaalien ja pohjamaan oletetaan olevan molemmissa kohteissa samaa maa-ainesta.

Mallinnusosiossa tarkastellaan kahta erilaista laskentatapausta:

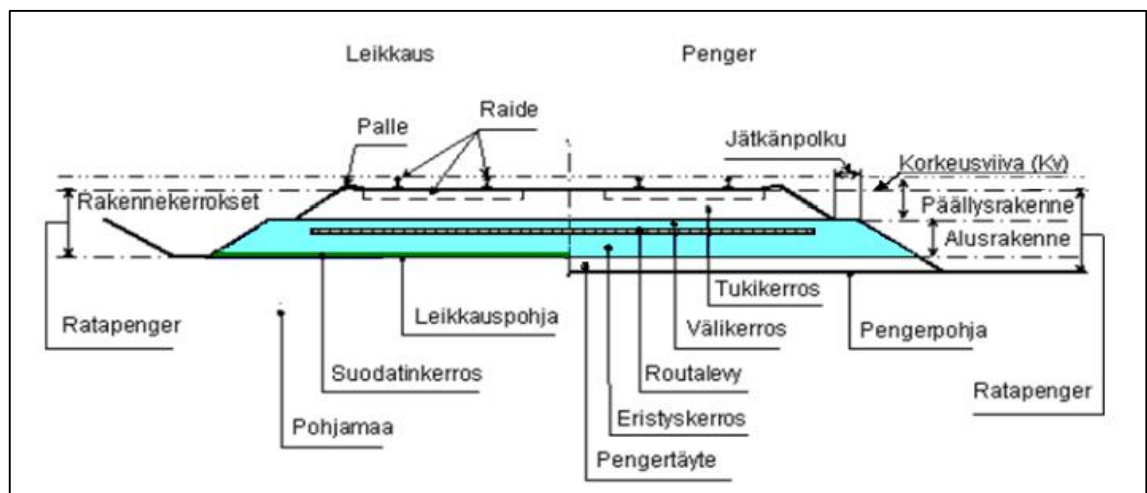
1. Routalevy (40 mm, 60 mm, 80 mm, 100 mm, 120 mm) asennetaan tukikerroksen alapuolelle
2. Routalevy (40 mm, 80 mm, 120 mm) asennetaan eristyskerroksen pintaan

Mallinnuksessa käytetyt mitoittavat pakkasmäärät on rajattu siten, että laskentatapauksessa 1 pakkasmäärinä käytetään pakkasmääriä F10, F20 ja F50 ja laskentatapauksessa 2 mitoittavana pakkasmääränä käytetään pakkasmäärää F50.

2 Radan rakenne

2.1 Radan rakennekerrokset

Radan rakennekerrokset koostuvat päällys- ja alusrakenteesta. Radan rakenneosat on esitetty kuvassa 2.1. Ratapenkereeseen kuuluvat rakennekerrokset sekä mahdollinen pengertäyte. Päällysrakenne koostuu raiteesta ja tukikerroksesta. Alusrakenteeksi puolestaan kutsutaan tukikerroksen ja pohjamaan välisiä rakennekerroksia, joita ovat välikerros, eristyskerros sekä mahdollinen suodatinkerros. Alusrakenteeseen kuuluvat myös routasuojauksena käytetyt eristelevyt. Alusrakenteen käyttöikävaatimus on rakennekerrosten osalta 100 vuotta ja routalevyjen osalta 40 vuotta. Tukikerros mitoitetaan 40 vuoden käyttöikävaatimukselle. (Ratahallintokeskus 2008.)



Kuva 2.1. Radan rakennekerrokset (Ratahallintokeskus 2008).

Tukikerros sijaitsee heti ratakiskojen alapuolella, ratapölkkyjen alla ja ympärillä. Tukikerroksen tehtävänä on pitää raide geometrisesti oikeassa asemassa ja asennossa sekä tarjota raiteelle riittävä sivu- ja pituussuuntainen tuki. Lisäksi tukikerros jakaa toistuvasta liikennekuormituksesta aiheutuvat kuormat alusrakenteelle, vaimentaa liikennöinnistä syntyvää melua, runkomelua ja tärinää sekä muodostaa raiteelle suunnitelman mukaisen tasaisen, kantavan ja muokattavan alustan. Tukikerrosmateriaalina käytetään Suomessa pääsääntöisesti raidesepeliä. Vanhoilla vähäliikenteisillä radoilla tukikerrosmateriaalina on käytetty myös raidesoraa. Tukikerroksen paksuus on tavallisimmin 450–550 millimetriä. (Ratahallintokeskus 2008, Nurmikolu 2011b.)

Tukikerroksen alla oleva välikerros muodostaa tukikerrokselle tasaisen, kantavan ja vettäläpäisevän alustan. Kerroksen tehtävänä on myös estää tukikerrosmateriaalin sekoittumista alla oleviin rakennekerroksiin ja ehkäistä routimisesta aiheutuvia haittoja. Välikerrosmateriaaleina käytetään routimatonta soraa, hiekkaa tai mursketta. Jos välikerroksen alla oleva eristyskerros rakennetaan murskeesta, molemmat kerrokset tehdään samanaikaisesti ja samasta materiaalista. (Ratahallintokeskus 2008, Kolisoja 2011.)

Eristyskerros estää tai vähentää sen alapuolella olevien kerrosten routimista sekä muodostaa välikerrokselle tasaisen ja kantavan alustan. Lisäksi eristyskerros siirtää ja jakaa kuormia maa- tai kalliopohjalle sekä pysäyttää kapillaarisen vedennousun. Eristyskerrosmateriaaleina käytetään routimatonta hiekkaa, soraa tai kalliomurskettä. Jos eristyskerros rakennetaan murskeesta, kerros on yhdistettävä välikerrokseen ja rakennettava samasta materiaalista. (Ratahallintokeskus 2008, Kolisoja 2011.)

Suodatinkerrosta käytetään tarvittaessa leikkauspohjalla estämään rakennekerrosten ja pohjamaan sekoittuminen. Lisäksi suodatinkerros estää tai pienentää yhdessä muiden rakennekerrosten kanssa alla olevien maakerrosten routimisesta aiheutuvia haitallisia muodonmuutoksia radassa. Suodatinkerros rakennetaan hiekasta, murskeesta tai suodatinkankaasta. Suodatinkerroksen tarve määräytyy raekokosuhteeseen perustuvalla suodatinkriteerillä (kaava 2-1), joka arvioi päällekkäisten materiaalien raekokosuhdetta. Suodatinkerros tarvitaan ratarakenteeseen, jos kriteerin ehto ei täyty. (Ratahallintokeskus 2008, Kalliainen et al. 2011, Kolisoja 2011.)

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 5 \quad (2-1)$$

jossa D_{15} on rakeisuudeltaan karkeamman materiaalin (eristyskerrosmateriaali) läpäisyprosenttia 15 vastaava raekoko
 d_{85} on rakeisuudeltaan hienomman materiaalin (pohjamaa) läpäisyprosenttia 85 vastaava raekoko

Olemassa olevaan ratarakenteeseen voidaan rakentaa routaeristys suulakepuristetusta routalevyistä. Olemassa olevien ratojen routakorjauksissa routalevyt lisätään asennustavasta riippuen eristyskerroksen pintaan tai väli- ja tukikerroksen väliin. Uusi rata perustetaan ensisijaisesti roudattomaan syvyyteen ja routalevyjen käyttö edellyttää tällöin aina Liikenneviraston lupaa. (Ratahallintokeskus 2008.)

Pengertäyte rakennetaan pohjamaan ja eristyskerroksen väliin. Täytteen tehtävänä on tasoittaa maanpinnan korkeusvaihteluita siten, että radan ylemmät rakennekerrokset voidaan rakentaa pengertäytteen päälle. Rakennekerroksille tulee tarjota tasalaatuinen ja ominaisuuksiltaan luonnonmaapohjaa vastaava alusta. Penger voidaan rakentaa maapenkereenä hiekasta tai hiekkaa karkeammista kivennäismaa-aineksista, näitä vastaavista moreenimaalajeista tai pienlouheesta. Louhepenger tehdään alle 300 millimetrin pienlouheesta yläpuolisen rakennekerrosmateriaalin lajittumisen ehkäisemiseksi ja penkereen tiiviyyden varmistamiseksi. Ratapenkereissä voidaan käyttää kevytsoraa routaeristeenä ja kevennyksenä. Kevytsoraa ei kuitenkaan saa käyttää kohteissa, joissa se voi jäädä jatkuvasti pohjaveden pinnan alapuolelle, sillä kevytsora on vettä kevyempää ja siten kelluu vedessä. (InfraRYL 2010, Kolisoja 2011.)

2.2 Parannettavan radan rakenteen routivuusluokitus

Ratateknisten ohjeiden osassa 3 ”Radan rakenne” esitetään parannettavan radan rakenteen jako routimattomaksi, harvoin routivaksi tai routivaksi taulukon 2.1 mukaisesti. Kun pohjamaa on routiva, parannettavan radan routivuus määritetään selvittämällä, kuinka paljon radan routimattomien rakennekerrosten paksuus eroaa liitteen 1 kuvan mukaisista routimattoman radan rakennepaksuuksista. Radat jaetaan henkilöliikenteen tai tavaraliikenteen suurimman sallitun nopeuden mukaan viiteen eri alusrakenneluokkaan. Alusrakenneluokan 1 radoilla routimattomien rakennekerrosten kokonaispaksuus saa olla 0,2 m ja alusrakenneluokan 0 radoilla 0,6 m liitteen 1 kuvassa esitettyjä arvoja pienempi.

Taulukko 2.1. Olemassa olevan radan rakenteen luokittelu routivuuden mukaan pohjamaan ollessa routiva (Ratahallintokeskus 2008).

Rakenteen routivuus	Liitteen 1 kuvan mukaisen routimattoman radan rakennepaksuuden ja parannettavan radan rakennepaksuuden erotus [m]
Routiva	> 0,2
Harvoin routiva	≤ 0,2
Routimaton	Rakennepaksuus liitteen 1 kuvan mukainen

Taulukossa 2.2 on esitetty radan alusrakenneluokkaan perustuva routaeristetyn radan routamitoituksessa käytettävän mitoituspakkasmäärän toistumisjakson valinta. Kun rakenne on routimaton, routanoususta ei oleteta aiheutuvan vaurioita taulukon 2.2 mukaisia toistumisjaksoja vastaavilla mitoituspakkasmäärillä. Jos rakenne on harvoin routiva, voidaan olettaa, että routimisesta aiheutuu todennäköisesti haittoja joinakin vuosina taulukon 2.2 mukaisia toistumisjaksoja vastaavilla mitoituspakkasmäärillä. Routivilla rakenteilla routanoususta aiheutuu haittoja toistuvasti. (Ratahallintokeskus 2008.)

Taulukko 2.2. Olemassa olevan radan rakenteen luokittelu routivuuden mukaan pohjamaan ollessa routiva (Ratahallintokeskus 2008).

Radan alusrakenneluokka	Mitoituspakkasmäärän toistumisjakso [vuotta]	
	Ratalinja	Vaihdealue
0	5	20
1	20	50
2	50	50
3	50	50
4	50	50

3 Routa ilmiönä

3.1 Yleistä

Kun maalaji on routiva, lämpötila laskee alle nollan asteen ja maaperässä on riittävästi vettä, maahan alkaa muodostua jäälinsskejä. Tässä työssä jäälinssien muodostumisesta aiheutuvaa routimista kutsutaan perinteiseksi routimiseksi. Routimattomissakin maalajeissa voi esiintyä routanousua, kun maa on täysin tai osittain vedellä kyllästetty ja huokosvesi jäätyy maapartikkeleiden ympärille. Rataympäristössä myös routimattoman maamateriaalin sisältämän huokosveden jäätymisestä aiheutuvalla routanousulla on merkitystä.

3.2 Perinteisen routimisen mekanismi

Maassa alkaa tapahtua routaantumista maan huokosveden jäätyessä. Huokosvesi on maa-aineksen raepinnoille sitoutunutta vaippavettä, kapillaarivoimien alaista kapillaarivettä tai vapaata huokosvettä. Normaalipaineessa puhdas vesi jäätyy 0 °C:n lämpötilassa, mutta käytännössä vesi jäätyy aina hieman alemmassa lämpötilassa. Esimerkiksi maapartikkeleiden pinnoille sitoutuneen adsorptioveden jäätymlämpötila on selvästi alle 0 °C. Jäätympiste on sitä alhaisempi, mitä epäpuhtaampaa huokosvesi on ja mitä hienorakeisemmasta maalajista on kyse. Kun sulasta maasta jäätymisvyöhykkeeseen kulkeva vesi jäätyy, maan tilavuus ja vesipitoisuus kasvavat, minkä seurauksena routavyöhykkeen yläpuolinen maanpinta alkaa nousta. Jäätyneen maakerroksen paksuutta kutsutaan roudan syvyydeksi ja kerroksen alarajaa routarajaksi. Vastaavasti roudan sulaessa tapahtuu sulamispehmenemistä ja maanpinta laskeutuu. (Saarelainen 1990.)

Maan routaantumisen tai sulamisesta seuraavia haitallisia ilmiöitä, kuten maan pinnan liikkumista tai maan fysikaalisten ominaisuuksien muuttumista kutsutaan routimiseksi. Routaantuminen ei aiheuta maarakenteille ongelmia, ellei pohjamaa roudi. Routiminen aiheuttaa routanousun esteenä oleviin rakenteisiin kohdistuvan voimavaikutuksen tai jännityksen, jota kutsutaan routavoimaksi tai -paineeksi. (Saarelainen 1990.)

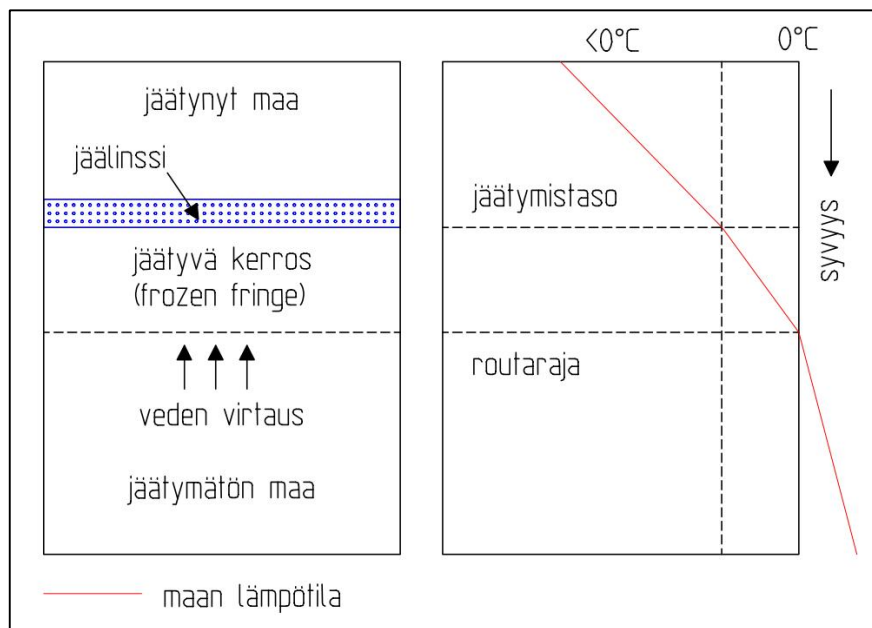
Maan routivuuden ja routanousun neljä perusedellytystä ovat:

- maalaji on routiva
- routivan maan lämpötila laskee alle 0 °C
- vettä on riittävästi saatavilla jäälinssin muodostumispaikalle
- routapaine ylittää yläpuolisten maakerrosten ja rakenteiden aiheuttaman kuormituksen

3.3 Jäälinssin muodostuminen

Routimisilmiössä tapahtuvasta veden imusta jäätymisvyöhykkeeseen on kirjallisuudessa esitetty useita erilaisia teorioita. Nykyisin yleisesti vallalla oleva käsitys veden virtauksesta jäätyneessä maassa perustuu osittain jäätyneen kerroksen (frozen fringe)

olemassaoloon likimäärin 0 °C isotermiä vastaavan routarajan ja hieman sen kylmemmällä puolella olevan jäälinssin muodostumistason välillä. Periaatteellisessa kuvassa 3.1 on esitetty jäätyvän kerroksen olemassaolo jäätyneen ja jäätyvätön maan välissä. Jäätyvän kerroksen maapartikkeleita ympäröi jäätyvätön vesi ja kerroksen paksuus voi vaihdella alle millimetristä muutamiin senttimetreihin. Routimiskerroksessa vesi virtaa lämpötilagradienttia vastaavan vedenpainegradientin kuljettama kohti jäälinssiä. Vedenpainegradientin suuruus määräytyy maalajien ominaisuuksien perusteella ja paine on suurempi hienorakeisissa maalajeissa. Veden kulku pysähtyy jääkerrokseen ja kerroksen takana veden virtaus on lähes olematonta. (Saarelainen 1990, Nurmikolu 2004.)



Kuva 3.1. Segregaatiopotentiaaliteorian mukainen osittain jäätynyt vyöhyke (muokattu lähteestä Woo 2012).

Segregaatiopotentiaaliteorian mukaan jäälinssi alkaa muodostua jäätymisvyöhykkeen yläpuolella, kun vyöhykkeen yläreuna saavuttaa segregaatiolämpötilan. Jäälinssi ei enää kasva, kun jäätymisvyöhykkeen yläpuolinen paine kasvaa suuremmaksi kuin vettä kuljettava vedenpainegradientti, eikä vettä enää kulkeudu jäälinssiin. Teorian perusoletuksena on, että veden virtausnopeus (v) routarajalle jäälinssin kasvuprosessin aikana ja jäätymisvyöhykkeen lämpötilagradientti ($\text{Grad}T$) ovat suoraan verrannollisia kaavan (3-1) mukaisesti. Verrannollisuuskerrointa SP kutsutaan segregaatiopotentiaaliksi ja se kuvaa maalajin voimakkuutta routia. (Ehrola 1996, Nurmikolu 2006.)

$$SP = \frac{v}{\text{Grad}T} \quad (3-1)$$

jossa SP on segregaatiopotentiaali [mm^2/Kh]
 v on veden virtaus jäälinssin muodostumistasolle [mm/h]

GradT on osittain jäätyneen vyöhykkeen lämpötilagradientti [K/mm]

Segregaatiopotentiaalin käsitteeseen viittaa routimiskerroin (SP), joka lasketaan routanousunopeuden ja jäätyneen näyteosan lämpötilagradientin suhteena. Routimiskerroin lasketaan samalla yhtälöllä kuin segregaatiopotentiaali, mutta kaavan muuttujien määritelmät ovat erilaiset. Routimiskerrointa määritettäessä SP on routimiskerroin, v on routanousunopeus ja GradT jäätyneen näyteosan keskimääräinen lämpötilagradientti. Routimiskerroin huomioi segregaatiopotentiaalista poiketen veden jäätymisessä tapahtuvan 9 %:n tilavuudenkasvun. (Nurmikolu 2006.)

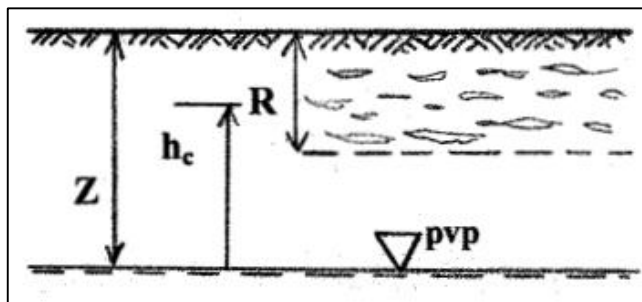
Huokosveden imua jäätymistasossa voidaan arvioida Clausius-Claypeyronin yhtälöllä (kaava 3-2). Yhtälö perustuu olomuotojen väliseen termodynaamiseen tasapainotilaan, joka vallitsee silloin, kun jään vapaa energia on yhtä suuri kuin veden vapaa energia. Yhtälön paikkansa pitävyys on todistettu kokeellisesti muun muassa kapillaariputkikokeella, vedenpainemittauksin alle 0 °C:n lämpötiloissa sekä routapainemittauksin laboratoriossa. Vapaan energian tasapainotarkastelun mukaan osittain jäätyneeseen kerrokseen muodostuu alipaine, jonka vaikutuksesta jäälinsin muodostumisvyöhykkeeseen imeytyy lisävettä alapuolisista sulista maakerroksista. Lämpötilan laskiessa alipaineen suuruus kasvaa vyöhykkeen yläreunaa kohti. (Saarelainen 1990, Nurmikolu 2004.)

$$V_w \cdot dp_w - V_i \cdot dp_i = \frac{L}{T} dT \quad (3-2)$$

jossa V_w on veden ominaistilavuus [m³/kg]
 p_w on veden paine [Pa]
 V_i on jään ominaistilavuus [m³/kg]
 p_i on jään paine [Pa]
 L on jäätymislämpö [J/kg]
 T on absoluuttinen lämpötila [K]

Saksasta lähtöisin oleva ns. freibergiläinen kriteeri (kuva 3.2 ja kaava 3-3) ei ole ollut Suomessa käytössä, mutta kriteeri kuvaa hyvin maalajin vedenläpäisevyyden ja kapillaarisen nousukorkeuden vaikutusta maalajin routivuuteen. Kaavassa (3-3) vedenläpäisevyyškertoimella k kerrotaan koko lauseke, joten maa-aineksen kapillaarivirtaama riippuu suoraviivaisesti vedenläpäisevyydestä. Vedenläpäisevyys taas on kytköksissä raekoon neliöön, joten raekoon pienentyessä esimerkiksi kymmenesosaan, vedenläpäisevyys pienenee sadasosaan alkuperäisestä. Kapillaarinen nousukorkeus on kääntäen verrannollinen raekokoon, joten vastaavasti h_c kasvaa kymmenkertaiseksi. Kaavasta (3-3) voidaan kuitenkin päätellä, että virtaama pienenee. Havainto selittää sen, että vaikka savella on maalajeista suurin kapillaarinen nousukorkeus, siinä ei kuitenkaan esiinny voimakkaimpia routanousuja. Savessa veden virtaus jäätymisvyöhykkeeseen on hidasta, joten muodostuvat jäälinsit jäävät usein

ohuiksi. Kuvasta 3.3 nähdään, että karkearakeisten maalajien, kuten hiekan vedenläpäisevyys on suuri, mutta imuvoima jäätymisvyöhykkeessä puolestaan on hyvin pieni. Kaavan (3-3) mukaisesti karkearakeisissa maalajeissa pohjavedenpinnasta ylöspäin jäätymisvyöhykkeeseen nouseva virtaama on pieni ja kuvasta 3.3 nähdään, että myös virtausnopeus on alhainen. Karkearakeisissa maalajeissa routanousut jäävätkin hienorakeisia maalajeja pienemmiksi. Kuvassa 3-3 saven ja hiekan väliin jää siltti, jossa vedenläpäisevyys on savea parempi ja imuvoima jäätymisvyöhykkeessä puolestaan suurempi kuin hiekassa. Siltissä veden virtausnopeus jäätymisvyöhykkeeseen onkin maalajeista suurin ja siten silttimaalajit ovat usein voimakkaasti routivia. (Jääskeläinen 2009.)

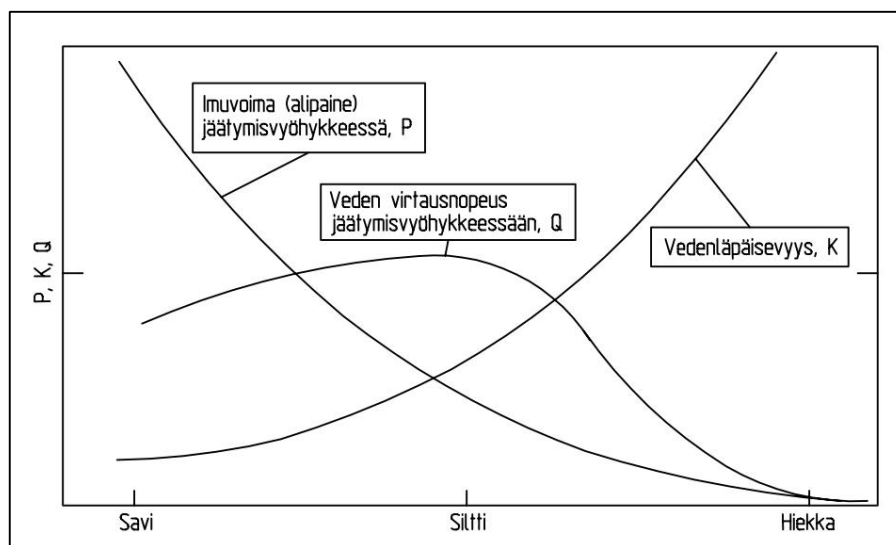


Kuva 3.2. Freibergiläinen kriteeri (Jääskeläinen 2009).

$$Q = k \cdot \frac{h_c - (Z - R)}{(Z - R)} \quad (3-3)$$

jossa

- Q on virtaama [m²/s]
- k on vedenläpäisevyyskerroin [m/s]
- h_c on kapillaarinen nousukorkeus [m]
- R on roudan syvyys [m]
- Z on pohjavedenpinnan etäisyys maanpinnasta [m]



Kuva 3.3. Maalajiominaisuuksien vaikutus veden virtausnopeuteen jäätymisvyöhykkeessä (Ehrola 1996).

3.4 In-situ routanousu

Mikäli maa on vedellä kyllästetty tai lähes kyllästetty, myös routimattomissa maalajeissa saattaa esiintyä routanousua, sillä vesi laajenee jäätyessään noin 9 %. Maassa olevan huokosveden jäätymisestä aiheutuvaa routimista kutsutaan *in-situ routanousuksi* ja sen syntymisen edellytyksenä on, ettei vesi jäätymislaajenemisen seurauksena enää mahdu alkuperäiseen huokostilaan, eikä pääse poistumaan suljetussa tilassa sivuille tai alaspäin. *In-situ routanousun* merkitys perinteisen routimisen aiheuttamaan routanousuun verrattuna on vähäinen, mutta ratarakenteissa vaikutus on otettava huomioon. Lähtökohtaisesti oletetaan, että ratarakenteen kerrosmateriaalit eivät ole kyllästetyssä tilassa ja että kuivatus toimii asianmukaisesti. Kuitenkin käytännössä on huomattu, että rataverkolla on kuivatusongelmia monin paikoin. 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. Lisäksi raiteelle asetettujen suurten tasaisuusvaatimusten vuoksi pienelläkin routanousulla on merkitystä. (Nurmikolu 2006.)

3.5 Maan lämpötekniset ominaisuudet

3.5.1 Yleistä

Maan routaantumiseen vaikuttavia lämpötekniisiä ominaisuuksia ovat sulan ja jäätyneen maan lämmönjohtavuus, sulan ja jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetti sekä olomuodonmuutoslämpö. (Saarelainen 1990.)

3.5.2 Lämmönjohtavuus

Maan lämmönjohtavuus kuvaa maa-aineksen kykyä johtaa lämpöä. Maan lämmönjohtavuuteen vaikuttavat useat eri tekijät, kuten maa-aineksen tiheys, lämpötila, huokoisuus ja vesipitoisuus. Lämpö voi siirtyä osittain veden ja jään kyllästämässä maassa johtumalla, säteilemällä tai konvektiivisesti eli kuljettumalla väliaineen mukana. Lämmönsiirtoa tapahtuu aina, kun maassa on paikallisia lämpötilaeroja. Maamateriaaleissa lämmön pääasiallinen kuljetusmekanismi on johtuminen, mutta hyvin karkearakeisissa maalajeissa, kuten sorassa lämmön siirtyminen konvektion avulla voi olla merkittävää. Sulan ja jäätyneen maamateriaalin lämmönjohtavuuden määrittämiseksi on kehitetty useita erilaisia empiirisiä yhtälöitä ja mitoituskäyrästäjä. Ehkä tunnetuimmat kokemuseräiset yhtälöt ovat Kerstenin (1949) yhtälö ja siihen perustuva Johansenin (1975) yhtälö. Maa-aineksen lämmönjohtavuus voidaan määrittää myös laboratorio- tai kenttämittauksin esimerkiksi lämpösauvamenetelmällä. (Saarelainen 1990, Andersland ja Ladanyi 2004.)

Lämpösauvamenetelmä perustuu lyhytaikaisen lämmönjohtumisen mittaukseen. Menetelmässä asennetaan lämpötilan mittausturilla varustettu lämmönjohtosondi näytteeseen tai maahan tehtyyn reikään. Lämmönjohtosondi on mittauksen aikana lineaarinen lämpölähte tutkittavassa näytteessä. Mittaus aloitetaan kytkemällä sondin lämmitysvastuksen kaapelit virtalähteeseen ja lämpötila-anturin johtimet

lämpötilamittariin. Lämpötila-anturilla seurataan lämmityksen seurauksena näytteessä syntyvää lämpötilan nousua ajan suhteen. Lämpötila nousee maan johtavuuden ja lämpökapasiteetin mukaisissa suhteissa. Maan lämmönjohtavuus saadaan määritettyä vastuskaapeliin johdetun vakioitehon sekä mittauksessa saadun lämpenemiskäyrän avulla. (Saare ja Wenner 1957, Kivikoski et al. 2001.)

Laskennallisesti sulan ja jäätyneen hienorakeisen ja karkearakeisen maamateriaalin lämmönjohtavuudet saadaan esimerkiksi käyttämällä Kerstenin kokemuseräisiä kaavoja tai mitoituskäyrästäjä. Lähtöarvoina on tunnettava maa-aineksen kuivairtitiheys sekä vesipitoisuus. Yhtälöt eivät kuitenkaan huomioi jäätyneen maamateriaalin jäätyneen veden määrää, eivätkä materiaalin kvartsipitoisuutta. Kvartsin lämmönjohtavuus on 3-4 kertaa suurempi kuin muiden tavallisten maamineraalien, joten kvartsipitoisuudella on huomattava merkitys maan kokonaislämmönjohtavuuteen. Kerstenin suorittamat laboratoriomittaukset osoittivat, että yhtälöillä saadut arvot voivat poiketa todellisista maa-aineksen lämmönjohtavuuden arvoista enintään $\pm 25\%$. Hienorakeisten maalajien sulan ja jäätyneen maan lämmönjohtavuudet saadaan Kerstenin kaavoilla (3-4) ja (3-5). (Andersland ja Ladanyi 2004, Doré ja Zubeck 2009.)

$$\lambda_u = (0,13 \cdot \log w - 0,029) \cdot 10^{0,6243 \cdot \rho_d} \quad (3-4)$$

$$\lambda_f = 0,00144 \cdot 10^{1,373 \cdot \rho_d} + 0,01226 \cdot w \cdot 10^{0,499 \cdot \rho_d} \quad (3-5)$$

Karkearakeisten maalajien sulan ja jäätyneen maan lämmönjohtavuudet voidaan laskea Kerstenin kaavoilla (3-6) ja (3-7).

$$\lambda_u = (0,10 \cdot \log w + 0,058) \cdot 10^{0,6243 \cdot \rho_d} \quad (3-6)$$

$$\lambda_f = 0,01096 \cdot 10^{0,8116 \cdot \rho_d} + 0,00461 \cdot w \cdot 10^{0,9115 \cdot \rho_d} \quad (3-7)$$

joissa λ_u on sulan maan lämmönjohtavuus [W/mK]
 λ_f on jäätyneen maan lämmönjohtavuus [W/mK]
 w on maan vesipitoisuus [paino-%]
 ρ_d on maan kuivairtitiheys [g/cm³]

Kerstenin yhtälöihin perustuva Johansenin malli maamateriaalin lämmönjohtavuuden määrittämiseksi on esitetty alla (kaava 3-8). Yhtälöä voidaan käyttää sekä hieno- että karkearakeisten maalajien sulan ja jäätyneen tilan lämmönjohtavuuden määrittämiseen. (Andersland ja Ladanyi 2004.)

$$\lambda = (\lambda_{\text{sat}} - \lambda_{\text{dry}}) \cdot K_e + \lambda_{\text{dry}} \quad (3-8)$$

jossa λ on maan lämmönjohtavuus [W/mK]
 λ_{sat} on veden kyllästämän maan lämmönjohtavuus [W/mK]
 λ_{dry} on kuivan maan lämmönjohtavuus [W/mK]
 K_e on ns. Kerstenin luku [-]

Kerstenin luku K_e määritetään karkearakeisille maalajeille kaavalla (3-9) ja hienorakeisille maalajeille kaavalla (3-10).

$$K_e = 0,7 \cdot \log \cdot S_r + 1,0 \quad (3-9)$$

$$K_e = \log \cdot S_r + 1,0 \quad (3-10)$$

Kaavoissa (3-9) ja (3-10) esiintyvä S_r on normalisoitu vesipitoisuus:

$$S_r = \frac{w}{w_s} \quad (3-11)$$

jossa w on maan vesipitoisuus [paino-%]
 w_s on vesipitoisuus veden kyllästävässä maassa [paino-%]

Johansenin malli määrittää kyllästetyn sulan maan lämmönjohtavuuden geometriseen keskiarvoon perustuen kaavalla (3-12).

$$\lambda_{\text{sat}} = \lambda_s^{1-n} \cdot \lambda_w^n \quad (3-12)$$

jossa λ_{sat} on kyllästetyn maan lämmönjohtavuus [W/mK]
 λ_s on maapartikkeleiden lämmönjohtavuus [W/mK]
 λ_w on veden lämmönjohtavuus [W/mK]
 n on maan huokoisuus [-]

Kyllästetyn jäätyneen maan lämmönjohtavuus voidaan laskea kaavalla (3-13).

$$\lambda_{\text{sat}} = \lambda_s^{1-n} \cdot \lambda_i^{n-w_u} \cdot \lambda_w^{w_u} \quad (3-13)$$

jossa λ_{sat} on kyllästetyn maan lämmönjohtavuus [W/mK]
 λ_s on maapartikkeleiden lämmönjohtavuus [W/mK]
 λ_i on jään lämmönjohtavuus [W/mK]
 λ_w on veden lämmönjohtavuus [W/mK]
 n on maan huokoisuus [-]
 w_u on jäätymättömän veden määrä [paino-%]

Maapartikkeleiden lämmönjohtavuutta λ_s voidaan arvioida kvartsin lämmönjohtavuuden λ_k sekä muiden maapartikkeleiden lämmönjohtavuuden λ_0

geometrisena keskiarvona (kaava 3-14). Kaavassa k on kvartsin osuus maan kiintoaineksesta. Kvartsin lämmönjohtavuutena käytetään arvoa $7,7 \text{ W/mK}$. Maapartikkeleiden lämmönjohtavuutena käytetään arvoa $2,0 \text{ W/mK}$, kun kvartsin osuus on yli 20% . Kun kvartsipitoisuus on alle 20% , maapartikkeleiden lämmönjohtavuutena käytetään arvoa $3,0 \text{ W/mK}$. (Andersland ja Ladanyi 2004.)

$$\lambda_s = \lambda_0^{1-k} \cdot \lambda_k^k \quad (3-14)$$

Johansenin malli ilmaisee kuivan maan lämmönjohtavuuden osin empiirisen kaavan (3-15) mukaisesti.

$$\lambda_{\text{dry}} = \frac{0,135 \cdot \rho_d + 64,7}{2,70 - 0,947 \cdot \rho_d} \pm 20\% \quad (3-15)$$

jossa λ_{dry} on kuivan maan lämmönjohtavuus [W/mK]
 ρ_d on maan kuivairtitiheys [g/cm^3]

3.5.3 Lämpökapasiteetti

Maan lämpökapasiteetti tarkoittaa lämpö määrää, joka tarvitaan nostamaan maa-aineksen massa- tai tilavuusyksikön lämpötilaa yhden asteen verran tai vastaavasti lämpö määrää, joka vapautuu vastaavan ainemäärän lämpötilan laskiessa yhdellä asteella. Ominaislämpökapasiteetilla tarkoitetaan ainesosan lämpökapasiteettia massayksikköä kohti laskettuna. Tilavuuslämpökapasiteetilla tarkoitetaan lämpö määrää, joka tarvitaan muuttamaan maa-aineksen lämpötilaa yksikön verran tilavuusyksikköä kohti. Maan lämpökapasiteetti on maan ainesosien summa (kaava 3-16). (Saarelainen 1990.)

$$C = \rho_d \cdot c_m + n_w \cdot \rho_w \cdot c_w + n_j \cdot \rho_j \cdot c_j + n_i \cdot \rho_i \cdot c_i \quad (3-16)$$

jossa C on maan tilavuuslämpökapasiteetti [$\text{Wh/m}^3\text{K}$]
 ρ_d on maan kuivairtitiheys [kg/m^3]
 c_m on mineraaliaineiden ominaislämpökapasiteetti [Wh/kgK]
 $n_w \cdot \rho_w$ on maan vesipitoisuus paino-osina [kg/m^3]
 c_w on veden ominaislämpökapasiteetti [Wh/kgK]
 $n_j \cdot \rho_j$ on maan jääpitoisuus paino-osina [kg/m^3]
 c_j on jään ominaislämpökapasiteetti [Wh/kgK]
 $n_i \cdot \rho_i$ on maan ilmapitoisuus paino-osina [kg/m^3]
 c_i on ilman ominaislämpökapasiteetti [Wh/kgK]

Sulan ja jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetit saadaan kaavoilla (3-17) ja (3-18).

$$C_u = \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot \left(0,18 + 1,0 \cdot \frac{w}{100} \right) \cdot c_w \quad (3-17)$$

$$C_f = \frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot \left(0,18 + 0,5 \cdot \frac{w}{100} \right) \cdot C_w \quad (3-18)$$

joissa C_u on sulan maan tilavuuslämpökapasiteetti [Wh/m³K]
 C_f on jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetti [Wh/m³K]
 ρ_d on maan kuivairtitiheys [kg/m³]
 ρ_w on veden tiheys, 1000 kg/m³
 w on maan vesipitoisuus [paino-%]
 C_w on veden tilavuuslämpökapasiteetti, 1163 Wh/m³K

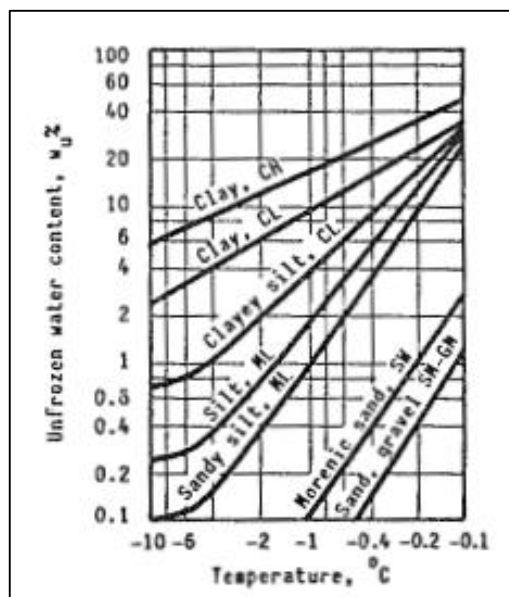
3.5.4 Olomuodonmuutoslämpö

Maan olomuodonmuutoslämpö tarkoittaa maan jäätymisessä vapautuvaa tai sulamisessa kuluva lämpö määrää painoyksikköä kohti. Maan olomuodonmuutokseen kuluva energia voidaan laskea kaavalla (3-19). (Jumikis 1977.)

$$L = \rho_d \cdot w \cdot l_w \quad (3-19)$$

joissa L on maan jäätyislämpö [kJ/m³]
 ρ_d on maan kuivairtitiheys [g/cm³]
 w on maan vesipitoisuus [paino-%]
 l_w on veden jäätyislämpö, 0,0334 MJ/kg

Yllä esitetyssä kaavassa oletetaan, että kaikki maaperän sisältämä vesi jäätyy 0 °C:ssa, vaikka todellisuudessa maassa on jäätymätöntä vettä myös pakkaslämpötiloissa (Saarelainen 1990). Kuvasta 3.4 nähdään, miten jäätymätön vesi jäätyy asteittain eri maalajeissa lämpötilan laskiessa. Jäätymättömän veden osuus alle nollan asteen lämpötilassa on pienempi karkea- kuin hienorakeisissa maalajeissa.

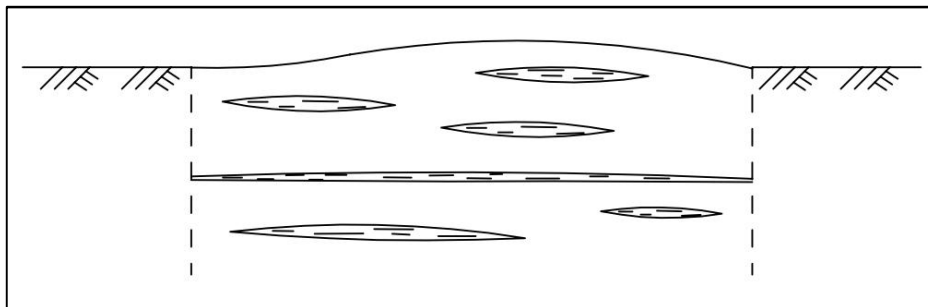


Kuva 3.4. Jäätymättömän veden pitoisuuskäyriä eri maalajeille (Nordal ja Refsdal 1989).

3.6 Roudan rakennetyypit

Routa muodostuu eri maalajeissa eri tavoin. Karkearakeiset maalajit routaantuvat hienorakeisia maalajeja syvemmälle ja eloperäisissä maalajeissa routaantumista tapahtuu yleensä vähiten. Erilaiset routimisominaisuudet johtuvat maan rakenteen lisäksi muun muassa maan lämpökapasiteetista, lämmönjohtavuudesta sekä maavesisuhteista. Erilaisissa maaperäolosuhteissa muodostuu myös rakenteeltaan erilaista routaa. Routa voidaan jakaa kolmeen rakennetyyppiin, joita ovat onkalorouta, massiivinen routa sekä kerrosrouta. Onkalorouta on rakenteeltaan neulasmaista ja sitä muodostuu tyypillisesti mururakenteisen maan pintakerroksen onkalojen ja kolojen sisäpinnoille. Geotekniikassa ja siten radan rakenteissa roudan esiintymismuodoista merkitystä on kerrosroudalla ja massiivisella roudalla. (Valkama 2006.)

Kerrosroutaa esiintyy enimmäkseen hienorakeisissa maalajeissa ja se muodostuu huokosveden jäätyessä ensin maanpinnan alapuolisissa suuremmissa maaonteloissa. Syntyvä jääkerros ei välttämättä ole rakenteeltaan yhtenäinen, mutta eri paksuiset jäälinssit muodostuvat maahan likimain samalle syvyydelle. Pakkassään jatkuessa vesi nousee kapillaarisesti paksunevaan jääkerrokseen, joka muodostaa lopulta yhtenäisen jäälevyn. Lämpötilan edelleen laskiessa vesi jäätyy yhä pienemmissä onteloriveissä, jolloin muodostuu uusia jääkerroksia syntyneiden kerrosten alle ja väliin. Syntyvät jääkerrokset voivat olla toistensa yhteydessä tai erillään ja ne vuorottelevat sulan maan tai massiivisesti routaantuneiden maakerrosten kanssa. Kerrosroudun syntyyn ja rakenteeseen vaikuttavia tekijöitä ovat maaperän rakeisuus ja vedenläpäisevyys, lämpötilan vaihtelut, pohjaveden sijainti, maaperän luonnollinen vesipitoisuus sekä routaantumisenopeus. Kerrosroudun rakenne on esitetty kuvassa 3.5. (Soveri ja Varjo 1977.) Kerrosrouta aiheuttaa routimista ja sen vaikutus rataverkon routaongelmiin on merkittävä.



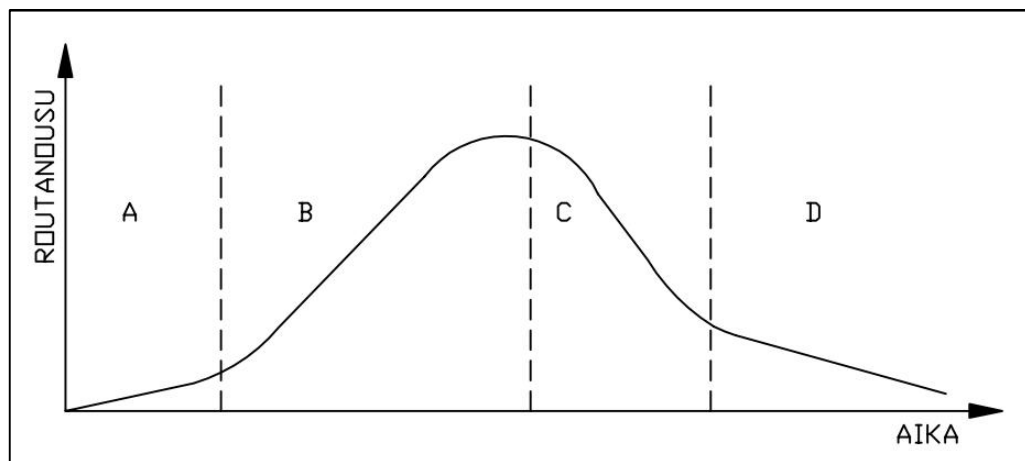
Kuva 3.5. Kerrosroudun rakenne.

Massiivisella roudalla tarkoitetaan koko talvikauden aikana syntyvää rakenteeltaan yhtenäistä routakerrosta, jonka kokonaistilavuus säilyy muuttumattomana eli routimista ei tapahdu. Massiivista routaa muodostuu routimattomiksi kutsutuissa karkearakeisissa maalajeissa, joiden vesipitoisuus on vähäinen ja vertikaalisesti tasaisesti jakautunut. Massiivinen routa muodostaa harvoin paksuja kerroksia ja se kuuluu useimmiten osana

kerrosroutaan. (Soveri ja Varjo 1977.) Ratamaailmassa massiivisellakin roudalla on merkitystä, sillä raiteelle on asetettu suuret tasaisuusvaatimukset.

3.7 Roudan vaikutus maan geoteknisiin ominaisuuksiin

Maan geotekniset ominaisuudet muuttuvat routaantumisen yhteydessä ja ratarakenteessa vallitsevat olosuhteet vaihtelevat selkeästi eri vuodenaikoina. Routaantuminen voidaan jakaa neljään eri vaiheeseen. Vaiheita havainnollistetaan kuvassa 3.6. Ensimmäisessä vaiheessa A ratarakenteessa oleva vesi alkaa virrata syksyn aikana kohti jäätymisrintamaa ja jäätyvän maan vesipitoisuus kasvaa. Ilman kylmetessä ratarakenteeseen muodostuu jäälinssijä ja maa alkaa nousta roudan vaikutuksesta (vaihe B). Tällöin myös ratarakenteen kantavuus on suuri. Keväällä, kun talven pakkassumma ei enää kasva ja ilma lämpenee, routa alkaa sulaa pääosin routakerroksen yläosasta alaspäin. Lisäksi sulamista tapahtuu jäätyneen kerroksen alapinnalla maalämmön vaikutuksesta. Keväällä myös rataympäristön lumet alkavat sulaa ja osa sulamisvesistä virtaa ratarakenteeseen lisäten entisestään rakenteen vesipitoisuutta. Vapautuva huokosvesi ja sulamisvedet eivät kuitenkaan pääse virtaamaan alaspäin, sillä alemmat rakennekerrokset ovat vielä jäässä. Sulamisvyöhykkeelle syntyy huokosveden ylipaine, minkä seurauksena sulien, vedellä kyllästyneiden rakennekerrosmateriaalien tehokas raepaine laskee, routineet rakennekerrokset sekä pohjamaa pehmenevät ja ratarakenteen kantavuus alenee. Ilmiötä kutsutaan sulamispehmenemiseksi ja sen seurauksena ratarakenteeseen ja pohjamaahan syntyy pysyviä muodonmuutoksia. Kuvassa 3.6 sulamispehmenemistä kuvaa vaihe C. Ratapenkereessä sulamispehmenemistä tapahtuu erityisesti alusrakenteessa ja pehmenevä maakerros sisältää yleensä hienorakeista maalajia. Sulaneeseen alusrakennekerrokseen voi kulkeutua lisää hienorakeista maa-ainesta myös yläpuolisesta tukikerroksesta. Vaiheessa C ratarakenteeseen syntyy pysyviä muodonmuutoksia, jos maa kokoonpuristuu joko oman painonsa tai junan aiheuttaman lisäkuormituksen vaikutuksesta ja kuormitus ylittää maan lujuuden. Kuvan 3.6 viimeisessä vaiheessa D jäälinssit sulavat ja routanousu alkaa palautua. (Saarinen 1990, Doré ja Zubeck 2009.)

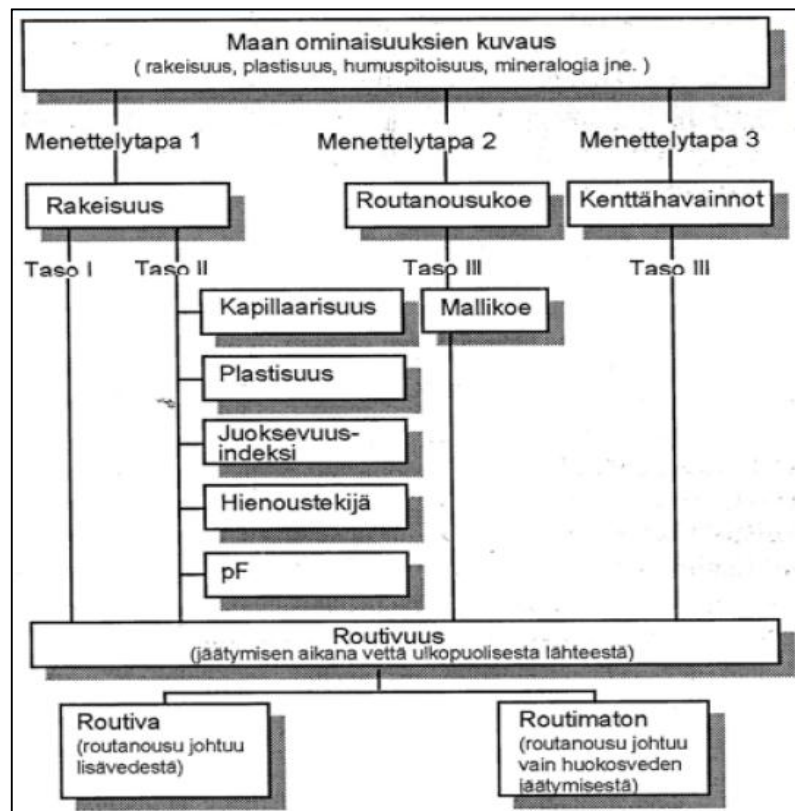


Kuva 3.6. Routaantumisen vaiheet (muokattu lähteestä Doré ja Zubeck 2009).

3.8 Routimiskriteerit

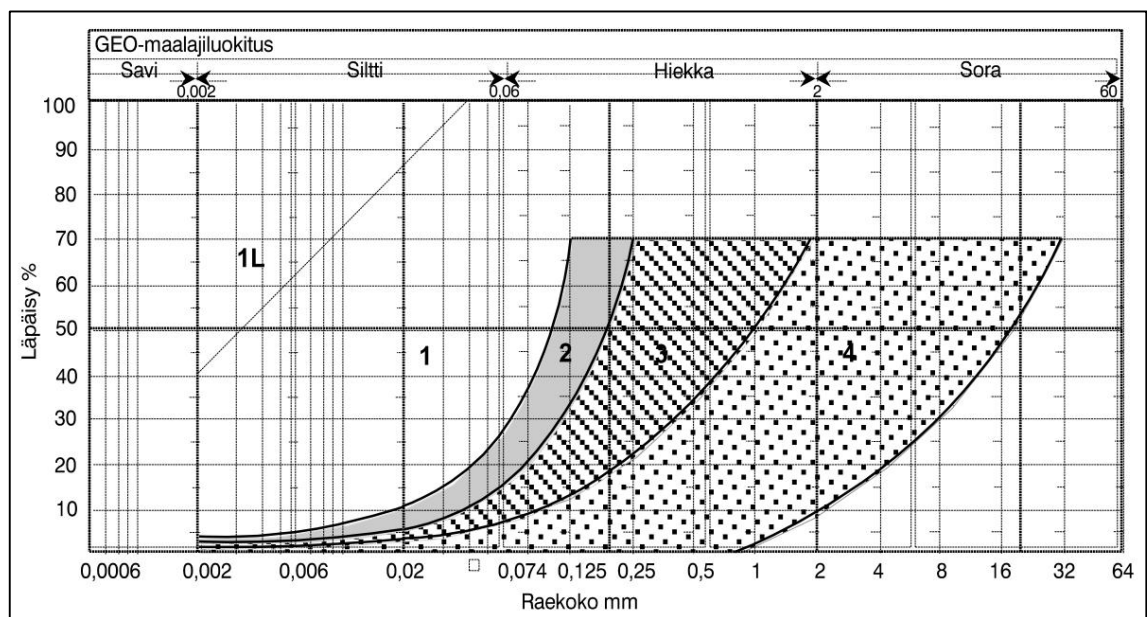
Routa tunkeutuu eri maalajeihin eri tavoin. Maalajin routivuus aiheutuu maalajiominaisuuksien, kuten raekokojakauman, kapillaarisuuden, vedenpidätyskyvyn sekä veden ja lämmön virtausten yhteisvaikutuksesta. Routimattomalla maalajilla tarkoitetaan maata, jossa ei normaaliolosuhteissa muodostu kerrosroudan aiheuttamaa routanousua. Routivuuskriteeri on sellainen maalajin ominaisuus, joka kuvaa sen routivuutta. Routivuuden arvioimiseksi ja luokitteluksi on esitetty kirjallisuudessa yli 100 erilaista kriteeriä, jotka voivat perustua sekä maalaji- että laboratoriotutkimuksiin. Määrittystapojen suuri lukumäärä selittyy sillä, että eri kriteereissä on pyritty huomioimaan toisistaan poikkeavien maalajiominaisuuksien lisäksi erilaiset ilmasto-, pohja- ja rakenneolosuhteet. Routivuuden arvioinnissa on useita ongelmia, sillä yhtenäistä testausstandardia ja luokittelua ei ole. Lisäksi monet kriteerit on laadittu aikana, jolloin rakenteille asetetut laatuvaatimukset olivat nykyistä lievempiä. Routimiskriteereillä voidaan arvioida maalajin herkkyyttä routia siten, että maahan muodostuu jäälinseistä koostuva jäätymisvyöhyke. (Kujala 1996.)

Kansainvälisen geoteknisen yhdistyksen (ISSMFE) routakomitea julkaisi ehdotuksensa routivuuden määrittyskriteereiksi vuonna 1989. Ehdotuksessa kriteerit luokitellaan kolmeen eri tasoon (kuva 3.7). Tasoon I kuuluvat kriteerit perustuvat raekokojakaumaan. Tason II kriteerit perustuvat tason I kriteereihin, joita on täydennetty luokitus- ja/tai hydraulisilla ominaisuuksilla ja tason III kriteerit perustuvat malliroutanousukokeisiin sekä in-situ -havaintoihin. (Kujala 1996.)



Kuva 3.7. Routivuuskriteerien luokittelu (Kujala 1996).

Yleisin tapa arvioida maamateriaalin routivuutta on käyttää rakeisuuteen perustuvaa luokitusta, jossa maalajit erotellaan routiviin ja routimattomiin. Kuvassa 3.8 on esitetty ISSMFE:n ehdottama suositus rakeisuuden perusteella määritettäväksi routivuuskriteeriksi. Hienoaineksen määrällä on oleellinen merkitys maalajin routivuudessa ja routimisen kannalta merkitystä on alle 0,002 mm ja 0,02 mm raekoon omaavalla aineksella. Routiviksi maalajeiksi luetaan kaikki rakeisuusalueen 1 maalajit ja ne alueiden 2, 3 ja 4 maalajit, joiden rakeisuuskäyrä ulottuu vasemmanpuoleiselle hienompirakeiselle alueelle. Alueen 1L maalajit ovat hienorakeisuutensa vuoksi lievästi routivia. Materiaali on routimatonta, jos sen rakeisuuskäyrä sijoittuu kokonaisuudessaan alueen 2, 3 tai 4 sisälle ja materiaali täyttää taulukon 3.1 mukaiset raekokorajat. Alueella 2 routimattomuuden varmistamiseksi on tarkistettava, että kapillaarinen nousukorkeus on alle 1 m. Kapillaarisen nousun korkeutta voidaan käyttää routimiskriteerinä siten, että maalaji luetaan routimattomaksi, jos sen kapillaarinen nousukorkeus on alle 1 m. Maalaji on lievästi routiva, jos sen kapillaarinen nousukorkeus on 1,0–1,5 m ja kesinkertaisesti routiva kapillaarisuuden arvoilla 1,5–2,0 m. Maalaji on erittäin routiva, jos sen kapillaarinen nousukorkeus on yli 2 m. (Kujala 1996.)



Kuva 3.8. ISSMFE:n mukainen routivuuden arviointi rakeisuuden perusteella (Kujala 1996).

Taulukko 3.1. Hienoaineksen osuudet materiaalin osuessa kuvan 3.8 routimattomalle alueelle (Kujala 1996).

Raekoko (mm)	Rakeisuusalue		
	2	3	4
< 0,002	≤ 3 %	≤ 1,5 %	≤ 1 %
< 0,02	≤ 10 %	≤ 5 %	≤ 3 %
< 0,074	≤ 35 %	≤ 18 %	≤ 8 %

Rajatapauksissa ja vaativampien rakenteiden yhteydessä maalajin rakeisuuteen perustuvaa routivuuden arviointia on täydennettävä tason II sisältämällä luokitus- ja hydraulisiin ominaisuuksiin perustuvilla lisäkriteereillä. Kriteerien perustana ovat vakioidulla routanousukokeella selvitettyt routimista kuvaavat parametrit segregatiopotentiaali ja routanousunopeus. Karkearakeisten maalajien routivuusmäärittäystä voidaan täydentää kapillaarisuuteen ja/tai hienoustekijään perustuvilla kriteereillä. Hienorakeisten maalajien routivuuden ja routimattomuuden rajaa taas voidaan tarkentaa plastisuuteen, juoksevuusindeksiin ja vedenläpäisevyyskertoimeen perustuvilla kriteereillä. (Kujala 1996.)

Kun arvioidaan radan rakennemateriaalien routimattomuutta, on huomioitava, että monet maamateriaalien routivuusluokittelut on laadittu aikana, jolloin raiteen tasaisuudelle ei ole asetettu nykyisten liikennöintinopeuksien asettamia vaatimuksia. Useimmat luokitukset eivät myöskään arvioi routivuutta pelkästään materiaaliominaisuutena, vaan kuvaavat materiaalin routimisesta aiheutuvan riskin suuruutta käyttökohteen mukaisissa olosuhteissa. Monet luokitukset on tehty tienrakennuksen näkökulmasta, eikä tieympäristössä routimattomaksi arvioitu materiaali välttämättä täytä routimattomuuden määritelmää rataympäristössä. Lisäksi monet routivuuskriteerit on laadittu keskittyen rakenteen pohjamaan routimisherkkyyteen, joten kriteerejä ei voida suoraan soveltaa radan rakennekerrosmateriaaleihin. (Nurmikolu 2006, RIL 2013.)

Nurmikolu (2006) havaitsi suorittamissaan laboratoriokokeissa, että monissa kuvan 3.8 mukaan routimattomiksi luokiteltavissa materiaaleissa esiintyi selvää routanousua. Nurmikolu ehdottaakin radan rakennekerrosmateriaalien routivuuden arvioinnissa sovellettavan ”käytännöllisen routimattomuuden rajaa”. Käytännöllisen routimattomuuden voidaan ajatella riippuvan käyttökohteessa sallituista routanousuista ja routanousujen ylittymisen seurauksista, joten routimattomuuden rajojen arviointia varten tulisi olla käytössä kohdekohtaisia routimishavaintoja. Jos kenttähavaintoja ei ole, voidaan taulukon 3.1 arvoja muokata siten, että ratarakenteiden käytännöllisen routimattomuuden rajalla olevien materiaalien alle 0,02 mm aineksen osuus olisi 1,5 %.

Radan tukikerroksen sekä väli- ja eristyskerrosten materiaalit tulee valita Liikenneviraston sekä InfraRYL:n ohjeiden ja laatuvaatimusten mukaisesti, sillä vaatimuksissa on otettu huomioon routimattomuuden edellytykset rataympäristössä. Vaatimukset huomioivat muun muassa kiviaineksen hienontumisen vaikutuksen rakennekerrosmateriaalin routivuuteen. (RIL 2013.)

3.9 Roudan syvyys

Roudan syvyyteen vaikuttavat muun muassa maalaji, ilmasto, maaperän kosteusolosuhteet sekä lumi- tai kasvipeitteen olemassaolo. Maalajiominaisuuksista suurin merkitys on maalajin vesipitoisuudella sekä jäätyneen tilan lämmönjohtavuudella. Talven pakkasmäärällä on suuri vaikutus roudan syvyyteen sekä

sulamispehmenemisajan keston. Pakkasmäärään vaikuttaa talven kylmyys ja määrä toistuu vuosittain erisuuruisena. Pakkasmäärä lasketaan ilman vuorokautisista keskilämpötiloista kaavan (3-20) mukaisesti. (Kivikoski ja Saarelainen 2000a.)

$$F = 24 \cdot \sum_j (T_f - T_{d,j}) \quad (3-20)$$

jossa F on talven pakkasmäärä [Kh]
 T_f on jäätymispiste, 0 °C
 $T_{d,j}$ on vuorokauden keskilämpötila päivälle j [°C]

Roudan syvyyden määrittämiseen on kehitetty useita erilaisia laskentamenetelmiä. Yksinkertaisin laskentakaava on nimeltään Stefanin yhtälö (kaavat 3-21 ja 3-22). Neliöjuurikaava ottaa huomioon routaantuvan maakerroksen ominaisuudet maalajikertoimella sekä pakkasmäärän. (Onninen 2001b.)

$$Z = k \cdot \sqrt{F} \quad (3-21)$$

jossa Z on roudan syvyys [m]
 k on maalajista riippuva kerroin [mm/\sqrt{Kh}]
 F on pakkasmäärä [Kh]

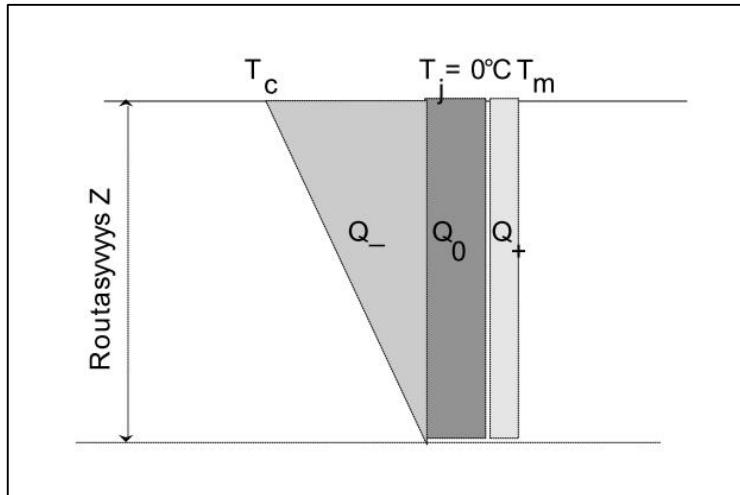
$$k = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda}{L}} \quad (3-22)$$

jossa k on maalajista riippuva kerroin [mm/\sqrt{Kh}]
 λ on lämmönjohtavuus [W/mK]
 L on jäätymislämpö [J/kg]

Kirjallisuudessa esitetyt maalajikertoimen kenttämittauksiin perustuvat arvot vaihtelevat keskimäärin välillä 8–12. Kertoimia voidaan arvioida myös korjauskertoimella, joka huomioi maan vaihtuvan lämpökapasiteetin. Myös esimerkiksi lumen eristävä vaikutus voidaan sisällyttää kertoimeen käyttäen sopivia laskumenettelyitä. Maalajikerrointa käytettäessä on huomioitava, että kertoimen arvo pätee tarkasti vain mittauspaiikkakunnan maalajille ja sitä voidaan soveltaa vain suuntaa-antavasti tietyille maalajille. (Saarelainen 1990.)

Roudan syvyyttä voidaan arvioida laskennallisesti myös esimerkiksi Watzingerin, Kindemin ja Michelsenin kehittämällä analyttisellä laskentamallilla, joka perustuu Stefanin yhtälöön (Watzinger et al. 1938). Menetelmällä voidaan laskea roudan syvyys sekä homogeenisessä että kerroksellisessa maassa. Kuvassa 3.9 on esitetty, miten lämpötila jakautuu laskentamallin mukaan maan jäätyessä. Lämpötilakenttä on kuvan 3.9 mukainen, kun routa on tunkeutunut syvyyteen Z ajassa t . Kuvassa oikealla esitetty

lämpömäärä Q_+ on maan jäähtymislämpö, kun maa jäähtyy lähtöhetken lämpötilasta T_m (vuoden keskilämpötila) nollaan asteeseen. Kuvan keskellä oleva Q_0 edustaa maassa olevan veden olomuodonmuutoslämpöä. Kuvassa vasemmalla esitetty Q_- on rakenteen jäähtymislämpö, kun maan pintalämpötila laskee nolasta asteesta T_c :hen (pakkaskauden keskilämpötila). Laskentamenetelmä esitetään tarkemmin Nurmikolun ja Kolisojan (2002) julkaisussa Ratarakenteen routasuojaus.



Kuva 3.9. Lämpötilan jakautuminen maan jäätyessä (Watzinger et al. 1938).

3.10 Lumen eristävä vaikutus

Lumipeite vaikuttaa roudan syvyyteen, sillä lumi toimii hyvin lämpöeristeenä huonon lämmönjohtokykynsä vuoksi. Etenkin huokoisen, kevyen lumen kiderakenteeseen on sitoutunut paljon ilmaa. Jos pakkasia esiintyy jo ennen lumipeitteen satamista ja lumikerros jää ohueksi, routa tunkeutuu syvälle maaperään. Runsaslumisina talvina ja etenkin, jos lumikerros sataa jo alkutalven aikana ennen kovia pakkasia, lumi eristää hyvin ja roudan tunkeutuvuus pienenee.

Lumipeite koostuu useista paksuudeltaan erilaisista kerroksista, joiden kideominaisuudet poikkeavat toisistaan. Muun muassa kiteiden rakenne vaikuttaa lumipeitteen fysikaalisiin ominaisuuksiin, kuten tiheyteen, huokoisuuteen ja lämmönjohtavuuteen ja siten lumen eristyskykyyn. Lumen lämmönjohtavuuden ja tiheyden välillä on havaittu olevan voimakas riippuvuus, jota voidaan käyttää apuna, kun tunnetaan lumen tiheys ja halutaan arvioida lämmönjohtavuutta. Vanhin lumen tiheyden ja lämmönjohtavuuden välistä riippuvuutta kuvaava ns. Abelin kaava on esitetty alla (kaava 3-23). Kaavalla ei kuitenkaan voida arvioida uuden huokoisen lumen tai syväkuuran lämmönjohtavuutta. (Oksanen 1999.)

$$\lambda_s \approx 0,0285 \cdot \rho_s^2 \quad (3-23)$$

jossa λ_s on lumen lämmönjohtavuus [J/cm]
 ρ_s on tiheys [g/cms°C]

Lumipeitteen terminen eristävyys kuvaa lumipeitteen kykyä vastustaa lämpötilaeroista johtuvaa lämmönjohtumista. Lumipeitteen eristävyysvaikutteeseen vaikuttavat lumikerroksen paksuus ja lämmönjohtavuus kaavan (3-24) mukaisesti.

$$R = \frac{h}{\lambda_s} \quad (3-24)$$

jossa R on terminen eristävyys [Kh]
 h on lumipeitteen paksuus [m]
 λ_s on lumen lämmönjohtavuus [W/mK]

Termisen eristävyysvaikutteen suuruuteen vaikuttaa merkittävästi lumen tiheys. Tiheyden kasvaessa lumen lämmönjohtavuus paranee ja lumipeitteen paksuus pienenee, mikä johtaa lumen eristyskyvyn alenemiseen. Suomessa lumipeitteen tiheys kasvaa talven aikana alkutalven keskimääräisestä arvosta 200 kg/m^3 kevään maksimitiheyteen, joka on suuruudeltaan noin $300\text{--}400 \text{ kg/m}^3$. (Oksanen 1999.)

3.11 Routiiko maa?

3.11.1 Maanäytteet

Olemassa olevan radan rakenteen routivan yläpinnan syvyys saadaan selvitettyä kairausmenetelmällä, jossa raiteen keskeltä otetaan määrävälein maanäytteitä kierrekairalla. Pohjatutkimuspisteiden ohjelmoinnin kohdentamisen apuna voidaan käyttää kunnossapitäjien kokemukseen perustuvaa tietoa sekä raiteentarkastusvaunun mittaustuloksia. Maanäytteistä määritetään tutkimuspaikalla sepelin, alusrakenteen ja pohjamaan kerrosrajojen syvyydet sekä otetaan kustakin maakerroksesta näytteet laboratoriotutkimuksia varten. Laboratoriossa näytteistä tehdään silmämääräinen maalajimääritys sekä routivuusarvio. Silmämääräisen tarkastelun yhteydessä valitaan tarvittaessa näytteet, joista määritetään kapillaarinen nousukorkeus ja rakeisuusjakauma sekä tehdään routanousukokeita routivuuden varmistamiseksi. (Ratahallintokeskus 2002.)

3.11.2 Routanousukoe

Routivuutta voidaan arvioida kokeellisesti luotettavimmin routanousukokeiden avulla. Routanousukokeen tarkoituksena on määrittää luonnontilaisen tai muottiin rakennetun maanäytteen routimiskerroin, jota käytetään routanousulaskelmissa. Kokeella saadaan tietoa eri maalajiominaisuuksien vaikutuksesta routimisherkkyyteen. Maailmanlaajuisesti vakiintunutta routanousukokeenmenettelyä ei ole olemassa ja Suomessakin koe voidaan suorittaa noudattaen erilaisia standardeja ja koejärjestelyitä. Koejärjestelyt eroavat toisistaan muun muassa jäähdytyslämpötilojen, laitteiston ja näytteen valmistelun osalta. Kansainvälisesti routanousu voidaan määrittää myös menettelyillä, joiden tuloksena ei saada routimiskerrointa, vaan routivuusluokittelu, jonka perusteella routanousua ei pystytä suoraan laskemaan. (Onninen 2001a, Nurmikolu 2004.)

Suomessa käytetyssä VTT:n routanousukoemenettelyssä sula näyte otetaan maastossa ohutseinäiseen teräsputkeen painamalla putkea varovasti koekuopan pohjaan, kunnes putken sisään on saatu vähintään 80 mm korkea näyte. Jäätynestä, hienorakeisesta ja kivettömästä maasta näyte otetaan kierrekairalla. Laboratoriossa näytteistä valitaan mahdollisimman häiriintymätön ja halkeilematon osa routakoenäytteeksi. Häiriintyneestä maanäytteestä rakennetaan routanousukoenäyte sullomalla sula näyte halkaistavaan muottiin. (Onninen 2001a.)

Tavallisimmin routanousukoe suoritetaan jäädyttämällä maanäytteen yläosa ja pitämällä alaosa sulana. Kokeen aikana seurataan muun muassa routarajan syvyyttä ja näytteen korkeuden muutosta eli routanousua. Kokeessa käytettävien näytesylinterien eli routasellien koko valitaan maan rakeisuuden perusteella ja sylinterit voivat olla läpimitaltaan esimerkiksi 80 mm, 100 mm tai 150 mm. Routanousukokeessa käytettävä maanäyte otetaan tutkimuskohteen edustavasta pisteestä. Tutkimuskohteen pohjamaan rakenne ja pohjatutkimustiedot määrittävät maastoalueen ja maakerroksen, johon routanousukokeella saatua routimiskerrointa voidaan soveltaa. (Onninen 2001a.)

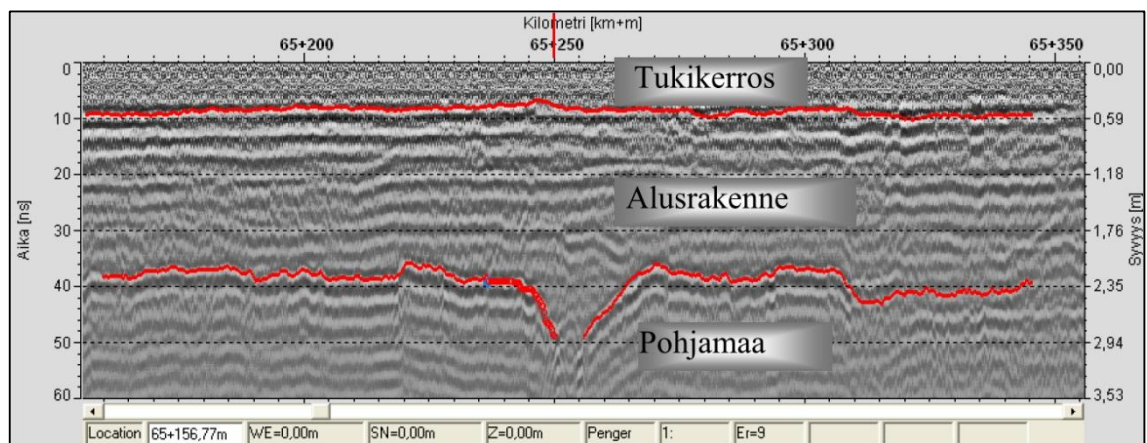
Routanousukokeet voidaan jakaa karkeasti kolmeen periaatteeltaan erilaiseen tyyppiin, joita ovat vakiolämpötilakoe, vakioroutaantumisnopeuskoe sekä koetyyppi, joka perustuu lämmön poistumiseen vakionopeudella. Vakiolämpötilakoe on yleisimmin käytetty koetyyppi ja siinä näytteen jäädyttäminen tehdään käyttäen yhtä tai useampaa portaittaista jäädytyspuolen lämpötilan muutosta. Koetuloksista määritetään segregatiopotentiaali, jonka avulla voidaan laskea routanousun suuruus. Vakioroutaantumisnopeuskokeessa jäädytyspuolen lämpötilaa alennetaan jatkuvasti mieluiten automatisoidusti, jotta näytteessä vallitseva jäätymisraja saadaan etenemään tasaisella nopeudella. Kokeen tuloksena saadaan routaantumisnopeuden aiheuttama routanousunopeus, joka kuvaa routimisherkkyyttä. (Nurmikolu 2004.)

3.11.3 Maatutkaluotaus

Maatutkaluotaus (Ground Penetrating Radar, GPR) on geofysikaalinen maanpintaa rikkomaton tutkimusmenetelmä, jossa maankamaraan lähetetään korkeataajuisia sähkömagneettisia radioaaltoja muutaman nanosekunnin mittaisina pulsseina. Radioaaltojen osuessa maassa sähköisten ominaisuuksien rajapintaan osa energiasta heijastuu ylöspäin osan energiasta jatkaessa kulkuaan alempiin maakerrokseen optiikan lakien mukaisesti. Heijastuneiden osien amplitudit ja heijastukseen kulunut aika rekisteröidään ja tallennetaan digitaalisesti maatutkalaitteistolla. Aaltojen heijastus on sitä suurempi, mitä suuremmat erot eri kerrosten sähköisissä ominaisuuksissa on. Tutkan liikkuessa tulostussignaalit eli pyyhkäisyt piirretään intensiteettiipiirturilla tiheästi peräkkäin, jolloin tuloksena saadaan jatkuva profiili maaperässä tapahtuvista sähköisistä muutoksista. Tutkasignaalin valinnalla on vaikutusta luotauksen syvyysulottuvuuteen ja erottelukykyyteen. Korkeammilla taajuuksilla saadaan ohuet kerrokset erottumaan paremmin, mutta syvyysulottuvuus pienenee. Vastaavasti

matalataajuisilla antenneilla erottelukyky on karkeampi, mutta syvyysulottuvuus huomattavasti parempi kuin korkeampia taajuuksia käytettäessä. (Peltoniemi 1988, SGY 1991.)

Maatutkaluotausta voidaan käyttää radan routaongelmien selvittämiseen ja paikantamiseen. Kuvassa 3.10 on esitetty maatutkaprofiili, johon on tulkittu ratarakenteen kerrosrajat. Ratarakenteen luotauksessa käytetään 80–300 MHz:n antenneja ja tutkan avulla voidaan selvittää ratarakenteiden paksuudet sekä kerätä tietoa tukikerrosmateriaalin ja pohjamaan laadusta sekä rakennepoikkeamista. Luotauksella saadaan tietoa radan pohjamaan routivuudesta, sillä routimisen mahdollistavan hienoaineksen korkeampi vesipitoisuus vaimentaa tutkasignaalin korkeita taajuuksia. Maatutkalla voidaan myös paikantaa olemassa olevia routaeristeitä. Eristeiden sijainnin selvittäminen on tärkeää, sillä vanhat vettyneet eristeet aiheuttavat routimista ratarakenteessa ja lisäksi routalevyt voivat aiheuttaa ongelmia sepelinpuhdistuksessa. Maatutkaluotauksella saadaan myös tietoa roudan syvyydestä sekä radan mahdollisista kuivatusongelmista, jotka voivat johtaa routimiselle suotuisien olosuhteiden kehittymiseen. (Passi 2007, Nurmikolu 2011a.)



Kuva 3.10. Esimerkki maatutkalla saatavasta ratarakenteen tutkaprofiilista (Passi 2007).

Maatutkaluotauksen hyviä puolia ovat suuri mittaussnopeus, kustannustehokkuus sekä suhteellisen hyvä tunkeutuvuus ja tuloksena saatava ratarakenteen jatkuva profiili. Rataympäristössä on myös huomattava etu, että mittaukset voidaan suorittaa liikkuvalla kalustolla rakennetta rikkomatta ja muuta raideliikennettä häiritsemättä. Maatutkaluotausta käytettäessä on huomioitava, että datan analysointi edellyttää ammattitaitoa ja syvyyshavaintojen kalibrointi vaatii tuekseen jonkin verran referenssikairauksia. Maatutkaluotauksen rajoitteena on myös se, ettei se sovellu savimaiden tutkimiseen, sillä tutkasignaali vaimenee voimakkaasti savessa. (SGY 1991, Nurmikolu 2011a.)

3.11.4 Routaseuranta-asemat

Ratahallintokeskuksen (nykyisin Liikennevirasto) toimeksiannosta on Tampereen teknillisessä yliopistossa kehitetty automaattinen monitorointijärjestelmä routimisen seurantaan. Ensimmäiset seurantatulokset on saatu talvilta 2009–2012. Routivat materiaalit ratarakenteessa eivät automaattisesti aiheuta routaongelmia, minkä vuoksi on tärkeää saada mittauksen avulla tietoa routimattomuuden kriteerien täsmentämiseksi ja kalibroimiseksi. Maastossa kerätyn mittausdatan avulla voidaan muodostaa yhteys routanousukokeiden tulosten ja radassa tapahtuvan todellisen routimisen välille. Monitorointijärjestelmällä saatuja mittaus tuloksia voidaan myös käyttää tukena, kun arvioidaan eri korjaustoimenpiteiden soveltuvuutta routaongelmien vähentämiseen. Routaseuranta-asemat koostuvat lämpötila- ja siirtymäantureista ja ne välittävät reaaliaikaista tietoa roudan tunkeutumissyvyydestä sekä routanoususta ja sen ajankohdasta. Roudan syvyys selvitetään mittaamalla ratapenkereen lämpötila. Routanousu mitataan siirtymäantureilla, joiden referenssipisteiksi asennetaan havaintotangot routimattomaan syvyyteen. (Luomala 2010.)

4 Routaongelmat radoilla

4.1 Routaongelmien yhteiskunnalliset vaikutukset

Routaan liittyvät ilmiöt aiheuttavat Suomessa vuosittain liikenteellistä haittaa ja routaongelmista seuranneet myöhästymiset raideliikenteessä ovatkin olleet julkisuudessa korostuneesti esillä viime vuosina. Yhä suurempiin liikennöintinopeuksiin pyrittäessä raiteen tasaisuusvaatimukset ovat tiukentuneet. Routiville rataosille joudutaankin usein asettamaan nopeusrajoituksia, joiden avulla pyritään pienentämään routimisesta aiheutuvien epätasaisuuksien vaikutuksia. Nopeusrajoituksilla on suurempi vaikutus henkilö- kuin tavaraliikenteeseen, sillä suurin osa rajoituksista ei koske tavaraliikennettä ja tavaraliikenteelle asetetut nopeudet ovat jo valmiiksi alhaisempia. Tavaraliikenne kärsii routanopeusrajoituksista pääosin silloin, kun henkilöliikenne häiriintyy, sillä henkilöliikenne on junien priorisointiasteikolla tavaraliikennettä korkeammalla sijalla. Yhdistetyt kuljetukset ovat kuitenkin tarkasti aikataulusidonnaisia, joten niillä roudan aiheuttama myöhästymisen heikentää kuljetusten kilpailukykyä. (Liikennevirasto 2011b.)

Yhteiskunnan kehittymisen myötä matkustajien odotukset raideliikenteen aikataulujen pitävyyden ja matka-aikojen kohtuullisuuden suhteen ovat kasvaneet. Rautatiejärjestelmä on kuitenkin hyvin häiriöherkkä ja yksittäinenkin radan ongelmakohta voi sysätä liikkeelle kerrannaisvaikutusten ketjun, jonka seurauksena liikenteen myöhästymisen vaikutukset yhdellä rataosalla kohdistuvat laajalle alueelle. Roudan aiheuttamat vaikutukset junaverkolle voidaan jakaa primäärisiin ja sekundäärisiin haittoihin. Primääristen haittojen vuoksi junaliikenne ei pysy suunnitellussa aikataulussa ja syntyy myöhästymisiä. Suorat vaikutukset heijastuvat muuhun liikenteeseen aiheuttaen sekundäärisiä haittoja, kuten vaihtoyhteyksien katkeamisia ja korjaustoimenpiteistä aiheutuvien kustannusten kasvua. (Liikennevirasto 2012.)

Rataosan häiriöherkkyyteen vaikuttavat muun muassa rataosan raiteiden lukumäärä, asetetun nopeusrajoituksen suuruus, liikennemäärä, liikennepaikkaväli sekä suojastus. Liikennepaikat mahdollistavat junien ohitukset sekä kohtaamiset ja suojastuksella mahdollistetaan junayksiköiden kulku peräkkäin. Mitä tärkeämmällä rataosalla routahaittoja esiintyy, sitä suurempia kerrannaisvaikutuksia koko liikenneverkolle routimisesta aiheutuu. Esimerkiksi tärkeän yksiraiteisen rataosan häiriön vaikutukset voivat kertautua koko verkkoon. Liikenteen häiriintyessä muun muassa junakohtaamiset menevät sekaisin ja mikäli ratakapasiteetti on täynnä, liikennettä on vaikeaa saada normalisoitua. (Liikennevirasto 2011a.)

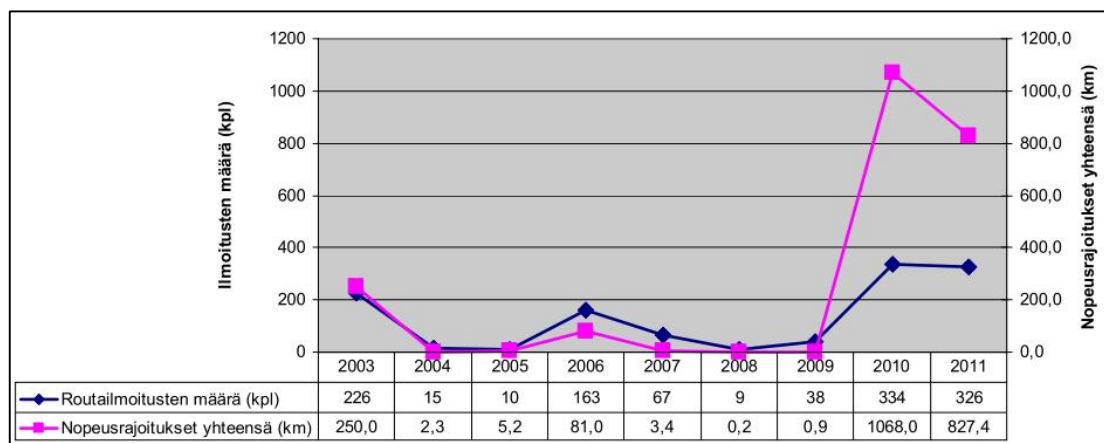
Routiminen synnyttää radan alus- ja päällysrakenteissa pystysuuntaisia muodonmuutoksia. Yhdessä liikennekuormituksen kanssa muodonmuutokset aiheuttavat raidevirheiden kasvua, minkä seurauksena liikennöitävyys ja matkustusmukavuus kärsivät huomattavasti. Matka-aika ja etenkin liikenteen

täsmällisyys ovat merkittäviä liikennemuodon valintaa määrittäviä tekijöitä, joten rautatieliikenteen sujuvuudella ja luotettavuudella on suuri vaikutus matkustajatytyväisyyteen. Aikataulut ovat rataverkon käyttäjille lupaus liikennöidä tiettyinä aikana tiettyjen liikennepaikkojen välillä, joten myöhästymiset ja niistä seuraavat jatkoyhteyksien katkeamiset sekä junavuorojen peruminen aiheuttavat raideliikenteen käyttäjissä ärtymystä ja madaltavat kynnyksiä siirtyä käyttämään muita kulkumuotoja. Lisäksi routavaurioiden aiheuttamat liikenteen viivytykset huonontavat raideliikennejärjestelmän imagoa. (Goverde 2005.)

Roudan aiheuttamista ongelmista syntyy yhteiskunnalle kustannuksia. VR Track Oy on laatinut Liikennevirastolle toimenpideohjelman routavaurioiden korjaamiseksi rahoitustarvearvioineen. Kustannusten muodostumisen oletuksena on, että suurin osa routakohteista pystytään korjaamaan päällysrakennetöillä ja routalevytyksellä. Perustapauksissa kustannusten suuruudeksi on arvioitu 300 euroa/raidemetri. Mikäli kyseessä on radan tekninen epäjatkuvuuskohta, kuten vaihderakenne tai rumpupaikka, kustannukset muodostuvat selkeästi suuremmiksi. Mikäli rataverkon routapaikat parannettaisiin tasoon F10, joka vastaa kerran 10 vuodessa toistuvaa pakkastalvea, kustannukset olisivat suuruudeltaan 500 miljoonaa euroa. (Liikennevirasto 2011a.)

4.2 Ongelmien laajuus ja vakavuus

Viideltä aikaisemmalta vuosikymmeneltä tunnetaan viisi vakavaa routakevättä, jotka koettiin vuosina 1960, 1987, 2003, 2010 ja 2011. Kuvassa 4.1 on esitetty routailmoitusten sekä asetettujen nopeusrajoitusten määrä vuosina 2003–2011. Nopeusrajoitusten määrän tarkastelussa on huomioitava, että rajoitusten määrä on radan nopeuden funktio. Radan nopeuksien nosto lisää siis myös nopeusrajoitusten määrää. Suomen liikennöidyn rataverkon pituus vuonna 2011 oli 5919 kilometriä ja kuvasta 4.1 havaitaan, että rautatiehistorian ankarimpana talvena vuonna 2010 lähes 20 prosentin osuus raideverkosta oli nopeusrajoitettua. Leudompina talvina vuosien 2004–2009 aikana rajoituksia asetettiin keskimäärin vain 1–5 kilometrille. Myös vuonna 2011 routavauriot olivat huomattavan suuria ja roudasta aiheutuvia nopeusrajoituksia asetettiin enimmillään noin 800 kilometrin matkalle. Vuosi 2012 osoittautui kahta edeltävää vuotta helpommaksi routatalveksi ja nopeusrajoituksia asetettiin enimmillään noin 60 kilometrin matkalle. Routavauriot esiintyivät suurimmaksi osaksi samoissa kohteissa kuin vuosina 2010 ja 2011. (Levomäki 2012b.)



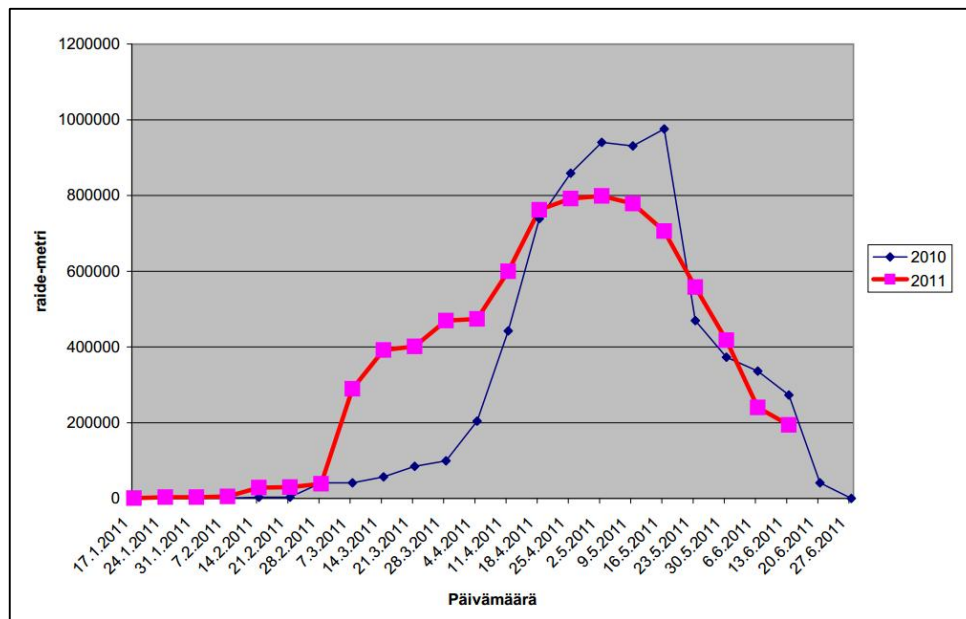
Kuva 4.1. Routapaikkailmoitusten ja nopeusrajoitusten määrä vuosina 2003–2011 (Liikennevirasto 2011a).

Liikennevirasto on asettanut yhdessä VR Groupin kanssa täsmällisyystavoitteet henkilö- ja tavaraliikenteelle. Henkilökaukoliikenteessä ja tavaraliikenteessä pyritään yli 90 % täsmällisyyteen määrääsamalla. Helsingin seudun lähiliikenteessä tavoitteena on yli 97,5 % täsmällisyys lähtö- ja määrääsamalla. Liikenne- ja viestintäministeriö on lisäksi asettanut Liikennevirastolle erillisen radanpidon aiheuttamaan epätäsmällisyyteen liittyvän päämäärän. Vuosina 2010 ja 2011 tavoitteena on ollut, että enintään 4 % henkilökaukoliikenteen junista ja 1 % lähiliikenteen junista myöhästyisi aikataulustaan radanpitoon liittyvien syiden vuoksi. (Liikennevirasto 2012.)

VR Yhtymä otti vuoden 2011 talvella ensimmäistä kertaa käyttöön routa-aikataulut, joiden tarkoituksena oli vähentää roudasta johtuvaa myöhästymistä. Aikatauluissa huomioitiin tietyille rataosille roudan takia asetetut liikennöintiä hidastavat nopeusrajoitukset lisäämällä hallitusti matka-aikoja. Kaukojunien aikataulumuutokset kohdistettiin routavaurioista todennäköisesti kärsiville rataosille, jotta liikennöintiä voitiin hoitaa sujuvammin. Muutosten seurauksena kaukojunien matka-ajat pitenevät muutamilla reiteillä Pohjois- ja Itä-Suomessa reittikohtaisesti 20–90 minuuttia. Aikataulut olivat käytössä huhtikuusta kesäkuun alkupuolelle asti ja niiden avulla junamatkustajat saivat realistisempaa tietoa matkustusajoista jo ennen matkaa. Routa-aikataulujen käytöstä oli kohtuullista hyötyä ja junien liikennöinnin täsmällisyyttä saatiin parannettua. (Liikennevirasto 2011a.)

Kuvassa 4.2 on esitetty rataverkolle asetettujen nopeusrajoitusten ajoittuminen vuosina 2010 ja 2011. Kuvasta huomataan, että suurin osa routarajoituksista ajoittui huhtikuun ja toukokuun välille. Ensimmäiset rajoitukset asennettiin joulukuusta tammikuussa ja viimeiset poistettiin kesä-heinäkuun aikana. Vuonna 2011 routakausi alkoi noin kuukautta aikaisemmin ja päättyi hieman alle kuukautta myöhemmin kuin vuonna 2010. Liitteessä 3 on esitetty vuoden 2011 routapaikkojen maantieteellinen sijoittuminen. Nopeusrajoituksia ja roudan aiheuttamien raiteen epätasaisuuksien tasaamiseksi tehtyjä kiilauksia oli erittäin paljon ja rajoitukset sijoituivat ympäri Suomen rataverkkoa.

Routahaitat olivat huomattavan suuria etenkin Pohjois-, ja Keski-Suomessa Etelä-Suomen vaurioiden jäädessä vähäisemmiksi. (Liikennevirasto 2011a.)



Kuva 4.2. Rataverkolle asetettujen nopeusrajoitusten ajoittuminen vuosina 2010 ja 2011 (Liikennevirasto 2011a).

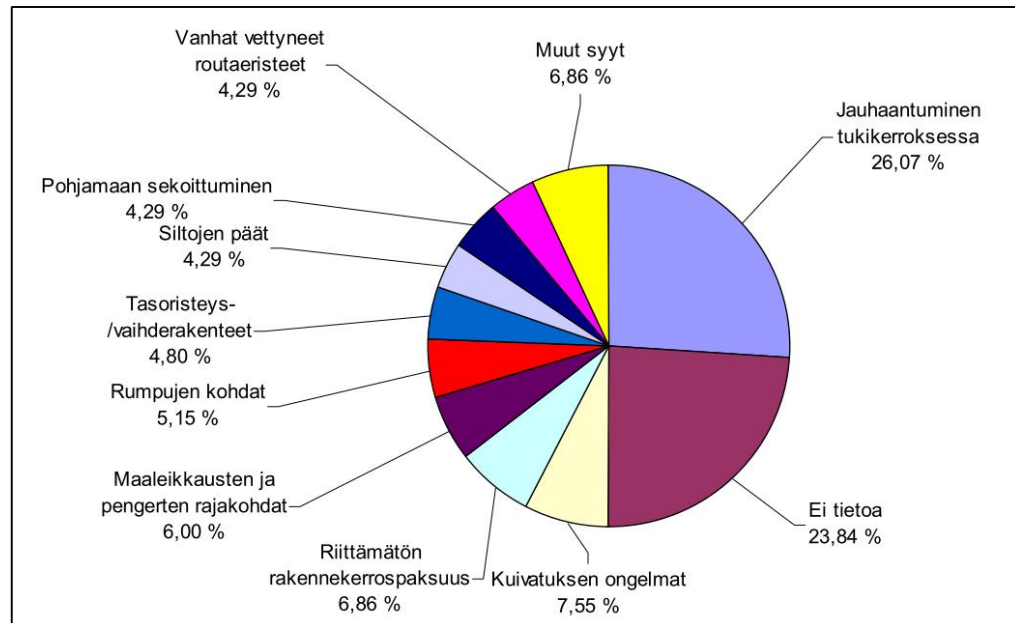
Routavaurioiden aiheuttaman liikenteellisen haitan merkittävyys riippuu radan liikenteellisistä oloista. Samansuuruiset routavauriot eivät aiheuta yhtä suurta kunnossapitotarvetta eri rataosuuksilla, sillä radan liikenteelliset olot ja siten kunnossapitotaso määrää radan liikennöintinopeuden ja sallitut korkeuspoikkeamien raja-arvot. Kunnossapitotason nosto lisää korjausta vaativien routavaurioiden määrää ja vastaavasti tason aleneminen vähentää korjaustarvetta.

Routaan aiheuttamien haittojen suuruutta eri kunnossapitotason rataosilla pystytään vertailemaan myöhästymisminuuttien avulla. Teoreettisella myöhästymisellä tarkoitetaan sallitun nopeuden ja routanopeusrajoituksen aikaeroa routapaikkaa ohittaessa ja sen suuruus voidaan laskea routapaikka- ja ratavälikohtaisesti. Henkilöliikenteen junien todellisia myöhästymisiä rataverkolla on seurattu vuodesta 2005 alkaen Liikenneviraston junien seurantajärjestelmällä (JUSE). Junien kulkutiedot kirjautuvat järjestelmään liikenteenohjausjärjestelmistä tai liikenteenohjaajan syöttämänä ja tietoja verrataan aikataulussa annettuun arvoon. Liikenteenohjaaja kirjaa järjestelmään myöhässä olevien junien myöhästymissyyn. (Liikennevirasto 2011a, Liikennevirasto 2012.)

4.3 Kunnossapitäjien havaitsemat epätasaisuudet

Kuvassa 4.3 on esitetty radan kunnossapitäjien näkemys vuosien 2003–2009 routavaurioiden syyjakaumasta. Arvion mukaan noin 60 prosenttia eli valtaosa routavaurioista on aiheutunut ratarakenteiden ja niissä käytettyjen materiaalien

ongelmista. Noin 15 prosenttia ongelmista on ollut radan epäjatkuvuuskohtien aiheuttamia. Jäljelle jäävissä routakohteissa routimista ovat aiheuttaneet muut syyt (6,86 %) tai syitä ei tiedetä (23,84 %). Syiden jakaumaa tarkasteltaessa on huomioitava, että eri kunnossapitoalueilla esiintyy merkittäviä eroja eri syiden lukumäärissä. Suuriin poikkeamiin on suhtauduttava varauksella, sillä routimisen syy ei aina ole kunnossapitäjän ilmoittama. Lisäksi on huomioitava, etteivät kaikki roudan aiheuttamiksi tulkitut radan epätasaisuudet välttämättä johdu roudasta. (Saarinen 2008, Liikennevirasto 2011a, Kuula-Väisänen ja Nurmikolu 2012.)



Kuva 4.3. Kunnossapitäjien näkemys routaongelmien syistä vuosina 2003–2009 (Liikennevirasto 2011).

4.4 Routaongelmien syiden analysointi

Routaongelmien syiden analysointi on haastavaa ja samassa ongelmakohteessa vaikuttaa usein lukuisia routimiseen johtavia syitä. On myös mahdollista, että etenkin keväisin radan vaurioita tulkitaan roudan aiheuttamiksi, vaikka kyse on ratarakenteen materiaalien luonnollisesta ikääntymisestä ja siten laadun huononemisesta. Suomen rataverkolla on kohteita, joissa esimerkiksi tukikerros on tehty 60-luvulla, joten sepeliaines alkaa olla elinkaarensa lopussa, mikä näkyy muutoksina radan geometriassa. Vanhoilla pehmeän pohjamaan varaan perustetuilla radoilla esiintyy myös paikoin ratarakenteiden painumia, jotka tulee erottaa routavaurioista. Lisäksi rataosuuksien teknisiin epäjatkuvuuskohtiin voi syntyä painumia roudan sulamispehmenemisen aikana, kun rakenteiden jäykkyyserot korostuvat. Kyse ei siis yleensä ole varsinaisesta routimisesta.

Suomen rataverkoston 150-vuotisen historian aikana ratarakenteille asetetut vaatimukset ovat ehtineet muuttua monesti ja radan rakentamisessa, kunnossapidossa sekä peruserustustöissä on ollut käytössä useita erilaisia menetelmiä. Aikaisemmin on esimerkiksi ollut tapana rakentaa uudet rakenteet vanhojen rakennekerrosten päälle.

Valtaosa alusrakenteista on lisäksi rakennettu 1940-luvulla, eikä rakennemateriaaleille ole ollut käytössä laatuvaatimuksia ennen 1960-lukua. Vanhojen rataosuuksien routimattomien kerrosten rakennepaksuudet ovatkin 2000-luvun ohjeisiin verrattuna valtaosin alimitoitettuja ja alusrakenteissa on käytetty routivia rakennemateriaaleja. Lisäksi 2000-luvulla ratarakenteisiin kohdistuu huomattavasti suurempi dynaaminen kuormitus kuin vuosisataa aikaisemmin. (Saarinen 2008, Liikennevirasto 2011a.)

Saarisen (2008) diplomityössä on selvitetty olemassa olevien ratojen alusrakenteissa käytettyjen sora- ja hiekkamateriaalien routimisherkkyyttä. Työssä otettiin rataverkolta yhteensä 60 näytettä 30:stä eri kohteesta, joissa kaikissa oli havaintoja routimisen aiheuttamista haitoista. Routanousukokeiden tulokset osoittivat, että näytteistä yli 60 % ylitti Nurmikolun (2006) radan rakennemateriaaleille arvioiman käytännöllisen routimattomuuden rajan. Tutkimuksessa saadut tulokset osoittavat, että ratojen alusrakennekerroksissa on monissa paikoissa routimisherkkää materiaalia. Paikoin on myös mahdollista, että routivaa pohjamaata on sekoittunut alusrakenteeseen.

Routaongelmia ratarakenteessa aiheuttavat myös vanhat routaeristelevyt, jotka ovat vettyessään menettäneet huomattavasti lämmöneristyskykyään, eivätkä eristeet enää estä roudan tunkeutumista routivaan pohjamaahan. Lisäksi etenkin maa- ja kalliroleikkauksissa puutteelliset alus- ja päällysrakenteen kuivatusjärjestelyt luovat otolliset olosuhteet routavaurioiden kehittymiselle, koska jäälinsien muodostumisvyöhykkeeseen on saatavilla vettä. Routavaurion syynä voi olla myös ylikäinen, jauhaantunut tukikerrossepeli, sillä hienoaineksen suuri määrä pienentää materiaalin hydraulista johtavuutta ja vedenpidätyskyvyn kasvu mahdollistaa routimisen. Keväisin roudan sulamispehmenemisen aikaan radan päällysrakenteeseen voi syntyä pysyviä muodonmuutoksia, kun hienontuneen tukikerroksen kantavuus pienenee. (Lim 2004, Liikennevirasto 2011a.)

Myös ilmastoteknisillä olosuhteilla ja tekijöillä on vaikutusta roudan kehittymiseen. Roudan tunkeutumisen syvyyteen vaikuttavat muun muassa talven pakkasmäärä, pakkaskautta edeltäneiden sateiden määrä, lumipeitteen syvyys sekä paikalliset vaihtelut ilmastossa. (Liikennevirasto 2011a.)

4.4.1 Tukikerrosmateriaalin hienoneminen

Radan tukikerrosmateriaalina käytetään yleisimmin raidesepeliä, joka on karkearakeista murskattua kiviainesta. EU-maissa vuonna 2004 voimaan tullut CEN-normi määrää, että raidesepelin on kuuluttava johonkin taulukossa 4.1 esitetystä kuudesta (A–F) raekokojakaumaluokasta. Suomessa käytössä ovat luokat C, E ja F siten, että pääradoilla käytetään luokkaan F kuuluvaa sepeliä ja vähäliikenteisillä radoilla sekä sivuradoilla käytetään luokan E sepeliä. Luokkaan E kuuluu myös uusioraidesepeli, johon on lisätty luokan F sepeliä. Luokan C sepeliä käytetään kuormaus- ja vaihtotyöalueilla. Tukikerrosmateriaalilta edellytetään pitkää käyttöikää ja elinkaarensa aikana sepeli joutuu toimimaan rankassa kuormitusympäristössä. Ympäristö-, liikenne-

ja kunnossapitorasitus hienontaa tukikerrosainesta ja muuttaa ratarakenteen muotoa, jolloin raidegeometrialle asetettujen tarkkojen tasaisuusvaatimusten täyttyminen vaarantuu. Hienoaineksella tarkoitetaan yleensä raekokoa 0,06–0,075 mm pienempää ainesta. (Nurmikolu 2004, Ratahallintokeskus 2004c.)

Taulukko 4.1. Raidesepelin rakeisuusvaatimukset standardin SFS-EN 13450 mukaan (Ratahallintokeskus 2004c).

Seulan koko mm	Raidesepelin raekoko 31,5...50 mm			Raidesepelin raekoko 31,5...63 mm		
	Läpäisy massaprosentteina					
	Rakeisuusluokka					
	A	B	C	D	E	F
80	100	100	100	100	100	100
63	100	97...100	95...100	97...99	95...99	93...99
50	70...99	70...99	70...99	65...99	55...99	45...70
40	30...65	30...70	25...75	30...65	25...75	15...40
31,5	1...25	1...25	1...25	1...25	1...25	0...7
22,4	0...3	0...3	0...3	0...3	0...3	0...7
31,5...50	≥ 50	≥ 50	≥ 50	-	-	-
31,5...63	-	-	-	≥ 50	≥ 50	≥ 85

HUOM. 1. Seulan 22,4 mm läpäisylle asetetut vaatimuksia sovelletaan vain tuotantopaikalta otetulle raidesepelinäytteelle
 HUOM. 2. Tietyissä olosuhteissa 25 mm seulaa voidaan käyttää 22,4 mm seulan sijasta, tällöin raja-arvona käytetään 0...5 (0...7 luokassa F).

Tukikerrossepin käyttöikä määräytyy pääasiassa kiviaineksen lujuusominaisuuksien, liikennekuormituksen ja ratarakenteen muiden komponenttien kunnon perusteella. Suomessa raidesepelin uusimis- ja puhdistamistarvetta mitataan rakeisuusluvulla, jonka selvittämiseksi otetaan ratapölkyn pään vierestä tukikerrosnäytteet kolmelta eri syvyydeltä ja lasketaan yhteen 1, 8 ja 25 mm seulojen läpäisyprosenttien summa. Kun tarkasteltavan rataosuuden keskimääräinen rakeisuusluku ylittää arvon 88, sepele on selkeästi hienontunut ja puhdistusraja on saavutettu. Myös maatutkalla voidaan tutkia tukikerroksen kuntoa. Maatutkaluotauksella saadaan tietoa tukikerroksen ominaisuuksista nopeasti ja kustannustehokkaasti. (Ratahallintokeskus 2000, Väisänen ja Nurmikolu 2012.)

Hienoaineksen määrä ja laatu vaikuttavat tukikerroksen routimisherkkyyteen, sillä pieneksi jauhautunut kiviaines estää tai hidastaa veden virtausta sepelekerroksen läpi, jolloin alun perin routimaton materiaali saattaa muuttua routivaksi. Tukikerroksen hienoaines voi tunkeutua myös alusrakenteeseen, mikä on erityisen ongelmallista, sillä alusrakenteen hienonemista on vaikea arvioida ja alusrakenteen vaihto on huomattavasti hankalampaa kuin tukikerrosainemateriaalin uusiminen. On myös mahdollista, joskin harvinaista, että tukikerrokseen nousee savea tai muuta hienorakeista ainesta radan alemmista kerroksista. Routimisen aiheuttamat routanousut radan rakennekerroksissa vaikeuttavat raidegeometrian ylläpitoa halutulla tasolla. (Ratahallintokeskus 2000, Nurmikolu 2004.)

4.5 Ongelmien havaitseminen ja seuranta

4.5.1 Seuranta

Routatilanteen kehittymistä rataverkostolla seurataan jatkuvasti, jotta liikenne raiteilla kulkisi mahdollisimman turvallisesti, täsmällisesti ja luotettavasti. Lisäksi samanaikaisesti tehdään kunnossapitotöitä routavaurioiden ja nopeusrajoitusten välttämiseksi. Routatilanteen tarkkailu on kunkin rataosan kunnossapitäjän vastuulla ja kun vaurio havaitaan, kohdalle asetetaan nopeusrajoitus. Rajoituksen suuruus on minimissään 50 km/h ja pääsääntöisesti 80 tai 100 km/h. (Liikennevirasto 2011b.)

4.5.2 Radantarkastus

Radantarkastuksen tärkeimpänä päämääränä on varmistaa turvallinen liikennöinti sekä radan käytettävyys. Tarkastuksella huolehditaan myös siitä, että radan liikenteellinen palvelutaso täyttää sille asetetut tavoitteet. Tietoa radan kunnosta tarvitsevat kunnossapitäjät, urakoitsijat, rataisännöitsijät, valvojat, suunnittelijat, Liikennevirasto sekä Liikenteen turvallisuusvirasto. Tarkastustietojen perusteella toteutetaan kunnossapitotyön ohjaus, hyväksyntä ja valvonta. Lisäksi tietoja käytetään, kun suunnitellaan radanpitotöiden kohdentamista paikallisiin virhekohtiin ja laajempien kunnossapito-ohjelmien ohjelmointia mahdollisimman taloudellisesti. (Ratahallintokeskus 2006.)

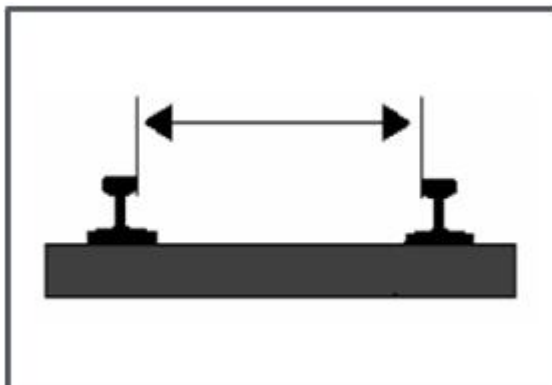
Radan geometrian tarkastusmenetelmiä ovat koneellinen tarkastus tarkastusvaunulla, kävelytarkastus sekä tarkastus liikkuvasta kalustosta. Kävelytarkastus on säännöllinen näköhavaintoihin perustuva radan kunnan tarkastus, jonka lähtötietoina otetaan huomioon tarkastusvaunumittausten ja muiden tarkastusten tulokset. Kävelytarkastuksesta laaditaan tarkastusdokumentti. Liikkuvasta kalustosta tehtävä tarkastus taas tehdään tavallisimmin junan tai veturin ohjaamosta käsin. Pääosin aistinvaraisesti havainnoidut raidevirheet tutkitaan tarvittaessa tarkemmin muilla radantarkastusmenetelmillä. Tarkastaja voi junaturvallisuuden varmistamiseksi asettaa kunnossapitoa edellyttävälle rataosalle nopeusrajoituksen ja todetut virheet ilmoitetaan radan kunnossapidosta vastaavalle henkilölle. (Ratahallintokeskus 2006.)

Radan kunnossapitotaso määrää, kuinka usein ja millä menetelmillä rata on tarkastettava. Radan kunnossapitotaso määritetään liikenteellisten tarpeiden, päällysrakenteen ja maksiminopeuden perusteella. Kunnossapitotasoja on kahdeksan ja niitä merkitään tunnuksilla 1AA, 1A, 1, 2, 3, 4, 5 ja 6. Esimerkiksi korkeimmalla kunnossapitotasolla 1AA tarkastusvaunumittauksia tehdään kuusi kertaa vuodessa, mutta pahoina routavuosina on suoritettu ylimääräisiä raiteentarkastusajoja routimisen aiheuttamien raidevirheiden ja nopeusrajoitustarpeiden selvittämiseksi. Radantarkastusmittauksia on aikanaan tehty muun muassa resiinalla, mutta tarkastusmenetelmät ovat vuosisatojen kuluessa kehittyneet ja nykyisin Suomessa kerätään tietoa roudan aiheuttamista raidevirheistä radantarkastusvaunu EMMA:lla (kuva 4.4). (Ratahallintokeskus 2006, Levomäki 2007.)

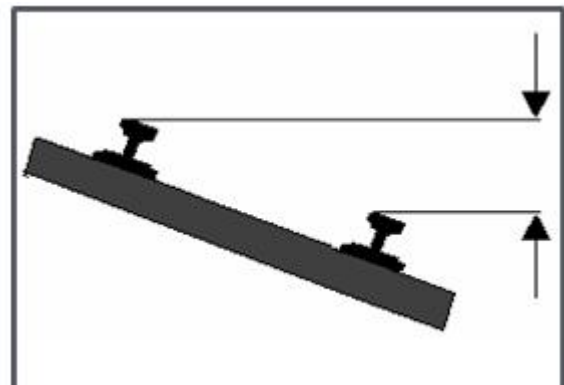


Kuva 4.4. Radantarkastusvaunu EMMA (Levomäki 2007).

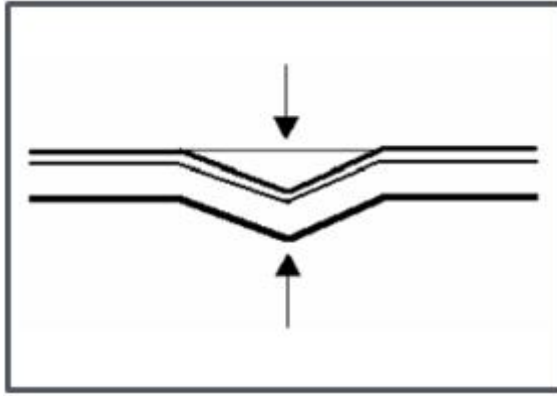
Tarkastusvaunumittauksilla selvitetään raiteen geometrista kuntoa ja sähköradan ajolangan suhteellista asemaa raiteeseen nähden. Mittauksilla valvotaan geometrinen turvallisuusvaatimusten täyttymistä sekä raiteen ja ajolangan geometrista kuntoa ja laatua. Mitattavat geometriset suureet on esitetty kuvissa 4.5a–4.5e. Raidelevyden (kuva 4.5a) nimellismitta on 1524 mm ja sillä tarkoitetaan lyhintä etäisyyttä kiskojen kulkureunojen välillä mitattuna kiskon kulkupintojen suuntaisesti. Raiteen kallistuksella (kuva 4.5b) kuvataan sisä- ja ulkokiskojen välistä korkeuseroa. Kallistus mitataan joko kiskon kulkupintojen ja vaakasuoran horisontin välisenä kulmana tai yleisemmin kahden kiskon kulkupinnan korkeuserona. Korkeuspoikkeamalla (kuva 4.5c) tarkoitetaan kiskon kulkupinnan teoreettisen jänteen keskipisteen etäisyyttä kiskon todellisesta kulkupinnasta. Kierous (kuva 4.5d) tarkoittaa vierekkäisten kiskojen kallistuksen muutosta. Nuolikorkeudella tarkoitetaan kaaren jänteen keskipisteen etäisyyttä kaaresta (kuva 4.5e). Säännöllisessä ympyränkaaressa nuolikorkeuden maksimiarvo on jänteen keskikohdalla. Säännöllisessä suorassa nuolikorkeus on nolla. (Ratahallintokeskus 2005.)



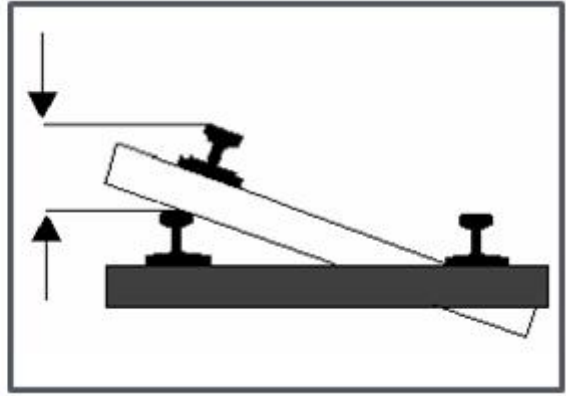
Kuva 4.5a. Raidelevyys.



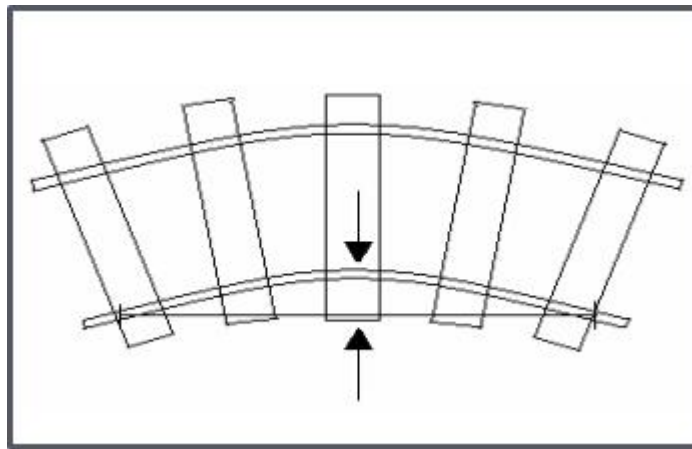
Kuva 4.5b. Kallistus.



Kuva 4.5c. Korkeuspoikkeama.



Kuva 4.5d. Kierous.



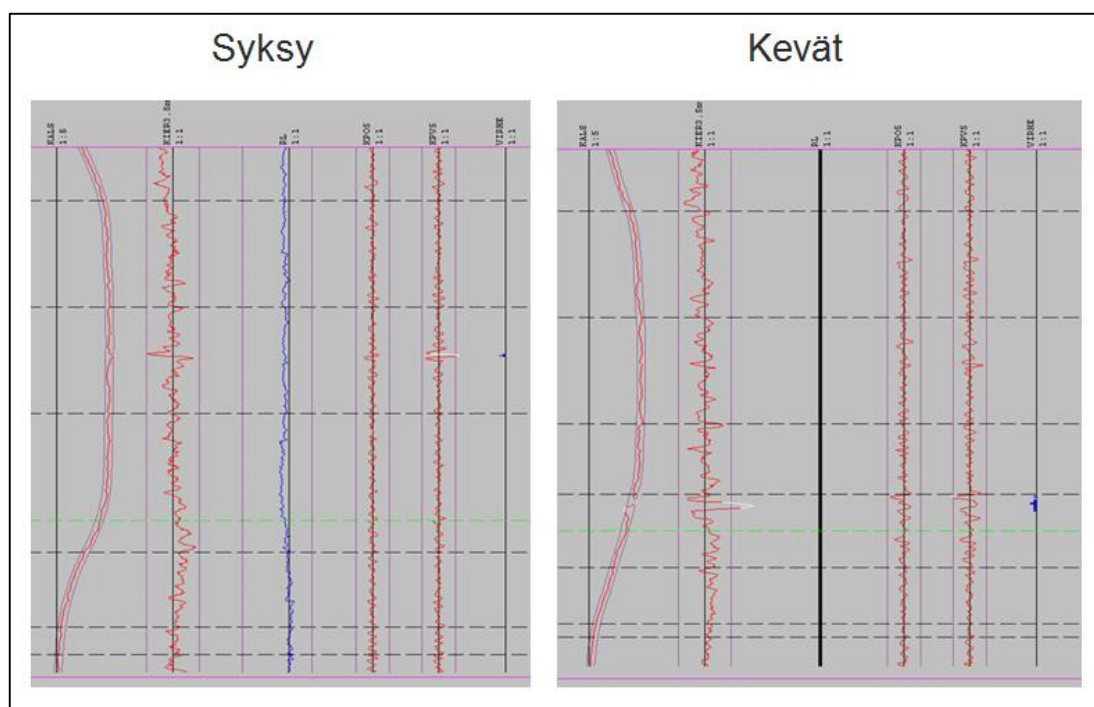
Kuva 4.5e. Nuolikorkeus.

Tarkastusvaunumittauksissa mitattavat geometriset suureet jaetaan kolmeen eri virheluokkaan, jotka ovat C-, D- ja *-luokka. Virheluokille on asetettu kunnossapitotasokohtaiset raja-arvot. C-luokan virheellä tarkoitetaan alkavaa virhettä, jonka kehittymistä on tarkkailtava ja joka tulee mahdollisesti korjata. D-luokan virhe on lähitulevaisuudessa korjattava virhe, joka on sisällytettävä kunnossapitosuunnitelmaan ja korjattava lähitulevaisuudessa. D-luokan virheet vaikuttavat kilometrin virhemetrimäärään. Jos tarkastuksissa havaitaan *-luokan virhe, kunnossapitäjän on arvioitava välittömästi virheen edellyttämät toimenpiteet ja tarvittaessa laskettava rataosan nopeusrajoitusta, kunnes virhe on korjattu. Nopeusrajoituksen suuruus on määriteltävä siten, ettei virhe sitä vastaavalla kunnossapitotasolla enää ole *-luokan virhe. Jos kunnossapitotason alentamisen jälkeenkin virhe kuuluu *-luokkaan, virhe arvioidaan tapauskohtaisesti ja liikenne keskeytetään tarvittaessa. (Ratahallintokeskus 2005, Ratahallintokeskus 2006.)

Raidegeometriamittauksen tuloksena saadaan A3-kokoinen paperinen käyrätuloste, virhelistaus sekä vaihde- ja kilometriyhteenvedot jokaiselta mitatulta kilometriltä. Yksittäisen kilometrin osalta kuntotiedot selviävät kyseisen kilometrin km-yhteenvedosta. Kilometrin arvostelun perusteena on virhemetrimäärä, joka saadaan laskemalla kyseisellä kilometrillä esiintyneiden D-luokan virheiden pituuksien

metrimäärä siten, että päällekkäin esiintyvät eri suureiden D-luokan virheet lasketaan mukaan vain kerran. Raiteen kokonaiskunto tietyllä rataosuudella saadaan selville välin rataosakohtaisesta yhteenvedosta. Rataosan päällysrakenteen geometrista kuntoa kuvataan geometrisen kunnan palvelutaso –luvulla. Geometrisen kunnan palvelutaso (GKPT) on prosenttiluku ja se lasketaan tarkasteltavan rataosan kilometrien arvosteluista. Kuntoindeksin maksimi-arvo on 100 %. (Ratahallintokeskus 2006.)

Routimisen vaikutusten selvittämisen kannalta tärkeitä tarkastussuureita ovat kallistus, korkeuspoikkeama ja kierous. Mittausvaunun tulosteista nähdään, mikäli raide on roudan suorasta tai välillisestä vaikutuksesta nousnut, painunut tai siirtynyt. Kuvassa 4.6 on esimerkki routivan kohteen käyrätulosteista syksyllä ja keväällä. Roudan aiheuttamat virheet voidaan erottaa muista radan epätasaisuutta aiheuttavista syistä vertaamalla syksyn ja kevään mittaustuloksia. Tietoa roudan aiheuttamista muutoksista raiteen asemassa saadaan myös veturinkuljettajilta. Suurin osa routa-ajan nopeusrajoituksista asetetaan kuitenkin EMMA:n ajojen tulosten perusteella. Yli-ikäisillä päällysrakenteilla on havaittu olevan nähtävissä roudan aiheuttamia vaikutuksia jo alkuvuodesta tammi- ja helmikuussa. Vaikutukset näkyvät lisääntyneinä kallistus- ja kierousvirheinä, jotka ovat jo osittain siirtyneet nuolikorkeusvirheisiin. (Liikennevirasto 2011b, Levomäki 2012a.)



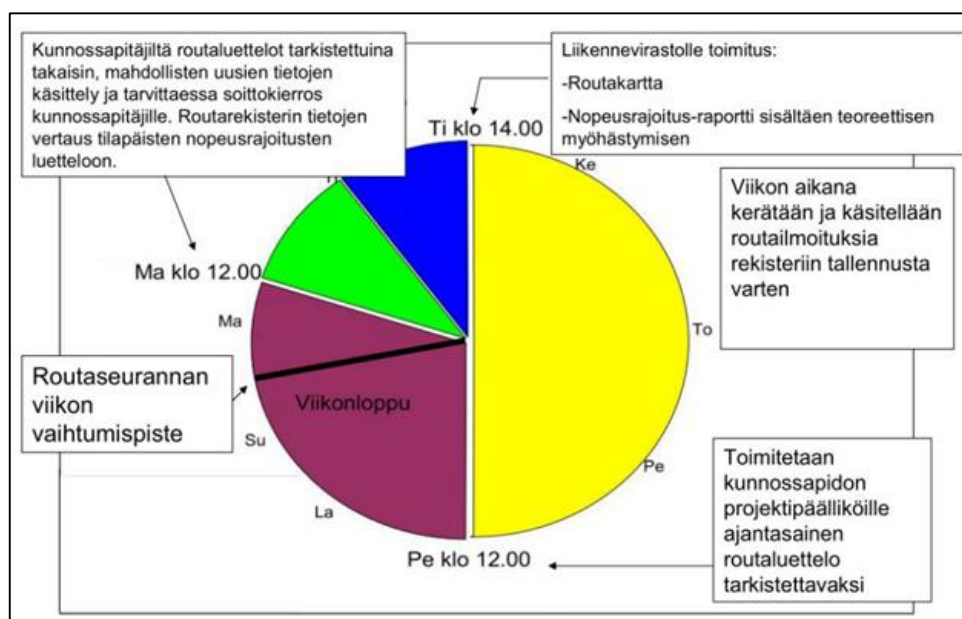
Kuva 4.6. Tarkastusvaunumittauksen routivan kohteen käyrätulosteet syksyllä ja keväällä (Levomäki 2012a).

4.5.3 Routapaikkarekisteri

Liikennevirasto ohjaa rataverkon liikennöintiä, kunnossapitoa ja radan peruseräparannuksia kattavan hallintajärjestelmän ja erinäisten rekisterien avulla. Routahaittojen seuraamista varten on perustettu routapaikkarekisteri, jota päivitetään routa-aikana marraskuusta heinäkuuhun. Ratojen kunnossapidosta vastaavat Liikenneviraston toimeksiannosta VR

Track Oy ja Destia Rail Oy. Kunnossapitäjät tekevät routapaikkailmoituksia, joiden perusteella rekisteriin kerätään mahdollisimman reaaliaikaista tietoa routakohteiden sijainneista, kiilauksista, asetetuista nopeusrajoituksista sekä lisätietoja paikkojen muista rakenteista tai syyarvioita. Suomen rataverkko on jaettu maantieteellisesti 12 erilliseen kunnossapitoalueeseen (liite 2) ja tietoja kerätään routapaikkarekisteriin kunnossapitoalueittain. Kerätyt tiedot kootaan vuosittain Roudan hallintaraportiksi, joka palvelee radan kunnossapidon ja radansuunnittelun ohjausta. Tietojen pohjalta pyritään tunnistamaan kaikki merkittävimmät routapaikat sekä routimisen syyt. Lisäksi pidemmän aikavälin tavoitteena on korjata kohteet routimattomiksi. (Ratahallintokeskus 2007, Liikennevirasto 2011a.)

Vuonna 2010 rataverkon routaongelmat olivat poikkeuksellisen suuria, minkä seurauksena roudan kehittymistä on alettu seurata aktiivisena kautena viikon tarkkailujaksoissa. Hiljaisempana routa-aikana rekisteriin kerätään tietoja kahden viikon välein. Kuvassa 4.7 on esitetty routaviikkokello, jossa kuvataan routapaikkarekisterin toiminta yhden viikon aikana aktiivisena kautena. Viikon kuluessa kerätään ja käsitellään routatietoa rekisteriin tallentamista varten. Kerättyjen tietojen oikeellisuus varmistetaan olemalla kunnossapitäjiin säännöllisesti yhteydessä ja toimittamalla rekisterin tiedot heille perjantaina tarkistettaviksi. Kunnossapitäjät palauttavat tarkistettut routaluettelot viikonlopun jälkeen maanantaina. Mahdollisten lisätarkistusten ja uusien tietojen käsittelyn jälkeen rekisterin tiedot toimitetaan radanpitäjälle routakartan ja nopeusrajoitusraportin muodossa routaviikon tiistaina. Routapaikkailmoitusten perusteella esille tulleet routapaikat analysoidaan lisäksi geoasiantuntijan toimesta. Asiantuntija käyttää hyväkseen rekisterin tietojen lisäksi tarpeen mukaan haastatteluja, lisäselvityksiä sekä arkistotietoa. Routakohteiden tietoja verrataan aikaisempiin vuosiin ja tarvittaessa asiantuntija voi antaa korjaussuosituksia. (Liikennevirasto 2011a.)



Kuva 4.7. Routaviikkokello (Liikennevirasto 2011a).

5 Routaongelmien korjaustoimenpiteet

5.1 Olemassa olevien ratojen routavaurioiden korjaaminen

Tässä luvussa käsitellään olemassa olevien ratojen routavaurioiden korjaamista. Käsittelyyn sisällytetään perinteisestä routimisesta, *in-situ routimisesta* sekä roudan sulamispehmenemisestä aiheutuvien vaurioiden korjaaminen.

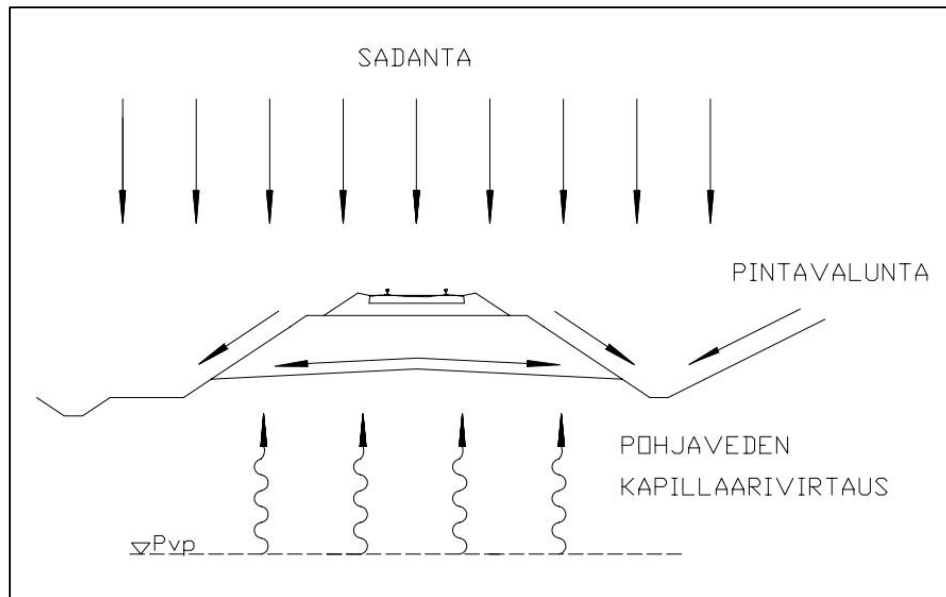
Jäälinsien muodostumisesta aiheutuvan routanousun syntyminen edellyttää nollan alapuolella olevaa lämpötilaa, jäätymisrintamaan saatavilla olevaa vettä ja routivaa maainesta. Jos yksikin edellytyksistä puuttuu tai toteutuu puutteellisesti, routimista ei tapahdu tai routiminen rajoittuu. Radan rakennekerrosmateriaalien jäätymistä tai veden kulkeutumista jäätymisvyöhykkeeseen ei kuitenkaan voida täysin rajoittaa, joten routimisen estämiseksi ratarakenteiden tulisi olla routimattomista materiaaleista rakennettuja ja lisäksi routivan pohjamaan routaantuminen pyritään estämään routamitoituksellisin keinoin. (Nurmikolu 2004.)

Roudasta aiheutuvia ongelmia voidaan vähentää tehokkaimmin kohdistamalla korjaustoimenpiteet routailmiön syihin. Suomessa olemassa olevien ratojen routakorjaustoimenpiteinä käytetään yleisimmin rakennekerrosmateriaalien vaihtoa routimattomiin, kuivatuksen parantamista, routalevyjen lisäämistä ratarakenteeseen ja tukikerrosmateriaalin seulontaa tai vaihtoa. Raiteen tukemista ja routakiilausta käytetään pienentämään roudan aiheuttamia muutoksia radan geometriassa.

5.2 Radan kuivatuksen parantaminen

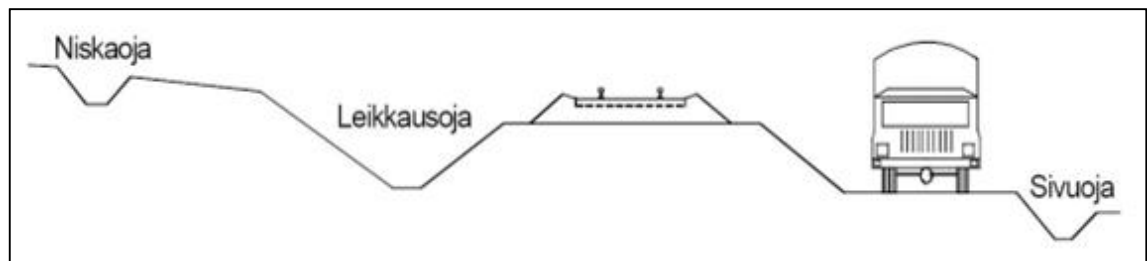
5.2.1 Yleistä radan kuivattuksesta

Kuvassa 5.1 on esitetty rataympäristössä radan rakenteeseen kertyvän veden lähteet. Kuivatuksen suunnitteluratkaisuilla pyritään estämään veden pääsy radan rakennekerroksiin, johtamaan vesi pois radan pinnalta, rakenteen sisältä ja radan lähiympäristöstä sekä torjumaan rakenteen läpi tapahtuva haitallinen veden virtaus, sillä vesi ratarakenteessa mahdollistaa routimisen ja heikentää rakenteen kantavuutta. Radan rakenteen kuivatus jaetaan pintakuivattukseen ja rakenteen kuivattukseen. Pintakuivattuksen tarkoituksena on koota ja johtaa pois radan ja rata-alueen pintavedet. Rakenteen kuivattuksella puolestaan pyritään johtamaan ratarakenteeseen päässeet vedet pois. Radan kuivatus järjestetään avo-, suoto- ja salaojin. Lisäksi voidaan käyttää hyväksi putkiviemäreitä ja rumpuja. Radan kuivatustarpeen suuruuteen vaikuttavat pääasiassa radan ulkopuolisen maaston pinnanmuodot, valuma-alueen laajuus sekä sadannan määrä. Kalliroleikkausten kuivattuksessa on lisäksi huomioitava kallion geologiset ominaisuudet sekä kalliroleikkauksen korkeus. (InfraRYL 2010.)



Kuva 5.1 Ratarakenteeseen päätyvän veden lähteet (muokattu lähteestä Charlier et al. 2009).

Pintakuivatuksessa vedet ohjataan ojiin tai hulevesiviemäriin sivu-, leikkaus-, niska- tai laskuojilla. Erilaisia pintakuivatusoja on esitetty kuvassa 5.2. Sivuojilla kootaan rata-alueelta ja sen ulkopuolelta tulevat pintavedet ja johdetaan ne sellaisiin maastokohtiin, että vedet saadaan ohjattua pois rata-alueelta. Sivuoja käytetään matalilla penkereillä, mutta ei kuitenkaan silloin, jos maa viettää selkeästi radasta pois päin. Lisäksi sivuoja käytetään korkeilla pengerosuuksilla ympäröivän maaston viettäessä radalle päin sekä silloin, kun sivuoja on osa esimerkiksi pellon tai metsän kuivatusjärjestelmää. Leikkausojilla kootaan ja johdetaan pois vedet maa- tai kallioleikkauksen kohdalla. Niskaojia käytetään leikkausojien yhteydessä estämään leikkauksen ulkopuolelta tulevien pintavesien virtaaminen leikkausluiskaan. Sivu-, leikkaus- ja niskaojat ovat yhteydessä laskuojiin, joiden kautta rata-alueelta tulevat kuivatusvedet ohjataan sellaiseen paikkaan, jossa ne eivät aiheuta haittaa tai vahinkoa ympäristölle. (InfraRYL 2010.)



Kuva 5.2. Pintakuivatusojatyyppejä (InfraRYL 2010).

Ratarakenteen kuivatus järjestetään avo-, suoto- tai salaojilla. Kuivatuksessa käytetään ensisijaisesti avo-oja. Sala- ja suoto-oja käytetään, jos avo-ojien käyttö ei ole teknisesti, maisemallisesti tai ympäristöllisesti perusteltua. Salaojitus toteutetaan salaojaputkilla. Putkissa on rei'itetyt seinämät, joiden kautta ratarakenteessa oleva vesi

pääsee putkeen hyvin vettä läpäisevästä ympäristäytteestä sekä mahdollisesti suodatinkankaasta. Salaojarakenteeseen kuuluu lisäksi tarkastusputkia ja -kaivoja. Suoto-ojilla nopeutetaan veden virtausta avo- tai salaojiin. Matalissa kallio- ja maaleikkauksissa rakenteen kuivatus toteutetaan leikkausojilla, suoto-ojilla tai tarvittaessa salaojilla. (InfraRYL 2010.) Ratarakenteen kuivatus on varmistettava rakennekerrosten alapintaan asti.

5.2.2 Kuivatuksen parannustoimenpiteet

Roudan muodostumisen edellytyksenä on ratarakenteeseen helposti saatavilla oleva kapillaarisesti nouseva tai rata-alueen sivuilta tuleva vapaa vesi. Kun ratarakenteen kuivatus ei toimi suunnitellusti ja rakenne kyllästyy vedellä, tapahtuu myös *in-situ routimista*. Varsinkin maa- ja kallioleikkauksissa routimisen syynä on usein ratarakenteen puutteellinen kuivatus. Suomen rataverkolla kuivatusongelmia esiintyy myös alavilla osuuksilla varsinkin, jos ratapenger on matala. Lisäksi, jos pohjaveden pinta on korkealla, kuivatus ei vanhoilla rataosuuksilla välttämättä toimi tehokkaasti. Radan kuivatusjärjestelyitä tehostamalla voidaan pienentää etenkin radan alusrakenteen routimista. Kuvassa 5.3 on tyypillinen kuivatusongelmista kärsivä kohde Suomen rataverkolla. Kuva on otettu Rantadalta kesällä 2012.

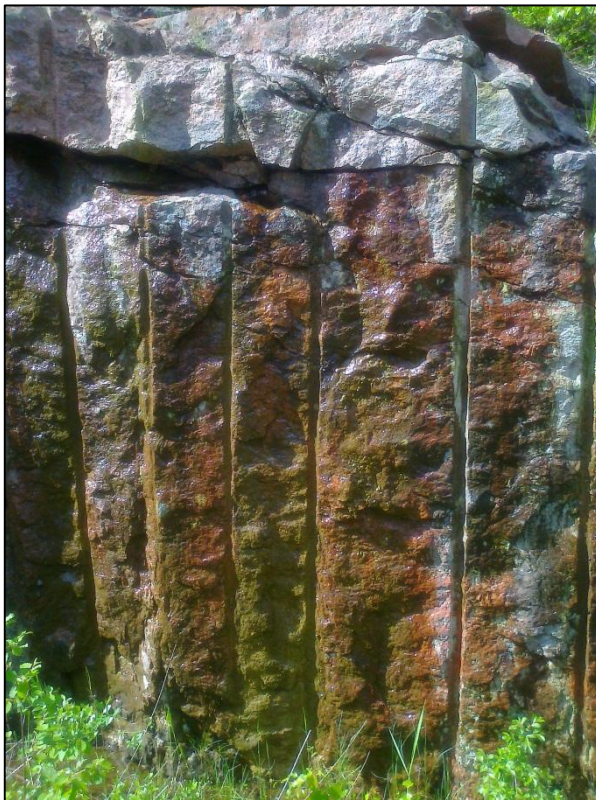


Kuva 5.3. Kuivatusongelmista kärsivä kohde Rantaradalla.

Kuvasta 5.3 on nähtävissä, että radan ojat ovat runsaan kasvillisuuden peitossa, eivätkä todennäköisesti toimi suunnitellusti. Tuuli ja vesi ovat kuljettaneet sivuojiin eloperäistä ainesta, joka on luonut otollisen kasvualustan kasvillisuudelle. Ojiin on saattanut myös valua sepeliä radan tukikerroksesta. Kuivatuksen parantamiseksi ojat tulee perata säännöllisesti kasvillisuudesta ja raidesepeleistä ja lisäksi veden virtauksen estävät tukkeutuneet ratarummut on puhdistettava. Ojien puhdistuksen suunnittelussa on huomioitava veden luonnollinen virtaussuunta ja tarvittaessa ojia on syvennettävä, jotta

vesi saadaan johdettua tehokkaasti pois rata-alueelta. Myös laskuojien toimivuus ja rumpujen riittävä määrä on varmistettava.

Erityisesti vanhojen kallioleikkausten kuivatus on monin paikoin osoittautunut puutteelliseksi, minkä vuoksi kallioleikkauksen ulkopuolelta valuvat pintavedet sekä leikkauksen kallioraoista tuleva vesi voivat pakkasilla jäätyä kallio-ojiin sekä kallioseinämiin aiheuttaen *in-situ routimista* paannejääongelmien muodossa. Kuva 5.4 on myös Rantaradalta ja siitä havaitaan, että lämpimänä kesäpäivänäkin kallioleikkauksen pinta on kostea. Vanhojen kallioleikkausten pohjat ovat usein epätasaisia ja pohjalla on painanteita, joihin vesi pääsee kerääntymään. Kallion pinnalle ja ojiin kertyvän veden sekä routivaksi muuttuneen tukikerrosmateriaalin yhteisvaikutus saattaa johtaa radan päällysrakenteen routimiseen. Kallioleikkauksen kuivatusta voidaan parantaa puhdistamalla olemassa olevat leikkausojat ja mikäli kuivatussyvyys ei ole riittävä, louhimalla ojia syvemmiksi. Lisäksi olemassa olevaan ojaan tai louhimalla tehtyyn kanaaliin voidaan lisätä salaoja. Epätasaiselle kallioleikkauksen pohjalle muodostuvat vesitaskut voidaan poistaa betonoimalla leikkauksen pohja.



Kuva 5.4. Kallioleikkauksen kallioraoista valuvat vesimäärät voivat olla merkittävän suuria.

Kun sateen tai sulamisen intensiteetti ylittää maan imeytäkyvyn, kaikki vesi ei ehdi imeytyä maahan ja kaltevassa maastossa vesi alkaa virrata pintavaluntana. Rataleikkauksissa kasvillisuutta voitaisiin käyttää pienentämään radalle ohjautuvaa valuntaa, sillä kasvipeite estää maanpintaa pitkin valuvan veden nopean virtauksen ja hidastaa näin pintavalunnan kerääntymistä. Osa sadantana tulevasta vedestä myös

pidättäytyy kasvien pinnoille ja haihtuu interseptiona. Lisäksi kasvit suojaavat maanpintaa kovettumiselta ja maaperän imeyntäkyky on kuohkeassa juurivyöhykkeessä huomattavasti suurempi kuin kasvittomilla alueilla, jolloin pintavalunta pienenee entisestään. (Huttula 2013.)

5.3 Tukikerroksen seulonta ja vaihtaminen

Tukikerroksen seulonta on radan päällysrakenteen peruseräparannustoimenpide, jossa tukikerros puhdistetaan siten, ettei raidetta jouduta purkamaan. Tukikerrosmateriaalina yleisesti käytetty raidesepeli jauhautuu hienorakeiseksi liikenteen kuormituksen ja radan kunnossapitotoimenpiteiden vuoksi. Sepelin murskautuessa pienempirakeiseksi tukikerroksen kantavuus heikkenee ja lisäksi hienoainesta sisältävä raidesepeli routii puhdasta sepeliä helpommin. Sepelinpuhdistukseen ryhdytään, kun tukikerrosmateriaalin ominaisuudet ovat heikentyneet sellaiselle tasolle, ettei peruskunnossapidolla saada pidettyä raidetta halutussa asemassa. Sepelinseulonnassa tukikerroksesta poistetaan hienontunut kiviaines ja laatuvaatimukset täyttävät karkearakeiset maapartikkelit palautetaan takaisin rataan. Puhdistamisen yhteydessä tukikerrosmateriaali vähenee, joten poistetun kiviaineksen tilalle lisätään uutta karkearakeista raidesepeliä. (Nurmikolu ja Kolisoja 2010.)

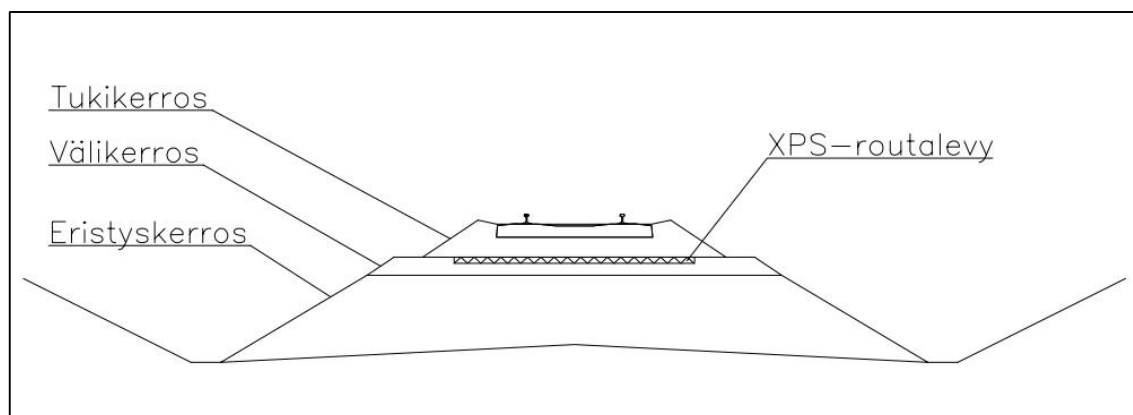
Tukikerroksen puhdistaminen suoritetaan sepelinpuhdistuskoneella. Koneen alla liikkuvan kaivuketjun terät irrottavat vanhan tukikerrosmateriaalin pölkkyjen alta ja siirtävät materiaalin kuljetinhihnalle, jota pitkin kiviaines kuljetetaan seulontalaitteeseen. Seulottu raidesepeli palautetaan rataan ja tukikerrosmateriaaliksi kelpaamaton kiviaines siirretään radan sivuun tai kuljetetaan pois raiteella liikkuvalla kuljetusvaunulla. Poistetun hylkysepin tilalle lisätään uutta karkearakeista kiviainesta ja valmis sepelipatja tiivistetään raiteella liikkuvalla tiivistyskoneella eli stabilisaattorilla. Seulonnan yhteydessä ratarakenteeseen voidaan asentaa routaeristelevyt. Valmiin tukikerroksen materiaali ei saa sisältää epäpuhtauksia, sallittua raekokoa isompia kiviä tai muita kiviaineslajikkeita. (Ratahallintokeskus 2004a.)

Tukikerros vaihdetaan kaivamalla, jos seulonta ei ole taloudellisesti kannattavaa tai sitä ei voida suorittaa esimerkiksi tilanpuutteen vuoksi. Kaivamalla suoritettava tukikerroksen vaihto voidaan joutua tekemään muun muassa vaihteiden, taseristeysten ja siltojen päiden kohdalla. Toimenpiteessä vanha tukikerros poistetaan kaivinkoneeseen asennettavalla massanvaihtokauhalla ja tilalle tuodaan uutta tukikerrosmateriaalia. (Ratahallintokeskus 2004a.)

5.4 Routaeristelevyt

Routivan ratarakenteen ensisijaisena korjaustoimenpiteenä käytetään routivien materiaalien vaihtoa routimattomiin. Routasuojaus toteutetaan toissijaisesti routalevyillä. Routalevyillä saadaan lisättyä rakenteen lämmöneristävyyttä ja estettyä tai vähennettyä radan rakenteen alla olevien maakerrosten routimista. Routalevyt voidaan asentaa olemassa olevan eristyskerroksen pintaan tavallisesti kaivamalla ratarakennetta

eristyskerroksen yläosaan asti. (Ratahallintokeskus 2008, InfraRYL 2010.) Levyjen asentaminen kaivinkoneella on kuitenkin hyvin hidasta, eikä etenään runsasliikenteisillä radoilla ole mahdollisuutta pitkiin työrakoihin. Levyt lisätäänkin ratarakenteeseen tavallisimmin tukikerroksen seulonnan yhteydessä, jolloin levy asennetaan suoraan tukikerroksen alapuolelle (kuva 5.4). Eristelevyn alla olevan routimattoman alusrakennekerroksen vähimmäispaksuus on 300 mm, kun alusrakenne tehdään luonnonmateriaaleista ja 450 mm, kun alusrakenteessa käytetään murskattua kiviainesta. Routalevyjen käyttöikävaatimus on 40 vuotta.



Kuva 5.4. Tukikerroksen seulonnan yhteydessä asennettavan routalevyn sijainti ratarakenteessa.

Routalevyjen mitoituksessa noudatetaan Suomessa Ratateknisiä ohjeita (RATO). Käytettävät levyvahvuudet ovat 40 mm, 60 mm, 80 mm, 100 mm ja 120 mm. Levyn paksuuden valintaan vaikuttavat radan alusrakenneluokka, mitoituspakkasmäärä sekä vuotuinen ilman keskilämpötila. Ratarakenteen maa-ainekset puristuvat levyn pintaosiin, mistä seuraa levyjen lujuuden alenemista ja lämmöneristyskyvyn huononemista. Maamateriaalien levyjen toimintaa heikentävä vaikutus on otettava huomioon levyn paksuuden mitoituksessa sekä ratatyömaalla käytettävien työkoneiden ja -menetelmien valinnassa. (Ratahallintokeskus 2008.)

Kun eristelevyt lisätään rakenteeseen sepelinpuhdistuksen yhteydessä, levyjen asentamista varten sepelinpuhdistuskoneen seulaan on vaihdettava leveämpi puomi. Lisäksi koneeseen liitetään vaunut, joissa eristelevyt kuljetetaan asennuspaikalle. Levyt tulevat vaunusta siirtohihnaa pitkin tasatulle alustalle ja ne asennetaan paikoilleen käsin. Levyjen mitoituksessa on huomioitava, ettei eristyslevyjä asennettaessa levyjen ylä- tai alapuolelle voida tehdä suojahiekkakerroksia. Jos suojahiekkakerrokset puuttuvat, levyn paksuuteen lisätään 10 mm. Levyjen säilytys, käsittely ja asentaminen on tehtävä työmaalla oikeaoppisesti, sillä levyjen varomaton käsittely huonontaa levyjen lämmöneristyskykyä. Eristyskyky heikentyy lisäksi rakenteeseen asennetun levyn kastuessa, sillä levyjen ilmahuokosiin pääsevä vesi lisää solumuovin lämmönjohtavuutta. (Ratahallintokeskus 1998, Hölttä 2011.)

Routalevyjen materiaalina käytetään suulakepuristettua polystyreenimuovia (XPS) tai paisutettua polystyreenimuovia (EPS). Varsinaisessa ratarakenteessa routaeristelevynä on käytettävä InfraRYL:n mukaisesti suulakepuristettuja XPS-routalevyjä, sillä on huomattu, että aikaisemmin käytössä olleet EPS-levyt ovat muun muassa vettyneet ja rikkoutuneet käytössä. Erityistapauksissa, kuten ratojen laiturirakenteiden routasuojauksessa on sallittua käyttää RHK:n hyväksynnän saaneita EPS-routalevyjä. Solumuovi soveltuu erityisen hyvin routaeristemateriaaliksi, sillä se on rakenteeltaan umpinainen sekä tasalaatuinen ja puhdas ilma toimii lämmöneristeenä suljetuissa ilmahuokosissa. Lisäksi EPS- ja XPS-tuotteet eivät johda vettä kapillaarisesti ja tiiviin solurakenteensa vuoksi ne kestävät kosteutta lahoamatta tai homehtumatta. Solumuovilla on myös hyvä maaperässä normaalisti olevien suolojen-, happojen- ja emästensietokyky. Suuren puristuslujuutensa vuoksi solumuovi kestää myös hyvin pitkäaikaista raskasta liikennekuormitusta. (Jääskeläinen 2009, Hölttä 2011.)

Ajan kuluessa on huomattu, etteivät kaikki rataverkolle asennetut routalevyt ole täyttäneet niille asetettuja vaatimuksia. Levyissä on havaittu sekä valmistus- että laaturvirheitä, eivätkä heikkolaatuiset levyt ole kestäneet nykyisen akselikuorman aiheuttamaa puristusta. Liikennevirasto on lisäksi asettanut tavoitteeksi korottaa liikkuvan kaluston suurinta sallittua akselipainoa 250kN:iin kaikilla tärkeimmillä rataosilla vuoteen 2020 mennessä. Akselipainon korotus lisää ratarakenteeseen kohdistuvaa rasitusta ja nostaa siten entisestään routalevyjen vaurioitumisriskiä. On tutkittu, että akselikuorman korottaminen voi aiheuttaa levyn pinnan rikkoutumisen jopa vuodessa. Riskiä voidaan kuitenkin pienentää nostamalla eristelevyjen puristuslujuusvaatimusta nykyisestä 450kPa:ista 500kPa:iin. (Koskela 2011.)

5.5 Massanvaihto

Geoteknisessä termistössä massanvaihdolla tarkoitetaan pohjanvahvistusmenetelmää, jossa huonosti kantava pohjamaa korvataan kantavalla maamateriaalilla. Tässä työssä massanvaihdolla tarkoitetaan radan alusrakenteen tai pohjamaan routivien materiaalien vaihtamista routimattomiin roudattomaan syvyyteen asti tai routalevyn alle tehtävää massanvaihtoa. Rataympäristössä etenkin syvät pohjamaan massanvaihdot ovat hankalia ja hitaita toteuttaa. Rataympäristössä myös työrajojen pituus asettaa massanvaihdon suorittamiselle haasteita.

5.6 Routakiilaus

Routakiilausta käytetään routimisen aiheuttamien raiteen pituussuuntaisten epätasaisuuksien ja kallistusvirheiden tilapäiseen korjaamiseen keväisin. Kiilauksessa raide kiilataan sellaiseen asemaan, että radalla voidaan liikennöidä rataosuuden normaaleilla nopeusrajoituksilla. Puuratapölkköraide kiilataan vanerista valmistetuilla kiiloilla. Betoniratapölkköraiteen kiilaus tehdään pölkyn kiinnitystavasta riippuen joko käyttämällä kiinnitysrousia ja kumisia välilevyjä tai käyttämällä erityisiä routakiilausvälilevyjä. Kiilausta käytetään, kun raidetta ei voida korjata tavanomaisilla nosto- ja tukemistoimenpiteillä. Kiilaus voidaan korvata alentamalla suurinta sallittua

nopeutta tilapäisesti, jos kiilaustarpeen muuttuminen on niin nopeaa, ettei sitä voida kohtuudella hallita. Roudan sulaessa kiilauspaksuutta pienennetään vähitellen. (Ratahallintokeskus 2000, Ratahallintokeskus 2002.)

5.7 Raiteen tuenta

Routanousujen aiheuttamia epätasaisuuksia raidegeometriassa voidaan tasoittaa raiteen tuennalla. Toimenpiteessä raidetta siirretään sivusuunnassa ja nostetaan suunnitellulle tasolle, minkä jälkeen tukemiskoneen hakuilla työnnetään raidesepeliä pölkyn alle jääneeseen tyhjään tilaan. Tukikerrossepelin tiivistäminen nostaa raiteen oikeaan asemaan, mutta useita kertoja toistuessaan toimenpide hienontaa tukikerrosmateriaalia, joten tarpeetonta tukemista on vältettävä. (Lim 2004.)

5.8 Korjaustoimenpiteen valinta

Kunnossapidon suunnittelua varten, oikeiden perusparannustoimenpiteiden valitsemiseksi ja siten kustannussäästöjen saavuttamiseksi on tunnistettava, aiheutuuko routiminen ongelmista radan päällysrakenteessa, alusrakenteessa vai pohjamaassa. Erityisesti on huomioitava, ettei routavaurioiden syynä aina ole roudan tunkeutuminen routivaan pohjamaahan, jos alus- tai päällysrakennemateriaali on routimisherkkää. Routimisen mekanismi on monimutkainen ja routavauriot syntyvät monesti useiden tekijöiden yhteisvaikutuksesta. Oikeiden routimiseen johtaneiden syiden selvittäminen on kuitenkin ensisijaisen tärkeää, sillä väärin kohdennetut, väliaikaiset korjaustoimenpiteet parantavat rataverkon tilaa vain hetkellisesti ja routaongelman lopullinen ratkaiseminen siirtyy tulevaisuuteen.

Roudan tunkeutuminen routivaan pohjamaahan pyritään estämään riittävän paksuisilla routimattomasta materiaalista rakennetuilla alusrakennekerroksilla. Jos pohjamaa kuitenkin routii, ongelman korjaamiseksi voidaan routimattomien kerrosten paksuutta kasvattaa alkuperäisestä. Alusrakenteen paksuntaminen vaatii kuitenkin koko ratapenkereen purkua ja pitkää liikennekatkoa, joten toimenpide on hyvin kallis. Paksun alusrakennekerroksen materiaalikustannukset nousevat myös korkeiksi. Lisäksi alusrakennekerrosten paksuutta lisäämällä saatetaan päätyä tarpeettoman suureen kokonaisrakennekerrosvahvuuteen ja radan korkeusviivan muutokset edellyttävät usein muutoksia sähköistetyn radan rakenteissa. Olemassa olevilla radoilla onkin tavanomaista korvata osa alusrakennekerroksesta routaeristelevyllä. Levypaksuus valitaan Ratateknisten ohjeiden osassa 3 ”Radan rakenne” esitettyjen mitoituskäyrästä perusteella.

Pohjamaan maa-aines on vaihdettava routimattomaan, jos ratarakenteessa esiintyy huomattavia routanousuja, joita ei saada muilla korjaustoimenpiteillä korjattua. Massanvaihtoa on käytettävä myös, jos routimista tapahtuu välittömästi tukikerroksen alapuolella alusrakenteessa, sillä levytyksellä ei voida estää rakenteen routimista. Eristelevyllä ei ole juurikaan omaa lämpökapasiteettia, joten routaraja tunkeutuu väistämättä ainakin hieman levyn alapuoliseen ratarakenteeseen. Massanvaihto voidaan

yhdistää routalevytykseen siten, että levyn alle tehdään tarvittaessa osittainen massanvaihto. Erityisesti syvät massanvaihdot ovat rataympäristössä hankalia ja työläitä toteuttaa, sillä toimenpide edellyttää paljon valmistelevia ja viimeisteleviä työvaiheita, kuten kiskojen ja ratapölkkyjen siirtoa. Massanvaihdon suorittaminen edellyttää myös pitkiä työrakoja, joita rataympäristössä on hankala järjestää. Etenkin laajamittaisesti käytettynä massanvaihto onkin hyvin kallis korjaustoimenpide.

Jos routimista tapahtuu alusrakennekerroksessa, voidaan kuivatusta parantamalla ehkäistä routavaurioiden syntyä, muttei kuitenkaan kokonaan estää niiden esiintymistä, mikäli rakennemateriaali jäätyy. Kuivatusta parantamalla voidaan vähentää routaongelmia erityisesti vähäliikenteisillä radoilla, joilla raiteen tasaisuusvaatimukset ovat päärajoja pienemmät. Pääradoilla joudutaan usein vaihtamaan rakennemateriaali routimattomaan. Routalevytyksellä ei voida merkittävästi parantaa tilannetta.

Kun pohjamaa ei roudi ja routaongelmat aiheutuvat päällysrakenteesta, tukikerros on vaihdettava tai seulottava. Jos ratarakenteeseen on asennettava routalevy, asennus on kustannustehokkainta tehdä tukikerroksen kunnostamisen yhteydessä. Tukemisella voidaan tilapäisesti parantaa raiteen asemaa, jos tukikerroksessa esiintyy haitallisen suuria routanousuja.

6 Roudan syvyyden mallinnus laskentaohjelmalla

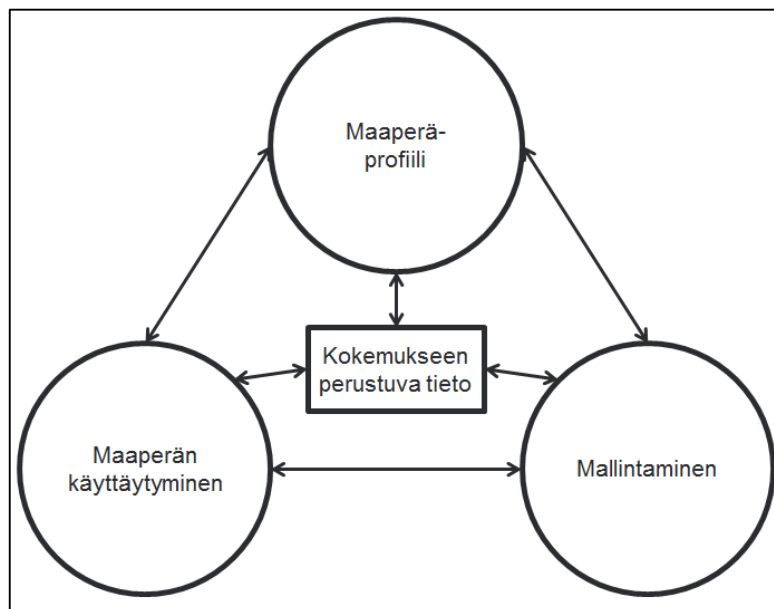
6.1 Laskentaohjelman teoria

6.1.1 Yleistä

Maan lämpötekni­sen analyysin numeeriseen ratkaisemiseen on kehitetty useita elementtimenetelmään (Finite Element Method, FEM) perustuvia tietokoneohjelmia, kuten COMSOL Multiphysics, SoilVisionin SVHeat ja ADINA Thermal. Tässä työssä roudan syvyyden mallinnukseen käytettiin GeoStudio 2007 –ohjelmiston ohjelmaa TEMP/W. TEMP/W:llä voidaan mallintaa kaksiuotteisesti esimerkiksi ilman lämpötilamuutosten tai rakentamistoimenpiteiden vaikutuksia maaperän lämpöoloihin. Ohjelma simuloi lämmön siirtymistä huokoisissa väliaineissa, joten se soveltuu hyvin roudan syvyyden mallintamiseen muuttuvissa olosuhteissa. Lämpötekni­sen mallin luominen TEMP/W:llä perustuu käyttäjän antamiin mallinnettavien maa-ainesten materiaaliparametreihin sekä ilman ja maaperän lämpötilatietoihin.

6.1.2 Numeerinen mallinnus geotekniikassa

Lontoon Imperial Collegen maamekaniikan professori John Burland esitti vuonna 1987 ajatuksensa geotekni­sen insinööritaidon kolmesta pääkomponentista. Esityksessä painottuu numeerisen mallintamisen merkitys geotekniikassa. Burland havainnollistaa komponentteja kuvassa 6.1 esitetyn kolmion muodossa.



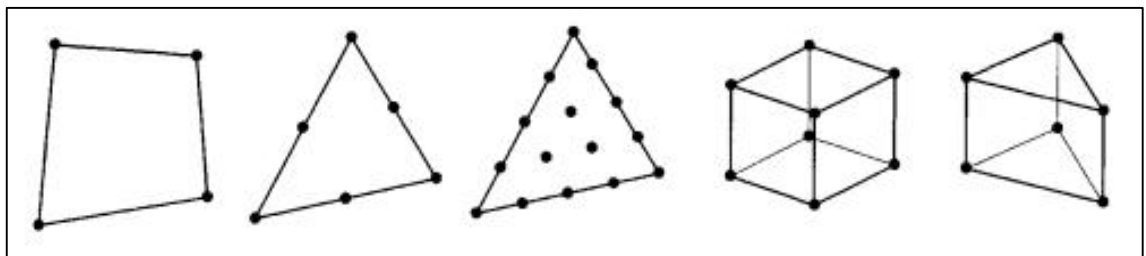
Kuva 6.1. Burlandin kolmio (muokattu lähteestä Burland 1996).

Burlandin kolmiossa esitetty maaperän käyttäytymisen komponentti koostuu laboratoriokokeista, in-situ kokeista sekä kenttätutkimuksista. Kokeiden ja tutkimusten avulla kootaan tarvittavat lähtötiedot suunnittelun ja mallintamisen pohjaksi. Maaperäprofiililla tarkoitetaan kohdekohtaista tietoa vallitsevista maaperäolosuhteista. Mallintaminen voi olla käsitteellistä, analyttistä tai kokeellista. Nykyajan kehittyneet

laskentaohjelmat mahdollistavat hyvinkin numeeristen mallien muodostamisen. Kolmion kaikki komponentit ovat keskenään vuorovaikutteisessa suhteessa ja niitä kaikkia yhdistää kokemukseen perustuva tieto. Burlandin kolmio korostaa mallintamisen tärkeyttä geoteknisten ongelmien ratkaisemisessa. Samoin on tärkeää ymmärtää kokemuksen kautta maaperän geomekaanista toimintaa ja kerätä riittävä määrä lähtötietoja mallien muodostamisen pohjaksi. (Burland 1996.)

Rakenteiden käyttäytymisen analysointiin käytettävän elementtimenetelmän kehitys alkoi 1950-luvulla lentokoneteollisuuden piirissä. Kun tietokoneet alkoivat kehittyä 1960-luvulla, menetelmää alettiin soveltaa laajemmin apuna rakenteiden lujuusanalyyseissä. Elementtimenetelmän matemaattisten perusteiden parempi ymmärrys on laajentanut merkittävästi menetelmän sovelluskohteita ja nykyisin sitä voidaan käyttää rakenteiden mallinnuksen lisäksi myös esimerkiksi lämmön siirtymisen ja värähtelyiden vaikutusten arviointiin. Elementtimenetelmässä luodaan matemaattisia malleja käytännön ongelmista. Menetelmällä voidaan ratkaista numeerisesti osittaisdifferentiaaliyhtälöitä, joiden ratkaiseminen analyttisesti on hankalaa tai mahdotonta. (Gussman et al. 2002.)

Geometrialtaan tai toimintatavaltaan monimutkaiset ongelmat jaetaan elementtimenetelmässä pienempiin osiin eli elementteihin, joita on äärellinen määrä. Kuvassa 6.2 on esitetty kaksi- ja kolmiulotteisen elementtianalyysin elementtityyppejä. Yksittäinen elementti koostuu solmupisteistä ja elementin sivuista. Jokaisen elementin rajapinnalta valitaan tietty määrä solmupisteitä, joilla elementti liittyy toisiin elementteihin. Elementtien yhdessä muodostamaa kokonaisuutta kutsutaan elementtiverkoksi. Laskennan tarkkuutta voidaan parantaa tihentämällä elementtiverkkoa, jolloin verkko sisältää enemmän solmupisteitä. Laskentaohjelma ratkaisee elementtien väliset vuorovaikutussuhteet ja lopulta saadaan alkuperäisen ongelman approksimoitu eli likimääräinen ratkaisu. FEM-analyysin kolme päävaihetta ovat mallin rakentaminen, laskennan suorittaminen sekä tulosten analysointi ja visualisointi. (Gussman et al. 2002.)



Kuva 6.2. Elementtimenetelmän elementtityyppejä (muokattu lähteestä Gussmann et al. 2002).

6.1.3 TEMP/W:n lämpötekniset yhtälöt

Veden ja jään kyllästämässä routimattomassa maassa lämpö siirtyy pääasiassa johtumalla. Ratarakenteessa myös konvektiolla voi olla merkitystä lämmön siirtymisen

muotona, jos rakennemateriaali on hyvin karkearakeista, kuten sepeliä tai louhetta. Tämän työn laskentatapauksissa kaiken lämmön oletetaan siirtyvän ratarakenteessa johtumalla. Lämmönjohtumista kuvaava perusyhtälö on Fouriér'n yhtälö (6-1). Kaavoissa esitetään lämpötilat kelvineinä. (Saarelainen 2001b, GEO-SLOPE International Ltd. 2010.)

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (6-1)$$

jossa q on lämpövuoto [W/m²]
 λ on lämmönjohtavuus [W/mK]
 $\frac{\partial T}{\partial x}$ on lämpötilan alenema x-suuntaan [K/m]

Yhtälön mukaisesti maassa johtumalla kulkevan lämmön lämpövuoto riippuu maan lämmönjohtavuudesta sekä lämpötilagradientista. Negatiivinen etumerkki osoittaa, että lämmön virtaus alenevan gradientin $\frac{\partial T}{\partial x}$ suuntaan on positiivinen eli lämpö siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta matalampaan. (GEO-SLOPE International Ltd. 2010.)

Jos lämpövuoto tai lämpötila muuttuu ajan suhteen missä tahansa systeemin pisteessä, tilannetta kutsutaan transientiksi. Yleinen lämmönjohtumisen differentiaaliyhtälö lämpövuolle olosuhteissa, jotka muuttuvat ajan funktiona, on esitetty alla (kaava 6-2). Yhtälön vasemman puolen ensimmäinen termi edustaa johtumalla siirtyvää lämpötehoa tilavuusyksikköä kohti monidimensioisessa tapauksessa ja toinen termi q_g on tilavuusyksikköä kohti kehittyvä lämpöteho. Yhtälön oikean puolen termi on ominaislämpöön varastoituva lämpöteho tilavuusyksikköä kohti. (GEO-SLOPE International Ltd. 2010.)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_g = C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6-2)$$

jossa T on lämpötila [K]
 k_x on lämmönjohtavuuskerroin x-suuntaan [W/mK]
 k_y on lämmönjohtavuuskerroin y-suuntaan [W/mK]
 k_z on lämmönjohtavuuskerroin z-suuntaan [W/mK]
 q_g on lämmön kehittyminen [W/m³]
 $\frac{\partial T}{\partial x}$ on lämpötilan alenema x-suuntaan [K/m]
 $\frac{\partial T}{\partial y}$ on lämpötilan alenema y-suuntaan [K/m]
 $\frac{\partial T}{\partial z}$ on lämpötilan alenema z-suuntaan [K/m]
 C on lämpökapasiteetti [J/m³K]
 t on aika [s]

Stationäärisessä, ajasta riippumattomassa tilassa lämmönjohtumisen differentiaaliyhtälö saa muodon:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_g = 0 \quad (6-3)$$

Tarkempi kuvaus TEMP/W-ohjelman laskelmien perustana olevista teorioista löytyy ohjelman käyttöohjeesta.

6.2 Roudan syvyyden laskenta TEMP/W:llä

6.2.1 Yleistä

Ratateknisten ohjeiden (RATO) osan 3 ”Radan rakenne” mukaisesti radan rakennekerrosten kokonaispaksuus mitoitetaan siten, ettei routa pääse tunkeutumaan routivaan maahan mitoitustalvea vastaavissa olosuhteissa. Lähtökohtana on, että radan routaantuvat rakennekerrosmateriaalit ovat routimattomia. Routimattomissa maalajeissa saattaa esiintyä *in-situ routanousua* huokosveden jäätyessä, mutta jäälinsien muodostumista ei sallita radan alus- ja päällysrakenteessa. Jos pohjamaa on routimatonta, rakennekerrosten paksuutta voidaan pienentää ja sallia roudan tunkeutuminen myös pohjamaahan. Routaeristetyssä rakenteessa routalevyn alapuolella olevan routimattoman alusrakennekerroksen vähimmäispaksuus on 300 mm, kun käytetään luonnonmateriaaleja ja 450 mm käytettäessä murskattua kiviainesta. (Ratahallintokeskus 2008.)

Tämän työn laskentatapauksissa tutkittiin tilannetta, jossa yksiraiteisen radan rakenteeseen asennettiin routaeristelevy. Eristelevy sijoitettiin mallinnustapauksissa kahteen eri syvyyteen, jotta voitiin selvittää, vaikuttiko levyn sijainti ratarakenteessa roudan tunkeutumiseen. Tarkasteluun valittiin kaksi rakennekerrosmateriaaleiltaan ja pohjamaaltaan samanlaista ratapengertä. Toisen kohteista oletettiin sijaitsevan Etelä-Suomessa Kirkkonummella ja toisen Pohjois-Suomessa Oulussa, sillä mallinnuksen yhtenä päämääränä oli selvittää, miten Etelä- ja Pohjois-Suomen pakkasmääräerot vaikuttivat roudan tunkeutumissyvyyteen ja siten tarvittavaan eristelevypaksuuteen. Laskennalla selvitettiin myös, miten syvälle eristelevyn alapinnasta routa tunkeutui erilaisissa laskentatapauksissa. Roudan tunkeuman perusteella määritettiin tarvittavan massanvaihdon minimisyvyys, mikäli radan alusrakenne olisi ollut routivaa materiaalia.

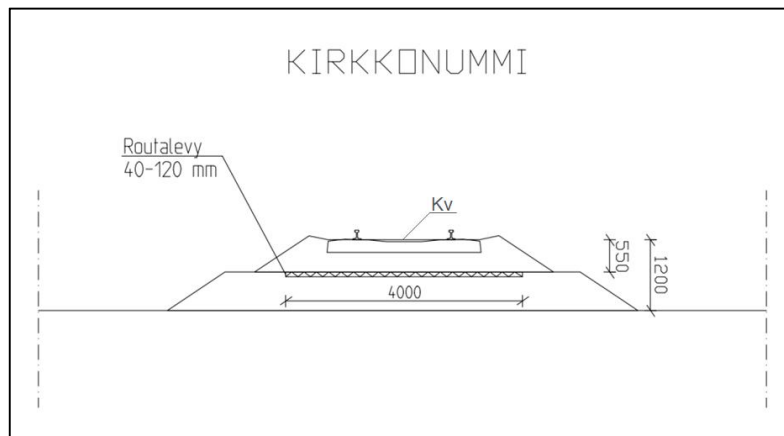
Kirkkonummella sijaitsevan radan pengerleveydeksi oletettiin 6,0 metriä ja pengerkorkeudeksi 1,20 metriä. Oulussa sijaitsevan radan pengerleveydeksi oletettiin 6,0 metriä ja pengerkorkeudeksi 1,65 metriä. Luvussa 2 esitetyn taulukon 2.1 ja liitteen 1 perusteella voidaan todeta molempien ratarakenteiden olleen routivia. Mallinnuksen lähtöoletuksena oli, että ennen korjaustoimenpiteitä molempien kohteiden tukikerros oli sepelikiviainesta ja pohjamaa routivaa hiekkamoreenia. Alusrakennemateriaalin oletettiin olevan hiekkaa. Mallinnuksessa varioitiin routalevyn paksuutta eri arvoilla. Rataympäristössä routalevyyn kohdistuvat rasitukset aiheuttavat levyyn mekaanisia

vaurioita. Syntyviä vaurioita kompensoitiin laskennassa vähentämällä levyn nimellispaksuudesta 10 mm, kuten on tehty RATO 3:n routalevymitoituksessa.

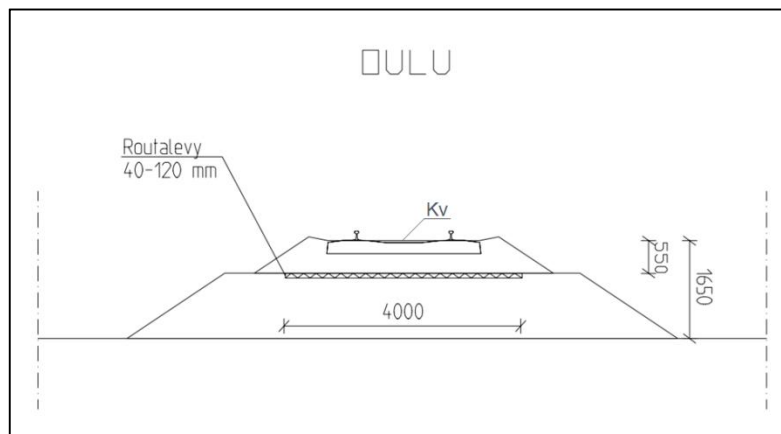
Jokaisessa laskentatapauksessa etsittiin ajankohta, jolloin routa oli syvimmillään ratarakenteessa ja mahdollisesti myös pohjamaassa mitoituspakkasmäärien mukaisina talvina. Lisäksi tutkittiin, miten roudan syvyydet vaihtelivat erilaisissa laskentatapauksissa. Routarajana laskennassa pidettiin kriittisen isotermin ($0\text{ }^{\circ}\text{C}$) sijaintia ja roudan syvyydet laskettiin raiteen keskilinjasta. Lumen eristävä vaikutusta ei huomioitu mallinnuksessa.

6.2.2 Laskentatapaus 1 - Routalevy asennetaan tukikerroksen alle

Ensimmäisessä laskentatapauksessa routaeristelevy asennettiin tukikerroksen vaihdon yhteydessä suoraan tukikerroksen alapuolelle siten, että routalevyn yläpinta tuli syvyydelle $K_v - 0,55\text{ m}$ (kuvat 6.3 ja 6.4). K_v :llä tarkoitetaan radan korkeusviivaa. Mallinnuksessa tutkittiin, miten eri paksuisten eristelevyjen (40 mm, 60 mm, 80 mm, 100 mm tai 120 mm) asentaminen tukikerroksen alapuolelle vaikutti roudan tunkeutumiseen ja selvitettiin, miten syvälle eristelevyn alapinnasta routa tunkeutui. Laskennassa käytettiin mitoittavina pakkasmäärinä pakkasmääriä F10, F20 ja F50. Laskennan tuloksia verrattiin RATO 3:n mukaiseen routalevymitoitukseen.



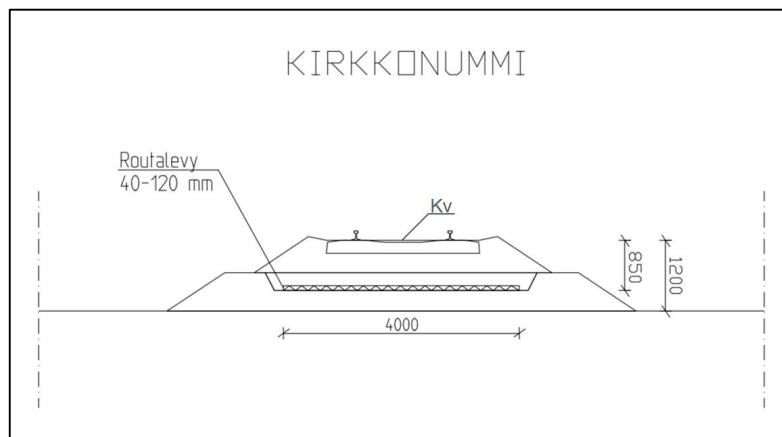
Kuva 6.3. Laskentatapauksen 1 Kirkkonummen kohteen geometria.



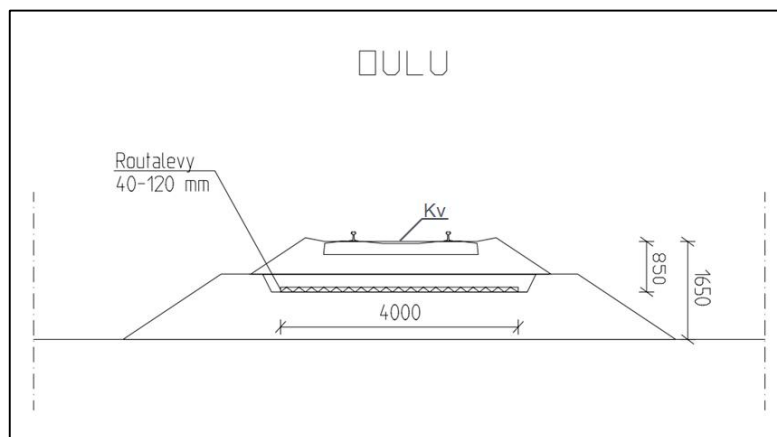
Kuva 6.4. Laskentatapauksen 1 Oulun kohteen geometria.

6.2.3 Laskentatapaus 2 - Routalevy asennetaan eristyskerroksen yläpintaan

Toisessa laskentatapauksessa routaeristelevy asennettiin kaivamalla syvyyteen K_v - 0,85 m siten, että se tuli eristyskerroksen yläpintaan (kuvat 6.5 ja 6.6). Mallinnuksessa tutkittiin, miten eri paksuisten eristelevyjen (40 mm, 80 mm tai 120 mm) asentaminen syvyyteen K_v - 0,85 m vaikutti roudan tunkeutumiseen. Laskennassa käytettiin mitoittavana pakkasmääränä pakkasmäärää F50. Laskentatuloksia verrattiin laskentatapauksessa 1 samoilla eristelevypaksuuksilla ja samalla mitoittavalla pakkasmäärällä saatuihin tuloksiin ja selvitettiin, oliko eristelevyn sijainnilla vaikutusta roudan syvyyteen.



Kuva 6.5. Laskentatapauksen 2 Kirkonummen geometria.



Kuva 6.6. Laskentatapauksen 2 Oulun geometria.

6.3 Mallinnuksessa käytetyt parametrit ja laskennan kulku

6.3.1 Laskentaparametrien määrittäminen

Mallinnuksessa maan lämpöteknisen analyysin lähtötietoina tarvittiin:

- radan rakennemateriaalien, pohjamaan ja XPS-levyn lämmönjohtavuudet ja lämpökapasiteetit sulana ja jäätyneenä
- rakennemateriaalien, pohjamaan ja XPS-levyn tilavuusvesipitoisuudet

- laskennan alkuajankohdan lämpötila maanpinnalla ja pohjamaassa kolmen metrin syvyydellä maanpinnasta
- mitoitettavan pakkasmäärän mukaiset ulkoilman pakkaskauden kuukausikohtaiset keskilämpötilat.

Laskennassa käytetyt materiaaliparametrit on esitetty taulukossa 6.1. Mallinnuskohteen pohjamaan oletettiin olevan routivaa hiekkamoreenia ja tukikerroksen raidesepeliä. Radan alusrakennekerrosten osalta mallinnusta yksinkertaistettiin siten, että ennen korjaustoimenpiteitä radan väli- ja eristyskerroksen oletettiin olevan samaa maamateriaalia, sillä kerrosten materiaalien lämpöparametrien välillä ei ole merkittäviä eroja. Alusrakennemateriaalin oletettiin olevan hiekkaa. Laskentatapauksessa 2 routalevy asennettiin eristyskerroksen pintaan ja toimenpiteen yhteydessä välikerroksen materiaali vaihdettiin mallinnuksessa hiekasta soraan.

Taulukko 6.1. Laskennassa käytetyt materiaaliparametrit.

	Lämmön- johtavuus sulana λ_u [W/m °C]	Lämmön- johtavuus jäätynäänä λ_f [W/m °C]	Tilavuus- lämpö- kapasiteetti sulana c_u [kJ/m ³ °C]	Tilavuuslämpö- kapasiteetti jäätynäänä c_f [kJ/m ³ °C]	Tilavuus- vesipitoisuus w [til-%]
Materiaali					
Tukikerrossepeleli	1,50	1,10	1339,78	1272,78	3,20
XPS-routalevy	0,05	0,05	40,00	40,00	10,00
Välikerros (Sr)	1,50	1,60	1829,63	1630,76	9,50
Alusrakenne (Hk)	1,50	1,70	1858,94	1626,57	11,11
Pohjamaa (HkMr)	1,60	1,80	2227,38	1829,63	19,00

Kirjallisuudessa on esitetty runsaasti lämpöparametrien arvoja sepelikiviainekselle, hiekalle, soralle ja hiekkamoreenille. Parametrien suuruudessa on jonkun verran eroja ja esimerkiksi lämmönjohtavuuden arvoon vaikuttaa suuresti maamateriaalin vesipitoisuus, kuten voidaan huomata taulukosta 6.2. Vesipitoisuuden kasvaessa myös lämmönjohtavuus kasvaa. Lisäksi eri laskentakaavojen antamat tulokset poikkeavat hieman toisistaan. Kohdekohtaista suunnittelua varten varmimmat lämpöparametrien arvot saadaan laboratoriomittauksilla. Mallinnuksessa käytettiin julkaisussa Ratarakenteen routasuojaus (Kolisoja ja Nurmikolu 2002) esitettyjä raidesepelin, hiekan ja soran keskimääräisiä lämpöparametrien arvoja. Hiekkamoreenille laskettiin lämmönjohtavuus ja lämpökapasiteetti luvussa 3 esitetyillä kaavoilla. Moreenin kuivairtotiheydeksi oletettiin 1900 kg/m³ ja vesipitoisuudeksi 10 paino-%.

Taulukko 6.2. Kuivairtoteiheyden ja vesipitoisuuden vaikutus soraisen hiekan lämmönjohtavuuden arvoihin Kerstenin mukaan (muokattu lähteestä Saare ja Wenner 1957).

Kuivairtoteiheys ρ_d [kg/m ³]	Vesipitoisuus w [paino-%]	Lämmönjohtavuus λ [W/mK]
1,72	1,20	0,50
1,72	2,50	1,05
1,72	5,90	1,35
1,81	1,30	0,69
1,81	2,60	1,24
1,81	6,20	1,75
1,93	0,20	0,45
1,93	2,60	1,54
1,93	10,50	2,19

Maamateriaalien tilavuusvesipitoisuudet laskettiin kaavalla (6-4).

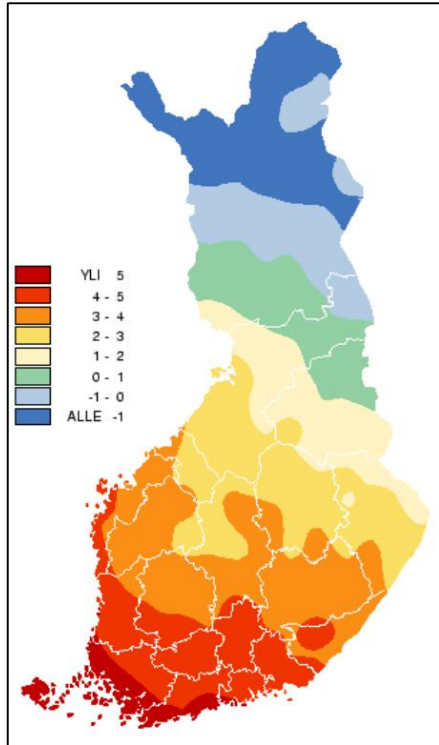
$$W_v = \frac{w \cdot \rho_d}{\rho_w} \quad (6-4)$$

jossa W_v on vesipitoisuus tilavuusprosentteina [til-%]
 w on vesipitoisuus painoprosentteina [paino-%]
 ρ_d on maan kuivairtoteiheys [kg/m³]
 ρ_w on veden tiheys sulassa tilassa, 1000 kg/m³

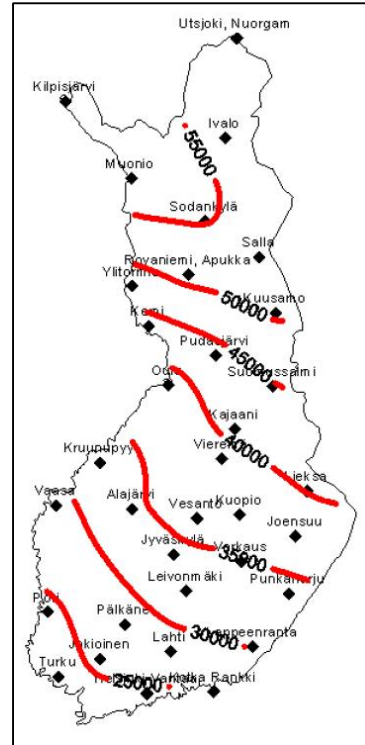
XPS-routaeristelevyjen mitoitustalvuuksien vaihtelevat normaaliolosuhteissa välillä 0,034–0,037 W/Km (ThermiSol 2013). Mallinnuksessa eristeen mitoitustalvuuksena käytettiin julkaisussa Ratarakenteen routasuojaus (Kolisoja ja Nurmikolu 2002) esitettyä arvoa 0,050 W/Km. Tilavuusvesipitoisuutena käytettiin arvoa 10 til-%.

Mallinnuksen lähtötietoina tarvittiin myös mitoitustalvien mukaiset talvikuukausien keskilämpötilat, maanpinnan lämpötila laskennan alkuhetkellä sekä lämpötila kolmen metrin syvyydellä maanpinnasta. TEMP/W:ssä lämpötilat voidaan asettaa fahrenheit- tai celsiusasteina. Laskennassa käytettiin SI-järjestelmän mukaisia celsiusasteita. Laskennassa oletettiin maanpinnan lämpötilan vastaavan laskentakohteen ilman vuotuista keskilämpötilaa. Kuvassa 6.7 on esitetty Suomen keskilämpötilat kaudelta 1977–2006. Kirkkonummella maanpinnan lämpötilaksi asetettiin +5,0 °C ja Oulussa +1,5 °C. Laskennan reunaehdoksi asetettiin myös lämpötila 3 metrin syvyydellä maanpinnasta. Kirkkonummella lämpötilan arvioitiin olevan +10,0 °C ja Oulussa +3,0 °C. Laskennan suorittamiseksi tarvittiin myös mallinnettavan talven pakkaskuukausien keskilämpötilat. Mallinnettavien ratakohteiden oletettiin kuuluvan alusrakenneluokkaan 1 tai 2, joten mitoitettavina pakkasmäärinä käytettiin pakkasmääriä F20 ja F50 (kuvat 6.9

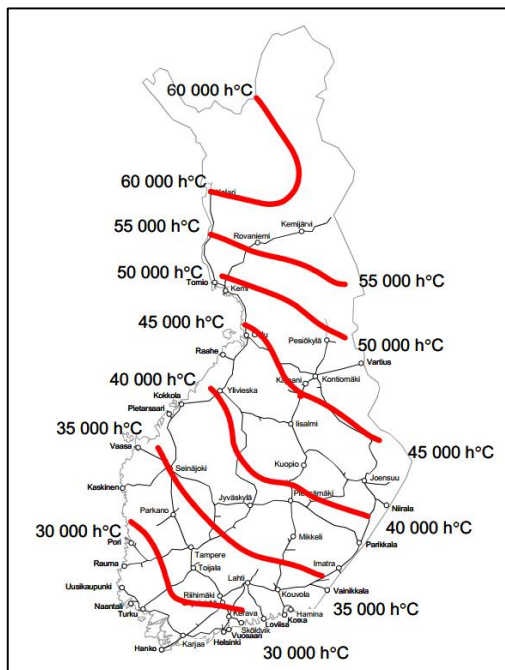
ja 6.10) luvussa 2 esitetyn taulukon 2.2 mukaisesti. Lisäksi laskennassa käytettiin pakkasmäärää F10 (kuva 6.8). Esimerkiksi pakkasmäärä F50 tarkoittaa tilastollisesti keskimäärin kerran viidessäkymmenessä vuodessa toistuvaa suurinta pakkasmäärää. Pakkasmäärät on laskettu Ilmatieteenlaitoksen säähavainnoista kaudelta 1978–2007.



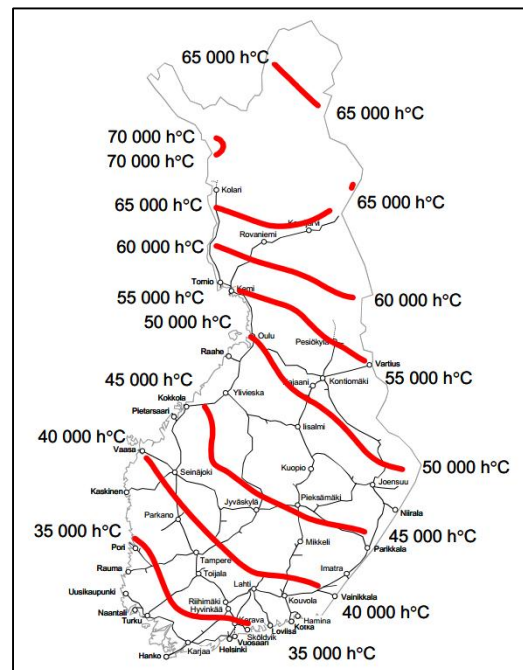
Kuva 6.7. Vuoden keskilämpötila (C°) (Ilmatieteenlaitos).



Kuva 6.8. Kerran 10 vuodessa toistuva suurin pakkasmäärä (Ratahallintokeskus 2008).

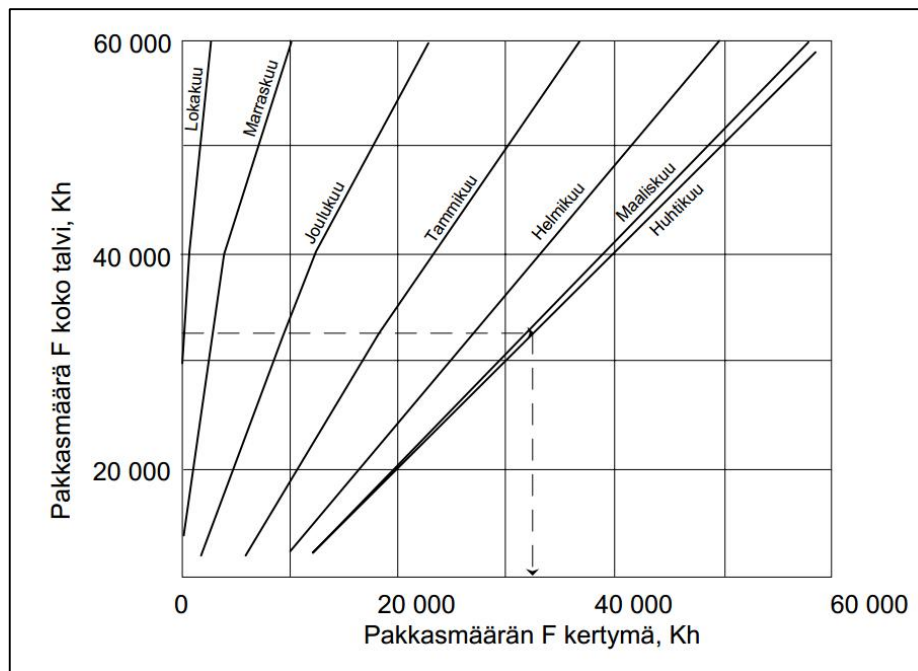


Kuva 6.9. Kerran 20 vuodessa toistuva suurin pakkasmäärä (Ratahallintokeskus 2008).



Kuva 6.10. Kerran 50 vuodessa toistuva suurin pakkasmäärä (Ratahallintokeskus 2008).

Talven pakkaskuukausien keskilämpötilat määritettiin selvittämällä ensin kuvan 6.11 käyrästä mitoitus talven pakkasmäärän kertymän jakautuminen kuukausille lokakuu-huhtikuu. Sijoittamalla saadut kuukausien pakkasmäärät kaavaan (6-5) saatiin laskettua jokaisen kuukauden keskilämpötila. Kuvassa 6.11 ja kaavassa (6-5) pakkasmäärän yksikkönä on kelvintunti, mutta kaavan tuloksena saadaan kuitenkin kuukauden keskilämpötila celsiusasteina. Tulos on mahdollinen, sillä kelvin- ja celsiusasteikon asteikkoväli on sama. Molemmissa yksiköissä erotus veden jäätymislämpötilaan (0 °C) on yhtä suuri. Mallinnuksessa käytetyt talvikauden kuukausien keskilämpötilat on esitetty taulukoissa 6.3 ja 6.4.



Kuva 6.11. Pakkasmäärän jakautuminen talvikuukausille (Kivikoski ja Saarelainen 2000).

$$T_{kk} = \frac{-F_{kk}}{t_{kk}} \quad (6-5)$$

jossa T_{kk} on kuukauden keskilämpötila [°C]
 F_{kk} on kuukauden pakkasmäärä [Kh]
 t_{kk} on kuukauden pituus [h]

Taulukko 6.3. Mitoittavien pakkasmäärien F10, F20 ja F50 mukaiset talvikuukausien keskilämpötilat (°C) Kirkkonummella.

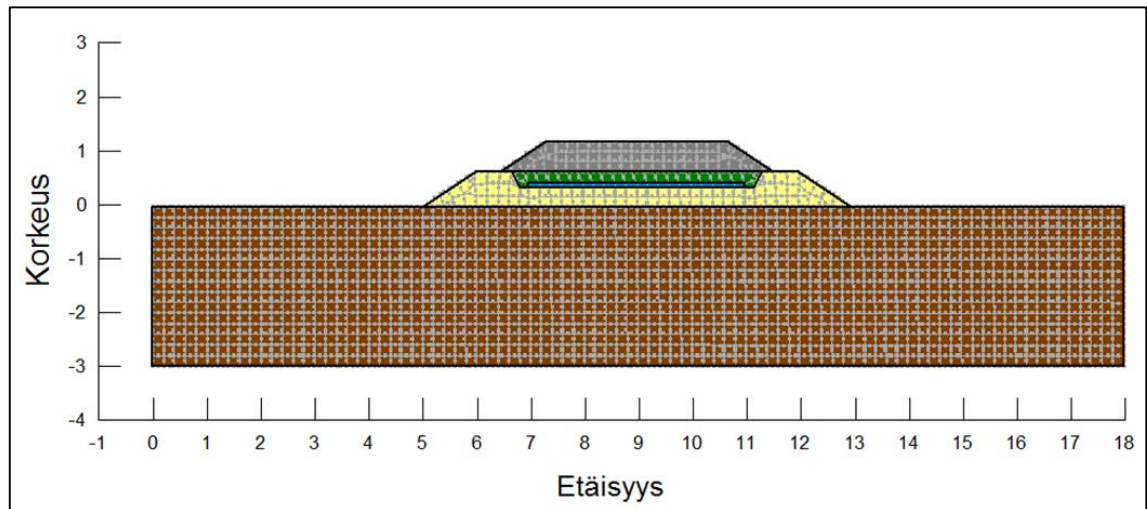
Kuukausi	Kirkkonummi F10	Kirkkonummi F20	Kirkkonummi F50
Lokakuu	-	-	-
Marraskuu	-1,39	-1,81	-2,36
Joulukuu	-7,26	-9,14	-11,56
Tammikuu	-10,89	-13,17	-16,26
Helmikuu	-12,50	-15,18	-18,60
Maaliskuu	-6,67	-8,06	-10,08
Huhtikuu	-0,14	-0,14	-0,14

Taulukko 6.4. Mitoittavien pakkasmäärien F10, F20 ja F50 mukaiset talvikuukausien keskilämpötilat (°C) Oulussa.

Kuukausi	Oulu F10	Oulu F20	Oulu F50
Lokakuu	-0,81	-1,21	-1,61
Marraskuu	-6,11	-7,64	-9,58
Joulukuu	-12,50	-14,92	-18,28
Tammikuu	-15,19	-17,61	-20,70
Helmikuu	-17,11	-19,94	-23,36
Maaliskuu	-11,11	-12,63	-15,05
Huhtikuu	-1,81	-2,22	-2,92

6.3.2 Laskennan kulku

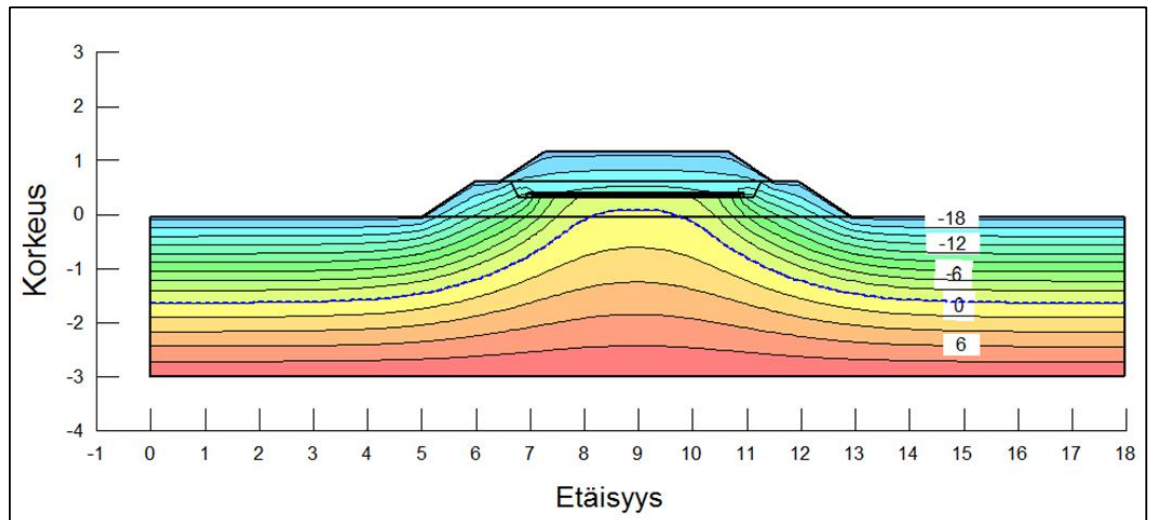
Mallien luominen aloitettiin määrittämällä jokaisen laskentatapauksen geometria. Elementtiverkon tiheydeksi asetettiin 0,2 m. Mallinnusta jatkettiin asettamalla maamateriaaleille ja XPS-levylle ohjelman edellyttämät laskentaparametrit. TEMP/W:ssä materiaalimallina voidaan käyttää Full thermal modelia tai Simplified thermal modelia. Simplified thermal modelia käytetään, kun voidaan olettaa kaiken maaperän sisältämän veden jäätyvän 0 °C:ssa. Kuten luvussa 3 on todettu, jäätymättömän veden osuus pakkaslämpötiloissa on pienempi karkearakeisissa kuin hienorakeisissa maalajeissa. Hiekassa, sorassa ja moreenissa jäätymättömän veden osuus pakkaslämpötilassa on vain 1–2 %, joten maalajien materiaalimalliksi valittiin Simplified thermal model. Myös routalevyn materiaalimalliksi valittiin Simplified thermal model. Kuvassa 6.12 on esitetty mallin geometria Kirkkonummen kohteessa laskentatapauksessa 2, kun ratarakenteeseen on asennettu 80 mm:n paksuinen XPS-levy.



Kuva 6.12. Mallin geometria ja elementtiverkko laskentatapauksessa 2, kun routalevy on asennettu eristyskerroksen yläpintaan.

Kun mallien geometria oli luotu ja materiaaleille oli asetettu laskentaparametrit, määritettiin stationäärisen, ajasta riippumattoman tilan (steady state) lämpötilakenttä. Laskennan reunaehdoiksi asetettiin maanpinnan ja ratapenkereen pinnan lämpötila sekä lämpötila kolmen metrin syvyydellä maanpinnasta ajanhetkellä $t = 0$. Mallinnusta jatkettiin asettamalla alkuhetken lämpötilakenttä mallin hetkellistä tilaa (transient state) muuttuvissa lämpöoloissa kuvaavan mallin alkutilaksi. Maanpinnan ja ratapenkereen pinnan lämpötilaksi asetettiin talvikuukausien keskilämpötilat. Laskennan hetkellistä tilaa kuvaava malli on ajasta riippuvainen ja aika-askelten suuruudeksi asetettiin kunkin pakkaskauden kuukauden päivien määrä. Kirkkonummella laskenta-ajan kokonaispituudeksi muodostui siis 181 päivää ja Oulussa 212 päivää.

Laskenta aloitettiin, kun mallien geometria, laskentaparametrit ja reunaehdot oli määritetty. Hetkellistä tilaa kuvaava malli huomioi käyttäjän asettamien lämpötilareunaehtojes vaikutuksen lämmön siirtymiseen ja mallin avulla voitiin tutkia 0-isotermin etenemistä ratarakenteessa ja pohjamaassa pakkaskauden eri ajanhetkillä. Kuvassa 6.13 on esitetty TEMP/W:llä saatava lämpöteknisen analyysin mallinnustulos kuvan 6.12 laskentatapauksessa, kun mallinnuksen alkuhetkestä on kulunut 90 päivää. Kirkkonummen kohteessa on siis kyseessä tammikuu. Routarajan sijainti on kuvattu sinisellä katkoviivalla. Mitoittavana pakkasmääränä on käytetty pakkasmäärää F50.



Kuva 6.13. Roudan syvyys ratarakenteessa tammikuussa kuvan 6.12 mukaisessa laskentatapauksessa.

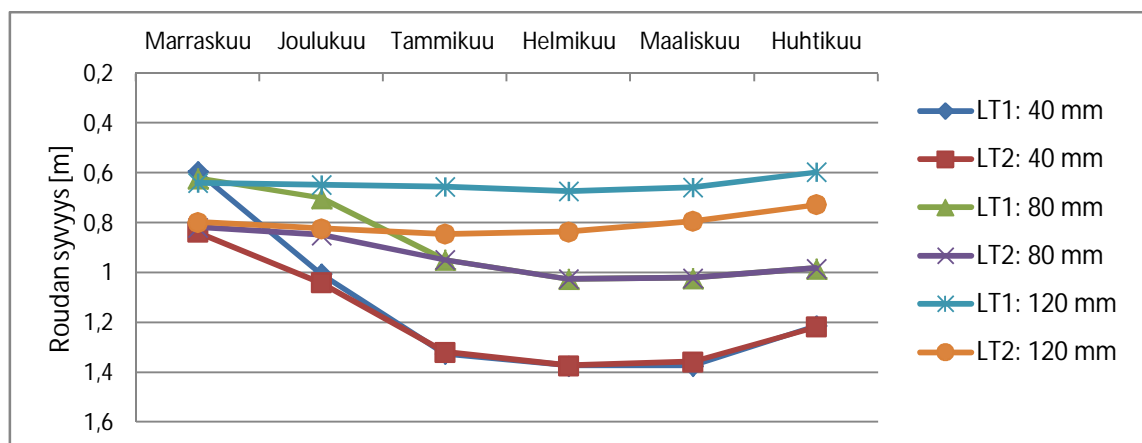
Mallinnustulosten visuaalisessa tarkastelussa on huomioitava, ettei laskentatapauksiin mallinnettu lumipeitettä. Luvussa 3 todetun mukaisesti lumella on lämpöä eristävä vaikutus alhaisen lämmönjohtavuutensa vuoksi. Talven aikana kertyvä lumipeite toimii lämpöeristeenä ratapenkereen jätkänpolulla ja luiskissa. Erityisesti, jos rata sijaitsee leikkauksessa, lunta voi talven aikana kertyä merkittävä määrä sivuojiin ja luiskiin. Lumikerros vaikuttaisi 0-isotermin muotoon siten, että isotermi kulkisi tasaisemmin eristelevyn alapintaa pitkin, eikä sukeltaisi levyn keskeltä ratapenkereen sivuille yhtä jyrkästi, kuten kuvassa 6.13.

7 Laskennan tulokset

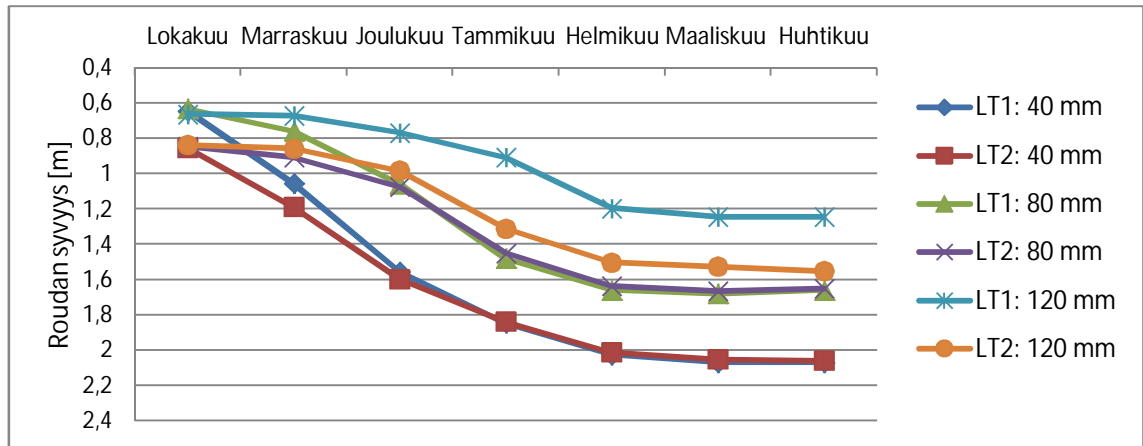
7.1 Routalevyn sijainnin vaikutus roudan tunkeutumiseen

Kuvissa 7.1 ja 7.2 on esitetty roudan syvyys mitoitustalvena F50 Kirkkonummella ja Oulussa laskentatapauksissa 1 ja 2. Laskentatapauksessa 1 routalevy asennettiin välittömästi tukikerroksen alapuolelle ja laskentatapauksessa 2 routalevy asennettiin kaivamalla syvyyteen $K_v - 0,85$ m. Laskentatulosten perusteella voidaan todeta, ettei levyn sijainnilla ollut merkitystä roudan maksimisyvyyteen levypaksuuksilla 40 mm ja 80 mm. Eristelevyn sijainti vaikutti kuitenkin routarajan ulottumiseen pakkaskauden alussa, sillä mitä syvemmällä ratarakenteessa levy oli, sitä syvemmälle routa ulottui Kirkkonummella marraskuussa ja Oulussa lokakuussa. Ensimmäisten talvikuukausien jälkeen syvyuserot tasoittuivat ja 0-isotermin eteneminen molemmissa laskentatapauksissa samaan syvyyteen. Laskentatapauksessa 2 välikerroksen maamateriaali vaihdettiin mallinnuksessa hiekasta soraan. Laskennassa käytettyjen hiekan ja soran materiaaliparametrien väliset erot olivat niin pieniä, ettei maa-aineksen vaihtamisella ollut vaikutusta roudan syvyyteen laskentatapauksissa 1 ja 2.

Kuvasta 7.1 nähdään, että suurin mallinnuksessa käytetty levypaksuus 120 mm pysäytti Etelä-Suomessa tehokkaasti roudan tunkeutumisen levyn alapuolella olevaan alusrakennekerrokseen. Koska routaraja jäi levyn tasolle, levyn sijainti ratarakenteessa määritteli roudan maksimisyvyyden. Kuvasta 7.2 nähdään, että Pohjois-Suomessa eristelevypaksuus 120 mm ei pysäyttänyt täysin routarajan etenemistä, mutta hidasti merkittävästi roudan tunkeutumista ratarakenteeseen. Lähemmäs pohjamaata asennettu paksu routalevy vei myös Oulussa routarajan syvemmälle. Routaeristyksen tarkoitus on estää roudan tunkeutuminen routivaan pohjamaahan, joten on tarkoituksenmukaista pyrkiä pysäyttämään 0-isotermin mahdollisimman kauas pohjamaasta. Laskentatapauksissa paksuin eristelevy kannatti siis asentaa suoraan tukikerroksen alapuolelle, jotta routarajan ja pohjamaan väliin jäi mahdollisimman paksu alusrakennekerros.

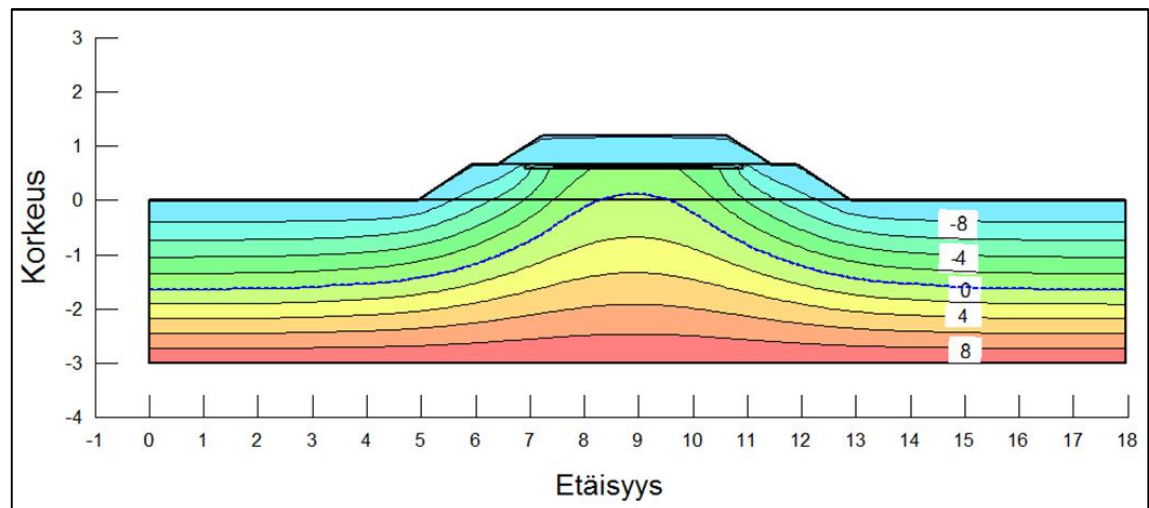


Kuva 7.1. Roudan syvyys Kirkkonummella mitoitustalvena F50 laskentatapauksessa 1, jossa routalevy on suoraan tukikerroksen alapuolella ja laskentatapauksessa 2, jossa routalevy on asennettu eristyskerroksen yläpintaan.

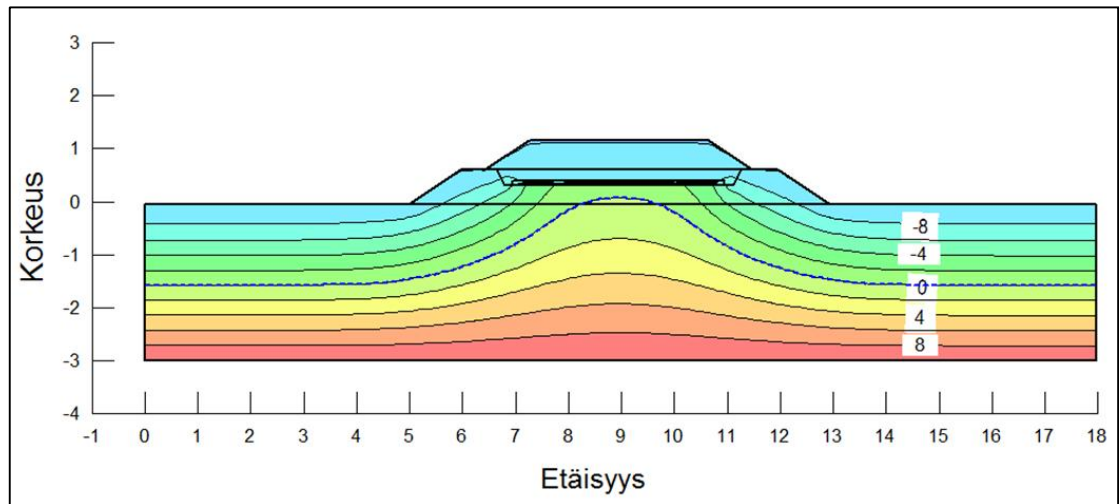


Kuva 7.2. Roudan syvyys Oulussa mitoitustalvena F50 laskentatapauksessa 1, jossa routalevy on suoraan tukikerroksen alapuolella ja laskentatapauksessa 2, jossa routalevy on asennettu eristyskerroksen yläpintaan.

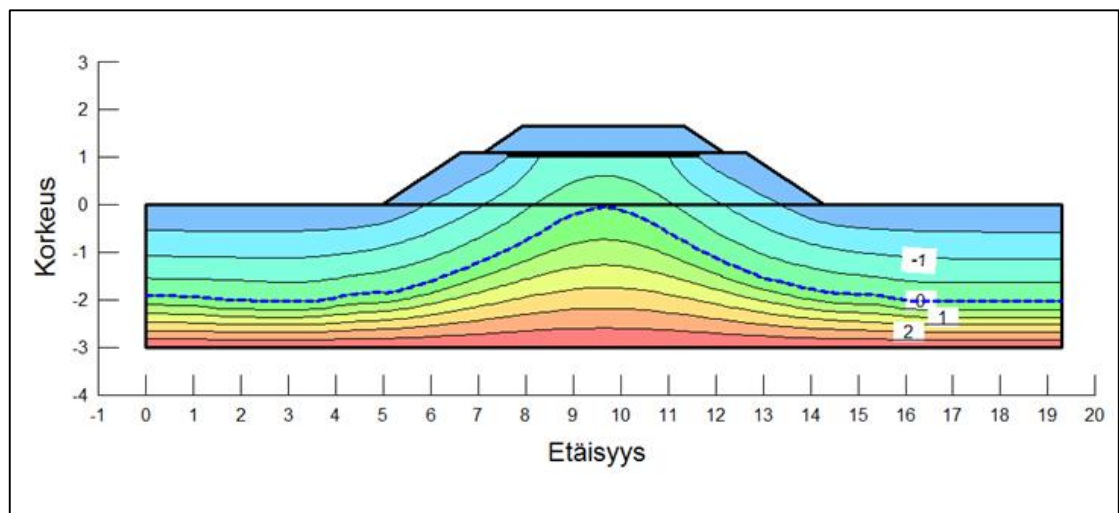
Kuvissa 7.3, 7.4, 7.5 ja 7.6 on esitetty Kirkkonummen ja Oulun kohteiden lämpötilaprofiilit laskentatapauksissa 1 ja 2, kun ratarakenteeseen on asennettu 80 mm eristelevy ja routaraja on syvimmillään. Routaraja saavutti Kirkkonummella maksimisyvyytensä (1,03 m) helmikuussa. Oulussa routaraja oli syvimmillään maaliskuussa ulottuen 1,67 metrin syvyyteen. Kuvista nähdään, miten syvemälle ratarakenteessa asennettu levy vie Kirkkonummella isotermin $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja Oulussa isotermin $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ lähemmäs pohjamaata. Koska kuvissa esitetyissä tilanteissa Etelä-Suomessa on helmikuu ja Pohjois-Suomessa jo maaliskuu, Oulun kohteessa routalevyn pinnan lämpötila on Kirkkonummea suurempi.



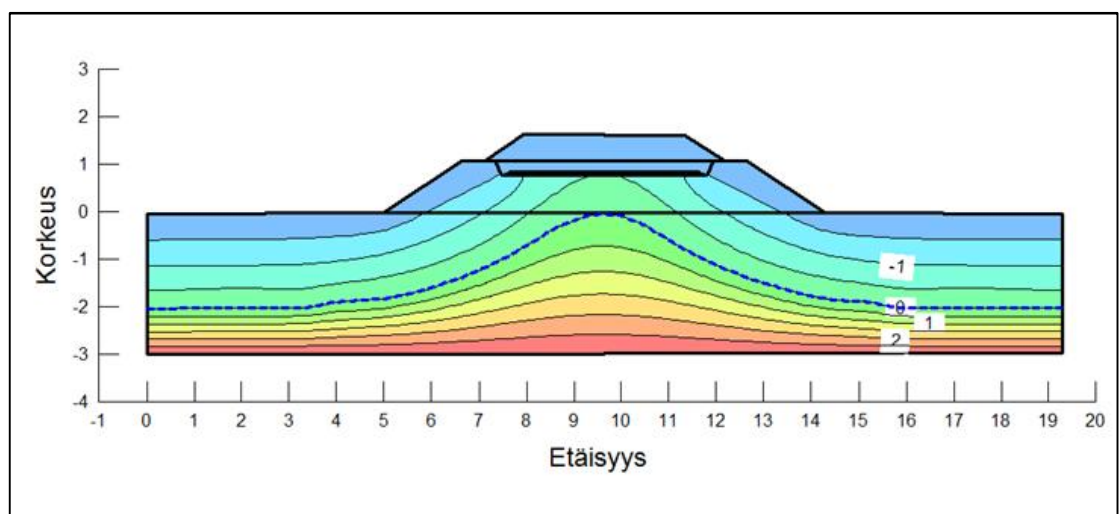
Kuva 7.3. Roudan maksimisyvyys Kirkkonummen kohteessa laskentatapauksessa 1, kun ratarakenteeseen on asennettu 80 mm routalevy.



Kuva 7.4. Roudan maksimisyvyys Kirkkonummen kohteessa laskentatapauksessa 2, kun ratarakenteeseen on asennettu 80 mm routalevy.

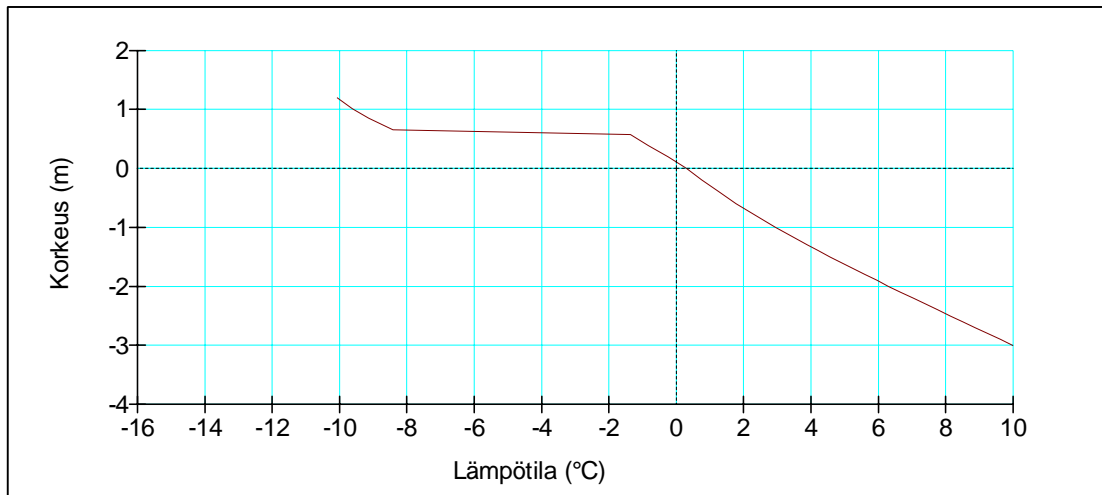


Kuva 7.5. Roudan maksimisyvyys Oulun kohteessa laskentatapauksessa 1, kun ratarakenteeseen on asennettu 80 mm routalevy.

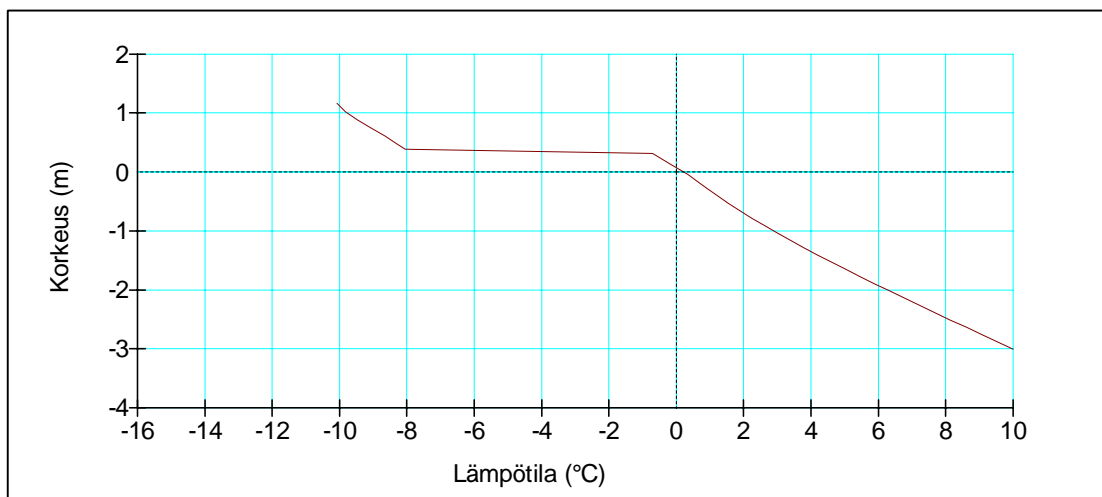


Kuva 7.6. Roudan maksimisyvyys Oulun kohteessa laskentatapauksessa 2, kun ratarakenteeseen on asennettu 80 mm routalevy.

Kuvissa 7.7 ja 7.8 on esitetty kuvaajan muodossa ratapenkereen ja pohjamaan lämpötila eri syvyyksillä kuvissa 7.3 ja 7.4 esitetyissä tilanteissa Kirkkonummella. Kuvaajista nähdään, miten tehokkaasti ratarakenteeseen asennettu eristelevy pysäyttää lämmön siirtymisen lävitseen. Ensimmäisessä laskentatapauksessa lämpötila eristelevyn pinnalla on $-8,40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja alapinnalla $-1,35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Toisessa laskentatapauksessa lämpötila eristelevyn pinnalla on $-8,04\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja alapinnalla $-0,80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Eristelevy hidastaa lämpövirran poistumista maaperästä ja mitä lähemmäs radan pintaa levy asennetaan, sitä suurempi lämpömäärä jää levyn alle.



Kuva 7.7. Ratapenkereen ja pohjamaan lämpötilat eri syvyyksillä kuvan 7.3 mukaisessa laskentatapauksessa Kirkkonummella.



Kuva 7.8. Ratapenkereen ja pohjamaan lämpötilat eri syvyyksillä kuvan 7.4 mukaisessa laskentatapauksessa Kirkkonummella.

Routalevyn asennussyvyyteen vaikuttavat myös levyn asentamiseen ja radan korjaustoimenpiteiden suorittamiseen liittyvät näkökohdat. Välittömästi tukikerroksen alapuolelle asennettuun routalevyyn kohdistuu suuri rasitus, kun raidesepelirakeet painautuvat levyyn. Suoraan tukikerroksen alapuolella oleva routalevy aiheuttaa myös ongelmia päällysrakenteiden korjaustoimenpiteiden yhteydessä, sillä ratarakenteessa

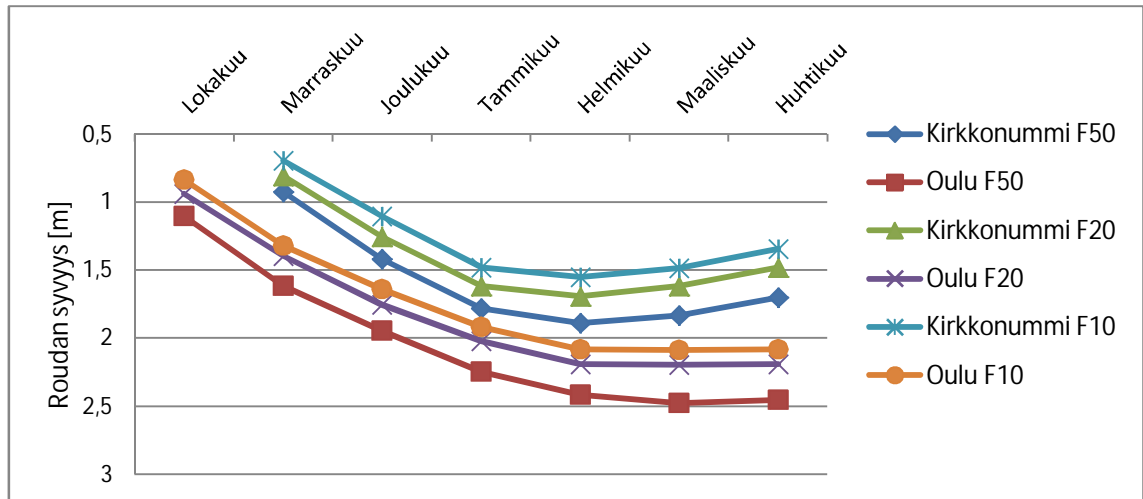
olevat levyt vaurioituvat helposti sepelinseulontakoneen terien alla. Jos toimintakuntoiset eristelevyt jätetään tukikerroksen kunnostuksen ajaksi ratarakenteeseen, levyjen työnaikaisesta suojauksesta syntyy lisäkustannuksia. Kustannustehokkainta onkin ajoittaa vanhojen routalevyjen vaihto tukikerroksen uusimisen yhteyteen. Syvemmälle ratarakenteeseen asennettu routalevy ei aiheuta ongelmia päällysrakenteen korjaustoimenpiteiden suoritukselle ja levy on paremmin suojassa junaliikenteen dynaamiselta kuormitukselta. Levyn asentaminen ja vaihtaminen voi kuitenkin edellyttää suuria kaivutöitä, joiden suorittaminen rataympäristössä on hankalaa.

7.2 Roudan syvyys eristämättömässä ja eristetyssä ratarakenteessa

7.2.1 Roudan syvyys eristämättömässä ratarakenteessa

Kuvassa 7.9 on esitetty roudan syvyyden kehittyminen routaeristämättömässä ratarakenteessa mitoituspakkasmäärien F10, F20 ja F50 mukaisina talvina Kirkkonummella ja Oulussa. Kirkkonummella pakkaskausi alkoi lokakuussa ja Oulussa marraskuussa. Molemmissa kohteissa routaraja ulottui mitoittavina talvina ratarakenteen läpi pohjamaahan, joten tarkasteltavat ratapenkereet on eristettävä routalevyillä. Oulussa routa ulottui pohjamaahan talvena F10 0,45 m, talvena F20 0,55 m ja ankarimpana talvena F50 0,83 m. Kirkkonummella routa ulottui pohjamaahan talvena F10 0,35m, talvena F20 0,49 m ja talvena F50 0,70 m. Etelä-Suomessa routa oli syvimmillään helmikuussa ja Pohjois-Suomessa maaliskuussa.

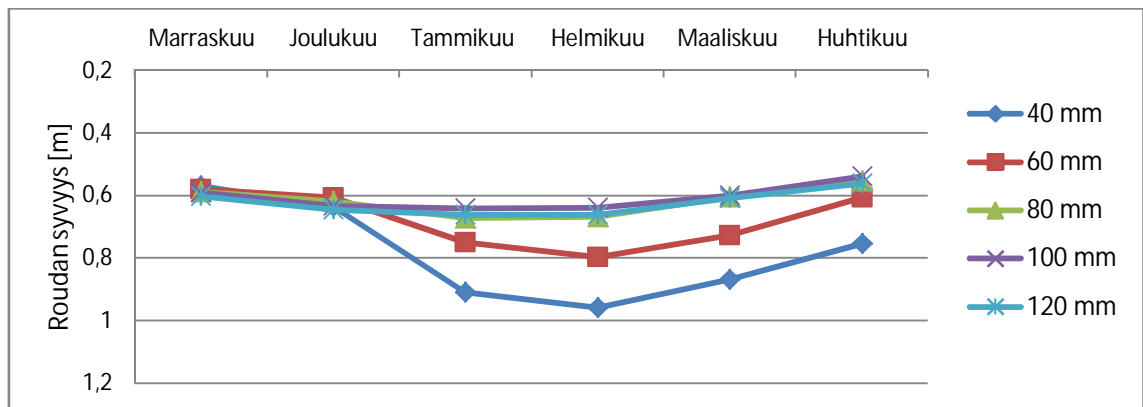
Kuvasta 7.9 nähdään, että routa tunkeutui mitoittavana talvena F50 keskimäärin 0,2–0,3 m syvemmälle kuin talvena F20. Talveen F10 verrattuna routa tunkeutui mitoittavana talvena F50 keskimäärin 0,35–0,40 m syvemmälle. Pohjois-Suomessa routa tunkeutui keskimäärin 0,5–0,6 m syvemmälle ratarakenteeseen ja pohjamaahan kuin Etelä-Suomessa. Tulosten tarkastelussa on huomioitava, että pakkaskauden kestoksi oletettiin laskennassa talvikuukausien kokonaispituus. Todellinen pakkasjakson pituus on lyhyempi, mikä korostuu etenkin pakkaskauden viimeisen kuukauden eli huhtikuun kohdalla. Laskennassa huhtikuun päivien lämpötilaksi asetettiin kuukauden keskimääräinen lämpötila, joka sekä Oulussa että Kirkkonummella oli nollan alapuolella. Todellisuudessa huhtikuussa lämpötilat alkavat kuun loppua kohden nousta nollan yläpuolelle, joten routa alkaa sulaa laskennassa saatuja tuloksia nopeammin.



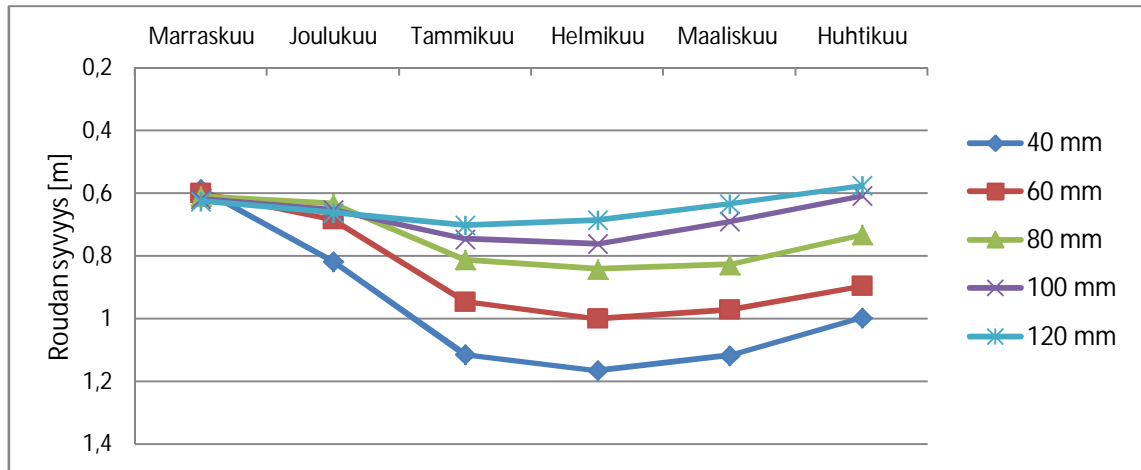
Kuva 7.9. Roudan syvyys Oulussa ja Kirkkonummella eristämättömässä ratarakenteessa mitoittavina talvina F10, F20 ja F50.

7.2.2 Roudan syvyys Kirkkonummella eristetyssä ratarakenteessa

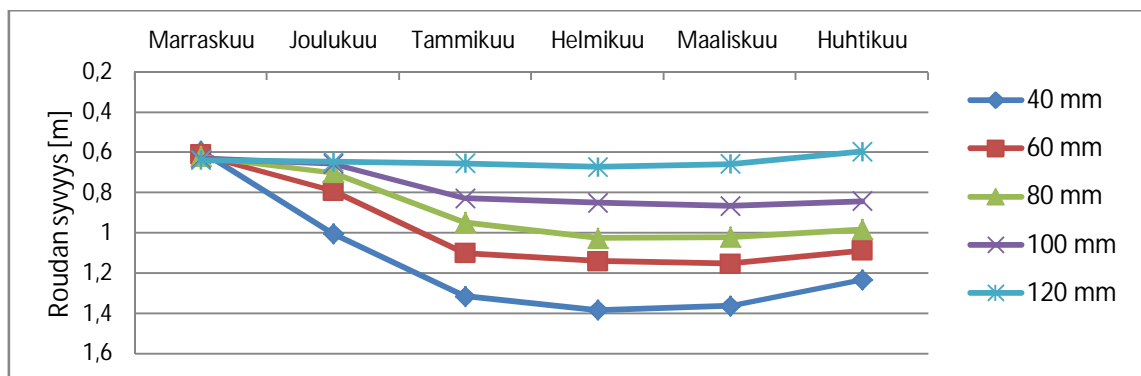
Kuvissa 7.10, 7.11 ja 7.12 on esitetty routalevyn asentamisen vaikutus roudan syvyyteen Kirkkonummella mitoittavina talvina F10, F20 ja F50. Ratapenkereen korkeus Kirkkonummella on 1,20 m, joten kuvista huomataan, ettei mitoittavana talvena F50 levypaksuus 40 mm riitä estämään roudan tunkeutumista pohjamaahan. Rakenteeseen on asennettava paksuudeltaan 60 mm routalevy. Mitoittavina talvina F10 ja F20 jo eristelevypaksuus 40 mm riittää estämään roudan tunkeutumisen routivaan pohjamaahan.



Kuva 7.10. Roudan syvyys Kirkkonummella mitoitustalvena F10, kun routaeristelevy on asennettu tukikerroksen alapuolelle.



Kuva 7.11. Roudan syvyys Kirkkonummella mitoitustalvena F20, kun routaeristelevy on asennettu tukikerroksen alapuolelle.



Kuva 7.12. Roudan syvyys Kirkkonummella mitoitustalvena F50, kun routaeristelevy on asennettu tukikerroksen alapuolelle.

RATO 3:ssa esitetään mitoituskäyrästöt, joiden perusteella määritetään routimattoman eristetyratarakenteen vähimmäispaksuus. Routamitoituksen lähtötietoina tarvitaan mitoittava pakkasmäärä sekä paikkakunnan vuotuinen keskilämpötila. Taulukossa 7.1 on esitetty RATO 3:n mukaiset routimattoman eristetyratarakenteen vaaditut kokonaispaksuudet Kirkkonummella mitoittavilla pakkasmäärillä F10, F20 ja F50. Kun verrataan TEMP/W:llä saatuja laskentatuloksia RATO 3:n mukaisiin arvoihin, huomataan tulosten olevan hyvin yhteneväisiä. Laskennan perusteella määritetyt routalevyjen minimipaksuudet täyttävät RATO 3:n vaatimukset.

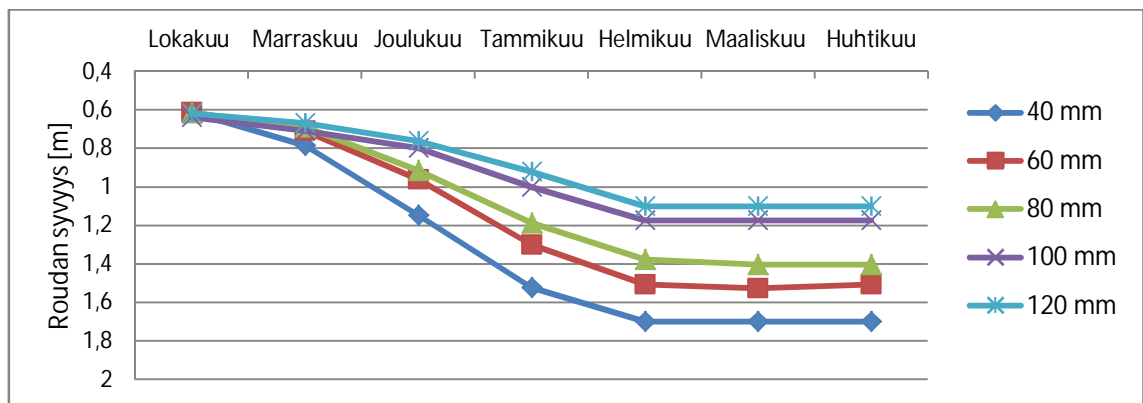
Ratateknisten ohjeiden mitoituskäyrästöt perustuvat roudan syvyyden laskentaan. Käyrästöistä luettava tapauskohtainen routimattoman rakenteen minimipaksuus vastaa siis roudan maksimisyvyyttä. TEMP/W:llä saadut roudan syvyyden arvot poikkeavat vain hieman RATO 3:n arvoista. Suurimmat erot ovat mitoitustalven F50 tuloksissa. TEMP/W:llä saadut roudan maksimisyvyydet levypaksuuksilla 40 mm, 60 mm ja 80 mm ovat keskimäärin 0,1 m suurempia kuin RATO 3:n käyrästöissä esitetyt arvot. Erot ovat kuitenkin niin pieniä, ettei niillä ole vaikutusta eristelevypaksuuden valintaan.

Taulukko 7.1. RATO 3:n mukainen routimattoman rakenteen minimipaksuus Kirkkonummella, kun ratarakenteeseen on asennettu routalevy.

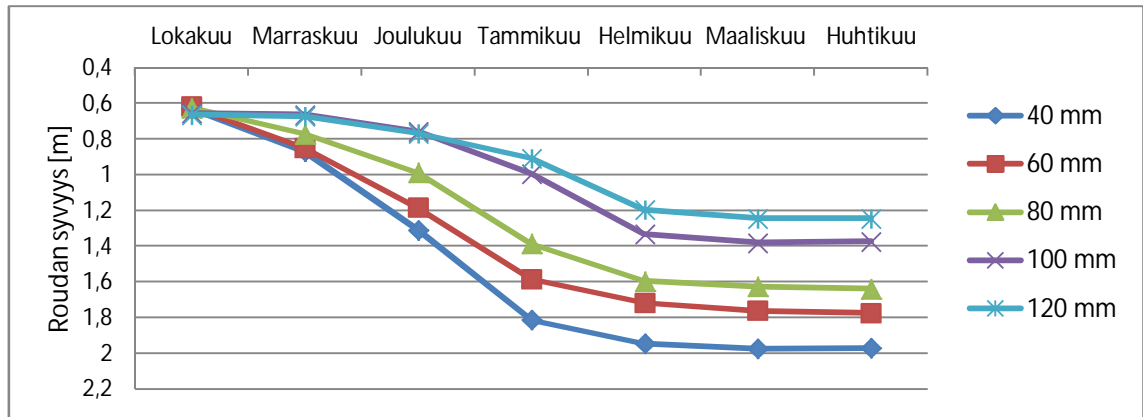
Routalevypaksuus (mm)	Routimattoman rakenteen vähimmäispaksuus (m)		
	Kirkkonummi F10	Kirkkonummi F20	Kirkkonummi F50
40	1,01	1,18	1,30
60	0,81	0,95	1,09
80	0,80	0,80	0,90
100	0,80	0,80	0,80
120	0,80	0,80	0,80

7.2.3 Roudan syvyys Oulussa eristetyssä ratarakenteessa

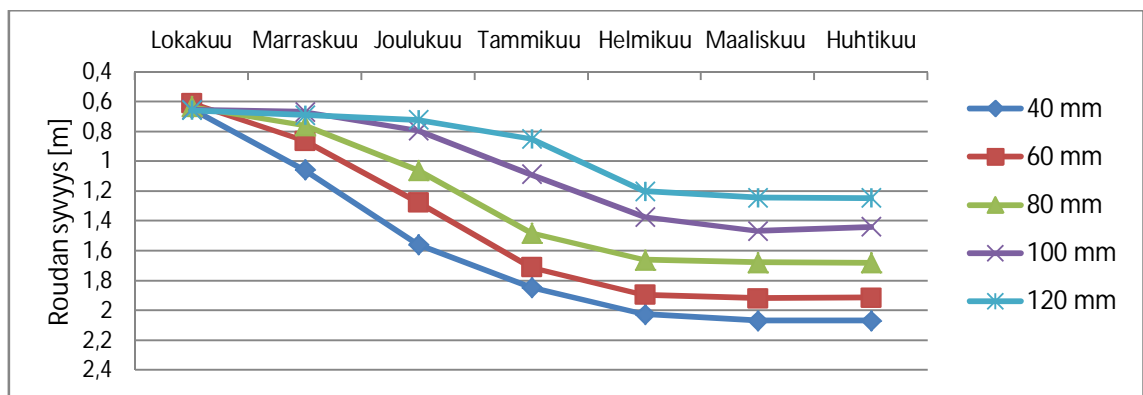
Kuvissa 7.13, 7.14 ja 7.15 on esitetty routaeristeen asentamisen vaikutus roudan syvyyteen Oulussa mitoittavina talvina F10, F20 ja F50. Ratapenkereen korkeus Oulussa on 1,65 m ja kuvista nähdään, että levypaksuudella 40 mm routa ulottuu kaikkina mitoitustalvina pohjamaahan eli levypaksuus on riittämätön. Mitoittavana talvena F10 ratarakenteeseen asennettavan routalevyn sopiva paksuus on 60 mm ja talvena F20 80 mm. Ankarimpana mitoitavana talvena F50 eristelevypaksuus 100 mm riittää estämään roudan tunkeutumisen routivaan pohjamaahan.



Kuva 7.13. Roudan syvyys Oulussa mitoitustalvena F10, kun routaeristelevy on asennettu tukikerroksena alapuolelle.



Kuva 7.14. Roudan syvyys Oulussa mitoitustalvena F20, kun routaeristelevy on asennettu tukikerroksen alapuolelle.



Kuva 7.15. Roudan syvyys Oulussa mitoitustalvena F50, kun routaeristelevy on asennettu tukikerroksen alapuolelle.

Taulukossa 7.2 on esitetty RATO 3:n mitoituskäyrästäjien mukaiset routimattoman eristetyn ratarakenteen vähimmäispaksuudet Oulussa mitoittavilla pakkasmäärillä F10, F20 ja F50. Kun verrataan TEMP/W:llä saatuja laskentatuloksia RATO 3:ssa esitettyihin arvoihin, huomataan myös Oulun kohteessa tulosten olevan hyvin yhteneväisiä. TEMP/W:llä määritetyt vaadittavat routalevypaksuudet ovat mitoitustalvea F50 lukuun ottamatta RATO 3:n mukaisia. TEMP/W:n laskentatulosten perusteella mitoitustalvena F50 ratarakenteeseen tulee asentaa 100 mm:n eristelevy. Ratateknisten ohjeiden mukaan jo levypaksuus 80 mm on riittävä.

Kun verrataan TEMP/W:llä laskettuja roudan maksimisyyvyksiä RATO 3:n mukaisiin syvyyskiin, huomataan että myös Oulun kohteessa erot ovat melko pieniä. Roudan syvyudet vaihtelevat keskimäärin vain 0,05–0,1 m. Suurimmat erot ovat mitoitustalven F50 tuloksissa. Eristelevypaksuuksilla 60 mm, 80 mm ja 100 mm TEMP/W laskee roudan tunkeutuvan RATO 3:ssa esitettyjä arvoja 0,1 m syvemälle.

Taulukko 7.2. RATO 3:n mukainen routimattoman rakenteen minimipaksuus Oulussa, kun ratarakenteeseen on asennettu routalevy.

Routalevypaksuus (mm)	Routimattoman rakenteen vähimmäispaksuus (m)		
	Oulu F10	Oulu F20	Oulu F50
40	1,82	1,98	2,10
60	1,58	1,70	1,78
80	1,50	1,47	1,57
100	1,24	1,30	1,37
120	1,10	1,18	1,25

7.3 Routalevyn alle tehtävän massanvaihdon syvyys

Jos radan alusrakennekerroksen materiaali on routivaa, asennettavan routalevyn alle on tehtävä massanvaihto, jossa routiva maamateriaali vaihdetaan routimattomaan. Massanvaihto tehdään niin syväälle kuin routaraja ulottuu, jotta alusrakenteessa ei tapahdu routimista. RATO 3:ssa ohjeistetaan, että luonnonmateriaaleista tehtävän massanvaihdon minimisyvyys on 300 mm. Taulukossa 7.3 on esitetty routarajan etäisyys routalevyn alapinnasta talvina F10, F20 ja F50 Kirkkonummella ja Oulussa. Laskennassa tutkittiin tilannetta, jossa routalevy asennetaan tukikerroksen alapuolelle.

Taulukko 7.3. Routarajan syvyys eristelevyn alapinnasta Kirkkonummella ja Oulussa.

Kohde ja mitoituspakkasmäärä	Roudan etäisyys (m) routalevyn alapinnasta mitoitettavina talvina F10, F20 ja F50				
	40 mm	60 mm	80 mm	100 mm	120 mm
Kirkkonummi F10	0,37	0,19	0	0	0
Kirkkonummi F20	0,58	0,39	0,21	0,11	0
Kirkkonummi F50	Pohjamaassa	0,54	0,40	0,22	0
Oulu F10	Pohjamaassa	0,90	0,77	0,52	0,43
Oulu F20	Pohjamaassa	Pohjamaassa	1,00	0,73	0,57
Oulu F50	Pohjamaassa	Pohjamaassa	Pohjamaassa	0,82	0,60

Taulukosta 7.3 nähdään, että RATO 3:n mukainen massanvaihdon minimisyvyys 300 mm on riittävä vain Kirkkonummella mitoitustalvena F10 eristelevypaksuudella 60 mm, mitoitustalvena F20 eristelevypaksuuksilla 80 mm ja 100 mm sekä mitoitustalvena F50 eristelevypaksuudella 100 mm. Routarajan jäädessä alusrakennekerrokseen roudan syvyys eristelevyn alla vaihtelee Kirkkonummella välillä 0,11–0,58 m. Kun 0-isotermin etäisyys routalevyn alapinnasta on 0,58 m, routa on jo hyvin lähellä pohjamaata, joten massanvaihto on järkevää tehdä koko alusrakenteen paksuudelta. Tässä työssä määritettiin, että talvina F10 ja F20 Kirkkonummen kohteessa ratarakenteeseen on asennettava paksuudeltaan 40 mm routalevy. Talvena F50 riittävä eristelevypaksuus on 60 mm. Kaikkien mitoitettujen levypaksuuksien alle tarvitaan syvämpi massanvaihto kuin 300 mm.

Oulussa massanvaihdon minimisyvyys 300 mm ei ole riittävä yhdessäkään tutkitussa laskentatapauksessa. Kun routaraja jää alusrakennekerrokseen, eikä tunkeudu pohjamaan, roudan syvyys eristelevyn alla vaihtelee välillä 0,43–1,0 m. Kun 0-isotermin etäisyys routalevyn alapinnasta on 1 m, routaraja on alusrakenteen ja pohjamaan rajalla, joten massanvaihto on tehtävä koko alusrakennekerroksen paksuudelta. Tässä työssä määritettiin, että talvena F10 Oulun kohteessa ratarakenteeseen on asennettava paksuudeltaan 60 mm routalevy. Talvena F20 riittävä eristelevypaksuus on 80 mm ja talvena F50 100 mm. Kaikkien mitoitettujen levypaksuuksien alle tarvitaan vähintään 500 mm syvempi massanvaihto kuin 300 mm.

Taulukossa 7.3 roudan etäisyydeksi eristelevyn alapinnasta on merkitty 0, jos levy pysäyttää routarajan etenemisen levyn alapuoliseen alusrakenteeseen. Routalevyn oma lämpökapasiteetti on kuitenkin niin pieni, että routa tunkeutuu todennäköisesti hieman levyn alapuolelle, eikä routalevyä siksi saa asentaa suoraan routivan alusrakenteen päälle. Myös paksujen routalevyjen alle on siis tehtävä matala massanvaihto. Eristelevyt saattavat myös vaurioitua käyttöikänsä aikana, jolloin niiden lämmöneristyskyky heikkenee ja routa tunkeutuu levyn alapuolelle routivaan alusrakenteeseen.

7.4 Laskentatulosten arviointi

TEMP/W on käyttöliittymältään melko yksinkertainen ohjelma ja sen toimintaan voi perehtyä monipuolisen käyttöoppaan avulla. Elementtimenetelmään perustuva TEMP/W on tehokas työkalu monimutkaisten ja haastavien lämpötekniisten ongelmien ratkomiseen, mutta käyttäjällä on aina suuri vastuu lopputuloksen arvioinnista. Luotettavien laskentatulosten saavuttaminen edellyttää, että mallinnettavan ongelman pohjasuhde- ja lämpöparametritiedot ovat hyvin selvillä. Tässä työssä ei tutkittu olemassa olevia kohteita, joten laskentaparametreina käytettiin mallinnettavien maamateriaalien keskimääräisiä lämpötekniisiä arvoja. Kirjallisuudesta löytyvien lämpöparametrien vaihteluväli on kuitenkin suuri ja esimerkiksi valituilla lämmönjohtavuuden arvoilla on merkittävä vaikutus ohjelman laskentatulokseen. Tulosten tarkastelussa on huomioitava, että laskennassa käytettiin samoja lämpöparametreja routimattomalle ja routivalle hiekalle. Tehdyt koemallinnukset osoittivat, että erot routimattoman ja routivan alusrakennehiekan lämpöparametreissa eivät vaikuttaneet merkittävästi roudan syvyyteen. Jos mallinnetaan olemassa olevaa kohdetta, laskennassa voidaan parhaassa tapauksessa käyttää oikeita kohdekohtaisia maaparametreja, jotka on määritetty maanäytteille tehdyillä laboratorikokeilla.

TEMP/W:n laskentatulosten tulkintaa varten käyttäjän on ymmärrettävä ohjelman taustalla vaikuttava geotekninen teoria ja eri parametrien vaikutus mallinnustuloksiin. Mallinnustulos perustuu käyttäjän antamiin lähtöarvoihin, eikä ohjelma arvioi parametrien luotettavuutta. Mallinnuksen alkuvaiheessa on kiinnitettävä erityistä huomiota lähtöparametrien yksiköihin ja tarvittaviin yksikkömuunnoksiin. Esimerkiksi TEMP/W:n käyttämä lämpökapasiteetin yksikkö on J/m^3C , eikä tässä työssä

lämpökapasiteetin kaavoissa esitetty $\text{Wh/m}^3\text{K}$. Lisäksi on huomioitava, että TEMP/W käyttää vesipitoisuutena tilavuusvesipitoisuutta, eikä vesipitoisuutta painoprosentteina.

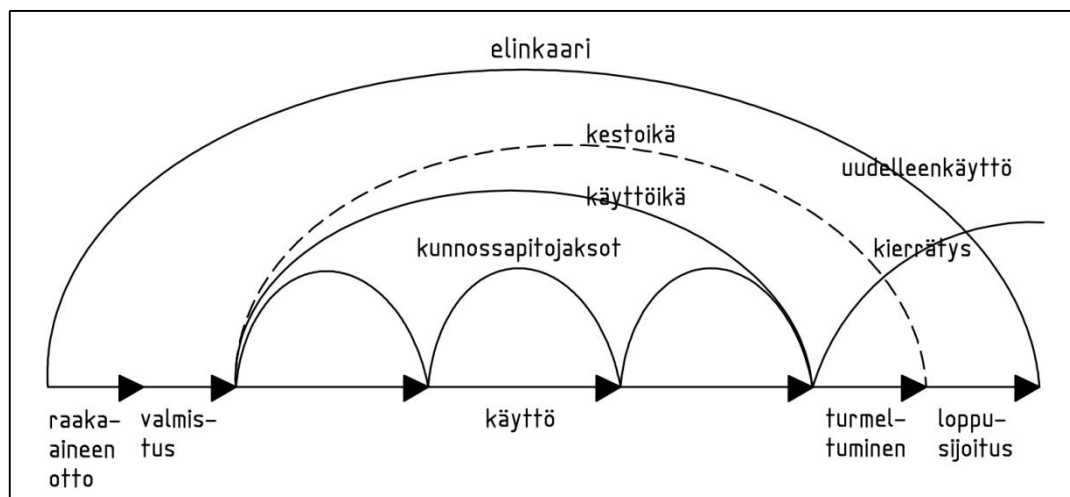
TEMP/W:llä tutkitut laskentatapaukset olivat karkeita yksinkertaistuksia todellisuudesta, kuten numeeriset mallit aina. Roudan tunkeutumiseen ratarakenteessa vaikuttaa monia muuttujia, joiden perusteellinen huomioiminen mallinnuksessa on käytännössä mahdotonta. Tämän työn laskentatapauksissa maanpinnan lämpötilan oletettiin vastaavan mallinnettavan kohteen vuotuista ilman keskilämpötilaa. Todellisuudessa maanpinnan lämpötila ei ole täysin sama kuin ilman lämpötila ja lämpötila luonnollisestikin vaihtelee vuosittain. Lisäksi myös lumipeitteen paksuus ja siten sen eristävä vaikutus vaihtelee vuosittain ja talven aikana kuukausittain. Rataympäristössä routarajan etenemisen kannalta on myös merkitystä syksyllä juuri ennen pakkaskauden alkamista tulevilla sateilla. Jos sateet ovat runsaita, ratarakenteen vesipitoisuus kasvaa merkittävästi. Ratarakenteen vesipitoisuuteen vaikuttaa myös muun muassa ratarakenteen kuivatuksen toimivuus sekä pohjavedenpinnan läheisyys.

Elementtimenetelmään perustuvan lämpömallinnusohjelman käyttäjällä on oltava käsitys routarajan syvyyden realistisista arvoista. Roudan syvyyden suuruusluokkaa on järkevää arvioida esimerkiksi roudan syvyyden käsinlaskentakaavoilla, jotta mahdolliset virheet mallin geometriassa tai laskentaparametreissa voidaan korjata. Jos mallinnuskohteena on olemassa oleva ratarakenne, laskennan tueksi olisi hyvä suorittaa muutamia empiiriä mittauksia, jotta voidaan varmistua ohjelman laskemien roudan syvyyksien oikeellisuudesta. Tässä työssä TEMP/W:llä laskettuja roudan maksimisyyvyksiä erilaisissa laskentatapauksissa verrattiin RATO 3:n mitoituskäyrästä mukaisiin roudan syvyyksiin. Laskennalla saadut roudan syvyydet sekä Kirkkonummella että Oulussa olivat melko yhteneväisiä RATO 3:n käyrästä luettavien syvyyksien kanssa. TEMP/W:llä määritetyt routalevyypaksuudet täyttivät myös Ratateknisten ohjeiden vaatimukset, joten voidaan päätellä, että saadut laskentatulokset ovat suuruusluokaltaan oikeita ja luotettavia.

8 Routakorjausten kustannukset ja elinkaaritarkastelu

8.1 Elinkaariajattelu ratamaailmassa ja välilliset kustannukset

Suomessa väyliä koskeva elinkaarisuunnittelu on painottunut teiden elinkaaritutkimuksiin ja vasta viime vuosien aikana myös ratamaailmassa on alettu siirtyä elinkaariajattelun soveltamiseen päätöksenteon apuvälineenä (Väisänen ja Nurmikolu 2012). Kuvassa 7.1 on esitetty elinkaarihallinnan käsitteet. Elinkaarella tarkoitetaan ajanjaksoa, joka käsittää rakenteen kaikki vaiheet raaka-aineen hankinnasta loppusijoitukseen tai kierrätykseen. Käyttöikä on se elinkaaren osa, jonka ajan rakennetta voidaan käyttää ja se täyttää sille asetetut tekniset vaatimukset. Käyttöiän aikana rakennetta on taloudellisesti kannattavaa kunnossapitää ja käyttöikä koostuu kunnossapitajaksoista. Kestoiikä käsittää kaikki rakenteen valmistamisen ja turmeltumisen väliset vaiheet. Käyttöiän jälkeen rakenteella voi olla jäljellä vielä kestoikä, mutta kestoiän lopussa rakenteen tekninen kunto on heikentynyt niin paljon, että sen käyttämisestä aiheutuu lisäkustannuksia. Kestoiän päättyessä rakennetta ei voida enää käyttää ja käytön jatkamiseksi rakenne tulisi uusiksi kokonaan. (Korkiala-Tanttu et al. 2005.)



Kuva 7.1. Elinkaariajattelun käsitteistö (Korkiala-Tanttu et al. 2005).

Elinkaarikustannuksiin lasketaan mukaan kaikki rakenteen elinkaaren aikana sen rakentamisesta, käytöstä ja ylläpidosta sekä loppusijoituksesta syntyvät kustannukset. Elinkaarikustannusten hallinnalla pyritään tunnistamaan kaikki investointeihin liittyvät kustannukset ja minimoimaan kustannukset siten, että rakenne kuitenkin täyttää kaikki sille asetetut tekniset ja toiminnalliset vaatimukset. Elinkaaritarkasteluiden tavoitteena on selvittää toteutettavan hankkeen tai valinnan rahassa mitattava yhteiskuntataloudellinen kokonaiskannattavuus huomioimalla hankkeen ekologisuus, taloudellisuus ja toiminnallisuus. Radanpidossa on päämääränä tehdä yhä enemmän elinkaaritaloudellisia investointeja, jotta raideliikenteen käyttäjille voidaan tarjota turvallisia matkoja mahdollisimman tehokkaasti sekä taloudellisesti että ekologisesti. Huolellisella korjaustoimenpiteiden suunnittelulla eli valitsemalla kohteeseen parhaiten

soveltuva korjausratkaisu ja materiaalit, voidaan vaikuttaa rakenteen elinkaarikustannuksiin merkittävästi. (Koskela 2011, Macchi et al. 2012.)

Rataympäristö on monimutkainen kokonaisuus ja elinkaaritaloudellisissa tarkasteluissa tulisi huomioida myös korjauksista ja kunnossapidosta välillisesti syntyvät kustannukset, joita aiheutuu muun muassa raideliikenteen viivästyksistä, aikataulumuutoksista, korvaavien kuljetusten järjestämisestä sekä radan suorituskyvyn alenemisesta. Välillisiä kustannuksia muodostuu myös raideliikenteen imagon kärsimisestä, joka saattaa johtaa asiakkaiden menettämiseen. Kustannuslaskelmiin tulisi sisällyttää myös yhteiskunnalle aiheutuvat kustannukset ja vastaavasti yhteiskunnan saamat hyödyt. Laskelmissa toimenpiteiden aikaan saamat hyvät vaikutukset näkyvät niin kutsuttuina positiivina kustannuksina. Välillisten kustannusten arviointi on usein haastavaa, sillä esimerkiksi ajalle on määritettävä rahallinen arvo. (Väisänen ja Nurmikolu 2012.)

Routavaurioiden aiheuttamista viivästyksistä ja rataverkon suoritus- sekä välityskyvyn alenemisesta aiheutuu kustannuksia sekä matkustajille että liikennöitsijälle. Routarajoituksista aiheutuvat kustannukset koostuvat matkustajien kokemasta haitasta, matkustajatulon vähenemisestä, kalustokierron ja henkilökunnan kustannuksista sekä routarajoitusten suunnittelu- ja asennuskustannuksista. Rajoituksesta syntyvien kustannusten suuruuteen vaikuttaa rajoituksen laajuus sekä asennettavien baliisien ja merkkien määrä. Liikennevirasto vastaa rajoitusten suunnittelusta sekä baliisien ja merkkien asentamisesta ja poistosta. Matkustajat ovat oikeutettuja saamaan VR:ltä korvauksia, mikäli kaukojunamatka viivästyy yli tunnin. Tapauskohtaisesti korvauksia voi saada myös myöhästymisestä aiheutuvan jatkoyhteyden katkeamisen vuoksi. (Liikennevirasto 2011b.)

Matkustajille viivästysten tai aikataulumuutosten vuoksi aiheutuvaa haittaa voidaan arvioida rahassa laskemalla matkustajien ajalle hinta käyttämällä vahvistettuja tieliikenteen yksikköarvoja. Yksikköarvon suuruus määräytyy matkan tarkoituksen perusteella taulukon 7.1 mukaisesti. Junamatkoista tehdään työajan sisällä noin 15 % ja loput 85 % ovat muita matkoja. Mikäli rataosakohtainen matkan tarkoituksijakauma tunnetaan, sitä tulee käyttää aikakustannusten laskennassa. Muulloin voidaan käyttää keskimääräistä junamatkustajan ajan arvoa, jonka suuruudeksi saadaan 7,1 euroa/tunti. (Ratahallintokeskus 2004b.) Myöhästymisten aiheuttamien todellisten kustannusten suuruuden selvittäminen on kuitenkin vaikeaa, sillä liikenteen epätasaisuudesta syntyvät kustannukset ovat aina tapauskohtaisia.

Taulukko 7.1. Matka-ajan yksikköarvojen suuruus Suomessa vuoden 2000 hintatasossa (Ratahallintokeskus 2004b).

Matkan tarkoitus / junamatkan pituus	Matkustajan ajan arvo (euroa / tunti)
Työajan matka	24,08
Työ- tai asiointimatka	4,07
Vapaa-ajan matka	4,07

Vuoden 2011 Roudan hallintaraportissa on määritetty teoreettisen routapaikkakohtaisen myöhästymisen suuruus. Myöhästymisen määrittämiseen sallitun nopeuden ja routanopeusrajoituksen aikaerona routapaikkaa ohitettaessa. Teoreettinen matka-ajan hidastuminen eri rataosilla vuonna 2011 on esitetty liitteessä 4. Pienimmät roudan aiheuttamat myöhästymiset ovat kestoltaan alle 2 minuuttia ja pahimmin routavaurioista kärsivillä rataosilla, kuten välillä Oulu-Kontiomäki myöhästymiset ovat paikoin yli 20 minuuttia. Vuonna 2011 välin Oulu-Kontiomäki toteutuneet myöhästymisminuutit talven ja kevään ajalta olivat kokonaisuudessaan noin 750 minuuttia ja ratavälin liikenne hidastui suurimmillaan 47 minuuttia (Liikennevirasto 2011b).

Elinkaaritarkasteluissa voidaan taulukossa 7.1 esitettyjen ajan arvojen perusteella arvioida routakorjauksilla saavutettavan matka-ajan säästön tuottamia hyötyjä matkustajalle. Tarkastellaan esimerkkinä välin Oulu-Kontiomäki kilometriväliä 877+300–894+200, jolla routarajoitukset olivat vuonna 2011 voimassa 54 vuorokautta ja välin liikenne hidastui routarajoitettuna aikana 2,9 minuuttia matkaa kohden (Liikennevirasto 2011b). Liikennevirasto tilastoi vuosittain henkilöliikenteen matkoja rataosittain ja vuonna 2011 välillä Oulu-Kontiomäki tehtiin 135 000 matkaa. Jos arvioidaan karkeasti, että yhden vuorokauden aikana matkoja tehtiin 375 kappaletta, voidaan laskea keskimääräinen junamatkustajan ajan arvon säästö, mikäli kilometrivälin routavauriot korjattaisiin. Routarajoituksen keston aikana tehtiin arviolta 20 250 matkaa, joista jokainen viivästyi 2,9 minuutilla, joten keskimääräiseksi matkustajien ajan arvoksi saadaan 6950 euroa. Tarkasteluissa on huomioitava myös routakorjausten ajaksi ratavälille asetettu nopeusrajoitus tai välin liikennöinnin täydellinen katkaiseminen korjausten ajaksi.

Jotta elinkaarikustannustarkasteluita voidaan tehdä, tarvitaan luotettavaa ja yksityiskohtaista tietoa radan kunnossapitotoimenpiteiden ja korjausten kustannuksista. Tarkasteluissa on huomioitava, että rataympäristö koostuu lukuisista erilaisista teknisistä osista, jotka ovat kaikki kytkeytyneitä toisiinsa (Macchi et al. 2012). Kustannuksia voidaan arvioida sitä tarkemmin, mitä enemmän ymmärretään radan kunnan kehittymiseen ja kustannusten muodostumiseen vaikuttavia tekijöitä. Kaikkien mahdollisten kustannusten suuruuden arvioiminen on kuitenkin hyvin hankalaa, ellei mahdotonta, sillä infrarakenteiden elinkaareen vaikuttaa paljon ulkoisia tekijöitä, joiden ennakointi on vaikeaa. Lisäksi ratarakenteiden elinkaari on niin pitkä, että

tarkastelu-aikaan sisältyy paljon epävarmuustekijöitä. Laskennalliset elinkaarikustannukset eivät siis aina vastaa todellisen elinkaaren aikana syntyviä kustannuksia. On kuitenkin olemassa erilaisia tekniikoita, joiden avulla voidaan kehittää yksinkertaisia malleja, joilla kuvataan monimutkaista rataympäristöä. Malleissa käytettyjen funktioiden parametrien epävarmuutta ja niiden valintaan sisältyviä riskejä voidaan arvioida tilastollisesti ja siten on mahdollista saada arvio mallin avulla saatujen tulosten luotettavuudesta. (Kuula-Väisänen ja Nurmikolu 2012.)

8.2 Elinkaaritalouteen perustuva routaongelman korjaussuunnittelu

Vuoden 2011 Roudan hallintaraportissa on alustavasti arvioitu selvityksessä mukana olleiden 11 rataosan routakorjauskustannusten suuruudeksi 80,3 miljoonaa euroa. Kustannukset perustuvat oletukseen, että valtaosa routahaittojen korjauksista voidaan toteuttaa päällysrakennetöillä tai routalevyjen asentamisella. Suurin korjaustarve on rataosilla Kouvola-Joensuu, Pieksämäki-Joensuu, Oulu-Kontiomäki sekä Iisalmi-Ylivieska, joiden korjausten kustannukset ovat yhteensä 48 miljoonaa euroa. Routakorjausten rataosakohtaista kannattavuutta voidaan tarkastella vertaamalla korjauskustannuksia korjauksilla saavutettavaan liikenteelliseen hyötyyn. Parhaat liikenteelliset hyödyt suhteessa kustannuksiin saadaan ratavälien Oulu-Kontiomäki, Iisalmi-Kontiomäki, Laurila-Rovaniemi sekä Kouvola-Joensuu korjauksilla. Välien korjauskustannukset ovat yhteensä noin 40 miljoonaa euroa. (Liikennevirasto 2011a.)

Jos Suomen koko rataverkko korjattaisiin tasoon F10, korjauskustannukset nousisivat 500 miljoonaan euroon ja arvioituja routahaittoja olisi 1500 kilometrin matkalla. Routapaikkojen poistaminen tasoon F10 ei kuitenkaan ole taloudellisesti mahdollista, eikä elinkaaritaloudellisesti kannattavaa. Pahimmat routapaikat onkin priorisoitava siten, että kohteiden korjauksilla saavutetaan mahdollisimman hyviä tuloksia kustannustehokkaasti. Routakohteiden erillisrahoituksen määrän arvioinnissa tulee huomioida ratavälit, joiden päällysrakennetyöt sisältyvät Liikenneviraston lähivuosisien investointiohjelmiin ja mahdolliset päällekkäiset kohteet on poistettava. (Liikennevirasto 2011a.)

Tampereen teknillisen yliopiston ”Ratojen routaongelmien korjaustoimenpiteiden ja routasuojauksen elinkaaritaloudelliset perusteet (RARELI)” –projektissa pyritään luomaan menettely, jonka avulla routaongelmakohteiden korjaustoimenpiteitä koskeva päätöksenteko voidaan perustaa ratkaisuvaihtoehtojen elinkaaritaloudellisuuteen. Menettely perustuu routaongelman syiden ymmärtämiseen sekä ongelmien toistuvuuden mallintamiseen. Lisäksi tarkasteluun otetaan mukaan korjaustoimenpiteiden kustannustiedot.

Menettely etenee vaiheittain ja lähtee liikkeelle määrittämällä routanousulle laskentamalli, joka perustuu arvioituun maakerrosten routivuuteen ja roudan syvyyteen. Prosessia jatketaan määrittämällä malli routanousun ja roudan aiheuttaman

epätasaisuuden välille. Malli perustuu mitattujen routanousujen ja raiteentarkastuksen mittaaman epätasaisuuden väliseen yhteyteen. Kun routanousun laskentamalli sekä routanousun ja roudan aiheuttaman raiteen epätasaisuuden välille muodostettu malli yhdistetään, saadaan malli, joka kertoo raiteen epätasaisuuden sekä sen tilastollisen toistumistiheyden. Tavoitteena on, että mallin avulla voitaisiin ennustaa routanousua ja sen toistumistiheyttä kohdekohtaisesti siten, että rakenteen olosuhteet, materiaalit ja ilmastotiedot otetaan huomioon. (Nurmikolu 2011a.)

Elinkaaritaloudellista tarkastelua jatketaan arvioimalla erisuuruisten epätasaisuuksien aiheuttamia liikennehaitta- ja kunnossapitokustannuksia toteumien perusteella. Saadut tiedot integroidaan epätasaisuusmalliin ja lopputuloksena saadaan malli, joka kertoo roudan aiheuttaman liikennehaitta- ja kunnossapitokustannuksen sekä haitan tilastollisen toistumistiheyden. Lopuksi toteumien perusteella arvioidaan vielä routaongelman eri syiden korjauskustannukset. Routaongelmakohteiden korjaussuunnittelu voidaan toteuttaa mahdollisimman elinkaaritaloudellisesti laskemalla korjausten hyöty-kustannussuhde vertaamalla korjaamisella poistuvien liikennehaitta- ja kunnossapitokustannusten nykyarvoa korjauskustannuksiin. (Nurmikolu 2011a.)

Rautatieliikenne on voimakkaasti sidottu raiteeseen ja muutokset yhdellä rataosuudella vaikuttavat kaikkeen liikennöintiin, joten korjauskohteiden valinnassa on otettava huomioon rataverkko kokonaisuutena. Kun yksittäinen routapaikka korjataan, muutos vaikuttaa muiden kohteiden taloudellisesti kannattavaan korjausjärjestykseen. Lisäksi on selvitettävä, miten yhden merkittävän routapaikan korjaaminen vaikuttaa rataverkon liikenteellisiin oloihin, jos vertailuvaihtoehtona on useamman pienen vaurion korjaaminen.

8.3 Tukikerroksen korjaustoimenpiteiden kustannukset

8.3.1 Sepelin seulonta ja vaihto

Sepelin puhdistuksen ja vaihdon kustannusten suuruuteen vaikuttavat monet muun muassa radan rakenteesta sekä käytettävän kiviaineksen laadusta ja määrästä riippuvat tekijät. Lisäksi esimerkiksi tasoristeys- ja vaihdealueilla tukikerroksen korjaamiseen sisältyy linjaosuuksia enemmän työvaiheita, joten myös kustannukset ovat suuremmat. Suomen rataverkon omistava Liikennevirasto vastaa ratojen kunnossapidosta ja kilpailuttaa kunnossapitourakat, joten korjaustoimenpiteiden kustannuksiin vaikuttaa suuresti vallitseva markkinatilanne.

Tukikerroksen vaihdossa ja seulonnassa sepelin hankintakustannukset muodostuvat kiviaineksen yksikköhinnan, laadun, määrän sekä kuljetusetäisyyden perusteella. Taloudellisinta on, jos tukikerrosmateriaali voidaan välivarastoida lähellä perusparannuskohdetta. Etenkin tiheästi liikennöidyillä rataosuuksilla sepelin laadulla on suuri merkitys, sillä dynaamisen kuormituksen kasvaessa sepelin hienoneminen nopeutuu, mikä edesauttaa routimiselle otollisten olosuhteiden kehittymistä.

Nurmikolun (2000) diplomityössä kerrotaan, että kiviaineksen lujuusluokka valitaan elinkaarikustannusvertailun avulla eri lujuusluokan kiviaineksista saatujen tarjosten, kiviainesten odotettavissa olevan kestoian sekä rataosuuden vuotuisen liikennemäärän perusteella. Lujuudeltaan parasta raidesepeleä käytetään rataosilla, joiden vuotuinen liikennemäärä on vähintään 9 miljoonaa bruttotonnia ja lujuusominaisuuksiltaan heikointa sepeliä käytetään rataosilla, joiden liikennemäärä on 3 Mbrt tai pienempi. Raidesepelein laatuvaatimukset on esitetty Ratahallintokeskuksen (nykyisin Liikennevirasto) julkaisuissa SFS-EN 13450 raidesepeleikiviainekset kansallinen soveltamisohje (2004) ja Päällysrakennetöiden yleiset laatuvaatimukset.

Nurmikolu (2000) tutki diplomityössään raidesepelein lujuuden vaikutusta kiviaineksen kestoikään. Tutkimustulokset osoittivat, että esimerkiksi raiteen ja pohjamaan ominaisuuksien ohella myös kiviaineksen lujuudella on merkittävä vaikutus raidesepelein kestoikään. Lujempi kiviaines on kalliimpaa, mutta myös kestävämpää. Elinkaaritarkasteluissa on huomioitava huonompaa lujuusluokkaa olevan sepelin hankinnassa saavutetut säästöt ja toisaalta lujempaa sepeliä aikaisempi uusimistarve. Työssä todetaan myös, että tukikerrosmateriaalin kunnan kehittymistä tulisi seurata elinkaaren alusta lähtien. Tukikerroksen säännöllisellä kunnossapidolla voidaan pienentää routaongelmien kehittymistä ja välttyä ongelmien edellyttämiltä nopeusrajoituksilta. Lisäksi tuennan tarvetta voidaan vähentää.

Tukikerroksen mitat ja siten tarvittava tukikerrosmateriaalin määrä määräytyvät rataluokan, suurimman sallitun nopeuden, kiskonpituuden, tukikerrosmateriaalin sekä ratapölkkytyypin perusteella. Tukikerroksen paksuus on betonipölkkyraiteella 550 mm ja leveys 5100 mm. Puuratapölkkyraiteella tukikerroksen paksuus on 450 mm ja leveys 4900 mm. (Ratahallintokeskus 2004a.) Tarvittava sepelin määrä sepelinvaihdossa betonipölkkyraiteella on siis noin 2,8 m³ / raidemetri ja puuratapölkkyraiteella 2,2 m³ / raidemetri. Sepelinseulonnessa tarvittavan täydennyssepelin määrän vaikuttaa tukikerroksen mittojen lisäksi parannettavan tukikerroksen kunto.

Työraon pituudella on suuri merkitys tukikerroksen kunnostuksen tehokkuuteen ja siten kustannusten muodostumiseen. Sepelin puhdistukseen ja vaihtoon sisältyy useita valmistelevia ja viimeisteleviä töitä, jotka lyhentävät varsinaiseen työhön käytettävissä olevaa tehokasta aikaa, joten lyhyet työraot eivät ole kannattavia. Suomen liikennöidyn rataverkon pituus vuonna 2011 oli 5919 kilometriä, josta 5349 kilometriä eli valtaosa verkosta oli yksiraiteista (Liikennevirasto 2011c). Erityisesti yksiraiteisella radalla työraon pituudella on suuri merkitys korjaustoimenpiteiden työsaavutuksiin, sillä työajan päätyttyä esimerkiksi työkonet on kuljetettava pois korjattavasta kohteesta ja valmisteltava uudestaan käyttökuuntoon seuraavan työvuoron alussa. Kustannustehokkainta on toteuttaa tukikerroksen korjaustoimenpiteet 8 tunnin työraoissa. Pidempien työraojen saaminen vilkasliikenteisillä rataosuuksilla on kuitenkin hankalaa ja töitä tehdään usein yö- ja viikonloppuraoissa.

Taulukossa 7.2 on esitetty asiantuntija-arvion mukaisia tukikerroksen vaihdon ja puhdistuksen keskimääräisiä kustannuksia linjaosuuksilla raidemetriä kohden. Yksikköhintoihin sisältyy varsinaisen tukikerroksen vaihdon tai seulonnan lisäksi myös muun muassa raideseppelin kuormaus, kuljetus ja asennus työalueelle, työnaikaiset sähkö- ja turvalaitetyöt sekä valmistelevat ja viimeistelevät työvaiheet, kuten tarvittavat mittaukset, tukikerroksen muotoilu sekä raiteen tukeminen ja oikominen. Korjaustoimenpiteisiin ei sisälly routalevyn asentamista. (Nieminen 2013.)

Taulukko 7.2. Tukikerroksen puhdistuksen ja vaihdon keskimääräiset kustannukset raidemetriä (rdm) kohden.

Toimenpide	yksikkö	€/ yksikkö
Tukikerroksen vaihto, ei routalevyä	rdm	300,00
Tukikerroksen seulonta, ei routalevyä	rdm	278,00

8.3.2 Tuenta

Tuenta tehdään sepelin vaihdon tai seulonnan yhteydessä tai erillisenä korjaustoimenpiteenään. Jos tuenta tehdään tukikerroksen muun kunnostuksen yhteydessä, tukemisen osuus kokonaiskustannuksista on asiantuntija-arvion mukaan keskimäärin 10 €/ rdm. VR Trackin käytössä on nopeita linjatukemiskoneita, joilla voidaan tehdä pelkkää tuentaa ja kustannukseksi raidemetriä kohden muodostuu 3–5 € (Nieminen 2013.)

Tuennalla voidaan korjata roudan aiheuttamia raiteen epätasaisuuksia melko edullisesti, mutta toimenpiteen suorittaminen hienontaa tukikerrosmateriaalia, jolloin routaongelmat saattavat toimenpiteen seurauksena lisääntyä. Tarpeetonta tuentaa tuleekin välttää. Ratateknisten ohjeiden osassa 15 ”Radan kunnossapito” ohjeistetaan, että on tärkeää, ettei keväällä tapahtuvaa tuentaa suoriteta ennen kuin routa on täysin sulanut. Raiteen geometria muuttuu jatkuvasti roudan sulaessa, joten raide saatetaan joutua tukemaan uudestaan, jos ensimmäinen tuenta suoritetaan liian aikaisessa vaiheessa.

8.4 Routalevytyksen kustannukset

Routalevyjen käyttöikävaatimus on 40 vuotta, mutta käytännössä levyt joudutaan uusimaan tukikerroksen korjaustoimenpiteiden yhteydessä, sillä sepeliseulan terät rikkovat vanhat levyt, mikäli ne on asennettu suoraan tukikerroksen alapuolelle syvyyteen $K_v = 0,55$ m. Sepeli tulee seuloa koko tukikerroksen syvyydeltä, sillä erityisesti kerroksen alaosaan, eristelevyn pinnalle kerääntyy hienorakenteista routimisherkkää kiviainesta. Radoilla on kokeiltu myös radan korkeusviivan nostamista levyjen asentamisen yhteydessä, jotta toimintakuntoiset eristelevyt voitaisiin jättää paikoilleen, kun suoritetaan päällysrakenteen korjaustoimenpiteitä. Sähköistetyllä radalla radan korkeusviivan korottaminen ei kuitenkaan ole ongelmatonta.

Routalevyjen elinikä voidaan pitää tukikerroksen vaihto- tai puhdistusväliä. Olemassa olevien ratojen rakenteissa on yhä käytössä laatuongelmista kärsineitä EPS-eristelevyjä, jotka tulee korvata uusilla XPS-eristelevyillä tukikerroksen uusimisen yhteydessä. Taulukosta 7.3 nähdään, että vanhan routalevyn poiston kustannukset ovat peräti 348 euroa raidemetriä kohden. Lisäksi vanhojen levyjen poisto hidastaa merkittävästi tukikerroksen vaihdon etenemistä ja rikkoutuneet levyt voivat tukkia sepeliseulan ritilät. Levyjen poiston korkeiden yksikkökustannusten vuoksi routaeristys ei ole elinkaaritaidellinen toimenpide, jos levyjen määriä ja paikkoja ei optimoida huolellisesti.

Kun verrataan taulukon 7.2 ja taulukon 7.3 kustannuksia, havaitaan että kun tukikerroksen vaihdon yhteydessä ratarakenteeseen asennetaan eristelevy, toimenpiteen kokonaiskustannukset eivät muodostu merkittävästi pelkän tukikerroksen vaihdon kustannuksia suuremmiksi. Routaeristykseen asentamisen kustannus tukikerroksen vaihdon yhteydessä on levyn paksuudesta riippuen keskimäärin 57–87 €/rdm. Kustannukset sisältävät vanhojen routalevyjen kuljettamisen hävitettäväksi viranomaisten hyväksymällä tavalla. (Nieminen 2013.)

Taulukko 7.3. Routalevytyksen keskimääräiset yksikkökustannukset raidemetriä kohden.

Toimenpide	yksikkö	€/yksikkö
Tukikerroksen vaihto ja routalevyn (60 mm) asennus	rdm	335,00
Tukikerroksen vaihto ja routalevyn (80 mm) asennus	rdm	350,00
Tukikerroksen vaihto ja routalevyn (100 mm) asennus	rdm	365,00
Routalevyn poisto ratarakenteesta	rdm	348,00

8.5 Massanvaihdon kustannukset

Massanvaihdon kustannuksiin vaikuttavat ensisijaisesti korjattavan kohteen massansiirtoetäisyydet, pohjaolosuhteet sekä vaihdettavan massan määrä ja materiaali. Taulukossa 7.4 on esitetty massanvaihdon keskimääräiset kustannukset, kun routiva materiaali vaihdetaan kolmelta eri syvyydeltä. Taulukosta huomataan, että kustannukset nousevat selkeästi mitä syvemmältä massat vaihdetaan. Myös työraon työsuorite laskee massanvaihdon syvyyden kasvaessa. Kahdeksan tunnin työraossa syvyyteen Kv - 1,20 m tehtävän massanvaihdon keskimääräinen työsaavutus on 100 metriä, kun syvyyteen Kv - 2,00 m tehtävän massanvaihdon työsaavutus on noin 50 metriä. (Nieminen 2013.) Laajamittaisten syvien massanvaihtojen kustannukset rataympäristössä nousevatkin melko korkeiksi. Massanvaihto soveltuu erityisen hyvin esimerkiksi vaihdealueille sekä kohtiin, joita ei voida korjata muilla menetelmillä.

Taulukko 7.4. Massanvaihdon keskimääräiset yksikkökustannukset raidemetriä kohden.

Toimenpide	yksikkö	€/ yksikkö
Massanvaihto, Kv - 1,20 m	rdm	450,00
Massanvaihto, Kv - 1,60 m	rdm	550,00
Massanvaihto, Kv - 2,00 m	rdm	650,00

8.6 Kuivatuksen parantamisen kustannukset

8.6.1 Ojien perkaus, maaojan teko

Ojien perkauksen keskimääräiset kustannukset ovat 6–17 €/m. Maaojan teon kustannukset ovat noin 28,50 €/m³. (Nieminen 2013.)

9 Johtopäätökset

9.1 Ratojen routaongelmat

Tämän työn kirjallisuusselvityksen tavoitteena oli perehtyä Suomen rataverkon routaongelmiin. Radoilla routaongelmia aiheutuu perinteisestä routimisesta. Myös *in-situ routanousulla* on merkitystä, sillä raiteelle asetetut tasaisuusvaatimukset ovat suuret, eikä routanousuja sallita pääradoilla tapahtuvan ollenkaan. Routaongelman syy voi löytyä radan päällysrakenteesta, alusrakenteesta tai pohjamaasta. Rataverkon routakohteet ovat kuitenkin usein moniongelmaisia ja ongelmien syiden analysointi on haastavaa. Routaongelmakohteiden poistaminen vaatii tuekseen monien eri alojen, kuten geotekniikan ja liikennetekniikan osaamista. Routimiseen johtavat syyt tulee selvittää ennen korjaustoimenpiteiden valintaa ja suorittamista ja tehtäessä elinkaaritalouteen perustuvia korjaustoimenpidetarkasteluja koko rataympäristö tulee huomioida kokonaisuutena. Esimerkiksi pohjamaan syvät massanvaihdot tulevat hyvin kalliiksi ja routaongelman pienentämiseksi tuloksia voidaan usein saavuttaa edullisemmaksi tulevalla routalevytyksellä. Kuitenkin, jos samassa kohteessa esiintyy myös esimerkiksi stabiliteettiongelmaa, massanvaihto voi olla kokonaisuuden kannalta kannattavampi korjaustoimenpide.

Rataverkko muodostaa monimutkaisen kokonaisuuden, joka on vahvasti sidottu raiteeseen. Muutos yhdellä rataosuudella heijastuu kertautuvasti koko verkkoon. Rataverkon kunnossapidolle onkin ominaista, että korjaustoimenpiteiden suorittamisesta aiheutuu lähes poikkeuksetta häiriöitä ja muutostöitä raideliikenteelle, eikä liikennöinnin siirtäminen muille reiteille useinkaan rataympäristössä ole mahdollista. Kun suunnitellaan routakorjaustoimenpiteitä, vastakkain on korjauksen suorittamisesta matkustajille aiheutuva liikenteellinen haitta sekä routavaurion korjaamatta jättämisestä syntyvä pidempiaikainen häiriö liikenteessä, kun routivalle rataosalle joudutaan asettamaan nopeusrajoitus. Korjaukset pyritään aina toteuttamaan siten, että raideliikenne häiriintyy mahdollisimman vähän. Lisäksi routavaurioiden korjausjärjestys priorisoidaan siten, että korjaustoimenpiteillä saavutetaan mahdollisimman suuri liikenteellinen hyöty.

Ratojen routavaurioiden korjausten suunnittelua ja toteutusta rajoittaa korjauksiin käytettävissä oleva rahamäärä. Korjaustoimenpiteiden huolellisella suunnittelulla on pyrittävä siihen, että korjaukset tehdään mahdollisimman elinkaaritaloudellisesti ja kustannustehokkaasti. Rataverkon routavaurioiden korjauskustannukset ovat kohde- ja toimenpidekohtaisia. Kustannusten suuruuteen vaikuttavat monet tekijät, kuten vallitseva markkinatilanne, käytettävissä oleva työrakojen pituus sekä radan yksi- tai moniraiteisuus. On ensisijaisen tärkeää tunnistaa routavaurion oikea syy, jotta voidaan valita sopiva korjaustoimenpide. Korjaustoimenpiteiden kustannuksia ei voida suoraan verrata keskenään, jos toimenpiteet kohdistuvat radan eri rakennekerroksiin.

9.2 Roudan syvyyden laskenta TEMP/W:llä

Tämän työn laskentatapauksissa tarkasteltiin Etelä- ja Pohjois-Suomessa sijaitsevia esimerkkikohteita. Tarkasteltujen ratapenkereiden geometria sekä radan rakennemateriaalit ja pohjamaan maalaji valittiin siten, että kohteet edustaisivat keskimääräisiä kohteita valituilla sijainneilla. Laskennan yhtenä tavoitteena oli selvittää, miten Etelä- ja Pohjois-Suomen pakkasmääräerot vaikuttavat mallinnuksen tuloksiin. Laskentatulokset osoittivat selkeästi, että pakkasmääräerojen vuoksi ratarakenteiden ja routalevyjen paksuuden on oltava Suomen pohjoisosissa maan eteläosaa suurempia. Laskennassa tarkasteltiin kohteita, joiden ilmasto-olot edustivat kahta ääripäätä. Laskennan tuloksia ei siis voida yleistää koskemaan koko Suomea. Monipuolisemman käsityksen saamiseksi tarkasteluun tulisi vielä sisällyttää kohde ainakin Keski-Suomesta.

Työn laskentatapauksissa tutkittiin, oliko routalevyn asennussyvyydellä vaikutusta routarajan ulottumaan Etelä-Suomessa Kirkkonummella ja Pohjois-Suomessa Oulussa. Ensimmäisessä laskentatapauksessa routalevy asennettiin välittömästi tukikerroksen alapuolelle ja toisessa laskentatapauksessa levy asennettiin eristyskerroksen yläpintaan. Levypaksuuksilla 40 mm ja 80 mm tehdyt laskelmat osoittivat, että levyn asennussyvyydellä oli vaikutusta pakkaskauden alussa, sillä routa eteni nopeasti ratarakenteen läpi routalevyn pintaan ensimmäisten talvikuukausien aikana. Alemmas ratarakenteessa asennettu eristelevy vei siis routarajan laskennan alkuvaiheessa syvemmälle. Syvyyserot kuitenkin tasaantuivat talven aikana ja routa saavutti saman maksimisyvyyden molemmissa laskentatapauksissa. Suurimmalla mallinnuksessa käytetyllä levypaksuudella 120 mm routa tunkeutui ratarakenteessa sitä syvemmälle, mitä alemmas ratarakenteeseen levy oli asennettu.

Routalevyjen tarkoituksena on estää roudan tunkeutuminen routivaan pohjamaahan ja routaraja pyritään pysäyttämään mahdollisimman kauas pohjamaasta. Saatujen laskentatulosten perusteella voidaan päätellä, että laskentatapausten kaltaisissa tilanteissa erityisesti paksu routalevy kannattaa asentaa suoraan tukikerroksen alapuolelle. Routalevy kannattaa asentaa lähelle ratarakenteen pintaa myös sen vuoksi, että levy estää tehokkaasti rakenteessa olevan lämpö määrän poistumista. Jos eristelevy asennetaan lähelle radan pintaa, on huomioitava, että ratarakenteen kantokestävyys tulee tarkastaa. Laskennassa käytettiin pakkasmäärää F50 ja kolmea eri routalevypaksuutta. Tässä työssä saatujen laskentatulosten varmentamiseksi laskentaan tulisi ottaa mukaan myös muita mitoittavia pakkasmääriä ja Suomessa käytettyjä routalevypaksuuksia.

Tämän työn tavoitteena oli myös tutkia, miten syvä massanvaihto routalevyn alle tulee tehdä, mikäli radan alusrakennemateriaali on routivaa. Laskennan tulokset osoittivat, että RATO 3:ssa esitetty massanvaihdon vähimmäissyvyys 300 mm oli riittävä vain osassa Kirkkonummen laskentakohteissa. Pohjois-Suomessa pakkasmäärät ovat Etelä-Suomen pakkasmääriä suurempia, joten routa tunkeutui ratarakenteessa syvemmälle ja routalevyn alle oli tehtävä syvempi massanvaihto. Oulun kohteen kaikissa tutkituissa

laskentatapauksissa tarvittavan massanvaihdon syvyys oli vähintään 450 mm. Muutamissa laskentatapauksissa massanvaihdon syvyys oli niin suuri, että on kannattavampaa vaihtaa koko alusrakennekerros routimattomaan materiaaliin. Vaadittavan massanvaihdon syvyys pieneni levypaksuuden kasvaessa, sillä paksu eristelevy hidasti tehokkaasti roudan tunkeutumista levyn alapuolella olevaan alusrakenteeseen. Laskennan tulosten perusteella voidaan todeta, että massanvaihdon syvyys tulee suunnitella kohdekohtaisesti. Suunnittelussa tulee ottaa huomioon kohteen maantieteellinen sijainti sekä olemassa olevan radan rakenne. Syvemmät massanvaihdot ovat rataympäristössä matalia massanvaihtoja hankalampia ja kalliimpia toteuttaa. Saatujen laskentatulosten perusteella voidaankin pohtia, olisiko tapauskohtaisesti järkevää asentaa ratarakenteeseen paksuudeltaan ylimitoitettu routalevy, jonka alle tarvitaan ohuempaa levyä matalampi massanvaihto. Päätöksen tueksi tulisi tehdä kohdekohtainen kustannusvertailu.

Tässä työssä roudan syvyyslaskelmat tehtiin elementtimenetelmään perustuvalla ohjelmalla TEMP/W. Ohjelmalla määritetyt roudan maksimisyvyudet ja sopivat routalevypaksuudet tutkituissa laskentatapauksissa vastasivat hyvin RATO 3:n mitoituskäyrästä luettuja tuloksia. Suurimmat erot TEMP/W:n laskentatulosten ja RATO 3 roudan syvyyden arvojen välillä olivat 0,05–0,1 m. Saatujen laskentatulosten perusteella voidaan päätellä TEMP/W:n soveltuvan hyvin käytettäväksi apuvälineenä routalevymitoituksessa. Ohjelmalla voidaan myös laskea routalevyn alle tarvittavan massanvaihdon syvyys, mikäli radan alusrakennemateriaali on routivaa. TEMP/W oli tehokas sekä suhteellisen helppokäyttöinen ohjelma ja tässä työssä saatujen käyttökokemusten perusteella ohjelmaa voidaan suositella käytettäväksi, kun halutaan mallintaa lämmön siirtymisen vaikutuksia maaperässä.

Lähdeluettelo

Andersland, O., Ladanyi, B. 2004. Frozen Ground Engineering. Vol 2. John Wiley & Sons. 400 s.

Burland, J.B. 1987. Nash Lecture: The Teaching of Soil Mechanics – a Personal View. Proceedings, 9th ECSMFE, Dublin. Vol 3. S. 1427-1447.

Charlier, R., Hornych, P., Sršen, M., Hermansson, Å., Bjarnason, G., Erlingsson, S., Pavšič, P. 2009. Water Influence on Bearing Capacity and Pavement Performance: Field Observations. Teoksessa: Dawson, A. (toim.) Water in Road Structures. Nottingham, England. Vol. 5. Springer. S. 181-182.

Doré, G., Zubeck, H. 2009. Cold Regions Pavement Engineering. The McGraw-Hill Companies. 416 s.

Ehrola, E. 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto Oy. Helsinki. 365 s.

GEO-SLOPE International Ltd. 2010. Thermal Modeling with TEMP/W 2007. Calgary, Alberta, Canada. 224 s.

Goverde, R. 2005. Punctuality of Railway Operations and Timetable Stability Analysis. Delft, The Netherlands. 310 s.

Gussmann, P., Schad, H., Smith, I. 2002. Geotechnical Engineering Handbook, vol 1. John Wiley & Sons. 775 s.

Huttula, T. 2013. Hydrologia. Luentomateriaali. Jyväskylä.

Hölttä, P. 2011. Rautatietekniikka. Opetusmoniste. Espoo.

InfraRYL 2010. 2010. Rakennustieto Oy. Helsinki. 624 s.

Jumikis, A. 1977. Thermal geotechnics. New Jersey, the United States of America. Rutgers University Press. 375 s.

Jääskeläinen, R. 2009. Routasuojaus. Teoksessa: Jääskeläinen, R. Pohjarakennuksen perusteet. 2. painos. Jyväskylä. S. 159.

Kalliainen, A., Luomala H., Jäniskangas T., Nurmikolu A., Kolisoja P. 2011. Radan eristys- ja välikerrosten tiiviys- ja kantavuustutkimus. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 10/2011. 152 s.

Kivikoski, H., Saarelainen, S., Ahonen, M., Huttunen, E., Kujala, K. 2001. Lämmönjohtavuuden määrittäminen. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma, Menetelmäkuvaus TPPT 8. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Espoo. 12 s.

Kivikoski, H., Saarelainen, S. 2000. Ilmastorasitus, Pakkasmäärän ja sulamiskauden pituus. VTT Yhdyskuntatekniikka. Espoo. 11 s.

Kolisoja, P. 2011. Radan alusrakenne. Luentoaineisto. Rautatiesuunnittelun erikoiskurssi. Tampereen teknillinen yliopisto. 19.10.2011.

Korkiala-Tanttu, L., Törnqvist, J., Eskola, P., Pienimäki, M., Spoof, H., Mroueh, U-M. 2005. Elinkaaritarkastelut tienpidon hankintoihin, Kokemuksia kahdesta pilot -kohteesta. Tiehallinnon selvityksiä 13/2005. Helsinki. 44 s.

Koskela, O-L. 2011. Ratojen elinkaariajattelu ja ratahankkeiden kannattavuuslaskennan ongelmat. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä. 8/2011. Helsinki. 69 s.

Kujala, K. 1996. Routivuuden määrittäminen. Seminaariesitelmä. 9 s.

Kuula-Väisänen, P., Nurmikolu, A. 2012. Kirjallisuusselvitys ratarakenteiden elinkaaritaloudellisuuden arvioinnista. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 1/2012. 104 s.

Levomäki, M. 2007. Ratahallintokeskuksen radantarkastusjärjestelmä. Luentoaineisto. Rautatiesuunnittelun erikoiskurssi. Tampereen teknillinen yliopisto. 14.11.2007.

Levomäki, M. 2012a. Radantarkastusjärjestelmä, Tulosten tulkinta. Rautatiesuunnittelun erikoisopintopaketti. Tampereen teknillinen yliopisto. 2.5.2012.

Levomäki, M. 2012b. Ratojen routavauriot. [verkkosivu]. Julkaisupäivä tuntematon [viitattu 11/2012]. Saatavissa:
http://portal.liikennevirasto.fi/sivu/www/f/kunnossapito/routa_kelirikko/routavauriot.

Liikennevirasto. 2011a. Roudan hallintaraportti 2011. VR Track Oy, Rautatiesuunnittelu, Helsinki. 30 s.

Liikennevirasto. 2011b. Routaselvitys 2010-2011. Liikenteellinen ja geotekninen tarkastelu. VR Track Oy, Rautatiesuunnittelu, Helsinki. 241 s.

Liikennevirasto. 2011c. Suomen rautatietilasto 2011. Liikenneviraston tilastoja 5/2011. Helsinki. 52 s.

Liikennevirasto. 2012. Rautatieliikenteen täsmällisyys 2011. Helsinki. 54 s.

Lim, W. 2004. Mechanics of Railway Ballast Behaviour. The University of Nottingham. Nottingham, England. 188 s.

Luomala, H. 2010. Ratapenkereiden monitorointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2010. Helsinki. 85 s.

Macchi, M., Garetti, M., Centrone, D., Fumagalli, L., Pavirani, G-P. 2012. Maintenance management of railway infrastructures based on reliability analysis. Reliability Engineering & System Safety. Vol. 104. S. 71-83.

Nieminen, K. 2013. Routakorjaustoimenpiteiden toteutuneet kustannukset. [sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Soininen, S. Lähetetty 6.3.2013. klo 22.07 (GMT +0200). Saatavissa: luottamuksellinen.

Nordal, R.S., Refsdal, G. 1989. Frost protection in design and construction. VTT Symposium 94, Frost in geotechnical engineering. Saariselkä, Finland, 13.-15.3.1989. Espoo, VTT. Vol 1. S. 127-163.

Nurmikolu, A. 2000. Raidesepelin lujuuden vaikutus tukikerroksen kestoikään. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2000. Helsinki. 93 s.

Nurmikolu, A., Kolisoja, P. 2002. Ratarakenteen routasuojaus. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 1/2002. Ratahallintokeskus. Helsinki. 101 s.

Nurmikolu, A. 2004. Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa. Kirjallisuusselvitys. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2004. Ratahallintokeskus. Helsinki. 193 s.

Nurmikolu, A. 2006. Ratarakenteessa käytettävien kalliomurskeiden hienoneminen ja routimisherkyys. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 9/2006. Ratahallintokeskus. Helsinki. 170 s.

Nurmikolu, A., Kolisoja, P. 2010. Sepelinpuhdistuksen vaikutukset raidesepelin ominaisuuksiin. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 11/2010. Helsinki. 64 s.

Nurmikolu, A. 2011a. Radan routasuojaus ja olemassa olevien ratapenkereitten parantaminen. Luentoaineisto. Rautatiesuunnittelun erikoiskurssi. Tampereen teknillinen yliopisto. 19.10.2011.

Nurmikolu, A. 2011b. Radan tukikerros. Luentoaineisto. Rautatiesuunnittelun erikoiskurssi. Tampereen teknillinen yliopisto. 9.11.2011.

Oksanen, T. 1999. Suomen lumipeitteen alueellinen vaihtelu. Pro gradu- tutkielma. Helsingin yliopisto. Helsinki. 66 s.

Onninen, H. 2001a. Routanousukoe. Routimiskertoimen (SP) määrittäminen laboratoriossa. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma, Menetelmäkuvaus TPPT 6. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Espoo. 13 s.

Onninen, H. 2001b. Roudan syvyyden määrittäminen. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma, Menetelmäkuvaus TPPT 5. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Espoo. 14 s.

Passi, T. 2007. Maatutkatekniikan hyödyntäminen radan tukikerroksen kunnan arvioinnissa. Ratahallintokeskuksen julkaisuja 8/2007. Helsinki. 84 s.

Peltoniemi, M. 1988. Maa- ja kallioperän geofysikaaliset tutkimusmenetelmät. Otakustantamo. Espoo. 411 s.

Ratahallintokeskus. 1998. Päällysrakennetöiden yleiset laatuvaatimukset. Tukikerroksen vaihto-/puhdistustyön yleiset laatuvaatimukset. Helsinki. 8 s.

Ratahallintokeskus. 2000. Ratatekniset ohjeet RATO 15 Radan kunnossapito. Helsinki. 63 s.

- Ratahallintokeskus. 2002. Ratojen routasuojaustarpeen selvittäminen, tutkimusohje. Helsinki. 14 s.
- Ratahallintokeskus. 2004a. Päälysrakennetöiden yleinen työselitys. Helsinki. 40 s.
- Ratahallintokeskus. 2004b. Ratainvestointien hankearviointiohje. Helsinki. 44 s.
- Ratahallintokeskus. 2004c. Standardin SFS-EN 13450 raidesepeleliviaineekset kansallinen soveltamisohje. Helsinki. 7 s.
- Ratahallintokeskus. 2005. Raiteentarkastustulokset ja niiden tulkinta. Helsinki. 22 s.
- Ratahallintokeskus. 2006. Ratatekniset ohjeet RATO 13 Radantarkastus. Helsinki. 51 s.
- Ratahallintokeskus. 2007. Rekisterien päivitysohje. Helsinki. 147 s.
- Ratahallintokeskus. 2008. Ratatekniset ohjeet RATO 3 Radan rakenne. Helsinki. 50 s.
- RIL 261-2013. 2013. Routasuojaus – rakennukset ja infrarakenteet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki. 89 s.
- Saare, E., Wenner, C-G. 1957. Värmeledningstal hos olika jordarter. Norrköpings Tidningars Aktiebolag. Norrköping, Sverige. 136 s.
- Saarelainen, S. 1990. Luku 18 Jäätynneen maan fysiikka ja mekaniikka. In: Mäkelä, H. RIL 157-2 Geomekaniikka II. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Helsinki. S. 282-287.
- Saarelainen, S. 2001a. Routimiskertoimen määrittäminen. Tien pohja- ja päälysrakenteet tutkimusohjelma, Menetelmäkuvaus TPPT 7. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Espoo. 13 s.
- Saarelainen, S. 2001b. Frost heave design of embankments for high-speed railways. Teoksessa: Correia, A., Brandl, H. (toim.) Geotechnics for Roads, Rail Tracks and Earth Structures. The Netherlands. A.A. Balkema Publishers. S. 259-262.
- Saarinen, M. 2008. Radan alusrakenteissa käytettyjen materiaalien routimisherkyys. Diplomityö. Ratahallintokeskuksen julkaisu 7/2008. Helsinki. 75 s.
- SGY. 1991. Maatutkaluotaus (Geofysikaaliset tutkimusmenetelmät). Rakentajain Kustannus Oy. 60 s.
- Soveri, J., Varjo M. 1977. Roudan muodostumisesta ja esiintymisestä Suomessa vuosina 1955-1975. Vesihallitus. Helsinki. 57 s.
- ThermiSol. 2013. [verkkosivu]. Julkaisupäivä tuntematon [viitattu 3/2013]. Saatavissa: <http://www.thermisol.fi/tuotteet-ja-palvelut/eriste/xps-eristeet>.

Valkama, J. 2006. Routa, sen aiheuttamat pinnanmuodot ja ilmiöt sekä niiden merkitys ihmistoiminnan kannalta. Geologian tutkimuskeskus. Oulu. 19 s.

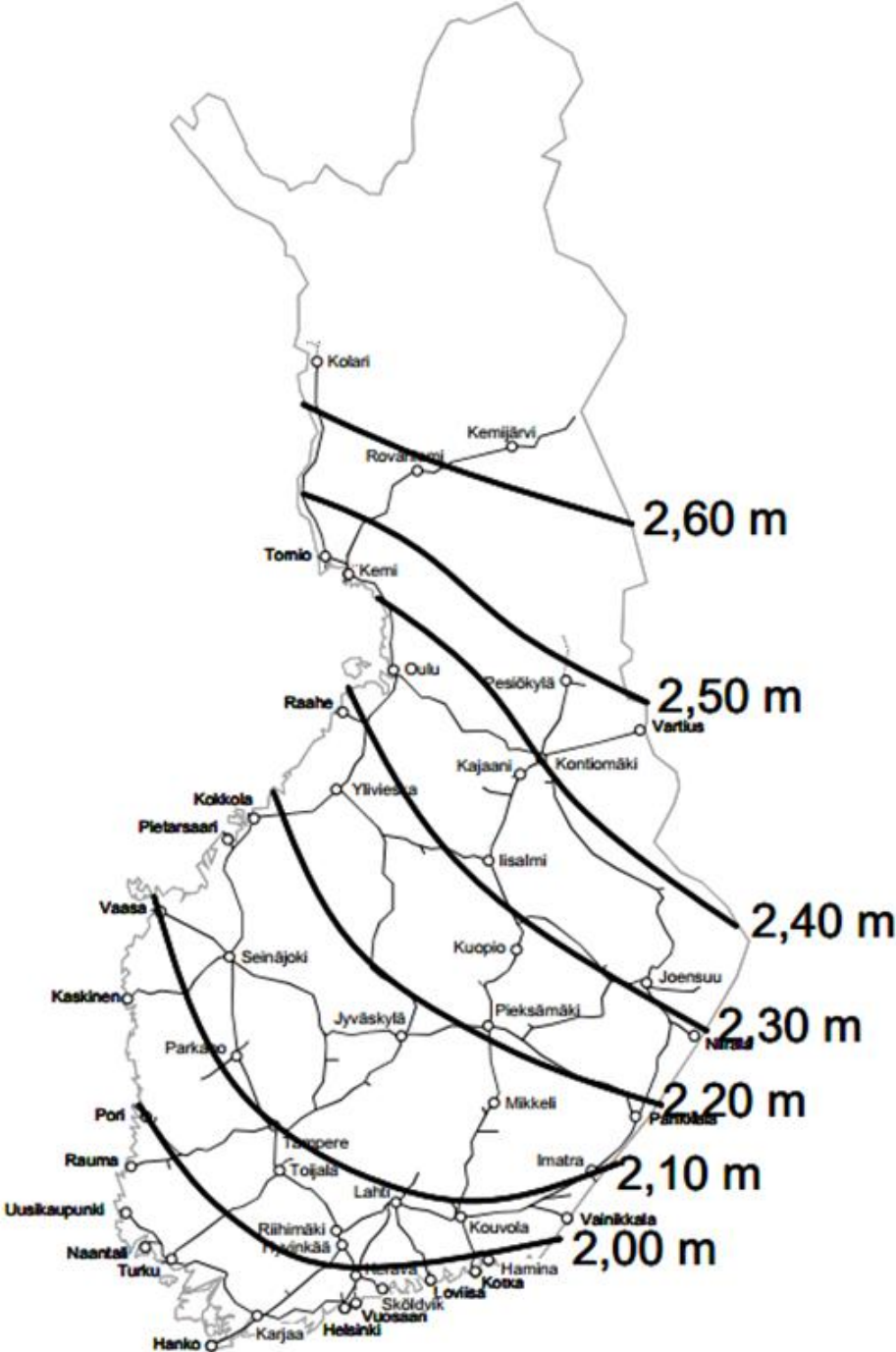
Watzinger A., Kindem E., Michelsen B. 1938. Undersøkelser av masseutskiftningsmaterialer for vei- og jernbanebygning. Norges geotekniske institutt. 24 s.

Woo, M. -k. 2012. Permafrost Hydrology. Springer. 563 s.

Liiteluettelo

- Liite 1. Routimattoman radan rakennekerrosten kokonaispaksuus. 1 sivu.
- Liite 2. Suomen rataverkon jako kunnossapitoalueisiin. 1 sivu.
- Liite 3. Routapaikkojen sijoittuminen vuonna 2011. 1 sivu.
- Liite 4. Matka-ajan hidastuminen routavaurioiden vuoksi vuonna 2011. 1 sivu.

Liite 1. Routimattoman radan rakennekerrosten kokonaispaksuus



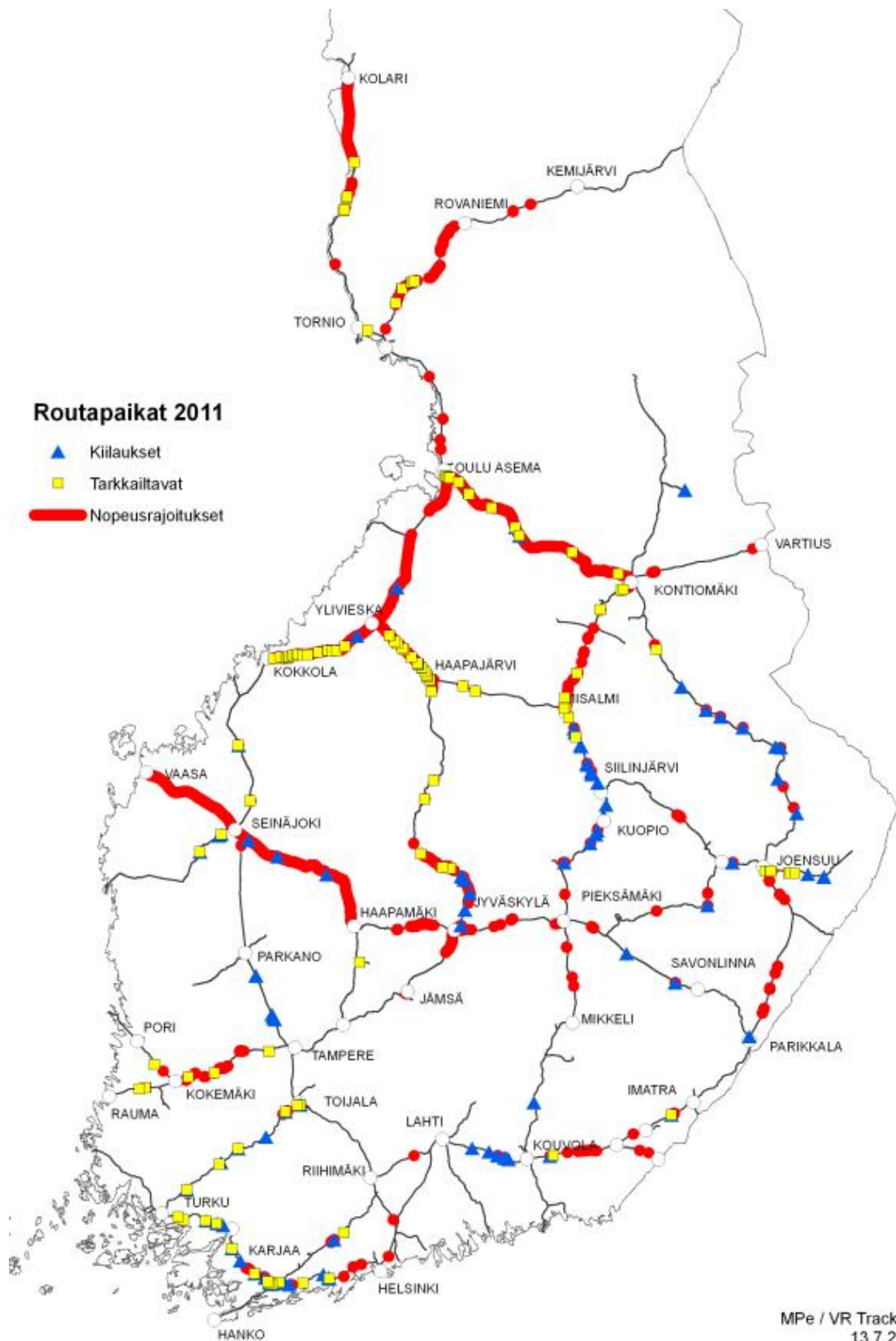
Liite 2. Suomen rataverkon jako kunnossapitoalueisiin

Kunnossapitoalueet

- Alue 1: Uusimaa
- Alue 2: Lounaisrannikko
- Alue 3: (Riihimäki)–Seinäjoki
- Alue 4: Rauma–(Pieksämäki)
- Alue 5: Haapamäen tähti
- Alue 6: Savon rata
- Alue 7: Karjalan rata
- Alue 8: Ylä-Savo
- Alue 9: Pohjanmaan rata
- Alue 10: Keski-Suomi
- Alue 11: Kainuu–(Oulu)
- Alue 12: (Oulu)–Lappi



Liite 3. Routakohteiden sijoittuminen vuonna 2011



Liite 4. Matka-ajan hidastuminen routavaurioiden vuoksi vuonna 2011

