

LAB-ammattikorkeakoulu
Tekniikka Lappeenranta
Rakennusalan työnjohdon koulutus

Mika Lankinen

Radan penger-, eristys- ja välikerrosmateriaalit luonnonsorasta

Opinnäytetyö 2020

Tiivistelmä

Mika Lankinen

Radan pengeri-, eristys- ja välikerrosmateriaalit luonnonsorasta, 40 sivua, 4 liitettä

LAB-ammattikorkeakoulu

Tekniikka Lappeenranta

Rakennusalan työnjohdon koulutus

Opinnäytetyö 2020

Ohjaajat: lehtori Eija Hauska-Mertanen, LAB ammattikorkeakoulu, työpäällikkö Antti Rämä, GRK Infra Oy

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin radan pengeri-, eristys- ja välikerrosmateriaaleja, jotka on tehty luonnonsorasta. Tarve tutkia luonnonsorasta tehtäviä radan alusrakennekerroksia lähti GRK Infra Oy:n Saimaan kanavan ratasilta työmaalta, jossa InfraRYL:n vaatimusten mukaisten kiviainesten tiivistyminen oli ajoittain hankalaa. Tutkimuksen tarkoituksena on pystyä jo ennakkoon varautumaan kustannustehokkaan ja sopivan materiaalin löytämiseen tulevilla ratahankkeilla.

Tutkimuskohteiksi valittiin kaksi GRK Infra Oy:n urakkaa ratahankkeesta Luumäki – Imatra Tavara väliltä. Opinnäytetyöprosessin vuoksi tutkimuksia tehtiin Saimaan kanavan ratasiltatyömaalla enimmäkseen eristys- ja välikerroksista. Rataurakka 2, Rauha – Imatra T välin alusrakenteen tutkimus antoi hyvin vertailupohjaa Saimaan kanavan ratasillan tutkimuksiin, jolloin pystyttiin vertailemaan syitä ja seurauksia, miten erityyppiset materiaalit käyttäytyvät tiivistämisen suhteen.

Loppuyhteenvedon tutkimustulosten pohjalta voidaan todeta, että luonnonsorasta tehtävien pengeri-, eristys- ja välikerrosten kantavuus- ja tiiviysvaatimukset eivät täysin täyty, vaikka rakeisuuskäyrä olisi InfraRYL:n vaatimusten mukainen. Hyvälaatuisen luonnonsoran saaminen voi olla tulevaisuudessa uhkatekijä, sillä materiaalien pitäisi olla luonnon muovaamia eikä sekoittaminen toisella materiaalilla ole tällä hetkellä mahdollista vaatimusten mukaan.

Asiasanat: luonnonsora, pengeri, eristyskerros, välikerros

Abstract

Mika Lankinen

Track substructure of nature gravel, 40 pages, 4 Appendices

LAB University of Applied Sciences

Technology Lappeenranta

Degree programme in construction management

Bachelor's Thesis 2020

Instructors: teacher Ms Eija Hauska-Mertanen, LAB University of Applied Sciences, Area manager Mr Antti Rämä, GRK Infra Oy

The purpose of the research was to find out reasons why it is hard to make track substructure of gravel in InfraRYL demands. The work was done together with GRK Infra Oy. GRK Infra Oy had two worksites of Luumäki – Imatra railway upgrade project. This work was started in Saimaa canal railway bridge project and the rest of examinations were done in other projects in Rauha – Imatra T.

Data for this study were collected by many sources and the primary source was the InfraRYL technical requirements and RATO3 (Finnish railroad technical guideline). This study also gathered data and research by few master's thesis. The work site data for this thesis were collected and conclusions often go to the project supervisors and project orderer.

The result of this thesis was that building a railway track gravel and sand substructure is very accurate when there is need for good testimonials in density and good results. Proper and improper substructure materials need to be tested before use and do some conclusions if the material is good enough to put into the track substructure.

Further study is required to build railway track gravel and sand substructure because it is not sure to achieve InfraRYL demands even if the gravel and sand fraction is between diagrams curves. In the future it is hard to found good quality track substructure gravel and sand because good quality gravel- and sand-pits have already been used.

Keywords: substructure, gravel, sand

Sisällys

Käsitteet.....	5
1 Johdanto.....	6
2 Suomen soravarannot ja niiden käyttö.....	7
3 Radan rakenne	9
3.1 Radan normaalipoikkileikkaus ja sen määräytyminen.....	9
3.2 Alusrakenneluokka.....	10
3.3 Pengerleveys	11
3.4 Routamitoitus.....	13
3.5 Radan penger- ja rakennekerrokset.....	14
4 Penger materiaalien laatuvaatimukset ja valmiit rakenteet	15
4.1 Penger	15
4.2 Eristyskerros sorasta	17
4.3 Välikerros sorasta	18
4.4 Lievennykset materiaalien rakeisuuden suhteen	19
4.5 Kantavuuden ja tiiviiden laadunvarmistusmenetelmät	19
4.6 Raekoko ja rakeiden muoto	21
4.7 Mittatarkkuusvaatimukset	22
5 Työmaahavainnot ja tutkimukset	24
5.1 Saimaan kanavan ratasilta (SKRS RU4)	24
5.2 Rauha - Imatra T (RU2)	32
6 Yhteenveto ja pohdinta	38
Lähteet.....	40

Liitteet

- Liite 1. Ratapenkereen, eristys- ja välikerroksen kantavuus ja tiiviysvaatimukset
- Liite 2. Rakeisuuskäyrä tiivistyvistä eristys- ja välikerrosmateriaalista
- Liite 3. Rakeisuuskäyrä huonosti tiivistyvistä eristys- ja välikerrosmateriaalista
- Liite 4. Ratapenkereen kelpoisuusasiakirja

Käsitteet

Alusrakenne koostuu välikerroksesta, eristyskerroksesta sekä mahdollisesta suodatinkerroksesta ja routalevystä.

Eristyskerros jakaa ylempien rakennekerroksien kuorman ratapenkereeseen tai leikkauspohjaan. Estää myös routaantumisen vettä läpäisevänä rakenteena.

Korkeusviiva (K_v) on määritelty RATO:n osassa 2 Radan geometria.

Leikkauspohja on leikatun pohjamaan yläpinta.

Pengerleveys on radan alusrakenteen, normaalisti välikerroksen, yläpinnan leveys.

Pengerpohja on pengertäytteen alla olevan pohjamaan pinta.

Pengertäyte on pengerpohjan ja eristyskerroksen väliin rakennettu ratapenkereen osa.

Pohjamaa (perusmaa) on ratapenkereen alla oleva maa.

Päällysrakenne on radan rakenneosa, johon kuuluu tukikerros ja raide.

Raide koostuu ratapölkyistä, rataakiskoista, rataakiskojen kiinnitys- ja jatkososista sekä vaihteista ym. raiteen erikoisrakenteista.

Rakennekerrokset ovat tuki-, väli-, eristys- ja suodatinkerros.

Ratapenger koostuu radan rakennekerroksista ja mahdollisesta pengertäytteestä.

Välikerros muodostaa tukikerrokselle tasaisen ja kantavan alustan ja estää tukikerroksen sekoittumisen alla oleviin rakennekerroksiin.

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä selvitetään luonnonsorasta tehtävien radan pengermateriaalien soveltuvuutta suhteessa laatuvaatimuksiin. Tiiveys- ja kantavuusvaatimukset ovat radanrakentamisessa suhteellisen kovat ja ne ovat joiltakin osin risiiritaisia suhteessa käytettävän materiaalin työmaaolosuhteissa saavutettaviin arvoihin.

Tutkimus perustuu GRK Infra Oy:n työmailla havaittuihin tiivistämisongelmiin. GRK Infra Oy rakentaa Väylän LUIMA-hankkeen kahta urakkaa (SKRS RU4 ja RU2), jotka ovat tutkimuksissa mukana. Molemmissa hankkeissa ratapenkereet tukikerroksen alapintaan asti tehdään luonnonsorasta. Saimaan kanavan ratasilan penkereissä käytettävä materiaali on lähes kokonaan paikalliselta kiviaines-toimittajalta ostettavaa materiaalia. Rauha – Imatra T välin hankkeen ratapenkereseen saadaan suuri osa pengermateriaaleista rakennettavan kaksoisraiteen leikkausmassoista.

Radan pengermateriaaleina käytetään paljon luonnonsoraa ja siitä jatkojalostettuja materiaaleja. Luonnonsoraa käytetään usein kustannusvaikutusten minimoimisessa verrattuna kalliimpiin kalliokiviaineksiin. Luonnonsoran saatavuus voi joillakin alueilla rajoittaa sen käyttöä, kuten myöskin riittävän laadukkaan luonnonsoran saatavuus. Uusia soranottoaikoja avataan nykyään harvoin, sillä soranottoaikat sijaitsevat usein myös pohjavesialueilla ja nykyisin niitä osataan ja halutaan suojella.

Lähteinä tässä opinnäytetyössä ovat Väylän rautatiealan julkaisut, InfraRYL, Internetin luotettavat julkaisut ja GRK Infra Oy:n urakoiden tekniset asiakirjat.

2 Suomen soravarannot ja niiden käyttö

Kallioperän päälle on aikojen saatossa kerrostunut hiekkaa, soraa ja moreenia. Lajitteiden raekoko vaihtelee erilaisten synty olosuhteiden ja sijainnin perusteella. Soraa käytetään monissa eri tarkoituksissa, kuten muun muassa tienrakennuksessa, asfaltin teossa, talonrakennuksessa ja betoniteollisuudessa. Sora-ala työllistää useita tuhansia työntekijöitä ja taloudellinen arvo käyttäjille on useita satoja tuhansia euroja. (GTK 2020.)

Suomen soravarannot sijaitsevat melko tasaisesti läpi koko maan (Kuva 1). Kasvukeskuksien läheisyydessä soran kulutus on kuitenkin suurempaa kuin pienemmillä paikkakunnilla. Harjualueiden suojelu ja maa-alueiden muu käyttö rajoittaa soranottoa ja usein parhaat soranottoalueet sijaitsevat pohjavesialueilla, mikä osaltaan vaikuttaa kuljetusmatkojen pidentymisiin. (GTK 2020.)

Suurimmat soravarantojen ottoalueet sijaitsevat Hyvinkään – Hämeenlinnan seuduilla, missä Salpausselän harjumuodostumat ovat kasaantuneet Järvi-Suomen eteläpuolelle. Soraa ja hiekkaa on arvioitu käytettävän vuoden 2011 mittausten mukaan noin 40 % kiviainesten kokonaismäärästä. Noin 75 % sorantuotannon kokonaismäärästä vuonna 2011 oli kymmenen suurimman yrityksen hoidossa. (GTK 2020.)

HIEKAN JA SORAN OTTO 2011

Ottomäärä kunnittain (1000 t)

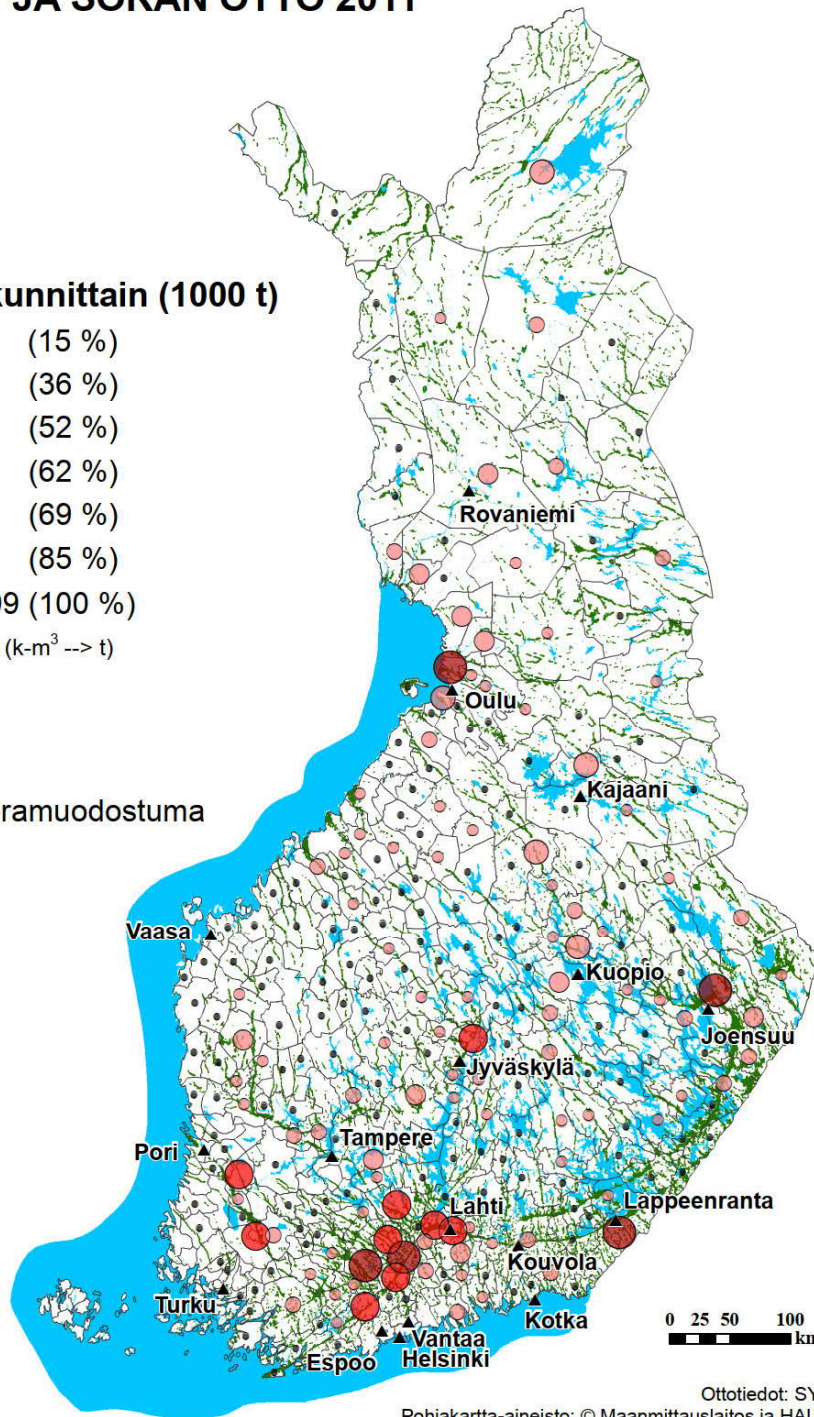
- < 100 (15 %)
- 100 - 199 (36 %)
- 200 - 299 (52 %)
- 300 - 399 (62 %)
- 400 - 499 (69 %)
- 500 - 749 (85 %)
- 750 - 1 499 (100 %)

Muuntokerroin 2,0 (k-m³ --> t)

▲ Kaupunki

□ Kuntaraja

■ Hiekka-soramuodostuma



0 25 50 100 km

Ottotiedot: SYKE

Pohjakartta-aineisto: © Maanmittauslaitos ja HALTIK

Kuva 1. Suomen soravarannot ja ottomäärät vuonna 2011 (GTK 2020)

3 Radan rakenne

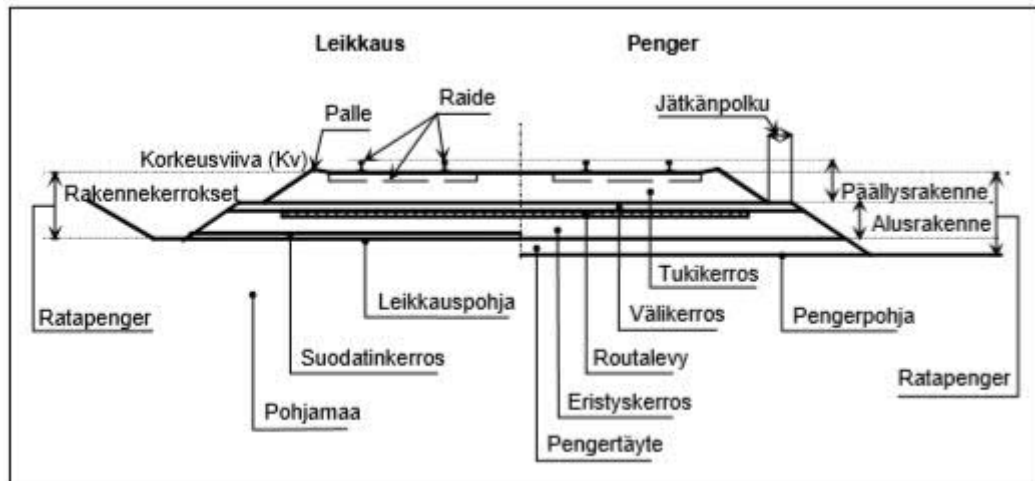
Ratojen pohjarakenteiden suunnittelu vaatii aina geoteknistä erikoisosaamista. Alus- ja pohjarakenteet suunnitellaan kestävän 100 vuotta ja niiden geotekninen luokka on erittäin vaativa, GL3 tai vaativa, GL2. (RATO 3, 2018.)

Rakennettaessa pengertämällä rataa, pitää pintamaan poiston ja maan leikkauksen jälkeen leikkauspohja tasata. Kohteesta ja sen maaperän olosuhteista riippuen voidaan ennen pengermateriaalia tehdä suodatinkerros hiekasta tai käyttää suodatinkangasta.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään luonnonsorasta tehtyihin ratapenkereisiin. Ratapenger muodostuu karkearakeisista maalajeista, mitkä ovat usein epähomogeenisia. Ratapenkereessä makroskooppiset yksittäiset rakeet ovat kosketuksissa toistensa kanssa ja näin muodostavat ratapenkereen. Rakeisen luonteen vuoksi pengermateriaali ei kestä paljoakaan vetoa, mutta puristuskestävyys on hyvä ja leikkaustakin rakeinen materiaali kestää kohtalaisen hyvin. (Brecciaroli & Kolisoja 2006.)

3.1 Radan normaalipoikkileikkaus ja sen määräytyminen

Ratapenkereen poikkileikkauksien minimimitat on määritelty tarkkaan. Erilaisia poikkileikkaustyyppisiä on useita, riippuen siitä toteutetaanko rakennettava rata leikkaukseen, penkereeseen vai kalliroleikkaukseen. Myös liikennöinti nopeus ja akselipainot vaikuttavat radan poikkileikkaukseen. Normaalipoikkileikkaukset ovat ohjeellisia ja niitä voidaan soveltaa ja laatia tarkennettuja hankekohtaisia poikkileikkauksia. Kuvassa 2. on esitetty ratapenkereen poikkileikkaus penkereessä ja leikkauksessa. (Erkkilä 2010.)



Kuva 2. Ratapenkereen poikkileikkaus penkereessä ja leikkauksessa (RATO 3, 2018)

3.2 Alusrakenneluokka

Radan alusrakenneluokka (0-4) määrää henkilöliikenteen suurimman sallitun nopeuden ja tavaraliikenteen suurimman sallitun nopeuden ja akselipainon (Taulukko 1). Vaihtealueilla radan alusrakenneluokka on aina 4 eli korkein mahdollinen. (RATO 3, 2018.)

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

Taulukko 1. Alusrakenneluokat Suomen rataverkolla (RATO 3, 2018)

Rata ei saa käyttöönoton jälkeen ylittää taulukossa 2. asetettuja raja-arvoja. Vaihdealueilla sovelletaan alusrakenneluokka 4 mukaisia enimmäisarvoja. Perustamistavan vaihdealueilla tulee olla homogeeninen ja routimaton. (RATO 3, 2018.)

Radan alusrakenneluokka	Painuma-aika 100 vuotta Tasainen kokonaispainuma [mm]	0-2 vuoden aikana tapahtuva painuma		2-9 vuoden aikana tapahtuva painuma	
		Pituuskaltevuuden muutos [%]	Sivuttaiskaltevuuden muutos [%]	Pituuskaltevuuden muutos [%]	Sivuttaiskaltevuuden muutos [%]
0	800	0,4	0,8	0,4	0,8
1	800	0,3	0,6	0,3	0,6
2	500	0,2	0,4	0,2	0,4
3	300	0,15	0,3	0,15	0,3
4	100	0,1	0,2	0,1	0,2

Taulukko 2. Tasaisen kokonaispainuman enimmäisarvot (RATO 3, 2018)

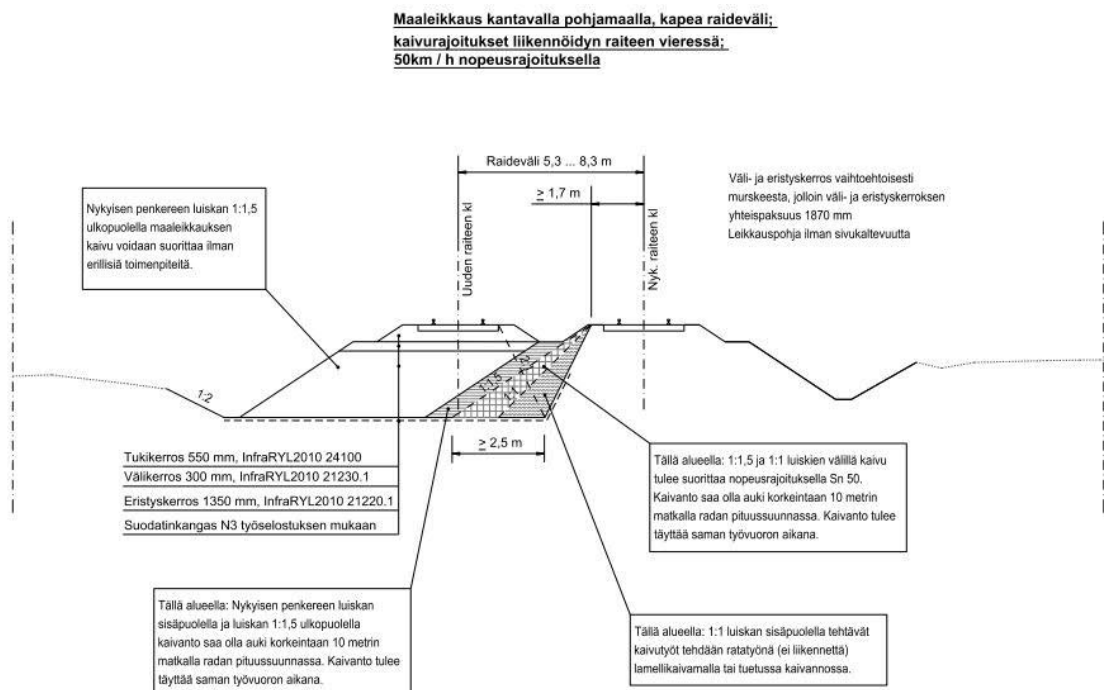
3.3 Pengerleveys

Pengerleveyksiä on käytössä useita riippuen raiteiden lukumäärästä, alusrakenneluokasta, radan jäykkydestä, radan geometriasta, raidevälistä ja sillan läheisyydestä (Taulukko 3). Olemassa olevan raiteen viereen rakennettavan uuden raiteen vähimmäisraidevälin määrittelyssä on huomioitava rakentamisen vaikutus vanhaan rakenteeseen. Kapea raideväli aiheuttaa mahdollisia tukiseiniä, jotta uuden raiteen pohjanvahvistustyöt voidaan toteuttaa suunnitelmien ja määräysten mukaan. Myös kustannusten nousuun pitää varautua, mikäli rakennettavan uuden raiteen väli vanhaan raiteeseen on kapea. (RATO 3, 2018.)

Raiteiden lukumäärä ¹⁾²⁾	Radan alusrakenneluokka	Pengerleveys [m]		Raideväli [m]
		Suoralla	Kaarteessa	
1	0	5,4 ³⁾	5,4 ³⁾	—
1	1	5,4 ³⁾	5,4 ³⁾	—
1	1	6,0	6,0	—
2	1	9,5	9,5	4,1
2	4	12,5	12,5	4,7

Taulukko 3. Ratapenkereen vähimmäisleveys, kun $R \geq 3000$ m (RATO 3, 2018)

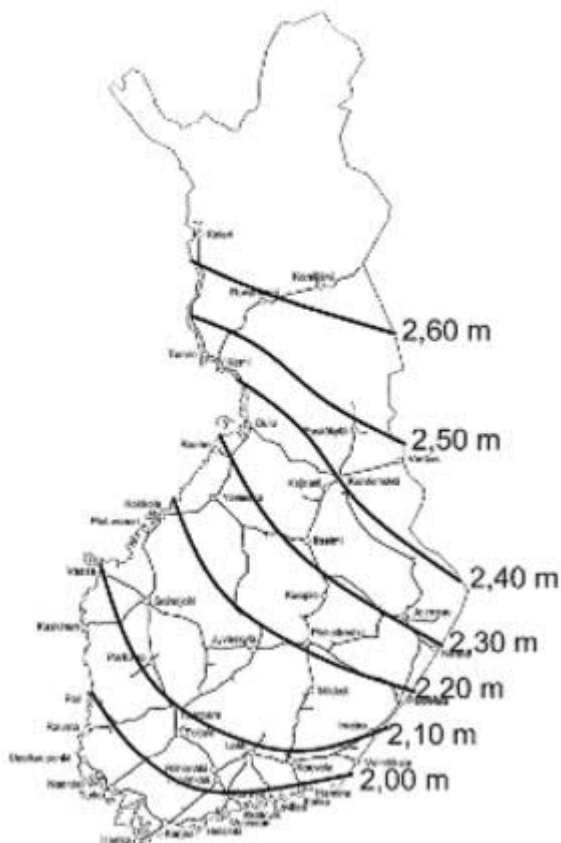
Rakennettaessa uutta ratapengertä vanhan ratapenkereen välittömään läheisyyteen tai radan linjauksen muuttuessa sen liityntäkohdissa uuden ratapenkereen rakennekerrokset sijoittuvat osittain limittäin vanhaan rakenteeseen. Rakennekerrokset pyritään suunnittelemaan ja tekemään täysilevyisinä, jolloin viereisen ratapenkereen rakennekerroksia joudutaan kaivamaan pois ja vaihtamaan uusiin. Kaivurajoitusten takia, joudutaan osa massanvaihdosta tekemään liikennöidyn raiteen vieressä alennetulla nopeudella tai ratatyönä, jolloin liikennettä ei sallita (Kuva 3).



Kuva 3. Esimerkki kaivurajoituksista kapealla raidevälillä RU2 urakassa. (RU2, tekniset asiakirjat, 2019)

3.4 Routamitoitus

Routanousun estämiseksi uudet ratarakenteet suunnitellaan siten, ettei roudan aiheuttamia muodonmuutoksia tapahdu. Routaeristämättömien ratojen routimat-
tomien rakennekerrosten kokonaispaksuudet ovat 2, 3 ja 4 alusrakenneluokissa
kuvan 4. mukaisia. Kuvan 4. rakennekerroksien kokonaispaksuudet ovat luon-
nonsorasta tehtyjä. Mikäli rakennekerroksissa käytetään murskeita, ovat kerros-
paksuudet 15 % suuremmat kuin luonnonmateriaaleista tehdyt rakenteet. Jos
eristyskerros on luonnonmateriaalia ja välikerros on murskerakenteinen, raken-
nekerrospaksuuksissa voidaan käyttää luonnon lajittamien materiaalien rakenne-
paksuuksia. Alusrakenneluokan 1 radoilla kokonaiskerrospaksuutta vähenne-
tään 0,2 metriä ja alusrakenneluokka 0 radoilla kokonaiskerrospaksuutta vähen-
netään 0,6 metriä. Routalevyjä käyttämällä voidaan kerrospaksuuksia pienentää
tapaus kohtaisesti. (Erkkilä 2010.)



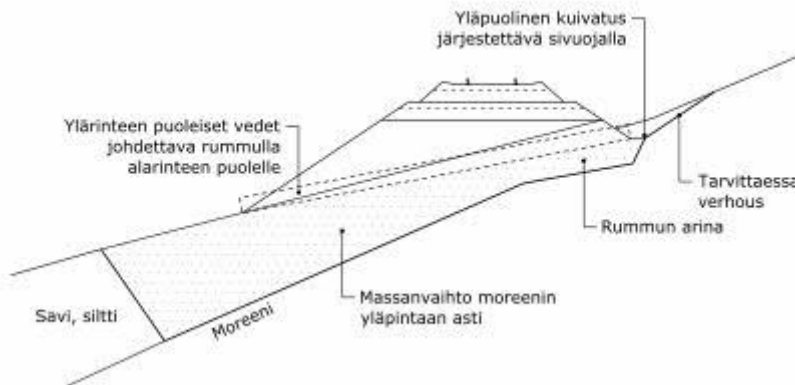
Kuva 4. Radan routimattomien rakennekerrosten paksuus (Erkkilä 2010)

3.5 Radan penger- ja rakennekerrokset

Radan rakentamisessa on käytössä useita erilaisia rakennekerroksia. Rakennekerroksilla on oma tietty tehtävä rakenteessa. Luonnon lajittamasta sorasta ja hiekasta tehty eristys- ja välikerros noudattaa InfraRYL:n mukaisesti samaa rakaisuusaluetta 21230:K1.

Pengertäyte

Penkereellä tasoitetaan maanpinnan luonnollisia korkeusvaihteluita niin, että radan rakennekerrokset ovat rakennettavissa sen varaan. Sivuttaissuunnassa kaltevissa maastoissa penkereen liukumisriski tulee huomioida ja estää liukuminen tarvittavin keinoin (Kuva 5). Materiaalit, jotka soveltuvat pengertäytteeseen, ovat karkeat kivennäismaalajit, hiekka, moreeni, murske ja alle 300 mm kokoinen pienlouhe. Hienommat maalajit eivät sovellu ratapenkereen tekoon liukumariskin takia. (Erkkilä 2010.)



Kuva 5. Penkereen liukumariskin estäminen (InfraRYL)

Eristyskerros

Eristyskerros muodostaa välikerrokselle hyvän alustan, mikä kantaa ja jakaa kuormia. Eristyskerros nimensä mukaisesti myös eristää, jolloin routa ei pääse vaikuttamaan alempiin rakenneosiin ja estää näin roudan aiheuttamia muutoksia radassa. Rakennekerrosten sekoittumisen ja kapillaarisen vedennousun estämisessä alemmista kerroksista on myös eristekerroksella suuri merkitys. (Erkkilä 2010.)

Eristyskerrokseen sopivat materiaalit ovat hiekka, sora ja kalliomurske. Eristyskerroksen hiekan ja soran tulee olla routimatonta eivätkä ne saa sisältää orgaanisia epäpuhtauksia tai muita aineita. Veden kapillaarinen nousukorkeus ei saa olla enempää kuin 0,7 m. (Erkkilä 2010.)

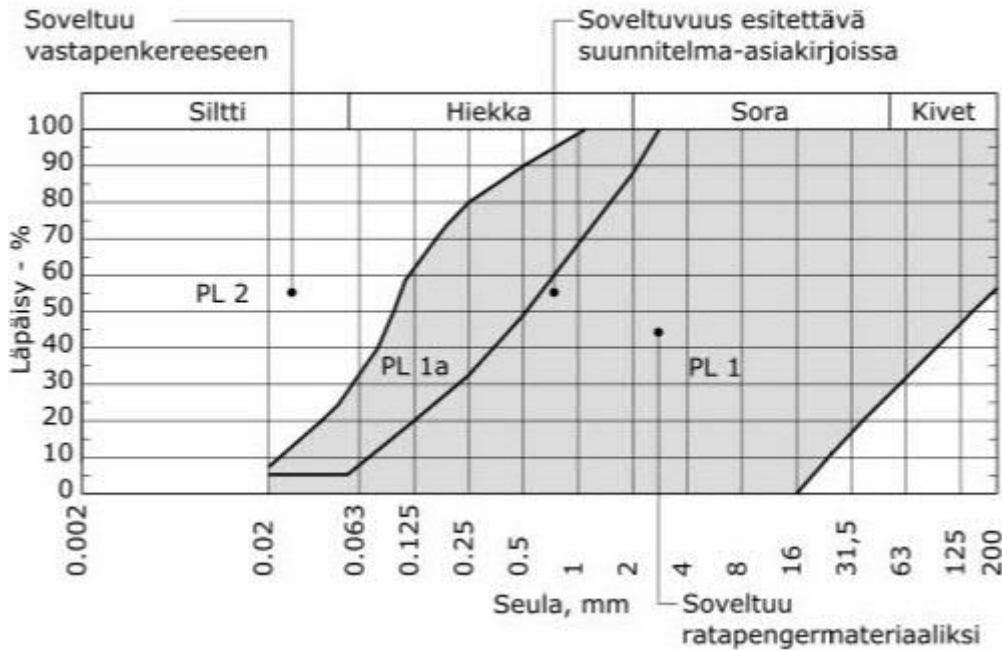
Välikerros

Välikerros muodostaa lujan ja tukevan pohjan tukikerrokselle eli ratasepelille. Routaantumisen estäminen ja kapillaarisen vedennousun estäminen ovat välikerrosmateriaalille tärkeitä tehtäviä. Myös tuki- ja eristyskerrosten keskenään sekoittuminen estetään välikerroksen avulla. (Erkkilä 2010.)

4 Pengermateriaalien laatuvaatimukset ja valmiit rakenteet

4.1 Penger

Ratamaapenkereessä voidaan käyttää useita erilaisia materiaaleja. Tässä opinäytetyössä keskitytään luonnonsorasta tehtyyn pengermateriaaliin. Luonnonsora lukeutuu karkearakeisiin maalajeihin ja sille sovelletaan omaa rakeisuuskäyrää (Kuva 6). (InfraRYL.)



Kuva 6. Rakeisuuskäyrä sorasta ja hiekasta tehtävään ratapenkereeseen. (InfraRYL, 18110.1.2, Liite K5)

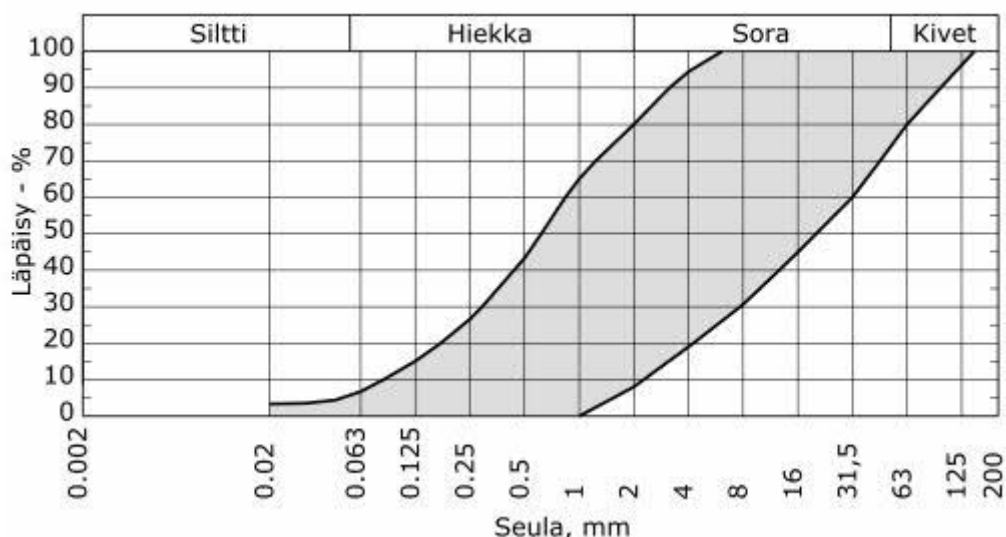
Pengerrys ratarakenteissa tehdään kerros- tai kiilapengerryksenä. Kerrospaksuus ei saa ylittää 0,7 m ja kukin kerros tiivistetään täysilevyisenä. Päätypengerrystä ei saa käyttää ratarakenteissa. Talvikautena rakennettaessa pengerrystä materiaalit eivät saa jäätyä ennen kuin ne on tiivistetty. (InfraRYL.)

Luonnonlajittamista materiaaleista tehdyn ratapenkereen laadunvarmistusmenetelmänä ensisijainen laadunvarmennustapa on säteilymittaus (Troxler). Säteilymittaus mittaa ainoastaan tiiviyttä ja liitteessä 1. on esitetty ratapenkereen tiiviysarvojen vähimmäisvaatimukset. Levykuormakoetta laadunvarmistuksessa käytettäessä vaatimukset menevät kantavuuden ja tiiviyssuhteen kautta ja ne ovat liitteessä 1. Pudotuspainolaitteella kantavuuden vaatimukset ovat esitetty liitteessä 1. ja ne ovat hieman kovemmat kuin levykuormituslaitteella. Tiiviyssuhdevaatimus pudotuspainolaitetta käytettäessä on esitetty liitteessä 1.

Mittausten ja kokeiden sijaintipaikka vaikuttaa siten, että alle kolme metriä radan kv:stä vaatimukset ovat tiukemmat kuin yli kolme metriä kv:stä. Yksittäiset tulokset voivat myös olla heikompia, mikäli keskiarvo pysyy vaadittavan arvon yläpuolella.

4.2 Eristyskerros sorasta

InfraRYL 21220.1.2 hiekka ja sora otsakkeen mukaan materiaalivaatimukset hiekasta ja sorasta tehtävään eristyskerrokseen ovat samat kuin välikerrosta tehdessä sorasta ja hiekasta. InfraRYL viittaa kuvaan 21230:K1 (Kuva 7), joka on hiekasta ja sorasta tehtävän välikerroksen materiaalivaatimus. Toisin sanoen hiekasta ja sorasta tehtävä eristyskerros on samaa materiaalia, mutta vaatimusten mukaiset kantavuus ja tiiviyssuhteet eroavat toisistaan. Hiekasta ja sorasta tehtävä eristys- ja välikerroksen materiaalin kelpoisuus osoitetaan standardin *SFS-EN 13242* mukaisella CE-merkinnällä, suoritusasoilmoituksella ja rakeisuuden tutkimustuloksella. Rakeisuus tutkitaan pesuseulonnalla vähintään kerran päivässä tai kerran 5000 tonnia kohden sen mukaan kumpi vaatimuksista täyttyy ensin. (InfraRYL.)



Kuva 7. Hiekasta ja sorasta tehtävän eristys- ja välikerroksen laatuvaatimukset (InfraRYL, 21230:K1)

Eristyskerros tehdään maksimissaan 500 mm kerroksina tiivistäen sulan maan aikaan. Tiiviyden mittauksessa luonnon lajittamista materiaaleista tulee ensisijaisesti käyttää säteilymittausta (Troxler). Tiiviyssasteen perusteella kussakin tiivistetyssä kerroksessa tulee saavuttaa säteilymittauksella keskimäärin 95 % tiiviyssaste ja pienimmän yksittäisen sallitun koetuloksen arvo on 92 %.

Mikäli käytetään laadunvarmistuksessa levykuormituslaitetta, tulee jokaisessa rakennettavassa tiivistyskerroksessa saavuttaa keskimäärin 130 MPa kantavuus (E2) ja yksittäisessä mittauksessa vähintään 110 MPa kantavuus (E2) ja InfraRYL taulukon 21220:T4 (Liite 1.) mukainen tiiviyssuhde.

Pudotuspainolaitetta laadunvarmistuksessa käytettäessä tulee käyttää eri taulukkoa kuin levykuormalaitteella. Pudotuspainolaitteella tulee saavuttaa jokaisessa tiivistettävässä kerroksessa 150 MPa kantavuus (E2) ja liitteen 1. mukainen tiiviyssuhde. Yksittäisen mittauksen tulee kuitenkin ylittää 125 MPa kantavuus ja liitteen 1. mukainen tiiviyssuhde.

4.3 Välikerros sorasta

Välikerrosmateriaali on tutkittava standardin SFS-EN 933-1 mukaisesti pesuseulonnalla kerran päivässä tai kerran 5000 t:a tonnia kohti sen mukaan kumpi vaatimuksista ensin täyttyy. Välikerrosmateriaaleja ei saa valmistaa sekoittamalla eri lähteistä olevia raaka-aineita. Epäpuhtauksia materiaalissa ei saa olla. Välikerros tehdään yhtenä 300 mm kerroksena sulan maan aikaan. Materiaalin optiivisesipitoisuus saa poiketa tiivistämistyön aikana enintään 2 %. (InfraRYL.)

Hiekasta ja sorasta tehtävä välikerrosmateriaali noudattaa samaa käyrää kuin hiekasta ja sorasta tehtävä eristyskerros. Rakeisuuskäyrä noudattaa kuvan 7 muotoa. InfraRYL:n mukaan materiaalin on oltava rajakäyrien välisellä alueella, mutta käyrän muotoon ei oteta millään tavalla kantaa ja tämä on olennainen asia kantavuuden ja tiiveyden kannalta. Luonnonlajittamista materiaaleista tehty välikerros on siis materiaaliltaan täysin samaa kuin sorasta ja hiekasta tehty eristyskerros.

Tiiviyssasteella välikerroksen laatua mitattaessa tulee saavuttaa keskimäärin 95 %:n tiiviyssaste. Pienin hyväksyttävä koetulos on 92 %. Kantavuuden ja tiiveyden mukaan välikerroksen laatua arvioitaessa tulee levykuormituskokeella saavuttaa keskimäärin 160 MPa kantavuus (E2) ja yksittäisessä mittauksessa vähintään 140 MPa kantavuus ja liitteen 8. mukainen tiiviyssuhde. Pudotuspainolaitetta laadunvarmistuksessa käytettäessä tulee saavuttaa keskimäärin 185 MPa kantavuus (E2) ja liitteen 1. mukainen tiiviyssuhde.

4.4 Lievennykset materiaalien rakeisuuden suhteen

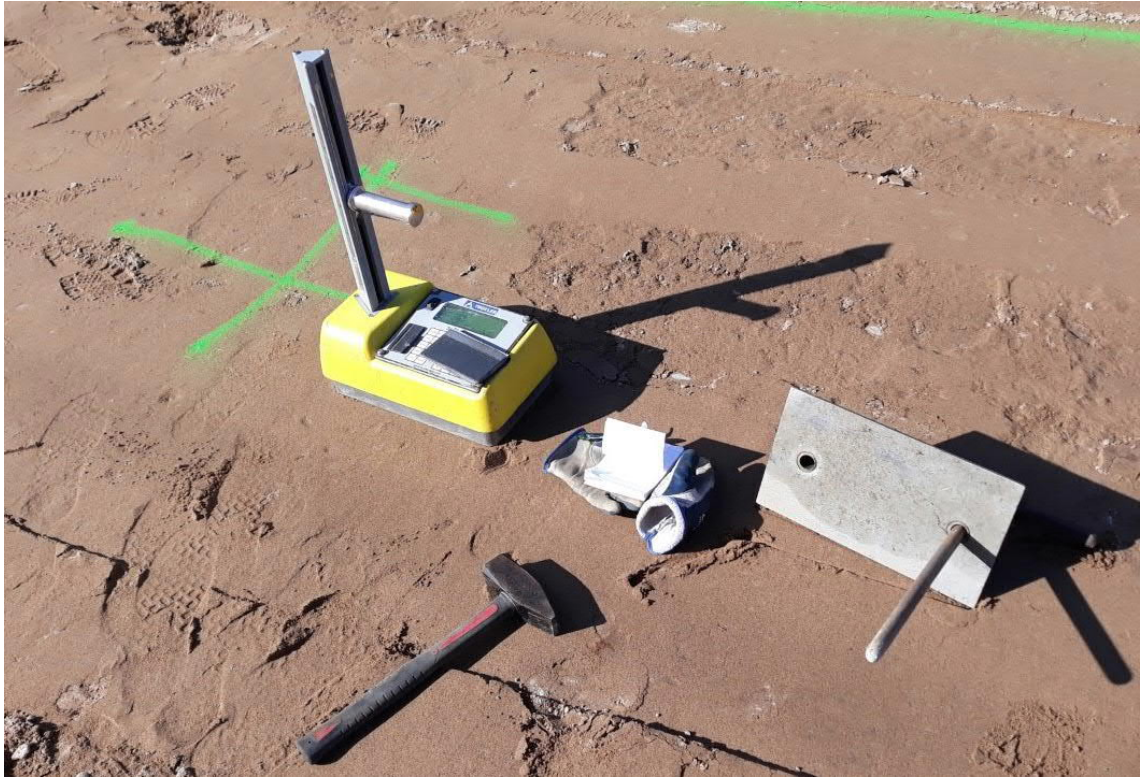
Sekä eristys- että välikerroksen materiaaleille sallitaan liennytyksiä rakeisuuden suhteen. InfraRYL antaa mahdollisuuden poiketa 21230:K1 rakeisuuskäyrästä tietyin ennalta annetuin arvoin seulojen vaihteluväleistä (Taulukko 6). 0,063 mm seulalla materiaalin läpäisy saa olla 1,5% suurempi, 0,125...2 mm seuloilla 2 %-yksikköä suurempi ja läpäisy 4...63 mm:n seuloilla 3 %-yksikköä suurempi tai pienempi, kuin taulukossa 6 annetut arvot. Rakenne tulee kuitenkin olla edellä mainittujen liennytysten hyväksymiseksi tiivistetty vaatimusten mukaiseen tiiviyteen. (InfraRYL.)

Yksittäisen rakeisuustuloksen sallittu vaihteluväli, InfraRYL kuva 21230:K1 ja kohdan 21230.4 sallitut poikkeamat													
Seula, mm	0,02	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5	63	125
Vähintään... enintään, %	0...2	0...4	0...13	0...24	0...42	0...64	8...80	18...94	30...100	45...100	60...100	78...100	96...100
Sallittu fraktion muutos, %		+1,5	+2	+2	+2	+2	+2	±3	±3	±3	±3	±3	
Vaihteluväli sallittujen muutosten jälkeen, %	0...2	0...5,5	0...15	0...26	0...44	0...66	8...82	15/21... 91/97	27/33... 97/100	42/48... 97/100	57/63... 97/100	75/81... 97/100	

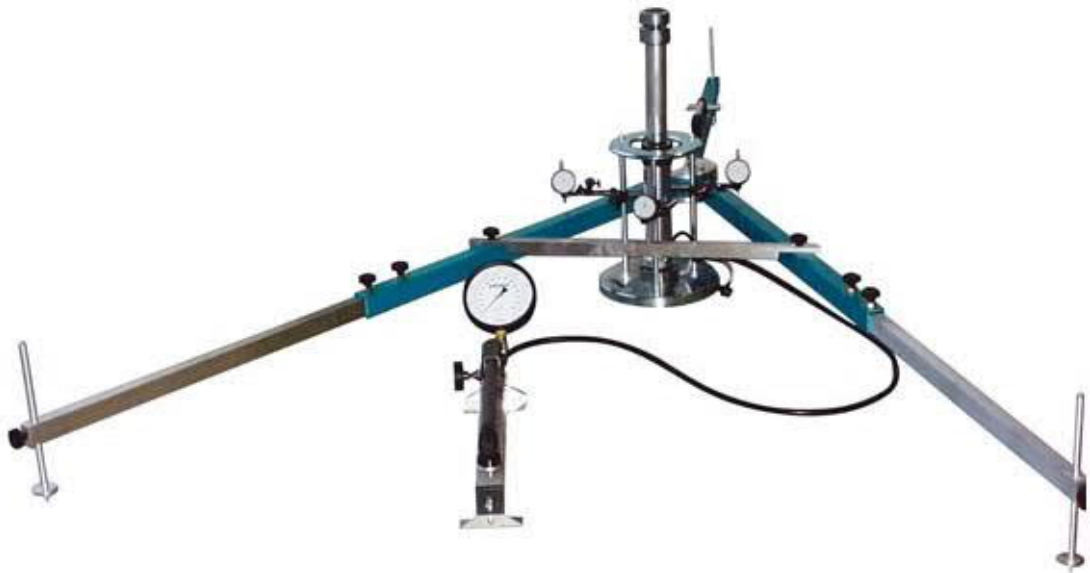
Taulukko 6. Yksittäisen rakeisuustuloksen vaihteluväli ja sallitut poikkeamat (Mika Lankinen)

4.5 Kantavuuden ja tiiviyden laadunvarmistusmenetelmät

Tiivistystyön laaduntarkkailumenetelmiä on useita. Yleisesti luonnonsoralle soveltuvia laaduntarkkailumenetelmiä ovat kuvan 10 säteilymittaus (Troxler) ja levykuormalaite- (Kuva 11) sekä pudotuspainolaitemittaus (Kuva 12). Soralle voidaan käyttää myös vesivolymetrikoetta. Säteilymittauslaitteen mittaukseen tarvitaan parannettu Proctor-koe tai jokin muu menetelmä maksimikuivairtoiteyden määrittämiseen, mikä toimii vertailuarvona Troxler-tuloksille.



Kuva 10. Troxler säteilymittauslaitteisto apuvälineineen (Mika Lankinen)



Kuva 11. Levykuormituslaitteisto (Infratest)

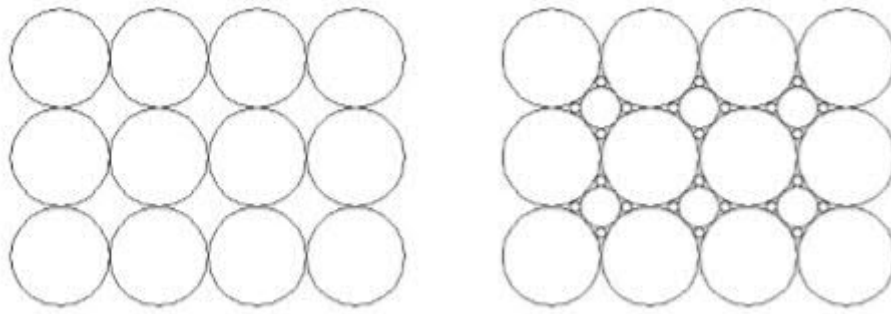


Kuva 12. Loadmann pudotuspainolaite (Mika Lankinen)

4.6 Raekoko ja rakeiden muoto

Materiaalin tiivistymiseen vaikuttaa oleellisesti raekokojakauma. Se on yksi tärkeimmistä tiivistyvyyteen vaikuttavista tekijöistä. Karkearakeisella soralla maksimi kuivana otettu kiintotiheys on noin $2,2 \text{ t/m}^3$ ja hienompi rakeisilla hiekoilla noin $2,0 \text{ t/m}^3$. (Liikennevirasto 2011.)

Tasarakeinen materiaali jättää sisäänsä paljon tyhjää tilaa, jolloin tiivistyminen on huonoa. Myös kuivairtoteheyden maksimi jää tasarakeisella materiaalilla alhaiseksi. Sekarakeinen sora tiivistyy huomattavasti paremmin kuin tasarakeinen, koska isompien rakeiden väliin jäävä tila täyttyy pienemillä rakeilla ja estää materiaalin liikkumisen (Kuva 13). (Liikennevirasto 2011.)



Kuva 13. Tasarakeinen ja sekarakeinen materiaali (Liikennevirasto 2011)

Raekokosuhteella $C_u = d_{60}/d_{10}$ kuvataan materiaalin tasa- ja sekarakeisuutta. Merkit d_{60} ja d_{10} tarkoittavat rakeisuuskäyrän läpäisyprosenttia 60 %:n ja 10 %:n kohdalla. Raekokosuhteen kasvaessa kasvaa myöskin maksimitiheys. Suuri raekokosuhte tarkoittaa loivaa muotoa rakeisuuskäyrällä. Pieni raekokosuhte tarkoittaa rakeisuuskäyrän jyrkkää nousua. Kuvassa 14 on esitetty raekokosuhteiden vastaavat nimitykset. Tällä hetkellä voimassa oleva InfraRYL 2019/1 ei vaadi sorasta ja hiekasta tehtävään eristys- ja välikerrosmateriaalien täyttävän raekokosuhdetta $C_u = d_{60}/d_{10}$. Raekokosuhdetta on vaadittu käytettävän aikaisemmin muun muassa InfraRYL 2015/1 versiossa, joka ei ole voimassa oleva.

Raekokosuhte $C_u = d_{60} / d_{10}$	Maalajin määrittäminen
< 5	Tasarakeinen
5 - 15	Sekarakeinen
> 15	Suhteistunut

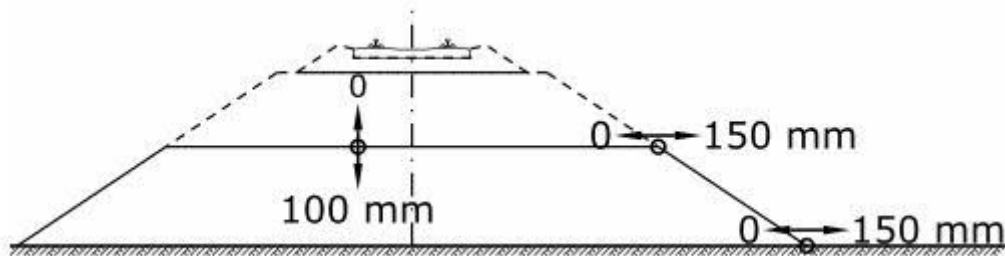
Kuva 14. Raekokosuhteen arvot ja nimitykset (Mika Lankinen)

4.7 Mittatarkkuusvaatimukset

Penger, eristys- ja välikerrosta tehdessä tulee huomioida InfraRYL:n mukaiset mittatarkkuusvaatimukset. Penkereen ja radan rakennekerrosten teossa käytetään nykyisin lähestulkoon pelkästään koneohjausjärjestelmillä varustettuja maanrakennuskoneita, jolloin maastossa ei ole havaittavissa mittakeppejä. Koneohjausmallien oikeellisuuteen ja oikeiden mallien käyttämiseen tulee kiinnittää suurta huomiota, koska työnjohdon on vaikea havainnoida mahdollisia mittapoikkeamia.

Maapenger

Penkereen mittatarkkuusvaatimusten tulee olla suunnitelma-asiakirjojen mukaiset. Penger ei saa olla korkeusasemaltaan korkeampi kuin suunnitelmien mukainen. Ratapenkereessä ei saa olla vettä kerääviä painanteita. Mitat tarkistetaan maastossa mittaamalla taitepisteet 20 metrin välein ja taitepisteiden välit 1 m välein. Koneohjausjärjestelmiä käytettäessä voidaan asettaa kaivumalleihin poikki- viivoja helpottamaan koneenkuljettajien tarkkeiden ottamista sopivin välein. Kuvassa 15. on esitetty maapenkereen suurimmat sallitut poikkeamat (Erkkilä 2010.)



Kuva 15. Maapenkereen mittavaatimukset (InfraRYL)

Eristyskerros

Eristyskerroksen yläpinnan suurin sallittu yksittäinen korkeuspoikkeama on ylöspäin 0 mm ja alaspäin 50 mm. Keskimääräinen suurin sallittu poikkeama suunnitellun tason alapuolella on 30 mm. Leveyssuunnassa ylä- ja alapinnan suurin sallittu poikkeama on sisäänpäin 0 mm ja ulospäin 100 mm (InfraRYL.)

Välikerros

Välikerroksen yläpinnan suurin sallittu yksittäinen korkeuspoikkeama on ylöspäin 0 mm ja alaspäin 30 mm. Leveyden poikkeama sisäänpäin 0 mm ja ulospäin 50 mm (InfraRYL.)

5 Työmaahavainnot ja tutkimukset

Työmaahavainnot ja työnaikaisia tutkimuksia tehtiin kahdessa eri hankkeessa Luumäki – Imatra-ratahankkeen yhteydessä. Saimaan kanavan ratasiltatyömaalla ongelmat materiaalien tiivistämisessä eivät olleet niin suuria kuin Rauha – Imatra Tavara (RU2) välin ongelmat. RU2-hanke on parhaillaan käynnissä ja se on tässä opinnäytetyössä pääosassa työmaahavainnoissa. Kaksi erillistä hanketta antaa mahdollisuuden vertailla saatuja tuloksia, koska materiaalit, joista radan aluskerroksia tehdään, ovat samanlaisia mutta eri soranottoaikoista.

5.1 Saimaan kanavan ratasilta (SKRS RU4)

Tutkimus radan pengermateriaaleihin lähti käyntiin Saimaan kanavan ratasiltatyömaalla havaittujen tiivistysongelmien takia. Uusi ratasilta sijaitsee vanhan ratasillan eteläpuolella varsin korkealla muuhun maastoon nähden. Ratasillan alitse kulkee Saimaan kanava ja sen nimellinen alituskorkeus on 24,5 m. Alituskorkeudesta ja olevan maanpinnan korosta johtuen vanhan radan liitosalueilta täytyi rakentaa uutta melko korkeaa ratapengertä noin kahden kilometrin matkalle, sillat mukaan lukien (Kuva 16).



Kuva 16. Saimaan kanavan uuden ratasillan sijainti ja urakka-alue (Väylä)

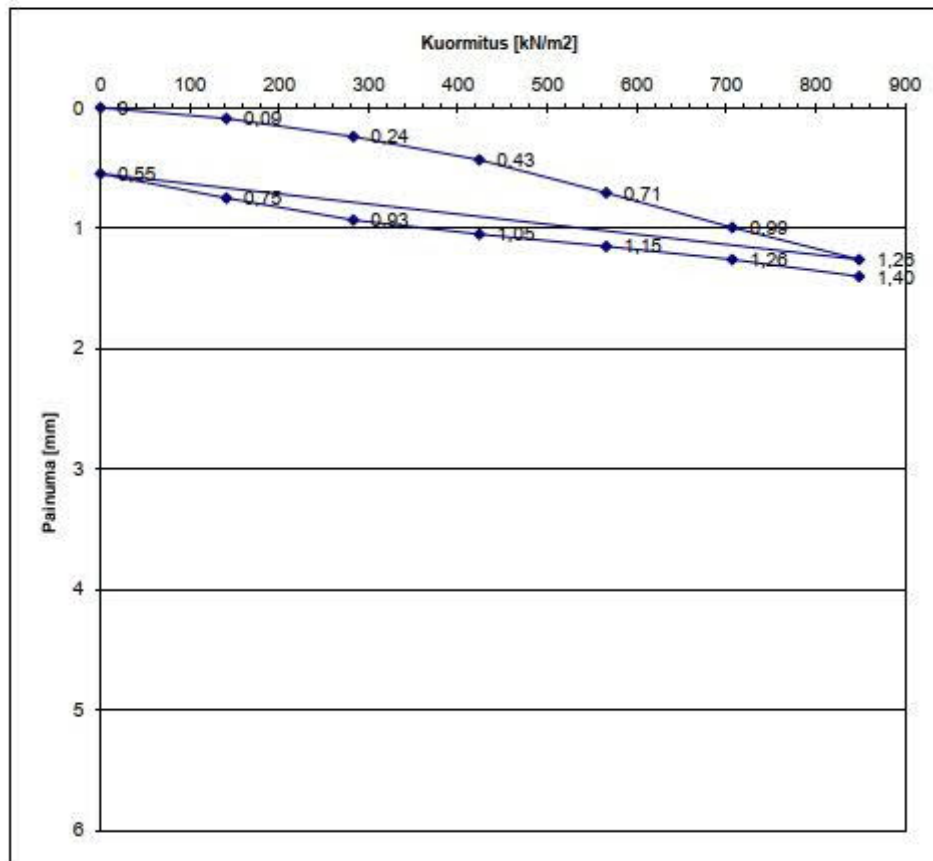
Pengertäyttö

Pengermateriaalia käytettiin noin 140 000 m³tr ja penger tehtiin pääosin vuoden 2018 syksyllä ja osin 2019 talvella. Pengermateriaali toimitettiin kasettiautoilla noin 15 kilometrin päästä ja oli niin sanottua penkkasoraa eli sitä ei ollut seulottu tai välpätty millään tavoin. Materiaalin tiivistyksessä ei liioin ollut ongelmia ja tiiveydet sekä kantavuudet saavutettiin 1-valssijyrän 4–8 ylityskerran jälkeen. Käytettävät 1-valssijyrien työpainot olivat 7–12 tonnia. Penger tehtiin kerrospengerryksenä noin 500 mm kerrosvahvuuksilla.

Penkereet olivat useita kuukausia pääpiirteittäin valmiina ja niitä pitkin ajettiin raskeilla ajoneuvoilla, jolloin staattinen kuormitus osaltaan myös tiivisti rakennetta. Laadunvarmistuksena penkereestä otettiin levykuormakokeet ja niiden perusteella huomattiin staattisen kuormituksen alla olevien penkereen osien olevan paljon tiiviimpiä kuin ilman staattista kuormitusta olevat penkereen osat. Esimerkki levykuormakokeesta kuvassa 17, mikä ylitti tiiviys- ja kantavuusvaatimukset ($E2 \geq 120 \text{ MN/m}^2$) selkeästi.

Levykuormituskoee

Työnumero	<u>-44744</u>	Piste/Paalu	1
Tilaaaja	<u>Graniittirakennus Kallio Oy</u>	Kerros/Taso	
Kohde	<u>Kanava, Muukon puol. Penger</u>	Kerroksen laatu	Sr
Pvm	<u>13.8.-19</u>	Sijainti	
Tulokset		Vaativukset	
$E_1 =$	152 MN/m²	$E_1 \geq$	- MN/m ²
$E_2 =$	224 MN/m²	$E_2 \geq$	MN/m ²
$E_2/E_1 =$	1,48	$E_2/E_1 \leq$	



Kuva 17. Levykuormakoe 13.8.2019 pengermateriaalista. (Ramboll / GRK Infra Oy)

Koekentät ennen liitosalueiden massanvaihtoa

Uuden Saimaan kanavan ratasillan eristys- ja välikerros tehtiin luonnon lajittamasta välpätystä sorasta ja hiekasta. Eristys- ja välikerrosmateriaaleja käytettiin ensimmäisen kerran uuden ja vanhan ratalinjan liitosalueiden massanvaihdossa. Ensimmäinen massanvaihto oli 25.5–26.5.2019 ja sen aikana uusittiin eristys-, väli- ja tukikerros.

Ennen massanvaihtoa tutkimme eristys- ja välikerroksen materiaalin tiivistymistä tekemällä koekenttiä. Ensimmäisessä tutkimuksessa teimme noin 0,5 metriä korkean testipenkereen, jossa kokeilimme erilaisia tiivistämistapoja. Kokeilimme erilaisilla jyräyskerroilla ja kastelulla tiivistymistä, jotta saisimme materiaalille parhaan mahdollisen työtavan. Tiivistäminen tehtiin Ammann ASC 70 yksivalssijyrällä (Kuva 18), jonka työpaino on noin 7 tonnia. Koetiivistyskentän jyräyskerrat olivat 2–10 ylityskertaa ilman kastelua ja kasteltuna.



Kuva 18. Ammann ASC 70 yksivalssijyrä ja eristys- ja välikerroksen tekoa kaivurajoitusalueella. (Mika Lankinen)

Mittauksissa käytimme Loadmann-pudotuspainolaitetta ja levykuormakoetta. Huomasimme kastelulla olevan tuloksia parantavia vaikutuksia koko testauksen ajan. Esimerkkinä kahdeksan ylityskerran Loadmann tulokset ilman kastelua ja kasteltuna (Kuva 19). Koetiivistyskentän tarkoituksena oli myös seurata pudotuspainolaitteen ja levykuormamittauksen eroja ja saada näin omiin työn lomassa tapahtuviin mittauksiin luotettavaa dataa, jolla pudotuspainolaitteen arvoilla levykuormakokeet antaisivat vaatimuksien mukaisesti riittävän tuloksen.

Tuloksia analysoitaessa on ensimmäinen sarake E-moduuli, toinen sarake mitattu painuma mm, kolmas sarake mittauskerta sekä tiiviyssuhde E2/E1. 300 luku kertoo mittauslevyn halkaisijan millimetreissä. Levykuormakokeen ja Loadmann-pudotuspainolaitteen erot tuloksissa olivat InfraRYL:n vaatimuksien mukaiset eli Loadman-pudotuspainolaitteella arvot olivat hieman korkeampia, mikä oli odotettavissakin.

kuiva 8 x jyrätty				
0091	1.09	1R1.00	300	2019-05-09T09:18:17
0101	0.98	2R1.11	300	2019-05-09T09:18:26
0106	0.94	3R1.16	300	2019-05-09T09:19:07
0109	0.91	4R1.20	300	2019-05-09T09:19:18
0112	0.89	5R1.23	300	2019-05-09T09:19:28
0115	0.86	6R1.27	300	2019-05-09T09:20:06
0116	0.86	7R1.28	300	2019-05-09T09:20:17
0120	0.84	8R1.31	300	2019-05-09T09:20:26
0120	0.83	9R1.32	300	2019-05-09T09:21:16
kasteltu 8 x jyrätty				
0098	1.02	1R1.00	300	2019-05-09T09:24:24
0107	0.93	2R1.09	300	2019-05-09T09:25:02
0114	0.87	3R1.17	300	2019-05-09T09:25:13
0118	0.84	4R1.21	300	2019-05-09T09:25:22
0120	0.83	5R1.23	300	2019-05-09T09:26:01
0123	0.81	6R1.26	300	2019-05-09T09:26:10
0125	0.80	7R1.28	300	2019-05-09T09:26:19
0127	0.78	8R1.30	300	2019-05-09T09:26:29
0128	0.78	9R1.31	300	2019-05-09T09:27:08

Kuva 19. Loadmann 2 pudotuspainolaitteen tulokset ilman kastelua ja kasteltuna (GRK Infra Oy)

Toinen koetiivistyskenttä tehtiin samalla tavalla kuin ensimmäisellä kertaa. Tällä kertaa kuitenkin keskityttiin oikean vesimäärän käyttöön ja arvioimme aikaa, montako m³rtr saisimme tietystä ajassa tiivistettyä. Aikaa tiivistämiseen ei voinut käyttää liikaa, koska 20 tunnin radan totaalikatkon aikana tehtävät liityntäalueiden massanvaihdot olivat määriltään melko suuria. Toisen koetiivistyskentän mittausten jälkeen saimme halutut ja vaaditut arvot kohdalleen. Kokeen tuloksena tiivistäminen tehtiin kahdeksalla 1-valssijyrän ajokerralla ja kahden ensimmäisen ylityskerran jälkeen tehtiin reilu kastelu. Veden täytyi antaa imeytyä rakenteeseen ennen kuin tiivistämistä 1-valssijyrällä voitiin jatkaa. Mikäli tiivistystyötä jatkettiin liian nopeasti, oli vaarana, että rakenne häiriintyi ja tiivistymistä ei tapahtunut.

Liitosalueiden massanvaihdot

Vanhan- ja uuden ratalinjan liitosalueilla tehtiin useaan otteeseen massanvaihtoja, joissa vaihdettiin tukikerros, välikerros ja eristyskerros. Yhdessä 20 tunnin liikennekatkossa tehtiin aina noin 40–120 metriä massanvaihtoja riippuen paikasta ja vaihdettavien kerrosten paksuudesta. Massanvaihtojen tarkoitus oli saada aikaan yhtenäinen ja homogeeninen rakenne, jolloin radan muodonmuutoksilta vältytään. Tarvittavat materiaalit varastoitiin valmiiksi työalueiden lähisille. Vanhojen kerrosten kaivutyöt tehtiin kolmella noin 30 tonnisella telakaivinkoneella ja ajan säästämiseksi ratajohtimien orsia ei käännetty sivuun (Kuva 20). 30 tonninen kaivinkone mahtui juuri työskentelemään ajolankojen alla varovaisuutta noudattaen.



Kuva 20. Vanhojen rakennekerrosten kaivu liitosalueella (Mika Lankinen)

Uudet eristys- ja välikerrosmateriaalit siirrettiin pyöräkuormaajien ja dumperien avulla rakenteisiin kerrospengerryksenä noin 0,3 metrin kerrosvahvuuksiin. Ennen varsinaista jyräystä ajettiin tyhjäpainoltaan 30 tonnisella pyöräkuormaajalla

kauha täynnä soraa koko rakennettavan kerroksen läpi, jotta kastelussa käytettävä traktorilla vedettävä vesikärry ei uppoa tiivistymättömään rakenteeseen. 1-valssijyriä oli kaikissa massanvaihdossa kaksi kappaletta, joista toinen oli 12 tonnia painava ja toinen 7 tonnia painava. Kantavuus- ja tiiviysmittaukset tehtiin jokaisesta tehdystä kerroksesta Loadmann-pudotuspainolaitteella. Levykuormituskokeen käyttö massanvaihdossa ei tullut kysymykseen sen viemän ajan takia.

Eristys- ja välikerroksen teko

Eristys- ja välikerroksen teko luonnonsorasta lähti käyntiin rakennettavan alueen länsipuolelta. Työtapana oli kerrospengerrys ja vastaanotto koneena oli 25 tonnia painava kaivinkone varustettuna 3D-koneohjauslaitteilla, jolloin saatiin penkeeseen malli kerralla suunnitelmien mukaiseksi. Koneohjauksesta oli hyötyä myös kerrospengerryksen kerroksien paksuuden määrittämisessä, mikä tehtiin 300 mm kerroksin. Materiaali ajettiin aina mahdollisuuksien mukaan tasatun ja tiivistetyn kerroksen päältä ja eri ajouria, jolloin saatiin hyödynnettyä kuorma-autojen pyörien staattinen kuormitus ja tiivistämisvaikutus. Jokaisen tehdyn 300 mm kerroksen välissä käytiin ottamassa pudotuspainolaitteella kantavuus mittauksia. Mikäli tulokset eivät täyttäneet suunnitelmien mukaisia vaatimuksia, niin silloin jatkettiin tiivistystyötä, kunnes arvot olivat hyväksytyt. Vaadittavien arvojen saavuttamiseksi jouduimme tarkastamaan käytettävän veden määrää ja ohjeistamaan 1-valssijyrän kuljettajaa ajamaan hiljempaa. Näillä keinoilla saatiin ylitettyä vaadittavat arvot ja työtä voitiin jatkaa.

Tutkimukset ja havainnot

Eristys- ja välikerrosmateriaalin toimittaja oli kesän aikana välpännyt valmiiksi noin 20 000 m³ materiaalia kasalle odottamaan työmaalle toimittamista. Materiaalitoimittajan oman laatuseurannan perusteella materiaali noudatti selkeästi InfraRYL:n vaatimuksia eristys- ja välikerroksen rakeisuuskäyrien suhteen. Välpäys tapahtui välpällä, jonka varpuväli oli 150 mm ja siten materiaali noudatti suunnitelmien mukaisia laatuvaatimuksia. GRK Infra Oy:n tekemä eristys- ja välikerros onnistui hyvin materiaalista, joka oli kesän aikana valmiiksi välpätty. Myös tiiviys ja kantavuusmittaukset osoittivat materiaalin olevan sopivaa käyttötarkoitukseensa.

Tilaaaja ja valvojaorganisaatio tekivät omia näytteenottoja ja rakeisuusseulontoja työmaalle jo toimitetuista materiaaleista ja niiden perusteella epäiltiin materiaalin sisältävän liian isoja kiviä. Samalla työmaalla huomattiin eristys- ja välikerrosmateriaalin muuttuneen huomattavasti huonommin tiivistyväksi. Olimme yhteydessä materiaalin toimittajaan ja sieltä kerrottiin valmiiksi välppätyn kasan olevan melkein loppu ja materiaalia alettiin välppäämään suoraan penkasta. Pyysimme rakeisuusnäytteet tavarasta ja työmaalla kokeilimme erilaisia tiivistystapoja, miten tämä hieman erilaisella, mutta silti InfraRYL:n mukaan sallitulla käyrällä oleva materiaali saadaan tiivistämään kunnolla. Materiaalin tiivistämiskokeiluista ja koekenttien tekemisen kokemuksesta huolimatta emme saaneet pintaa kovaksi. Myöskään staattinen kuorma-autojen pyörien kuorma ei tiivistänyt muuttunutta materiaalia, vaan pinta murtui aina sillä liikuttaessa (Kuva 21).



Kuva 21. Eristys- ja välikerrosmateriaalin tiivistämisiongelmiä. (Mika Lankinen)

Tiivistämisiongelmat aiheuttivat sen, että halusimme tutkia materiaalia tarkemmin. Pyysimme rakeisuusnäytteet materiaalin toimittajalta ja otimme myös itse näyt-

teitä, jotka vietiin riippumattomaan laboratorioon. Kiviainestoimittajan rakeisuusnäytteiden tulokset (Liite 2) ja GRK Infra Oy:n omien rakeisuustestien tulokset olivat verrattavissa toisiinsa eli molempien teettämät käyrät olivat samanlaiset.

Verrattaessa touko-kesäkuun massavaihdossa ratapenkereen välpättyä eristys- ja välikerrosmateriaalia syksyn silmämääräisestäkin muuttuneeseen materiaaliin voidaan todeta rakeisuusnäytteiden perusteella, että hyvin tiivistyvän materiaalin käyrä (Liite 3) noudattaa InfraRYL kuvaajan 21230:K1 ylä- ja alaviitearvojen muotoa. Rakeisuuskäyrän muodon ollessa erilainen kuin reunojen viitearvojen mukainen, on suuri mahdollisuus, että materiaalin tiivistämisessä tulee ongelmia.

5.2 Rauha - Imatra T (RU2)

GRK Infra Oy voitti urakkakilpailussa Luumäki – Imatra-ratahankkeessa toisen ison ratauran (RU2). Kuvassa 22 on esitetty urakan sijainti ilman urakkarajoja. Urakassa rakennetaan nykyisen raiteen pohjoispuolelle uusi raide, kunnostetaan käytössä oleva raide ja rakennetaan uusia siltoja. Urakan mukainen paaluväli on 317+500 – 325+320 ja maastossa sijainti on likimain Rauhan aseman tienoilta Sienimäen ylikulkusillalta muutama sata metriä Imatra tavara-asemaa kohden. Urakan sisällä on kolme siltakohdetta, jotka ovat erillisessä kilpailutuksessa annettu kilpailevan yrityksen tehtäväksi. Tilaaja velvoittaa hankkeen sisällä erillisissä urakoissa toimivia yrityksiä yhteensovittamaan työt niin, että esteitä tai haittoja ei kummallekaan osapuolelle synny.



Kuva 22. RU2 urakan sijainti Imatralla. (Väylä)

Pengertäyttö

Ratapenkereitä tehdään RU2-hankkeessa ratalinjan ja uuden pohjoisen raiteen leikkauksista siirrettävistä massoista. Ennen varsinaisten kaivutöiden alkua on tutkittu leikkausmassojen sopivuutta rakennettaviin rakenteisiin. Tilaaja on teettänyt omat tutkimukset ja kairaukset, joiden perusteella GRK Infra Oy on tehnyt tarkempia tutkimuksia ja tehnyt koekuoppia, joista on tehty pesuseulontoja materiaalin kelpoisuuden varmistamiseksi.

Paaluvälillä 319+880 – 320+580 sijaitsee iso leikkaus, josta ennakkotietojen perusteella arveltiin saatavan penger- ja rakennekerroksiin kelpavaa tavaraa niin paljon, ettei penger-, eristys- ja välikerrosmateriaalia juurikaan tarvitsisi ostaa. Työmaan leikkausten edetessä ja leikkauksesta materiaalia siirrettäessä penkereeseen havaittiin materiaalin vaihtelevan paljon, riippuen leikkauspaikasta. Leikkauksen alussa leikattava materiaali oli hyvin tiivistyvää ja penkereeseen sijoitettuna materiaalista saatiin pudotuspainolaitteella hyviä tuloksia. Penkereen teko oli muutaman viikon tauolla, kun koneet olivat toisessa paikassa, mutta koneiden palatessa takaisin ison leikkauksen kaivuun, todettiin materiaalin muuttuvan kaivun edetessä kauttaaltaan hienommaksi eikä siitä saanut penkereeseen tiivistetynä pudotuspainolaitteella vaadittavia tuloksia kasteltunakaan. Penkereen teko keskeytettiin välittömästi ja materiaalia alettiin ajamaan toisarvoisiin täyttöihin ja läjitysalueille, joissa tiivistymisellä ei ole tarkkoja vaatimuksia.

Penkereiden kelpoisuuden varmistamiseksi tilaaja vaati jokaisesta 500 mm täyttö- / tiivistyskerroksesta laadunvarmistuksen osoitusta muutenkin kuin pelkästään työtapatarkkailuna. Mittauksissa käytimme Loadman-pudotuspainolaitetta ja levykuormakoetta. Seuraavaa täyttö- / tiivistyskerrosta ei saanut aloittaa tekemään ennen kuin edellisen kerroksen laadunvarmistustulokset olivat vaatimusten mukaiset. Kaikki laadunvarmistuksen mittauksien sijainnit otettiin kiinni 3D-koneohjausjärjestelmällä varustetulla puskukoneella. Mittauksien tulokset kootaan yhteen kelpoisuusasiakirjaan (Liite 4), josta pystytään varmentamaan työn oikeaoppinen suorittaminen ja laatu.

Eristys- ja välikerrosten koekentät

Koekenttiä tehtiin kiviainestoimittajan työmaalle toimittamasta eristys- ja välikerrosmateriaaleista, koska halusimme varmistaa materiaalin tiiviys- ja kantavuusominaisuudet ennen töiden jatkumista. Koekentät tehtiin tulevan pohjoisen raitteen läheisyyteen, jolloin voitiin varmistaa pohjamaan samankaltaisuus. Toinen kentistä tehtiin kuivana suoraan varastokasasta siirretystä materiaalista ja toinen kentistä tehtiin kasteltuna jokaisesta tiivistämiskerroksesta. Kenttien korkeus oli noin 1 metri ja ne tehtiin kahdessa 500 mm kerroksissa. Koekenttien jyräskerrat olivat jaettu neljään osaan, jotka olivat 4, 6, 8 ja 10 jyräskertaa. Tiivistys tapahtui 12 tn painoisella 1-valssijyrällä ja aina kaksi viimeistä ylityskertaa ajettiin lyhyellä iskulla, kun ensimmäiset ylityskerrat olivat aina pitkällä iskun pituudella.

Kentistä otettiin sekä levykuormakokeet että Loadman-pudotuspainolaitetekokeet. Levykuormakokeissa oli ongelmana mittakellojen ympärööriminen eikä tuloksia saanut edes jokaisesta mittauskohdasta. Kokonaisuudessaan parhaat levykuormakokeen tulokset saatiin kahdeksan 1-valssijyrän ylityskerran jälkeen sekä kuivana että kasteltuna. Kaikki levykuormakokeiden tulokset jäivät vaadituista kantavuuden (E2) tuloksista yli 60 MPa, joka johti siihen, että asiaa ryhdyttiin tutkimaan tarkemmin.

Teimme katselmuksen materiaalitoimittajan soranotto paikalle yhdessä valvontaorganisaation edustajan kanssa. Katselmuksessa todettiin soranotto paikan olevan avattu juuri GRK:n työmaata varten. Soranotto paikan pienen koon takia materiaalin ottaminen silmämääräisesti paremmasta paikasta ei onnistu, jolloin paremman rakeisuuskäyrän omaavan materiaalin välppääminen ei ole mahdollista.

Toiset koekentät tehtiin materiaalitoimittajan kahdessa eri paikoissa olevissa sora-ramontuissa, joissa tutkittiin, saadaanko parempia tuloksia eri kohdista sora-ramontua otetusta ja välpätystä materiaalista. Sora-ramonttujen materiaalit eivät useinkaan ole tasalaatuisia, joten ammattitaitoisen pyöräkuormaajan kuljettajan toimesta voidaan saada toivottu rakeisuus aikaiseksi. Sora-ramonttu 1:ssä tehtiin kaksi erillistä koekenttää, joiden materiaali oli saatu tehtyä hieman erilaiseksi sora-ramontauspaikan valinnan takia. Testit tehtiin samalla tavalla kuin aiemmissakin koekentissä, sillä erolla, että 1-valssijyrän paino oli 7 tonnia ja kentät tehtiin

kuivana. Tulokset olivat samankaltaisia kuin ensimmäisissä koekentissä. Soramonttu 2:ssa tehtiin samanlainen koekenttä valmiiksi välipätystä eristys- ja välikerrosmateriaalista. Materiaali oli silmämääräisesti hieman erilaista, karkeampaa ja sekarakeista, mutta tulokset olivat taas samankaltaisia kuin aiemminkin.

Kolmas koekenttärakenne tehtiin taas samaan paikkaan kuin ensimmäiset koekentät (Kuva 23). Käytimme kevyempää 7 tn painoista yksivalssijyrää kenttien teossa, jotta epäily liian raskaan jyrän tuloksien heikentämisestä voidaan sulkea pois. Kenttä tehtiin samanlaisena kuin aiemmin eli eristyskerros noin 1000 mm, 500 mm nosto kerroksin ja välikerros 300 mm kerroksin. Koekenttään käytettävä materiaali oli samaa kuin aiemmin ensimmäisessä koekentässä käytetty materiaali ja se kannettiin sekä tasattiin pyöräkuormaajalla. Troxler-mittauksen suoritti Mitta Oy ja jokaiselle kentän osiolla tehtiin useita mittauksia mittavirheiden minimoimiseksi. Mittaaja otti myös näytteitä Proctor-koetta varten, jotta saadaan oikea vertailuarvo maksimikuivairtiheyden määrittämiseen. Troxler-kokeen tulokset antoivat tiiviyssasteen prosentteina ja kokonaisuudessaan tiiviyssasteet olivat hyviä ja ylittivät vaatimukset. Eristyskerroksen paksuutta vastaavassa otannassa lähes kaikki otannat ylittivät myös minimiarvon 92 %. Miniarvon alitus 6:n tiivistyskerran kohdassa oli yksittäinen alitus, muiden kolmen mittapisteen ollessa reilusti yli 95 %:n tiiviyssasteen. 10 tiivistyskerran tulokset olivat hävinneet eristyskerroksen osalta johonkin, joten niitä emme saaneet analysoidavaksi. Tulokset eristyskerroksen Troxler-mittauksista:

- 4 tiivistyskerran jälkeen ja neljän Troxler otannan mukaan keskiarvo oli 95,6 %, minimitulokset 93,6 %
- 6 tiivistyskerran jälkeen ja neljän Troxler otannan mukaan keskiarvo oli 96,3 %, minimitulokset 90,7 %
- 8 tiivistyskerran jälkeen ja neljän Troxler otannan mukaan keskiarvo oli 96,5 %, minimitulokset 94,1 %



Kuva 23. Koekenttärakenteen tekoa (Mika Lankinen)

Välikerroksen lisäämisen ja tiivistämisen jälkeen (300 mm) otettiin uudestaan Troxler-mittaus ja tulokset olivat linjassa eristyskerroksen kanssa. Välikerroksen teossa jätettiin 4 ja 6 tiivistyskerran osiot tekemättä aikaisempaan kokemukseen nojaten ja tehtiin 8 ja 10 tiivistyskerran kentät, joista Troxler-mittaukset otettiin Mitta Oy:n toimesta. Tiiviyssaste jäi hieman huonommaksi kuin eristyskerroksesta otetut näytteet. Kerrospaksuuden ollessa noin 300 mm ja tiivistyskertojen lukumäärän ollessa 8 & 10 on syytä olettaa, että materiaali on alkanut erottumaan ja tässä tapauksessa jyräyskertoja on ollut liian paljon suhteessa kerrospaksuuteen. Välikerroksen teossa huomioitava jatkossa kerrospaksuuden vaikutus tiivistämiseen ja tiivistämiskertojen lukumäärää tarpeen mukaan vähennettävä parhaan mahdollisen tiiviyden aikaansaamiseksi. Tulokset välikerroksen Troxler-mittauksista:

- 8 tiivistyskerran jälkeen ja neljän Troxler otannan mukaan keskiarvo oli 93,3%, minimitulokset 91,6 %
- 10 tiivistyskerran jälkeen ja neljän Troxler otannan mukaan keskiarvo oli 94,8 %, minimitulokset 90,4 %

Välikerroksen tulokset jäivät huonommiksi kuin eristyskerroksen tulokset, vaikka materiaali oli täysin samaa ja työtapakin täysin sama. Kerrospaksuus pieneni 200 mm pienemmäksi kuin eristyskerroksessa. Todennäköisesti liiallinen jyräys suhteessa kerrospaksuuteen vaikutti tulosten heikkenemiseen.

Neljäs koekenttärakenne tehtiin tilaajan eli Väylän tarkkojen ohjeiden mukaisesti. Koekenttä tehtiin taas tuttuun paikkaan ja se oli mitoiltaan noin 30 metriä pitkä ja noin 6 metriä leveä. Pohjamaan kantavuus varmistettiin ja siitä otettiin kantavuusmittauksia levykuormakokeella ja Loadman-pudotuspainolaitteella. Kaikista pinnoista ja mittauskohdista otettiin 3D-koneohjausjärjestelmällä varustetulla kaivinkoneella tarkkeet. Tiivistyskalustona oli hyväksi havaittu 7 tonnia painava 1-valsijrä ja materiaalien kantaminen suoritettiin pyöräkuormaajalla läheisestä varastokasasta. Mittaukset suoritettiin seuraavanlaisesti:

- Tiivistetystä pohjamaasta otettiin kolme levykuormakoetta ja kuusi Loadmann-koetta.
- Eristys- ja välikerroksista otettiin kolme Troxler-, levykuormakoetta / kentän osio.
- Loadmann-mittauksia otettiin eristys- ja välikerroksesta kuusi / kentän osio.
- Jokaisesta kerroksesta otettiin näyte, pois lukien pohjamaa
- Proctor-näyte eristys- ja välikerrossorasta otettiin varastokasasta, kolmesta erillisestä kohdasta, josta materiaalit yhdistettiin yhdeksi näyteeräksi.
- Proctor-kokeet tehtiin Mitta Oy:n Oulun laboratoriossa koekentän eristys- ja välikerroksen materiaaleilla viidellä eri vesipitoisuudella.

Kokeen tuloksista voitiin päätellä, että suora mittaustapa eli Troxlerilla suoritettava säteilymittaus on huomattavasti luotettavampi tapa tutkia InfraRYL:n mukaista valmiin rakenteen vaatimuksenmukaisuutta luonnon lajittamasta materiaalista kuin levykuormakoe ja pudotuspainolaitemittaukset. Testitulokset ovat säteilymittauksella huomattavasti tasaisempia kuin edellä mainitut muut mittaussmenetelmät.

6 Yhteenveto ja pohdinta

Ratapenkereen materiaalin täytyy olla hyvänlaatuista ja sekarakeista soraa ja hiekkaa, jotta kantavuus ja tiiviysarvot saavutetaan. Vaikka ratapenkereen kantavuusarvot eivät ole niin kovat kuin ylemmissä radan kerroksissa, niin siltikään vaadittavia arvoja ei saavuteta liian hienojakoisella eikä epäloogisella rakeisuuskäyrällä olevalla materiaalilla. Karkearakeisemmilla materiaaleilla saadaan varmemmin hyvä ja kantava ratapenger. Leikkauksesta otettavan pengermateriaalin luontainen rakeisuuden vaihtelevaisuus aiheuttaa paljon lisätyötä ja materiaalin testausta, mikä syö paljon resursseja.

Luonnon lajittamasta hiekasta ja sorasta tehtävään eristys- ja välikerroksen rakeisuuskäyrän muotoon pitää kiinnittää huomiota, vaikka rakeisuusseulonnan tulos pysyisikin ohjealueiden sisällä. Rakeisuuskäyrän muodon pitää olla hienosta eli 0-päästä loiva ja yläpäästä jyrkkä, mikäli halutaan varmistaa materiaalin paras mahdollinen kantavuusarvo. Rakeisuuskäyrän muodon tulisi myös noudattaa reuna-arvojen suuntaa, jolloin materiaali on riittävän sekarakeinen ja hyvin tiivistettävissä. RU2-hankkeen koekenttien eristys- ja välikerros materiaalin rakeisuusnäytteet eivät noudattaneet reuna-arvojen suuntaa, mikä oli ainakin yksi olennainen syy kantavuusongelmiin.

Ongelmalliseksi materiaalin valinnan ja käytön tekee se, että eristys- ja välikerros toimittajan tarvitsee vain osoittaa materiaalin mahtuvan InfraRYL käyrän 21230:K1 sisälle ja mitään materiaalin kantavuus tai tiiviys vaatimuksia materiaalityöntoimittajan ei tarvitse osoittaa. Tämä taas johtaa siihen, että pääurakoitsija on usein huonossa välikädessä tilaajan ja materiaalityöntoimittajan välissä, jolloin on vaarana, että kustannukset lankeavat pääurakoitsijan vastuulle. InfraRYL antaa mahdollisuuden tehdä radan rakennekerroksia käytännössä sellaisista materiaaleista, joista ei mitenkään ole mahdollista saavuttaa vaadittavia kantavuus arvoja. Tämä tulisi myös tilaajien huomioida jo suunnitteluvaiheessa eli työselostuksiin tulee laittaa InfraRYL:ä tiukempi vaatimus luonnonmateriaalin rakeisuuskäyrän osalta.

Tiivistämisessä käytettävän 1-valssijyrän painolla ei omissa testeissämme huomattu suurta eroa omapainoltaan 12 tonnisen tai 7 tonnisen jyrän välillä. Kuitenkin aikaisempien tutkimusten perusteella on suositeltavaa käyttää noin 7 tonnia painavaa 1-valssijyrää, jotta vältetään tiivistettävän materiaalin häiriintymiseltä. Kastelulla ei myöskään ollut havaittavissa suuria vaikutuksia, mikäli kantavuusmittaukset tehtiin samana päivänä kuin kastelu suoritettiin. Kasteltuna mittaustulokset usein hieman paranivatkin, mutta tulosten paraneminen oli kantavuuden E2 suhteen luokkaa 10 MPa, joka ei useinkaan ollut riittävä parannus vaadittavien arvojen saavuttamiseen. Kastelu aiheutti kuitenkin usein pitkiä odotteluja veden hitaan imeytymisen takia, joten työn sujuvuuden kannalta olisi parempi tehdä kerroksia ilman kastelua. Vesi kuitenkin aiheuttaa kuivuessaan soraan ja hiekkaan myös tiettyjä partikkeleiden yhteen liimautumisen ominaisuuksia, joita tässä opinnäytetyössä ei ole käsitelty ja jatkotutkimuksien tarve on ilmeinen.

Luonnon lajittamille materiaaleille tulisi ensisijaisesti käyttää säteilymittausta ja laadunvarmistus pitäisi hakea tiiviuden kautta. Useiden kokeiden ja kahden tutkimuksen kohteena olevan urakan pohjalta voidaan sanoa, että sopivaa luonnon lajittamaa eristys- ja välikerrokseen sopivaa hiekkaa ja sora on vaikea löytää Etelä-Karjalan alueella. Jatkossa olisi hyvä jo ennen eristys- ja välikerros tavarantoimituksia työmaalle, materiaalin toimittajan esittää omin kokein jo soranottopai- kassa tehdyllä koekentällä materiaalin soveltuvuus ratarakenteisiin.

Raekokosuhteen vaatimukset olisi hyvä ottaa uudelleen käyttöön, koska sillä voitaisiin estää ainakin jollakin tapaa liian tasarakeisen soran ja hiekan käytön eristys- ja välikerroksissa. Myöskin kantavuuden vaatimukset eristys- ja välikerroksille ovat useimmille luonnonlajittamille materiaaleille liian kovia, joita ei käytännössä pystytä saavuttamaan, vaikka tiiviuden kautta rakenne täyttäisikin vaadittavat vaatimukset. Alemmissa pengerkerroksissa vaadittavat kantavuus ja tiiviysarvot ovat helpommin saavutettavissa ja niihin yleensä päästääkin ilman suurempia ongelmia.

Lähteet

Brecciaroli, F. & Kolisoja, P. 2006. Deformation behaviour of railway embankment materials under repeated loading: Literature review. Publications of Finnish Rail Administration A 5/2006. Helsinki.

Erkkilä, J. 2010. Radan alusrakenteen kantavuus- ja tiiviysselvitys. Diplomityö. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/6764/erkkila.pdf?sequence=4&isAllowed=y>, luettu 7.2.2020

Geologia.fi. Maa-aines. Tuotantoalueet. <http://www.geologia.fi/index.php/2019/12/18/maa-aines/>. luettu 19.4.2020

Kalliainen ym. 2011. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 10/2011. Radan eristys- ja välikerrosten tiivys- ja kantavuustutkimus. Helsinki.

Liikennevirasto. 2018. Ratatekniset ohjeet (RATO) osa 3. Radan rakenne. Liikenneviraston ohjeita 13/2018. Helsinki.

Tielaitos. 1993. Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset. Yleiset perusteet. Tielaitos; Kehittämiskeskus. Helsinki.

Väylävirasto. Hankkeet. Luumäki – Imatra ratahanke. Urakat. Kaksoisraideosuus Rauha – Imatran tavara-asema. <https://vayla.fi/luumaki-imatra-ratahanke/urakat/kaksoisraideosuus-rauha-imatran-tavara-asema#.XkUPzG5uLug>. luettu 13.2.2020

Väylävirasto. Hankkeet. Luumäki – Imatra ratahanke. Urakat. Saimaan kanavan ratasilta. <https://vayla.fi/luumaki-imatra-ratahanke/urakat/saimaan-kanavan-ratasilta#.XkURTW5uLuh>. luettu 13.2.2020

Ympäristöhallinnon yhteinen verkkopalvelu. Luonnonvarojen kestävä käyttö. Maaainesten otto. https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Kulutus_ja_tuotanto/Luonnonvarojen_kestava_kaytto/Maaainesten_ottaminen. luettu 3.2.2020

Liitteet

Liite 1. Ratapenkereen, eristys- ja välikerroksen kantavuus ja tiiviysvaatimukset

Ratapenkereen tiiviysvaatimukset säteilymittausta käytettäessä (InfraRYL 2019/1. Taulukko 18111:T6)

Etäisyys radan kv:sta tai kadun tsv:sta	Vaadittu tiiviyysaste	
	Keskimäärin	Vähintään
≤ 3,0 m	92 %	90 %
> 3,0 m	90 %	87 %

Ratapenkereen kantavuusvaatimukset levykuormakoetta käytettäessä (InfraRYL 2019/1. Taulukko 18111:T7)

Etäisyys radan kv:sta tai kadun tsv:sta	E ₂ (MPa)	
	Keskimäärin	Vähintään
≤ 3,0 m	120	100
> 3,0 m	100	90

Ratapenkereen tiiviyssuhdevaatimukset kantavuuden suhteen levykuormakoella (InfraRYL 2019/1. Taulukko 18111:T8)

Kantavuus (E ₂), MPa	Tiiviyssuhde E ₂ / E ₁	
	Etäisyys radan kv:sta tai kadun tsv:sta ≤ 3,0 m	Etäisyys radan kv:sta tai kadun tsv:sta > 3,0 m
< 125	≤ 2,6	≤ 3,0
125...134	≤ 2,7	≤ 3,1
135...144	≤ 2,8	≤ 3,2
145...154	≤ 2,9	≤ 3,3
155...164	≤ 3,0	≤ 3,4
165...174	≤ 3,1	≤ 3,5
175...184	≤ 3,2	≤ 3,6
≥ 185	≤ 3,3	≤ 3,7

Ratapenkereen kantavuuden vaatimukset pudotuspainolaitteella (InfraRYL 2019/1. Taulukko 18111:T9)

Etäisyys radan kv:sta tai kadun tsv:sta	E ₂ (MPa)	
	Keskimäärin	Vähintään
≤ 3,0 m	140	115
> 3,0 m	115	105

Ratapenkereen tiiviyssuhdevaatimukset kantavuuden suhteen pudotuspainolaitetta käytettäessä (InfraRYL 2019/1. Taulukko 18111:T10)

Kantavuus (E ₂), MPa	Tiiviyssuhde E ₂ / E ₁	
	Etäisyys radan kv:sta tai kadun tsv:sta ≤ 3,0 m	Etäisyys radan kv:sta tai kadun tsv:sta > 3,0 m
< 125	≤ 2,2	≤ 2,6
125...134	≤ 2,3	≤ 2,7
135...144	≤ 2,4	≤ 2,8
145...154	≤ 2,5	≤ 2,9
155...164	≤ 2,6	≤ 3,0
165...174	≤ 2,7	≤ 3,1
175...184	≤ 2,8	≤ 3,2
≥ 185	≤ 2,9	≤ 3,3

Eristyskerroksen levykuormakokeen tiiviyssuhdevaatimus kantavuuden E2 suhteen käytettäessä soraa ja hiekkaa yksittäisessä mittauksessa (InfraRYL 2019/1. Taulukko 21220:T4)

Kantavuus (E_2), MPa	Tiiviyssuhde E_2/E_1
< 125	$\leq 2,2$
125...134	$\leq 2,3$
135...144	$\leq 2,4$
145...154	$\leq 2,5$
155...164	$\leq 2,6$
165...174	$\leq 2,7$
175...184	$\leq 2,8$
≥ 185	$\leq 2,9$

Eristyskerroksen tiiviyssuhdevaatimus tehtynä hiekasta ja sorasta kantavuuden E2 suhteen pudotuspainolaitetta käytettäessä (InfraRYL 2019/1. Taulukko 21220:T5)

Kantavuus (E_2), MPa	Tiiviyssuhde E_2/E_1
> 125	$\leq 1,9$
125...134	$\leq 2,0$
135...144	$\leq 2,1$
145...154	$\leq 2,2$
155...164	$\leq 2,3$
165...174	$\leq 2,4$
175...184	$\leq 2,5$
≥ 185	$\leq 2,6$

Välikerroksen levykuormituskokeella määritetyn tiiviyssuhteen vaatimukset yksittäiselle mittaukselle kantavuuden E2 suhteen käytettäessä hiekkaa ja soraa (InfraRYL 2019/1. Taulukko 21230:T3)

Kantavuus (E ₂),MPa	Tiiviyssuhde E ₂ /E ₁
< 125	≤ 2,0
125...134	≤ 2,1
135...144	≤ 2,2
145...154	≤ 2,3
155...164	≤ 2,4
165...174	≤ 2,5
175...184	≤ 2,6
≥ 185	≤ 2,7

Hiekasta ja sorasta rakennetusta välikerroksesta pudotuspainolaitteella määritetyn yksittäisen mittauksen tiiviyssuhteen vaatimukset kantavuuden E2 suhteen (InfraRYL 2019/1. Taulukko 21230:T4)

Kantavuus (E ₂),MPa	Tiiviyssuhde E ₂ /E ₁
>125	≤ 1,7
125...134	≤ 1,8
135...144	≤ 1,9
145...154	≤ 2,0
155...164	≤ 2,1
165...174	≤ 2,2
175...184	≤ 2,3
≥ 185	≤ 2,4