

Ratojen alusrakenteissa käytettyjen materiaalien routimisherkyys



Maija Saarinen



Ratahallintokeskuksen
julkaisu A 7/2008

Ratojen alusrakenteissa käytettyjen
materiaalien routimisherkkyys

Maija Saarinen

Helsinki 2008

Ratahallintokeskus

Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 7/2008

ISSN 1455-2604

ISBN 978-952-445-231-1

Verkkajulkaisu pdf (www.rhk.fi)

ISSN 1797-6995

ISBN 978-952-445-232-8

Kannen ulkoasu: Proinno Design Oy, Sodankylä

Kansikuva: Maija Saarinen

Helsinki 2008

Saarinen, Maija: Ratojen alusrakenteissa käytettyjen materiaalien routimisherkkyyys. Ratahallintokeskus, Rataverkko-osasto. Helsinki 2008. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 7/2008. 75 sivua ja 5 liitettä. ISBN 978-952-445-231-1, ISBN 978-952-445-232-8 (pdf), ISSN 1455-2604, ISSN 1797-6995 (pdf).

Avainsanat: rautatie, alusrakenne, eristyskerros, välikerros, routa, routiminen, routanousukoe, raiteentarkastus

TIIVISTELMÄ

Tämä julkaisu on esiselvitys radan routimiskäyttämistä koskevassa tutkimuskokonaisuudessa. Työn tavoitteena oli selvittää radan alusrakenteessa käytettyjen materiaalien routimisherkkyyttä. Radan rakennekerroksien routimisesta aiheutuu haittaa junaliikenteelle sekä kustannuksia radan kunnossapidolle, joten routahaittojen syyn tunnistaminen on oleellista.

Liikennöintinopeuksien noustessa radan tasaisuusvaatimukset ovat tiukentuneet ja raiteen asemassa sallitaan vain pieniä muutoksia. Riittävällä alusrakennepaksuuksilla pystytään estämään pohjamaan jäätyminen ja routivasta pohjamaasta johtuvat epätasaiset routanousut. Routasuojauksen toimivuus edellyttää lisäksi, että alusrakennekerrokset ovat routimattomia.

Pääosa rataverkkomme alkuperäisistä alusrakenteista on rakennettu ennen 1900-luvun puoliväliä. Alusrakenteen materiaaleille, rakenteelle ja routasuojaukselle on asetettu vaatimuksia, jotka ovat muuttuneet vuosikymmenien kuluessa. Radan rakentamishistoriaa koskevien selvitysten perusteella havaittiin, että ennen 1960-lukua radan alusrakennemateriaaleja arvioitiin tavallisesti vain silmämääräisesti. Nämä materiaalit ovat saattaneet aiheuttaa routaongelmia, joiden syytä ei ole aina tiedostettu. Kuitenkin ne ovat tiukentuneista raiteen tasaisuusvaatimuksista huolimatta edelleen radan rakenteissa.

Tutkimuksen kokeellista osuutta varten otettiin rataverkolta yhteensä 60 näytettä 30:stä eri kohteesta. Näytteenotto hajautettiin koko rataverkolle kohteisiin, joissa oli havaintoja routimisen aiheuttamista haitoista. Näytteille tehtiin routanousukoe, jossa mitattiin routanousua sekä määritettiin routimiskerroin jokaiselle näytteelle. Saatujen tulosten perusteella arvioitiin alusrakennemateriaalien routimisherkkyyttä. Noin 60 prosentissa näytteistä materiaali oli niin routimisherkkää, että aiemmassa tutkimuksessa arvioitu radan rakennemateriaalien käytännöllisen routimattomuuden rajat 2,2 mm neljän vuorokauden jälkeiselle routanousulle ja 1,1 mm²/Kh routanousukertoimelle ylittyivät. Suurimmillaan neljän vuorokauden jälkeinen routanousu oli 14,3 mm ja routanousukerroin vastaavasti 6,8 mm²/Kh. Tuloksen perusteella alusrakenne voi olla routahaittojen syynä monessa paikassa rataverkolla. Tästä varmistumiseksi tarvitaan kenttätutkimuksia. Routanousukokeen lisäksi määritettiin näytteiden rakeisuus ja vesipitoisuus. Routimisherkkyyden ja hienoainespitoisuuden (alle 0,063 mm) välillä ei ollut havaittavissa erityisen selkeää riippuvuutta.

Saarinen, Maija: Tjälfarligheten hos de material som har använts i banornas underbyggnad. Banförvaltningscentralen, Bannätsavdelningen. Helsingfors 2008. Banförvaltningscentralens publikationer A 7/2008. 75 sidor och 5 bilagor. ISBN 978-952-445-231-1, ISBN 978-952-445-232-8 (pdf), ISSN 1455-2604, ISSN 1797-6995 (pdf).

Nyckelord: järnväg, underbyggnad, underballast, isoleringsskikt, mellanskikt, tjäle, tjälbildning, tjällyftningstest, spårgranskning

SAMMANDRAG

Den här publikationen är en förutredning i en omfattande undersökning om banans egenskaper vid tjälbildning. Syftet med arbetet var att utreda tjälfarligheten hos de material som har använts i banans underbyggnad. Det är viktigt att identifiera orsaken till tjälskadorna, eftersom tjälbildning i banans konstruktionslager orsakar problem för tågtrafiken samt kostnader i samband med banunderhållet.

I och med att hastigheterna har ökat har kraven på banans jämnhet blivit strängare och endast små ändringar i spårets position tillåts. Med tillräckligt tjock underbyggnad kan man förhindra att den underliggande jordgrunden fryser och att ojämn tjällyftning uppstår på grund av tjälbildning i jordgrunden. Tjälkyddets funktion förutsätter dessutom att det inte bildas tjällyft i underbyggnadslagren.

Merparten av de ursprungliga underbyggnaderna i vårt bannät är byggda före mitten av 1900-talet. Under årtiondenas lopp har kraven på underbyggnadens material, konstruktion och tjälkydd ändrats. På basis av utredningarna om banans byggnadshistoria har man konstaterat att man före 1960-talet i allmänhet endast bedömde underbyggnadsmaterialen okulärt. Dessa material har eventuellt orsakat tjälskador vars orsaker man inte alltid har undersökt. Trots de strängare jämnhetskraven på spåren finns materialen fortfarande i banans konstruktioner.

För den experimentella delen av undersökningen togs sammanlagt 60 prover från 30 olika ställen i bannätet. Provtagningen omfattade hela bannätet och genomfördes på sådana platser där man upptäckt skador orsakade av tjälbildning. Proverna utsattes för tjällyftningstest där man mätte tjällyftningen samt bestämde en tjälkoefficient för varje prov. På basis av resultaten bedömde man underbyggnadsmaterialens känslighet för tjälbildning. I omkring 60 procent av proverna var materialet så tjälfarligt att den praktiska gränsen för frostpassivitet hos banans konstruktionsmaterial, som i tidigare undersökningar uppskattats till 2,2 mm efter fyra dygns tjällyftning och tjällyftningskoefficienten $1,1 \text{ mm}^2/\text{Kh}$, överskreds. Som störst var tjällyftningen efter fyra dygn 14,3 mm och tjällyftningskoefficienten motsvarande $6,8 \text{ mm}^2/\text{Kh}$. Resultatet visar att underbyggnaden kan utgöra orsaken till tjälskador på många platser på bannätet. För att säkerställa detta behöver man genomföra fältundersökningar. Förutom tjällyftstestet bestämdes provernas kornstorlek och vattenhalt. Inget speciellt tydligt samband mellan tjälfarlighet och andelen finmaterial (under 0,063 mm) kunde konstateras.

Saarinen, Maija: Frost susceptibility of materials in railway substructures. Finnish Rail Administration, Rail Network Department. Helsinki 2008. Publications of the Finnish Rail Administration A 7/2008. 75 pages and 5 appendices. ISBN 978-952-445-231-1, ISBN 978-952-445-232-8 (pdf), ISSN 1455-2604, ISSN 1797-6995 (pdf).

Keywords: railway, substructure, subballast, frost, frost action, frost heave test, track inspection

ABSTRACT

This publication is a preliminary study in a research project concerning frost action in railway structures. The aim of the work was to examine the frost susceptibility of the materials used in substructure layers (subballast) of railway track. Frost action in track substructure causes inconvenience to railway traffic and maintenance costs. Therefore it is essential to identify the cause of frost damages.

The requirements for the smoothness of track have become stricter because of the increasing travelling speeds and only minor roughness of rails is permitted. Freezing and frost heave of the frost susceptible subsoil can be prevented with a sufficient substructure thickness. Non-frost-susceptible substructure materials are a necessity in functional frost protection.

For the most part Finnish railway network has been built before the 1950's. By examining the history of railway construction it was observed that before the 1960's the substructure materials were evaluated only visually. These materials may cause frost damages whose origin has not been taken into account. However the same materials are still in the structures even though the quality requirements for the track smoothness have become stricter.

In the experimental part of the study 60 samples were collected from the substructure layers of in 30 different places of railway network. Sampling was focused on sites where there were observed damages. The samples went through a frost heave test in which the frost heave of each sample was measured and the frost heave coefficient defined. The frost susceptibility was evaluated on basis of the test results. Approximately 60 % of samples exceeded the limit of 2,2 mm in frost heave and the limit of 1,1 mm²/Kh in frost heave coefficient. These limits determining the practical non-frost-susceptibility of track structure materials have been suggested in a previous study. The maximum measured frost heave was 14,3 mm and the maximum heaving factor was 6,8 mm²/Kh. On the basis of the results substructure may be the origin of frost damages in several places on the railway network. To ensure the results it is necessary to carry out field tests. The grain size distribution and water content of all the samples was also defined. The dependence between frost susceptibility and the fines content of the samples was not especially clear.

ALKUSANAT

Työ tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä Ratahallintokeskuksen tilauksesta ja se on osa radan routimiskäyttäytymistä koskevaa tutkimuskokonaisuutta. Tutkimuksen on tehnyt tekniikan ylioppilas Maija Saarinen. Työ on samalla tekijän diplomityö Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen Maa- ja pohjarakenteiden yksikköön.

Työn tarkastajina toimivat professori Pauli Kolisoja ja tekniikan tohtori Antti Nurmikolu Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen Maa- ja pohjarakenteiden yksiköstä sekä diplomi-insinööri Matti Levomäki Ratahallintokeskuksesta. Lisäksi työssä ovat avustaneet geotekninen asiantuntija Jouko Suomalainen Oy VR-Rata Ab:n Rautatiesuunnittelusta ja laboratoriomestari Marko Hoppo Tampereen teknillisestä yliopistosta.

Helsingissä, kesäkuussa 2008

Ratahallintokeskus
Rataverkko-osasto

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
SAMMANDRAG.....	4
ABSTRACT.....	5
ALKUSANAT.....	6
LIITTEET.....	8
TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT.....	9
1 JOHDANTO.....	10
2 RADAN RAKENNE.....	11
2.1 Rakennekerrokset.....	11
2.2 Väli- ja eristyskerrokset.....	12
2.2.1 Välikerroksen materiaalit.....	12
2.2.2 Eristyskerroksen materiaalit.....	14
2.2.3 Routamitoitus.....	17
2.3 Alusrakenteen rakentamisen historia.....	23
2.3.1 Lähtökohdat.....	23
2.3.2 Radan rakenne ja materiaalivaatimukset.....	25
2.3.3 Ratojen peruserännyt.....	28
2.3.4 Aiemman rakentamisen vaikutus nykyiseen alusrakenteeseen.....	30
3 ROUTA RATARAKENTEESSA.....	32
3.1 Routimisilmiö.....	32
3.3.1 Routaan liittyviä käsitteitä.....	32
3.3.2 Maan sisältämä vesi ja sen jäätyminen.....	33
3.1.3 Routiminen.....	34
3.1.4 Segregaatiopotentiaali ja routimiskerroin.....	36
3.2 Routivuuden arviointi.....	37
3.2.1 Rakeisuus.....	37
3.2.2 Muut routivuutta kuvaavat ominaisuudet.....	38
3.2.3 Routanousukokeet.....	39
3.2.4 Karkearakeisten maalajien routivuus.....	40
3.3 Ratarakenteen routiminen ja raiteentarkastus.....	41
3.3.1 Raiteentarkastusmittaukset.....	41
3.3.2 Raiteen asema.....	43
3.3.3 Routavaurioiden syyt.....	43
3.3.4 Liikenteelle aiheutuvat haitat ja radan kunnossapito.....	44
3.4 Routivien kohteiden kartoitus ja roudan syvyys.....	46
3.4.1 Routimisen havaitseminen raiteentarkastusmittauksissa.....	46
3.4.2 Roudan syvyyslaskelmat ja maatutkaprofiilit radan rakenteesta.....	47
4 NÄYTTEET JA LABORATORIOTUTKIMUKSET.....	50
4.1 Näytteenottoaikat.....	50
4.1.1 Valintakriteerit.....	50

4.1.2	Valitut kohteet.....	50
4.1.3	Näytteenotto väli- ja eristyskerroksesta	52
4.2	Vesipitoisuuden ja rakeisuuden määrittäminen	56
4.3	Routanousukoe	57
4.3.1	Kokeiden tavoite	57
4.3.2	Näytteiden valmistus.....	57
4.3.3	Koejärjestely	57
5	TUTKIMUSTULOKSET JA ANALYSOINNIT	60
5.1	Rakeisuus.....	60
5.1.1	Raekokojakautuma	60
5.1.2	Hienoaines.....	60
5.2	Vesipitoisuus	62
5.3	Routanousukoe	62
5.3.1	Tulosten tulkinta.....	62
5.3.2	Tulokset.....	63
5.4	Hienoainespitoisuuden vaikutus routimisherkkyyteen.....	67
5.5	Sepelimmäärän vaikutus routivuuteen.....	68
5.6	Yhteenvedo eri rataosilta otetuista näytteistä.....	69
6	PÄÄTELMÄT JA JATKOTUTKIMUSSUOSITUKSET	71
6.1	Yleisarvio alusrakennemateriaalien routivuudesta.....	71
6.2	Jatkotutkimussuosituksia.....	71
	LÄHDELUETTELO	73

LIITTEET

Liite 1	Pääratojen kunnossapitotasot
Liite 2	Näytteenottoaikojen sijainti rataverkolla
Liite 3	Havainnot näytteenottoaikoilla
Liite 4	Kokeellisen osuuden tulokset
Liite 5	Alusrakennenäytteiden rakeisuuskäyrät

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

C_u	Raekokosuhde $\frac{d_{60}}{d_{10}}$
d_i	Läpäisyprosenttia i vastaava raekoko
F_i	Tilastollisesti kerran i vuodessa toistuva suurin pakkasmäärä
gradT	Jäätyneen maakerroksen keskimääräinen lämpötilagradientti (K/mm)
h_{24h}	Yhden vuorokauden jälkeinen routanousu (mm)
h_{96h}	Neljän vuorokauden jälkeinen routanousu (mm)
P_i	Läpäisyprosentti i mm seulalla
SP_o	Routimiskerroin (mm^2/Kh)
RATO	Ratatekniset ohjeet
R_f	Hienoustekijä
$T_{\text{yläp}}$	Maanpinnan lämpötila ($^{\circ}\text{C}$)
v	Routanousunopeus (mm/h)
$W_L <(0,5\text{mm})$	Alle 0,5 mm maa-aineksen juoksuraja
Z	Jäätyneen maakerroksen korkeus eli roudan syvyys (mm)
Δh	Routanousun lisäys aikavälillä Δt (mm)
Δt	Aikaväli (h)

1 JOHDANTO

Routiminen on ollut ongelma Suomen rataverkolla aina 1800-luvun lopulta, jolloin ratoja alettiin rakentaa. Liikennöintinopeuksien noustessa radan tasaisuusvaatimukset ovat tiukentuneet ja raiteen asemassa sallittavat muutokset ovat yhä pienempiä. Riittävällä alusrakennepaksuuksilla pystytään estämään pohjamaan jäätyminen ja routivasta pohjamaasta johtuvat epätasaiset routanousut. Alusrakenteisiin käytetyn materiaalin tulisi aina olla routimatonta. Mikäli alusrakenteeseen on kuitenkin käytetty routimisherkkää materiaalia, routimista tapahtuu lauhoinkin talvina, jolloin routaraja jää alusrakenteen syvyydelle.

Alusrakenteessa käytettäville materiaaleille on ollut laatuvaatimuksia vasta 1960-luvulta lähtien, joten aiemmin materiaalin rakeisuuden arvioiminen on tehty pelkästään silmämääräisesti. Ennen 1960-lukua käytetyt materiaalit ovat edelleen radan rakenteissa, ellei niitä ole perusparannustoimenpiteiden yhteydessä vaihdettu. Viime vuosisadan alusta nykypäivään mennessä raiteen tasaisuusvaatimukset ovat kuitenkin oleellisesti kiristyneet pyrittäessä yhä suurempiin liikennöintinopeuksiin.

Aiemmissä tutkimuksissa (Nurmikolu 2006) on ilmennyt, että eri sora- ja hiekka- materiaalien routimisherkkyudessa voi olla suuria eroja. Vuosituhansien rapauttaminen on muuttanut materiaalien vedensitomis- ja huokosominaisuuksia niin, että materiaalit ovat saattaneet muuttua routimisherkiksi.

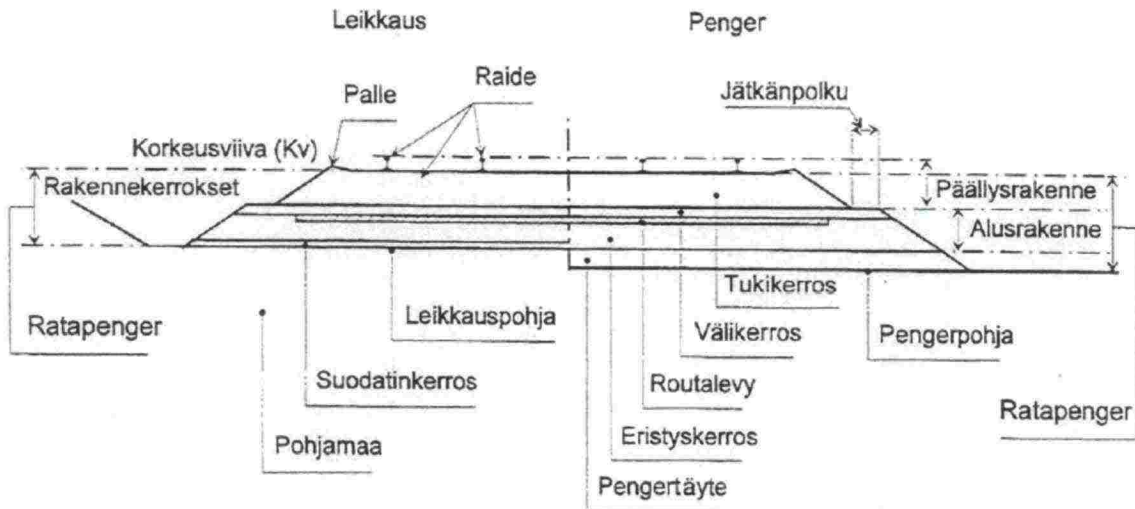
Kunnossapidon ja perusparannustoimenpiteiden kannalta on tärkeää tunnistaa, johtuuko routiminen alusrakenteeseen käytetyistä materiaaleista. Alusrakennekerrosten routimisherkkyys on vaikeasti korjattava ongelma, mutta routimisen syyn ollessa tiedossa voidaan sen korjaamiseen kohdistaa oikeita toimenpiteitä.

Tämän työn tavoitteena on selvittää, missä määrin rautateiden routahaitat johtuvat alusrakennekerrosten routimisesta. Tutkittavaksi otetaan näytteitä 30:stä rataverkon routivasta kohteesta. Kustakin kohteesta otetaan kaksi näytettä, eli näytteet väli- ja eristyskerrosten tasoilta. Jokaiselle näytteelle tehdään routanousukoe sekä rakeisuuden määrittäminen. Saatujen tulosten perusteella pyritään päättämään, missä määrin ratojen alusrakenteissa on routivaa materiaalia.

2 RADAN RAKENNE

2.1 Rakennekerrokset

Radan rakennekerrokset jaetaan alusrakenteeseen ja päällysrakenteeseen. Päällysrakenteeseen kuuluvat tukikerros ja raiteet. Alusrakenteeseen puolestaan kuuluvat väli- ja eristyskerros ja mahdollinen suodatinkerros. Radan rakenne on esitetty kuvassa 2.1.



Kuva 2.1. Radan rakenne ja rakenneosien nimityksiä (Ratahallintokeskus 2005b).

Tukikerroksen mitat määräytyvät rataluokan, suurimman sallitun nopeuden, kiskonpituuden, tukikerrosmaterian ja pölkkytyypin mukaan. Tukikerroksen materiaalina käytetään raidesepeliä. Vähäliikenteisillä radoilla käytetään myös raidesoraa. (Ratahallintokeskus 2004.)

Alusrakenteen mitoituksen kannalta radat jaetaan viiteen alusrakenneluokkaan taulukon 2.1 mukaisesti. Alusrakenneluokan määrää henkilö- ja tavaraliikenteestä se, kumman vaatimustaso on korkeampi. (Ratahallintokeskus 2005b.)

Taulukko 2.1. Alusrakenneluokat (Ratahallintokeskus 2005b).

Alusrakenneluokka	Henkilöliikenteen suurin sallittu nopeus, V (km/h)	Tavaraliikenteen suurin sallittu nopeus 22,5 t akselipainolla, V (km/h)	Tavaraliikenteen suurin sallittu nopeus 25 t akselipainolla, V (km/h)
0	≤ 50	≤ 40	≤ 30
1	≤ 120	≤ 100	≤ 60
2	≤ 200	≤ 100	≤ 80
3	≤ 250	≤ 120	≤ 100
4	> 250	> 120	> 100

Radan pengervevyyden vaikuttavat raiteiden lukumäärä, alusrakenneluokka, radan geometria, tukikerroksen leveys, raideväli, akselipaino ja mitoitusnopeus. Pengervevyydellä tarkoitetaan välikerroksen yläpinnan leveyttä. Yksiraiteisilla radoilla pengerveveys vaihtelee alusrakenneluokan mukaan suoralla 5,4–6,8 m ja kaarteissa 5,4–7,2 m. Kaksiraiteisilla radoilla pengerveveys on alusrakenneluokasta riippuen suoralla 9,5–12,5 m ja kaarteissa 9,5–12,5 m. (Ratahallintokeskus 2005b.) Alusrakenteen paksuus

määräytyy routamitoituksen mukaan. Routamitoitusta on käsitelty tarkemmin luvussa 2.2.3 sekä RATO 3:ssa (Ratahallintokeskus 2005b).

Radan alusrakenteen tehtävänä on toimia tukevana perustana radan päällysrakenteelle. Se myös tasoittaa alapuoliseen pohjamaahan kohdistuvaa kuormitusta, suojaa pohjamaata jäätymiseltä, estää rakennekerrosten ja pohjamaan sekoittumisen ja mahdollistaa radan rakenteen kuivatuksen. (Selig & Waters 1994.) Radan alusrakenteen kunnolla on suuri merkitys radan toimivuudelle ja turvallisuudelle. Alusrakenteessa tapahtuvat muodonmuutokset näkyvät radan kunnossa ja raiteen geometriassa ja vaikuttavat liikenteeseen. Eri kerrosten materiaaleille ja rakenteille on asetettu vaatimuksia, jotta radalle ei aiheudu vahinkoa liikennekuormituksesta, routimisesta tai huonosta kuivatuksesta. Radan alusrakenteen käyttöikävaatimus on 100 vuotta (Ratahallintokeskus 2005b.).

Välikerroksen tehtävänä on muodostaa tukikerrokselle luja, tasainen ja vettä läpäisevä alusta. Se estää eristyskerrosta ja tukikerrosta sekoittumasta toisiinsa, lisää kantavuutta ja ehkäisee routimisen aiheuttamia haittoja. (InfraRYL 2006.)

Eristyskerroksen tehtävänä on jakaa kuormia alapuoliselle maa- tai kalliopohjalle. Yhdessä muiden rakennekerrosten kanssa se estää tai pienentää alla olevien maa-kerrosten routimisesta aiheutuvia muodonmuutoksia. Eristyskerros myös estää pohjamaan sekoittumisen ylempiin rakennekerroksiin ja pysäyttää kapillaarisen vedennousun kerroksen alaosaan. (InfraRYL 2006.)

Väli- ja eristyskerroksen lisäksi maaleikkauksessa tarvitaan joskus suodatinkerrosta. Sen tehtävä on estää rakennekerrosten materiaalin sekoittuminen pohjamaahan. Suodatinkerroksen tarve arvioidaan päällekkäisten materiaalien (eristyskerros ja pohjamaa) kokosuhteen perusteella. Jollei ehto kaavan 2-1 toteudu, tarvitaan suodatinkerros. Suodatinkerroksen paksuuden on oltava vähintään 300 mm. (InfraRYL 2006.)

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

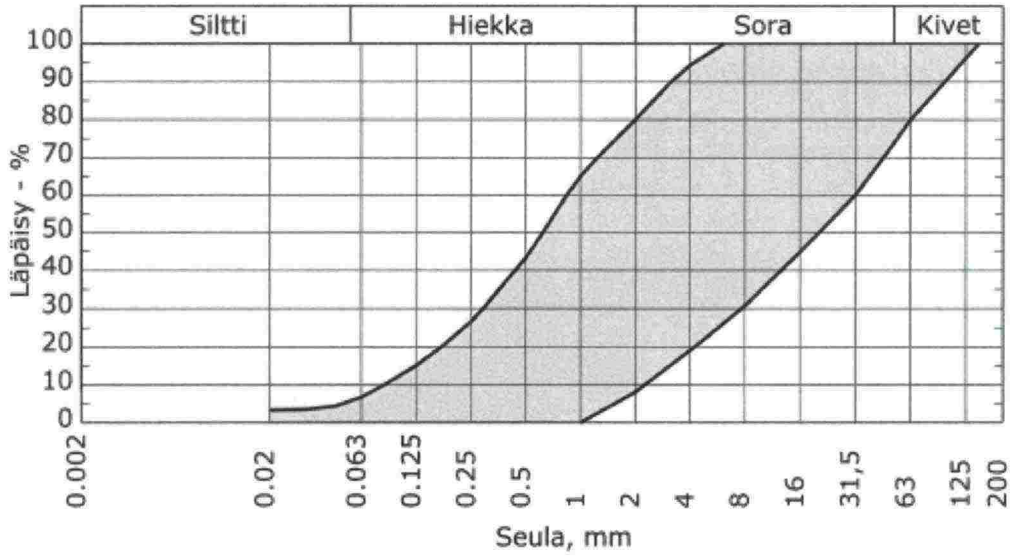
D_{15} läpäisyprosenttia 15 vastaava raekoko eristyskerroksessa ja
 d_{85} läpäisyprosenttia 85 vastaava raekoko pohjamaassa

Seuraavassa luvussa keskitytään väli- ja eristyskerroksiin, koska työn tavoitteena oli tarkastella kyseisten kerrosten luonnollisten sora- ja hiekkamateriaalien routimisherkkyyttä.

2.2 Väli- ja eristyskerrokset

2.2.1 Välikerroksen materiaalit

Suomessa välikerrosmateriaalina käytetään routimatonta hiekkaa, soraa tai kalliomurskettä. Soraa ja hiekkaa käytettäessä välikerros tehdään rakeisuudeltaan kuvan 2.2 mukaisesta materiaalista. Kalliomurskeelle on esitetty omat laatuvaatimukset (luku 2.2.2). (InfraRYL 2006.)



Kuva 2.2. Luonnollisista maalajeista (hiekkä, sora) rakennettavan välikerroksen rakeisuusvaatimukset (Infra RYL 2006).

Ruotsissa väli- ja eristyskerrosta vastaa ”underballast”-kerros. ”Underballast”-kerroksen yläosa, joka vastaa Suomen välikerrosta, tehdään kuvan 2.3 rakeisuuskäyrän mukaisesta murskeesta. Suurin sallittu raekoko on 150 mm. Raekokosuhteen C_u (kaava 2-2) tulee olla yli 6.

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \text{ jossa} \quad (2-2)$$

C_u on raekokosuhte

d_{60} on läpäisyprosenttia 60 vastaava raekoko

d_{10} on läpäisyprosenttia 10 vastaava raekoko

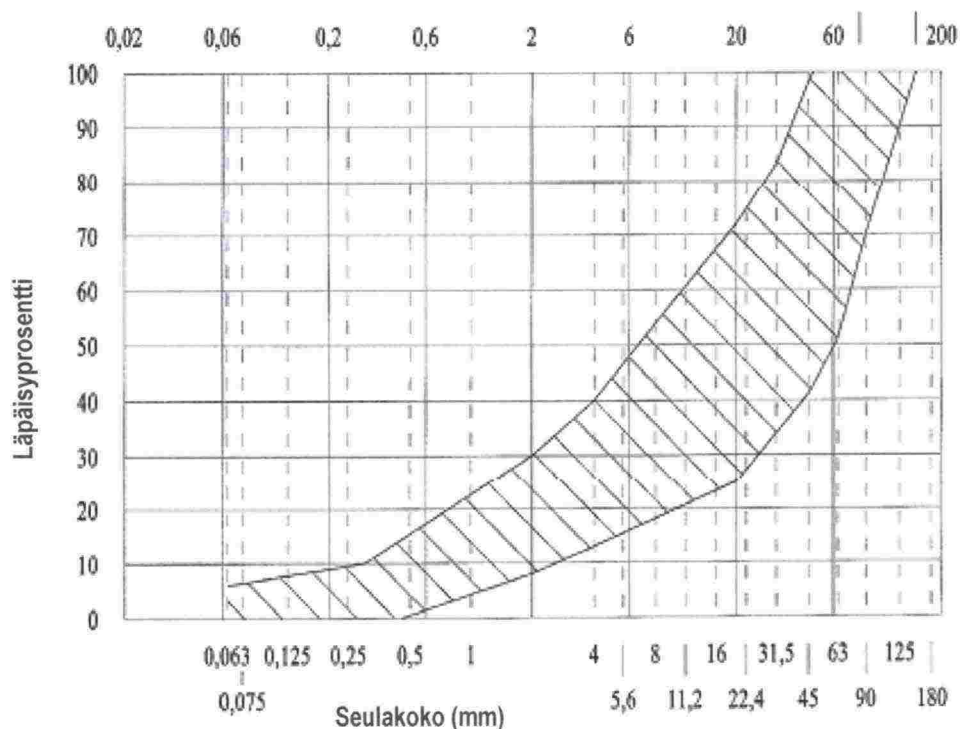
Lisäksi Underballast”-kerroksen yläosan materiaalissa lajitteiden painoprosenttien suhteiden tulee olla seuraavat: (Banverket 2007)

$$- \frac{P_{0,063}}{P_{60}} < 7 \%$$

$$- \frac{P_{0,075}}{P_{16}} < 16 \%$$

$$- \frac{P_{0,002}}{P_{0,063}} < 20 \%, \text{ jos } \frac{P_{0,063}}{P_{60}} < 5 \%, \text{ joissa}$$

P_i on läpäisyprosentti i mm seulalla



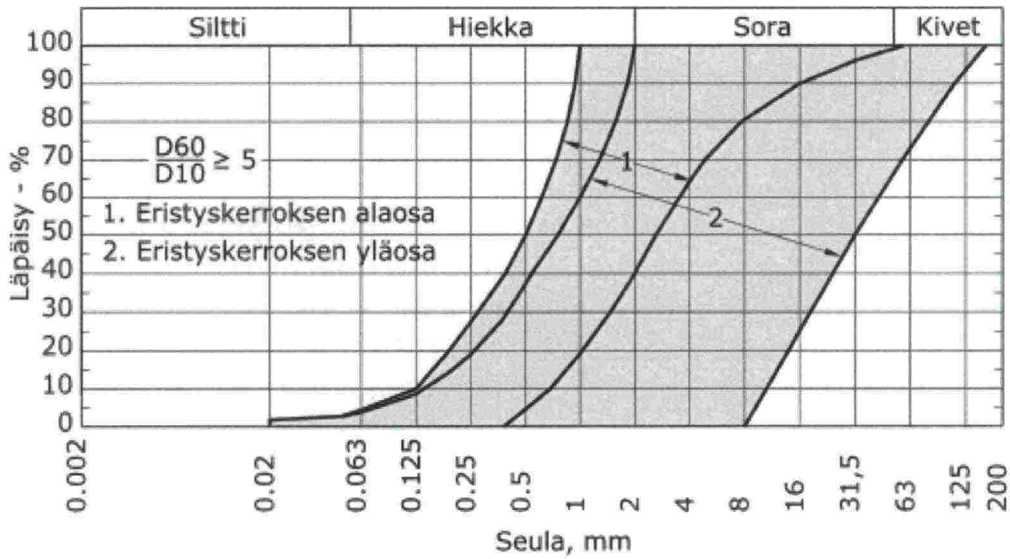
Kuva 2.3. "Underballast"-kerroksen yläosan rakeisuusalue murskeelle Ruotsissa (Banverket 2007).

Norjassa välikerrosta vastaavan "forsterkningslag"-kerrokseen käytettävän soran tulee olla suhteistunutta soraa luonnonmuodostumasta. Soran maksimiraekoko on 150 mm. "Forsterkningslag"-kerrokseen käytettävän louheen ja murskeen maksimiraekoko on 300 mm tai enintään puolet rakennettavan kerroksen paksuudesta. Murskeen tulee olla suhteistunutta ja raekokosuhteen (kaava 2-2) tulee olla vähintään 15. Raekoon 0,02 mm alittavaa lajitetta tulee olla alle 3 % suhteessa alle 20 mm lajitteen määrään. (Jernbaneverket 2006.)

Verrattaessa eri maissa välikerroksen materiaaleille asetettuja vaatimuksia voidaan todeta, että vain Ruotsissa välikerrosta vastaava kerros tehdään aina murskeesta. Suomessa ja Norjassa on murskeesta rakennettavan välikerroksen sallittu hienoaineksen osuus pienempi kuin Ruotsissa. Ruotsissa ja Norjassa sallitaan suuremman maksimiraekoon käyttö. Norjassa ei ole käytössä rakeisuuskäyriä, mutta murskeelta vaadittu raekokosuhte on Norjassa huomattavasti suurempi kuin Ruotsissa. Suomessa ei ole esitetty vaatimusta välikerroksessa käytettävien sora- ja hiekkamateriaalien raekokosuhteelle, mutta ohjealueen rajakäyrien muoto (kuva 2.2) vastaa raekokosuhdetta 10–15.

2.2.2 Eristyskerroksen materiaalit

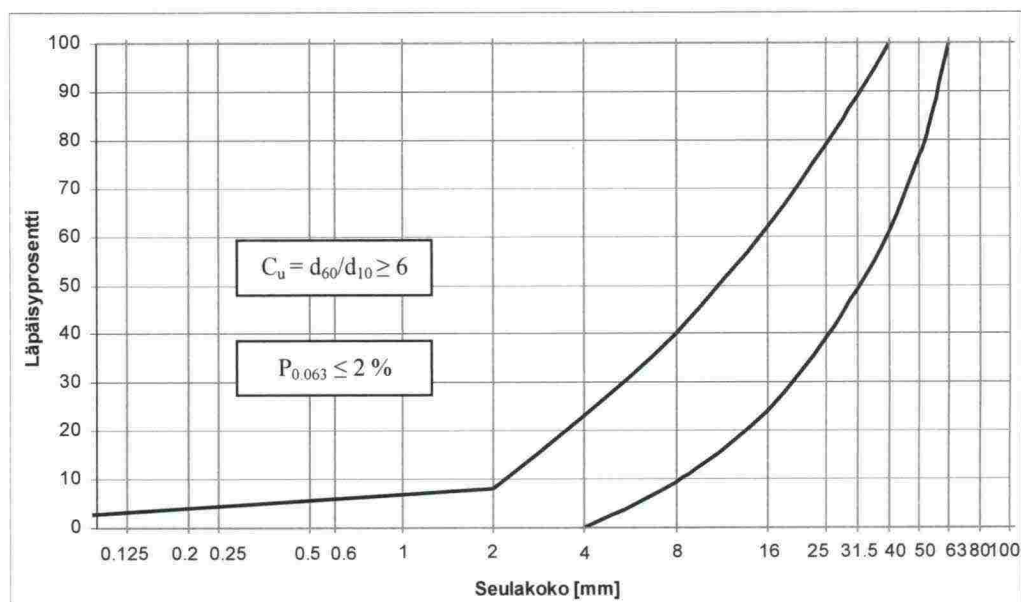
Suomessa luonnollisista maalajeista rakennettavassa eristyskerroksessa materiaalina käytetään kuvan 2.4 rakeisuusalueella olevia routimattomia materiaaleja. Materiaalin kapillaarinen nousukorkeus saa olla enintään 0,7 m. Materiaali ei saa sisältää orgaanisia eikä epäpuhtaita aineita. (InfraRYL 2006.)



Kuva 2.4. Materiaalin rakeisuusvaatimukset luonnollisista maalajeista rakennettavassa eristyskerroksessa Suomessa (Infra RYL 2006).

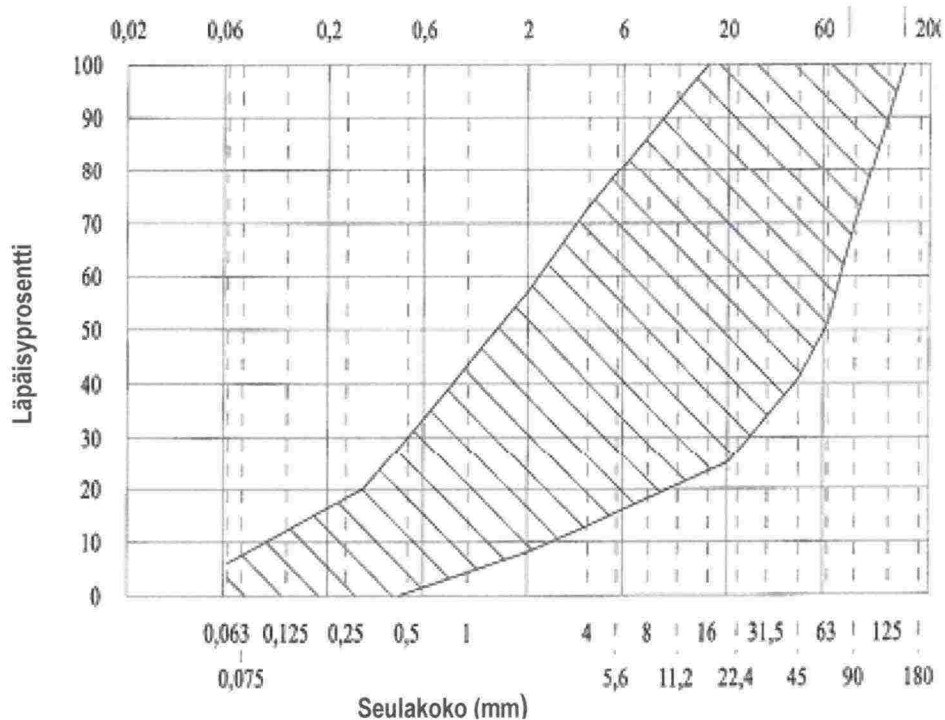
Kun Suomessa rakennetaan eristyskerros kalliomurskeesta, InfraRYL (2006) edellyttää välikerroksen yhdistämistä eristyskerrokseen. Rakennekerrokset rakennetaan samanaikaisesti ja samasta materiaalista. Rakennettaessa ei luonnomateriaaleja ja kalliomursketta käytetä sekaisin vaan kerrokset tehdään joko kalliomurskeesta tai luonnomateriaaleista (InfraRYL 2006). Yhdistetyn väli- ja eristyskerroksen kalliomurskeen rakeisuusvaatimukset on esitetty kuvassa 2.5. Kalliomurskeelle on asetettu myös mm. lujutta, mineralogaa ja vedenimua koskevia vaatimuksia (InfraRYL tulossa 2008).

Materiaalien käytössä ollaan suuntautumassa yhä enemmän kalliomurskeen käyttöön. Esimeriksi Vuosaaren satamaradan ja Oikoradan alusrakenteet on rakennettu kalliomurskeesta. Toisaalta lähes kaikki olemassa olevien ratojen alusrakennekerrokset on rakennettu sorasta tai hiekasta.



Kuva 2.5. Kalliomurskeesta rakennettavan yhdistetyn väli- ja eristyskerroksen rakeisuusvaatimukset (InfraRYL tulossa 2008).

Ruotsissa Suomen eristyskerrosta vastaava ”underballast”-kerroksen alaosa tehdään kalliomurskeesta, soramurskeesta tai luonnonmateriaalista, jonka rakeisuus on kuvan 2.6 vaatimuksen mukainen. Radan rakenteessa ei saa sekoittaa murskettä ja luonnonmateriaaleja. Suurin sallittu raekoko on 150 mm ja raekokosuhteen (C_u) tulee olla yli 6. Lisäksi eri seulakokojen läpäisyprosenttien suhteiden tulee olla samat kuin edellä luvussa 2.2.1 mainitussa ”underballast”-kerroksen yläosassa. (Banverket 2007.)



Kuva 2.6. Murskeen ja luonnonmateriaalin rakeisuus ”underballast”-kerroksen alaosalle Ruotsissa (Banverket 2007).

Norjassa Suomen eristyskerrosta vastaava "frostsikringslag"-kerros edellytetään tehtäväksi routimattomasta materiaalista. Louhetta tai mursketta käytettäessä maksimiraekoko on 500 mm tai enintään 2/3 rakennettavan kerroksen paksuudesta. Kerrosta ei tarvitse rakentaa, jos pohjamaa on routimaton. Murskemateriaalin tulee olla suhteistunutta ja raekokosuhteen vähintään 15. Mursketta ilman hiekka- ja sorafraktioita ei saa käyttää routateknisistä syistä. Raekoon 0,02 alittavaa lajitetta tulee olla alle 3 % suhteessa alle 20 mm lajitteen määrään. Käytettävän soran ja hiekan tulee olla suhteistunutta ja peräisin luonnonmuodostumasta. Sen maksimiraekoko on 150 mm. Hiekkaa tulisi leikkauksissa käyttää vain suodatinkerroksessa. (Jernbaneverket 2004.)

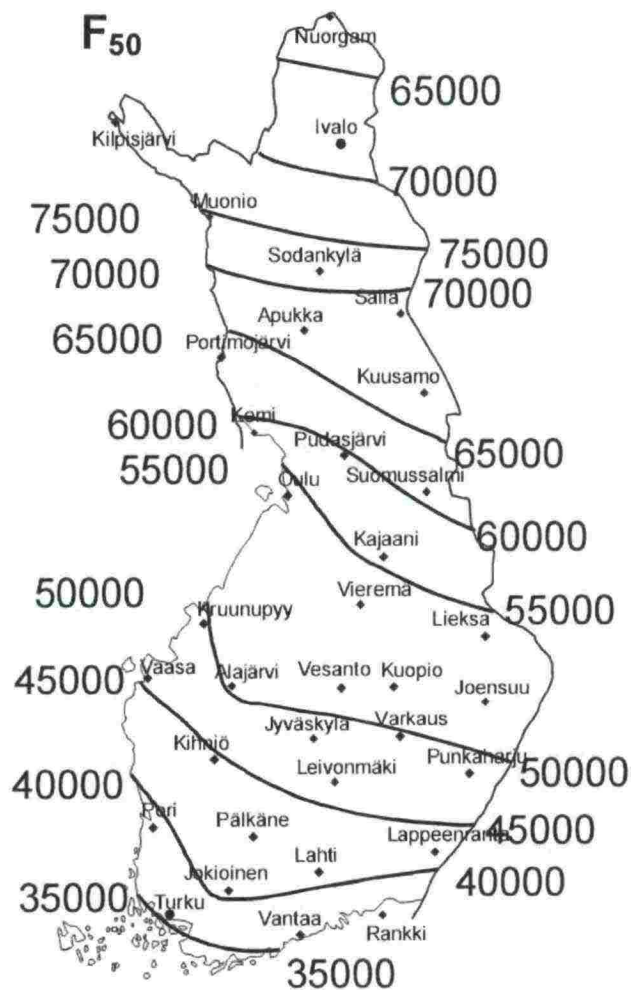
Verrattaessa Ruotsin "underballast"-kerroksen alaosan rakeisuusaluetta (kuva 2.6) ja Suomessa eristyskerrokseen käytettävän luonnonmateriaalin rakeisuuskäyriä (kuva 2.4) huomataan, että Suomessa saa käyttää kerrokseen materiaalia laajemmalla rakeisuusalueelta. Suomessa kuvan 2.4 rakeisuuskäyrä on vain luonnonmateriaaleille kun taas Ruotsissa samaa kuvan 2.6 rakeisuuskäyrää käytetään sekä luonnonmateriaaleille että murskeelle. Verrattaessa Suomessa ja Ruotsissa eristyskerrosta vastaavassa kerroksessa käytettäviä kalliomurskeita voidaan todeta, että Ruotsissa on alle 16 mm rakeiden sallittu osuus suurempi. Ruotsissa sallitaan myös karkempi rakeisen murskeen käyttö kuin Suomessa. Ruotsissa välikerrosta vastaavan "underballast" -kerroksen yläosan rakeisuusalue vastaa paremmin Suomessa väli- ja eristyskerrokseen käytettävän kalliomurskeen rakeisuusaluetta, mutta siinäkin sallitaan suurempi osuus alle 16 mm rakeista. Suomessa on luonnonmateriaaleilla erilaiset vaatimukset eristyskerroksen ylä- ja alaosalta, mitä Ruotsissa tai Norjassa ei ole. Suomessa eristyskerroksen alaosaan käytettävä luonnonmateriaali on ainoastaan käyrän alapäässä sellaista, että sitä voidaan käyttää myös Ruotsissa.

Norjassa sallitaan eristyskerroksessa huomattavasti karkearakeisemmän murskemateriaalin käyttö ja myös murskeelta vaadittu raekokosuhte on Norjassa huomattavasti suurempi kuin Suomessa ja Ruotsissa.

2.2.3 Routamitoitus

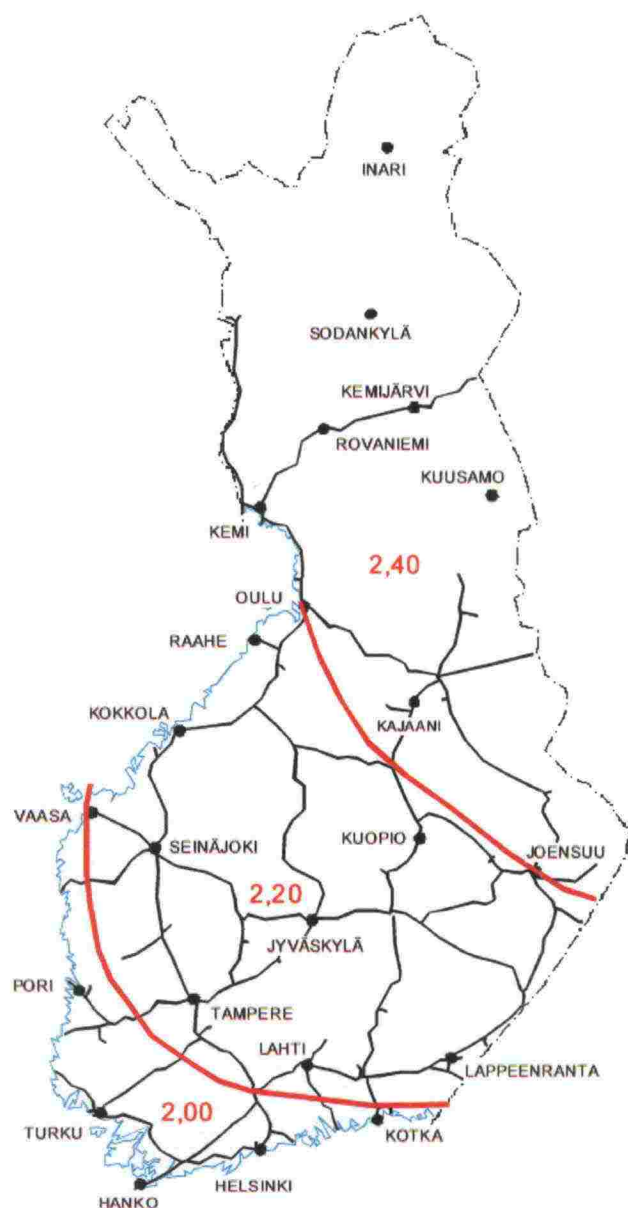
Liikennöintinopeuksien edellyttämä raiteen tasaisuusvaatimus on suuri varsinkin tärkeimmillä rataosilla ja tästä johtuen sallitut routanousut ovat vähäisiä. Routamitoituksella pyritään hallitsemaan routanoususta johtuvan raiteen epätasaisuuden suuruutta ja toistuvuutta. Käytännössä tämä toteutetaan käyttämällä routimattomia rakennekerrosmateriaaleja. Rakennekerrosten paksuus mitoitetaan sellaiseksi, että niiden alapuolisen routivan pohjamaan jäätyminen on estetty mitoituspakkasmäärän mukaisilla rakenteilla. (Nurmikolu & Kolisoja 2002.)

Mitoittavana pakkasmääränä käytetään Suomessa tärkeimmillä rataosilla tilastollisesti kerran 50 vuodessa toistuvaa suurinta pakkasmäärää (kuvassa 2.7).



Kuva 2.7. Kerran 50 vuodessa esiintyvä pakkasmäärä ($h^{\circ}C$) (Ratahallintokeskus 2005b).

Uusilla routaeristämättömillä radoilla rakennekerroksien kokonaispaksuuden on oltava kuvan 2.8 mukainen radan alusrakenneluokan ollessa 2, 3 tai 4. Rakennepaksuus sisältää sekä tukikerroksen että alusrakenteen. Alusrakenneluokan 1 radoilla rakennekerrosten kokonaispaksuus saa olla 0,2 m pienempi ja alusrakenneluokan 0 radoilla 0,6 m kuvan 2.8 arvoja pienempi. Rakennekerrosten paksuutta on kasvatettava kuvan 2.8 arvoista 15 %, kun käytetään murskattua kiviainesta. (Ratahallintokeskus 2005b.)



Kuva 2.8. Rakennekerrosten kokonaispaksuus (m) routaeristämättömillä radoilla (Ratahallintokeskus 2005b).

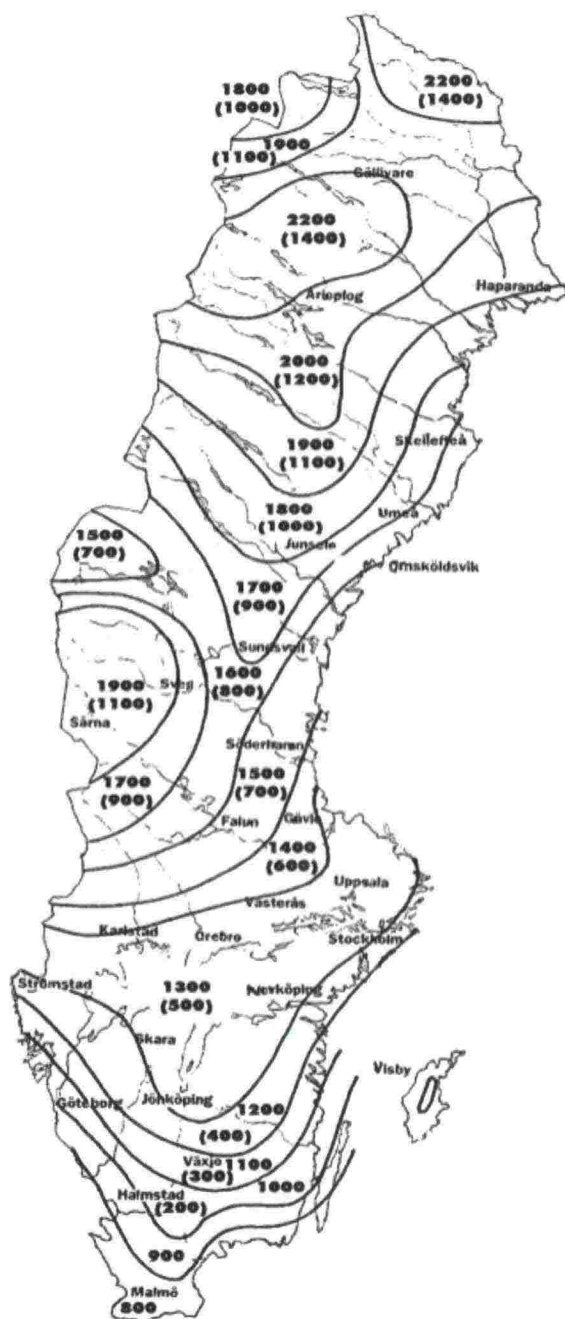
Parannettavan radan rakenne luokitellaan routivalla pohjamaalla joko routimattomaksi, harvoin routivaksi tai routivaksi. Luokitus perustuu siihen, paljonko routimattomien rakennekerrosten paksuus on kuvan 2.8 arvoja pienempi.

Rakenne on

- routiva, kun rakennekerrosten erotus on vähintään 0,2 m
- harvoin routiva, kun rakennekerrosten erotus on enintään 0,2 m
- routimaton, kun rakennekerrosten paksuus on kuvan 2.8 mukainen.

Routasuojauksen parantaminen toteutetaan ensisijaisesti siten, että routivat materiaalit vaihdetaan routimattomiin. Toissijaisesti routasuojaukseen voidaan käyttää routalevyjä. (Ratahallintokeskus 2005b.)

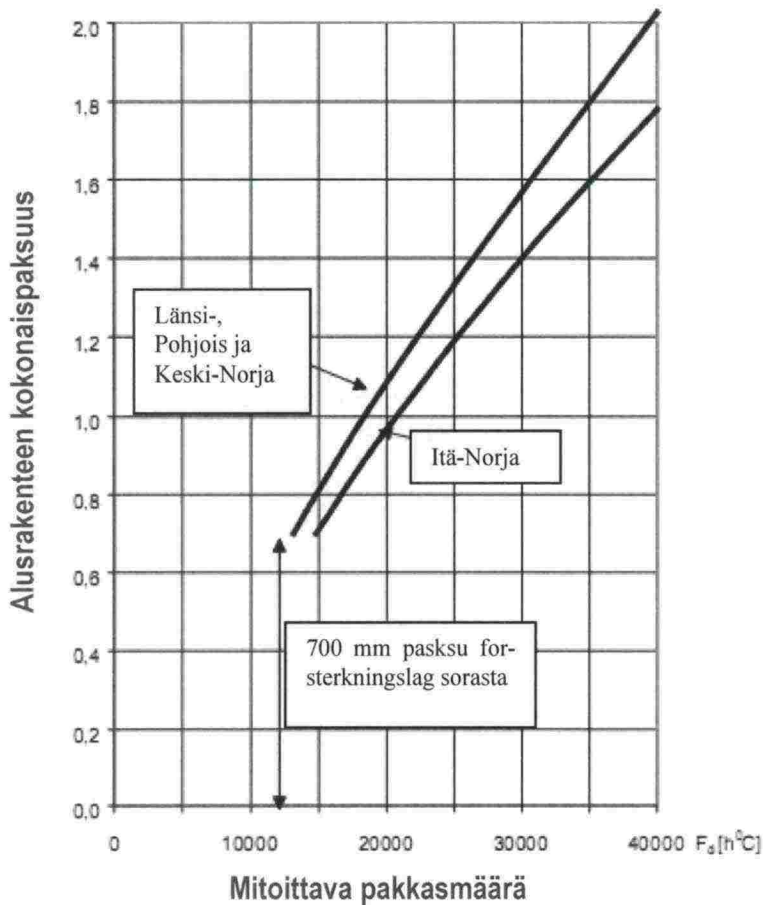
Myös Ruotsissa routimattoman rakenteen paksuus mitoitetaan kerran 50 vuodessa esiintyvän suurimman pakkasmäärän mukaan. Routimattoman rakenteen paksuus on esitetty kuvassa 2.9. ”Underballast”-kerroksen välikerrosta vastaavan osuuden paksuus on vähintään 0,8 m. (Banverket 2007.)



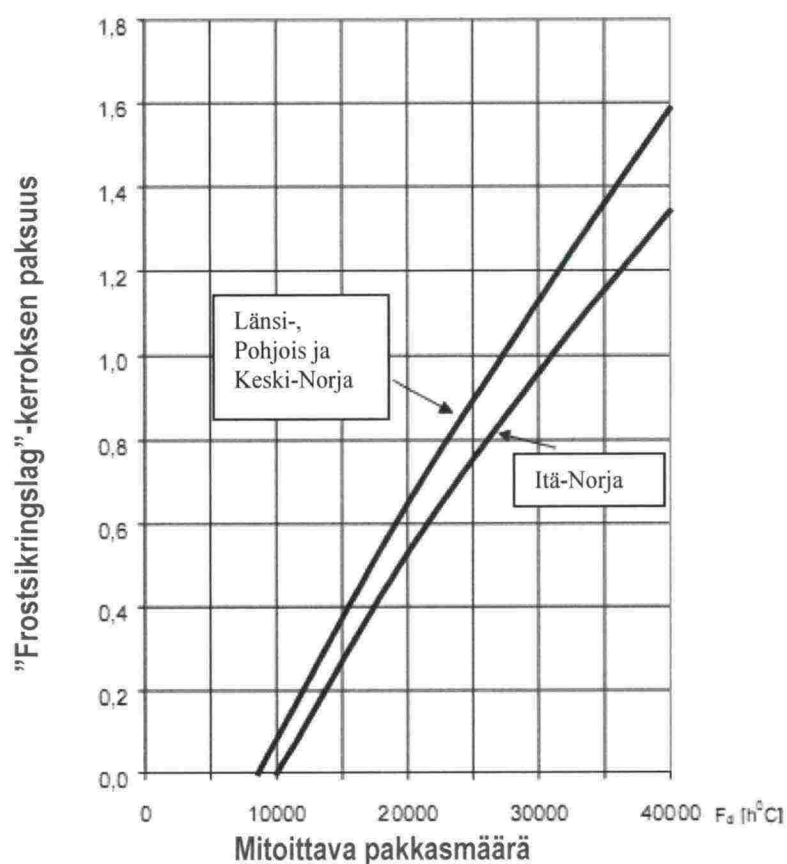
Kuva 2.9. Routamitoituksen määräämä radan alusrakenteen paksuus (mm) routivalla pohjamaalla Ruotsissa. Suluissa olevat luvut ovat murskeelle ja luonnonmateriaaleille, joita käytetään routasuojaukseen alusrakenteessa, kun rakenteessa on 800 mm paksu ”underballast”-kerroksen yläosa. Ilman sulkuja on ilmoitettu alusrakenteen kokonaispaksuus. Mitat eivät sisällä tukikerrosta. (Banverket 2007.)

Norjassa tärkeimmillä radoilla routamitoitus tehdään kerran 100 vuodessa toistuvan suurimman pakkasmäärän mukaan. Alemman luokan raiteilla, joilla nopeudet ovat pienempiä, voidaan käyttää myös kerran 10 vuodessa tai kerran 20 vuodessa toistuvia suurimpia pakkasmääriä. (Jernbaneverket 2004.)

Tärkeimmillä radoilla ”forsterkningslag”-kerros tehdään vähintään 700 mm paksuksi (Jernbaneverket 2006). Kokonaan sorasta tehtävä alusrakenne mitoitetetaan kuvan 2.10 mukaan. Kun rakenteessa on 700 mm ”forsterkningslag”-kerros murskeesta tai louheesta, sorasta tehtävän ”frostsikringslag”-kerroksen paksuus mitoitetetaan kuvan 2.11 mukaan. (Jernbaneverket 2004.)

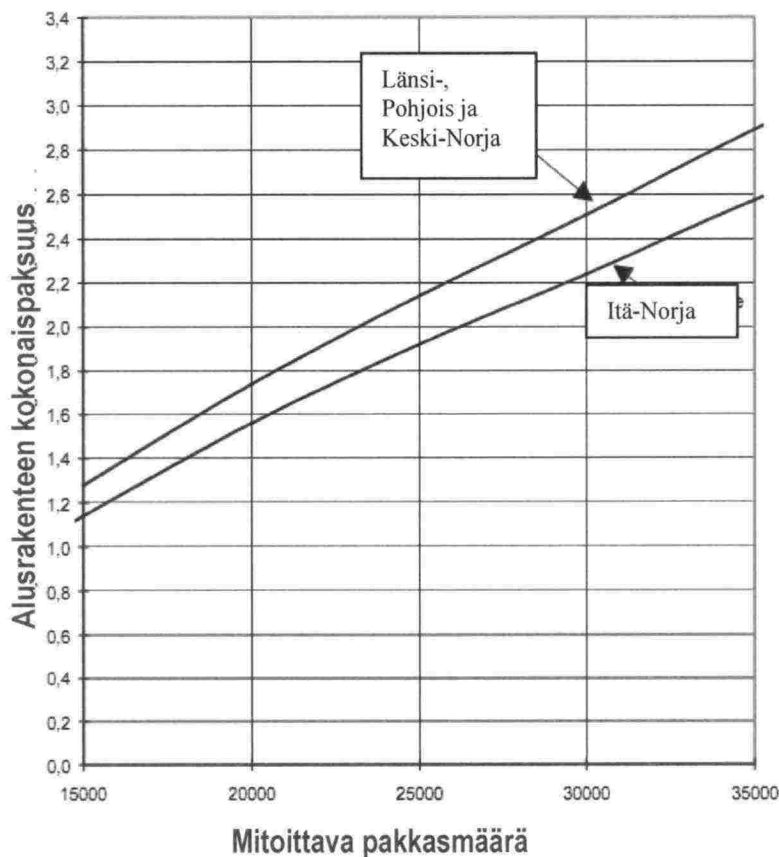


Kuva 2.10. Mitoituskäyrä sorasta rakennettavan alusrakenteen kokonaispaksuudelle (Jernbaneverket 2004).



Kuva 2.11. Mitoituskäyrä sorasta rakennettavalle "frostsikringslag"-kerrokselle, kun kerros rakennetaan 700 mm paksun murskeesta rakennettavan "forsterkningslag"-kerroksen lisäksi (Jernbaneverket 2004).

Kokonaan murskeesta rakennettavan alusrakenteen kokonaispaksuus mitoitetään Norjassa kuvan 2.12 mukaan, jolloin rakenteesta tulee peräti 60 % paksumpi kuin kokonaan sorasta tehdystä alusrakenteesta. Mursketta käytettäessä tulee sen olla suhteistunutta. (Jernbaneverket 2004.)



Kuva 2.12. Mitoituskäyrä murskeesta rakennettavan alusrakenteen kokonaispaksuudelle (Jernbaneverket 2004).

Vertailtaessa routamitoitusta huomataan, että Suomessa ja Ruotsissa tärkeimpien ratojen routamitoitus perustuu kerran 50 vuodessa toistuvaan suurimpaan pakkasmäärään. Norjassa puolestaan käytetään kerran 100 vuodessa toistuvaa suurinta pakkasmäärää. Kaikissa maissa tuki- ja välikerroksen paksuudet on määritelty etukäteen, joten rakenteen paksuutta säädellään eristyskerroksen paksuudella. Ruotsissa alusrakenteen paksuudessa on luonnollisesti enemmän vaihtelua etelän ja pohjoisen välillä kuin Suomessa. Voidaan kuitenkin huomata, että Ruotsin pohjoisosissa rakennekerrosten paksuus on suurempi kuin Suomessa. Murskeesta rakennettavan kerroksen paksuus on Norjassa noin 60 % paksumpi kuin luonnonmateriaaleista rakennettu, kun Suomessa vastaava luku on vain 15 %. Ero selittyy Norjassa sallitulla suuremmalla raekoolla. Ruotsissa ei ole poikkeavia vaatimuksia murskeesta rakennettujen kerrosten paksuudelle.

2.3 Alusrakenteen rakentamisen historia

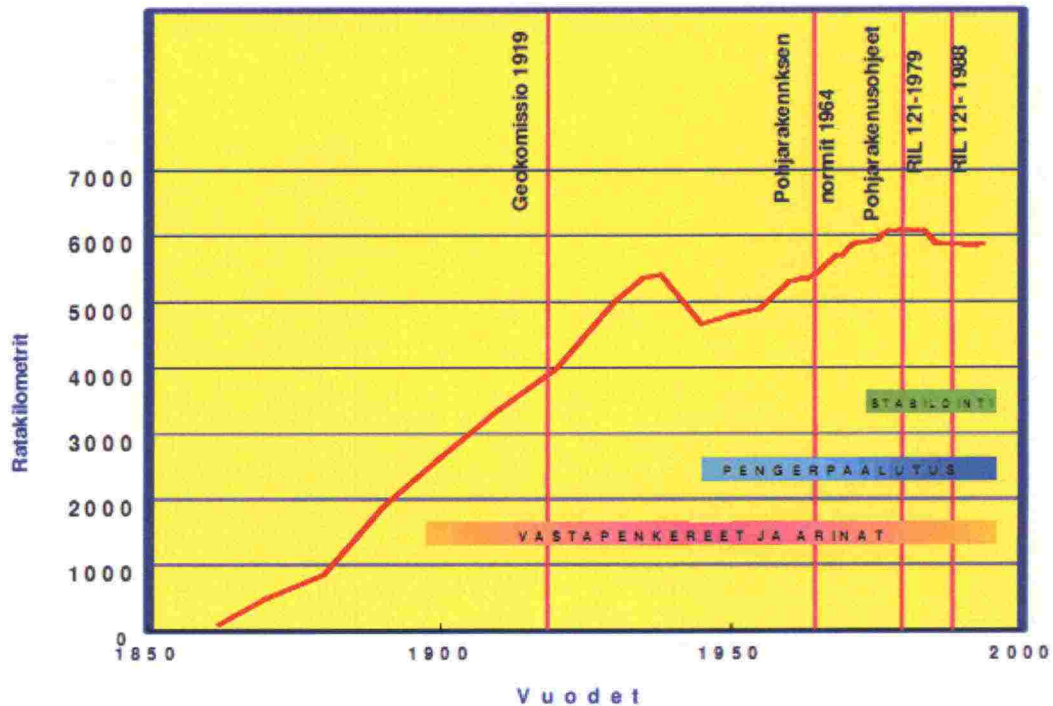
2.3.1 Lähtökohdat

Tässä työssä alusrakenteen rakentamisen historiaa kartoitettiin, koska aivan uusimpia lukuun ottamatta lähes kaikkien olemassa olevien ratojen alusrakenteet on rakennettu ennen nykyisen kaltaisten ohjeiden ja laatuvaatimusten olemassaoloa. Tästä syystä pyrittiin myös selvittämään, millaisia vaatimuksia alusrakenteiden rakennusmateriaaleille ja -tavoille on ollut olemassa ennen nykypäivää ja millaisia vaikutuksia niillä mahdollisesti on nykyisten ratarakenteiden routimiseen. Tietoa alusrakenteen

rakentamisen historiasta pyrittiin hyödyntämään myös valittaessa näytteenottokohtaa radan rakennekerroksista.

Ratojen rakentamisessa 1900-luvun alkupuolella tärkeänä pidetty asia oli massatöiden minimointi. Radat perustettiin maanpinnan varaan ja tasamaalle, jos se oli mahdollista. Korkeita leikkauksia vältettiin ja rakennekerrokset olivat ohuita. Radan kaarteisuus ja stabiliteetti, painumiin ja routimiseen vaikuttavat pohjasuhteet eivät olleet määrääviä näkökulmia. Tehdyt ratkaisut olivat aikanaan hyviä ja kun stabiliteetti, painumat ja routiminen olivat jatkuvasti ratavartijan valvonnassa, niistä ei muodostunut ongelmia. (Suomalainen 2007a.)

Aikanaan tehdyt ratkaisut aiheuttavat haasteita radanpidolle nykyään. Nopeuksien ja akselipainojen noustua ovat vaatimukset ratapenkereen vakavuudelle, painumille ja routimiselle toisenlaiset. (Suomalainen 2007a.) Ratakilometriä ja rakentamisen ohjeistus ovat kehittyneet kuvassa 2.13 esitetyn mukaisesti.



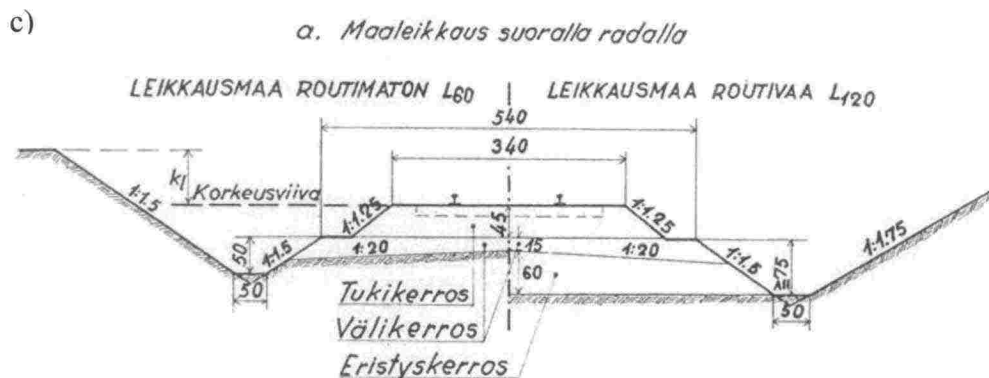
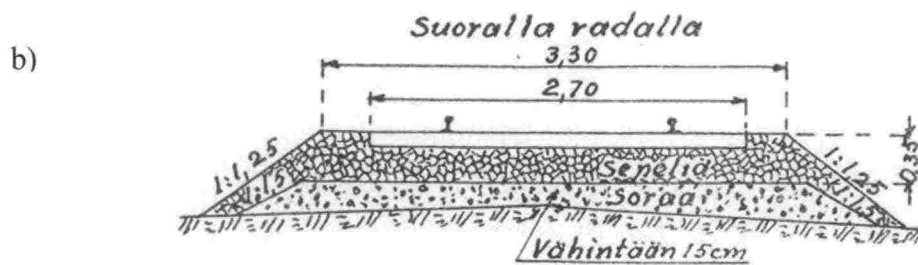
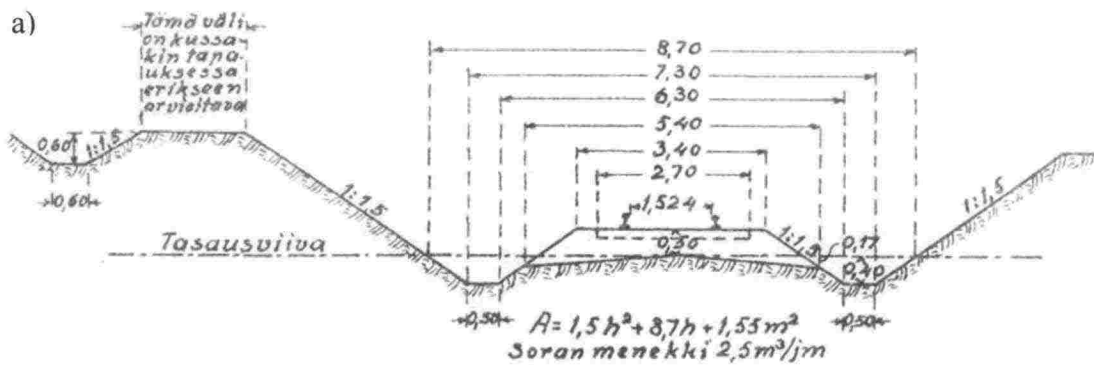
Kuva 2.13. Rakentamisen ohjeistuksen, tekniikan ja ratakilometriä määrän kehitys (Fagerholm, K. 1997).

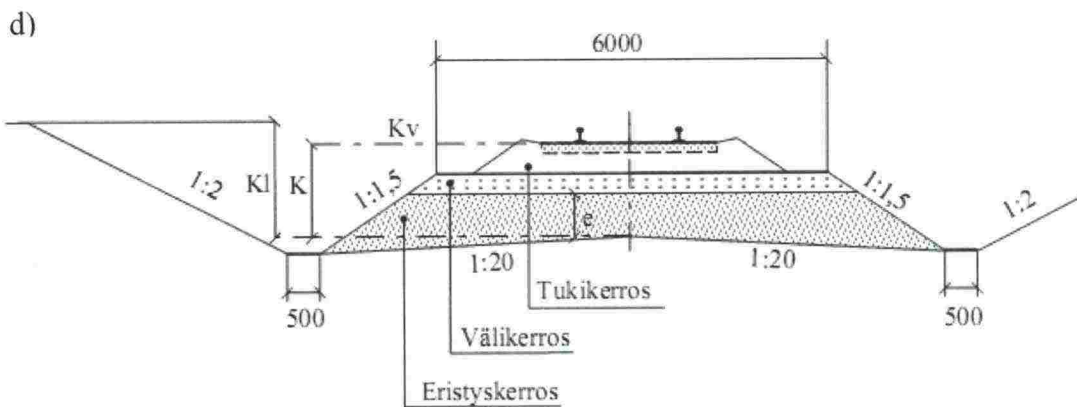
Alusrakenteen nykyinen kestoikävaatimus on 100 vuotta (Ratahallintokeskus 2005b). Pitkään jatkuvan kuormituksen alla varsinkin heikkolaatuinen kiviaines murenee (Nurmikolu 2006). Nykyisen kaltaisia laatuvaatimuksia ei ollut käytettävän materiaalin rakeisuudelle tai laadulle 1800-luvun lopulla ja 1900-luvun alussa, jolloin pääosa rataverkkomme alusrakenteista on alunperin rakennettu.

2.3.2 Radan rakenne ja materiaalivaatimukset

Päällysrakenne

Jo rakennettaessa ensimmäisiä ratoja 1800-luvun lopulla käytössä oli useita normaali-poikkileikkauksia. Tuolloin tunnetut ns. raskaat rakenteet muistuttavat vuonna 1924 hyväksytyjä rakenteita, joissa raidesorapaksuus oli 0,50 m (kuva 2.14a). Lisäksi oli käytössä ns. kevennetty rakenne, jossa raidesoran paksuus vaihteli 0,30–0,45 m välillä. (Rautatiehallitus 1916.) Vielä 1900-luvun alussa rata ohjeistettiin rakentamaan noin 0,5 m paksun raidesoran päälle ilman erillisiä alusrakennekerroksia. Vuonna 1928 ryhdyttiin käyttämään 0,6 m raidesorapaksuutta. (Rautatiehallitus 1937.)





Kuva 2.14. Vuodesta 1924 asti voimassa ollut normaalipoikkileikkaus maaleikkauksessa (a) (Lehtola 1952), normaalipoikkileikkaus 1950-luvulla sepeliä käytettäessä (b) (Lehtola 1952), normaalipoikkileikkaus vuodelta 1960 (c) (Rautatiehallitus 1962) sekä yksi nykyään käytössä olevista normaalipoikkileikkauksista (d) (Ratahallintokeskus 2005b).

Vuosina 1912–23 raidesoravallin leveys oli 3,5 m (Rautatiehallitus 1937). Vuonna 1924 siirryttiin 3,4 m leveyteen (kuvassa 2.14a) (Lehtola 1952). Vuoden 1924 normaali-poikkileikkaukset olivat voimassa aina 1960-luvulle asti pienin muutoksin, jotka koskivat raidesorakerroksen paksuutta. Väli- ja eristyskerroksen sisältävät rakenteet otettiin käyttöön 1960-luvulla (kuva 2.14c).

Vuoden 1924 poikkileikkauksen mukaisissa rakenteissa raidesorana ohjeistettiin käyttämään parasta karkeaa soraa erityisesti vaihteiden alla, tasoristeysten kohdalla ja pehmeissä leikkauksissa. Rakentamisessa kiellettiin käyttämästä savi- tai multapitoista soraa. (Rautatiehallitus 1937.) Jos penkereeseen käytettiin erilaisia maalajeja, ne tuli levittää tasaisesti penkereeseen (Rautatiehallitus 1937; Lehtola 1952).

Vuonna 1909 annettujen määräysten mukaan leikkausta syvennettiin savimailla routahaittojen vähentämiseksi 0,3 m normaalin leikkaustason alapuolelle. Vuonna 1924 poistettiin ohje leikkauksen syventämisestä 0,3 m:llä ja korvattiin se 0,1 m:n syvennyksellä, joka tuli luiskata siirtymäkiilatyypisesti 30 m matkalla pituussuunnassa leikkauksesta penkereelle siirryttäessä ja päinvastoin. (Rautatiehallitus 1937.)

Routimista pyrittiin ehkäisemään myös kohottamalla korkeusviivaa, lisäämällä raidesorakerroksen paksuutta, ojittamalla tai vaihtamalla radan rakenteen routivia maalajeja vähemmän routiviin. Routiva maa voitiin korvata routimattomalla maalla 3,5–5,0 m:n leveydeltä ja 0,5–1,0 m syvyydeltä. (Lehtola 1952.) Vuonna 1939 määrättiin raidesorakerroksen paksuudeksi routivilla mailla 0,8 m (Rautatiehallitus 1962). Lehtolan (1952) Rautatienrakennusopin mukaan saattoi joskus olla jopa edullista edistää routimista vaihtamalla maalaatuja lyhyellä radan osalla, joka ei jäätyessään kohonnut yhdenmukaisesti muun osan kanssa. Näin vältettiin suurien routanousuerojen muodostumista. Jo 1950-luvulla huomattiin, että routahaittoja ei saatu poistettua näilläkään ohjeilla ja 50-luvun puolivälissä alettiin käyttää poikkeavia raidesorakerroksen paksuuksia. (Rautatiehallitus 1962.)

Raidesepeliä alettiin käyttää 1930-luvulla tunneleissa sen pölyämättömyyden vuoksi sekä Helsinki–Turku-radan oikaisuisissa. Ensimmäinen sepelöidyn raiteen normaali-poikkileikkaus otettiin käyttöön vuonna 1935 ja oli vaatimuksiltaan vastaava kuin kuvassa 2.14b. Raidesepelin rakeisuusvaatimus oli tuolloin 30–60 mm. (Rautatiehallitus 1937.) Laajamittaisempi ratojen sepelöiminen aloitettiin vuonna 1951. Sepelöidyn raiteen tuolloinen normaalipoikkileikkaus on esitetty kuvassa 2.14b. Rakenteen paksuus oli 0,5 m, josta 350 mm oli sepeliä ja sen alla 150 mm:n kerros soraa. Vuoden 1961 loppuun mennessä oli sepelöity 1520 km rataa. Raidesepelin käyttöön siirryttiin, koska raidesora ei antanut riittävän tukevaa alustaa siirryttäessä suurempiin akselipainoihin ja nopeuksiin. (Rautatiehallitus 1962.)

Väli- ja eristyskerros

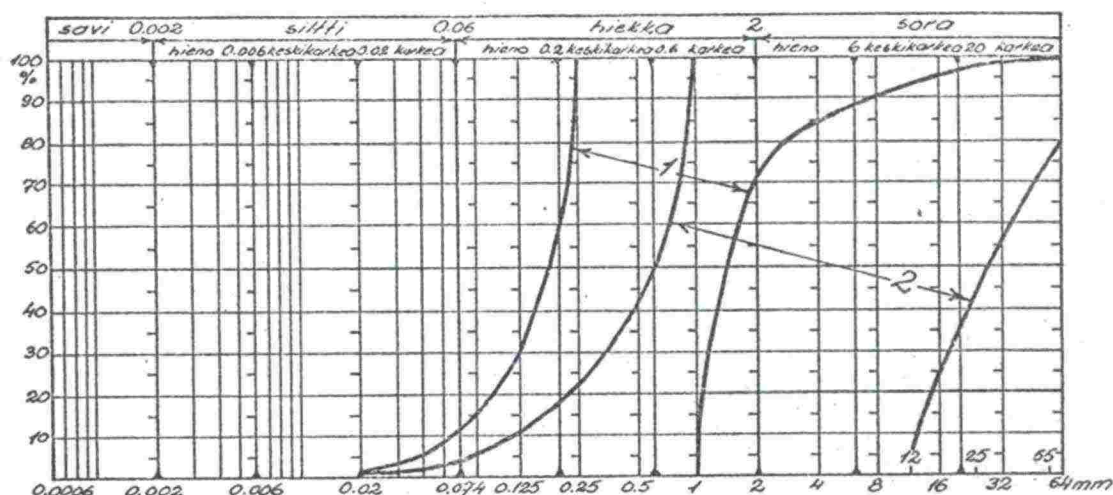
Uudet normaalipoikkileikkausprofiilit otettiin käyttöön 1960-luvulla. Siihen asti olivat voimassa profiilit vuodelta 1924. Ennen 1960-lukua laadittiin erillisiä maarakennustyöohjeita, joissa annettiin ohjeita epätasaisen routanousun poistamiseksi. Vuonna 1960 käyttöön otetut normaalipoikkileikkaukset (kuva 2.14c) poikkesivat huomattavasti siihen asti voimassa olleista ja radan rakenne tuli käsittämään tuki-, väli- ja eristyskerrokset. Aiempien 0,50 m ja 0,60 m paksuisten raidesorakerrosten sijaan käyttöön tulivat 0,60; 0,80; 1,00 ja 1,20 m paksuiset rakennekerrokset, jotka sisälsivät tukikerroksen ja alusrakenteen. (Rautatiehallitus 1962.) Vertailun vuoksi kuvassa 2.14d on esitetty myös yksi nykyisistä tyyppipoikkileikkauksista.

Vuonna 1960 käyttöön otetuissa poikkileikkauksissa yksiraiteisen radan alusrakenteen leveys oli 5,4 m ja kaksiraiteisen 9,5 m. Normaalipoikkileikkaukseen palautettiin myös 1880-luvulla viimeksi käytetty jätkänpolku, joka oli kadonnut tyyppirakenteista tukikerroksen vähitellen leventyessä. (Rautatiehallitus 1962.) Vuonna 1968 vaatimus alusrakenteen leveydelle oli yksiraiteisilla jatkuvakiskoraiteilla 6,0 m ja kaksiraiteisilla radoilla 10,1–10,2 m. Samaan aikaan vaatimus lyhytkiskoraiteen alusrakenteen leveydelle oli 5,4 m ja kaksiraiteisilla radoilla 9,5–9,7 m. (Valtionrautatiet 1968.)

Rautatiehallitus ohjeisti 1960-luvulla käyttämään rakennekerrosten alla penkereen yläosassa korkeusviivasta 1,2–1,8 m:n syvyyteen vain routimatonta pengertäytettä. Eristyskerroksessa tuli käyttää routimatonta hiekkaa tai soraa, josta on poistettu 100–200 mm suuremmat kivet. (Keinonen 1964.) Keinonen (1964) viittaa jo 1960-luvulla määriteltyihin vaatimuksiin väli- ja eristyskerroksissa käytettäville materiaaleille, mutta tarkempaa tietoa näistä vaatimuksista ei ollut lähdemateriaalissa.

Luonnollisista maalajeista rakennettavan välikerroksen materiaalivaatimukset eivät ole muuttuneet vuodesta 1970 nykypäivään. Rautatien maarakennustöiden yleisessä työselityksessä vuodelta 1970 ja vuodelta 1978 peräisin olevassa RATO 11:ssä rakeisuuden ohjealue on sama kuin kuvan 2.2 mukainen nykyinen ohjealue. Välikerroksen materiaalin tuli olla routimatonta sekarakeista soraa, hiekkaa tai murskaustuotetta, jonka maksimiraekoko oli 100 mm.

Rautatiehallituksen (1970) ohjeistuksen mukaan eristyskerrosmateriaalin tuli olla kuvan 2.15 mukaista hiekkaa tai soraa. Materiaalin kapillaarisuuden vaadittiin olevan alle 0,7 m. Kerroksen alaosa oli tehtävä mahdollisimman hienorakeisesta ohjealueelle kuuluvasta aineksesta ja yläosa karkearakeisemmasta aineksesta, jonka maksimiraekoko oli 150 mm.



Kuva 2.15. Eristyskerroksen rakeisuusvaatimukset vuodelta 1970. Alueen 1 materiaalia käytettiin eristyskerroksen alaosaan ja alueen 2 materiaalia yläosaan (Rautatiehallitus 1970).

Eristyskerroksen materiaalivaatimukset ovat muuttuneet 70-luvulta. Nykyään eristyskerroksen alaosan materiaalille sallittava 0,25–1 mm rakeisuusalueelle sijoittuva materiaalin osuus on huomattavasti pienempi. Myöskään eristyskerroksen yläosassa ei käytetä enää niin hienorakeista materiaalia kuin aiemmin.

2.3.3 Ratojen perusparannus

Ratoja perusparannettiin aktiivisesti 1950- ja 1960-luvuilla. Perusparannus kohdistui sekä päällystettä alusrakenteeseen. (Myyrä 1973.) Tukikerroksen sepelöinnin yhteydessä suoritettiin korkeusviivaa kohottava sorastus, jolla rata pyrittiin saamaan routimattomaksi. Muidenkin radanparannustöiden, kuten kiskonvaihdon tai kaksoisraiteen rakentamisen yhteydessä pyrittiin poistamaan routahaittoja mm. poistamalla routivat maalajit ja korvaamaan ne ohjeiden mukaisilla hiekka- ja sorakerroksilla, parantamalla radan kuivatusta ja rakentamalla siirtymäkiiloja. (Rautatiehallitus 1962.)

Alusrakenteen perusparannuksen ensisijaisena tavoitteena oli vakavuuden parantaminen ja routahaittojen poisto. Myös kuivatuksen järjestäminen oli olennainen osa perusparannusta. Routahaittoja alettiin järjestelmällisesti poistaa 1960-luvun alussa. Liikenteen asettamat vaatimukset kuitenkin nousivat nopeasti ja vuosikymmenen alkupuolella perusparannettuja ratoja perusparannettiin uudelleen 1960-luvun lopussa. (Myyrä 1973.)

Perusparannuspäätökset tehtiin aiempien vuosien kiilaustietojen perusteella (Myyrä 1973). Kiilauksella pienennetään radan pituussuuntaisia epätasaisuuksia ja kallistus-

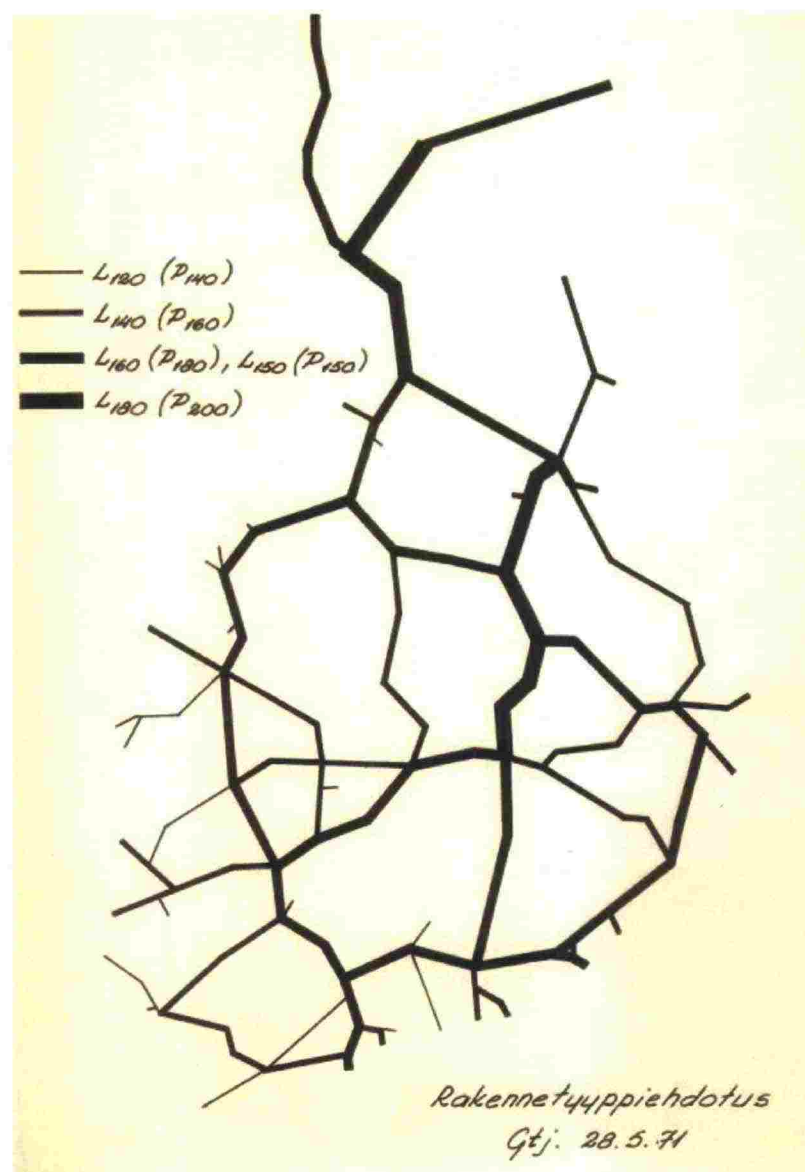
virheitä (Ratahallintokeskus 2002). Toimenpiteiden suunnitteluun kuului myös rakennekerrosten ja pohjamaan laadun ja paksuuden määrittäminen. Maanäytteiden laatu todettiin silmämääräisen tarkastelun perusteella.

Rataverkolla tehtyjen roudan syvyyden tutkimusten perusteella oli päätelty, että kerran kymmenessä vuodessa routa tunkeutuu noin 1,5–1,7 m:n syvyyteen Etelä-Suomessa ja 2,2–2,5 m:n syvyyteen Pohjois-Suomessa. Useimmissa tutkituissa kohteissa routa tunkeutui routivan maan rajan alapuolelle. (Myyrä 1973). Oriveden ja Jämsänkosken välisellä rataosuudella tehtiin routanousututkimuksia vuonna 1953 O.A. Taivaisen toimesta. Pohjamaasta riippuen routanousumittausten tuloksena todettiin hietamaassa 58 mm, hiesumaassa 100–125 mm ja hiekkaisessa hiedassa 113 mm routanousut. (Taivainen 1961.) Tutkimusta Oriveden–Jämsänkosken radan Jämsän puoleisessa päässä jatkettiin vuosina 1956–57. Talvi oli tavanomaista kylmempi ja pakkasmäärä oli Jämsässä Ilmatieteellisen keskuslaitoksen ilmoittamien kuukausikeskilämpötilojen mukaan noin 37000 h°C. Routanousumittauksia tehtiin 1400 m:n matkalla. Noin 30 prosentilla ratapituudesta routanousu oli alle 20 mm, 25 prosentilla 40–80 mm ja yli 100 mm routanousuja havaittiin noin 30 prosentilla. Routivimmat kohteet olivat leikkauksia. Routanousuista aiheutui korkeuseroja kallio- ja maaleikkausten rajakohdissa, penkereiden ja leikkausten rajakohdissa ja leikkauksissa maalajien muutoskohdissa. Routanousujen arvioitiin johtuvan pääosin pohjamaasta, jonka routimista liian ohut raidesorakerros ei estänyt. (Taivainen 1956.)

Ratojen perusparannuksessa 1950- ja 1960-luvuilla ratoja mitoitettiin eri tavoin kunkin rataosan liikenteen mukaan. Mitoituksessa ei lähdetty siitä, että kaikkien ratojen tulisi olla routimattomia ankarinakin talvina. Nopean pikajunaliikenteen radat tuli mitoitaa routimattomiksi sellaiselle suurimmalle pakkasmäärälle, joka toistuu keskimäärin kerran 20–50 vuodessa. Liikenteellisesti tärkeät tavarajunareitit mitoitettiin suurimmalle pakkasmäärälle, joka toistuu keskimäärin kerran 5–10 vuodessa ja vähäliikenteiset radat keskimäärin kerran 2–5 vuodessa toistuvalla pakkasmäärälle. (Myyrä 1973.)

Käytetyin alusrakenteen perusparannustapa oli radan nosto soralla tai hiekalla. Näin saatiin myös rataprofiili suunniteltua uudelleen. Korkeusviiva suunniteltiin siten, että noston jälkeen routimattomien aineiden paksuus vastasi radalla sitä rakennetyyppiä (esimerkiksi kuvassa 2.14c), joka kyseiselle radalle oli hyväksytty käytettäväksi. (Myyrä 1973.) Pääradat perusparannettiin rakennetyyppien L₁₂₀ ja P₁₂₀ mukaisiksi eli rakennekerroksien kokonaispaksuudeksi tuli 1,2 m sekä leikkauksissa (L₁₂₀) että penkereellä (P₁₂₀) (Myyrä 1970). Nostoon käytettiin kuvien 2.2 ja 2.15 rakeisuusvaatimusten mukaisia materiaaleja riippuen siitä, mihin materiaali rata-rakenteessa sijoittui. Nostojen lisäksi radan alusrakenteen perusparannusta tehtiin myös massanvaihoilla, joissa routiva maa vaihdettiin routimattomaan aina rakennetyyppiä vastaavaan syvyyteen asti. Kuivatusta ei ulotettu radan eristyskerrokseen, sillä sen kuivatusta ei vaadittu. Kuivatus ulotettiin molemmissa perusparannustavoissa 0,95 m:n syvyyteen korkeusviivasta. Tällä katsottiin olevan edullinen vaikutus, koska routa ei veden jäätyislämmön johdosta tunkeutunut kyllästetyn eristyskerroksen läpi niin syväälle kuin kuivan eristyskerroksen läpi. (Myyrä 1973.) Junien nopeudet nousivat ja raiteen tasaisuuden vaatimukset tiukentuivat ja jo 1970-luvulla todettiin, että perusparannuksessa tuli pyrkiä 1,6 metrin rakennekerrospaksuuteen tai ottaa käyttöön muita menetelmiä roudan eristämiseen (Myyrä 1970). Vuonna 1971 suunnitellut rakennekerrospaksuudet olivat kuvan 2.16 mukaiset. Suunniteltuja rakennekerrospaksuuksia

pyrittiin noudattamaan 1970–1980 lukujen perusparannustöissä. Kuvan 2.16 rakennepaksuuksista on tingitty eristelevyjen käytön yhteydessä. (Suomalainen 2008). Eristelevyjen käyttö aloitettiin Suomessa vuonna 1970. (Myyrä 1973.)



Kuva 2.16. Rataverkolle vuonna 1971 suunnitellut rakennepaksuudet (cm), joita pyrittiin noudattamaan 1970–1980 lukujen perusparannustöissä (Myyrä 1970).

2.3.4 Aiemman rakentamisen vaikutus nykyiseen alusrakenteeseen

Tultaessa 1860-luvulta nykypäivään radan alusrakennetta on rakennettu monin eri tavoin ja erilaisin rakentein. Tämän seurauksena alusrakenteessa on erilaisia materiaaleja eri aikakausilta, koska uudet rakenteet on rakennettu yleensä vanhojen päälle. Tarkempia laatuvaatimuksia materiaaleille on ollut käytössä vasta 1960-luvulta lähtien.

Alusrakenteen muutoksen suunta on yleensä ollut leveämmäksi ja paksummaksi. Tästä johtuen alkuperäiset raidesorakerrokset voivat olla useiden kymmenien senttien syvyydessä nykyisen raidesepelin alla. Jos alusrakennetta on levennetty tasaisesti molemmin puolin, on sivuilla vain myöhemmin lisättyä eristys- ja välikerrosmateriaalia. Jos alusrakennetta on sen sijaan levennetty vain toiselta reunalta, materiaali vaihtuu nykyisen raiteen alla toiseksi. Saattaa myös olla, että raidesorakerros on levitetty uuden rakenteen levyiseksi ennen rakentamista. Mitään säännönmukaista tapaa ei vanhan ratarakenteen uusimiseen ole ollut (Suomalainen 2007b).

Materiaalin vaihtelut ratarakenteessa johtavat epätasaiseen routanousuun, jos jokin käytetty materiaali on routimisherkkää. Erityisesti eri materiaalien rajapinnat pituus- ja poikkisuunnassa voivat aiheuttaa epätasaista routanousua.

Aikanaan rakennetut kuivatusjärjestelyt, joissa koko rakennetta ei kuivata, mahdollistavat osaltaan rakenteen routimisen. Saatavilla oleva vesi on yksi routimisen edellytyksistä.

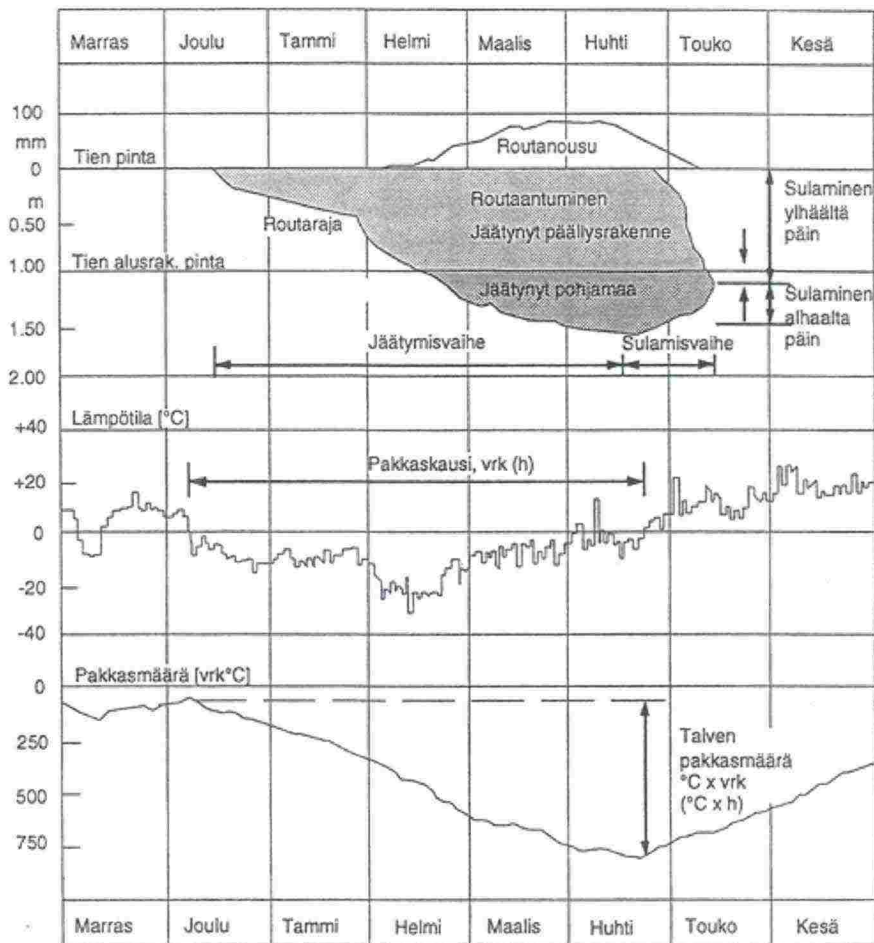
3 ROUTA RATARAKENTEESSA

3.1 Routimisilmiö

3.3.1 Routaan liittyviä käsitteitä

Routaantumisella tarkoitetaan maan jääymistä ja jäätyminen etenemistä syvemmälle maaperään. Huokosveden jäätyessä maan katsotaan routaantuvan. Routiminen taas on sellaista maan jääymistä, jonka seurauksen maan tilavuus kasvaa ja tapahtuu routa-nousua. Kaikki maalajit routaantuvat, mutta vain osa maalajeista routii. (Ehrola 1996, Rantamäki et al. 1979.)

Routaraja on jäätyneen ja sulan maan raja kyseisellä hetkellä ja sillä kuvataan myös maan jäätyneen etenemistä. Pakkasmäärällä tarkoitetaan pakkaskauden vuorokausien tai tuntien keskilämpötilojen summaa ja sitä käytetään kuvaamaan talven pituutta ja ankaruutta. Pakkasmäärä on tärkein routaantumiseen vaikuttava ulkoinen tekijä. Routan sulaminen on jäätyneen maan sulamista keväisin lämpötilan noustessa. Se tapahtuu pääosin maanpinnan suunnasta alkaen, mutta myös routarajan suunnasta maalämmöstä johtuen. (Ehrola 1996.) Routaan liittyviä peruskäsitteitä on esitetty kuvassa 3.1.



Kuva 3.1. Routaan liittyviä peruskäsitteitä (Ehrola 1996).

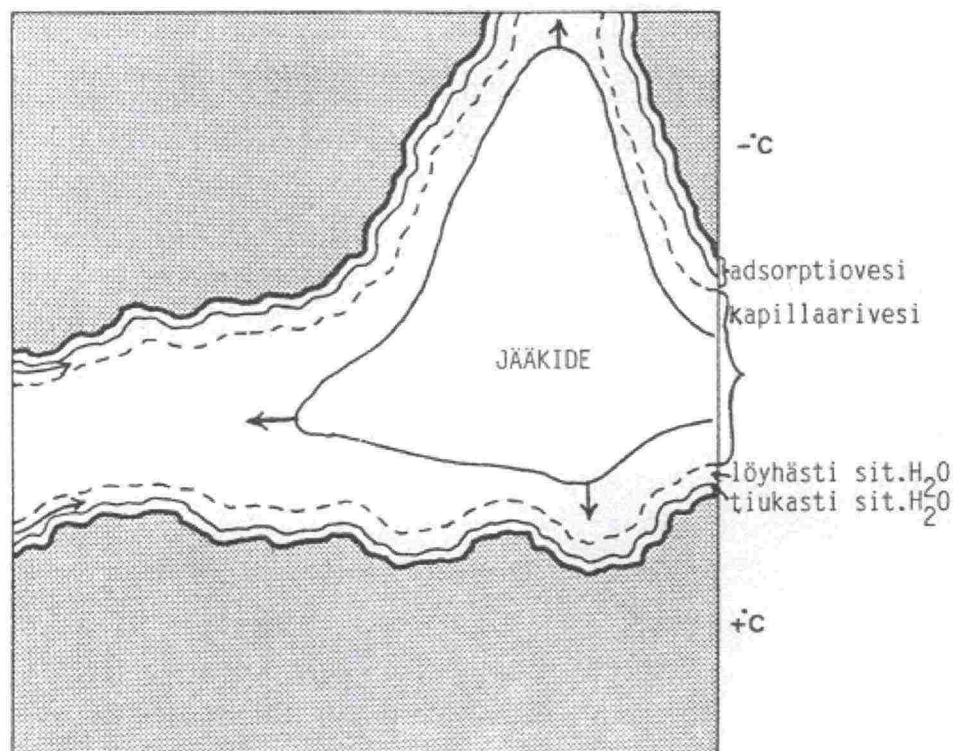
3.3.2 *Maan sisältämä vesi ja sen jäätyminen*

Maassa oleva vesi on yksi routimisen edellytyksistä. Kun veden saatavuus maaperässä vaikeutuu ja hidastuu, routanousu vähenee ja loppuu lopulta kokonaan ellei uutta lähdettä vedelle löydy. Vettä esiintyy maassa sekä vapaana että sitoutuneena. Vapaata vettä kutsutaan gravitaatiovedeksi ja se liikkuu maassa painovoiman alaisena (Rantamäki et al. 1979). Sitoutunut vesi on maan sisältämissä huokosissa maapartikkeleiden pinnalle kiinnittynyttä vettä. Sitoutunutta vettä esiintyy adsorptiovetenä, kapillaarivetenä ja kemiallisesti sitoutuneena. (Aittomäki 1986.)

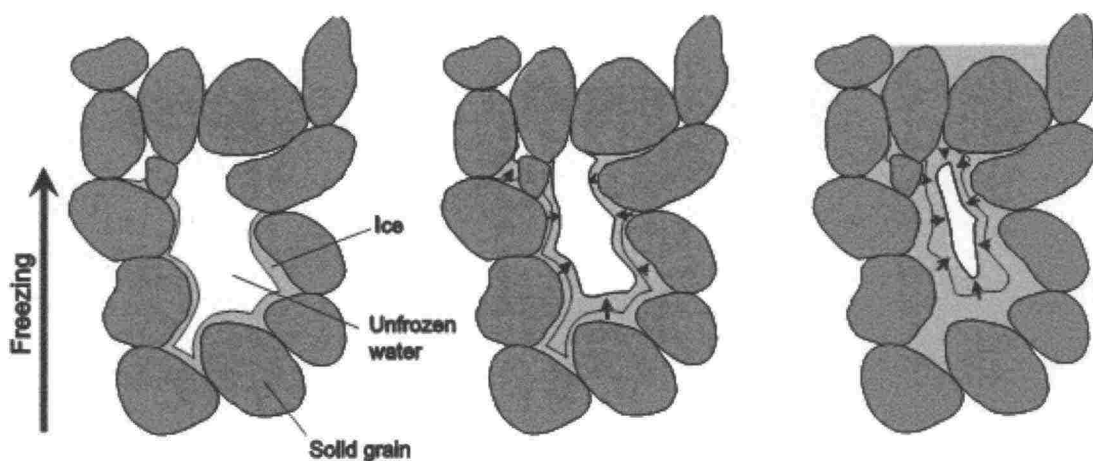
Kemiallisesti sitoutunut vesi on osa aineen kiinteää rakennetta, kuten kidevesi, eikä se poistu sidoksesta normaaleissa olosuhteissa. Adsorptiossa vesi tarttuu kiinteän aineen pintaan polaarisen ominaisuutensa vuoksi. Adsorption voimakkuus eli sidosenergia riippuu kiinteän aineen pinnan ominaisuuksista ja mineraalien varauksesta. Kapillaarinen sitoutuminen perustuu veden ja partikkelin pinnan väliseen adheesioon sekä pintajännitykseen. Adheesio pyrkii vetämään nesteen molekyylejä kiinteän aineen pintaan ja pintajännitys pyrkii estämään nesteen hajaantumisen. Seurauksena on voimatasapaino, jonka vaikutuksesta neste nousee ylöspäin. Raja-alueilla kapillaarista sitoutumista ja adsorptiositoutumista on vaikea erottaa toisistaan. (Aittomäki 1986.)

Maan huokosissa esiintyvän veden jäätyminen riippuu siitä, kuinka voimakkaasti vesi on sitoutunut. Vesi jäätyy sitä vaikeammin, mitä kovemmin se on sitoutunut. Kaikki vesi ei siis jäädy 0 °C:n lämpötilassa. Helpommin jäätyy sitoutumaton vesi, joka on suurissa huokosissa ja lujasti sitoutunut adsorptiovesi pysyy sulana vielä 0 °C:ssa (kuva 3.2). (Aittomäki 1986.)

Arensonin ja Segon (2006) mukaan kyllästetyssä karkearakeisessa maa-aineksessa veden lämmönjohtavuus on pienempi kuin maapartikkelien, joten maa-aines jäähtyy nopeammin kuin vesi ja jään muodostus alkaa maapartikkeleista (kuva 3.3). Hienorakeisissa maalajeissa puolestaan jään muodostus alkaa huokosten keskeltä ja sitoutunut sula vesi on maapartikkeleiden ympärillä (kuva 3.2). Karkearakeisten partikkeleiden pinnalle ei siis jää alle 0 °C:n lämpötilassa sulana pysyvää vesikerrosta.



Kuva 3.2. Veden jäätyminen hienorakeisessa maa-aineksessa (Nieminen 1985).



Kuva 3.3. Veden jäätyminen eteneminen vedellä kyllästetyssä karkearakeisessa maa-aineksessa (Arenson & Sego 2006).

3.1.3 Routiminen

Maan routiminen on seurausta seuraavien tekijöiden yhteisvaikutuksesta: routiva maa-aines, veden saatavuus jäätymisvyöhykkeessä ja alle 0 °C:n laskeva lämpötila. Mikäli jokin näistä edellytyksistä ei toteudu, routimista ei tapahdu tai se on vähäistä. (ISSMFE 1989, Ehrola 1996.)

Roudan nopea eteneminen pienentää routimista. Pitkään paikallaan pysyvä routaraja mahdollistaa jäälinsien kasvun, mutta routarajan edetessä nopeasti jäälinsien kasvumahdollisuus jää lyhyeksi ja linssi ohueksi. Roudan etenemisnopeus riippuu pakkasen kovuudesta. (Ehrola 1996.)

3.1.4 Segregaatiopotentiaali ja routimiskerroin

Segregaatiopotentiaaliteorian mukaan jäälinsien muodostuminen jäätymisvyöhykkeen yläpuolella (kuva 3.4) alkaa, kun jäätymisvyöhykkeen yläreuna saavuttaa segregaatiolämpötilan. Vyöhykkeessä muodostuu maahan alipaine, joka kasvaa lämpötilan laskiessa. Tämä alipainegradientti kuljettaa vettä sulista maakerroksista jäätymisvyöhykkeeseen ja vesi kasvattaa vyöhykkeen yläpuolelle syntynyttä jäälinsiiä. Alipaine on riippuvainen maalajin ominaisuuksista ja on suurempi hienorakeisissa maalajeissa. (Ehrola 1996.)

Segregaatiopotentiaaliteorian mukaan veden virtausnopeus (v) jäälinsien muodostumistasolle on suoraan verrannollinen jäätymisvyöhykkeen lämpötilagradienttiin ($grad\ T$) (Nurmikolu 2006). Jäälinsien kasvu loppuu, kun jäätymisvyöhykkeen yläpuolinen paine kasvaa alipainetta suuremmaksi ja vettä ei enää kulkeudu jäälinsiiin. Kun maan jäätyminen etenee, muodostuu uusi jäätymisvyöhyke edellisen alle. Segregaatiopotentiaali kuvaa maan routaantumisominaisuuksia ja se vaihtelee maalajin ja ulkoisen kuormituksen mukaan. Segregaatiopotentiaali voidaan määrittää routanousukokeella. Mitä pienempi arvo segregaatiopotentiaalilla on, sitä vähemmän maalaji routii. (Ehrola 1996.)

Routimiskerroin SP eroaa segregaatiopotentiaalista siinä, että routimiskerrointa määritettäessä v kaavassa 3-1 ilmentää routanousunopeutta eikä veden virtausnopeutta routimisyöhykkeeseen, kuten segregaatiopotentiaalia määritettäessä. Segregaatiopotentiaaliin ei siten sisälly veden jäätymisessä tapahtuvaa 9 % tilavuuden kasvua toisin kuin routimiskertoimeen. Täten täysin tai lähes vedellä kyllästetyn materiaalin sisältämän veden jäätyminen aiheuttama routanousu tulee huomioiduksi routimiskertoimessa mutta ei segregaatiopotentiaalissa. Toisena periaatteellisena erona routimiskertoimen ja segregaatiopotentiaalimäärittämisessä on se, että segregaatiopotentiaalia määritettäessä tarkastellaan lämpötilagradienttia osittain jäätyneessä vyöhykkeessä eikä yhtälön 3-1 mukaan koko jäätyneessä kerroksessa. (Nurmikolu 2006.)

$$SP = \frac{v}{gradT} = \frac{\Delta h \cdot Z}{\Delta t \cdot (0 - T_{yläp})}, \text{ jossa} \quad (3-1)$$

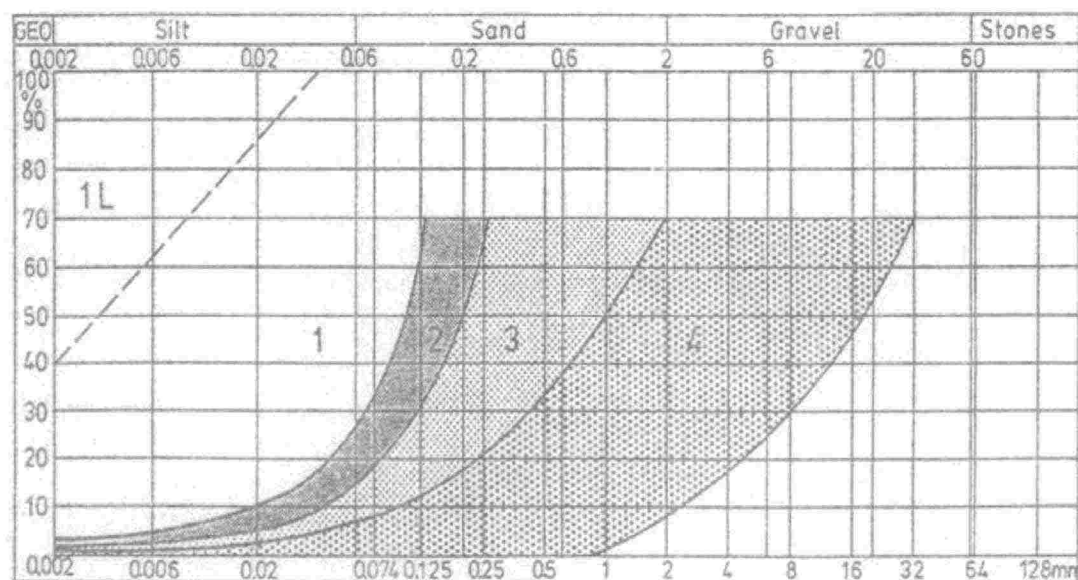
- SP on routimiskerroin (mm^2/Kh)
 v on routanousunopeus (mm/h)
 $gradT$ on jäätyneen maakerroksen keskimääräinen lämpötilagradientti (K/mm)
 Δh on routanousun lisäys aikavälillä Δt (mm)
 Δt on aikaväli (h)
 Z on jäätyneen maakerroksen korkeus eli roudan syvyys (mm)
 $T_{yläp}$ on maanpinnan lämpötila ($^{\circ}\text{C}$)

3.2 Routivuuden arviointi

3.2.1 Rakeisuus

Maan routivuuteen vaikuttaa ensisijaisesti hienoaineksen määrä. Routimisen kannalta oleellista on alle 0,002 mm ja 0,02 mm raekoon omaava aines. (ISSMFE 1989.)

Routivuuden arviointiin voidaan ISSMFE:n mukaan käyttää kuvan 3.5 mukaisia rakeisuuskäyriä. Alueen 1 rakeisuusalueelle sijoittuvat maalajit ovat routivia. Mikäli rakeisuuskäyrä sijoittuu alueille 2, 3 tai 4, materiaali on routimaton. Alueelle 2 sijoittuvilla materiaaleilla pitää tutkia myös kapillaarisuus. Jos alueille 2, 3 tai 4 sijoittuvan rakeisuuskäyrän alaosa ylittää rajan hienomman materiaalin puolelle, materiaali on routivaa. Alueelle 1L sijoittuva materiaali on lievästi routivaa. Materiaali luokitellaan routimattomaksi, mikäli se kuvan 3.5 alueille 2, 3 tai 4 sijoituessaan täyttää taulukon 3.1 mukaiset rajat. (ISSMFE 1989.)



Kuva 3.5. ISSMFE:n (1989) mukainen rakeisuuteen perustuva routivuuden arviointikriteeri. Materiaali on routivaa, jos sen rakeisuuskäyrä kulkee alueella 1, tai jos alueille 2, 3 tai 4 sijoittuvan rakeisuuskäyrän alaosa ylittää rajan hienomman materiaalin puolelle.

Taulukko 3.1. Kuvan 3.5 rakeisuusalueiden hienoaineslajitteiden osuudet materiaalin ollessa routimaton (ISSMFE 1989).

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

Kuvan 3.5 ja taulukon 3.1 mukainen routivuusluokitus on vain yksi monista rakeisuuteen pohjautuvista luokituksista, joita kirjallisuudessa on esitetty. Nurmikolu (2006) havaitsi laboratoriokokeissa kuvan 3.5 pohjalta routimattomiksi luokiteltavissa materiaaleissa selvää routanousua. Hän ehdotti ratarakenteiden materiaaleille sovellettavaksi ”käytännöllisen routimattomuuden rajaa”. Ehdotetulla rajalla olevissa materiaaleissa alle 0,02 mm aineksen osuus oli keskimäärin 1,5 %, mikä on puolet taulukon 3.1 mukaisessa luokittelussa rakeisuusaluella 4 sallitusta alle 0,02 mm aineksen osuudesta.

3.2.2 Muut routivuutta kuvaavat ominaisuudet

Materiaalin routimisherkkyteen vaikuttavat monet muutkin tekijät kuin rakeisuus. Rakeisuuden määrittämisellä saatua tulosta materiaalin routimisherkkydestä voidaan tarkentaa määrittämällä muita ominaisuuksia, joita on lyhyesti esitelty seuraavassa.

Konsistenssiominaisuudet kuvaavat maa-aineksen olomuodon ja vesipitoisuuden välisiä riippuvuuksia ja ovat yhteydessä hienoainespitoisuuteen ja mineralogiseen koostumukseen. Tätä kautta niillä on vaikutusta myös routivuuteen. (Ehrola 1996.)

Huokostilavuudella on suuri vaikutus maa-aineksen ominaisuuksiin. Huokostilavuus vaihtelee mm. raekoostumuksen ja mineraaliaineksen mukaan. Huokostilavuuden vaikutus riippuu huokoskokojakaumasta eli siitä, minkä kokoisista huokosista tilavuus muodostuu. Vedenläpäisevyys kasvaa suurissa huokosissa ja laskee huokosten pienetessä. Pieni huokoskoko kasvattaa kapillaarista nousukorkeutta ja isot huokokset alentavat sitä. (Nieminen 1985.)

Ominaispinta-ala tarkoittaa maahiukkasten muodostamaa kokonaispinta-alaa tietyssä maamassassa. Se on yhteydessä maan hienoainemäärään ja maarakeiden muotoon ja tätä kautta maan routivuuteen. (Ehrola 1996.) Ominaispinta-alaan vaikuttaa mineraalien rapautuneisuus. Ominaispinta-ala säätelee rakeiden pinnalle **adsorpoituvan veden** määrää. (Nieminen 1985.)

Hienoustekijä on rakeisuuden ja juoksurajan muodostama yhdistelmä kaavan 3-2 mukaisesti (Ehrola 1996). Hienoustekijää voidaan pitää hienorakeisen aineksen luokitusominaisuutena, joka ottaa epäsuorasti huomioon ominaispinta-alaan ja mineralogiaan liittyviä tekijöitä (Nurmikolu 2004). ISSMFE (1989) ehdottaa routivuusluokituksessa Vinson et al. (1987) mukaisesti, että materiaali, jonka hienoustekijä on alle 2,5, luokitellaan routimattomaksi.

$$R_f = \frac{P_{0,002} \cdot P_{0,074} \cdot 100\%}{P_{0,5} \cdot W_L < (0,5\text{mm})}, \text{ jossa} \quad (3-2)$$

R_f	on hienoustekijä (%)
$P_{0,002}$	on savipitoisuus (%)
$P_{0,074}$	on läpäisyprosentti 0,074 mm seulalla
$P_{0,5}$	on läpäisyprosentti 0,5 mm seulalla
$W_L < (0,5\text{mm})$	on alle 0,5 mm maa-aineksen juoksuraja

Mineralogian vaikutus routivuuteen on epäsuora. Se vaikuttaa partikkelien vedensitomiskykyyn ominaispinta-alan ja varaustiheyden kautta. Routimisen kannalta olennaista on hienoaineksen mineralogia. (Nurmikolu 2004.)

Vedenpidätyskyky tarkoittaa vesipitoisuutta, jonka maalaji pystyy pidättämään tietyssä ulkoisessa paineessa. Sillä on yhteys maan kapillaarisuuteen ja tätä kautta maa-aineksen routivuuteen (Friberg ja Slunga 1989 Ehrolan 1996 mukaan). **Imupaineominaisuudet** vaikuttavat maamateriaalin vedensitomiskykyyn, kyllästysasteen saavuttamiseen ja sen pysyvyyteen.

Vedenläpäisevyyden ollessa pieni rajoittuu veden virtaus sulana olevista maakerroksista ja routiminen vähenee. Toisaalta karkearakeisilla maalajeilla vedenläpäisevyys on suuri, eikä jäätymisvyöhykkeeseen muodostu veden imeytymisen aikaansaavaa alipainetta. Veden virtaus jäätymistasolla riippuu täten alipaineen ja vedenläpäisevyyden yhteisvaikutuksesta. Käytännössä routivimmat maalajit ovat usein silttimaalajeja. (Ehrola 1996.)

Kapillaarista nousukorkeutta on käytetty pitkään maan routivuuden arvioimiseen. Kapillaarisuus on yhteydessä raekokoon ja sen vaikutus routimiseen palautuu siis rakeisuuden ja huokoskokojakauman yhteyksiin. (Ehrola 1996.)

Jäätymättömänä pysyvä vesi alle 0 °C:ssa on edellytyksenä jäätymisvyöhykkeen syntymiselle ja perusta routimismekanismille (Ehrola 1996). Osa maapartikkeleihin sitoutuneesta vedestä on niin voimakkaasti sitoutunutta, ettei sen olomuoto muutu lämpötilan laskiessa. Jäätymätön vesikerros toimii vettä johtavana kerroksena, jota pitkin vesi virtaa kasvavaan jäälinssiin. Sulana pysyvän veden määrä riippuu voimakkaasti olosuhteista kuten lämpötilasta ja paineesta sekä maan fysikaalis-kemiallisista ominaisuuksista. (Kujala 1994.)

Routimista kuvaavia maalajiominaisuuksia on käsitelty tarkemmin Nurmikolun (2004) kirjallisuusselvityksessä.

3.2.3 *Routanousukokeet*

Arviot eri maalajiominaisuuksien vaikutuksesta routimisherkkyyteen perustuvat suurelta osin laboratoriossa tehtyihin routanousukokeisiin. Routanousukokeita on kolmea tyyppiä: vakiolämpötilakoe, vakioroutaantumisnopeuskoe ja koe, joka perustuu lämmön poistumiseen vakionopeudella. Vakiolämpötilakokeessa näytteen jäädyttämisessä käytetään yhtä tai useampaa portaittaista lämpötilan muutosta ja tuloksista määritetään segregaatiopotentiaali. Vakioroutaantumisnopeuskokeessa routimisherkkyyttä kuvataan routaantumisnopeuden aiheuttamalla routanousunopeudella. (Nurmikolu 2004.)

Routanousukokeille on monia erilaisia koejärjestelyjä. Yhtenäistettyjä menetelmiä ei tarpeesta huolimatta ole saatu aikaan. Koejärjestelyt poikkeavat toisistaan laitteiston, reunaehtojen ja näytteiden valmistelun suhteen. Kujalan (1991) luettelemia routanousukokeessa vaikuttavia tekijöitä Nurmikolun (2004) mukaan ovat mm. koe-laitteistossa näytteen ja koesellin välinen kitka, jäädytysuunta, sellin koko ja mittausjärjestelmä. Reunaehtoja, jotka poikkeavat toisistaan ovat kylmän ja lämpimän puolen lämpötilat, pintakuorma, vedenpinnan asema ja kokeen kesto. Näytteiden

valmisteluun liittyviä tekijöitä ovat puolestaan näytteen koko, maksimiraekoko, tiiviys, kosteuspitoisuus, kyllästysaste ja tiivistysmenetelmä.

Routanousukokeista saatujen tulosten vertailu on hankalaa, koska koejärjestelyt poikkeavat toisistaan. Kokeita voidaan pitää indeksikokeina, joissa voidaan vertailla eri materiaalien suhteellista routimisherkkyyttä. (Nurmikolu 2004.)

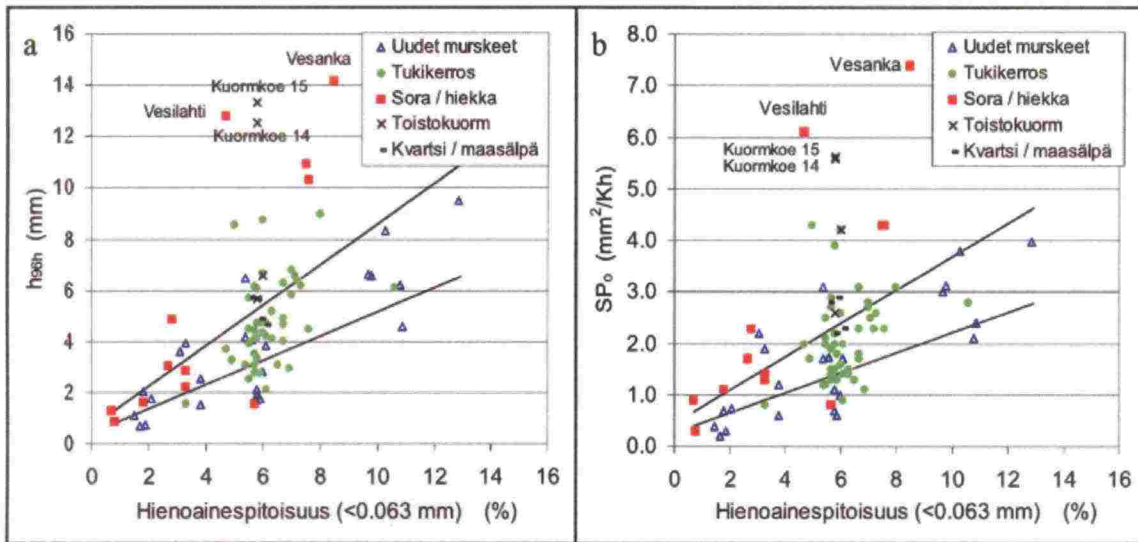
3.2.4 Karkearakeisten maalajien routivuus

Karkearakeisia maalajeja pidetään yleisesti routimattomina, kuten myös radan alusrakenteessa käytettyjä materiaaleja. Vedellä kyllästetyn tai lähes kyllästetyn maan jäätyessä voi kuitenkin tapahtua noin 9 %:n tilavuuden kasvu, mikä voi olla haitallista ottaen huomioon luvussa 3.3.1 esitetyt radan tasaisuusvaatimukset. Maan alun perin sisältämän huokosveden jääytymisestä aiheutuvaa routanousua kutsutaan in-situ routanousuksi. Radan rakenne on avoin ja pakkaskauden aikana leutojen jaksojen sulamis- ja sadevedet pääsevät täyttämään maan huokosia. (Nurmikolu 2004.) Näin ollen rakenteessa on usein vettä ja varsinkin silloin, kun ratarakenteen kuivatus toimii huonosti.

In-situ routanousun syntymisen edellytyksenä on, että routaantuminen tapahtuu suljetussa tilassa niin, ettei vesi pääse poistumaan jäätyvän veden puristamana sivuille tai alaspäin maan kokonaistilavuuden kasvamatta. Määritelmien (vrt. luku 3.1.1) nojalla in-situ routanousun johdosta myös routimaton materiaali voi tarkkaan ottaen routia jonkun verran. (Nurmikolun 2004.)

Useat routivuusluokitukset, kuten kuva 3.5, on tehty aikana, jolloin raiteen tasaisuudelle ei ollut vielä nykyisten liikennöintinopeuksien asettamia vaatimuksia. Luokitukset on myös tehty useimmiten tienrakennuksen näkökulmasta, jossa tasaisuudelle ei ole yhtä suuria vaatimuksia kuin rautateillä.

Nurmikolu (2006) totesi tutkimuksessaan, että routimisherkkyyys korreloi merkittävästi alle 0,02 mm lajitteen osuuden kanssa sekä kalliomurskeilla että luonnonmaalajeilla. Luonnonmaalajeilla havaittiin kuitenkin olevan huomattavasti hajontaa hienoainemäärän perusteella arvioidussa routimisherkkyydessä (kuva 3.6). Luonnonmaalajien tuhansien vuosien altistuminen ilmatorasituksille on rapauttanut joidenkin muodostumien heikoimpia kiviaineksia. Kiviainesten huokoisuus ja vedensitomiskyky ovat tämän seurauksena lisääntyneet ja routimisherkkyyys on tästä syystä kasvanut. (Nurmikolu 2006.)



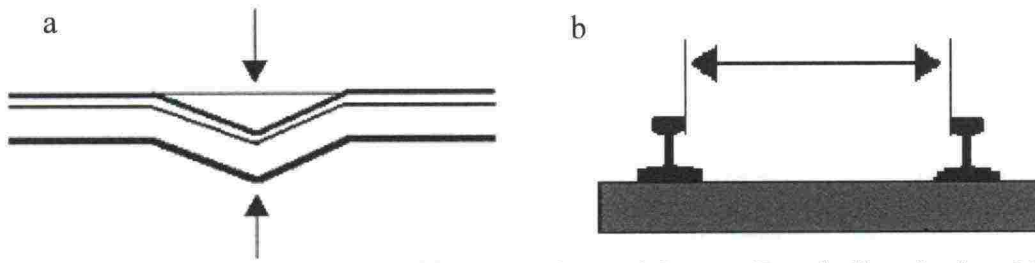
Kuva 3.6. Neljän vuorokauden routanousun ja hienoainespitoisuuden korrelaatio (a) ja routimiskertoimen ja hienoainespitoisuuden korrelaatio (b) (Nurmikolu 2006). Sora- ja hiekkamateriaalien hajonta on selvästi suurempi kuin tukikerros tai murskenäytteiden.

Nurmikolun (2006) kalliomurskeilla tekemissä tutkimuksissa havaittiin, että raekooltaan yli 0,063 mm hienorakeisen aineksen määrä vaikutti merkityksettömän vähän routimisherkkyyteen ratarakennemateriaaleissa kyseeseen tulevalla rakeisuuden vaihteluvälillä. Lajitteen 0,063–0,125 mm kolminkertaistaminen hienoainesmäärän säilyessä samana ei vaikuttanut tutkittujen kiviainesten routimisherkkyyteen.

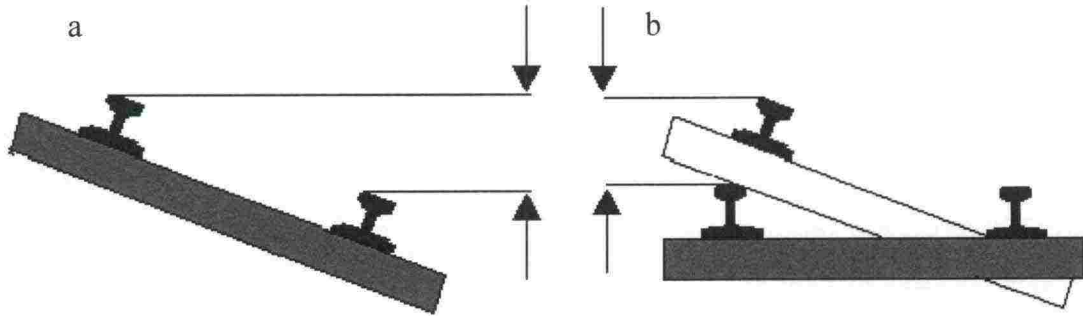
3.3 Ratarakenteen routiminen ja raiteentarkastus

3.3.1 Raiteentarkastusmittaukset

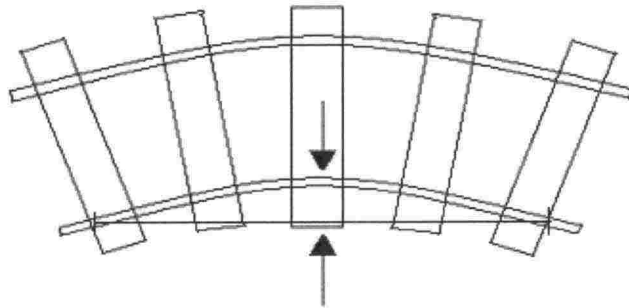
Raiteentarkastuksen tavoitteena on radan turvallisuus ja käyttövarmuus. Raiteentarkastusmittaukset tehdään radantarkastusvaunulla, jollaisella mittauksia on tehty vuodesta 1981. Raiteentarkastusmittauksessa raiteen geometrian osalta tarkastettavia suureita ovat korkeuspoikkeama, kierous, raideleveys, kallistus ja nuolikorkeudet. Radantarkastusvaunulla tehdään myös ajolangan staattisen aseman tarkastus. Geometrian tarkastuksessa korkeuspoikkeamalla (kuva 3.7a) tarkoitetaan kiskon kulkupinnan teoreettisen jänteen keskipisteen etäisyyttä kiskon todellisesta kulkupinnasta. Raideleveyden (kuva 3.7b) nimellismitta on 1524 mm ja se mitataan kiskon kulkureunojen välistä, 14 mm kiskonselän alapuolelta. Raideleveyden mittauksessa seurataan levenemää ja kapenemaa. Raiteen kallistus (kuva 3.8a) tarkoittaa sisä- ja ulkokiskojen välistä korkeuseroa. Kierous tarkoittaa kallistuksen muutosta (kuva 3.8b). Nuolikorkeudella (kuva 3.9) tarkoitetaan kaaren jänteen keskipisteen etäisyyttä kaaresta. (Ratahallintokeskus 2005a, Levomäki 2007)



Kuva 3.7. Raiteen a) korkeuspoikkeama ja b) raideleveys (Ratahallintokeskus 2005a).



Kuva 3.8. Raiteen a) kallistusvirhe ja b) kierousvirhe (Ratahallintokeskus 2005a).



Kuva 3.9. Raiteen nuolikorkeusvirhe (Ratahallintokeskus 2005a).

Koneellisen raiteentarkastuksen virheluokkia ovat C-, D- ja *-luokan virhe. C-luokan virhe on alkava virhe, D-luokan virhe on sisällytettävä kunnossapito-ohjelmaan ja korjattava lähitulevaisuudessa ja *-luokan virhe on korjattava välittömästi. Eri kunnossapitotasoilla on erilaiset virheluokkien raja-arvot. (Ratahallintokeskus 2006a.) Mittauksen aikana tulokset tulostuvat käyränä A3-paperille. Tulosteessa näkyy D-luokan virheraja jokaisen käyrän kohdalla ja ylittäessään D-luokan virherajan käyrä tulostuu valkoisena. (Ratahallintokeskus 2005a.) Lisäksi raporteina saadaan virhelistaus sekä vaihde- ja kilometriyhteenvedot (Levomäki 2007).

Taulukossa 3.2 on esitetty esimerkkinä raiteentarkastusmittauksessa havaitun korkeuspoikkeaman raja-arvot. Raiteentarkastusmittausten raja-arvot korkeuspoikkeamalle ovat 5 metrin mittakannalle esitettyjä poikkeamia keskimääräiseen arvoon nähden. (Ratahallintokeskus 2006a.) Routimisen vaikutuksia ajatellen taulukosta voidaan todeta, että esitetyt raja-arvot eivät juurikaan salli epätasaisen routanousun syntymistä.

Taulukko 3.2. Eri kunnossapitotasojen raja-arvot (mm) korkeuspoikkeaman virheille 5 metrin mittakannalla. Arvot on esitetty poikkeamina keskimääräiseen arvoon nähden. (Ratahallintokeskus 2006a.)

Kunnossapitotaso	1AA	1A	1	2	3	4	5	6
Virheluokka C	2	2	3	4	5	6	7	8
Virheluokka D	4	4	5	6	7	8	9	10
Virheluokka *	7	7	8	9	10	12	13	14

Raiteentarkastustuloksia käytetään kunnossapidon ohjaukseen paikallisten virhekohtien korjauksessa ja laajempien kunnossapito-ohjelmien ohjelmoinnissa. Tarkastuksia käytetään myös ratatöiden vastaanotossa varmistamaan työn laatu. (Ratahallintokeskus 2006a.)

3.3.2 Raiteen asema

Raiteen tasaisuus on perusedellytys rautatien liikenteenvälityskyvylle ja tämän vuoksi routanousun tulisi olla hallinnassa. Vaatimus tasaisuudelle on suuri verrattuna esimerkiksi tierakenteeseen. (Nurmikolu & Kolisoja 2002.)

Routanousu aiheuttaa pystysuuntaisia muutoksia raiteen asemassa (Selig & Waters 1994). Routiminen routanousuineen ja sulamispehmenemisineen voi aiheuttaa myös rakennekerros materiaalien löyhtymisen ja sitä seuraavan uudelleentiivistymisen myötä pysyviä muodonmuutoksia (Kolisoja et al. 1999).

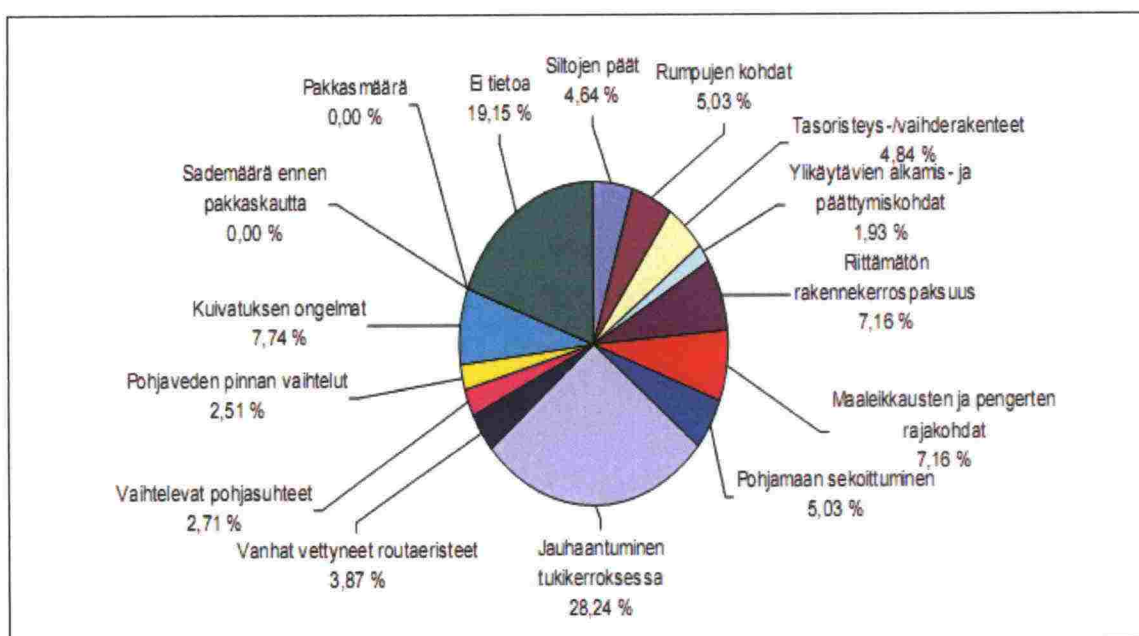
Routimisesta seuraa korkeuspoikkeamia sekä kallistus- ja kierousvirheitä radalle. Virheiden seurauksena radan dynaaminen kuormitus muuttaa raiteen asemaa sivusuunnassa eli siirtää kallistusvirheen nuolikorkeusvirheiksi (kuva 3.9) (Koskinen et al. 2006).

3.3.3 Routavaurioiden syyt

Routavauriot rataverkolla johtuvat monista syistä. Ne voivat olla seurausta rata-rakenteesta ilmenevistä ongelmista tai teknisistä epäjatkuvuuskohdista. Roudan hallintaraportissa 2007 (Ratahallintokeskus 2007) lueteltuja ratarakenteeseen liittyviä ongelmakohtia ovat mm. riittämätön rakennekerrospaksuus, maaleikkausten ja pengerten rajakohdat, routivan pohjamaan sekoittuminen rakennekerrokseen, epäpuhtaudet ja jauhaantumisen tukikerroksessa, vanhat vettyneet routaeristeet, vaihtelevat pohjasuhteet, pohjaveden pinnan vaihtelu ja kuivatuksen ongelmat. Teknisiä epäjatkuvuuskohtia ovat puolestaan esim. siltojen päät, rumpujen kohdat sekä tasoristeys- ja vaihderakenteet.

Vuosina 2003–2007 routavaurioiden syyjakauma on ollut kuvan 3.10 mukainen. Eri kunnossapitoalueilla on suuria eroja eri syiden lukumäärässä. Suuresti poikkeaviin lukumääriin tulee suhtautua varauksella, sillä routimisen syy ei välttämättä ole kunnossapitäjän ilmoittama. Esimerkiksi vain ankarina talvina esiintyvä routiminen tuskin johtuu tukikerroksesta, vaan roudan syy on alempana radan rakenteesta tai pohjamaasta. Syyjakaumaan vaikuttaa myös se, että kunnossapitoalueesta riippuen on ilmoitettu joko useita muutaman metrin mittaisia lyhyitä routapaikkoja peräkkäin tai

pidempiä jopa kilometrien pituisia yhtäjaksoisia paikkoja. Pidemmät nopeusrajoitus- tai kiilatut alueet koostuvat mahdollisesti useista lyhyemmistä routapaikoista.



Kuva 3.10. Routavaurioiden syyjakauma vuosina 2003–2007 kunnossapitäjien ilmoitusten mukaan (Ratahallintokeskus 2007).

3.3.4 Liikenteelle aiheutuvat haitat ja radan kunnossapito

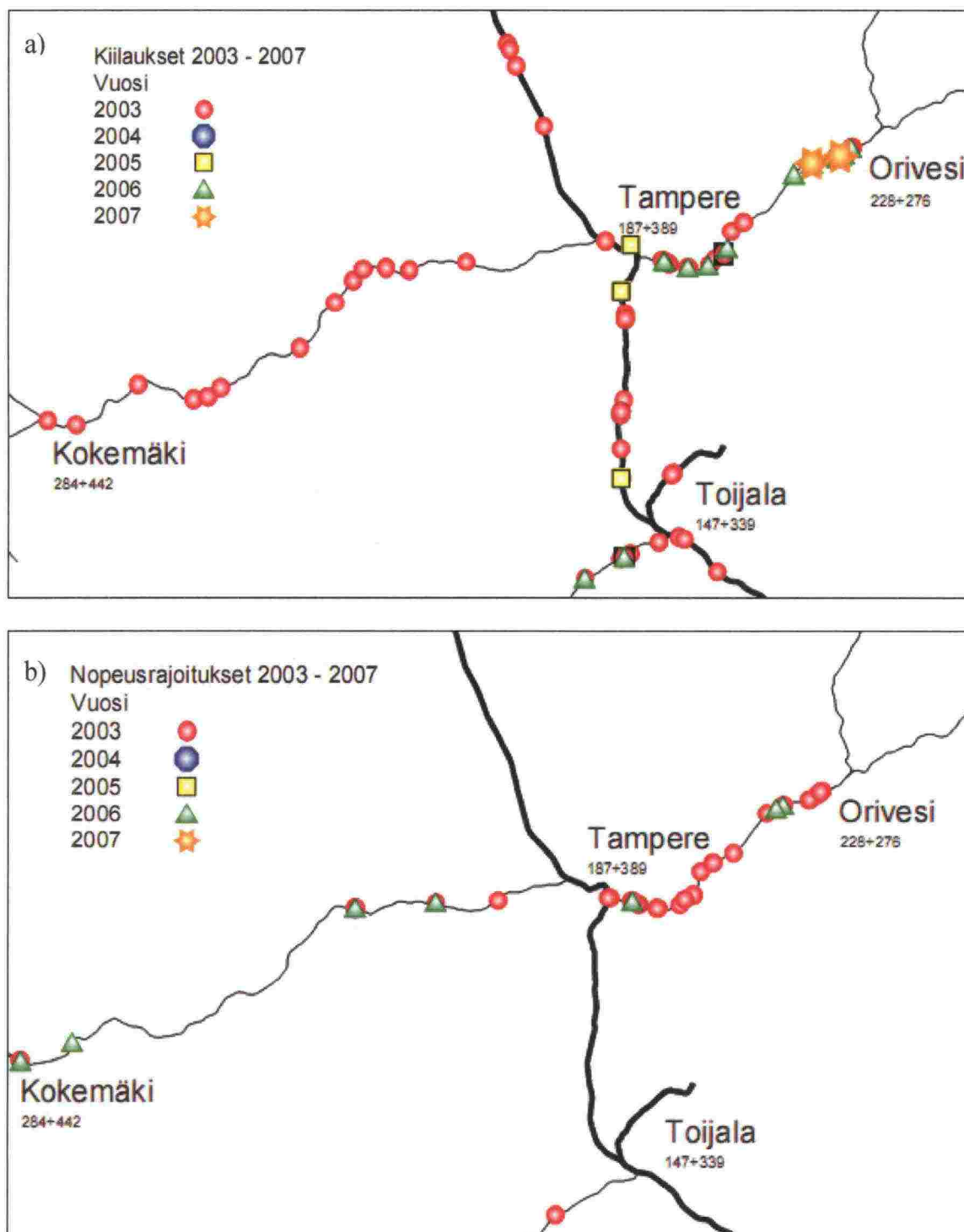
Routimisella on vaikutusta radan turvallisuuteen ja liikennöitävyyteen. Routanousujen vuoksi raiteelle asetettavat nopeusrajoitukset alentavat raiteen välityskykyä ja palvelutasoa. (Nurmikolu & Kolisoja 2002.)

Jotta raiteella voidaan liikennöidä, se joudutaan joko kiilaamaan vastaanamaan nopeusrajoituksia tai toinen vaihtoehto on asettaa raiteelle nopeusrajoituksia. Raide voidaan kiilata sellaiseen asemaan, että liikennöinti rataosan normaaleilla nopeusrajoituksilla on sallittu. Kiilausta käytetään silloin, kun raidetta ei voida korjata normaaleilla nosto- ja tukemistoimenpiteillä esim. tukikerroksen ollessa jäässä. (Ratahallintokeskus 2002.) Ellei kunnossapitotoimenpiteitä tehdä, virheet johtavat nuolikorkeusvirheiden syntymiseen, jolloin korjaustoimenpiteet siirtyvät tukikerroksen sulamisen jälkeiseen aikaan. Tämä taas johtaa nopeusrajoitusmatkan ja -ajan pitenemiseen ja myöhemmin tehtävät kunnostustoimenpiteet ovat mittavimmat. (Koskinen et al. 2006.)

Radan kunnossapidon ensisijainen tavoite on liikenneturvallisuuden takaaminen. Radan kunto tulee pitää sellaisena, että Junaturvallisuussäännön teknisten määräysten ja ohjeiden (Ratahallintokeskus 2008; Rautatievirasto 2008) mukainen liikenne voidaan sallia. (Ratahallintokeskus 2002.) Rataverkko on jaettu kunnossapitotasoihin. Pääratojen kunnossapitotasot on esitetty liitteessä 1 (Ratahallintokeskus 2008).

Nopean routimisen tai roudan sulamisen seurauksena saatetaan raiteen suurinta sallittua nopeutta joutua alentamaan. Nopeuden alennus tehdään, jotta liikennöinnin turvallisuus ja matkustusmukavuus säilyvät. Menettelyä voidaan käyttää, kun kiilaustarpeen

muuttuminen on niin nopeaa, ettei sitä voida kohtuudella hallita. Vähän liikennöidyllä radalla voidaan kiilaustarve korvata nopeuden tilapäisellä alentamisella, jos liikenteelliset syyt sallivat sen. (Ratahallintokeskus 2002.) Kuvassa 3.11 on esitetty Roudan hallintaraportin 2007 (Ratahallintokeskus 2007) mukainen esimerkkituloste Tampereen ympäristön nopeusrajoitus- ja kiilausalueista vuosilta 2003–2007.



Kuva 3.11. Kiilausalueet (a) ja nopeusrajoitusalueet (b) Tampereen ympäristössä talvina 2003–2007 (Ratahallintokeskus 2007).

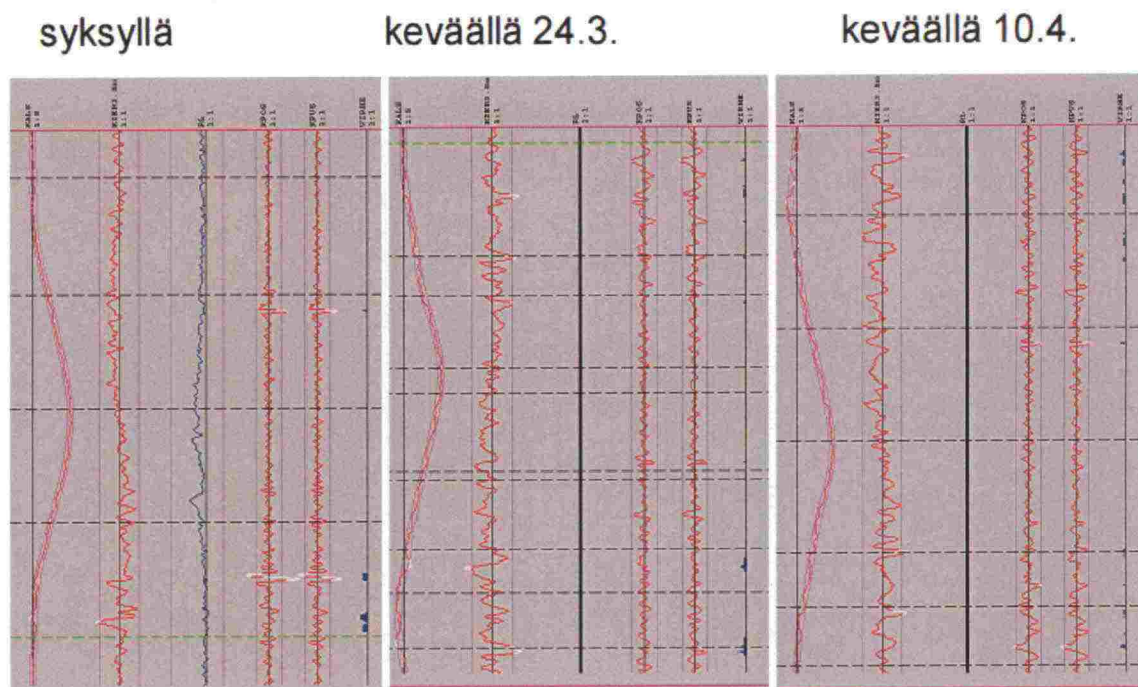
3.4 Routivien kohteiden kartoitus ja roudan syvyys

Näytteenottoa suunniteltaessa oli oleellista tietää routivien kohteiden sijainti rataverkolla. Kohteita paikannettiin Roudan hallintaraportin (Ratahallintokeskus 2007) avulla koko rataverkolta ja otettiin tarkempaan tarkasteluun.

Seinäjoki–Oulu-rataosalla roudaongelmaisten kohteiden kartoituksessa käytettiin myös koneellisen raiteentarkastuksen mittaustuloksia (Oy VR-Rata Ab:n Radantarkastuspalvelut 2006). Valinnan tarkentamisessa käytettiin apuna lisäksi tietoja laskennallisesta roudan syvyydestä ja maatulka- ja maanrakennusprofiileista saatuja tietoja rakennekerroksien paksuudesta.

3.4.1 Routimisen havaitseminen raiteentarkastusmittauksissa

Raiteentarkastustuloksista ei saada suoraan tietoa siitä, onko routiminen syynä raiteen aseman muutokseen. Keväällä tehtävissä mittauksissa saadaan selville talven vaikutus raiteen asemaan. Syksyn mittauksissa puolestaan selviää kesän aikana tehtyjen kunnostustöiden vaikutus. Selvitettäessä routimisen vaikutuksia on verrattava keskenään syksyn ja kevään mittaustuloksia. (Heikkinen 2007.) Kuvassa 3.12 on nähtävissä esimerkki raiteentarkastusmittauksen tuloksista routivalla paikalla.



Kuva 3.12. Raiteentarkastusmittauksen tulokset syksyllä ja keväällä routivalla paikalla (Levomäki 2007).

Leimin (1994) diplomityössä on selvitetty roudan aiheuttamien virheiden erottamista muista syistä johtuvista radan aseman virheistä koneellisessa raiteentarkastuksessa. Tarkastusmittaukset tehdään syksyllä ja keväällä. Syksyn mittausten perusteella voidaan myöhemmin kevään ja talven mittauksissa havaituista geometrisistä virheistä poistaa jo syksyllä havaitut virheet ja saada selville routivat rataosuudet. Tuloksista poistetaan myös radan aseman muutokset, joille löydetään joku muu syy. Mittaukset kuvaavat aina

yhden talven olosuhteita, eikä niistä voida arvioida, kuinka rata routisi esim. mitoituspakkasmäärällä. (Leimi 1994.)

Oy VR-Rata Ab:n Radantarkastuspalvelut (2006) on tehnyt Seinäjoki–Oulu-välillä vertailukäyrän syksyn 2005 ja kevään 2006 raiteentarkastusmittauksista. Vertailukäyrässä syksyn ja kevään mittausten käyrät on ajettu päällekkäin, jolloin nähdään erot käyrien välillä. Vertailukäyrään on tehty myös merkinnät routiviksi tulkituista osuuksista. Tällaisia osuuksia löytyy raiteentarkastusmittauksissa huomattavasti enemmän kuin routapaikkailmoitusten perusteella. Tulokset ovat yhteneviä sikäli, että suurin osa routahavainnoista sekä raiteentarkastuksen (Oy VR-Rata Ab Radantarkastuspalvelut 2006) että Roudan hallintaraportin 2007 (Ratahallintokeskus 2007) mukaan painottuu samalle alueelle Kokkola–Oulu-välille. Raiteentarkastustulosten perusteella ei voida päätellä kuitenkaan suoraan, tapahtuuko routiminen radan rakenteessa vai onko syy esimerkiksi pohjamaassa.

3.4.2 Roudan syvyyslaskelmat ja maatutkaprofiilit radan rakenteesta

Roudan hallintaraportissa (Ratahallintokeskus 2007) esitettyjen Ilmatieteenlaitoksen ilmoittamien pakkasmäärätietojen perusteella määritettiin laskennallinen roudan syvyys yhdeksällä eri paikkakunnalla syksystä 2002 kevääseen 2007. Roudan syvyyttä ja maatutkamittauksista saatuja rakenneprofiileja tarkasteltiin, jotta voitiin arvioida, ulottuuko routaraja pohjamaahan asti juuri niinä talvina, jolloin routaongelmia on raportoitu. Jos näin ei ole, routaongelmat ovat olleet rakennekerroksista johtuvia.

Laskennallisen roudansyvyyden määrittämisessä käytettiin yhdistettyä Watzingerin, Kindemin, Michelsenin ja Beskowin menetelmää, joka on myös RATO 3:n (Ratahallintokeskus 2005b) mukaisen ratarakenteen routamitoitusohjeen perusta (Nurmikolu & Kolisoja 2002). Käytetystä menetelmästä löytyy enemmän tietoa RHK:n julkaisusta Ratarakenteen routasuojaus (Nurmikolu & Kolisoja 2002). Roudan syvyydet laskettiin olettaen alusrakenteen olevan soraa. Tuloksena saadut laskennalliset roudansyvyydet paikkakunnittain ja vuosittain on esitetty taulukossa 3.3. Verrattaessa pakkasmääriä mitoituspakkasmääriin (Ilmatieteenlaitos Ratahallintokeskuksen 2005b mukaan) todettiin, että talvien 2002–2007 pakkasmäärät olivat melko alhaisia kerran 50-vuodessa toistuviin suurimpiin pakkasmääriin verrattuina. Talvi 2002–2003 vastaa Pohjois-Suomea lukuun ottamatta noin kerran viidessä vuodessa toistuvaa suurinta pakkasmäärää. Ajanjakson muiden talvien sekä Pohjois-Suomen kaikki pakkasmäärät ovat tätäkin alhaisempia.

Taulukko 3.3. Pakkasmäärät (F) ja laskennalliset roudansyvytydet (z) tukikerroksen yläpinnasta paikkakunnittain ja vuosittain talvina 2003–2007.

Paikkakunta Talvi	Helsinki Kaisaniemi		Helsinki-Vantaa		Turku	
	F (h°C)	z (m)	F (h°C)	z (m)	F (h°C)	z (m)
2002–2003	18014	1,24	21190	1,39	19891	1,3
2003–2004	8498	-	11287	-	9338	-
2004–2005	7886	-	11791	-	9614	-
2005–2006	13925	1,03	17719	1,23	15410	1,08
2006–2007	7243	-	8954	-	845*	-

Paikkakunta Talvi	Tampere		Kauhava		Joensuu	
	F (h°C)	z (m)	F (h°C)	z (m)	F (h°C)	z (m)
2002–2003	26052	1,66	27787	1,78	34769	2,14
2003–2004	13786	1,06	14602	1,15	21602	1,59
2004–2005	13786	1,06	15521	1,20	22313	1,63
2005–2006	20671	1,42	22198	1,54	27581	1,86
2006–2007	11578	-	13978	1,11	17645	1,39

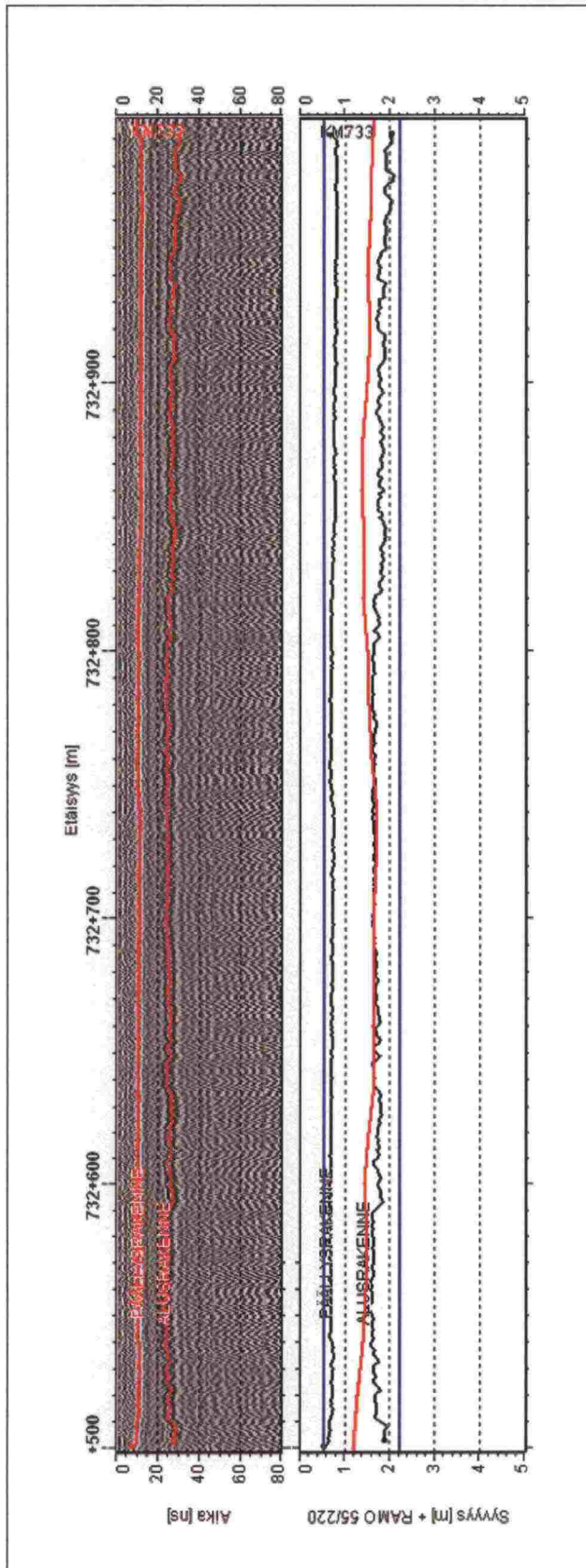
Paikkakunta Talvi	Kajaani		Oulu		Rovaniemi	
	F (h°C)	z (m)	F (h°C)	z (m)	F (h°C)	z (m)
2002–2003	40277	2,48	33818	2,18	40490	2,71
2003–2004	25541	1,91	22334	1,69	28282	2,23
2004–2005	25392	1,90	21005	1,59	25889	2,13
2005–2006	31205	2,15	27046	1,90	30282	2,32
2006–2007	21847	1,73	19022	1,52	28282	2,23

- pakkasmäärä alle 12 000 Kh, laskennallinen roudansyvyys alle 1,0 m

*) Lähteessä todennäköisesti virhe

Radan alusrakenteen paksuutta voitiin tarkastella käytössä olleiden maatutkaustulosten avulla, joihin oli valmiiksi tulkittu rakennekerrosten rajat. Vertaamalla laskennallista roudansyvyyttä ja alusrakenteen paksuutta voitiin arvioida, sijoittuuko routaraja alusrakenteen syvyydelle vai pohjamaahan.

Maatutkaustulokset olivat käytössä seuraavilta liikennepaikkaväleiltä: Seinäjoki–Oulu, Tampere–Jyväskylä, Jyväskylä–Pieksämäki, Tampere–Lielähti, Kokemäki–Rauma, Toijala–Turku, Kouvola–Luumäki, Pieksämäki–Kuopio ja Siilinjärvi–Viinijärvi. Kuvassa 3.13 on nähtävissä esimerkkituloste maatutkausprofiilista Seinäjoki–Oulu väliltä.



Kuva 3.13. Esimerkki maatukaustulosteesta Seinäjoki–Oulu-radan kilometriväliltä 732+500 – 733+000. Tulosteessa on tulkittuna ratarakenteen kerrosrajat ja niiden syvyydet (Silvast 2004).

4 NÄYTTEET JA LABORATORIOTUTKIMUKSET

4.1 Näytteenottopaikat

4.1.1 Valintakriteerit

Näytteenottopaikkoja valittiin yhteensä 30 kpl, joista jokaisesta otettiin kaksi näytettä. Näytteenottopaikat pyrittiin jakamaan routiviin kohteisiin tasaisesti koko rataverkolle, jotta saataisiin yleiskuva alusrakennemateriaaleista rataverkon routivilla osuuksilla. Valinta tehtiin tarkastelemalla raiteentarkastusmittausten tulosten (Oy VR-Rata Ab Radantarkastuspalvelut 2006) ja Roudan hallintaraportin 2007 (Ratahallintokeskus 2007) avulla kohteita, joissa esiintyi routahaittoja. Tarkastelussa pyrittiin paikallistamaan luvun 3.4 menetelmillä kohteet, joissa routahaitat johtuvat mahdollisesti radan alusrakennekerroksista.

Kohteet pyrittiin valitsemaan niin, että ne täyttävät seuraavat kriteerit:

- Paikalla oli ollut toistuvasti routahaittoja.
- Routimista oli tapahtunut talvina, jolloin laskennallinen roudansyvyys on alusrakenteen syvyydellä.
- Routapaikka oli pituudeltaan muutamaa kymmentä metriä pidempi tai se koostui useista peräkkäisistä lyhyistä osuuksista.
- Roudan hallintaraportissa ilmoitettua routimisen syytä oli aiheellista epäillä.
- Epäjatkuvuuskohtia, kuten tasoristeykset, sillat, tunnelit, kallioleikkaukset, rummut, ratapihat yms. ei otettu tarkasteluun.

Lopuksi valitut kohteet käytiin läpi vertaamalla niitä maatumittaus tuloksiin niissä kohteissa, joista tutkausprofiilit olivat käytettävissä. Jos tutkaustuloksista nähtiin esimerkiksi, että kohteessa oli ohut alusrakenne ja alla mahdollisesti routiva pohjamaa, kohde jätettiin tarkastelun ulkopuolelle. Rataverkon pohjoisimmissa osissa roudan syvyys on joka talvi niin suuri, että sen arvioitiin tunkeutuvan pohjamaahan asti. Lisäksi näytteenottoon otettiin Seinäjoki–Oulu-rataosalta kolme sellaista paikkaa, joissa oli havainto routimisesta ainoastaan raiteentarkastusmittauksista.

4.1.2 Valitut kohteet

Routapaikkojen tarkastelun perusteella päädyttiin taulukossa 4.1 esitettyihin näytteenottopaikkoihin. Näytteenottopaikkojen sijainti rataverkolla on esitetty liitteessä 2.

Taulukko 4.1. Valitut näytteenottoaikat.

Rataosa	Liikennepaikka väli ¹ ja ratakilometri	Routimisen syy ¹	Routapaikan pituus (m)	Emma ²	Rakennepaksuus maatutkauksessa (m)	Routimisvuosi ja laskennallinen roudan syvyys tukikerroksen pinnasta (m)
Tampere-Kokemäki	Snm-Kru 225+266	P	200		-	2003 1,55
	Snm-Kru 225+269	P	200		-	2003 1,55
	Snm-Kru 225+341	P	200		-	2003 1,55
Tampere-Orivesi	Tpe-Hvs 194+443	R/T	210		1,7	2003 1,55
	Hvs-Ov 208+414	T	7200		2,0	2003 1,55
Toijala-Turku	Kar-Mri 252+120	K	200		1,7	2003 1,30
	Ur-Hp 179+050	T/K	700		1,3	2003 1,50
Toijala-Tampere	Via-Mat 156+293	T/K	20		-	2003 1,55
	Via-Mat 156+894	0	0		-	-
Riihimäki-Lahti	Ri-Kek 77+925	E	215		-	2003 1,45
	Jut-Jr 95+584	E	200		-	2003 1,55
Kouvola-Lappeenranta	Uti-Kpa 208+785	E	200		1,3	2006 1,35
	Kjr-Ta 237+700	E	705		1,3	2003 1,45
	Tap-Lr 273+924	LP	285		-	2006 1,35
Kouvola-Pieksämäki	Hir-Ksa 330+485	R	100		-	2006 1,55
Jyväskylä-Pieksämäki	Vko-Lvt 390+016	V/K	700		2,0	2007 1,10
Jyväskylä-Äänekoski	Lau-Suo 411+861	E	9500		-	-
	Lau-Suo 417+042	E	9500		-	-
Seinäjoki-Oulu	Kpy-Kok 539+602	-	350	x	1,4	2006 1,50
	Kns-Ela 599+290	-	100	x	1,5	2006 1,50
	Khg-Yv 623+732	E	100		1,5	2007 1,10
	Yv-Kgs 635+890	-	150	x	1,2	2006 1,50
	Yv-Kgs 639+900	E	400	x	1,0	2006 1,50
	Ou-Kua 663+731	E	500	x	1,6	2007 1,50
	Kua-Vti 677+858	E	300	x	1,4	2007 1,50
	Lka-Kml 732+933	V	1200	x	1,8	2003 2,00
Pieksämäki-Kuopio	Krm-Kuo 457+231	PV	1500			2003 2,00
Helsinki-Turku	Pku-Erv 97+522	E	400		-	2006 1,40
	Slo-Po 155+648	K	200		-	2003 1,35
	Slo-Po 164+964	E	400		-	2006 1,10

* Verkkoselostuksen (Ratahallintokeskus 2006b) mukainen liikennepaikkaväli

¹ Arvioitu routimisen syy Roudan hallintaraportissa 2007 (Ratahallintokeskus 2007) :

P - Vaihtelevat pohjasuhteet

R - Riittämätön rakennekerrospaksuus

T - Jauhaantuminen tukikerroksessa

K - Kuivatuksen ongelmat

LP - Maaleikkausten/pengerten rajakohdat

E - Ei tietoa

V - Vanhat vettyneet routalevyt

PV - Pohjaveden pinnan vaihtelu

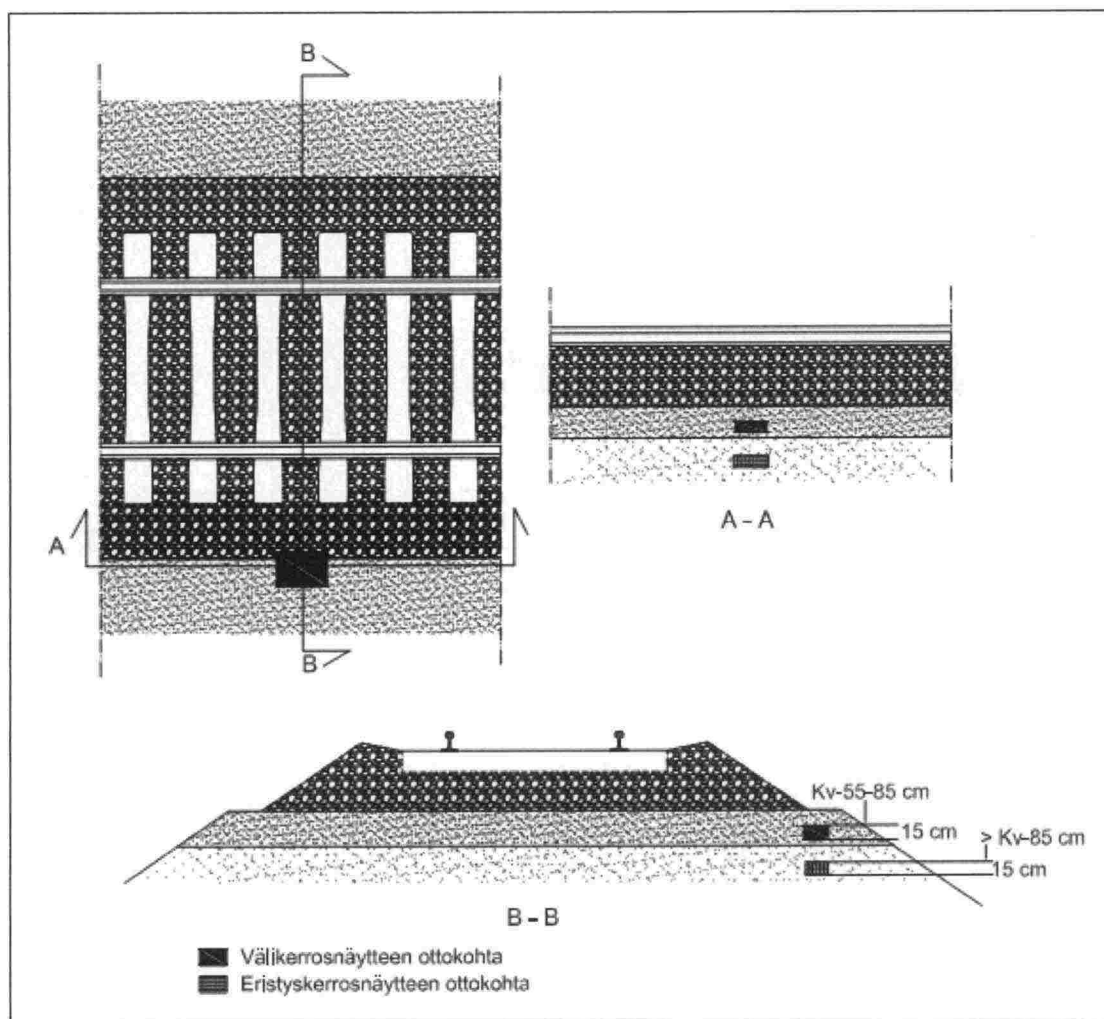
0 - Routimaton kohde

² Seinäjoki-Oulu radan koneellisen raiteentakastusmittauksen tuloksissa havaittu routapaikka

Snm-Kru 225+200-225+400 -väliltä otettiin näytteitä kolmesta kohtaa, joista kaksi samalta paikalta. Via-Mat-väliltä otettiin toinen näyte Roudan hallintaraportissa 2007 (Ratahallintokeskus 2007) ilmoitetun routapaikan ulkopuoliselta alueelta vertailtavaksi.

4.1.3 Näytteenotto väli- ja eristyskerroksesta

Näytteenotto väli- ja eristyskerroksesta tehtiin kahdelta syvyydeltä. Alkuperäinen tavoite oli saada näytteet sekä väli- että eristyskerroksista jokaiselta näytteenottopaikalta kuvan 4.1 mukaisesti. Tarkkoja mittoja ei määritetty suhteessa kerrosrajoihin, koska kerrosrakenteiden paksuudet vaihtelevat. Sivusuunnassa näytteenotto kohdistettiin jätkänpolulle aivan tukikerroksen ulkoreunaan (kuva 4.2).



Kuva 4.1. Suunnitellut näytteenottokohdat ja -syvyydet



Kuva 4.2. Näytteenottopaikka tukikerroksen ulkoreunassa.

Näytteet otettiin lapiolla ja käsin kaivaen raidevarausjärjestelyn turvin. Näytteenotto maastossa osoittautui paikoin suunniteltua hankalammaksi. Vaikeuksia aiheuttivat mm. kaapelit ja alusrakenteeseen sekoittunut sepeli. Kaapeleiden kohdalla kaivupaikkaa jouduttiin siirtämään kauemmaksi radan keskustasta. Syväälle alusrakenteeseen sekoittunut sepeli puolestaan hankaloitti näytteenoton kohdistamista väli- ja eristyskerrosten sora- ja hiekkamateriaaleihin. Paikoissa, joissa sepeliä oli syvällä alusrakennekerroksessa, jouduttiin ottamaan käytännössä kaksi näytettä miltei peräkkäisiltä syvyystasoilta sepelin esiintymisen loputtua. Joissakin kohteissa saatiin ensimmäinen ”välikerros” -näyte ongelmitta, mutta syvemmältä rakenteesta löytyi sepeliä (kuva 4.3) niin paljon, että kelvollisen näytteen saaminen oli työlästä. Osassa kohteista, joissa sepeli ulottui syväälle alusrakenteeseen (kuva 4.4), otettiin tarkoituksella näytteeksi sepelipitoista ainetta. Sepelipitoiset näytteet käyvät ilmi liitteen 3 taulukosta. Syvimmillään näytteenottosyvyydet olivat n. 1,3 m korkeusviivasta. Toteutuneet näytteenottosyvyydet on esitetty liitteessä 3.



Kuva 4.3. Raidesepeliä löytyi myös syvemältä alusrakenteesta, vaikka sitä ei pinnassa ollut. Kuva Kruunupyy–Kokkola-välin näytteenotto paikalta, josta hienomman aineksen alta tuli näkyviin sepeliä.



Kuva 4.4. Sepeliä syvällä alusrakenteessa Karviainen–Maaria-välin näytteenotto paikalla.

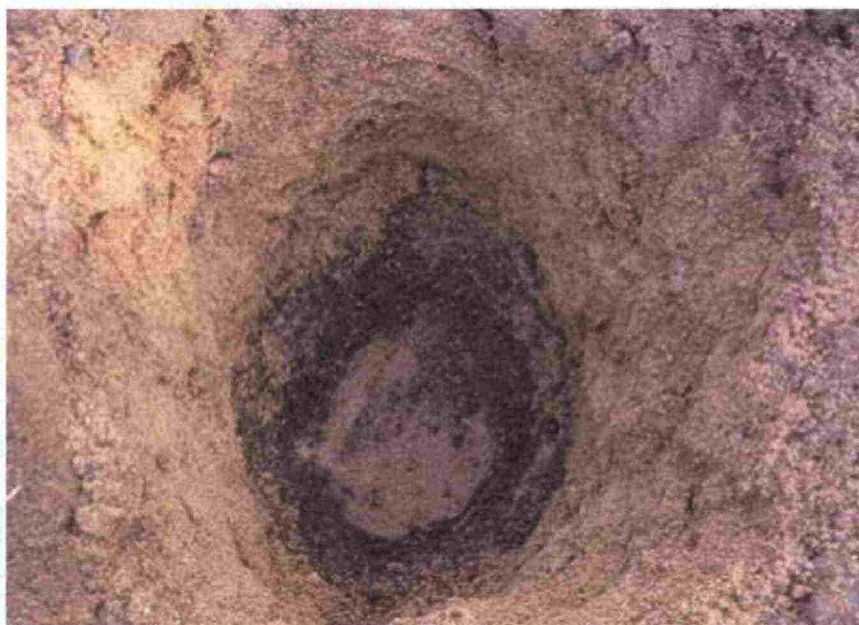
Näytteenottosyvyydet vaihtelevat eri rataosilla (liite 3). Vaihtelu johtuu edellä mainitun sepelin lisäksi myös siitä, mikä oli korkeusviivan sijainti välikerroksen pintaan nähden. Osassa kohteista tukikerros oli alusrakenteen sisässä niin, että välikerroksen pinta oli vain hiukan korkeusviivan alapuolella. Tällaisissa tapauksissa välikerroksesta otettavaksi suunniteltu ylempi näyte voitiin ottaa jonkin verran tukikerroksen alapinnan tason yläpuolelta, koska kaivu aloitettiin välikerroksen pinnalta tukikerroksen sivulta

(kuva 4.1). Ainoastaan niillä rataosilla, joissa päällysrakenne oli äskettäin uusittu, oli välikerroksen pinta 0,55 m korkeusviivan alapuolella.

Silmämääräisesti arvioiden osassa kohteista materiaali vaihteli jonkin verran näytteenottoaikalla eri syvyyksien välillä (kuvat 4.5 ja 4.6). Myös vesipitoisuudessa havaittiin eroja (kuva 4.7) näytteenottosyvyyksien välillä useissa kohteissa.



Kuva 4.5. Hienorakeisempaa ainesta karkeamman alla alusrakenteessa näytteenottoaikalla Kruunupyy–Kokkola-välillä.



Kuva 4.6. Kerros karkeampaa ainesta alusrakenteen sisässä näytteenottoaikalla Tapavainola–Lappeenranta-välillä.



Kuva 4.7. Kosteuspitoisuudessa havaittiin suuriakin eroja. Oulainen–Kilpua-välin näytteenottoaikalla vettä kertyi näytteenottokuopan pohjalle noin 100 mm pohjan ollessa tasolla kv-850 mm.

4.2 Vesipitoisuuden ja rakeisuuden määrittäminen

Aluksi näytteet kuivattiin niiden luonnollisen vesipitoisuuden määrittämiseksi. Vesipitoisuudet on esitetty liitteessä 4. Näytteet seulottiin standardin SFS-EN 933-2 mukaisella halkaisijaltaan 300 mm seulasarjalla (16, 8, 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125 ja 0,063 mm seulat). Seulonta tehtiin pesuseulontana kuitenkin siten, että kuivaseulonta tehtiin ennen pesua. Kuivaseulonnassa otettiin talteen 0,063 mm seulan läpäisevä aines jatkotutkimuksia varten. Tämän jälkeen pestiin 0,063 mm seulalla aines, joka ei aiemmassa seulonnassa läpäissyt 0,063 mm seulaa. Pesuseulonnalla saatiin selville alle 0,063 mm hienoaineksen kokonaismäärä. Nurmikolu (2006) totesi vakioidussa 50 kierroksen (6 bar) tiivistyksessä ja materiaalin käsittelyssä syntyneen hienoainemäärän vaihtelevan kalliomurskeilla kiviaineksesta ja raekokojakautumasta riippuen pääosin välillä 0,5–1,1 prosenttiyksikköä. Nyt tarkastelluilla luonnollisilla maalajeilla hienoneminen oli hyvin todennäköisesti vähäisempää kuin terävasärmäisillä kalliomurskeilla. Näytteiden hienoainespitoisuuksina käytettiin niistä routanousukokeen jälkeen pesuseulonnassa määritettyä hienoainespitoisuutta.

Näytteenottovaiheessa tehtiin havaintoja näytteiden sisältämän sepelin määrästä. Seulonnan yhteydessä arvioitiin näytteiden sisältämän sepelin määrää järjestelmällisemmin. Arviointi tehtiin silmämääräisesti asteikolla 1-4. Arvo 1 vastaa näytettä, jossa ei ole lainkaan tai vain yksittäisiä rakeita sepeliä ja arvo 4 taas näytettä, joka on lähes pelkkää sepeliä. Arviot sepelin määrästä on esitetty liitteessä 3.

4.3 Routanouskoe

4.3.1 Kokeiden tavoite

Routanouskokeessa tutkitaan materiaalin routimisherkkyyttä. Kokeissa tarkasteltiin ratojen alusrakennemateriaalien routimisherkkyyttä, eli toisin sanoen voivatko rataverkolla havaitut routavauriot johtua radan alusrakennemateriaaleista vai onko syy jokin muu.

4.3.2 Näytteiden valmistus

Aluksi kuivasta materiaalista seulottiin yli 31,5 mm rakeet pois. Tämän jälkeen materiaalia otettiin noin 6200 g routakoetta varten. Materiaaliin lisättiin vettä niin, että vesipitoisuudeksi tuli noin 3–5 % riippuen materiaalista. Vesi ja materiaali sekoitettiin hyvin, jotta kosteus jakaantui tasaisesti.

Materiaali laitettiin näytemuottiin, joka koostui 150 mm halkaisijaltaan olevasta PVC-putkesta, joka oli paloitetu viideksi renkaaksi. Näytteet tiivistettiin Intensive Compactor Tester – 150RB (ICT) -kiertotiivistinlaitteessa kiertämällä siinä 50 kierrosta 6 barin paineella. Näytteistä pyrittiin tekemään noin 150 mm korkeita. Toteutuneet korkeudet olivat välillä 140–160 mm.

Yhtenäisen putken sijasta näytemuottina käytettiin paloitetua putkea, koska muotin ja näytemateriaalin rajapinnan vaikutusta routanousuun on pidetty rajoittavana tekijänä (Kujala 1991 Nurmikolun 2006 mukaan). Näytemateriaalin ja putken sisäpinnan kitkavoima ja sitä lisäävä jäätyminen rajoittavat routanousua. Nurmikolu (2006) on verrannut yhtenäisen ja paloitetun muottiputken vaikutusta routanousuun ja havainnut putken paloittelun vähentävän kitkasta ja jäätymisestä johtuvaa routanousun rajoittavaa vaikutusta. Routanousu todettiin paloitetulla putkella ja täysin vastaavilla materiaaleilla jäädytysajasta riippuen 2-4-kertaiseksi verrattuna yhtenäiseen putkeen.

Nurmikolun (2006) mukaan paloitetulla putkella ongelmaksi saattaa suurilla routanousuilla muodostua se, että näytemateriaali alkaa varista routanousun mukana ilman muottia jääneistä reunoista. Muottirenkaiden erkaneminen aiheuttaa myös sen, että lämpötila-anturit liikkuvat ja tästä seuraa vähäinen virhe segregatiopotentiaalin tai routimiskertoimen laskentaan. Materiaalin varisemista ei nyt testatuissa näytteissä havaittu siinä määrin, että se olisi muodostunut ongelmaksi.

4.3.3 Koejärjestely

Routanousukokeella ei ole olemassa standardoitua koemenetelmää. Tästä syystä eri menetelmillä saatujen tulosten vertailu on hankalaa. (Nurmikolu 2006.) Tässä tutkimuksessa sovellettua koejärjestelyä on aiemmin käytetty laajalti mm. kalliomurskeiden routimisherkkyyden tutkimuksissa.

Routanousukoelaitteistolla voitiin jäädyttää samanaikaisesti neljä näytettä. Jokaiseen näytteeseen kiinnitettiin ennen kokeen käynnistystä kalibroidut termolankalämpötila-anturit. Jokaiseen näytteeseen kiinnitettiin seitsemän anturia 25 mm välein muottirenkasiin porattuihin reikiin. Anturit olivat reikien kautta suorassa kosketuksessa

tutkittavaan materiaaliin. Näytteiden yläpuolelle oli kiinnitetty siirtymäanturit, jotka mittasivat routanousua.

Aluksi allas täytettiin vedellä ja näytteet kyllästettiin (kuva 4.8) pitämällä niitä vedessä noin yhden vuorokauden ajan ja laskemalla lämpötila noin $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$:een. Tämän jälkeen allas tyhjennettiin niin, että vesi ulottui n. 12 mm näytteiden alapinnan yläpuolelle, millä turvattiin näytteiden lisävedensaanti. Näytteet eristettiin radiaalisten lämpövirtausten minimoimiseksi.



Kuva 4.8. Näytteet kyllästysvaiheen alussa.

Näytteet jäädytettiin (kuva 4.9) lämpöeristetyssä pakastealtaassa ylhäältä alaspäin. Näytteen yläpintojen lämpötila säädettiin tietokoneohjatusti $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$:een ja alapintojen lämpötila $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$:een. Antureiden mittaamat siirtymät ja lämpötilat tallentuivat tulostiedostoon viiden minuutin välein. Jäädytysvaihetta jatkettiin neljän vuorokauden ajan. Routimista vastustavana voimana kokeessa oli ainoastaan ylämäntien aiheuttama 3 kPa:n paine.



Kuva 4.9. Näytteet valmiina jäädytysvaiheen käynnistykseen.

5 TUTKIMUSTULOKSET JA ANALYSOINNIT

5.1 Rakeisuus

5.1.1 Raekokojakautuma

Pesuseulontojen tulosten perusteella piirrettiin jokaiselle 60 näytteelle rakeisuuskäyrä. Liitteessä 5 esitetyt käyrät kuvaavat alusrakenteesta otettujen näytteiden rakeisuuksia, eli pitävät sisällään myös routanousukokeista poistetut yli 31,5 mm rakeet.

Liitteen 5 rakeisuuskäyrästä on esitetty myös nykyiset väli- ja eristyskerroksien rakeisuusvaatimukset. Verrattaessa seulontojen tuloksina saatuja rakeisuuskäyriä ja rakeisuusvaatimuksia voitiin todeta, että 49 näytettä täytti vaatimukset, kun vaihtelualueeksi otettiin välikerroksen ja eristyskerroksen yläosan rakeisuusalueet. Välikerroksen rakeisuusvaatimuksen täytti 39 näytettä, eristyskerroksen yläosan rakeisuusvaatimuksen 30 näytettä ja eristyskerroksen alaosan rakeisuusvaatimuksen 7 näytettä.

Osa rakeisuuskäyristä on epäjatkuvia ja kulmikkaita. Tämä johtuu näytteiden sisältämästä sepelistä, jonka raekokojakauma poikkeaa alusrakenteen materiaalien raekokojakaumasta.

5.1.2 Hienoaines

Alusrakennenäytteiden hienoainespitoisuuden keskiarvo oli 2,8 %. Nykyisten vaatimusten mukaan välikerrosmateriaalissa saa olla korkeintaan noin 5 % ja eristyskerrosmateriaalissa korkeintaan noin 3 % alle 0,063 mm rakeita. Näytteistä 92 % täyttää hienoaineksen määrän osalta välikerrosmateriaalin vaatimukset ja 65 % eristyskerrosmateriaalin vaatimukset. Esitetyt hienoainespitoisuudet pitävät sisällään routanousukoenäytteiden tiivistyksessä syntyneen hienoaineksen. (luku 4.2).

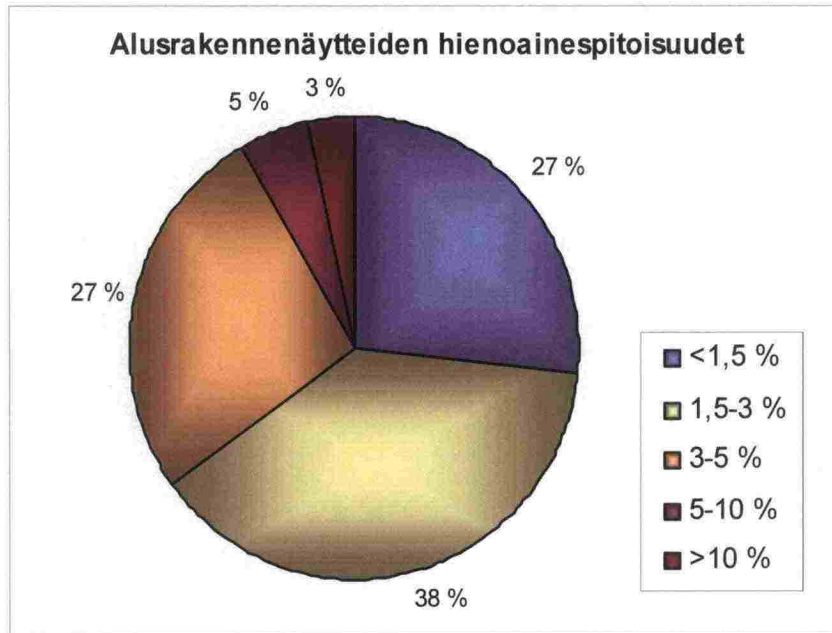
Muihin näytteisiin verrattuna suuria hienoainespitoisuuksia määritettiin seuraavilla näytteillä.

- 55 (Viiala–Mattila) 15,5 %
- 37u (Liminka–Kempele) 10,9 %.

Vähäisimmät hienoainespitoisuudet määritettiin seuraavilla näytteillä:

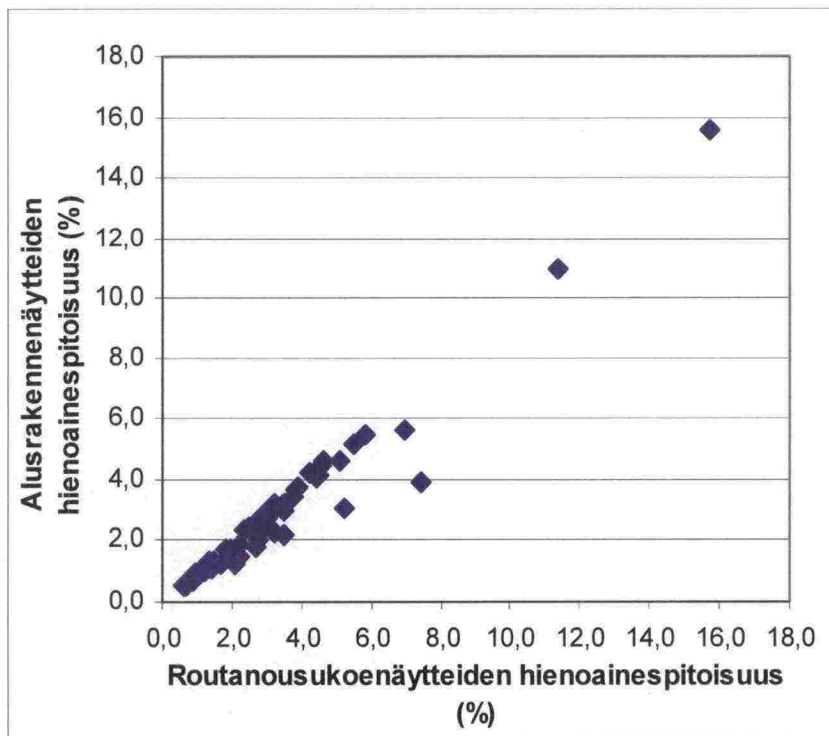
- 32 (Kannus–Eskola) 0,5 %
- 27 (Kilpua–Vihanti) 0,6 %
- 31 (Kannus–Eskola) 0,7 %
- 15 (Utti–Kaipiainen) ja 39 (Karhukangas–Ylivieska) 0,8 %
- 13 (Jutila–Järvelä) ja 29 (Kruunupyy–Kokkola) 0,9 %

Alusrakennenäytteiden hienoainespitoisuuksien jakaumat on esitetty kuvassa 5.1. Routanousukokeessa käytettiin alusrakenteesta otettuja näytteitä, joista oli seulottu pois yli 31,5 mm rakeet. Tästä syystä routanousukokeessa olleiden näytteiden hienoainespitoisuudet poikkeavat hieman alkuperäisten näytteiden hienoainespitoisuuksista. Alkuperäisten alusrakennenäytteiden ja routanousukoenäytteiden sisältämät alle 0,063 mm rakeiden osuudet on esitetty liitteessä 4.



Kuva 5.1. Alusrakennenäytteiden hienoainespitoisuudet.

Routanousukokeessa olleiden näytteiden hienoainespitoisuuden keskiarvo oli 3,2. Kuvasta 5.2 voidaan todeta, että routanousukokeessa olleissa näytteissä oli hieman enemmän hienoainesta kuin alusrakennenäytteissä. Routanousukoenäytteiden hienoainespitoisuuteen vaikutti luonnollisesti se, että niistä oli poistettu yli 31,5 mm rakeet.



Kuva 5.2. Routanousukoe- ja alusrakennenäytteiden hienoainespitoisuuksien vertailu.

5.2 Vesipitoisuus

Alusrakenteesta otettujen näytteiden sekä routanousukoenäytteiden vesipitoisuudet on esitetty liitteessä 4. Näytteiden vesipitoisuuksien keskiarvo oli 4,1 %. Tyypillisin vesipitoisuus vaihteli 2–5 % välillä, johon sijoittui 78 % näytteistä.

Suurimmat vesipitoisuudet olivat Viiala–Mattila-välin näytteen (näyte 55) 12 % ja Oulainen–Kilpua-välin näytteen (näyte 26) 13 %. Viiala–Mattila-välin näytteessä oli paljon alle 0,063 mm hienoainesta, joka sitoi vettä. Oulainen–Kilpua-välin näytteenotto paikalla kuivatuksessa oli puutteita, sillä vettä tulvi jatkuvasti näytteenottokuopan pohjalle, minkä vuoksi vesipitoisuus nousi suureksi.

5.3 Routanousukoe

5.3.1 Tulosten tulkinta

Routanousukokeissa tarkasteltiin alusrakennekerroksista otettuja näytteitä, joista oli seulottu pois yli 31,5 mm raekoot. Näytteiden tiedot on esitetty liitteessä 4.

Routanousukoe voidaan jakaa kahteen vaiheeseen. Vaihetta routarajan edetessä alaspäin kutsutaan ”transient freezing” -vaiheeksi ja routarajan pysähtyttyä alkavaa vaihetta ”stationary freezing” -vaiheeksi. (Nurmikolu 2006.) Segregaatiopotentiaali tulisi määrittää hetkellä, jolloin vaihe muuttuu toiseksi (Konrad 1980 Nurmikolun 2006 mukaan). Vaiheiden muutoskohta on usein kuitenkin epämääräinen määriteltävä, koska muutos ei tapahdu jyrkästi vaan vähitellen. (Nurmikolu 2006.)

Routanousukokeiden tuloksista käytetään tässä tutkimuksessa routimisherkkyyden kuvaamiseen routanousua yhden (h_{24h}) ja neljän (h_{96h}) vuorokauden jäädytyksen jälkeen sekä routimiskerrointa SP_o (vrt. luku 3.1.4). Näiden lisäksi routimisherkkyyden kuvaamiseen voidaan käyttää useita muitakin mittaustuloksista saatavia ja laskettavia parametreja.

Routanousun suuruus saadaan suoraan siirtymämittauksista. Kuvassa 5.3 on esitetty routimaton ja routunut näyte routanousukokeen jälkeen. Routimiskertoimen määrittämiseen aiheuttaa lievää epätarkkuutta se, että sulan näytteenosan korkeuden määrittämiseen sisältyy pieni virhe, koska lämpötila-anturit liikkuvat routanousun mukana kauemmas toisistaan käytettäessä paloiteltua muottia ja antureiden etäisyys tämän jälkeen eroaa alkuperäisestä 25 mm:stä. Virhe on kuitenkin merkityksetön ottaen huomioon jo epävarmuuden routarajan vakiintumisen arvioinnissa. (Nurmikolu 2006.) Tulosparametrien virherajoja on käsitelty tarkemmin Nurmikolun (2006) julkaisussa.



Kuva 5.3. Kaksi näytettä routanousukokeen jälkeen. Vasemmalla routimaton näyte ja oikealla routinut näyte.

Nurmikolu (2006) on täydentänyt ISSMFE:n (1989) segregatiopotentiaaliin perustuvaa routimisherkkyuden luokittelua (taulukko 5.1). Täydentäminen on tehty routimiskertoimen ja muiden parametrien korrelaatioyhtälöiden perusteella. Käytetyt tulospaarametrit riippuvat osin koejärjestelyistä.

Taulukko 5.1. Routimisherkkyuden luokittelu (Nurmikolu 2006.)

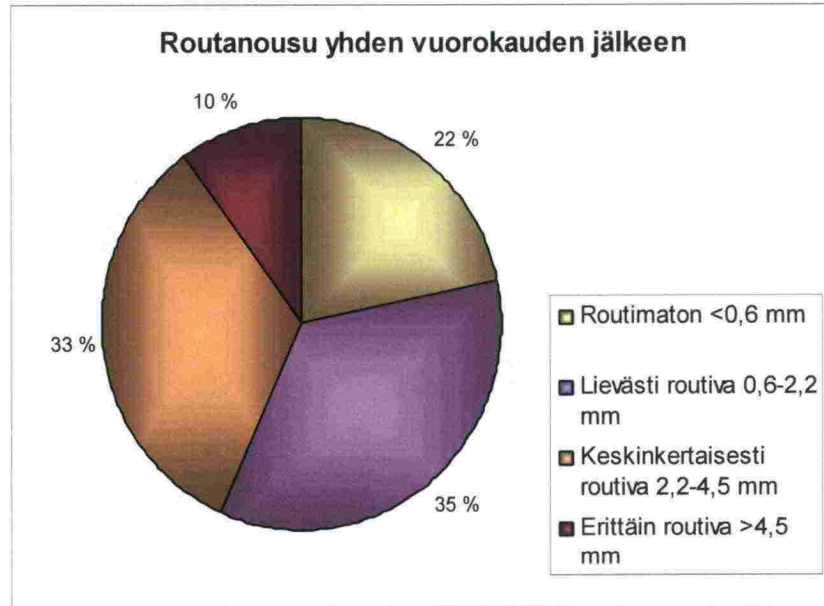
	Routimiskerroin SP_o (mm^2/Kh)	h_{24h} (mm)	h_{96h} (mm)
Routimaton	< 0,5	< 0,6	< 1,2
Lievästi routiva	0,5–1,6	0,6–2,2	1,2–3,7
Keskinkertaisesti routiva	1,6–3,3	2,2–4,5	3,7–7,4
Erittäin routiva	> 3,3	> 4,5	> 7,4

Nurmikolun (2006) yleisesti routimattomina pidetyille materiaaleille tekemissä kokeissa voitiin vain yksittäisiä näytteitä todeta täysin routimattomiksi taulukon 5.1 perusteella. Tästä syystä routimattomuuden merkitys käsitteenä on lähinnä teoreettinen ja tulisikin tarkastella käytännöllistä routimattomuutta, eli kyseisissä rakenteellisissa olosuhteissa sallittuja routanousuja ja niiden ylittymisen seurauksia. Ratarakenteen rakennekerros-materiaalien käytännöllisen routimattomuuden rajoiksi Nurmikolu (2006) ehdottaa routimiskertoimen arvoa $1,1 \text{ mm}^2/\text{Kh}$ ja sitä vastaavaa neljän vuorokauden routanousun arvoa 2,2 mm.

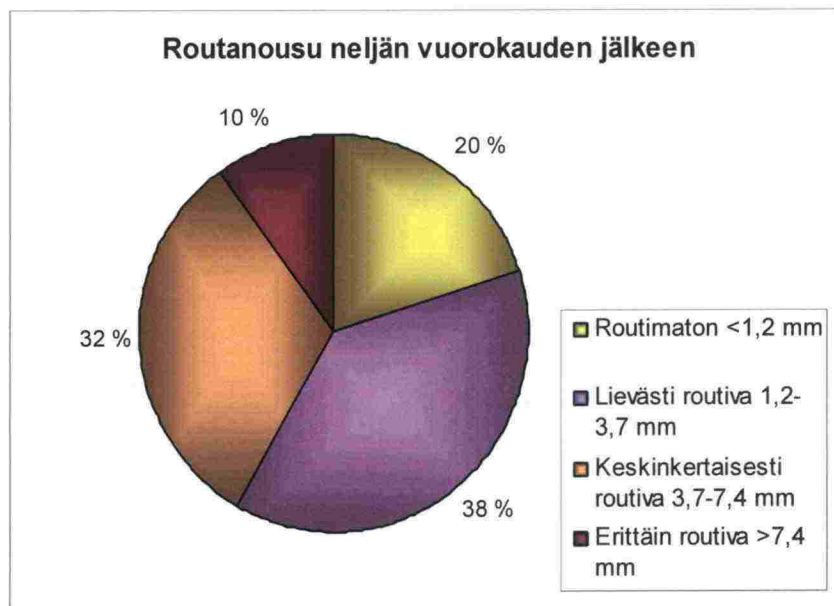
5.3.2 Tulokset

Routanousukokeissa havaittujen routanousujen keskiarvo oli 2,2 mm yhden vuorokauden jälkeen ja 4,0 mm neljän vuorokauden jälkeen. Routanousukokeiden tulokset on esitetty liitteessä 4.

Taulukon 5.1 mukaisten rajojen osuudet yhden ja neljän vuorokauden routanousuille ovat kuvien 5.4 ja 5.5 mukaiset. Näytteet jakaantuvat routanousujen perusteella melko tasaisesti samoihin routivuusluokkiin.



Kuva 5.4. Routanousukokeissa mitatut routanousut yhden vuorokauden jälkeen jaoteltuna taulukon 5.1 mukaisiin luokkiin.



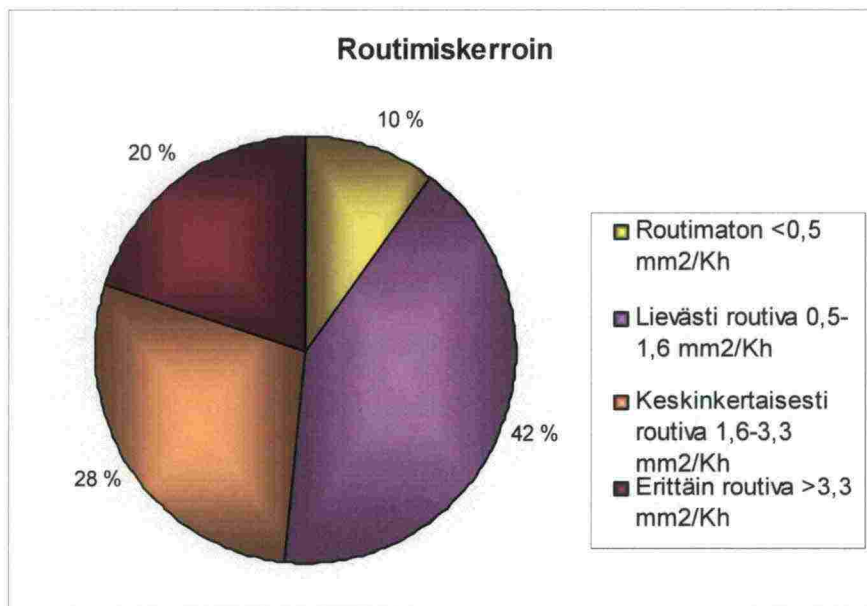
Kuva 5.5. Routanousukokeissa mitatut routanousut neljän vuorokauden jälkeen jaoteltuna taulukon 5.1 mukaisiin luokkiin.

Suurimpia routanousuja neljän vuorokauden jälkeen mitattiin seuraavilla näytteillä:

- 55 (Viiala–Mattila) 14,3 mm
- 2 (Suoniemi–Karkku) 12,7 mm
- 9 (Viiala–Mattila) 11,6 mm
- 37u (Liminka–Kempele) 10,8 mm
- 59 (Suoniemi–Karkku) 10,7 mm

Kaikki yllä listatut näytteet olivat alusrakenteesta ylemmältä tasolta otettuja näytteitä. Samoissa kohteissa alemmalta tasolta otetuissa näytteissä mitattiin routanousuja, joiden mukaan näytteet olivat keskinkertaisesti routivia.

Routimisherkkyyden luokittelu routimiskertoimen perusteella johti samansuuntaisiin tuloksiin verrattaessa yhden tai neljän vuorokauden jälkeisen routanousun mukaan tehtyyn luokitteluun. Suurin ero oli kaikkein routivimpaan luokkaan sijoittuvien näytteiden määrässä, joka oli suurin routimiskertoimen perustuvassa luokittelussa. Routimiskertoimen määrittämiseen liittyy huomattavaa epävarmuutta (ks. luvut 4.3.2 ja 5.3.1) ja monissa tapauksissa routimiskertoimelle määritetty arvo sijoittuu luokkien raja-alueelle. Määritetyt routimiskertoimet on esitetty liitteessä 4. Routimiskertoimien keskiarvoksi saatiin $2,1 \text{ mm}^2/\text{Kh}$. Taulukon 5.1 routivuusluokittelun mukaiset osuudet routimiskertoimelle on esitetty kuvassa 5.6.



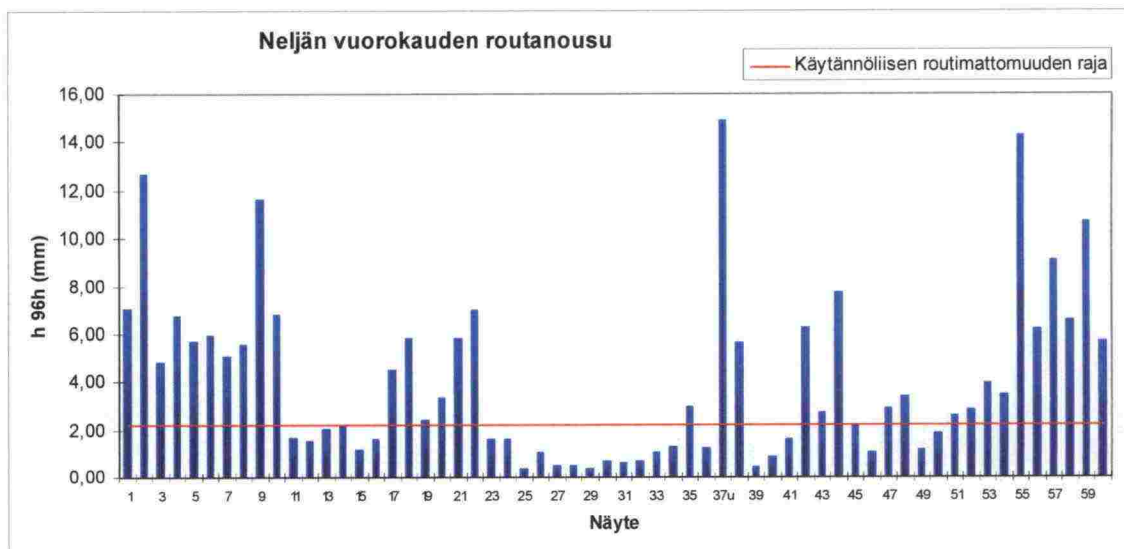
Kuva 5.6. Routanousukokeissa määritettyjen routimiskertoimien osuudet taulukon 5.1 mukaisessa luokittelussa.

Suurimpia routimiskertoimia määritettiin seuraaville näytteille:

- 2 (Suoniemi–Karkku) $6,8 \text{ mm}^2/\text{Kh}$
- 55 (Viiala–Mattila) $6,6 \text{ mm}^2/\text{Kh}$
- 37u (Liminka–Kempele) $6,5 \text{ mm}^2/\text{Kh}$
- 9 (Viiala–Mattila) $5,6 \text{ mm}^2/\text{Kh}$
- 57 (Suoniemi–Karkku) $5,3 \text{ mm}^2/\text{Kh}$

Näytteet, joille määritettiin suurimpia routimiskertoimia, ovat samoja näytteitä, joille mitattiin myös suurimpia routanousuja.

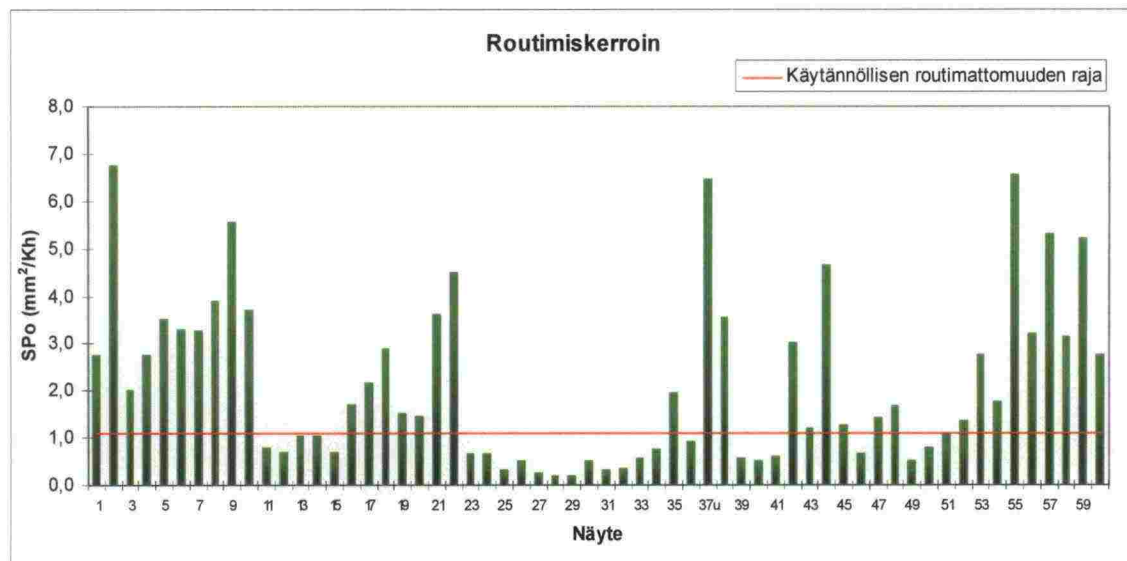
Nurmikolun (2006) ehdottaman ratarakenteen käytännöllisen routimattomuuden rajan, eli 2,2 mm neljän vuorokauden routanousulle, ylitti 60 % näytteistä. Kuvassa 5.6 on esitetty neljän vuorokauden routanousut ja käytännöllisen routimattomuuden raja.



Kuva 5.7. Mitatut neljän vuorokauden jälkeiset routanousut verrattuna käytännöllisen routimattomuuden rajaan.

Neljän vuorokauden routanousuna määritellyn käytännöllisen routimattomuuden rajan, 2,2 mm, ylittivät kaikki materiaalit, jotka yhden ja neljän vuorokauden routanousun perusteella luokiteltiin keskinkertaisesti ja erittäin routiviksi sekä myös kaksi kolmasosaa lievästi routiviksi luokitelluista materiaaleista. Samalta näytteenotto paikalta eri syvyyksiltä otetut näytteet olivat routanousun mukaisen luokittelun mukaan yleensä samassa tai toisiaan seuraavissa luokissa.

Kuvassa 5.8 on esitetty routimiskertoimet ja käytännöllisen routimattomuuden routimiskertoimen raja 1,1 mm²/Kh. Näytteistä 63 % ylitti rajan 1,1 mm²/Kh. Vain routimattomiksi luokitellut sekä noin ¼ lievästi routivista näytteistä alittavat rajan 1,1 mm²/Kh.



Kuva 5.8. Määritetyt routimiskertoimet ja käytännöllisen routimattomuuden raja $1,1 \text{ mm}^2/\text{Kh}$.

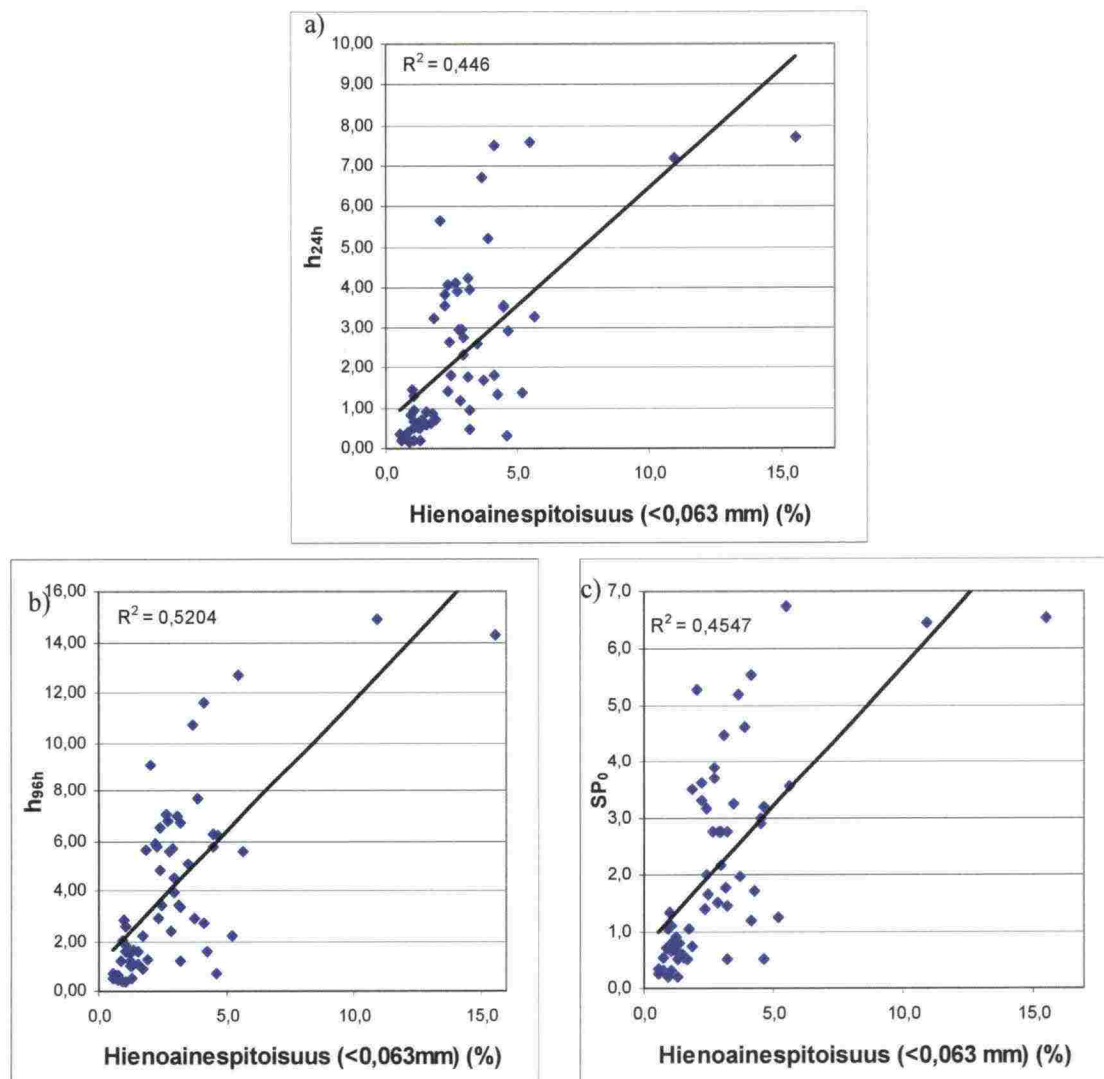
5.4 Hienoainespitoisuuden vaikutus routimisherkkyyteen

Hienoainespitoisuuden ja routanousun tai hienoainespitoisuuden ja routimiskertoimen välillä ei havaittu erityisen vahvaa riippuvuutta. Myös aiemmissa tutkimuksissa (Nurmikolu 2006) on todettu suurta hajontaa sora- ja hiekkamateriaalien hienoainespitoisuuden ja routimisherkkyyttä kuvaavien suureiden välillä (kuva 3.6).

Verrattaessa hienoainespitoisuuden sekä yhden ja neljän vuorokauden routanousujen riippuvuutta saatiin korrelaatiokertoimiksi 0,45 ja 0,52. Kuvissa 5.9 a ja b on esitetty hienoainespitoisuuden sekä yhden ja neljän vuorokauden routanousujen riippuvuus toisistaan.

Routimiskertoimen ja hienoainespitoisuuden riippuvuus toisistaan ei juurikaan poikkea hienoainespitoisuuden ja routanousujen riippuvuudesta. Korrelaatiokertoimeksi saatiin 0,45 (kuva 5.9c).

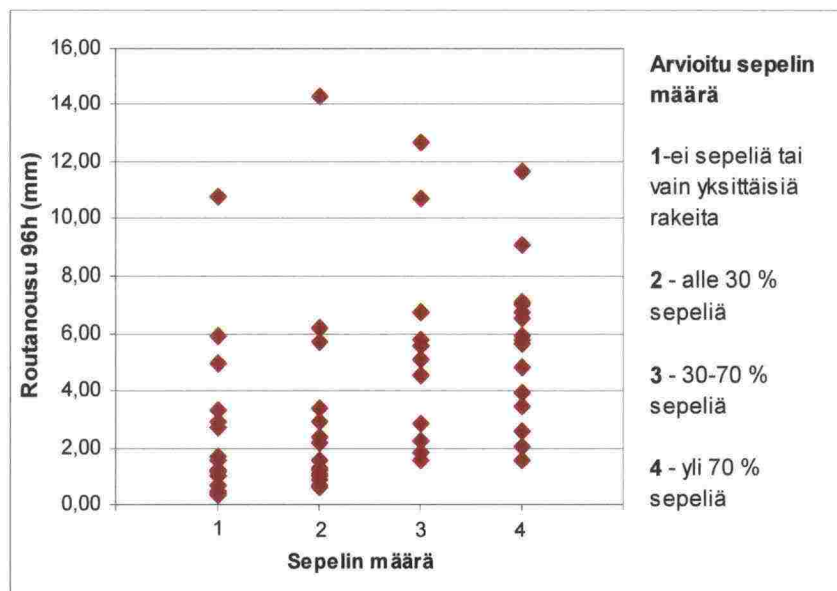
Kuvien 5.9a, b ja c nojalla voidaan todeta, että alusrakennemateriaalien routimisherkkyyttä ei juurikaan voida arvioida sen sisältämän hienoainemäärän perusteella. Korrelaatiokertoimien on havaittu olevan suurempia hienoaineksen hienoimmilla partikkeleilla (alle 0,02 mm ja alle 0,002 mm rakeet) (Nurmikolu 2006).



Kuva 5.9. Hienoainespitoisuuden ja 24 tunnin jälkeisen routanousun (a), hienoainespitoisuuden ja 96 tunnin jälkeisen routanousun (b), sekä hienoainespitoisuuden ja routimiskertoimen SP_0 (c) riippuvuus toisistaan.

5.5 Sepelimäärän vaikutus routivuuteen

Näytteiden sisältämän sepelin määrä arvioitiin silmämääräisesti (liite 3) ja sitä verrattiin neljän vuorokauden routanousuun. Kuvassa 5.10 on esitetty mitatut routanousut ja mihin luokkiin näytteet on sepelimäärän perusteella luokiteltu. Hienontunutta sepeliä oli suurimmassa osassa näytteitä, mutta suuria määriä vain joissakin näytteissä. Kuvasta voidaan päätellä, että hienontuneen sepelin määrällä ei ole juurikaan merkitystä näytteiden routivuuden kannalta.



Kuva 5.10. Näytteiden sisältämän sepelin määrän vaikutus routanousuun. X-akselin asteikolla 1–4 on arvioitu alusrakennenyhteiden sisältämän sepelin määrää.

5.6 Yhteenvedo eri rataosilta otetuista näytteistä

Seuraavassa on käsitelty lyhyesti rataosittain otettuja näytteitä ja niillä saatuja tuloksia. Tulokset ovat paikallisia, eikä niiden perusteella voida tehdä arvioita koko rataosasta. Routivuuden luokittelussa on huomattava, että kansainvälisesti tai edes kansallisesti yhtenäinen luokittelu puuttuu. Tässä yhteydessä routivuusluokittelussa sovellettiin ISSMFE:n (1989) esittämää luokitusta, joka on Nurmikolun (2006) toimesta mukautettu tässä työssä käytettyyn routanousukoejärjestelyyn sopivaksi. Luokittelun varmentaminen ja sitominen nimenomaan ratarakenteeseen soveltuvaksi edellyttää radalla tehtäviä kenttämittauksia.

- Tampere–Kokemäki-rataosalta Suoniemi–Karkku-väliltä samalta alueelta otetut kuusi näytettä (1–2, 57–60) olivat erittäin tai keskinkertaisesti routivia. Erittäin routivat näytteet oli otettu alusrakenteesta ylempältä tasolta.
- Tampere–Orivesi-rataosalta otetut neljä näytettä (3–4, 53–54) olivat keskinkertaisesti routivia lukuun ottamatta näytettä 54, joka oli lievästi routiva.
- Toijala–Tampere-rataosalta otettiin neljä näytettä (9–10, 55–56). Alusrakenteesta alemmalla tasolla otetut näytteet olivat keskinkertaisesti routivia ja ylempältä tasolta otetut näytteet erittäin routivia. Ilman routimishavaintoa Roudan hallintaraportissa 2007 (Ratahallintokeskus 2007) olleesta kohdasta otetun näytteen 55 (Via–Mat 156+894) routimisherkyys ja hienoainespitoisuus olivat suuria verrattuna muihin näytteisiin.
- Toijala–Turku-väliltä otettiin neljä näytettä (5–8), jotka olivat routanousun perusteella luokiteltuina keskinkertaisesti routivia ja routimiskertoimen perusteella erittäin routivia.

- Helsinki–Turku-rataosalta otetuista näytteistä yksi (42, Slo–Po 155+648) oli keskinertaisesti routiva ja yksi (44, Slo–Po 164+964) erittäin routiva. Molemmat näytteet oli otettu alusrakenteesta alemmalta tasolta. Loput näytteistä olivat lievästi routivia (41,43, 45) tai routimattomia (46).
- Riihimäki–Lahti-rataosalta otettiin neljä näytettä (11–14), jotka olivat lievästi routivia.
- Kouvola–Lappeenranta-rataosalta otetuista kuudesta näytteestä yksi oli routimaton, kolme lievästi routivia ja kaksi keskikertaisesti routivia.
- Kouvola–Pieksämäki-rataosalta Kalvitsan ratapihan eteläpuolelta otetut kaksi näytettä (21 ja 22) olivat keskinkertaisesti ja erittäin routivia.
- Jyväskylä–Pieksämäki-rataosalta otettiin kaksi näytettä (25 ja 26), jotka olivat lievästi routivia. Routanousukokeessa näytteet eivät ylittäneet käytännöllisen routimattomuuden rajaa.
- Jyväskylä–Äänekoski-rataosalta otetuista neljästä näytteestä yksi (49) oli routimaton ja kolme (50–52) lievästi routivia.
- Pieksämäki–Kuopio-rataosalta otetut näytteet (47–48) olivat lievästi routivia.
- Seinäjoki–Oulu-rataosalta otetuista 16 näytteestä (25–40) ainoastaan kolmen todettiin olevan routimisherkkiä. Kuitenkin näytteet 37 ja 38 (Lka–Kml 732+933) olivat erittäin routivia. Näissä näytteissä myös hienoainespitoisuus oli suuri. Kohteista (näytteet 29–32 ja 35–36), joista oli havainto ainoastaan raiteentarkastusmittauksissa, oli näyte 35 lievästi routiva ja muut routimattomia.

6 PÄÄTELMÄT JA JATKOTUTKIMUSSUOSITUKSET

6.1 Yleisarvio alusrakennemateriaalien routivuudesta

Tämän tutkimuksena tarkoituksena oli toimia esiselvityksenä radan alusrakenteeseen käytettyjen materiaalien routimisherkkyydestä. Tutkimuksen pohjalta on tavoitteena tehdä tarkempia tarkasteluja rataverkolla. Tässä tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella voidaan päätellä, että ratojen alusrakenteissa on routimisherkkää materiaalia ja osa rataverkolla havaituista routahaitoista todennäköisesti johtuu alusrakennemateriaalien routimisesta.

Useista vaiheittaisista ja eri menetelmillä tehdyistä rakenteen kunnossapito- ja perusparannustöistä johtuen alusrakenteessa käytetty materiaali saattaa vaihdella suhteellisen pienilläkin välimatkoilla, joten tulosten perusteella ei voida arvioida koko rataosan alusrakenteen routimisherkkyyttä.

Tuloksista voidaan päätellä, että alusrakenteessa esiintyy routimisherkkää materiaalia monissa paikoissa, sillä noin 60 % näytteistä ylitti Nurmikolun (2006) radan rakennemateriaaleille arvioiman käytännöllisen routimattomuuden rajan. Erittäin routiviksi arvioitiin neljän vuorokauden routanousun perusteella 10 % näytteistä ja routimiskertoimen perusteella 20 % näytteistä. Routivuuden luokittelussa sovellettiin Nurmikolun (2006) ISSMFE:n (1989) luokituksesta jalostamaa routivuusluokittelua. Routivuuden luokittelussa on käytössä myös muunlaisia jakoja eri routivuusluokkiin. Käytössä on myös routanousukoejärjestelyjä, jotka poikkeavat tässä tutkimuksessa käytetyistä. Luokittelu- ja koejärjestelyerojen vuoksi tulokset eivät ole lukuarvoiltaan suoraan vertailukelpoisia keskenään.

Kunnostustoimenpiteiden kannalta on oleellista tunnistaa, johtuuko routiminen alusrakenteesta. Mikäli alusrakenne routii, routahaittoja voidaan todennäköisesti pienentää kuivatusta parantamalla, kun taas routalevytyksessä saattaa jopa lisätä ongelmia.

Alusrakennemateriaaleista määritettiin myös rakeisuusjakautuma. Toisin kuin kalliomurskeilla (Nurmikolu 2006) alusrakennemateriaaleina käytettyjen luonnollisten maalajien routimisherkkyyks ei ole erityisen vahvasti riippuvainen alle 0,063 mm rakeiden osuudesta materiaalissa. Vaihtelu voi johtua eroista kiviaineksessa ja rasituksessa, jolle kiviaines on altistunut. Olosuhteet, joissa luonnolliset maalajit ovat vuosituhansia olleet, poikkeavat toisistaan ja osa kiviaineksista on alttiimpia rapautumiselle. Rasituksen seurauksena kiviainesten huokoisuus ja vedensitomiskyky ovat lisääntyneet ja tämän seurauksen routimisherkkyyks on kasvanut.

Näytteistä otettiin seulonnan yhteydessä talteen alle 0,063 mm hienoaines. Talteen otetuista hienoaineksista on mahdollista tutkia myös pintaominaisuuksia ja partikkeli-kokojakaumia.

6.2 Jatkotutkimussuositukset

Routimisesta aiheutuvan raiteen epätasaisuuden hallinta on edellytys raideliikenteen palvelutason nostamiselle ja edelleen raideliikenteen lisäämiselle, jolla on positiivisia vaikutuksia ympäristöön mm. päästöjen, energian kulutuksen ja ilmastonmuutoksen

hillinnän kannalta. Näistä syistä radan routimisen ymmärtämiseen ja hallintaan tähtäävä tutkimus on tärkeää.

Keskeinen jatkotutkimustarve kohdistuu routimisesta aiheutuvan raiteen epätasaisuuden tarkasteluun kenttäolosuhteissa. Kenttämittausten tueksi yleiskäsitystä rakennekerros- materiaalien routivuuden merkittävydestä ratojen routahaittojen synnyssä tulisi täydentää raiteentarkastusmittausten tulosten tarkastelulla. Raiteentarkastuksen vanhoista tuloksista tulisi selvittää, missä ratarakenteen kerroksista routiminen on tapahtunut. Vertaamalla valikoiduissa routineissa kohteissa pitkän aikavälin (n. 20 vuotta) raiteentarkastusmittausten tuloksia, vuosittaisia pakkasmääriä ja laskettuja roudan syvyyksiä sekä maatutkauksessa määritettyjä rakennepaksuuksia voidaan arvioida, mikä rakennekerroksista on routiva.

Kenttätutkimuksissa tulisi pyrkiä määrittelemään laboratoriossa saavutettujen tulosten vastaavuus todellisiin olosuhteisiin. Muutama kohteisiin tulisi järjestää roudan syvyys- ja routanousumittaukset, joissa seurataan roudan etenemistä ja kullakin routarajan tasolla aiheutuvaa routanousua. Tällöin voidaan havainnoida, mikä radan rakenneosista aiheuttaa routanousua ja epätasaisuutta. Tämän työn näytteenottokohteisiin kohdistetuissa kenttämittauksissa on mahdollista verrata routanousukoelaitteistossa mitattujen routimisherkkyyksien vastaavuutta kenttäolosuhteisiin sekä selvittää olosuhdetekijöiden vaikutusta routimiseen. Nurmikolun (2006) esittämän radan rakennemateriaalien käytännöllisen routimattomuuden rajan pätevyyttä tulisi tarkastella kenttämittauksissa. Mittauksissa tulisi tarkastella myös routanousun epätasaisuutta ja sulamispehmenemisen merkitystä. Myös nopeasti kehittyneen maatutkatekniikan soveltamismahdollisuuksia alusrakenteen ja pohjamaan routimisherkkyyden arviointiin kannattaa tarkastella.

Jatkotutkimuksissa on pyrittävä radan rakennemateriaalien routivuuskriteerin määrittelyyn sekä tukikerroksen että alusrakenteen osalta. Routivien kohteiden routivuuden merkittävyyden arviointia varten tulisi lisäksi saada aikaan perusteltu routivuusluokittelu, jota voidaan soveltaa sekä rakennekerros- materiaaleihin että pohjamaahan. Ehdotetut jatkotutkimukset tähtäävät roudan vaikutusmekanismin parempaan ymmärtämiseen ja sitä kautta radan routasuojaus-, kunnossapito- ja perusparannus- suunnittelun kehittämiseen.

LÄHDELUETTELO

Aittomäki, A. 1986. Routa maa- ja pohjarakentamisessa. RIL K66-1986. RIL, Helsinki. s. 5-22.

Arenson, L.U., Segó, D.C. 2006. The effect of salinity on the freezing of coarse-grained sands. *Canadian Geotechnical Journal* 43, 3, pp. 325-337.

Banverket. 2007. Järnvägs AMA 98, Anläggning, Version 2. 3s. 22 bilaga.

Fagerholm, K. 1997. Rakennetut radat ja geotekniikka. Sisäinen muistio. Oy Vr-Rata Ab.

Heikkinen, P. 2007. Oy VR-Rata Ab Radantarkastuspalvelut. Haastattelu 27.6.2007.

Hermansson, Å., Guthrie, W. 2005. Frost heave and water uptake rates in silty soil subject to variable water table height during freezing. *Cold Regions Science and Technology* 43, 3, pp. 128-139.

InfraRYL 2006. 2006. Rakennustieto Oy, Helsinki. 624 s.

InfraRYL tulossa 2008. Tiedot vuonna 2008 ilmestyvästä InfraRYL:n päivityksestä.

ISSMFE (International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering). Technical Committee on Frost, TC-8. 1989. Frost in Geotechnical Engineering. VTT Symposium 94, Saariselkä, Finland 13-15.3.1989. VTT, Espoo. Vol 1, pp 15-45.

Jernbaneverket. 2006. Underbygning, Banelegeme. 15 s.

Jernbaneverket. 2004. Underbygning, Frost. 17 s.

Keinonen, L. 1964. Ratojen routimisesta ja routimishaittojen estämisestä. Maarakennusalan ohjeita ja tiedoituksia N:o 4. Rautatiehallitus, Geoteknillinen osasto, Helsinki. 8 s.

Kolisoja, P., Levomäki, M., Mäkelä, E., ja Niskanen, P. 1999. Radan tukikerroksen ja alusrakenteen kirjallisuustutkimus, 250 kN:n ja 300 kN:n akselipainot. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 6/1999. Ratahallintokeskus, Helsinki. 135 s.

Konrad, J-M. 1980. Frost heave mechanics. Ph.D. Thesis. Edmonton, University of Alberta. 405p. 67 app.

Koskinen, K., Argillander, U., Astone, S., Lavola, S. ja Heikkinen, P. 2006. Raportti pääratojen ja vaihteiden kunnosta kevät 2006. Oy VR-Rata Ab Radantarkastuspalvelut. 53 s.

Kujala, K. 1991. Factors affecting frost susceptibility and Heaving pressure in soils. Ph.D. Thesis. ACTA Universitatis Ouluensis Series C 58. 99p., 5 app.

Kujala, K. 1994. Routanousun mallintaminen. Kirjallisuusselvitys. Tielaitoksen tutkimuksia 2/1994. Tielaitos, Geokeskus, Oulu. 135 s.

Lehtola, K.F. 1952. Rautatienrakennusoppi. Kauppa- ja teollisuusministeriön ammattikasvatusosasto. 271s.

Leimi, P. 1994. Koneellisen raiteentarkastuksen käyttö radan routivien osuuksien kartoittamiseen. Diplomityö. Oulu. Oulun yliopisto, Rakentamistekniikan osasto. 82 s. 4 liites.

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

Myyrä, V. 1970. Roudan eristäminen radassa. Geoteknillinen jaosto 21.1.1970. 9 s. 8 liites.

Myyrä, V. 1973. Perusparannustoimenpiteet radan routimishaittojen poistamiseksi. Rakennustekniikka, nro 6. s. 473–478.

Nieminen, P. 1985. Moreenin hienoaineksen laatu ja sen vaikutus routimisherkkyyteen. Julkaisuja 34. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere. 81 s. 5 liites.

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 routimisherkkyyys. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 9/2006. Ratahallintokeskus, Helsinki. 170 s. 6 liites.

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

Oy VR-Rata Ab Radantarkastuspalvelut. 2006. Seinäjoki–Oulu-vertailukäyrä. Raiteentarkastuksen tulokset. Helsinki.

Rantamäki, M., Jääskeläinen, R., Tammirinne, M. 1979. Geotekniikka. Otatieto, Helsinki. 307 s.

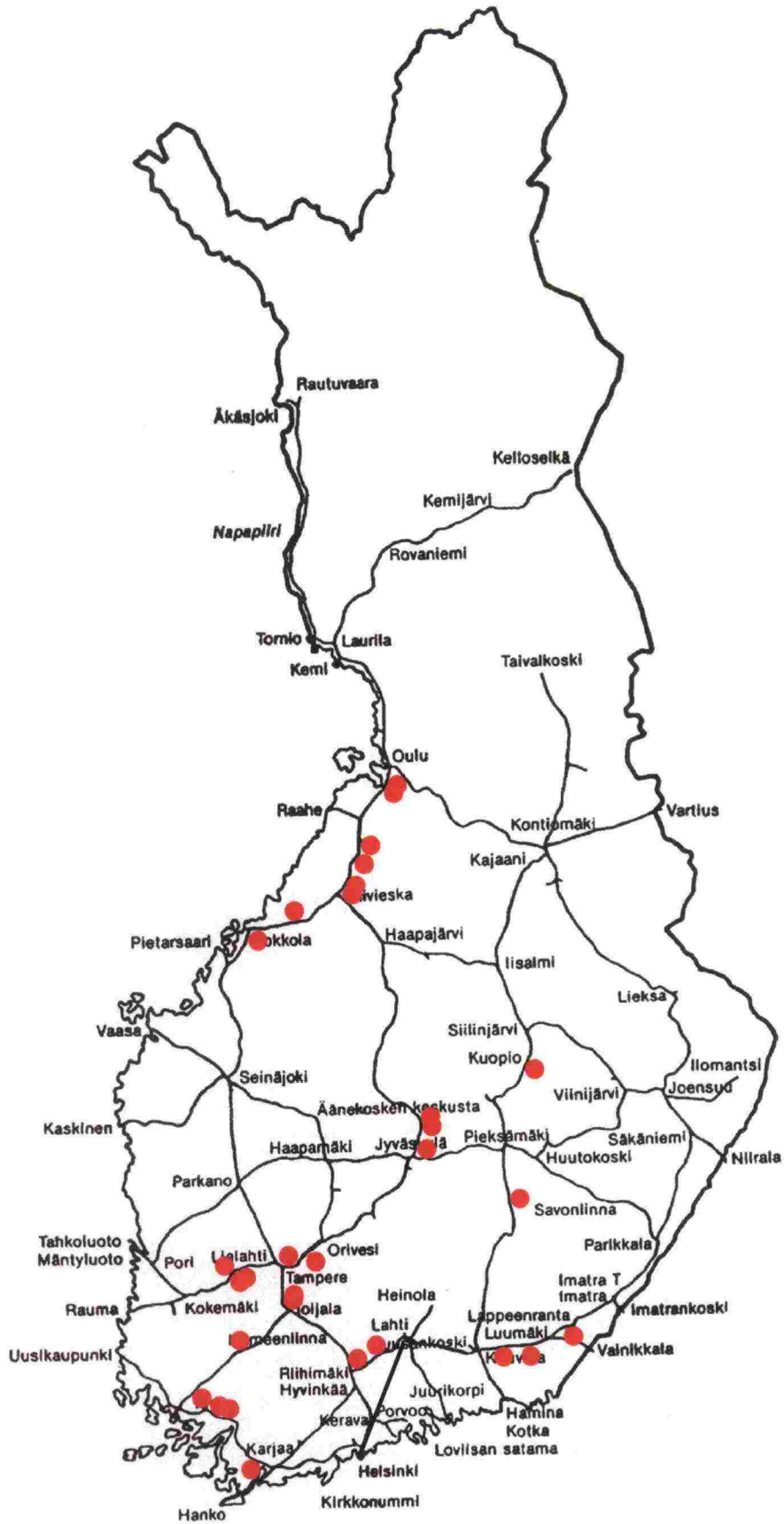
Ratahallintokeskus. 2002. Ratatekniset ohjeet RATO 15 Radan kunnossapito. Helsinki. 63 s.

Ratahallintokeskus. 2004. Päälyysrakennetöiden yleinen työselitys. Helsinki. 40 s.

Ratahallintokeskus. 2005a. Raiteentarkastustulokset ja niiden tulkinta. 22 s.

Ratahallintokeskus. 2005b. Ratatekniset ohjeet RATO 3 Radan rakenne. Helsinki. 44 s. 2 liites.

- Ratahallintokeskus. 2006a. Ratatekniset ohjeet RATO 13 Radantarkastus. Helsinki. 51 s. 11 liites.
- Ratahallintokeskus. 2006b. Verkkoselostus 2008. Helsinki. 119 s.
- Ratahallintokeskus. 2007. Roudan hallintaraportti 2007. Oy VR-Rata Ab, Rautatie-suunnittelu, Helsinki. 21 s. 5 liites.
- Ratahallintokeskus. 2008. Rataverkon kuvaus 7.1.2008. Ratahallintokeskuksen julkaisu F 1/2008. Helsinki.
- Ratateknilliset ohjeet RATO 11. 1978. Helsinki.
- Rautatiehallitus. 1916. Valtionrautatiet 1862–1912. II osa. Helsinki. 733 s.
- Rautatiehallitus. 1937. Valtionrautatiet 1912–1937. II osa. Helsinki. 912 s.
- Rautatiehallitus. 1962. Valtionrautatiet 1937–1962. Helsinki. 854 s.
- Rautatiehallitus, Rataosasto. 1970. Rautatien maarakennustöiden yleinen työselitys. 44 s., 8 liites.
- Rautatievirasto. 2008. Junaturvallisuussääntöön liittyvät tekniset määräykset ja ohjeet, Jtt. Helsinki.
- Silvast, M. 2004. Seinäjoki–Oulu-rataosuuden maatulkaustulkinnat km 600–752. Roadscanners Oy.
- Selig, E.T., Waters J.M. 1994. Track Geotechnology and Substructure Management. Thomas Telford.
- Suomalainen, J. 2007a. Rautatietekniikan käytännön asioita. Luentoaineisto. Rautatie-suunnittelun erikoiskurssi. Tampereen teknillinen yliopisto. 29.5.2007
- Suomalainen, J. 2007b. Oy VR-Rata Ab Rautatiesuunnittelu. Haastattelu 22.8.2007.
- Suomalainen, J. 2008. Oy VR-Rata Ab Rautatiesuunnittelu. Sähköposti 13.2.2008.
- Taivainen, O.A. 1961. Maalajien roudanarkuus ja routimismousu. Rakennusinsinööri, nro 4. s. 175–182.
- Taivainen, O.A. 1956. Roudan esiintyminen rautateillä ja sen vaikutuksesta radan runkorakenteeseen.
- Valtionrautatiet. 1968. Radan poikkileikkaukset.
- Vinson, T.S., Ahmad, F., Rieke, R. 1987. Factors Important to the Development of Frost Heave Susceptibility Criteria for Coarse Grained Soils. Transportation Research Record 1089, pp 124–131.



Rataosa	Liikennepaikka- väli ja ratakilometri	Näyte nro/ Syvyys kv:sta (cm)	Näyte nro/ Syvyys kv:sta (cm)	Etäisyys kiskosta (m)	Rataprofiili Leikkaus/ Penger (L/P)	Sepelin esiintyminen	Huomiot näytteenotto- paikalla: kuivatus, kasvillisuus yms.
Tampere- Kokemäki	Snm-Kru 225+266	1	100	1,7	P	4	- ojissa kasvillisuutta, sivuojarumpu
	Snm-Kru 225+296	57	65		P	4	
	Snm-Kru 225+341	59	58		L	3	- ojissa kasvillisuutta
Tampere- Orivesi	Tpe-Hvs 194+443	3	90	2,1	L	4	
	Hvs-Ov 208+414	53	40	1,9	P	4	- pohjoinen raide uusittu lähiaikoina
Toijala- Turku	Kar-Mri 252+120	5	81	1,7	P	4	- ojissa kasvillisuutta, märkää
	Ur-Hp 179+050	7	123	1,9	P	3	- syvä oja pohjoispuolella
Toijala- Tampere	Via-Mat 156+293	9	61	1,9	L	4	
	Via-Mat 156+894	55	60		P	2	
Riihimäki- Lahti	Ri-Kek 77+925	11	63	2,0	L	1	- ojissa kasvillisuutta
	Jut-Jr 95+584	13	96	2,8	P	4	- kaapelin vuoksi kaivupaikkaa siirrettiin kauemmaksi raiteesta
Kouvola- Lappeenranta	Uti-Kpa 208+785	15	50	2,2	P	1	- ojissa kasvillisuutta
	Kjr-Ta 237+700	17	40	2,5	L	3	- kaapelin asennus käynnissä ja kaapelit jatkänpolulla
	Tap-Lr 273+924	19	47	2,1	P	1	- pohjoisen puolella rakenteesta löytyi vain sepeliä, eteläpuolella alusrakenteen alla noin 10 cm kerros tummaa karkeampaa ainesta
Kouvola- Pieksämäki	Hir-Ksa 330+485	21	48	2,4	L	4	- lähes ratapihalla, sepeliä syvällä ja eristelevyt vastassa
Jyväskylä- Pieksämäki	Vko-Lvt 390+016	23	60	1,8	L	3	- paljon suuria kiviä alusrakenteessa, ojissa kasvillisuutta
	Ou-Kua 663+731	25	60	2,2	L	1	- vettä tulvi näytteenottokuopan pohjalle
	Kua-Vti 677+858	27	30	2,4	P	1	
	Kpy-Kok 539+602	29	40	2,3	P	1	- sepeliä alusrakennemateriaalin alla
	Kns-Ela 599+290	31	83	2,4	P	2	eteläpuolella hienorakeista materiaalia, mutta kaapeli estii näytteenoton.
Seinäjoki- Oulu	Yv-Kgs 639+900	33	28	2,3	P	2	- ojissa kasvillisuutta
	Yv-Kgs 635+890	35	30	2,0	P	1	
	Lka-Kml 732+933	37	32	2,0	P	1	- kivirumpu, jonka kohdalla raide epätasainen, ojissa vettä
	Khg-Yv 623+732	39	62	2,5	P	1	- syvä oja, jossa vettä

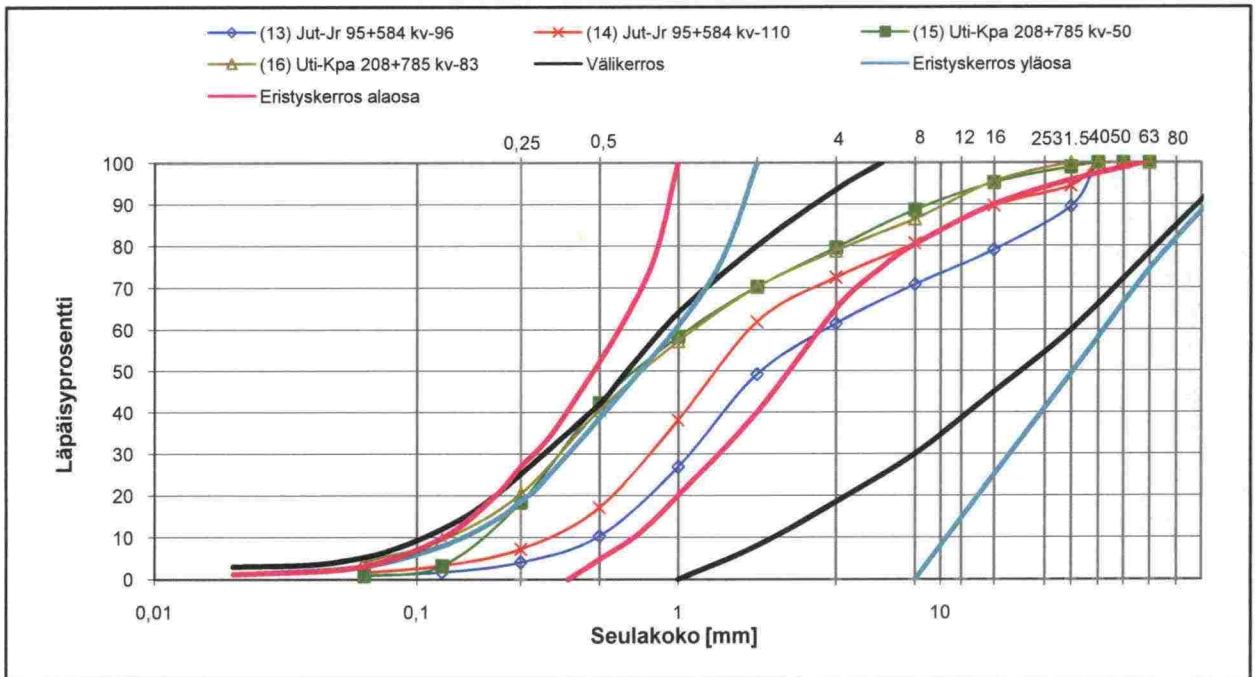
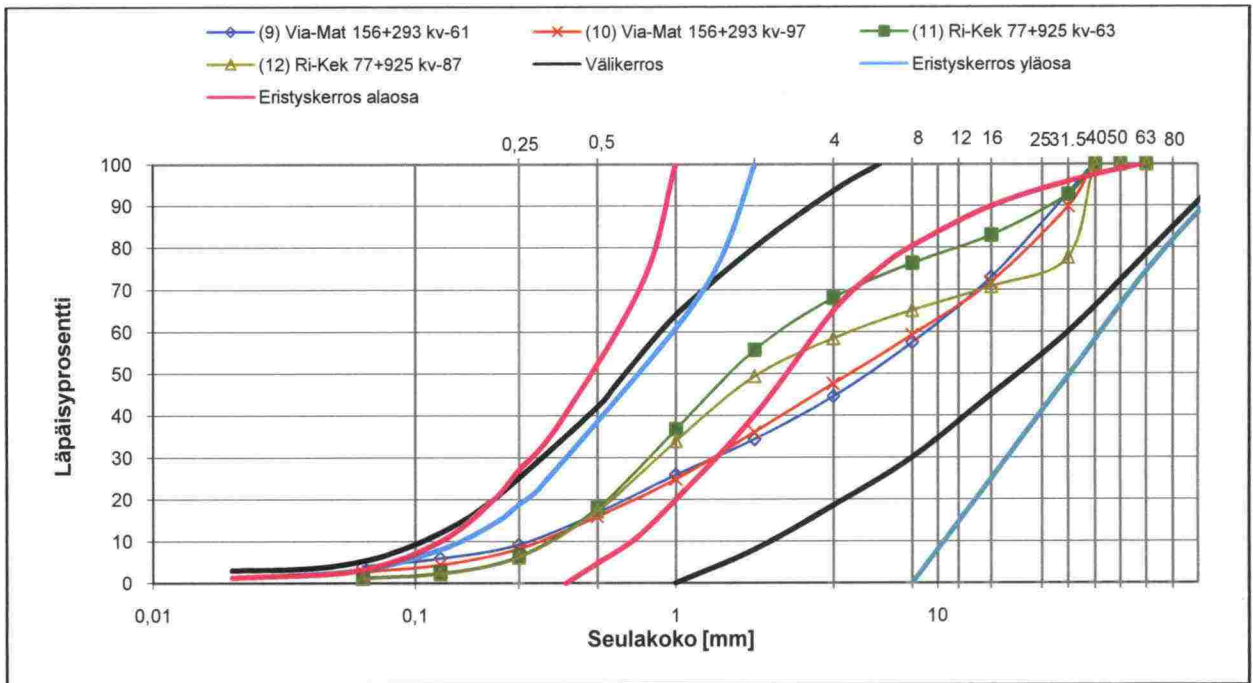
Rataosa	Liikennepaikka- väli ja ratakilometri	Näyte nro/ Syvyys kv:sta (cm)		Etäisyys kiskosta (m)	Rataprofiili Leikkaus/ Penger (L/P)	Sepelin esiintyminen	Huomiot näytteenotto- paikalla: kuivatus, kasvillisuus yms.
		41	42				
Helsinki- Turku	Slo-Po 155+648	41	42	2,2	P	1	
		43	44	2,2	L	2	- kv-50 näyte hienontunutta sepeliä, jota löytyi välikerroksen alta
Pieksämäki- Kuopio	Pku-Erv 97+522	45	46	2,2	L	2	
		47	48	3,0	P	2	
Jyväskylä- Äänekoski	Krm-Kuo 457+231	49	50	1,5	P	2	- rumpu eteläpuolella
		51	52	1,8	P	4	- kaarre, sepeil huonon näköistä

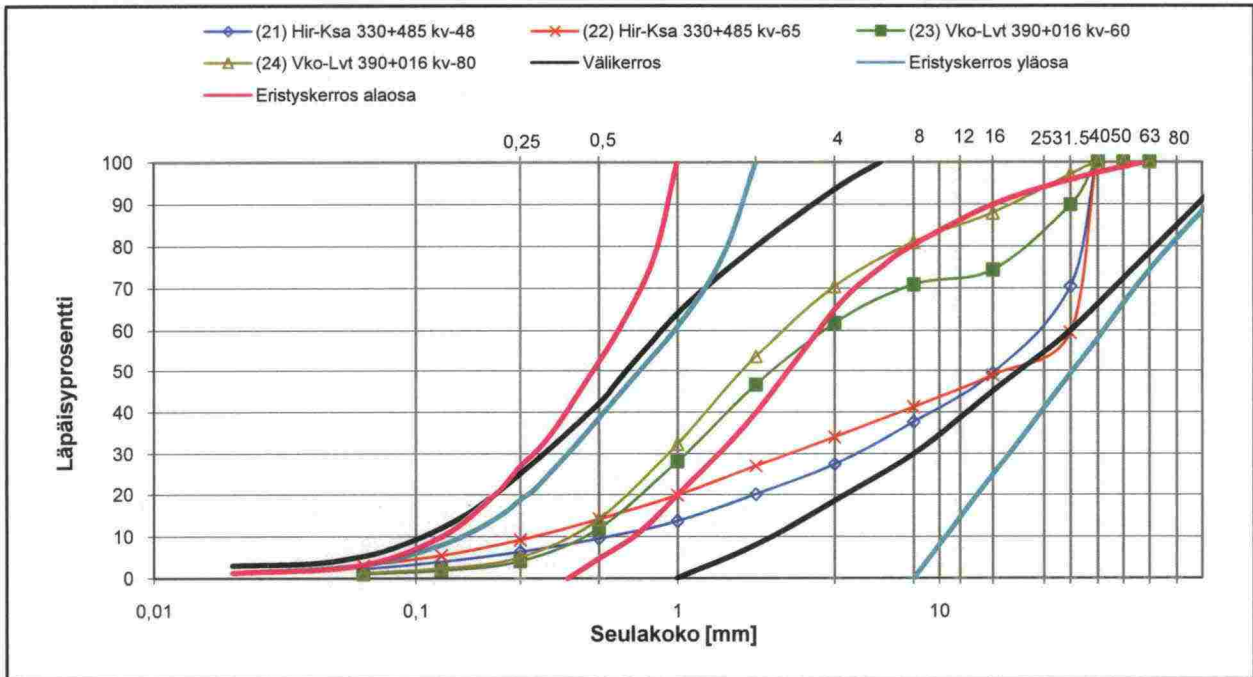
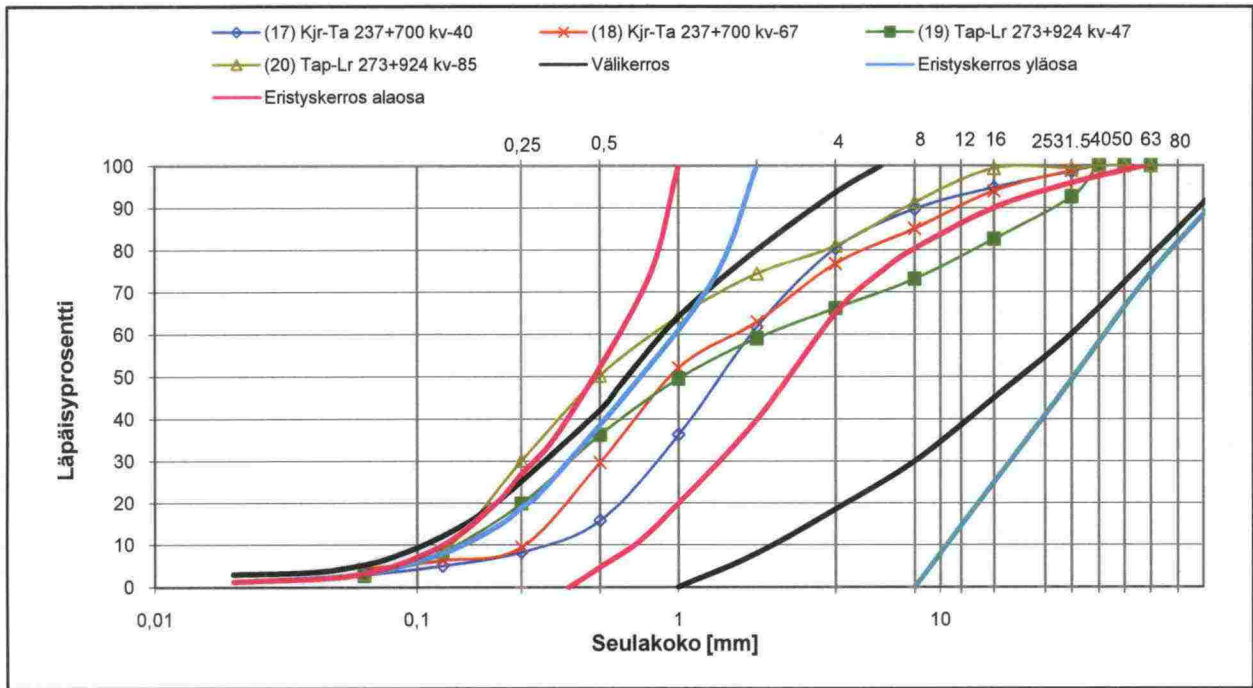
Näytteen tiedot		Routanousukoetulokset										
Rataosa	Liikennepaikka- väli ja ratakilometri	Näyte nro	Näytteenotto- vyys kv:sta (cm)	<0,063 mm (%) routakokeessa	<0,063 mm (%) yli 31,5 mm kivet huomioiden	Luonnollinen vesipitoisuus (%)	Routakoenäytteen vesipitoisuus (%)	Routakoenäytteen korkeus (mm)	Routakoenäytteen kuivavirtotiheys (kg/dm ³)	h _{24h}	h _{96h}	SP ₀
Tampere- Kokemäki	Snm-Kru 225+266	1	100	2,8	2,6	3,2	3,2	151,0	2,15	4,1	7,1	2,8
	Snm-Kru 225+266	2	44	5,8	5,5	4,1	2,6	151,0	2,18	7,6	12,7	6,8
	Snm-Kru 225+269	57	65	2,7	2,0	2,4	3,0	147,8	2,24	5,6	9,1	5,3
	Snm-Kru 225+269	58	90	2,9	2,4	2,5	4,9	148,0	2,18	4,1	6,6	3,2
	Snm-Kru 225+341	59	58	3,8	3,7	3,4	3,3	154,0	2,28	6,7	10,7	5,2
	Snm-Kru 225+341	60	85	2,9	2,9	5,2	4,2	150,3	1,96	3,0	5,7	2,8
Tampere- Orivesi	Tpe-Hvs 194+443	3	90	2,5	2,4	2,3	2,6	148,6	2,14	2,6	4,8	2,0
	Tpe-Hvs 194+443	4	55	3,5	3,2	2,4	2,4	153,6	2,24	3,9	6,8	2,8
	Hvs-Ov 208+414	53	40	3,5	2,9	3,2	3,9	142,3	2,29	2,8	4,0	2,8
	Hvs-Ov 208+414	54	80	3,5	3,1	3,7	3,9	146,9	2,00	1,8	3,5	1,8
Toijala-Turku	Kar-Mri 252+120	5	81	2,7	1,8	2,8	3,8	150,2	2,24	3,3	5,7	3,5
	Kar-Mri 252+120	6	108	3,4	2,2	3,0	4,3	147,2	2,22	3,8	5,9	3,3
	Ur-Hp 179+050	7	123	3,7	3,5	3,5	4,3	150,0	2,15	2,6	5,1	3,3
	Ur-Hp 179+050	8	97	2,9	2,7	3,5	4,3	148,8	2,15	3,0	5,6	3,9
	Via-Mat 156+293	9	61	4,4	4,1	4,2	3,7	146,9	2,31	7,5	11,6	5,6
	Via-Mat 156+293	10	97	3,0	2,7	3,5	3,1	148,5	2,26	3,9	6,8	3,7
	Via-Mat 156+894	55	60	15,7	15,5	12,1	6,9	151,7	2,09	7,7	14,3	6,6
	Via-Mat 156+894	56	95	5,1	4,6	6,6	4,4	154,2	2,09	2,9	6,2	3,2
Riihimäki- Lahti	Ri-Kek 77+925	11	63	1,4	1,3	3,3	3,4	149,8	2,02	0,7	1,7	0,8
	Ri-Kek 77+925	12	87	1,4	1,1	2,9	3,7	150,4	2,02	0,5	1,6	0,7
	Jut-Jr 95+584	13	96	1,0	0,9	3,1	3,5	152,5	2,00	0,8	2,1	1,1
	Jut-Jr 95+584	14	110	1,8	1,7	3,4	4,0	150,3	1,98	0,9	2,2	1,1
Kouvola- Lappeenranta	Uti-Kpa 208+785	15	50	0,9	0,8	2,6	4,4	154,4	1,99	0,4	1,2	0,7
	Uti-Kpa 208+785	16	83	4,2	4,2	4,0	5,1	151,0	2,03	1,3	1,6	1,7
	Kjr-Ta 237+700	17	40	3,0	2,9	3,2	3,9	153,5	2,02	2,3	4,5	2,2
	Kjr-Ta 237+700	18	67	4,5	4,5	4,4	4,1	143,4	2,11	3,6	5,8	2,9
	Tap-Lr 273+924	19	47	3,0	2,8	4,0	4,4	146,7	2,12	1,2	2,4	1,5
	Tap-Lr 273+924	20	85	3,2	3,2	8,9	5,2	153,2	2,00	0,9	3,4	1,5

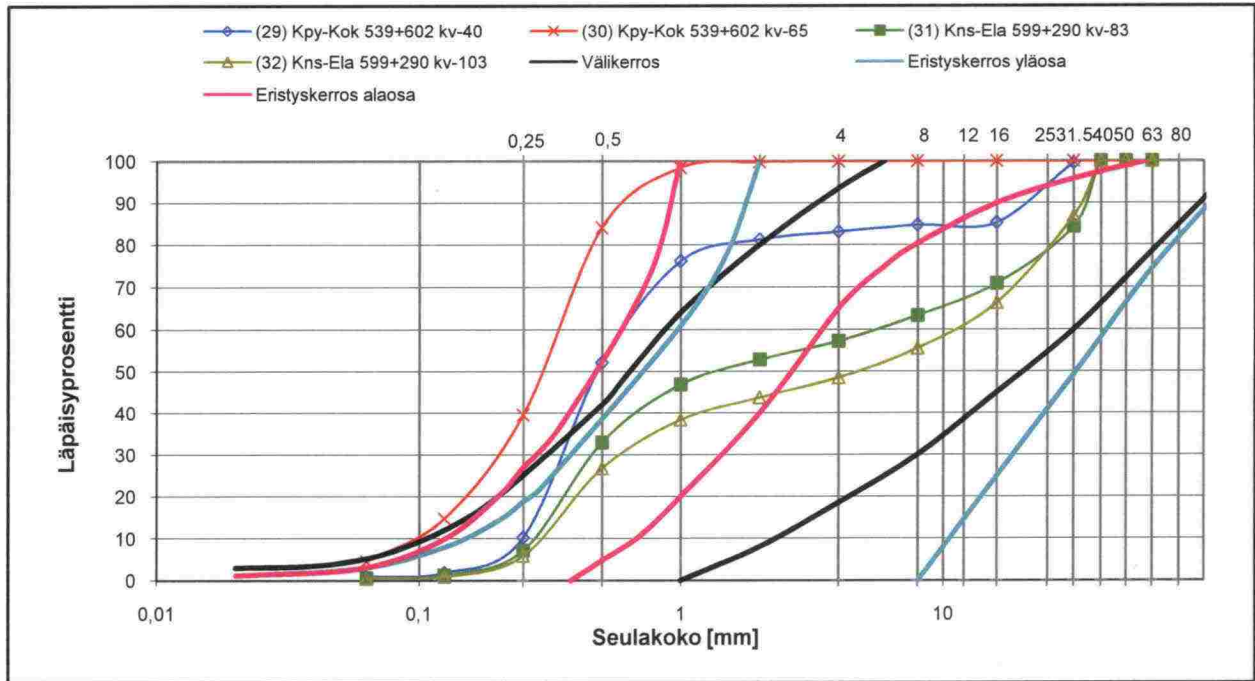
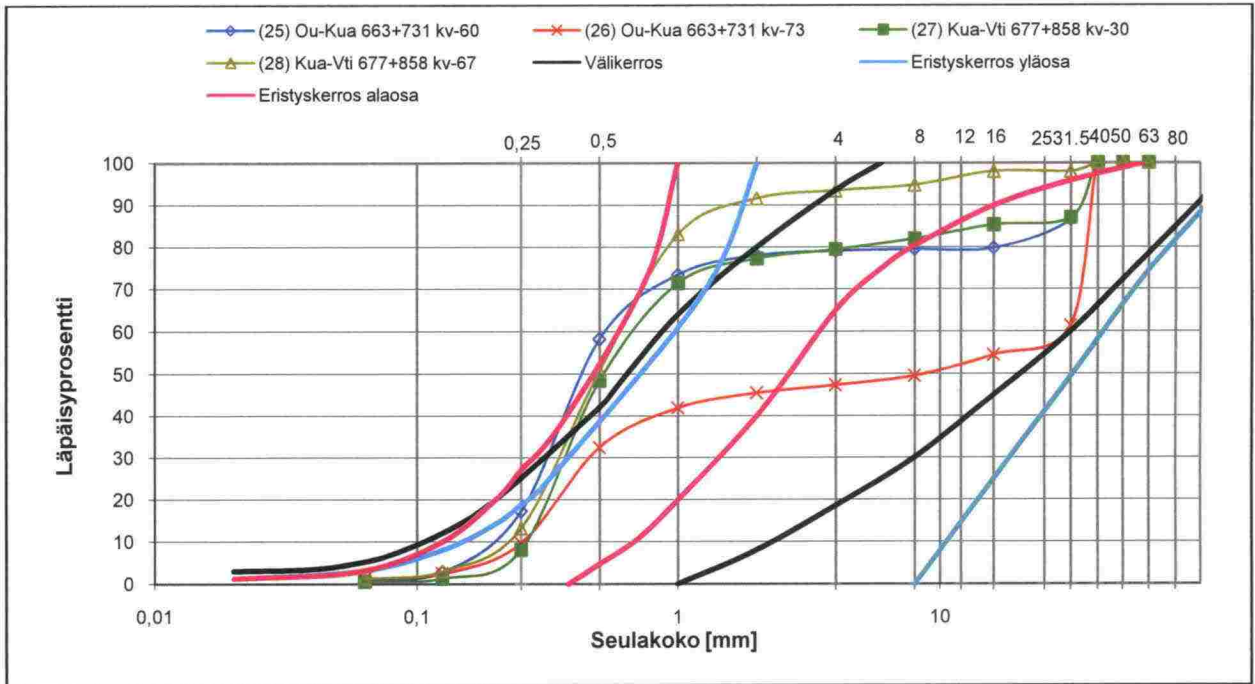
Näytteen tiedot		Routanousukoetulokset										
Rataosa	Liikennepaikka- väli ja ratakilometri	Näyte nro	Näytteenottosy- vyys kv:sta (cm)	<0,063 mm (%) routakokeessa	<0,063 mm (%) yli 31,5 mm kivet huomioiden	Luonnollinen vesipitoisuus (%)	Routakoenäytteen vesipitoisuus (%)	Routakoenäytteen korkeus (mm)	Routakoenäytteen kuivairtoisuus (kg/dm ³)	h _{24h}	h _{96h}	SP ₀
Kouvola- Pieksämäki	Hir-Ksa 330+485	21	48	3,2	2,2	3,0	4,3	143,8	2,28	3,6	5,8	3,6
	Hir-Ksa 330+485	22	65	5,2	3,1	3,4	4,4	149,1	2,28	4,2	7,0	4,5
Jyväskylä- Pieksämäki	Vko-Lvt 390+016	23	60	1,2	1,1	2,4	4,0	145,0	2,02	0,7	1,6	0,7
	Vko-Lvt 390+016	24	80	1,4	1,3	2,8	2,4	150,1	2,03	0,6	1,6	0,7
Seinäjoki-Oulu	Ou-Kua 663+731	25	60	1,2	1,0	7,2	6,2	146,0	1,82	0,2	0,4	0,3
	Ou-Kua 663+731	26	73	2,1	1,3	13,1	4,2	155,8	2,00	0,5	1,0	0,5
	Kua-Vti 677+858	27	30	0,7	0,6	3,4	4,9	155,6	1,86	0,2	0,5	0,3
	Kua-Vti 677+858	28	67	1,3	1,3	4,2	4,9	153,7	1,85	0,2	0,5	0,2
	Kpy-Kok 539+602	29	40	0,9	0,9	4,1	6,3	155,3	1,80	0,2	0,4	0,2
	Kpy-Kok 539+602	30	65	4,6	4,6	5,3	6,9	155,3	1,79	0,3	0,7	0,5
	Kns-Ela 599+290	31	83	0,8	0,7	2,3	4,9	152,6	2,07	0,3	0,6	0,3
	Kns-Ela 599+290	32	103	0,6	0,5	2,3	4,3	152,6	2,10	0,3	0,7	0,4
	Yv-Kgs 639+900	33	28	2,2	1,5	2,4	4,3	151,5	2,17	0,6	1,1	0,6
	Yv-Kgs 639+900	34	41	2,2	1,9	1,1	4,5	151,8	2,24	0,7	1,3	0,8
	Yv-Kgs 635+890	35	30	3,9	3,7	4,7	7,3	149,4	2,00	1,7	3,0	2,0
	Yv-Kgs 635+890	36	61	1,7	1,2	3,0	5,0	148,6	2,16	0,7	1,2	0,9
	Lka-Kml 732+933	37u	32	11,3	10,9	6,0	5,3	153,0	2,03	5,8	10,8	6,5
	Lka-Kml 732+933	38u	61	7,0	5,6	4,7	4,6	147,0	2,02	3,6	5,9	3,6
	Khg-Yv 623+732 ¹	39	62	0,8	0,8	3,7	5,2	158,4	1,87	0,3	0,4	0,6
	Khg-Yv 623+732 ¹	40	85	1,9	1,7	4,4	7,0	145,2	1,99	0,6	0,9	0,5
Helsinki-Turku	Slo-Po 155+648	41	42	1,9	1,5	9,9	4,3	151,5	2,00	0,9	1,6	0,6
	Slo-Po 155+648	42u	84	4,6	4,5	4,1	5,2	153,8	2,10	2,8	4,9	3,0
	Slo-Po 164+964	43	15	50,0	4,1	5,1	4,8	148,8	2,00	1,8	2,7	1,2
	Slo-Po 164+964	44u	50	7,4	3,9	3,6	4,0	148,4	2,26	4,5	6,2	4,7
	Pku-Erv 97+522	45	21	5,5	5,2	4,6	5,3	146,3	2,07	1,4	2,2	1,3
	Pku-Erv 97+522	46	52	1,2	1,2	3,2	4,6	153,6	2,06	0,5	1,0	0,7
Pieksämäki- Kuopio	Krm-Kuo 457+231	47	47	2,4	2,3	3,6	4,8	149,3	1,98	1,4	2,9	1,4
	Krm-Kuo 457+231	48	60	2,7	2,4	3,4	4,3	147,4	2,01	1,8	3,4	1,7

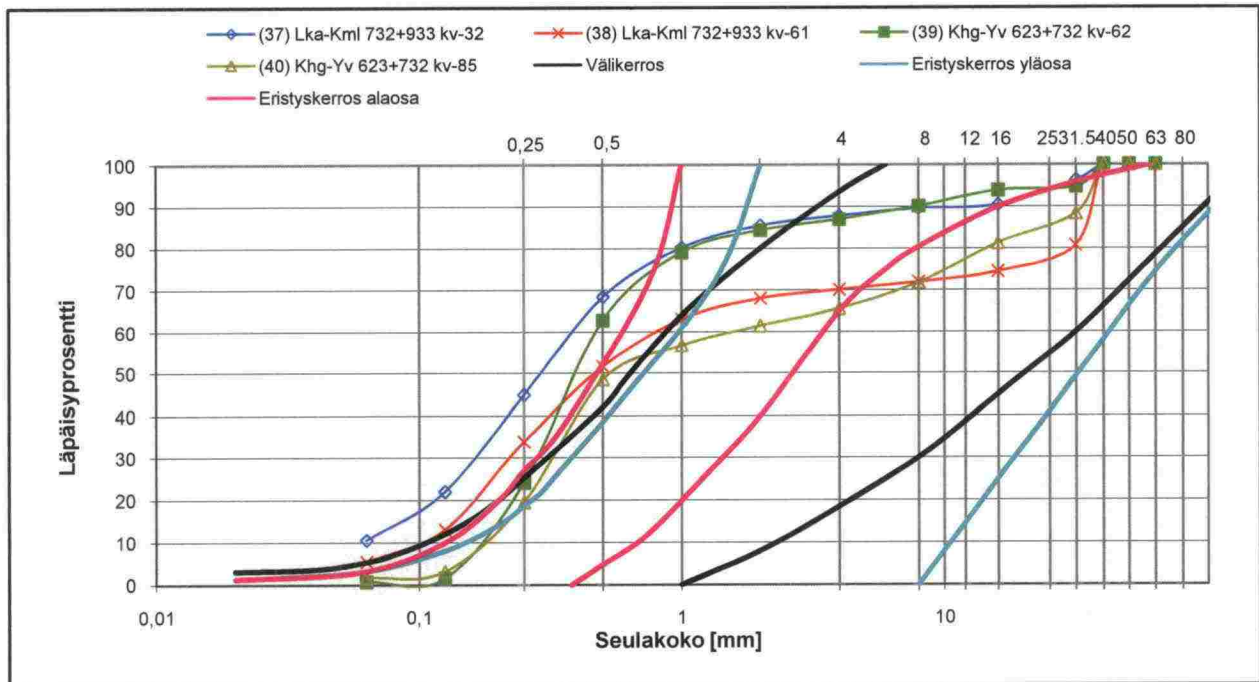
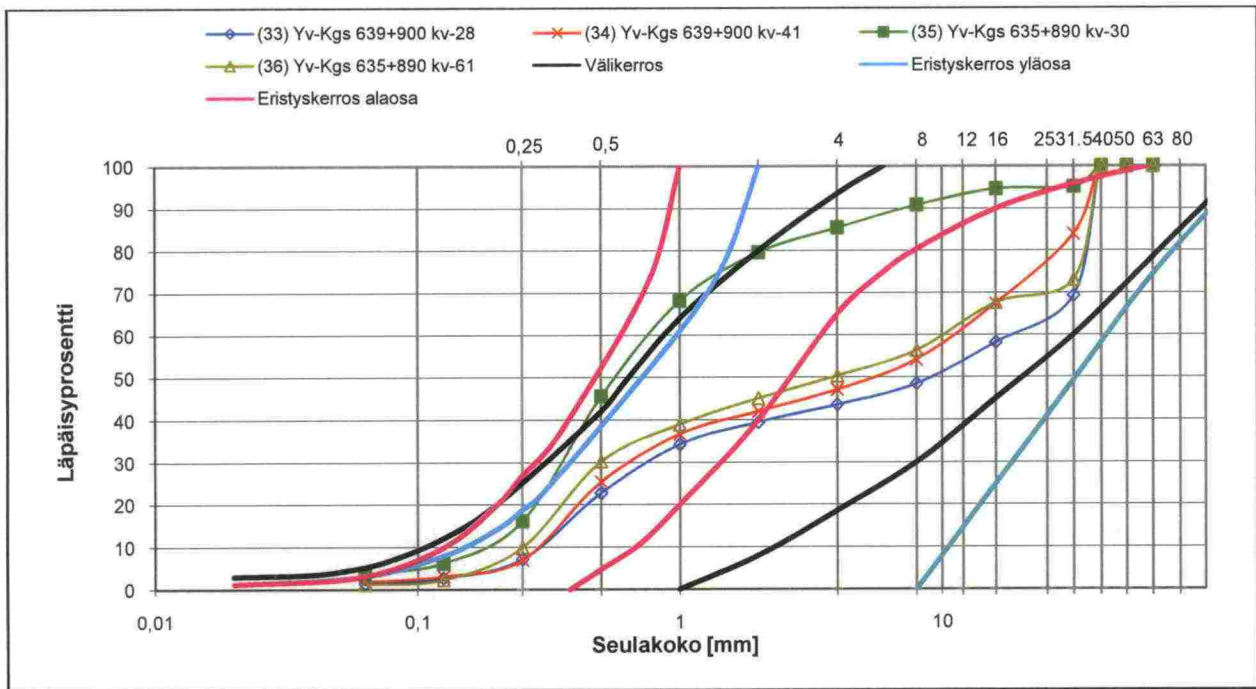
Näytteen tiedot		Routanouskokeet			
Rataosa					
Liikennepaikka- väli ja ratakilometri					
Näyte nro					
Näytteenotto- vyys kv:sta (cm)					
<0,063 mm (%) routakokeessa					
<0,063 mm (%) yli 31,5 mm kivet huomioiden					
Luonnollinen vesipitoisuus (%)					
Routakoenäytteen vesipitoisuus (%)					
Routakoenäytteen korkeus (mm)					
Routakoenäytteen kuivavirtotiheys (kg/dm ³)					
h _{24h}					
h _{96h}					
SP ₀					

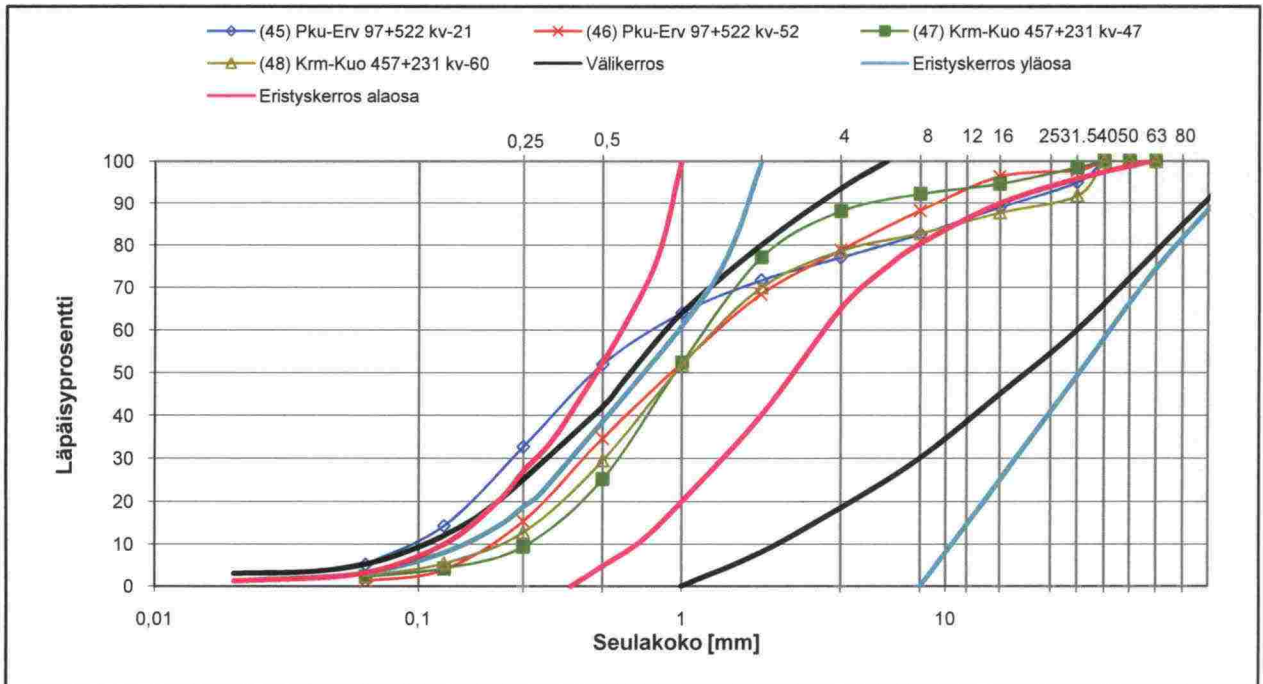
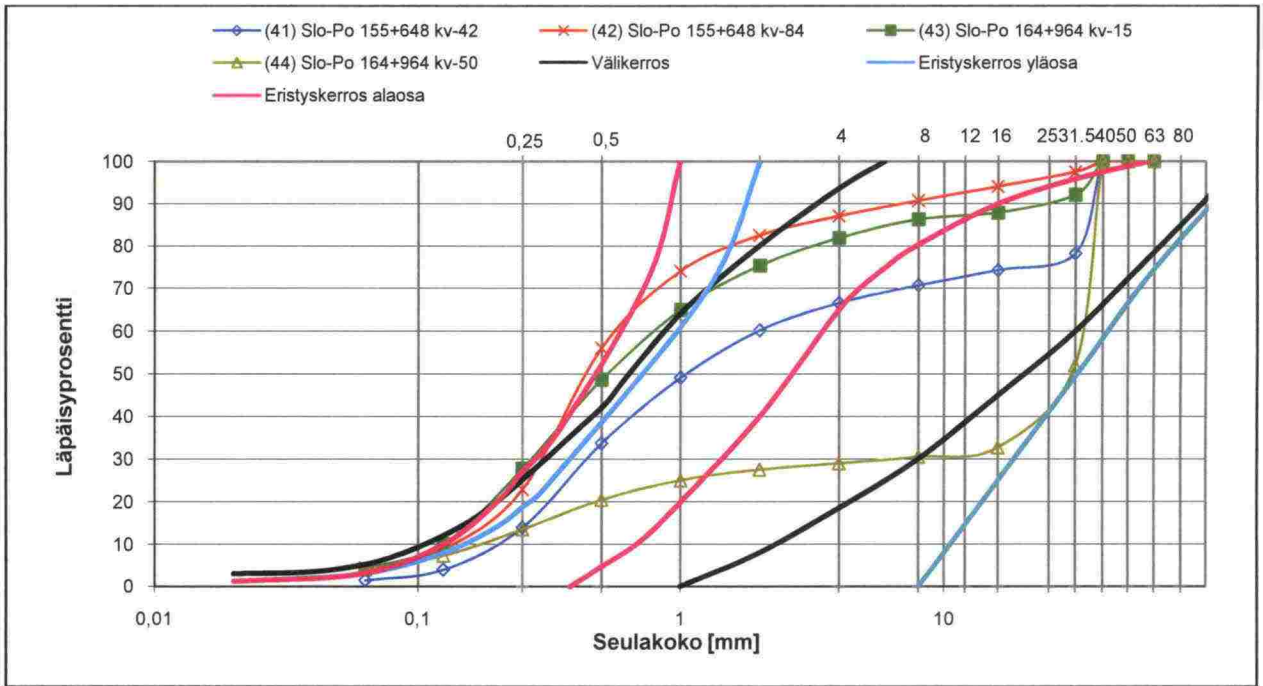
¹⁾ 96h routanousu extrapoloitu
u - näytteen routanousukoe uusittu

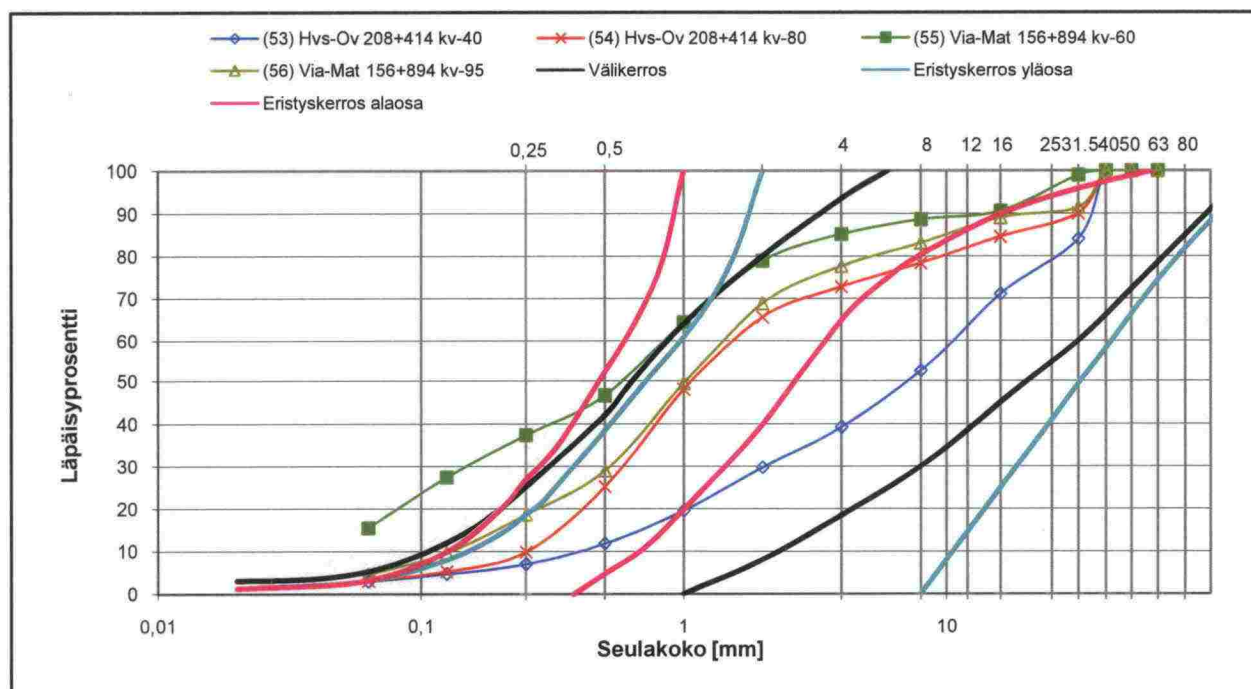
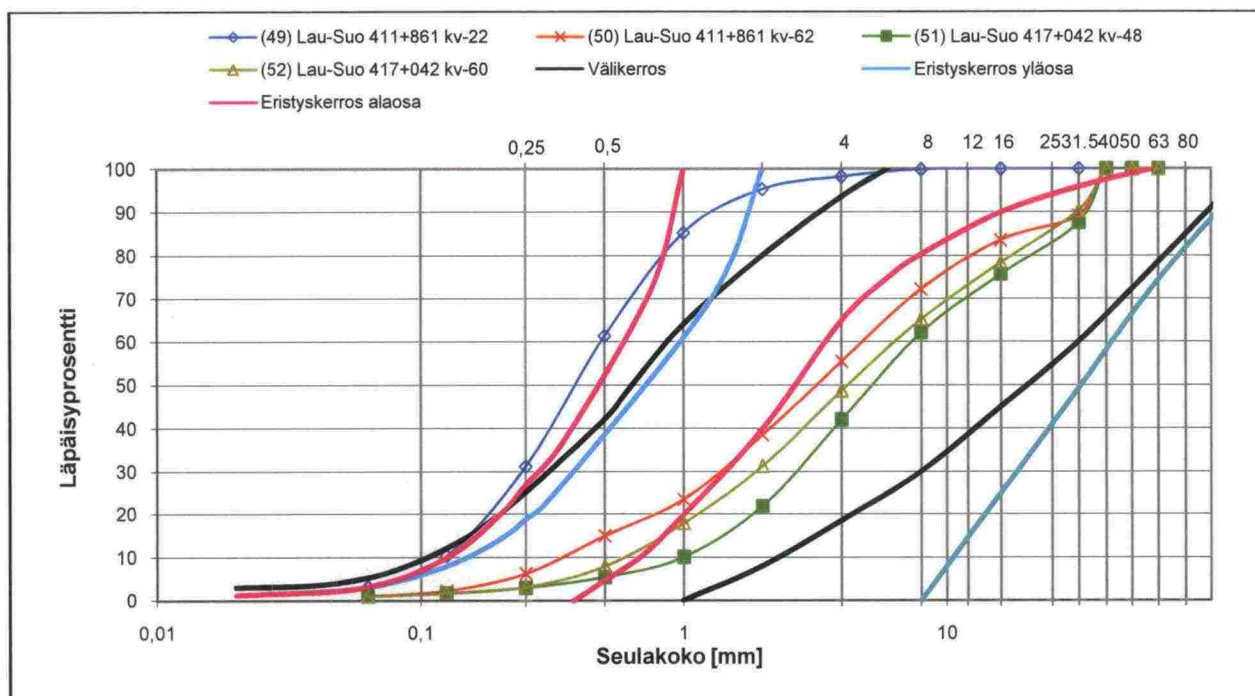


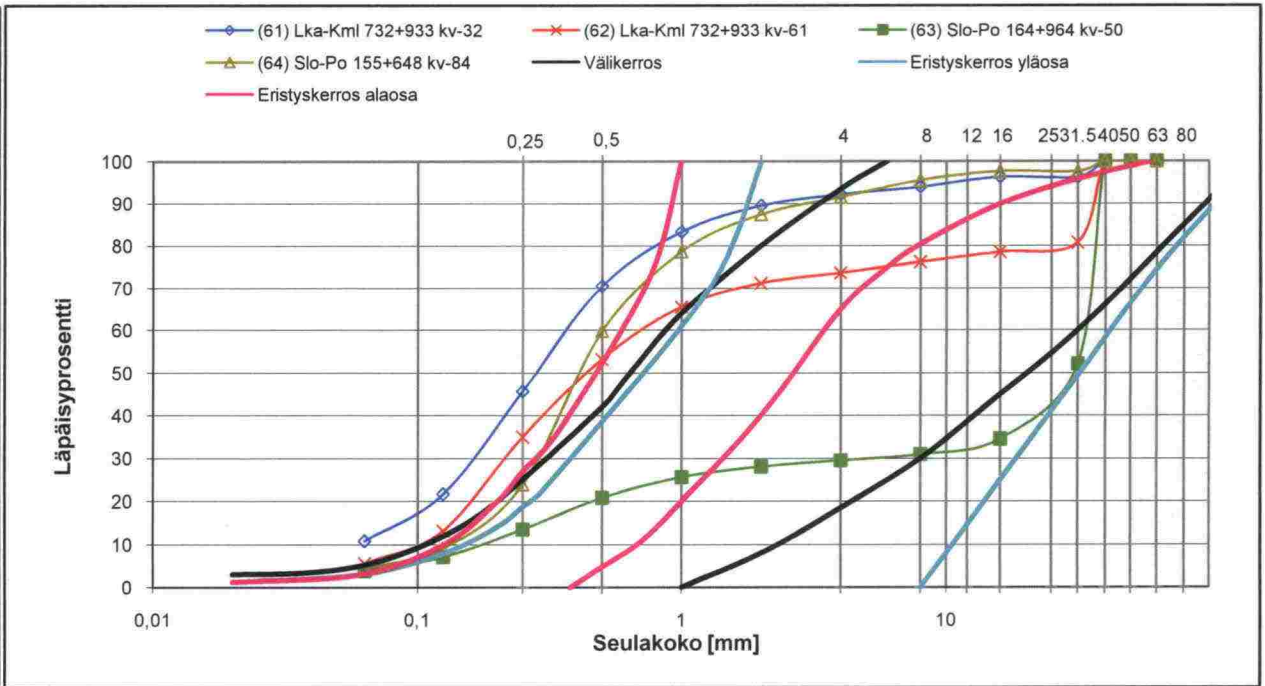
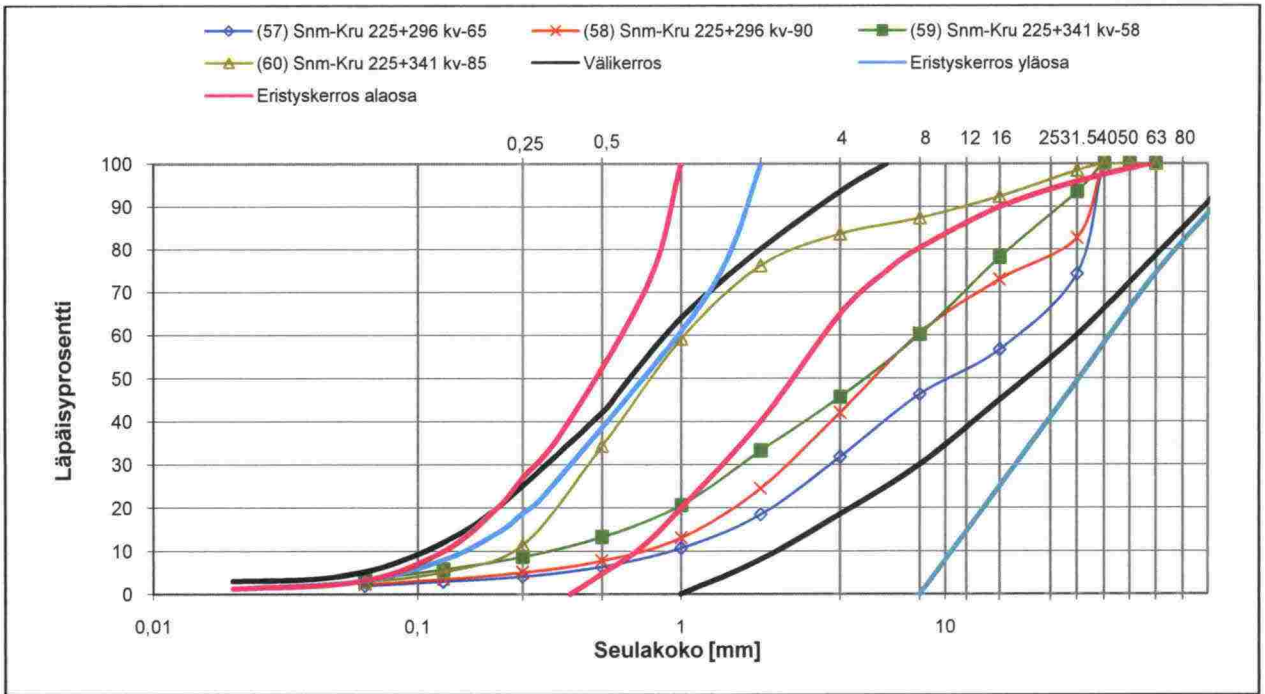












RATAHALLINTOKESKUKSEN JULKAISUJA A-SARJASSA

- 1/2004 Tavaraliikenteen ratapihavisio ja -strategia 2025
2/2004 Rautateiden kaukoliikenteen asemien palvelutaso ja kehittämistarpeet
3/2004 Rautatieinfrastruktuurin elinkaarikustannukset
4/2004 Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa
5/2004 Radan kulumisen rajakustannukset vuosina 1997–2002
6/2004 Marginal Rail Infrastructure Costs in Finland 1997–2002
7/2004 Ratakapasiteetin jakamisen vaatimukset ja liikenteen suunnittelun tila
8/2004 Stabiiliteetiltaan kriittiset ratapenkereet, esitutkimus
9/2004 Ratapenkereitten leveys ja luiskakaltevuus, esitutkimus
10/2004 Lähtökohtia ratapihojen kapasiteetin mittaamiseen
1/2005 Sähköratamaadoitusten perusteet – suojarakenteet, rakennukset ja laiturirakenteet
2/2005 Kerava–Lahti-oikoradan ennen-jälkeen vaikutusarviointi, ennen-vaiheen selvitys
3/2005 Ratatietojen kuvaaminen – ratatietokanta ja verkkoselostus
4/2005 Kaakkois-Suomen rataverkon tavaraliikenteen kehittäminen
1/2006 Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämisstrategia
2/2006 Rautatie ja sen vaarat osana lasten ympäristöä
3/2006 Matkustajainformaatiojärjestelmien arviointi Tampereen, Toijalan ja Hämeenlinnan rautatieasemilla
4/2006 Radan välityskyvyn mittaamisen ja tunnuslukujen kehittäminen
5/2006 Deformation behaviour of railway embankment materials under repeated loading
6/2006 Research and Development Strategy of the Finnish Rail Administration
7/2006 Rautatieliikenne 2030 -suunnitelman lähtökohdat ja vaikutustarkastelut
8/2006 Vanhojen, paalutettujen ratapenkereiden korjaus
9/2006 Ratarakenteessa käytettävien kalliomurskeiden hienoneminen ja routimisherkyys
10/2006 Radan stabiiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet
Kirjallisuustutkimus ja laskennallinen tausta-aineisto
11/2006 Rautatieinfrastruktuurin kehitystarpeet suuryksikkökuljetusten yleistyessä
12/2006 Pasilan aseman esteettömyyskartoitus ja toimenpideohjelma
1/2007 Akselipainon noston tekniset edellytykset ja niiden soveltuminen Luumäki–Imatra-rataosuudelle
2/2007 Radan kulumisen rajakustannukset 1997–2005
3/2007 Marginal Rail Infrastructure Costs in Finland 1997–2005
4/2007 Ratarakenteen kuormituksen määrittäminen stabiiliteettitarkasteluihin
5/2007 Pohjois-Suomen rataverkon tavaraliikenteen kehittäminen
6/2007 Suomen rataverkon tärinäselvitys
Kirjallisuuskatsaus ja tärinäkohteet vuosina 2000–2006
7/2007 Luvattomien radanylitysten välttäminen
8/2007 Maatutkatekniikan hyödyntäminen radan tukikerroksen kunnan arvioinnissa
9/2007 Markkinoilletulo ja rautatiemarkkinoiden muutos kotimaisen tavaraliikenteen avautuessa kilpailulle Suomessa
10/2007 Rautatieliikenne 2030 -suunnitelman liikenne-ennusteet
11/2007 Logistiikkakeskusten tie- ja ratayhteydet
1/2008 Aikataulusuunnittelu ja rautatieliikenteen täsmällisyys
2/2008 Rautatieliikenteen simuloinnin merkitys ratakapasiteettihakemusten yhteensovittamisessa
3/2008 Rautateiden liikkuvan kaluston kunnan valvonta runkoverkolla
4/2008 Raakapuukuljetusten tulevaisuuden haasteet
5/2008 Perussolmuraatapihojen merkitys ja näkymät osana kuljetusjärjestelmää
6/2008 Tasoristeysten kansirakenteet



**RATAHALLINTOKESKUS
BANFÖRVALTNINGSCENTRALEN**

Julkaisija:
Ratahallintokeskus
Keskuskatu 8, PL 185, 00101 Helsinki
puh. 020 751 5111, fax 020 751 5100
www.rhk.fi

ISBN 978-952-445-231-1
ISSN 1455-2604