

Joonas Kaskinen

JÄTTEENPOLTON POHJAKUONAKOERA- KENTEIDEN PITKÄAIKAISSEURANTA

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: Prof. Pauli Kolisoja
Tarkastaja: DI Nuutti Vuorimies
Huhtikuu 2024

TIIVISTELMÄ

Joonas Kaskinen: Jätteenpolton pohjakuonakoerakenteiden pitkäaikaisseuranta.
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka, DI
Huhtikuu 2024

Tämän työn tavoitteena oli selvittää jätteenpolton pohjakuonan soveltuvuutta tierakenteen jakavaan ja suodatinkerrokseen. Soveltuvuutta arvioitiin Fortum Waste Solutions Oy:n jätteenpolttolaitoksella tuotetusta ja käsitellystä pohjakuonasta toteutettujen koerakenteiden seurantamittausten perusteella. Seurantamittauksia oli tehty kolmen vuoden ajan koekohteen rakentamisen jälkeen. Tässä työssä keskityttiin soveltuvuuden arviointiin kuonamateriaalin teknisten ominaisuuksien näkökulmasta. Pohjakuonan maarakennuskäyttöä osaltaan ohjaavien ympäristökelpoisuusominaisuuksien tutkiminen on rajattu tämän työn ulkopuolelle.

Tutkimuksen kirjallisuuskatsauksessa perehdyttiin jätteenpolttoprosessiin ja pohjakuonan jalostukseen jatkokäyttöä varten, tierakenteen kuormituskestävyyden ja siihen vaikuttaviin tekijöihin sekä roudan syvyyden ja routimisen laskennalliseen arviointiin. Koerakenteista kerätyn tiedon analysointi keskittyy roudan syvyyden mallintamiseen sekä rakenteille tehtyjen pudotuspainolaitemittausten tuloksista johdettavien ominaisuuksien määrittämiseen. Vertailurakenteina käytetyt referenssirakenteet oli toteutettu kokonaan luonnonkiviaineksista. Kuonakoerakenteista tulkittujen ominaisuuksien määrittäminen perustui vertailuun tunnettuihin materiaaleihin.

Routamallinnusten perusteella jätteenpolton pohjakuonamateriaaleille saatiin määritettyä jäätyneen tilan lämmönjohtavuudet sekä hiekkaan verrattava vastaavuuskerroin materiaalin lämmönjohtavuuden suhteen. Lämmönjohtavuuden määrittäminen tehtiin perustuen roudan syvyyteen ja rakennekerrosten mitattuun lämpötilajakaumaan. Kuonamateriaalien lämmönjohtavuudet olivat luonnonkiviaineksia alhaisempia, jonka voidaan katsoa johtuvan pääasiassa niiden huokoisesta rakenteesta. Pohjakuona on myös routaeristävyden näkökulmasta jonkin verran luonnonkiviaineksia parempaa. Routaeristävyyden vaikuttaa kiviaineksia alhaisemman lämmönjohtavuuden lisäksi pohjakuonan korkeampi vesipitoisuus.

Routamallinuksilla ja routanousuvaaituksilla tutkittiin kuonamateriaalien routimisherkkyttä. Takaisinlaskennan tuloksena saatujen segregatiopotentiaaliarvojen perusteella kuonamateriaalit ovat routivuudeltaan luonnonkiviaineksia vastaavia eli käytännössä routimattomia. Tämän tuloksen voidaan katsoa pätevän ainakin silloin, kun rakenteiden etäisyys pohjavedenpintaan on riittävä.

Kantavuusmittausten perusteella pyrittiin arvioimaan kuonarakenteiden jäykkyyden kehitystä ja kuormituskestävyyttä pidemmällä aikavälillä. Lisäksi tarkasteltiin kuonamateriaalissa mahdollisesti tapahtuvaa ikääntymiseen liittyvää lujuuden kehitystä. Analyysin perusteella ei ollut nähtävissä indikaatiota rakenteiden vaurioitumisesta tai kantavuuden alenemasta. Toisaalta myöskään merkkejä lujuuden kasvusta ei tämän tutkimuksen pohjalta ollut todettavissa. Kuonarakenteiden kantavuuden kehitys vastasi luonnonkiviainesrakenteita ja kantavuus kehittyi kaikissa rakennetyypeissä huippuunsa ensimmäisen seurantavuoden aikana. Pudotuspainolaitemittauksista määritettyjen taipumasuppliloiden perusteella kuonamateriaaleille johdettiin E-moduuliarvot rakenteiden mitoituksessa käytettäväksi. Kuonamateriaalin moduuliarvot olivat jonkin verran luonnonkiviaineksia alhaisemmat.

Tutkimuksen käsiteltyjen ominaisuuksien perusteella jätteenpolton pohjakuona on soveltuvaa käytettäväksi tien jakavassa ja suodatinkerroksessa.

Avainsanat: jätteenpolton pohjakuona, uusiomateriaali, sivutuote, kuormituskestävyys, routamallinnus, takaisinlaskenta

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

ABSTRACT

Joonas Kaskinen: Long-term monitoring of bottom ash test structures from municipal solid waste incineration.

Master's Thesis

Tampere University

Civil Engineering, MSc

April 2024

The aim of this study was to assess the suitability of municipal solid waste incineration bottom ash for use in road construction as a sub-base course. The suitability was evaluated based on monitoring measurements of test structures constructed using bottom ash produced and treated at Fortum Waste Solutions Oy's waste incineration plant. Monitoring measurements were conducted for three years following the construction of the test site. This study focused on evaluating the suitability of the bottom ash from a technical perspective. Investigation into the environmental suitability characteristics guiding the use of bottom ash in earthworks is beyond the scope of this study.

The literature review of the study explores the waste incineration process and the treatment of bottom ash for further use, the load-bearing capacity of pavement structures and factors affecting it, as well as the computational assessment of frost and frost susceptibility. The analysis of the data collected from the test structures focuses on modeling the depth of frost penetration and determining the properties derived from falling weight deflectometer measurements on the structures. Some of the test structures were constructed entirely from natural stone aggregates. The determination of interpreted properties from bottom ash test structures was based on comparison with known materials.

Based on frost modeling, thermal conductivities in frozen state and equivalent coefficients comparing to sand for material thermal insulation were determined for bottom ash. The determination of thermal conductivity was based on frost depth and measured temperature distribution within the structural layers. The thermal conductivities of bottom ash materials are lower than those of natural stone aggregates, primarily due to their porous structure. Bottom ash also exhibits somewhat better frost insulation properties compared to natural stone aggregates. In addition to lower thermal conductivity of aggregates, bottom ash with higher water content also contributes to its frost insulation properties.

Frost modeling and frost heave measurements were used to investigate the frost susceptibility of bottom ash materials. Based on the segregation potential values obtained from the back calculations, bottom ash exhibit frost susceptibility similar to that of natural stone aggregates, practically meaning they are non-frost susceptible. This result can be considered valid at least when the distance of structures to the groundwater table is sufficient.

Based on the bearing capacity measurements, the aim was to assess the development of stiffness and load-bearing capacity of bottom ash structures over a longer period. Additionally, the potential aging-related strength development in bottom ash material was examined. The analysis did not reveal any indication of structural damage or decrease in bearing capacity. Conversely, there were also no signs of strength increase based on this study. The development of bearing capacity of bottom ash structures paralleled that of natural stone aggregate structures, with the bearing capacity reaching its peak value in all types of structures during the first year of monitoring. From the falling weight deflectometer measurements, modulus of elasticity values were derived for use in structural design. The modulus of elasticity values for bottom ash were somewhat lower than those for natural stone aggregates.

Based on this study, municipal solid waste incineration bottom ash is suitable for use in road construction as a sub-base course.

Keywords: municipal solid waste incineration bottom ash, recycled material, byproduct, load-bearing capacity, frost modeling, back calculation

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

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Työn tausta.....	1
1.2 Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset.....	2
1.3 Tutkimuskohde	3
1.4 Tutkimusmenetelmät	3
2. JÄTTEENPOLTON POHJAKUONA	5
2.1 Jätteenpolton volyyymi ja sen kehittyminen	5
2.2 Pohjakuona polttoprosessin sivutuotteena	6
2.2.1 Arinapoltto.....	6
2.2.2 Raakakuonan koostumus.....	7
2.3 Raakakuonan käsittely hyödyntämistä varten	8
2.3.1 Kemialliset menetelmät.....	9
2.3.2 Metallien fysikaalinen erottelu	10
2.3.3 Termiset menetelmät	12
2.4 Pohjakuonan materiaaliominaisuudet	13
2.5 Pohjakuonan käyttökohteet infrarakentamisessa	16
3. TIERAKENTEEN KUORMITUSKESTÄVYYS	18
3.1 Tien päällysrakenne.....	18
3.2 Rakenteen kuormitukset ja muodonmuutokset	19
3.2.1 Liikennekuormitus	20
3.2.2 Ympäristökuormitukset.....	22
3.2.3 Muodonmuutokset	24
3.3 Vaurioitumismekanismit.....	26
3.4 Kuormituskestävyyssmitoitus.....	29
3.5 Kantavuuden mittaaminen	31
3.5.1 Levykuormituskoe	31
3.5.2 Pudotuspainolaite	32
4. ROUTA JA ROUTAMITOITUS TIERAKENTEESSA	36
4.1 Roudan syvyyden laskennallinen arviointi.....	40
4.1.1 Maan jäätymisprosessi.....	36
4.1.2 Routiminen.....	39
4.2 Roudan syvyyden laskennallinen arviointi.....	40
4.2.1 Lähtöarvojen määrittäminen.....	40
4.2.2 Laskentamallit.....	44
4.3 Routanousun laskennallinen arviointi.....	47
4.4 Tierakenteen routamitoitus	49
5. KOERAKENNEKOhteet	52
5.1 Koerakenteiden kuvaus	52
5.1.1 Kuulojantie.....	52
5.1.2 Mt 2879 Riihimäki-Hikiä kevyenliikenteenväylä	54

5.2	Käytetyn pohjakuonan materiaaliominaisuudet.....	56
5.3	Kuulojantien rakentaminen ja rakentamisen aikaiset mittaukset	57
5.4	Kuulojantien seurantamittaukset.....	58
6.	MITTAUSTULOKSET	61
6.1	Lämpötilamittaukset.....	61
6.1.1	Ilman lämpötila seurantajaksolla	61
6.1.2	Roudan syvyys ja routanousu	63
6.2	Kantavuusmittaukset	69
6.2.1	Kuulojantie	69
6.2.2	Riihimäki-Hikiä kevyenliikenteenväylä.....	75
7.	MITOITUSPARAMETRIEN MÄÄRITTÄMINEN	79
7.1	Lämpötekni- sten ominaisuuksien määrittäminen takaisinlaskemalla mittauksista	79
7.1.1	Lämmönjohtavuus, laskentatapa I.....	79
7.1.2	Lämmönjohtavuus, laskentatapa II.....	84
7.1.3	Tulosten vertailu	88
7.1.4	Vastaavuusarvojen määrittäminen	95
7.1.5	Segregaatiopotentiaalin takaisinlaskenta	96
7.2	Rakennekerrosmoduulien takaisinlaskenta mittauksista	98
8.	TULOSTEN ANALYSOINTI JA JATKOTUTKIMUSSUOSITUKSET	107
8.1	Pohjakuonan lämpötekni- set ominaisuudet.....	107
8.2	Pohjakuonarakenteiden kuormituskestävyys	109
8.3	Jatkotutkimussuosituks et	110
8.4	Suosituksia koerakentamiseen uusiomateriaaleilla	112
9.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	114
	LÄHTEET	116
	LIITE A: ROUDAN SYVYYDEN KUVAAJAT TALVIEN MUKAAN	119
	LIITE B: ROUDAN SYVYYDEN KUVAAJAT RAKENTEIDEN MUKAAN	122
	LIITE C: ROUDAN SYVYYDEN KUVAAJAT LASKETTUNA ANALYYTTISESTI....	125
	LIITE D: ROUDAN SYVYYDEN KUVAAJAT TEMP/W	134
	LIITE E: RAKENNENÄYTTEENOTON TULOKSET	143
	LIITE F: RAKENNENÄYTTEENOTON VALOKUVAT	147

LYHENTEET JA MERKINNÄT

KÄSITTEET JA LYHENTEET

BCI	base curvature index, kuvaa rakenteen alaosan ja pohjamaan kuntoa
BDI	base damage index, kuvaa rakenteen tietyn osan kuntoa
E-moduuli	muodonmuutosmoduuli (kimmomoduli), kuvaa palautuvan venymän ja jännityksen suhdetta
FEM	finite element method, osittaisdifferentiaaliyhtälöiden numeerinen ratkaisumenetelmä
JpKu	jätteenpolton kuona, luokittelu maksimiraekoon mukaan
jäykkyyshmoduuli	jännitystilasta riippuva muodonmuutosmoduuli, kuvaa syklisen kuormituksen stabiloituneen palautuvan muodonmuutoksen ja deviatorisen jännityksen suhdetta
kantavuus	koko tierakenteen palautuvaa muodonmuutoskäyttäytymistä kuvaava moduuli
KKL	kuormituskertaluku
raakakuona	käsittlemätön jätteenpolton pohjatuhka/-kuona
pohjakuona	käsitelty jätteenpolton pohjakuona
KKR1	kuonakoerakenne, jossa on käytetty 0/16 ja 0/32 mm kuonaa
KKR2	kuonakoerakenne, jossa on käytetty 0/2 ja 0/32 mm kuonaa
kuormituskestävyys	tierakenteen kyky vastustaa palautumattomia muodonmuutoksia
PPL	pudotuspainolaite
REF1	vertailurakenne koerakenteen länsipäässä, jossa on käytetty luonnonkiviaineksia
REF2	vertailurakenne koerakenteen itäpäässä, jossa on käytetty luonnonkiviaineksia
SCI	surface curvature index, kuvaa rakenteen yläosan kuntoa

MERKINNÄT

a_i	materiaalin vastaavuus lämmöneristävyydessä hiekkaan verrattuna
c	koheesio
C	tilavuuslämpökapasiteetti
C_f	tilavuuslämpökapasiteetti jäätyneenä
C_u	tilavuuslämpökapasiteetti sulana
d	kerroksen paksuus
E	energia
E_1	muodonmuutosmoduuli ensimmäisessä kuormitusyhtälössä

E_2	muodonmuutosmoduuli toisessa kuormitusykyklissä
F	pakkasmäärä
F_{red}	reduoitu pakkasmäärä
G	lämpötilagradientti
G_-	lämpötilagradientti routarajan yläpuolella
G_+	lämpötilagradientti routarajan alapuolella
k	vedenjohtavuus
k_1, k_2	syklisellä kolmiaksoalikoella määritetyt materiaali-parametrit tietyssä tiiviys- ja kosteustilassa
L	jäätymislämpö (sulamislämpö)
M_r	jäykkyysmoduuli (resilient-moduuli)
q	lämpövuoto
Q	lämpövirta
SP_0	segregaatiopotentiaali
SP_σ	kuormituksesta riippuva segregatiopotentiaali
T	lämpötila
t	aika
v	veden virtausnopeus
w	vesipitoisuus
z	syvyys
z_f	routan syvyys
γ	tilavuuspaino
γ_d	kuivatilavuuspaino
θ	pääjännitysten summa
θ_0	vertailujännitys
λ	lämmönjohtavuus
λ_f	lämmönjohtavuus jäätynäänä
λ_u	lämmönjohtavuus sulana
ρ	tiheys
ρ_d	kuivairtotiheys
ϕ	kitkakulma (leikkauskestävyyskulma)

1. JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Rakentamisen ilmastopäästöt muodostavat merkittävän osan kaikkien kansantalouden toimialojen kokonaispäästöistä Suomessa. Tilastokeskuksen mukaan vuonna 2020 kaikkien toimialojen ja kotitalouksien kasvihuonekaasupäästöt olivat yhteensä noin 39,3 miljoonaa tonnia hiilidioksidia, josta rakentamisen osuus oli noin 1,6 miljoonaa tonnia. (Tilastokeskus, 2023a) Rakennustoiminta on voimakkaasti suhdanteista riippuvaista, mutta pitkällä aikavälillä ei ole näköpiirissä sellaista skenaariota, jossa rakentamisen tarve olisi merkittävästi vähenemässä.

Suuressa osassa infrarakennushankkeita pääasiallinen materiaalityö muodostuu erilaisista kiviaineksista. Hyödynnettävissä olevien soranottoaivojen ja kiviainesvarantojen vähentyessä on tullut tarve etsiä vaihtoehtoisia materiaaleja korvaamaan neitseellisiä kiviaineksia. Euroopan Unionin laajuiset kiertotaloustavoitteet ohjaavat hyödyntämään ja jatkokäyttämään erilaisia teollisuus- ja rakennustoiminnan sivutuotteina syntyviä materiaalityöitä. (Euroopan Komissio, 2020)

Suomessa syntyy vuosittain noin 3,5 miljoonaa tonnia yhdyskuntajätettä. (Tilastokeskus, 2023b) Jätteenpolto on tehokas tapa tuottaa energiaa ja vähentää loppusijoitettavan jätteen määrää. Tällä hetkellä yhdyskuntajätteestä noin 60 % poltetaan jätteenpolttolaitoksissa. (Tilastokeskus, 2023b) Jätteenpolto onkin määrällisesti syrjäyttänyt kaatopaikkasijoitukseen päätyvät jätteen. Jätteenpolttolaitoksissa polttoprosessin sivutuotteena syntyy vuosittain noin 300 000 tonnia pohjakuonaa, joka koostuu pääasiassa palamattomasta materiaalityöstä. (Suomen Erityisjäte, 2018) Jatkojalostettua kuonaa on aiemmin hyödynnetty mm. kaatopaikkojen rakenteissa. Jätteenpolton yleistyessä ja sitä myöden kaatopaikkasijoituksen vähentyessä, on tullut tarve löytää pohjakuonalle uusia hyödyntämiskohteita. Teknisten ominaisuuksiensa takia kuonamateriaalityöllä voisi olla muitakin mahdollisia hyödyntämiskohteita.

Tie- ja katurakenteissa käytetään tällä hetkellä pääasiassa uusiutumattomia luonnonkiviaineksia. Korvaamalla kiviainesta käsitellyllä jätteenpolton pohjakuonalla voitaisiin osaltaan saavuttaa kiertotaloustavoitteet, säästää hankkeiden materiaalityökustannuksissa sekä mahdollisesti vaikuttaa rakentamisen ilmastopäästöihin.

1.2 Työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Käsittelyn jätteenpolton pohjakuonan ominaisuudet poikkeavat jossain määrin luonnonkiviaineksista. Tässä työssä keskitytään kuonamateriaalin lämpöteknisten ja mekaanisten ominaisuuksien tutkimiseen. Kuonamateriaalin ympäristökelpoisuus asettaa sen hyödyntämiselle tiettyjä rajoituksia mm. haitta-aineiden liukoisuuden osalta. Pohjakuonan ympäristökelpoisuuden tutkiminen ja siihen liittyvien lupamenettelyiden käsittely on kuitenkin rajattu tämän työn ulkopuolelle. Tutkimuksella halutaan vastata erityisesti seuraaviin kahteen tutkimuskysymykseen:

- Miten pohjakuonan lämpötekninen käyttäytyminen eroaa luonnonkiviaineksista?
- Miten kuonarakenteen jäykkyys on kehittynyt pitkäaikaisseurannassa ja mitä moduli-arvoja kuonarakenteiden kuormituskestävyyssmitoituksessa voidaan käyttää?

Tie- ja katurakenteiden mitoitus perustuu osaltaan rakenteelta vaadittuun routa- ja kuormituskestävyyteen. Luonnonkiviaineksista tehdyille rakenteille on olemassa vakiintuneet mitoitusarvot kuormituskestävyyden laskemiseksi. Kuonamateriaalin ollessa kiviainesta hauraampaa, voidaan olettaa mekaanisten ominaisuuksien poikkeavan kiviaineksista. Aiemmissa selvityksissä on havaittu jonkin verran kuonarakenteen lujittumista ajan myötä. Työn tavoite on selvittää, millaisia mitoitusarvoja pohjakuonalle tie- ja katurakenteissa voidaan käyttää ja tapahtuuko materiaalissa lujisuuden kasvua rakentamisen jälkeen.

Jätteenpolton pohjakuona huokoisena materiaalina sitoo kiviaineksia enemmän vettä itseensä. Tutkimuksen lähtöoletama onkin, että pohjakuonarakenteen lämpötekninen käyttäytyminen eroaa luonnonkiviaineksesta. Tierakenteen mitoituksessa tarkastellaan alusrakenteeseen tunkeutuvan roudan syvyyttä ja routanousua. Näiden määrittämiseksi kiviainesrakenteelle on olemassa kokemusperäiset laskenta-arvot. Tutkimuksen tarkoituksena on selvittää vastaavat ominaisuudet pohjakuonasta tehdyille rakenteille.

Jätteenpolton pohjakuonan pitkäaikaiskäyttäytymisestä tierakenteissa Suomessa ei ole paljoa kokemusta. Väyläviraston ohjeistuksen mukaan uusiomateriaalista tulee olla riittävä määrä koerakentamisen kautta saatua tutkimustietoa, jotta pitkäaikaiskestävyyttä voidaan luotettavasti arvioida. (Väylävirasto, 2022) Tällä tutkimuksella halutaan saada tietoa pohjakuonan teknisistä ominaisuuksista ja mitoitusparametreista sekä siten arvioida sen soveltuvuutta tierakenteen jakavaan ja suodatinkerrokseen. Lopputulemana

tutkimustyön tuloksilla tavoitellaan pohjakuonan yleistä materiaalihyväksyntää sujuvan käytön mahdollistamiseksi Väyläviraston kohteissa.

1.3 Tutkimuskohde

Fortum Waste Solutions Oy on toteuttanut vuonna 2020 Hausjärvelle Kuulojantielle, Riihimäen jätteenpolttolaitoksen välittömään läheisyyteen, koekohteen, jossa laitoksen jätteenpolton jalostettua pohjakuonaa on käytetty tierakenteen jakavan ja suodatinkerroksen materiaalina. (Söderholm, 2020) Ennen koekohteen toteuttamista Fortum on tehnyt kuonamateriaalille laboratoriokokeita mekaanisten ominaisuuksien, kuten rakeisuuden, optimivesipitoisuuden ja moduuliarvojen selvittämiseksi. Kohteella on tehty rakentamisen aikana pohjamaan sekä eri rakennekerrosten kantavuusmittauksia, tehty tiivysmittauksia ja tarkkailtu tiivistämistyön aiheuttamaa materiaalin hienonemista. Rakenteisiin asennettiin lämpötila-antureita seurantaan varten. Samaan kohteeseen toteutettiin kaksi vertailurakennetta, joissa rakennekerrokset on tehty luonnonkiviaineksista.

Koekohdetta on seurattu tarkkailusuunnitelman mukaisesti noin kolmen vuoden ajan. Tarkkailu on sisältänyt rakenteissa olevien lämpötila-antureiden tuottamien tietojen keruuta, rakenteen pinnan vaaitusta routanousun määrittämiseksi, kantavuusmittauksia, vaurioinventointeja sekä rakennenäytteiden ottoa. Kohteen seuranta-aineisto muodostaa tämän työn tapaustutkimuksen lähtöaineiston.

Vuonna 2021 on niin ikään toteutettu koerakenne Fortumin Riihimäen jätteenpolttolaitoksen pohjakuonasta osaksi maantien 2879 kevyenliikenteenväylää. (Matikka, 2021) Tämän kohteen seurantamittauksia pyritään käyttämään lähinnä vertailua tarjoavana aineistona pääpainon ollessa ensin mainitun koekohteen seurantamittauksissa.

1.4 Tutkimusmenetelmät

Kirjallisuustutkimuksena työssä perehdytään lyhyesti jätteenpolton pohjakuonien syntyyn ja ominaisuuksiin. Lisäksi käsitellään routaa ja routamitoitusta tierakenteen kannalta. Tie- ja katurakenteiden kuormituksia ja kuormituskestävyyksimitoitusta tutkitaan siitä näkökulmasta kuin se palvelee rakennekerrosmateriaalien moduuliarvojen määrittäystä sekä takaisinlaskentaa.

Koerakenteesta saadun kolmen erilaisen talven mittaus- ja tiedonkeruuaineiston pohjalta on tarkoitus arvioida pohjakuonalle laboratoriotutkimuksissa saatujen materiaaliparametrien toteutumista käytännön rakentamiskohteessa. Tässä tutkimuksessa keskitytään seuraaviin parametreihin:

- Materiaalin lämmönjohtavuus (λ)
- Vastaavuus roudan eristyksen kannalta (a_i)
- Routaturpoama-arvo (t%) ja segregatiopotentiaali (SP)
- Rakennekerrosmateriaalin E-moduularvo kuormituskestävyysmitoituksessa

E-moduulimäärityksen lisäksi kuormituskestävyyttä ja rakenteen vaurioherkkyyttä arvioidaan rakenteen taipumamittauksiin perustuvien taipumasuppiloiden muodon analysoinnilla.

Materiaaliparametrien määrittämisessä käytetään niin sanottua vertailuparimenetelmää. Kuonakoerakenteen yhteyteen toteutetuille referenssirakenteille on tehty samat seuranta- ja tutkimukset kuin kuonarakenteillekin. Tällöin voidaan arvioida saatujen parametrien arvojen luotettavuutta, kun tunnetaan luonnonkiviaineksesta tehtyjen rakenteiden käyttäytyminen ja mitoitusarvot.

Materiaalin lämpötekniikan käyttäytymisen mallintamisessa hyödynnetään koerakenteen lämpötilaseurannan tuloksia sekä Ilmatieteen laitoksen sääasemalta saatua ilman lämpötiladataa, jolloin pystytään arvioimaan rakenteen jäätymis- ja sulamisnopeutta suhteessa pakkasmääriin. Routaturpoaman laskennassa hyödynnetään lisäksi rakenteen päältä tehtyjä vaaituksia. E-moduularvojen määrittäminen tehdään takaisinlaskennan avulla levykuormitus- ja pudotuspainomittausten tuloksista Odemarkin vastinpaksuusmenetelmällä sekä elementtimenetelmään (FEM) perustuvalla mallinnusohjelmistolla.

2. JÄTTEENPOLTON POHJAKUONA

2.1 Jätteenpolton volyymi ja sen kehittyminen

Yhdyskuntajätteitä on poltettu laitosmaisesti Euroopassa 1800-luvun lopulta alkaen. Ruotsissa ensimmäinen jätteenpolttolaitos aloitti toimintansa vuonna 1903 Tukholmassa. Alkuun pääasiallinen syy jätteiden polttoon oli tarve päästä eroon hygieniaongelmia aiheuttavista jätteistä suurimmissa kaupungeissa. Harvaan asutuilla alueilla tätä ongelmaa ei ollut, vaan jätteet voitiin koota syrjäisille alueille perustetuille kaatopaikoille. 1970-luvun öljykriisin myötä jätteiden hyödyntäminen energiaksi alkoi kiinnostaa, jolloin esimerkiksi Ruotsissa alettiin rakentaa kaukolämpöverkkoon liitettynä jätteenpolttolaitoksia. (Vesanto, et al., 2006)

Suomessa yhdyskuntajätteen kokonaismäärä on vuosina 2009–2019 vaihdellut 2,5–3,1 miljoonan tonnin välillä. Jätelain määrittelemän jättehierarkian mukaan lähtökohtaisesti tulisi vähentää syntyvän jätteen määrää ja haitallisuutta. Jos jätettä kuitenkin syntyy, tulee jätteen haltijan ensisijaisesti valmistella jäte uudelleenkäyttöön tai toissijaisesti kierrättää se. Siitä tapauksessa, että kierrätys ei onnistu, tulee jäte hyödyntää muulla tavoin, kuten energiana. Jätteen loppusijoitus on hierarkiassa viimeisin vaihtoehto. (Bröckl, et al., 2021)

Suomessa jätteenpolto on kasvanut voimakkaasti viimeisen noin 20 vuoden aikana. Vuonna 2003 Suomessa oli yksi jätteenpolttolaitos ja poltetun jätteen määrä 0,2 miljoonaa tonnia. (Vesanto, et al., 2006) Vuonna 2019 3,1 miljoonasta tonnista yhdyskuntajätettä 56 % päättyi energiakäyttöön. Osuus sisältää myös ulkomaille energiahyödynnettäväksi viedyn yhdyskuntajätteen määrän. Energiahyödyntäminen onkin käsittelymenetelmänä syrjäyttänyt yhdyskuntajätteen kaatopaikkasijoituksen. Vuonna 2019 vain alle 1 % yhdyskuntajätteestä päättyi kaatopaikoille. Loput 43 % yhdyskuntajätteestä käsiteltiin materiaalihyödyntämisen kautta. Vuonna 2021 Suomessa oli käytössä 9 jätteenpolttolaitosta, joiden polttokapasiteetti oli 1,8 miljoonaa tonnia vuodessa. Lisäksi rakenteilla oli 2 laitosta, Saloon ja Vantaalle, jotka tätä nykyä ovat myös käytössä. (Bröckl, et al., 2021) Jätteenpolttolaitosten lisäksi jätteitä poltetaan niin sanotuissa rinnakkaispolttolaitoksissa, joissa jätemateriaalin lisäksi polttoaineena käytetään tavanomaisia polttoaineita. Rinnakkaispolttolaitokset polttavat pääasiassa tasalaatuisia teollisuusjätteitä. Yhteensä rinnakkaispolttolaitoksissa arvioidaan käytettävän 300–400 tuhatta tonnia jätettä vuodessa. (Pöyry Management Consulting Oy, 2015)

2.2 Pohjakuona polttoprosessin sivutuotteena

2.2.1 Arinapoltto

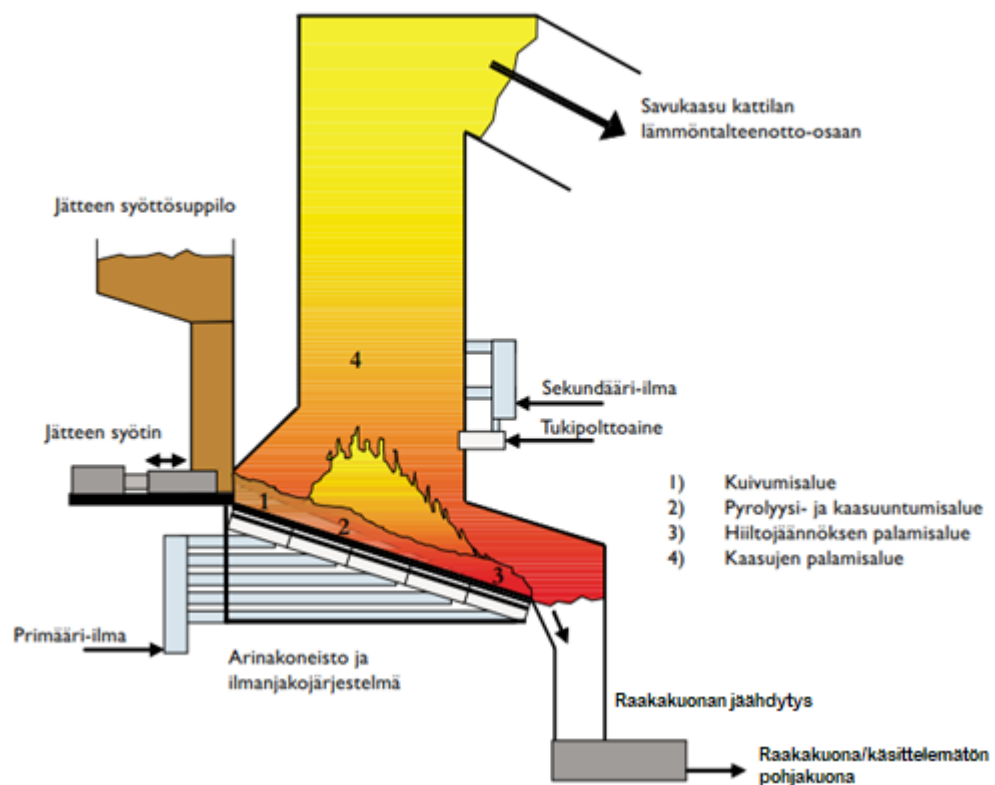
Jätteen polttoprosessin sivutuotteena syntyy pohjakuonaa, kattila- ja lentotuhkaa sekä savukaasujen puhdistuksen reaktiotuotteita. Näistä lentotuhkat ja savukaasujen puhdistuksen reaktiotuotteet voidaan luokitella vaarallisiksi jätteiksi mm. niiden sisältämien korkeiden kloridi- ja raskasmetallipitoisuuksien perusteella. Ne ovat myös kuivana helposti pölyäviä. Tuhkat voidaan tarvittaessa stabiloida niiden saattamiseksi haitattomampaan muotoon loppusijoitusta varten. Tavallisesti loppusijoitus tehdään vaarallisen jätteen kaatopaikalle. (Pöyry Management Consulting Oy, 2015) Tässä työssä käsitellään ainoastaan jätteenpolton pohjakuonaa. Pohjakuonalla tarkoitetaan jatkossa käsiteltyä jätteenpolton raakakuonaa.

Kuonien ominaisuuksiin vaikuttavat polttoaineen koostumus, polttotekniikka sekä savukaasujen erotustekniikka. (Kaartinen, et al., 2007) Suomessa kaikki jätteenpolttolaitokset, kahta lukuun ottamatta, käyttävät arinatekniikkaan perustuvaa polttoprosessia. Riikinvoima Oy:n laitoksella Leppävirroilla on käytössä kiertopetitekniikkaan perustuva kattila ja Lahti Energia Oy:n Kymijärvi II laitoksella käytetään kaasutuspolttotekniikkaa. (Pöyry Management Consulting Oy, 2015) Jätteiden rinnakkaispolttolaitoksissa poltto tapahtuu käytännössä leijupetikattilassa tai teollisuuden rumpu-uunissa. (Vesanto, et al., 2006) Tässä työssä käsitellään pelkästään arinapolttoprosessissa syntyvää pohjakuonaa. Se eroaa ominaisuuksiltaan muilla polttotekniikoilla poltetun jätteen pohjakuonista.

Arinapolttotekniikkaa käytettäessä voidaan laitoksella polttaa monenlaista jätettä. Oikein säädettynä prosessi sietää jätteen kosteuden, lämpöarvon ja tuhkapitoisuuden vaihtelevia. Se ei kuitenkaan sovellu nestemäisten, jauhemaisten tai sulavien jätteiden polttoon. Laitokset on suunniteltu toimimaan laadultaan vaihtelevan jätteen poltossa. Jäte tuodaan laitoksille jätemonttuihin odottamaan siirtoa polttoon. Hajuhaittojen hillitsemiseksi montut ovat usein alipaineistettuja. Montusta jäte syötetään kahmarilla syöttösuppiloon, samalla jätemäärää tarvittaessa sekoittaen. Suuremmat kappaleet erotellaan murskattavaksi ja isommat metalliesineet poistetaan tässä vaiheessa. Muutoin jätettä ei ole tarpeen esikäsitellä ennen polttoa. Syöttösuppilosta jäte kulkee jätteen syöttimen työntämänä arinalle. (Vesanto, et al., 2006) (Salovaara, 2017)

Tulipesä on jaettu palamisvaiheiden mukaisesti lohkoihin, joissa tapahtuu jätepolttoaineen kuivaaminen, pyrolyysi ja kaasuuntuminen sekä lopuksi hiiltojäännöksen palami-

nen. Uusimmissa laitoksissa arinat ovat usein rakenteeltaan vinoja (kuva 1), jotta palotapahtumaa voitaisiin ohjata säätämällä arinan eri osiin ilmanjakojärjestelmän kautta syötettävää ilmamäärää. Savukaasut poistuvat esijäähdytyskammion kautta kattilan lämmöntalteenotto-osaan, jonka jälkeen ne ohjataan puhdistusprosessiin. Savukaasut sisältävät hienojakoista tuhkaa, josta osa erottuu kattilan pohjalle kattilatuhkaksi. Lentotuhka on savukaasuista syklonien ja suotimien avulla erotettua kaasujen puhdistuksen jätettä. Pohjatuhkalla tarkoitetaan arinan päädyssä poistuvaa palamatonta osuutta. Pohjatuhka- ja kuona kerätään arinan alapäästä tulipesän pohjatuhkajärjestelmään. Palamaton osuus sisältää myös mm. metallinkappaleita ja kiviä. Palotapahtuman loppuvaiheen korkeasta lämpötilasta johtuen pohjatuhka on osittain sintraantunutta ja sulanutta. Arinalta pohjatuhka johdetaan yleensä jäähdytysaltaaseen, jossa se jäähtyy veden avulla. Tulipesän rakenne on esitetty alla olevassa kuvassa 1. (Kaartinen, et al., 2007) (Vesanto, et al., 2006)

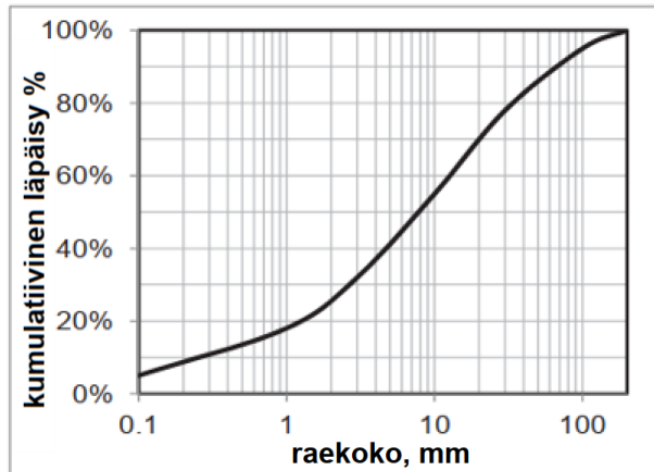


Kuva 1. Arinapolton tulipesän periaate. (Vesanto, et al., 2006), muokattu

2.2.2 Raakakuonan koostumus

Raakakuonaa muodostuu noin 20–30 % poltettavan jätteen painosta. Käsittelemätön raakakuona sisältää palamatonta materiaalia, kuten lasia, maamineraaleja, metallia ja

orgaanista ainesta. Sulamistuotteet ovat pääasiassa lasia, silikaatti- sekä oksidimineraaleja kuten rautaa ja kalkkia. Raakakuonan rakeisuuskäyrä on tyypillisesti loivan s-kirjaimen muotoinen, kuten kuvassa 2 on esitetty.



Kuva 2. Raakakuonan raekokojakauma. (Bunge, 2016)

Eri aineiden pitoisuuksiin vaikuttaa merkittävästi poltettavan jätteen koostumus. Yhdyskuntajätteen ollessa varsin heterogeenistä, ei jätemateriaalista tehtävän pistemäisen näytteenoton perusteella voida päätellä syntyvien tuhkien ja kuonien ominaisuuksia kovinkaan hyvin. Eri polttolaitosten käyttämillä prosessiparametreilla on niilläkin vaikutusta. Pohjakuonien ominaisuuksien ja jätemateriaalin vaihtelun korrelaation selvittämiseksi polttolaitoksella vaaditaan pitkäaikaista seurantaa ja näytteenottoa. (Kaartinen, et al., 2007)

2.3 Raakakuonan käsittely hyödyntämistä varten

Pohjakuonan ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa polttotapahtumaa optimoimalla, kuten tulipesän lämpötilaa korottamalla tai pidentämällä polttoaineen viipymäaikaa tulipesässä. Yleensä raakakuonaa joudutaan kuitenkin prosessoimaan maarakennuskäytön mahdollistamiseksi. Kuonan prosessointitekniikat voidaan jakaa menetelmän mukaan kemiallisiin, fysikaalisiin ja termisiin menetelmiin. Lisäksi prosessit voidaan jaotella prosessikonseptin mukaan kuiviin ja märkiin prosesseihin. Käytännössä molemmissa tehdään samat osaprosessit, mutta märkämenetelmässä lisäksi pesuseulonnalla erotetaan jokin haluttu raekokoluokka. (Kaartinen, et al., 2010) Märkämenetelmässä ongelmia saattaa aiheuttaa märän materiaalin paakkuuntuminen ja takertuminen, joka haittaa muita käsittelyvaiheita. (Bunge, 2016) Eri prosessointitekniikoilla tähdätään sekä kuonamateriaalin ympä-

ristökelpoisuuden että teknisen kelpoisuuden parantamiseen. Käsittelytekniikoita on olemassa useita riippuen materiaalin jalostuksen tavoitteista. Seuraavaksi on selostettu lyhyesti yleisimmin käytössä olevia tekniikoita.

2.3.1 Kemialliset menetelmät

Vesipesu on eräs mahdollinen menetelmä kuonamateriaalin liukoisten aineiden poistamiseen. Pelkällä vedellä pestäessä voidaan erottaa helposti liukenevat suolat, kuten kloridit ja bromidit. Materiaalin ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus pesukäsittelyn lopputulokseen. Niukkaliukoisten yhdisteiden, kuten raskasmetallien, tehokkaammaksi irrottamiseksi, voidaan pesuveden lämpötilaa nostaa, pH-arvoa laskea happokäsittelyllä tai lisätä liukoisia fosfaatteja. Vaikka itse pesukäsittelyn kustannukset ovat suhteellisen alhaiset, aiheuttavat pesutapahtumassa syntyvät jätevedet ja niiden asianmukainen käsittely lisätyötä ja kustannuksia. (Laine-Ylijoki, et al., 2005) Tyypillisesti pesu toteutetaan jäähdytysaltaassa polttoprosessin yhteydessä. (Kaartinen, et al., 2010)

Kuonan ikäännyttämisellä pyritään parantamaan sekä kuonan ympäristökelpoisuus- että teknisiä ominaisuuksia. Ikäänntyminen tapahtuu kasalla ulkona, joko sateelta suojassa katoksessa tai sateelle alttiina. Ikäänntyessään pohjakuonan yhdisteet reagoivat ilman hapen ja veden kanssa. Pohjakuonan alumiinista muodostuu alumiinihydroksidia, jonka vaikutuksesta kuonan tilavuus kasvaa. Tästä saattaa olla haittaa käytettäessä kuonaa maarakenteissa, jolloin ikäännyttäminen on tarpeen jo pelkästään tästä syystä ennen rakentamista. Kuonassa tapahtuvat karbonointireaktiot aiheuttavat kuonamateriaalin pH:n laskun, jolloin kuonasta veteen liukenevien metallien liukoisuus pääasiassa alenee. Ikäänntyminen sellaisenaan on kuitenkin hidas prosessi. Merkittäviä materiaalin ominaisuusmuutoksia tapahtuu yleensä vasta kuuden kuukauden jälkeen. Ikäänntymistä on mahdollista kiihdyttää hiilidioksidilla rikastetulla ilmalla, jolloin prosessi nopeutuu merkittävästi. Tämä tekniikka on käytössä Euroopassa useissa maissa. (Kaartinen, et al., 2010)



Kuva 3. Pohjakuonaa, josta metalleja ei vielä ole eroteltu, katoksessa Fortumin Riihimäen käsittelykeskuksessa. (Fortum Waste Solutions Oy)

2.3.2 Metallien fysikaalinen erottelu

Metallien erottamiseen raakakuonasta on syynä niiden kuonan jatkokäyttöä rajoittava vaikutus sekä metalleista saatava rahallinen arvo. Yli 2 mm kokoiset metallinkappaleet alkuainemuodossaan on vielä taloudellisesti kannattavaa erotella talteen. Sitä pienemmät jakeet ovat joko kemiallisesti sitoutuneita tai niiden erottelu ei ole järkevää yleisesti käytössä olevilla tekniikoilla. Metallien erottelu perustuu johonkin niiden mineraaliaineksesta eroavaan ominaisuuteen, kuten magneettisuuteen, sähköjohtavuuteen tai tiheyteen. Jos metallit ovat kiinni muissa kuonan partikkeleissa, ne täytyy saada irrotettua esimerkiksi murskauksen avulla ennen erottelua. Murskauksen jälkeen erikokoiset jakeet on syytä poimia esimerkiksi seulomalla omille erottelulinjastoilleen erottelun tehostamiseksi. Metallien erottelun saannon lisäämiseksi murskaus kannattaisi tehdä mahdollisimman hienoon partikkelikokoon. Tämä kuitenkin rajoittaisi pohjakuonan käyttöä esimerkiksi maarakenteissa, joissa on vaatimuksia materiaalin raekoon suhteen. (Bunge, 2016)

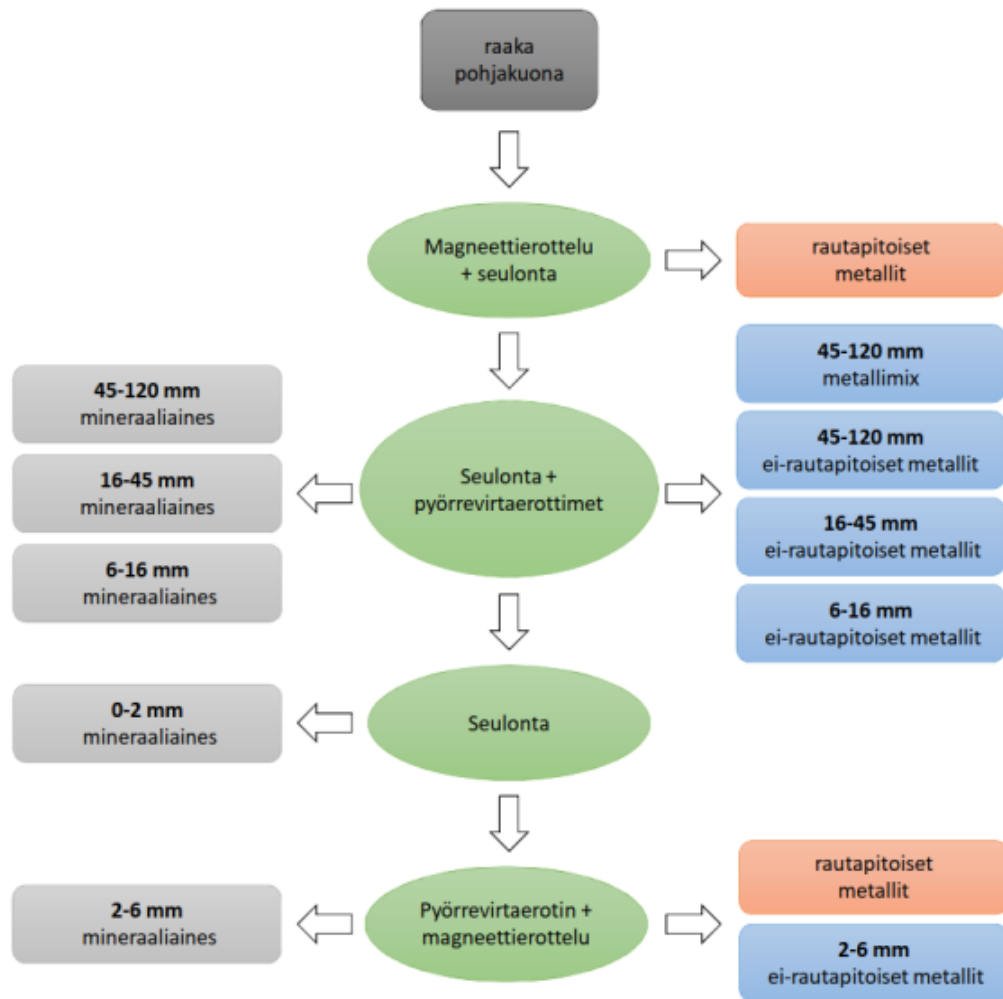
Yleisimmin käytetyt metallien erottelumenetelmät ovat magneettinen erottelu sekä pyörvirtaerottelu. Magneettierottelussa kuona liikkuu kuljettimella, jolta magneetti vetää puoleensa magneettiset jakeet. (Kaartinen, et al., 2010) Magneetin magneettikentän voimakkuudella on merkitystä siihen, miten se vaikuttaa eri partikkeleihin. Voimakkaasti

magneettiset aineet kuten rauta, voidaan erotella heikommalla magneetilla, kun taas heikosti magneettiset eli paramagneettiset rautaoksidit yms. tarvitsevat voimakkaan magneettikentän. Ei-magneettiset metallit voidaan erotella pyörrevirtaerottimella. Tekniikka perustuu pyörivän käämin metalliin indusoimaan pyörrevirtaan. Pyörrevirrat taas tuottavat magneettikentän, joka pyrkii vastustamaan pyörrevirran syntymistä. Tämän magneettikentän voimasta metallikappaleet lentävät kuljetinhihnan päästä eri lentorataa kuin muut kappaleet, jolloin ne voidaan kerätä omaan säiliönsä. (Bunge, 2016) Ei-magneettisten metallien erottamiseen voidaan käyttää myös tuulitunnelia, jolla saadaan erotettua raekooltaan yli 6 mm metallijakeet. (Kaartinen, et al., 2010) Märkien pienikokoisten partikkeleiden hankala erottelu on johtanut uudentyyppisten tekniikoiden kuten ADR (advanced dry recovery) kehittämiseen. Siinä ideana on pyörivän roottorin tai hihnan avulla kiihdyttää partikkelit lentämään ilmaan, jolloin eri painoiset jakeet saavat erilaisen lentoradan ja ne voidaan kerätä talteen eri kuljettimille. (Bunge, 2016). ADR-tekniikkaa on käytetty useissa maissa Suomi mukaan lukien. (Suomen Erityisjäte, 2023)



Kuva 4. Kuonan käsittelyä Fortumin Riihimäen laitoksella. (Fortum Waste Solutions Oy)

Alla on kuvattu Fortum Waste Solutions Oy:n käyttämä prosessi raakakuonan käsittelyssä. Raakakuonaa ei tässä prosessissa murskata metallien erottamisen tehostamiseksi.



Kuva 5. Fortumin Riihimäen käsittelykeskuksen raakakuonan käsittelyn prosessi-kaavio. (Söderholm, 2020)

2.3.3 Termiset menetelmät

Termiset käsittelymenetelmät tähtäävät haitta-aineiden liukoisuuden vähentämiseen, materiaalilavuuden pienentämiseen sekä lopputuotteen valmistukseen jatkokäyttöä varten. Termisiä käsittelymenetelmiä on kolme: vitrifikaatio, fuusio ja sintraus. Kaikki menetelmät perustuvat materiaalin sulatukseen eri tavoilla. Lopputuotteelta halutut ominaisuudet määräävät käytettävän menetelmän. Vitrifikaatiossa käsiteltävää materiaalia sulatetaan korkeassa lämpötilassa (tyypillisesti 1100 tai 1500 °C) lasinmuodostajan kanssa. Lopputuloksena syntyy lasituotetta. Fuusiossa käsiteltävä materiaali sulatetaan ilman lasinmuodostajaa sellaisenaan, jolloin syntyy heterogeeninen ja kidemäinen tuote. Fuusion etuna vitrifikaatioon on huomattavasti yksinkertaisempi prosessi. Sintrauksen tavoite on kuumentaa materiaali kemiallisten faasien uudelleen järjestämiseksi. Eri sintrausmenetelmiä on useita. (Laine-Ylijoki, et al., 2005)

2.4 Pohjakuonan materiaaliominaisuudet

Jätteenpolton pohjakuonan ominaisuuksista on löydettävissä useita vuosien varrella tehtyjä tutkimuksia. Monesti tutkimuksissa on keskitytty jonkin tietyn polttolaitoksen kuonan ominaisuuksiin. Materiaaliominaisuuksiin vaikuttaa muun muassa poltettu jäte, polttoprosessi, kuonan varastointi. Myös polttolaitosten välillä on eroja, jotka vaikuttavat syntyvän kuonan ominaisuuksiin. (Statens Geotekniska Institut, 2006) Ruotsin valtion geotekninen instituutti on laatinut ohjeen pohjakuonan käytöstä tie- ja perusrakenteissa. Ohje on vuodelta 2006. Nykyään pohjakuonan jalostuksessa ollaan menossa suuntaan, jossa metallien tarkempi erotus kuonasta ja raekooltaan eri kuonalajitteiden käyttö ovat valtaamassa alaa. Tällä voisi olettaa olevan vaikutusta kuonamateriaalin ominaisuuksiin. Arm et al. (2016) ja Sormunen (2017) ovat tutkimuksissaan kartoittaneet uudemmilla käsittelymenetelmillä tuotettujen pohjakuonien ominaisuuksia ja verranneet niitä ”perinteisempään” matalamman metallinerotteluasteen kuonaan. Tutkimuksissa on tultu johtopäätökseen, etteivät pohjakuonan tekniset ominaisuudet ja hyödynnettävyys ole kärsineet jalostusasteen noususta. Seuraavaksi on esitelty tämän työn kannalta olennaisia pohjakuonan materiaaliominaisuuksia. Ominaisuudet perustuvat Ruotsissa ja Suomessa tehtyjen tutkimusten tuloksiin.



Kuva 6. Käsiteltyä pohjakuonaa. (Fortum Waste Solutions Oy)

Pohjakuona muistuttaa ulkonäöltään harmaan väristä hiekkaista luonnonsoraa. Myös sen ominaisuudet muistuttavat jonkin verran luonnonkiviaineeksiä. Pohjakuona on kuitenkin luonnonsoraa huokoisempaa ja siten jonkin verran sitä kevyempää. Huokoisuus aiheuttaa sen, että pohjakuona hauraana materiaalina ei kestä kuormitusta siinä määrin kuin luonnonkiviaines, vaan saattaa hienontua raskaan liikennekuorman alla. Tästä syystä rakentamisen aikaista liikennöintiä suoraan kuonakerroksen päällä tulisi välttää. Samoin on varauduttava huolelliseen tiivistystyöhön. Pohjakuonan lämmöneristävyysominaisuudet ovat luonnonsoraa paremmat johtuen sen pienemmästä lämmönjohtavuusarvosta. (Statens Geotekniska Institut, 2006)

Raakakuonasta pyritään seulomaan rakeisuudeltaan hienoin 0/2 mm osuus pois. Tämä parantaa kuonan teknisiä ominaisuuksia ja laajentaa siten hyödyntämiskohteiden repertuaaria infrarakentamisessa. Lajitteessa 0/2 mm on korkea metallipitoisuus, mutta nykutekniikalla ei metalleja pystytä näin hienosta lajitteesta erottelemaan taloudellisesti kannattavasti. Metallien talteenoton osuus kokonaisuutena kuitenkin nousee tämän lajitteen erotuksen myötä. Raakakuonan käsittelyn myötä syntyy myös muita rakeisuudeltaan erilaisia katkaistuja lajitteita. Eri lajitteiden määrä ja seulakoot riippuvat laitoksen käsittelyprosessista. Yli 50 mm rakeet yleensä murskataan käsittelyssä, joten 50 mm on käytössä suurin kuonan raekoko. Rakeisuusmäärittelyn lopputuloksessa on paljon vaihtelua, riippuen käytetäänkö siinä pesuseulontaa. Pesuseulonnassa kuonasta hienontuu tai liukenee runsaasti hienoainesta, joka vaikuttaa 0,063 mm seulan läpäisyarvoon. (Harju, et al., 2022) Kuvassa 5 esitetyn Fortumin käyttämän raakakuonan käsittelyprosessin jälkeen seuraa jalostusvaihe, jossa alle 50 mm mineraalijakeista suhteitetaan muun muassa väylä- ja kenttärakenteisiin soveltuvia Gravo-keinokiviaineeksiä.

Rakennetulle pohjakuonakerrokselle tehtyjen pudotuspainolaitemittausten perusteella pohjakuonarakenteen jäykkyysmoduuli on luonnonkiviaineksesta tehtyä vastaavanlaista rakennetta alhaisempi. Ruotsissa Umeåssa ja Malmössä on pohjakuonaa käytetty koe-rakenteissa tiehankkeiden osana. Näille rakenteille tehtyjen seurantojen perusteella pohjakuonarakenteen jäykkyys oli noin 70 % luonnonkiviainesrakenteen jäykkyydestä. Tämän perusteella ei kuonarakenteelle voida kuitenkaan määrittää mitään yleistä jäykkyysmoduulia, sillä pudotuspainomittausten tuloksiin vaikuttaa koko rakenteen ominaisuudet, mukaan lukien eri rakennekerrokset ja pohjamaa. Laboratoriossa tehtyjen dynaamisten kolmiaksaalikoekoiden tulosten perusteella kuonamateriaalin jäykkyysmoduuli vaihtelee 70 ja 300 kPa välillä. Siihen vaikuttaa mm. kuormitusolosuhteet ja jännitystaso sekä kuonaa tuottanut laitos ja tuotantoajanjakso. Kuonaan jäänyt orgaaninen palamaton materiaali vaikuttaa voimakkaasti kuonan muodonmuutosominaisuuksiin. Korkea orgaanisen

aineksen pitoisuus alentaa muodonmuutosmoduulia. Laboratoriotesteissä on havaittu muodonmuutosmoduulin kaksinkertaistumista, kun hehkutushäviökokeessa 550 °C:ssa palamattoman aineksen pitoisuus on laskenut yhdeksästä neljään prosenttiin. (Statens Geotekniska Institut, 2006, p. 8)

Pohjakuonan optimivesipitoisuus on huomattavasti suurempi kuin vastaavan raekoon omaavilla luonnonkiviaineksilla. Kuonan optimivesipitoisuus vaihtelee 14–20 % välillä, kun vastaava arvo murskeelle on noin 5 %. Maksimikuivairtoteiheys kuonalla on Proctor-kokeiden (parannettu Proctor-koe) perusteella 1,4–1,8 t/m³. Kiviainekselle vastaava arvo on 2,0–2,2 t/m³. Alhaisempi kuivairtoteiheys johtuu pääasiassa kuonamateriaalin huokoisesta rakenteesta. Laboratoriossa tehdyissä tiivistyskokeissa on havaittu merkittävää kuonamateriaalin hienontumista, kun taas kenttäkokeiden perusteella hienontuminen ei ole ollut yhtä voimakasta. Tämä saattaa johtua siitä, että laboratorio-olosuhteita vastaavaan tiiviuteen ei kenttäolosuhteissa kovin helposti päästä. Toisaalta Proctor-kokeen soveltuvuus huokoiselle kuonamateriaalille ei välttämättä ole paras mahdollinen sen rakeita rikkovan vaikutuksen takia. Joka tapauksessa kuonan kantavuusominaisuuksien täysi hyödyntäminen vaatii huolellista tiivistystyötä sopivissa olosuhteissa ja oikeassa vesipitoisuudessa. Pohjakuonan pidemmän varastointiajan on havaittu vaikuttavan hienontumista ja optimivesipitoisuutta lisäävästi materiaalia tiivistettäessä. (Statens Geotekniska Institut, 2006)

Kaikille eri rakeisuuden omaaville kuonalajitteille tehtyjen laboratoriotutkimusten perusteella veden kapillaarinen nousukorkeus on suurempi kuin luonnonkiviaineksilla. Tämä asettaa vaatimuksen kuonarakenteiden hyvälle kuivatukselle. Kuona ei välttämättä sovellu sellaisiin rakenteisiin, jossa sen tulisi katkaista kapillaariveden nousu yläpuolisiin rakenteisiin. (Harju, et al., 2022)

Kuonarakenteille tehtyjen pitkäaikaisseurantojen perusteella ei pudotuspainomittauksissa ole havaittu rakenteen jäykkyyden alenemaa kuuden vuoden aikana. (Statens Geotekniska Institut, 2006) Osassa Suomessa toteutetuissa koekohteissa, heti rakentamisen jälkeen tehtyjen kantavuusmittausten mukaan, kantavuudet ovat olleet suunniteltua alempia eikä tavoitearvoja vastaavia tiiviysasteita ole saavutettu. Myöhemmissä mittauksissa samoissa kohteissa tavoitekantavuudet ovat kuitenkin täyttyneet kuonamateriaalin lujittumisen myötä. Suomessa pitkäaikaisseuratus kuonakohteet ovat pääasiassa olleet kaatopaikkarakenteita. Näiden tulosten perusteella voitaneen sanoa, ettei Suomen olosuhteissa pitkäaikaiskestävyyttä ole syytä epäillä. (Harju, et al., 2022)

Kuten jo todettua pohjakuonan materiaaliominaisuuksien arvot vaihtelevat usean tekijän mukaan. Harju et al. (2022) esittävät Käsitellyn yhdyskuntajätteenpolton pohjakuonan käyttö infrarakentamisessa -ohjeessa kootusti nykykäsitetyksen mukaisia materiaaliominaisuuksien arvoja.

2.5 Pohjakuonan käyttökohteet infrarakentamisessa

Kuonarakenteen tulee täyttää samat toiminnalliset ja tekniset vaatimukset kuin luonnonmateriaalista tehdyn rakenteen. Pohjakuonaa voidaan hyödyntää InfraRYL:n mukaisesti, mikäli kuonan ominaisuudet ovat käyttötarkoitukseen sopivat. Soveltuvia käyttökohteita ovat mm. teiden ja katujen rakennekerrokset, kenttäalueiden rakenteet, melu- ja maise-mavallit, täytöt sekä penkereet. Suunniteltaessa pohjakuonan käyttöä tulee ottaa huomioon rakenteen omistajan mahdollinen ohjeistus uusiomateriaalien käytölle. Esimerkiksi Väyläviraston kohteissa tulee uusiomateriaalille olla tehtynä teknisen soveltuvuuden arviointi ohjeen Uusiomateriaalien käyttö väylärakentamisessa mukaisesti. (Väylävirasto, 2022) Myös kunnilla ja kaupungeilla saattaa olla omia ohjeistuksiaan uusiomateriaalin käytön ja kelpoisuuden osoittamisen suhteen.

Täytöissä ja penkereissä, joissa ei ole yläpuolista kuormitusta tai rakenteita, eivät kuonan tekniset ominaisuudet aseta rajoitusta sen käytölle, kunhan rakenteen stabiiliteetista ja painumista muutoin huolehditaan. Peittämättömissä rakenteissa rajoitukset liittyvät lähinnä mahdolliseen haitta-aineiden liukenemiseen. Jos kuonatäytön päällä on pintarakenne, joka on vähintään 0,5 m paksuinen, jakaa se liikennekuormitusta siinä määrin, että kuonamateriaaliin ei kohdistu liiallista rasiitusta. (Arm, et al., 2016) Siten pohjakuona on myös sopivaa teiden- ja katujen alusrakenteisiin. Rakennettaessa kuonasta laajoja täyttöjä, tulee pitää mielessä mahdolliset maankäytön muutokset alueella. Jos aiemmin peitetty rakenne ei jatkossa olekaan riittävästi suojattu hulevesien pääsylvästä kuonarakenteeseen, saattaa koitua odottamattomia kustannuksia siinä tapauksessa, että koko kuonarakenne jouduttaisiin kaivamaan pois. (Arm, et al., 2016)

Tie- ja katurakenteiden pintarakenteissa pohjakuonaa voidaan käyttää suodatin- ja jakavassa kerroksessa. Kohteissa, joissa liikennesuoritus on merkittävää, ei pohjakuona ole tiukempien materiaalivaatimusten takia soveltuvaa kantavaan kerrokseen. Stabiloidulla pohjakuonalla saattaa olla potentiaalia myös tällaisessa kohteessa. Esimerkiksi Fortumin Riihimäen materiaalikeskuksen kenttärakenteiden kantavassa kerroksessa on käytetty jätteenpolton pohjakuonan sekä lentotuhkan seosta. (Lehtonen, 2010) Kevyemmin rasiitetuilla väylillä, kuten kevyenliikenteenväylillä sekä puisto- tai huoltoreiteillä, on mah-

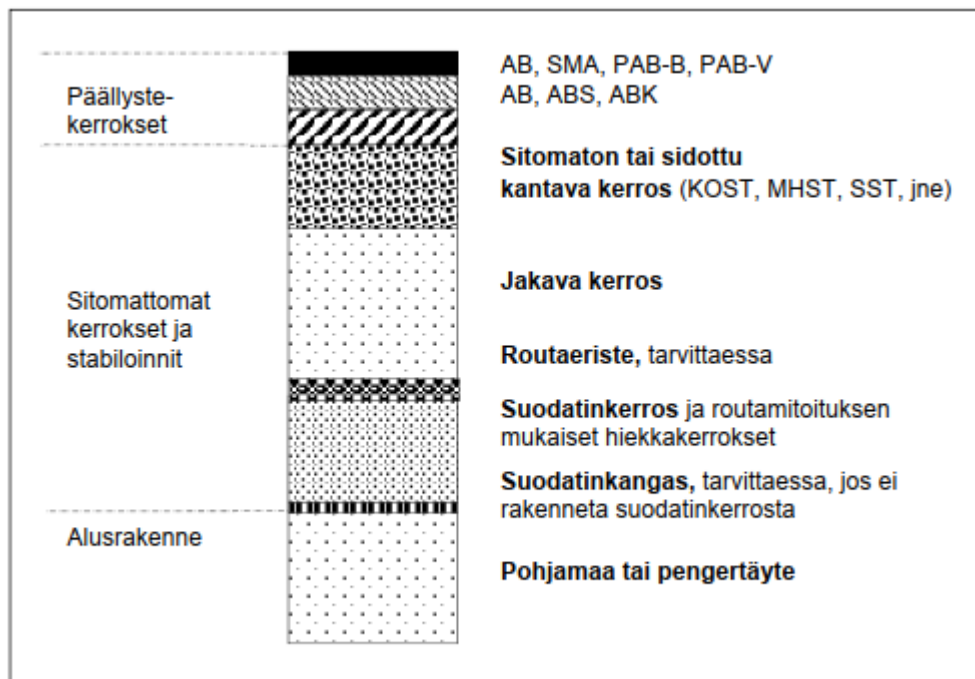
dollista, että kuonat olisivat soveltuvia myös kantavaan kerrokseen sellaisenaan. Katukohteissa, joissa on kunnallistekniikkaa, tulee huomioida kuonamateriaalin emäksisyys, josta saattaa olla haitallisia vaikutuksia putki- ja johtomateriaaleille. Muutoin kuona sopii putki- ja johtokaivantojen lopputäyttöihin, kunhan huomioidaan mahdollisen auki kaivun yhteydessä pois vietävien kuonien asianmukainen loppusijoitus. (Harju, et al., 2022)

3. TIERAKENTEEN KUORMITUSKESTÄVYYS

3.1 Tien päällysrakenne

Pohjamaan ominaisuuksien runsaan vaihtelun takia tielinjalla ei aina pystytä tekemään tarvittavaa homogenisointia alusrakenteen osalta. Käytännössä pohjanvahvistustoimenpiteillä vaikutetaan vain kantavuudeltaan kaikkein heikkolaatuisempiin kohtiin. Tien päällysrakennetta tarvitaan tällöin tasaamaan kantavuus- ja routivuusvaihteluita tielinjalla. Päällysrakenteella otetaan vastaa myös liikenne- ja ympäristökuormitusten vaihtelut.

Päällysrakenteet voidaan jakaa joustaviin, puolijäykkiin ja jäykkiin päällysrakenteisiin. Lisäksi voidaan erotella kiveys- ja sorapäällysteiset rakenteet. Suomessa yleisimmin käytössä on joustava päällysrakenne. Se koostuu tavallisesti bitumisella sideaineella sidotusta päällysteestä sekä sitomattomista rakennekerroksista. Kerroksellisen rakenteen ideana on käyttää erilaatuisia materiaaleja eri kerroksessa sen mukaan, miten kuormitus rakenteessa jakaantuu. Alemmissa kerroksissa voidaan käyttää heikkolaatuisempia materiaaleja kuormituksen ollessa vähäisempää. (Ehrola, 1996) Alla kuvassa 7 on esitetty tyypillisen joustavan päällysrakenteen rakennekerrokset.



Kuva 7. Päällysrakenteen rakennekerrokset. (Liikennevirasto, 2018)

Toimintaperiaatteeltaan sidotut ja sitomattomat kerrokset eroavat siten, että sidottu kerros pystyy vastaanottamaan vetorasituksia mutta sitomaton ei. Sidottujen kerrosten vetolujuutta pystytään parhaiten hyödyntämään rakenteen pintakerroksissa, jossa vetorasitukset ovat suurimmillaan. Sidottujen kerrosten jäykkyysominaisuuksien vuoksi ne pystyvät jakamaan kuormitusta laajemmalle alueelle ja näin vähentämään alempiin kerroksiin kohdistuvia pystysuoria jännityksiä. (Belt, et al., 2002)

Kulutuskerroksen tarkoitus on muodostaa liikennöitävälle alueella pinta, jolla ajaminen on turvallista, miellyttävää ja taloudellista. Kulutuskerroksen tulee toimia koko käyttökänsä ajan siten, että nämä tavoitteet toteutuvat. Kulutuskerroksen rakenteellinen tehtävä on estää veden pääsy alempiin kerroksiin ja lisätä tien päällysrakenteen jäykkyyttä.

Kantavan kerroksen tehtävänä on muodostaa päällysteelle kantava alusta, jotteivät rasitukset päällysteessä kasva liian suuriksi. Kantava kerros tehdään kaikkiin tierakenteisiin. Kantavan kerroksen alustana on joko jakava kerros tai se voidaan tehdä suoraan alusrakenteen päälle, jos alusrakenne on jakavan kerroksen materiaalia karkeampaa ja routimatonta. Yleensä kantava kerros tehdään kokonaan sitomattomana tai siinä käytetään sidottua yläosaa

Jakava kerros tarvitaan, jos alusrakenteen materiaali on kantavuudeltaan jakavan kerroksen materiaalia heikompaa tai hienompirakeista. Jakavan kerroksen tehtävä on kantavan tavoin jakaa kuormitusta ja rajoittaa alusrakenteeseen kohdistuvia pystysuoria jännityksiä. Lisäksi jakava kerros toimii rakennetta kuivattavana osana estäen kapillaarisen veden nousun päällysrakenteen yläosaan sekä johtamalla rakenteeseen suotautuneet vedet tien sivuille.

Suodatinkerros tarvitaan, kun alusrakenteen materiaali on routivaa eli käytännössä savi-, siltti- ja silttimoreenimailla. Suodatinkerros estää päällysrakenteen ja alusrakenteen materiaalien sekoittumisen keskenään ja katkaisee kapillaariveden nousun ylempiin rakenteisiin. Paksulla suodatinkerroksella kasvatetaan päällysrakennepaksuutta, joka vähentää alusrakenteen routimisesta aiheutuvaa routanousua. (Belt, et al., 2002)

3.2 Rakenteen kuormitukset ja muodonmuutokset

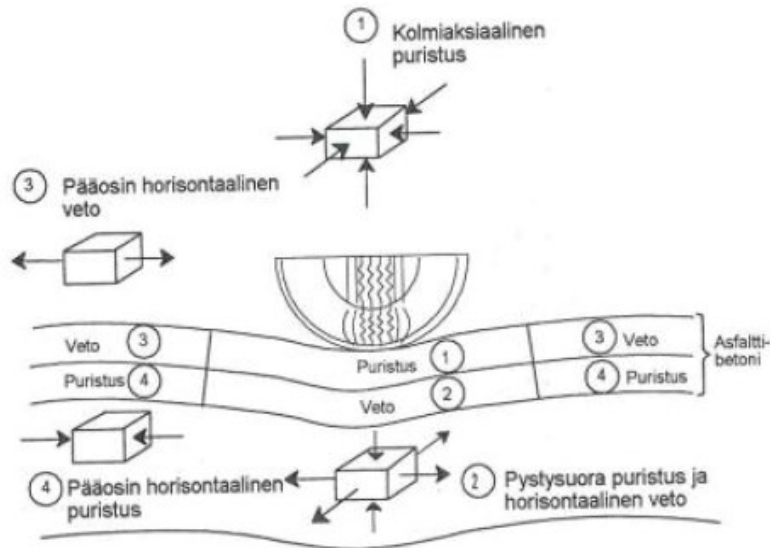
Tierakenteen pääasiallinen kuormitus syntyy liikenteestä. Toinen merkittävä kuormituslähde ovat ympäristötekijät, kuten routa, lämpötilamuutokset, vesi ja lumi.

3.2.1 Liikennekuormitus

Tierakennetta kuormittavia ajoneuvotyypppejä ovat moottoripyörät, henkilö- ja pakettiautot, linja-autot, kuorma-autot sekä erilaiset ajoneuvoyhdistelmät. Käytännössä merkittävien kuormitus syntyy raskaasta liikenteestä. Myös linja-autojen aiheuttamalla kuormituksella on merkitystä rakenteiden mitoituksen kannalta. Henkilö- ja pakettiautojen aiheuttama kuormitus ei ole oleellinen tekijä mitoituksessa. Niiden aiheuttama rasitus tierakenteeseen syntyy lähinnä nastarenkaiden aiheuttamana urautumisena päällysteessä. Raskaan liikenteen kuormituksessa on suurta hajontaa eri ajoneuvotyyppien ja kuormauksen suhteen. Myös kuormituksen toistuvuus on satunnaista ja vaihtelee paljon.

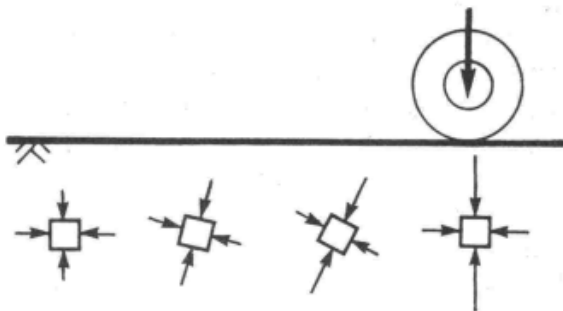
Ajoneuvon kuormitus välittyy tiehen akseleiden, jousituksen ja renkaiden kautta. Eri ajoneuvoyhdistelmissä on erilaisia akselistorakenteita ja jousitusratkaisuja. Kuormituksen välittyminen riippuu useista tekijöistä ja on siten monimutkainen ja hankala prosessi mallintaa. Kuormitettu rengas painuu tienpintaa vasten ja litistyy. Kosketuspinnan suuruuteen vaikuttavat taas rengaskoko, renkaan ilmanpaine ja rengaskuorma. Kosketuspintaan syntyy rengaskuorman aiheuttamia pystysuuntaisia puristusvoimia ja vaakasuuntaisia leikkausvoimia.

Tien pintaan syntyy jännityksiä ja muodonmuutoksia kuormitetun renkaan vaikutusalueella. Kuvassa 8 renkaan vaikutusalue on jaettu neljään eri jännitysalueeseen. Kolmiakσιαaliseen puristukseen, pystysuoraan puristukseen sekä horisontaaliseen vetoon, pääosin horisontaaliseen vetoon ja pääosin horisontaaliseen puristukseen. Sidotussa päällysteessä esiintyy kaikkia näitä jännityslajeja riippuen renkaan sijainnista päällysteen päällä. Sitomattomissa rakennekerroksissa ja alusrakenteessa jännitys koostuu ainoastaan kolmiakσιαalisesta puristuksesta. Sitomattomat materiaalit kun eivät pysty välittämään vetojännityksiä. (Ehrola, 1996)



Kuva 8. Taipumat ja jännitykset kuormitetun renkaan alla. (Ehrola, 1996)

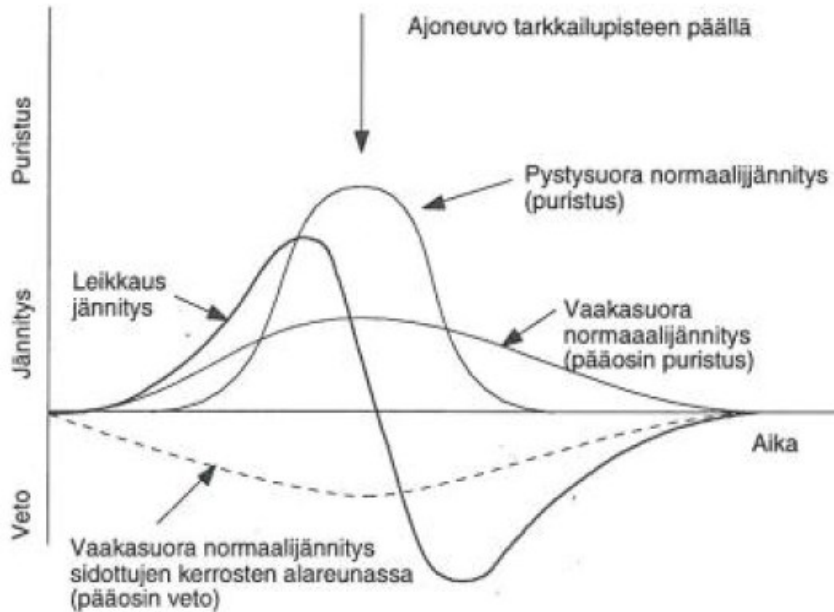
Kun kuormitus on staattista, eli rengas on paikallaan, pysyvät renkaan alla olevassa maa-alkiossa vallitsevat pääjännityssuunnat paikallaan. Tarkasteltaessa tietyssä sijainnissa olevaa maa-alkiota pyörän ollessa liikkeessä kiertyvät alkion pääjännityssuunnat kuvan 9 mukaisesti renkaan ylittäessä maa-alkion. Pystysuorassa oleva alkio vastaa tilannetta, kun pyörä on aivan kyseisen alkion yläpuolella. Muutoin pääjännityssuunnat ovat kiertyneinä tietyn kulman verran riippuen pyörän etäisyydestä tarkasteltavasta alkion-osta. (Kolisaja, 1993)



Kuva 9. Pääjännityssuuntien kiertyminen liikkuvan pyöräkuorman ylittäessä maa-alkion. (Kolisaja, 1993)

Jännityksiä renkaan ohittaessa tarkkailupisteen voidaan havainnollistaa myös kuvan 10 mukaisella käyrästöllä. Rengas synnyttää tierakenteeseen pystysuoran normaali-jännityksen, joka on puristusta. Se saavuttaa huippuarvonsa tarkkailupisteen kohdalla. Renkaan lähestyessä tarkkailupistettä syntyy päällysteen pintaan aluksi vaakasuoraa vetojännitystä, joka edelleen lähempänä muuttuu vaakasuoraksi puristukseksi. Sidottujen

kerrosten alaosassa vaakasuoran normaalijännityksen jännityksen kulku on peilikuva päällysteen yläosan käyttäytymisestä, eli tarkkailupisteen ympäristössä jännitys on pääosin vetoa.



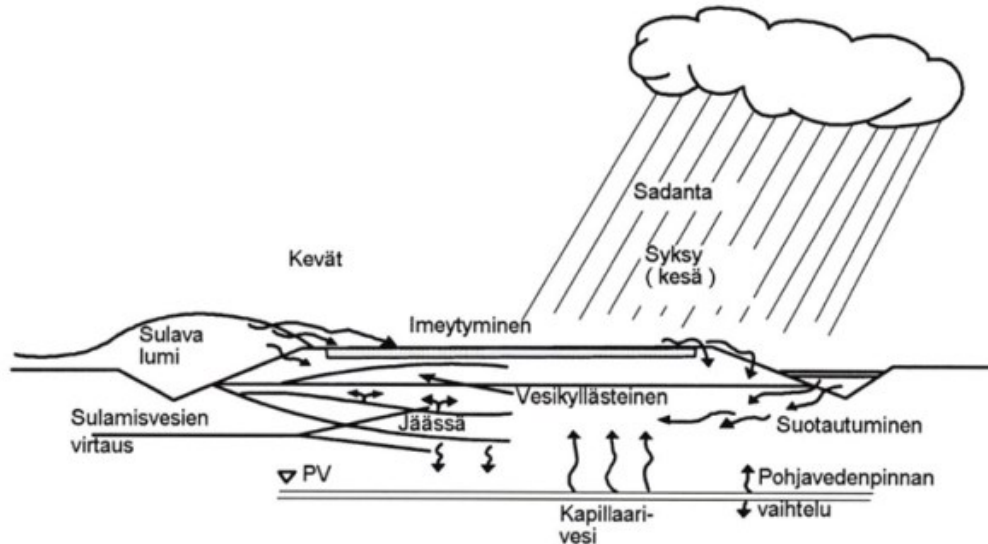
Kuva 10. Normaali- ja leikkausjännitys tierakenteessa renkaan ylittäessä tarkastelupisteen. (Ehrola, 1996)

3.2.2 Ympäristökuormitukset

Suurimmat ympäristön aiheuttamat kuormitustekijät liittyvät ilmastoon ja ilmastomuutokseen. Veden vaikutukset voidaan jakaa sulaan ja jäätyneeseen veteen. Jälkimmäinen liittyy routaan ja routimisen aiheuttamaan rasitukseen tierakenteelle. Routailmiötä käsitellään tarkemmin kappaleessa 4. Sulan veden vaikutukset ilmenevät pääasiassa sitomattomissa rakennekerroksissa. Nollan yläpuolella lämpötila taas vaikuttaa lähinnä sidottuihin kerroksiin.

Tierakenteessa on vettä vapaana vetenä, kapillaari- ja huokosvetenä sekä vesihöyrynä. Veden kulkeutumista tierakenteeseen on havainnollistettu kuvassa 11. Rakenteen suunnittelun kannalta oleellista on pyrkiä vaikuttamaan vapaan veden liikkeisiin tierakenteessa riittävällä kuivatustoimenpiteillä, sillä sen liiallisella läsnäololla on vaikutusta rakennekerrosten lujuuteen. Maarakenteen kuormituskestävyys syntyy pääasiassa maan leikkauslujuudesta, joka riippuu jännitystilasta, tehokkaasta koheesiosta ja kitkakulmasta. Huokosvedenpaine pienentää maan tehokasta jännitystä ja siten leikkauslujuutta. Leikkauslujuuden lisäksi maamateriaalin vesipitoisuus vaikuttaa sen muodonmuutos- ja kokoonpuristuvuusominaisuuksiin. Hienorakeisilla mailla vesipitoisuuden lisääntyminen on voimakkaasti sidoksissa materiaalin jäykkyyden (E-moduulin) pienenty-

miseen. Keväällä roudan sulamisen aiheuttama veden lisääntyminen aiheuttaa hienorakeisilla pohjamailla suurta kevätkantavuuden alenemaa. Käytännön mittauksissa teiden kevätkantavuudet ovat olleet 0–60 % kesäkantavuutta pienempiä.



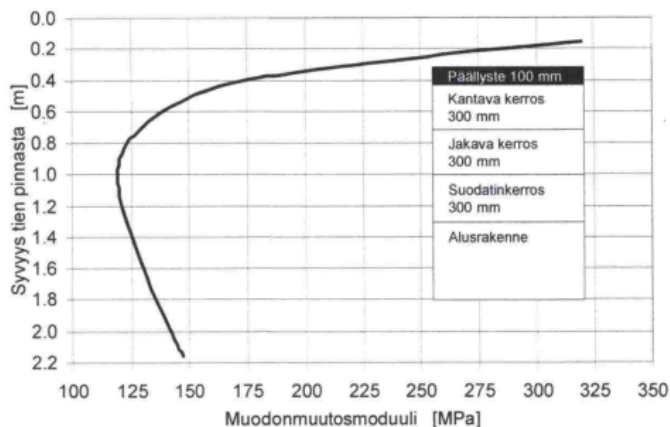
Kuva 11. Veden kulkeutuminen tierakenteeseen eri lähteistä. (Ehrola, 1996)

Tien rakennekerrokset koostuvat karkearakeisista kittamaalajeista, joissa koheesiolla ei ole suurta vaikutusta rakenteen lujuuteen. Riittävän alhaisella vesipitoisuudella rakeiden välille kuitenkin muodostuu veden imupaineesta johtuvaa näennäistä koheesiota, jolla on rakenteen lujuutta lisäävä vaikutus. Vesipitoisuuden muutokset vaikuttavat rakenteen mahdolliseen tiiviuteen optimivesipitoisuuden kautta. Tiiviystilan alentuessa rakennemateriaalin leikkauslujuus niin ikään laskee. Vedellä kyllästyneisiin rakennekerroksiin kehittyy huokosveden ylipainetta nopeassa kuormituksessa, jolloin tehokas jännitys ja leikkauslujuus pienenevät merkittävästi. Tällainen tilanne saattaa esiintyä keväällä roudan sulaessa rakenteiden pintaosasta alemman rakenteen ollessa vielä jäätyneenä, jolloin vesi ei pääse poistumaan rakenteesta.

Bitumia sisältävät päällysteet ovat viskoelastisia materiaaleja. Tällaisen materiaalin kuormituskäyttäytyminen riippuu lämpötilasta ja kuormitusajasta. Lämpötilamuutosten myötä tapahtuva kutistuminen ja laajeneminen ovat olennainen osa asfalttipäällysteiden toimintaa. Kutistuminen on päällysteen kestävyyskannalta haitallisempaa kuin laajeneminen. Kutistuminen aiheuttaa päällysteeseen vetojännityksiä, joita se kestävä puristusta huonommin. Sitomattomissa rakennekerroksissa ja pohjamaassa lämpötilalla on merkitystä lähinnä rakenteen jäätyneen kautta. Jäätyessään rakenteen jäykkyys lisääntyy merkittävästi sulaan verrattuna. Hienorakeisella pohjamaalla jäätyneen aiheuttama kantavuuden lisäys on karkearakeista maata merkittävämpää. (Ehrola, 1996)

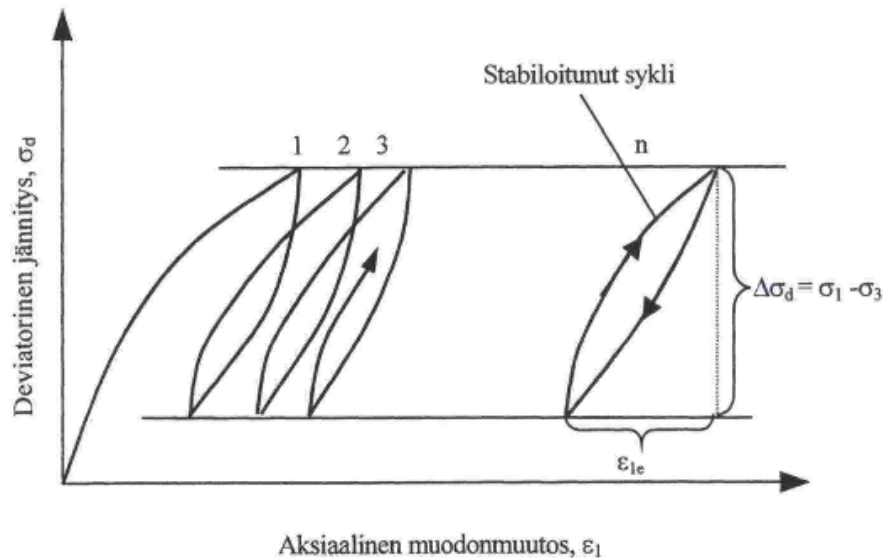
3.2.3 Muodonmuutokset

Tierakenteeseen kohdistuvan kuormituksen aiheuttamat muodonmuutokset voidaan jakaa palautumattomiin ja palautuviin muodonmuutoksiin. Maamateriaalissa kuormitus aiheuttaa aina sekä palautuvan eli elastisen että palautumattoman eli plastisen muodonmuutoksen. Elastinen muodonmuutos aiheutuu materiaalin raerungon kimmoisesta palautuvasta muodonmuutoksesta ja plastinen raerungon rakeiden kiertymisestä sekä liukumisesta toistensa suhteen. Yleisesti materiaalin muodonmuutosmoduulilla (E- eli kimmomoduuli) tarkoitetaan jännityslisäyksen ja siitä aiheutuvan palautuvan muodonmuutoksen suhdetta. Kimmomoduuli kuvaa hyvin homogeenisten ja isotrooppisten materiaalien muodonmuutoskäyttäytymistä. Koska sitomattomien tierakennemateriaalien muodonmuutoskäyttäytymiseen vaikuttavat monet sellaiset tekijät, jotka tavallisesti eivät liity materiaalin kimmoisiin ominaisuuksiin, käytetään muodonmuutosmoduulista nimitystä resiliient-moduuli (M_r) eli jäykkyyssmoduuli. Se lasketaan kuormituksen aiheuttaman jännityslisäyksen ja muodonmuutoksen palautuvan osan avulla. Resiliient-moduuli ei ole vakio, vaan riippuu vallitsevasta jännitystilasta ja kuormituksen aiheuttamasta jännityslisäyksestä. Jännitystilaan vaikuttavat tarkastelusyvyys, yläpuolisten kerrosten ominaisuudet ja liikennekuormituksen suuruus. Tierakenteessa materiaalin moduuli on suurimmillaan rakenteen yläosassa liikennekuorman takia. Rakenteen suodatinkerroksessa jännitystaso on yleensä pienimmillään, jolloin myös rakennemateriaalin jäykkyyssmoduuli on ylempiä kerroksia alhaisempi. Tarkastelupisteen ollessa syvemmällä liikennekuorman vaikutusalueen alapuolella, tulee rakenteen oma paino määräävämmäksi, jolloin moduuli alkaa kasvaa, kuten kuvasta 12 nähdään (Alkio, et al., 2001)



Kuva 12. Sitomattomien kerrosten muodonmuutosmoduuli syvyyden suhteen tierakenteessa. (Belt, et al., 2002)

Maarakenteiden kuormitus-muodonmuutosriippuvuus ei ole lineaarista. Kun maamateriaalia kuormitetaan toistuvasti samalla kuormalla riittävän monta kertaa, pienenee plastisen muodonmuutoksen merkitys olemattomaksi lyhyellä aikavälillä. Tällöin muodonmuutuskäyttäytyminen ikään kuin stabiloituu ja käytös on siitä eteenpäin lineaarielastista. Jos nyt toistokuormituksen aiheuttama jännityslisäys ylitetään tai pääjännitysten suhteet muuttuvat merkittävästi, alkaa materiaaliin jälleen syntyä plastisia muodonmuutoksia. Kuvassa 13 on esitetty maamateriaalin käyttäytyminen toistokuormituksessa, kun deviatorisen jännityksen huippuarvo pysyy vakiona eri kuormitusyhteisöissä. (Alkio, et al.,



2001)

Kuva 13. Maamateriaalin käyttäytyminen toistokuormituksessa. (Alkio, et al., 2001)

Tavallisesti resilient-moduuli määritetään syklisellä kolmiaksaalikokeella ja sen jännitystilariippuvuutta voidaan kuvata yhtälöllä:

$$M_r = k_1 \cdot \theta_0 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{k_2} \quad (1)$$

jossa:

M_r on	resilient-moduuli (MPa)
k_1	moduuliluku
k_2	moduuliekspONENTTI
θ	pääjännitysten summa (kPa)
θ_0	vertailujännitys (kPa)

Materiaaliparametrien k_1 ja k_2 määrittäminen voidaan tehdä käyrän sovituksella eri jännitystasoilla tehtyjen syklisistä kolmiaksaalikokeiden tuloksiin, jossa resilient-moduuli esitetään pääjännitysten summan funktiona. (Kolisoja, 1993)

Jännitystilän lisäksi materiaaliominaisuuksia ja olosuhdetekijöitä, joiden on todettu vaikuttavan sitomattoman maamateriaalin palautuvaan muodonmuutoskäyttäytymiseen ovat muun muassa raekokojakauma, hienoainespitoisuus, tiivistila, kosteuspitoisuus, kyllästysaste, maan jäätymis-sulamisprosessi ja alustan kantavuus. Karkearakeisilla materiaaleilla maksimiraekoon kasvun on todettu suurentavan jäykkyysmoduulia ja 0,002 mm savilajitetta pienemmän hienoaineksen pitoisuuden kasvun taas pienentävän sitä. Pienillä vesipitoisuuksilla tilanne on kuitenkin päinvastainen hienoaineksen osalta. Maamateriaali löyhtyy routaantumisen ja sitä seuraavan sulamisen johdosta, jolloin tiiviiden alentuessa jäännösmoduulin arvo laskee. Sitomattoman rakennekerroksen jäykkyyden ollessa selvästi alempaa rakennetta suurempi, tulisi kimmoteorian mukaan jäykemmän rakenteen alapintaan syntyä vetojännitys. Sitomaton materiaali, ei kuitenkaan pysty välittämään vetojännitystä, jolloin kyseinen kerros voi toimia vain tietyllä suhteellisella jäykkyydellä alempaan rakenteeseen nähden. Käytännössä tämä tarkoittaa, että päällimmäisen kerroksen jäykkyys voi olla korkeintaan 2–4 kertainen alempaan kerrokseen verrattuna. (Ehrola, 1996)

3.3 Vaurioitumismekanismit

Jokaisella ylityksellä rengaskuorma aiheuttaa päällysteeseen pienen millimetriluokan taipuman, joka synnyttää puristus- ja vetorasituksia päällysteen yläpintaan sekä vetoa päällysteen alapintaan. Kun tämä vetomuodonmuutos toistuu riittävän monta kertaa, päällyste alkaa vaurioutua eli väsyä ajan myötä. Käytännössä väsyminen johtuu päällystemateriaalin bitumin murtolujuuden ja -venymän pienenemisestä kuormituskertojen lisääntyessä. Väsymisvaurioita syntyy, kun liikennekuormituksen määrä ylittää rakenteen väsymiskestävyyden. Alkuvaiheessa väsyminen aiheuttaa hiushalkeamia sidotun kerroksen alapinnassa, jotka laajetessaan alentavat päällysteen jäykkyyttä. Siinä vaiheessa, kun halkeilu on edennyt tien pinnan näkyviksi vaurioiksi, saattaa päällysteen jäykkyys olla enää puolet alkuperäisestä. Näkyvät vauriot alkavat tyypillisesti tien pinnan pituussuuntaisina halkeamina ajourissa tai niiden sivuilla, eli siellä missä liikennekuormitus on suurinta. Vaurioitumisen edetessä muodostuu tien pintaan verkkohalkeamia (kuva 14). Päällysteen alapinnan vetomuodonmuutosten kasvua voidaan hillitä käyttämällä päällysteen alla olevassa kerroksessa korkean moduulin omaavaa materiaalia tai kasvattamalla päällystepaksuutta.



**Kuva 14. Urautumisen seurauksena päällysteen pintaan on muodostunut verkko-
halkeamia. (ROADEX, 2023)**

Tien pinnan urautumisella tarkoitetaan pinnan poikkisuuntaisen epätasaisuuden kasvua. Urautuminen johtuu päällysteen kulumisesta sekä rakennekerrokseen ja alusrakenteeseen syntyvistä pysyvistä muodonmuutoksista. Päällysteen kulumista aiheuttaa pääasiassa nastarengaskuluminen. Kuluminen ilmenee tien pinnalle syntyvistä jyrkkäreunaisista urista. Päällysteen kulumisnopeuteen vaikuttavat mm. päällysteen runkokiviaineksen ominaisuudet. Päällysteen deformaatioon on seurauksena ulkoisista kuormitustekijöistä, joita ovat mm. liikenteen määrä, kuormituksen suuruus sekä jakautuminen tien poikkisuunnassa, kuormitusaika ja lämpötila. Päällysteen jäykkyyteen ja siten muodonmuutosominaisuuksiin voidaan vaikuttaa päällystemassan ominaisuuksilla, kuten side-, lisä- ja kiviainesten oikealla valinnalla.

Päällysteen alapuolisten sitomattomien rakennekerrosten ja alusrakenteen pysyvät muodonmuutokset syntyvät sitomattomien materiaalien painumisesta ja ajourien välissä tapahtuvasta kohoamisesta. Kosteustilalla on merkittävä vaikutus sitomattomien rakenteiden deformaatioon. Suurimmat muutokset niissä tapahtuvatkin yleensä keväällä roudan sulamisen aikaan. Riski sitomattomien rakennekerrosten deformaatioon on suurin ohutpäällysteisillä kapeilla teillä. Ohutpäällysteisillä teillä liikennekuormitus aiheuttaa

suuria rasituksia varsinkin ylimpiin sitomattomiin kerroksiin, mikä lisää pysyvien muodonmuutosten syntyä. Kapeilla teillä liikennekuormitus kohdistuu yleensä tien reunaosiin, jolloin rakenne pääsee myötäämään reunan suuntaan, mikä aiheuttaa muodonmuutoksia päällysteen alapuolisissa rakenteissa. Nämä muutokset näkyvät tiellä reunapainumina. Kuvassa 17 tien reunaosan rakenteeseen on syntynyt pysyviä muodonmuutoksia.



Kuva 15. Sitomattomien rakennekerrosten ja pohjamaan pysyvät muodonmuutokset näkyvät erityisesti kapeilla teillä reunojen pettämisenä. (ROADDEX, 2023)

Tien pituussuuntaista epätasaisuutta aiheutuu pääasiassa tierakenteen painumista pehmeillä pohjamailla sekä routanousueroista tielinjalla. Alusrakenteen vaihtelu ja erilaiset epäjatkuvuuskohtat tierakenteessa, kuten päällysrakennepaksuuksien muutokset ja rumpurakenteet, voivat myös olla syynä pituussuuntaisten epätasaisuuksien syntymiselle. Kuvassa 16 tiehen on syntynyt ajamista haittaava pituussuuntainen muodonmuutos. Epätasaisuuksien lisäksi routanousut aiheuttavat halkeamia päällysteeseen. Epätasainen routanousu synnyttää päällysteen yläpintaan vetorasiitusta, joka ylittäessään rakenteen lujuuden muodostaa tierakenteeseen halkeamia päällysrakenteen yläosasta alkaen. Muita mahdollisia vauriotyyppejä ovat muun muassa lämpötilamuutosten aiheut-

tamat pakkaskatkot päällysteessä, heijastushalkeilu, jossa päällystekerroksen alapuolisiin kerroksiin syntyneet halkeamat kulkeutuvat tien pintaan sekä erilaiset materiaali- ja työvirheet. (Belt, et al., 2002)



Kuva 16. Epätasainen routanousu aiheuttaa pituussuuntaisia heittoja. (ROADX, 2023)

3.4 Kuormituskestävyyssmitoitus

Tierakenteen tarkoitus on tarjota tienkäyttäjälle mahdollisimman tasainen alusta ja sujuva ajokokemus koko sen elinkaaren ajalle. Jotta nämä vaatimukset täytyisivät, tulee tien pintakerroksen kulutuskestävyyden olla riittävä ja rakenteen pystyä jakamaan liikennekuormitus siten, ettei pohjamaahan kohdistu liian suuria rasituksia. Myöskään itse tierakenteeseen ei saa kohdistua liiallisia muodonmuutoksia. Tierakenne mitoitetaan kerroksellisena rakenteena, jossa jokaisella rakennekerroksella on kohdassa 3.1.2 kerrottu oma tehtävänsä, jolloin ne pystytään suunnittelemaan ottaen huomioon kussakin kerroksessa vallitseva jännitystaso ja näin päätyä teknistaloudellisesti järkevään lopputulokseen materiaali- ja laatuvaatimusten suhteen. (Väylävirasto, 2018)

Tien kuormituskestävyyden mitoituksessa tulee tuntea tiehen kohdistuvat kuormitukset sen käytön aikana. Tieliikenteen ollessa monimuotoista, on vaikea arvioida pelkästään

ajoneuvojen määrän perusteella syntyvää rasitusta. Tästä syystä on otettu käyttöön kuormituskertaluvun ja mitoitusakselipainon käsitteet. Tarkoituksena on redusoida eri akselipainojen kuormitusvaikutus rasitukseltaan yhtä suureksi mitoitusakselien lukumääräksi. Verrannollisuuskerrointa voidaan arvioida kaavalla (Kolisoja, 1993):

$$N = \left(\frac{P_x}{P_{ref}} \right)^n \quad (2)$$

jossa:

N on	akselikuormituksen ekvivalenttikerroin eli vastaavuuskerroin
P_x	tarkasteltava akselikuorma
P_{ref}	standardiakselikuorma, jolle käytetään paripyöräakselille Suomessa arvoa 100 kN
n	parametri, jolle käytetään yleensä arvoa 4

Käytännössä tierakenteen mitoituksessa erityyppisille ajoneuvoille on määrätty keskimääräiset vastaavuuskertoimet. Nyt tierakenteen kokonaiskuormitus voidaan määrittää halutulle ajanjaksolle, kun tunnetaan eripainoisten ajoneuvojen lukumäärä. Kuormituskertalukua korjataan vielä tien leveyskerroimella, joka huomioi ajoneuvojen kulku-urien vaihtelun tien leveyssuunnassa. (Väylävirasto, 2018)

Suomessa tierakenteisiin liittyvä kuormituskestävyysmitoitus tehdään Väyläviraston ohjeen Tierakenteen suunnittelu mukaisesti. Mitoituksen kulku on pääpiirteissään seuraava. Lasketaan kuormituskertaluku, joko arvioidun liikennemäärätiedon perusteella tai käyttämällä tieluokkakohtaisia kaavoja, jollei luotettavaa liikennemääräennustetta ole saatavilla. Kuormituskertaluku määrää kuormitusluokan, jonka perusteella taas määräytyvät rakenteiden tavoitekantavuudet ja päällystepaksuudet. Tavoitekantavuudella tarkoitetaan kevätkantavuutta, joka tulisi saavuttaa levykuormituskokeen tuloksena juuri roudan sulamisen jälkeen, jolloin rakenteen kantavuus on alimmillaan. Tämän jälkeen valitaan rakennekerrosmateriaalit ja määrätään niiden moduularvot. Nyt kun tiedetään vielä alusrakenteen kantavuus, voidaan rakennekerrospaksuudet mitoittaa Odemarkin kaavan avulla: (Väylävirasto, 2018)

$$E_Y = \frac{E_A}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0.81 \cdot \left(\frac{h}{0.15}\right)^2}}\right) \frac{E_A}{E} + \frac{1}{\sqrt{1 + 0.81 \cdot \left(\frac{h}{0.15}\right)^2} \left(\frac{E}{E_A}\right)^{\frac{2}{3}}}} \quad (3)$$

jossa:

E_A on	mitoittavan kerroksen alapinnan kantavuus (MPa)
E_Y	mitoittavan kerroksen yläpinnan kantavuus (MPa)
E	mitoittavan kerroksen materiaalin E-moduuli (MPa)
h	mitoittavan kerroksen paksuus (m)
0.15	kuormittavan pyörän kosketuspinnan laskennallinen säde (m)

Laskenta tehdään kerroksittain alhaalta ylös pohjamaan moduulista lähtien, kunnes tavoitekantavuudet on saavutettu. Rakennekerros materiaalien moduulien arviointi voidaan tehdä niiden rakeisuuskäyrien perusteella Tierakenteen suunnittelu ohjeen mukaisesti. (Väylävirasto, 2018) Rakeisuuskäyrän käyttö moduulimäärittämisessä perustuu kokemuspohjaiseen tietoon. Näin saadut moduuliarvot ovat rakennekerroskohtaisia vakioita, eikä moduulin jännitystilariippuvuutta huomioida. Esimerkiksi jakavan kerroksen kiviaineksen moduuliarvo edustaa sellaista jännitystasoa, joka tavanomaisessa tierakenteessa jakavan kerroksen syvyydellä saavutetaan. Uusiomateriaalien osalta tulee tässä kohtaa huomioida, että moduuliarvon määrittäminen tällä tavalla ei välttämättä ole mahdollista kokemusperäisen tiedon puuttuessa. Uusiomateriaaleilla saattaa olla myös ominaisuutena lujittuminen ajan myötä.

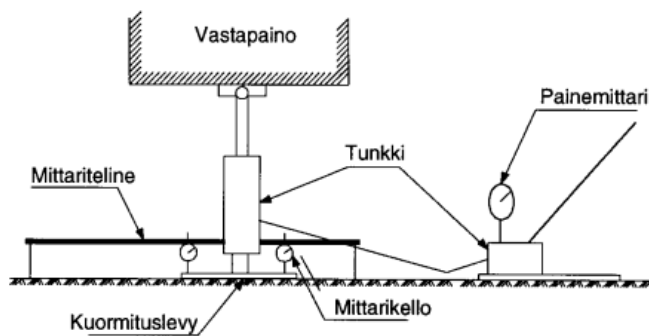
3.5 Kantavuuden mittaaminen

Tierakenteen kantavuuden mittaamiseen on olemassa lukuisia kenttäolosuhteisiin kehitettyjä menetelmiä. Kantavuudella tarkoitetaan tässä rakenteen kokonaisjäykkyyttä. Seuraavassa on kuvattu kahden tämän työn kannalta oleellisen mittausmenetelmän käyttöä.

3.5.1 Levykuormituskoe

Levykuormituskoe on hyvin yleisesti käytetty tierakenteiden kantavuus- ja tiiviysominaisuuksien mittausmenetelmä Suomessa ja muualla maailmassa. Laitteen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 17. Halkaisijaltaan 300 mm jäykkä metallilevy asetetaan mitattavalle pinnalle. Levyä kuormitetaan hydraulisen tunkin avulla portaittain kuormitusta nostaen 10 kN:sta 60 kN:iin. Vastapainona käytetään yleensä raskasta työkonetta tai

kuorma-autoa, johon levykuormituslaitteisto on kiinnitetty. Painumaa mitataan kuormituskehälle 120 asteen välein sijoitetuilla mittakelloilla. Mittakellot nollataan 3,5 kN esikuormituksen jälkeen, jolloin varsinainen mittaus alkaa. Kuormitus toteutetaan kahtena kuormitusytkinä, joista ensimmäisen tuloksista lasketaan E_1 -moduuli. Jälkimmäisestä kuormitusytkistä määritetään muodonmuutosmoduuli E_2 , joko kuormitus-muodonmuutoskäyrän lineaarisesta osasta tai sekanttimoduulina alku- ja lopputilanteiden väliltä. InfraRYL ohjeistaa määrittämään moduulin 30-70 % kuormitusväliltä. Toistokuormituksessa rakenteen tiiviys kasvaa. Vaadittu kantavuus tulee täyttyä toisella kuormituskerroilla. Muodonmuutosmoduulien E_2/E_1 suhteesta saadaan rakenteen tiiviyssuhde, jolle on yleensä myös asetettu jokin vaatimus.



Kuva 17. Levykuormituslaitteisto ja sen toimintaperiaate. (Piippo, et al., 1990)

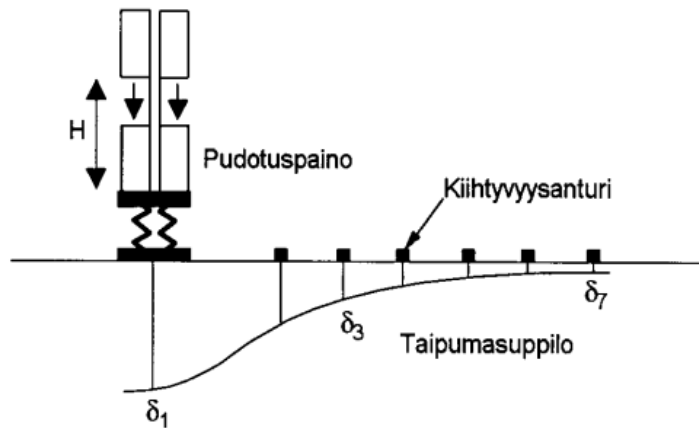
Kokeen kuormitusvaikutus rakenteisiin on selvästi alle metrin luokkaa. Sillä ei pystytä koko rakenteen päältä määrittämään minkään yksittäisen rakennekerroksen muodonmuutosominaisuuksia, vaan sen tuloksena saadaan tierakenteen ylimpien kerrosten kokonaiskäyttäytymistä edustava näennäinen muodonmuutosmoduuli. Jos käytävissä on alemmista kerroksista esimerkiksi ennen rakentamista määritettyjä moduularvoja, voidaan välissä olevan kerroksen muodonmuutosmoduuli määrittää Odemarkin yhtälön avulla.

Levykuormituskokeen heikkoutena voidaan pitää sen staattista mittaustapaa, joka ei vastaa dynaamista liikennekuormitusta. Kokeella on kuitenkin pitkä käyttöhistoria, jonka aikana on kertynyt runsaasti tietoa mittaustulosten ja rakenteiden käyttäytymisen välisestä yhteydestä. (Kalliainen, et al., 2011) (Ehrola, 1996)

3.5.2 Pudotuspainolaite

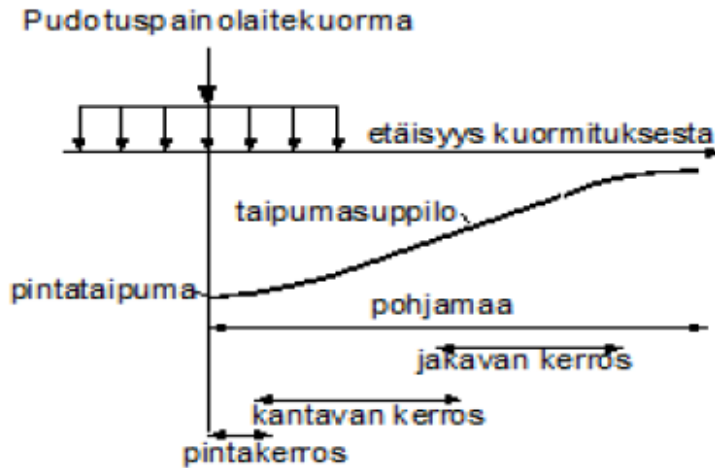
Pudotuspainolaitteella pyritään simuloimaan liikennekuormitusta mittaamalla laitteen tien kohdistamaa voimaa ja siitä aiheutuvaa taipumaa tien pinnalla. Paino pudotetaan tien pinnalla olevalle halkaisijaltaan n. 300 mm suuruiselle pyöreälle levyille. Pudotuskorkeutta ja painoa voidaan säätää kuorman suuruuden vaihtelemiseksi. Yleisesti käytössä

oleva pudotettava massa vastaa rakenteeseen kohdistuvaa 50 kN suuruista hetkellistä kuormitusimpulssia. Tällä pyritään jäljittelemään 100 kN standardiakselipainon tien kohdistamaa rasitusta. Taipuma mitataan suoraan kuormituslevyn alla sekä usealla etäisyydellä levystä. Anturien etäisyyksiä voidaan säätää portaattomasti yleensä 0,2–2,5 m välillä. Kuormitusaika vaihtelee laitteesta riippuen 20–60 ms. Pudotuspainolaitteen kuormitusajat tien pintarakenteessa ovat hyvin lähellä raskaan ajoneuvon normaalin ajonopeuden (60–80 km/h) mukaisia arvoja. Syvemmällä pudotuspainolaitteen antamat kuormitusajan arvot ovat jonkin verran raskasta ajoneuvoa pienempiä. Voidaan kuitenkin todeta, ettei tällä erolla ole merkitystä sitomattomien kerrosten moduulin määrittämisessä. Pudotuspainolaitteen tuloksista laskettujen taipumien ja moduuliarvojen voidaankin todeta kuvaavan staattisia mittausten menetelmiä paremmin tierakenteen kykyä kestää liikennekuormitusta. Pudotuspainolaitteen toimintaperiaate on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Pudotuspainolaitteen toimintaperiaate. (Liimatta, et al., 1989)

Maailmalla on muutama pudotuspainolaittevalmistaja. Laitteen valmistajasta riippuen toimintaperiaatteet eroavat jonkin verran kuormitusajan ja taipumamittausantureiden osalta. Pudotuspainolaitteen idea ei ole pelkästään määrittää kantavuutta levykuormituslaitteen tapaan maksimitaipuman mittauksella, vaan mitata tien pinnan taipuman muotoa eli taipumasuppiloa, ja saada siten enemmän tietoa tierakenteen kuormituskäyttäytymisestä. Kahdella erilaisella rakenteella saattaa olla samat maksimitaipumat, mutta erilaiset taipumasuppilot. Taipumasuppilon muoto määräytyy koko tierakenteen perusteella. Mitä kauempaa kuormituslevystä taipumaa tarkastellaan, sitä syvemältä tierakenteesta saadaan tietoa. Kuvassa 19 on nähtävissä periaate rakennekerrosten vaikutuksesta taipumasuppilon eri osiin. (Liimatta, et al., 1989) (Spoof & Petäjä, 2000)



Kuva 19. Tien rakennekerrosten vaikutus taipumasuppiloon. (Saarela, 2017)

Taipumasuppilosta saadaan määritettyä erilaisia rakenteen ominaisuuksia ja kuntoa kuvaavia parametreja, joita on esitetty taulukossa 1. Tavanomaisesti SCI:n määrittämisessä käytetään d_r -arvona 200 tai 300 mm etäisyydellä olevan anturin lukemaa. BCI lasketaan yleensä $d_{900} - d_{1200}$ erotuksena.

Taulukko 1. Pudotuspainolaitteella mitatusta taipumasuppilosta määritettäviä parametreja. (Spoof & Petäjä, 2000)

Nimi	Merkintä	Yksikkö	Käyttötarkoitus
Keskitaipuma	d_0	μm	Kuvaa koko rakenteen ja pohjamaan jäykkyyttä
Taipuma etäisyydellä r kuormituslevystä	d_r	μm	Kuvaa ekvivalenttisuurella r olevan kerroksen jäykkyyttä
Surface Curvature Index, SCI	$d_0 - d_r$	μm	Kuvaa päällysrakenteen yläosan kuntoa
Base Curvature Index, BCI	$d_{n-1} - d_n$	μm	Kuvaa päällysrakenteen alaosan kerrosten / pohjamaan kuntoa
Base Damage Index, BDI	$d_1 - d_r$	μm	Kuvaa päällysrakenteen kuntoa

Taulukossa on käytetty seuraavia symboleja: —

d_0 taipuma kuormituslevyn alla

d_r taipuma etäisyydellä r kuormituslevystä

d_n taipuma mitattuna kauimpana kuormituslevystä olevalla anturilla

d_{n-1} taipuma mitattuna toiseksi kauimpana kuormituslevystä olevalla anturilla

d_1 taipuma mitattuna lähimpänä kuormituslevyä olevalla anturilla

Taipumasuppiloindeksejä voidaan käyttää hyväksi mm. kohteen jakamisessa homogeenisiin osuuksiin kuormituskestävyyden mitoittamista varten.

Eri taipumaindekseille on määritetty kokemukseräisiä ohjearvoja. Kuvassa 20 on Roadex-projektilla esitettyjä raja-arvoja käytettäväksi päällystetyillä teillä. (ROADX, 2023)

Luokka	SCI (μm)	BCI (μm)
	0-200 mm	900-1200 mm
Hyvä	< 120	< 10
Tyydyttävä	120 - 200	10 - 30
Puutteellinen	200 - 250	30 - 40
Huono	250 - 400	40 - 60
Erittäin huono	> 400	> 60

Kuva 20. SCI- ja BCI-indekseille suositeltuja raja-arvoja. (ROADDEX, 2023)

4. ROUTA JA ROUTAMITOITUS TIERAKEN- TEESSA

4.1 Routa ja routiminen

Maan routaantumisella tarkoitetaan sen jäätymistä sekä jäätyksen etenemistä. Routaraja on tiettyä ajanhetkenä vallitseva roudan syvyys maakerroksessa. Roudan sulaminen taas merkitsee jäätyneen maakerroksen sulamista, kun ilman lämpötila nousee pak-kaskauden jälkeen lämpimän puolelle. Sulaminen tapahtuu tällöin pääasiassa maan pin-nalta alkaen, mutta myös jonkin verran routarajan alapuolisen maan lämmöstä johtuen routarajalta käsin.

Routimisella tarkoitetaan maan routaantumista, jonka yhteydessä maan tilavuus kasvaa ja sen seurauksena maan pinnalla tapahtuu routanousua. Maata, joka routaantuessaan routii, nimitetään routivaksi. Maata, jonka jäätymisestä ei aiheudu tilavuuden kasvua eikä routanousua, sanotaan routimattomaksi. (Ehrola, 1996)

4.1.1 Maan jäätymisprosessi

Jäätynyt maa on kiinteässä, nestemäisessä ja kaasumaisessa olomuodossa olevien ai-neiden seos. Siksi lämpö voi siirtyä maaperän raerakenteessa fysikaalisesti useiden eri prosessien avulla. Maaperässä liikkuvan veden jäätyminen määrää routaantumisen ja routimisen. Vesi voi olla maassa vapaana huokosvetenä tai sitoutuneena adsorbti-ovenä. Varsinkin hienorakeisissa maalajeissa sitoutuneella vedellä on merkittävä vaikutus maan lämpötilasta riippuvaan käyttäytymiseen.

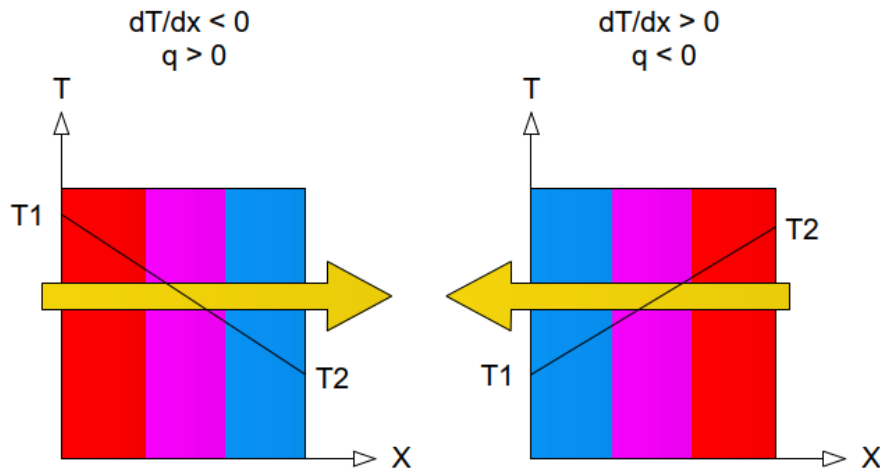
Lämmön siirtyminen aiheutuu lämpötilaeroista. Lämpö siirtyy maaperän huokosraken-teessa pääasiassa johtumalla, konvektion kautta tai säteilemällä. Yleensä nämä tapah-tuvat yhdessä. Merkittävin lämmönsiirtymismuoto maassa on johtuminen. Monesti puhu-taan lämmön virtaamisesta siirtymisen sijaan. Routivassa maassa lämpö siirtyy myös konvektiivisesti virtaavan veden mukana. Siirtyvän kokonaislämpömäärän näkökulmasta sen merkitys on kuitenkin mitätön. (Kujala, 1994)

Maassa johtumalla tapahtuvaa lämmön siirtymistä voidaan kuvata Fourierin lailla:

$$q = \lambda \frac{dT}{dz} \quad (4)$$

jossa

q on	lämpövuoto alenevan lämpötilan suunnassa (W/m ²)
λ	lämmönjohtavuus lämpövirran suunnassa (W/Km)
dT/dz	lämpötilagradientti lämpövirran suunnassa (K/m)



Kuva 21. Lämpövirran suunta. (Kujala, 1994)

Lämpöenergia siirtyy aina korkeammasta lämpötilasta matalamman lämpötilan suuntaan (kuva 21). Fourierin lain mukaan lämpövirta alenevan lämpötilan suuntaan on suoraan verrannollinen lämpötilagradienttiin. Lämmön siirtymistä maassa voidaan tarkastella lämpötaseen käsitteen kautta. Tarkastelun kohteena oleva rakenne voidaan käsittää yhtenä tasealueena, jonka energiatasetta kuvataan seuraavasti:

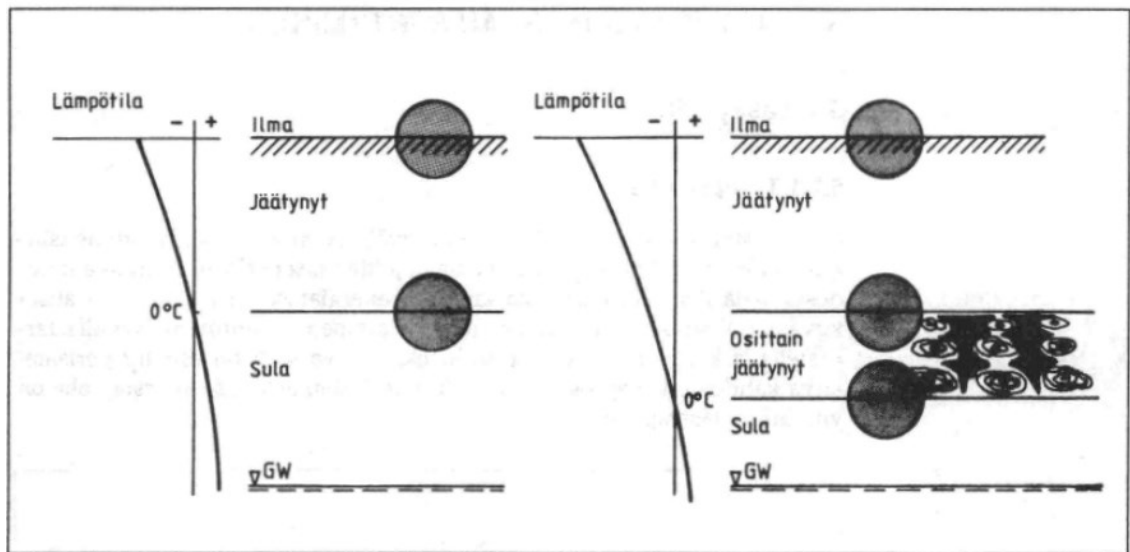
$$E_{out} = E_{in} + E_g - E_{st} \quad (5)$$

jossa

E_{out} on	tasealueelta ulos tuleva energia
E_{in}	tasealueelle sisään menevä energia
E_g	tasealueen sisällä vapautuva energia
E_{st}	tasealueen sisään varastoituva energia

Energiataseyhtälö pohjautuu termodynamiikan ensimmäisen pääsäännön periaatteeseen, jonka mukaan energiaa ei voida hävittää eikä luoda tyhjästä. Ainoastaan muuttaa muodosta toiseen. Tasealueena voidaan pitää differentiaalisen ohutta maasuikaletta routarajalla tai esimerkiksi yksittäistä routaantuvaa maakerrosta. Maan jäätyessä

tasealueelta poistuu enemmän energiaa kuin sinne virtaa sisään. Tämä johtuu tasealueen sisällä tapahtuvasta energian vapautumisesta, joka liittyy maan sisältämän veden jäätymiseen sekä maan ja veden jäähtymiseen. Sulamisessa tapahtuu päinvastoin, eli tasealueelle varastoituu energiaa lämpenemisen ja olomuodon muutoksen seurauksena. Routimisilmiön yhteydessä tasealueen rajoiksi käsitetään yleensä jäätyneen ja sulaneen kerroksen välinen raja, osittain jäätyneen kerroksen ylä- ja alaraja sekä maan pinnan ja ilman välinen raja. Tasealueen rajausta on esimerkinomaisesti näytetty kuvassa 22. (Kujala, 1994) (Nurmikolu & Kolisoja, 2002)



Kuva 22. Tasealueen rajaaminen kahdella eri tavalla (Kujala, 1994)

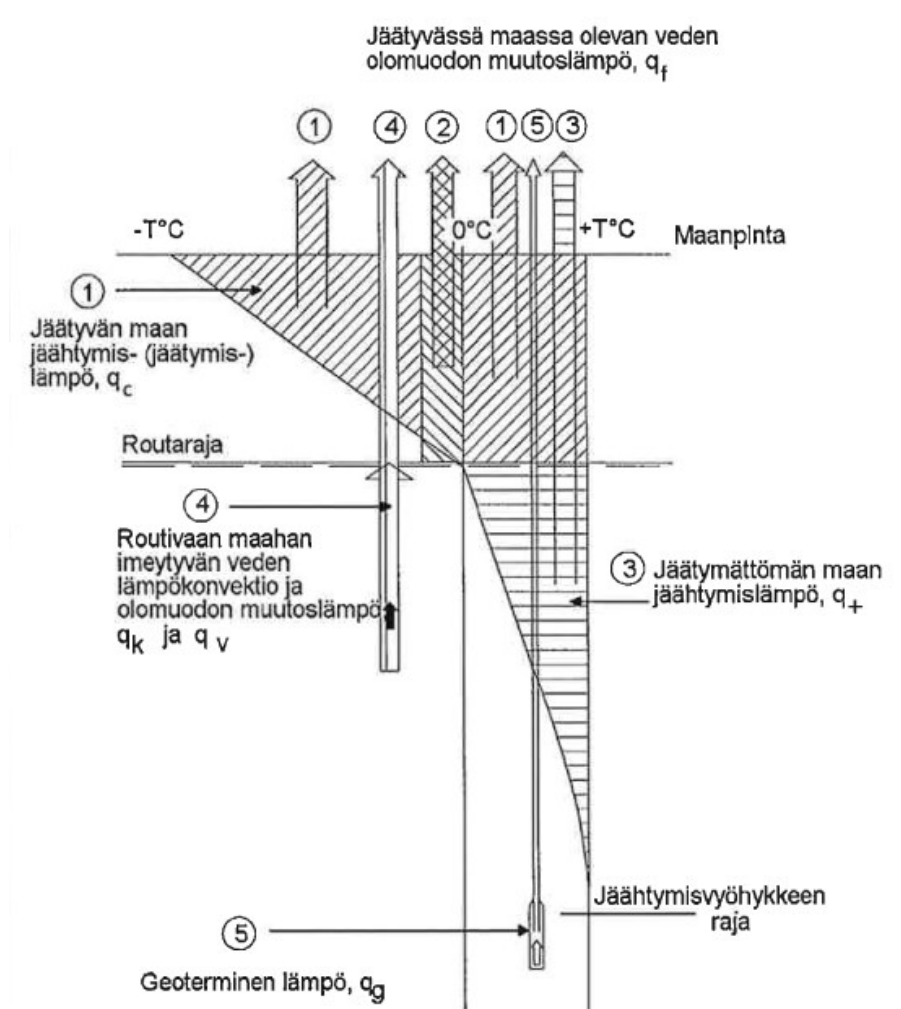
Yhtälöstä 5 voidaan johtaa maan jäätymisprosessia kuvaava lämpötaseyhtälö, jossa jäätymisprosessin aikana tapahtuva lämpövirtaus on jaettu osakomponentteihin:

$$Q_- = Q_+ + Q_v + Q_g + Q_f + Q_c \frac{Wh}{m^2} \quad (6)$$

jossa

- Q_- on tasealueelta ylöspäin poistuva lämpö
- Q_+ tasealueelle virtaava jäätyvä maan jäähtymislämpö
- Q_v routivaan maahan imeytyvän veden jäähtymislämpö
- Q_g tasealueelle virtaava geoterminen lämpö
- Q_f tasealueella vapautuva jäätyvän maan sisältämän veden jäähtymislämpö
- Q_c tasealueella vapautuva jäätyvän maan ja sen sisältämän veden jäähtymislämpö

Tämä yhtälö muodostaa perustan roudan syvyyden laskentamenetelmille. Yhtälössä ei huomioida routivaan maahan imeytyvän veden sisältämän lämmön tai huokosilman lämpökonvektion vaikutusta niiden vähäisen merkityksen vuoksi. (Nurmikolu & Kolisoja, 2002) Lämpövirran jakautuminen osakomponentteihin on havainnollistettu kuvassa 23.

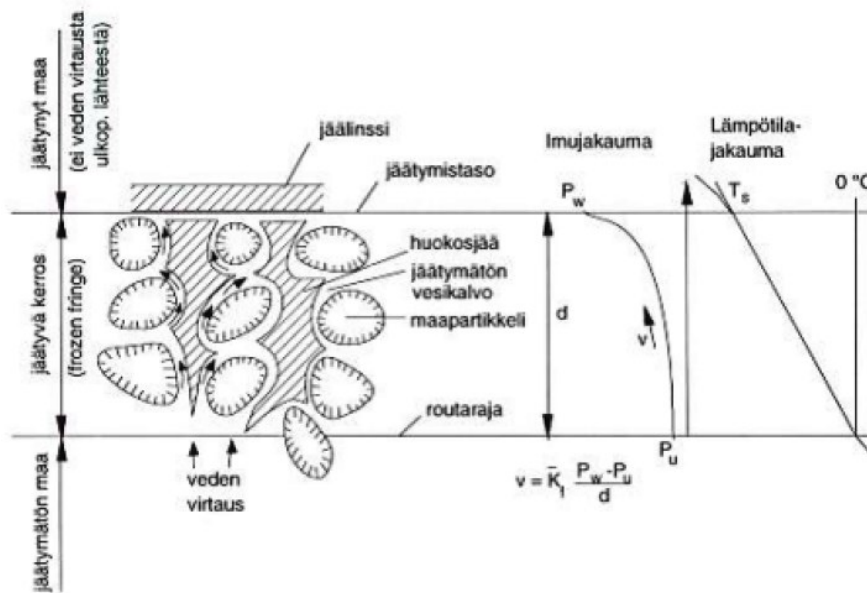


Kuva 23. Lämpömäärän osakomponentit jäätymisprosessin aikana tasealueella. (Ehrola, 1996)

4.1.2 Routiminen

Routimisen edellytyksenä on, että maassa oleva vesi jäätyy ja jää täyttää maan huokos-tilan. Lämpötilan laskiessa 0 °C:een alapuolelle, alkaa osa maassa olevasta vedestä jäätyä ja muodostaa jäätä. Jäätyminen riippuu voimakkaasti lämpötilasta, eikä koko vesimäärä jäädy kerralla samassa lämpötilassa. Koska osa vedestä on maassa sitoutuneena adsorbtiovetenä, siinä ei välttämättä tapahdu olomuodon muutosta eikä lämmön vapautumista. Jäätymätön vesi toimii vettä johtavana kerroksena, joka muodostaa edellytyksen routimiselle. Toisin sanoen se johtaa vettä kasvavaan jäälinssiin. Puhutaankin

osittain jäätyneestä maakerroksesta (frozen fringe), joka säätelee tehokkaasti veden virtausta jäälinssiin (kuva 24). Routivien maalajien on todettu olevan merkittävästi vettä johtavia 0 °C:een alapuolisissa lämpötiloissa. Karkearakeisissa maalajeissa taas ei ole sellaista vettä, jonka vapaa energia poikkeaisi merkittävästi vapaan huokosveden vapaasta energiasta. Siksi tällaiseen maahan ei synny routimista aiheuttavaa veden virtausta jäätyvään kerrokseen, eli maa ei roudi. (Kujala, 1994)



Kuva 24. Veden kulkeutuminen jäälinssiin. (Kujala, 1994)

4.2 Roudan syvyyden laskennallinen arviointi

4.2.1 Lähtöarvojen määrittäminen

Roudan tunkeutumissyvyyteen maassa tai tierakenteessa vaikuttavat lukuisat rakennetai maamateriaalin sekä rakenteen ominaisuudet. Rakenteen kannalta merkityksellisiä ominaisuuksia ovat mm. rakenteen poikkileikkaus, kerrospaksuudet ja kuivatus. Materiaaliteknisistä ominaisuuksista voidaan mainita mm. kuivairtoteiheys, huokoisuus, tiiviysaste ja kosteuspitoisuus. Ilmasto-olosuhteilla on niilläkin ensisijainen rooli roudan tunkeutumisessa. Tärkeimpänä voidaan todeta olevan pakkasmäärä ilmassa sekä vuotuinen keskilämpötila. Seuraavaksi esitellään tämän työn kannalta merkityksellisimpiä roudan syvyyteen vaikuttavia materiaalien lämpötekniisiä ominaisuuksia. Niitä tarvitaan lähtötietoina roudan syvyyden laskennallisessa tarkastelussa.

Jäätymislämpö

Aineen olomuodon muutoksessa vapautuu tai sitoutuu lämpöenergiaa. Jäätymislämmöllä tarkoitetaan aineen jäätyksen yhteydessä vapautuvaa lämpömäärää tilavuus- tai

massayksikköä kohden. Jäätyvän maan jäätyislämmön voidaan olettaa muodostuvan pelkästään sen sisältämän veden jäätymisessä vapautuvasta lämmöstä. Tällöin tilavuusyksikköä kohden vapautuva lämpö voidaan laskea kaavalla:

$$q_f = w \cdot \rho_d \cdot L_w \quad (7)$$

jossa

q_f on maaperän jäätyislämpö (Wh/m³)

w maan vesipitoisuus paino-osina

ρ_d maan kuivairtitiheys (kg/m³)

L_w veden jäätyislämpö (≈ 93 Wh/kg)

Kaavan oletuksena on kaiken maan sisältämän veden jäätyminen 0 °C:ssa. Jäätymättömän veden osuuteen vaikuttaa maalajiin raekoko. Hienorakeisissa maissa osuus voi olla yli 30 %. Karkearakeisissa maissa, kuten tierakennemateriaaleissa, jäätymättömän veden osuus pienenee laskelmien kannalta merkityksettömäksi.

Lämpökapasiteetti

Ominaislämpökapasiteetti tarkoittaa materiaaliin sitoutuvan tai siitä vapautuvan lämpöenergian sekä lämpötilaeron ja massan suhdetta. Tilavuuslämpökapasiteetista puhuttaessa massan tilalla on tilavuus. Maan tilavuuslämpökapasiteetti muodostuu maa-aineksen, huokosveden ja -jään sekä huokosilman lämpökapasiteettien summana. Maamateriaalin lämpökapasiteettia laskettaessa huokosilman osuus voidaan jättää huomiotta. Kun tiedetään veden ja jään ominaislämpökapasiteetit $c_w = 1,16$ Wh/kgK ja $c_j = 0,58$ Wh/kgK, voidaan sulan ja jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteeteille johtaa yhtälöt:

$$C_u = \frac{\rho_d}{\rho_w} \left(0,18 + 1,0 \frac{w}{100} \right) C_w \quad (8)$$

$$C_f = \frac{\rho_d}{\rho_w} \left(0,18 + 0,5 \frac{w}{100} \right) C_w \quad (9)$$

joissa

C_u on sulan maan tilavuuslämpökapasiteetti (Wh/m³K)

C_f jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetti (Wh/m³K)

ρ_d maan kuivairtitiheys (kg/m³)

ρ_w veden tiheys (kg/m³)

w maan vesipitoisuus (paino-%)

C_w veden tilavuuslämpökapasiteetti (≈ 1163 Wh/m³K)

Lämmönjohtavuus

Kaavassa 4 esitetyn Fourierin yhtälön mukaisesti lämmönjohtavuudella tarkoitetaan lämpövuon ja lämpötilagradientin suhdetta. Se kuvaa aineen kykyä johtaa lämpöä, joka riippuu monista tekijöistä, kuten lämpötilasta, kosteuspitoisuudesta, tiivyydestä ja raekoostumuksesta. Tierakenteen lämmönjohtavuus riippuu pääasiassa käytetyistä materiaaleista. Rakenteessa olevan materiaalin lämmönjohtavuuteen vaikuttaa eniten kosteuspitoisuus. Varsinkin sulan ja jäätyneen rakenteen lämmönjohtavuudet eroavat toisistaan, sillä jään lämmönjohtavuus (2,1 W/Km) on huomattavasti suurempi kuin veden (0,60 W/Km). Tiiviyssasteen kasvaessa maamateriaalin lämmönjohtavuuskin kasvaa, sillä alhaisen lämmönjohtavuuden (0,026 W/Km) omaavan huokosilman osuus pienenee. Samoin vaikuttaa materiaalissa olevien yksittäisten rakeiden koon suureneminen, kiven lämmönjohtavuuden ollessa suuri suhteessa maan keskimääräiseen lämmönjohtavuuteen. Myös maamateriaalin erilaisten mineraalikoostumusten välillä on eroa lämmönjohtavuudessa. Maan lämmönjohtavuutta voidaan arvioida erikseen hieno- ja karkearakeiselle maalle Kerstenin (1949) esittämällä yhtälöillä (Nurmikolu & Kolisoja, 2002):

$$\lambda_f = 0,0014 \cdot 10^{1,4\rho_d} + 0,012 \cdot 10^{0,50\rho_d} \cdot w \quad (10)$$

$$\lambda_u = (0,13 \cdot \log_{10} w - 0,029) \cdot 10^{0,62\rho_d} \quad (11)$$

joissa

λ_f on jäätyneen hienorakeisen maan lämmönjohtavuus (W/Km)

λ_u sulan hienorakeisen maan lämmönjohtavuus (W/Km)

ρ_d maan kuivairtitiheys (t/m^3)

w maan vesipitoisuus (paino-%)

$$\lambda_f = 0,0011 \cdot 10^{0,81\rho_d} + 0,0046 \cdot 10^{0,91\rho_d} \cdot w \quad (12)$$

$$\lambda_u = (0,10 \cdot \log_{10} w + 0,058) \cdot 10^{0,62\rho_d} \quad (13)$$

joissa

λ_f on jäätyneen karkearakeisen maan lämmönjohtavuus (W/Km)

λ_u sulan karkearakeisen maan lämmönjohtavuus (W/Km)

Lämmönjohtavuuden määrittämiseen voidaan käyttää myös laboratorio- tai kenttämittauksia. Laboratoriomääritys voidaan tehdä, joko stationääritilassa lämpötilaerojen aiheuttaman lämpövirran avulla tai epästationääritilassa lämmönjohtosondin avulla. Lähellä 0-astetta olevan jäätyneen maamateriaalin tutkiminen on erityisen ongelmallista, sillä jään sulaessa sitoutuu lämpöä olomuodonmuutoksessa. Stationääritilan mittaukset

soveltuvat lähinnä kuiville ja vähähuokoisille maamateriaaleille mittauksessa tapahtuvan kosteuden siirtymisen vuoksi. (Kujala, 1994)

Vesipitoisuus

Rakennemateriaalin vesipitoisuus vaikuttaa ennen kaikkea rakenteen jäätymistavustukseen ja lämmönjohtavuuteen. Vesipitoisuuden kasvu aiheuttaa veden jäätyislämmön kasvua rakenteessa ja siten lisää jäätymistavustusta. Vesipitoisuuden kasvaessa myös lämmönjohtavuus kasvaa, jolloin jäätyneestä maasta vapautuneen lämmön pois virtaaminen helpottuu. Toisaalta routarajan alapuolelta sulasta maasta virtaava jäähtymislämpö lisääntyy lämmönjohtavuuden kasvaessa ja toimii näin roudan tunkeutumissyvyyttä alentavasti. Toisin sanoen vesipitoisuuden kasvu vaikuttaa sulan maan lämmönjohtavuutta lisäävästi ja siten pienentää roudan tunkeutumista, kun taas jäätyneen maan osalta tilanne on päinvastainen. Vesipitoisuuteen vaikuttaa ennen kaikkea materiaalin rakeisuus. Hienoaineksen osuuden kasvu toimii veden pidätyskykyä lisäävästi. Myös kuivatusolosuhteilla ja pohjaveden pinnan etäisyydellä rakenteesta on merkitystä. Laskelmissa käytettävän vesipitoisuuden mitoitusravon määrittäminen hankaloittaa sen suuri vaihtelu sääolojen ja vuodenaikojen mukaan.

Lämpötilagradientti

Lämpötilagradientti kuvaa lämpötilaeron ja etäisyyden välistä suhdetta. Tässä tapauksessa lämpötilan muutosta syvyyden suhteen. Fourierin yhtälön mukaisesti lämpövirran suuruus määräytyy lämpötilagradientista. Routarajan yläpuolella gradientin arvoon vaikuttaa lähinnä ilman lämpötila ja roudan syvyys. Routarajan alapuolella vallitseva lämpötilagradientti määrää sulasta maasta vapautuvan jäähtymislämmön aiheuttaman lämpövirran suuruuden routarajaa kohti. Mitä suurempi lämpötila maahan on kesäkaudella varastoitunut, sitä enemmän lämpötila kasvaa maassa syvyyden suhteen ja siten myös lämpövirran määrä maasta routarajalle. Routarajan alapuolinen lämpötilagradientti on suurimmillaan pakkaskauden alussa pienentyen pakkaskauden edetessä. Roudan syvyyden kasvu hidastuu sitä enemmän mitä syvemmälle maahan routa on edennyt. Maan pinnan lämpötilan pysyessä samana lämpötilagradientti jäätyvässä maassa pienenee, joka johtaa pienempään lämpövirtaan pois maasta ja siten routaantumisen hidastumiseen. (Nurmikolu & Kolisoja, 2002)

4.2.2 Laskentamallit

Roudan syvyyden arvioimiseksi on kehitetty useita empiirisiä laskentakaavoja. Empiiristen menetelmien huonona puolena voidaan pitää sitä, että niiden tulokset ovat voimakkaasti sidoksissa olosuhteisiin, joissa ne on määritetty. Siksi tällaisen menetelmän käytössä tulee huomioida, ettei sitä voi pitää yleispätevänä kaikkialla.

Roudan syvyyttä voidaan arvioida myös analyyttisillä ja numeerisilla menetelmillä. Numeeriset menetelmät perustuvat lämpövirran osittaisdifferentiaaliyhtälön ratkaisemiseen jollain likimääräismenetelmällä, kuten elementti- tai differenssimenetelmällä. Numeerisen menetelmän käyttöön liittyy yleensä jokin laskentaohjelmisto. (Kujala, 1994) Seuraavaksi esitellään joitain yleisesti käytössä olevia analyyttisiä roudan syvyyden laskentamenetelmiä, joita voidaan käyttää käsinlaskennassa.

Stefanin menetelmä

Eräs yksinkertaisimmista laskentamalleista on Stefanin (1890) menetelmä. Menetelmä olettaa, että maasta routaantuneen kerroksen läpi poistuva lämpö koostuu ainoastaan maaperän jäätyislämmöstä, jolloin kaavan 6 lämpötaseyhtälö supistuu muotoon:

$$dQ_- = dQ_f \quad (14)$$

jossa

Q_- on tasealueelta ylöspäin poistuva lämpö (Wh/m²)

Q_f tasealueella vapautuva maaperän jäätyislämpö (Wh/m²)

Kun differentiaaliyhtälöstä ratkaistaan roudan maksimisyvyys koko pakkaskauden ajalla, saadaan:

$$z_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot F}{q_f}} \quad (15)$$

jossa

z_f on maksimi roudansyvyys (m)

λ_f jäätyneen maan lämmönjohtavuus (Wh/mK)

F pakkasmäärä (Kh)

q_f maaperän jäätyislämpö, Wh/m³

Koska sulasta maasta routarajalle virtaavaa lämpöä ei mallissa ole huomioitu, saadaan tällä menetelmällä usein liian suuria roudan syvyyden arvoja.

Beskowin menetelmä

Edellä mainittua Stefanin menetelmää on kehitetty edelleen huomioimalla maasta poistuvana lämpönä maan jäätymislämmön lisäksi sulana pysyvän routarajan alapuolisen maan jäätyislämpö sekä tasealueelle virtaava geoterminen lämpö. Tällöin lämpöta-
seyhtälö saa muodon:

$$dQ_- = dQ_f + dQ_+ + dQ_g \text{ (Wh/m}^2\text{)} \quad (16)$$

jossa

Q_- on	tasealueelta ylöspäin poistuva lämpö
Q_f	tasealueella vapautuva maaperän jäätymislämpö
Q_+	tasealueelle virtaava sulan maan jäätyislämpö routarajan alapuolella
Q_g	tasealueelle virtaava geoterminen lämpö

Yhtälöstä voidaan ratkaista roudan syvyys:

$$z_f = \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_f \cdot F_{red}}{q_f}} \quad (17)$$

jossa

z_f on	maksimi roudansyvyys (m)
λ_f	jäätyneen maan lämmönjohtavuus (Wh/mK)
F_{red}	redusoitu pakkasmäärä (Kh)
q_f	maaperän jäätymislämpö, Wh/m ³

Yhtälö muistuttaa Stefanin kaavaa. Sulana pysyvän maan jäätyislämmöllä redusoitu pakkasmäärä voidaan laskea, kun tiedetään routarajalle sulasta maasta virtaavasta lämmöstä aiheutuva jäätymisvastus:

$$E = S \cdot G_+ \cdot t \cdot \lambda_u \cdot \frac{z_f}{\lambda_f} \Rightarrow F_{red} = F - E \quad (18)$$

jossa

S on	pakkaskauden aikaisen roudan syvyyden ja lämpötilagradientin vaihtelun huomioiva kerroin, jolle yleensä käytetään arvoa 0,7
G_+	lämpötilagradientti routarajan alapuolella (°C/m)
t	pakkaskauden kesto (h)
λ_u	sulan maan lämmönjohtavuus (Wh/mK)

Kaavan käyttö vaatii iterointia, sillä roudan syvyyden arvo sisältyy neliöjuurilausekkeeseen redusoidun pakkassumman kautta. Yhtälössä ei huomioida jäätyvän maan jäähtymislämpöä, jonka voidaan olettaa olevan merkityksetön. Pakkassumman redusoinnin ansiosta Beskowin kaava antaa pienempiä roudan syvyyden arvoja Stefanin menetelmään verrattuna käytettäessä muuten samoja parametreja. (Nurmikolu & Kolisoja, 2002)

Roudan syvyyden laskenta kerroksellisessa rakenteessa

Kerroksellisessa rakenteessa eri kerrosten lämmönjohtavuudet, lämpösisällöt ja kerrospaksuudet vaihtelevat, jolloin yllä esitetyillä kaavoilla ei voida suoraan arvioida roudan syvyyttä. Roudan syvyyden laskenta kerroksellisessa rakenteessa perustuu osittaispakkasmäärämenetelmään. Siinä ideana on määrittää pakkaskauden pakkasmäärän perusteella kokonaan jäätyvien kerrosten lukumäärä ja niiden jäätymisestä ”yli” jäävän pakkasmäärän perusteella laskea roudan syvyys alimmassa osittain jäätyvässä kerroksessa. Kunkin kerroksen jäätymiseen tarvittava pakkasmäärä saadaan kaavasta:

$$F_k = q_k \cdot d_k \cdot \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_k}{\lambda_k} \right) \quad (19)$$

jossa

q_k on	jäätyvän kerroksen k lämpösisältö, Wh/m^3
F_k	kerroksen jäätymiseen tarvittava pakkasmäärä (h°C)
k	kerroksen numero
d	kerroksen paksuus (m)

Alimman jäätyvän kerroksen jäätymiseen jäljelle jäävä pakkasmäärä saadaan vähentämällä kokonaispakkasmäärästä kaikkien kokonaan jäätyvien kerrosten jäätymiseen vaadittava pakkasmäärä (Ehrola, 1996):

$$F_n = F - \sum_{k=1}^{n-1} F_k \quad (20)$$

Käytettäessä yllä esitettyä Beskowin menetelmää kerroksellisessa rakenteessa, laskeaan roudan syvyys kaavalla 17. Alimman kerroksen jäätymiseen käytettävä pakkasmäärä saadaan kaavasta 20, jossa termi F korvataan redusoidulla pakkasmäärällä:

$$F_{red} = F - S \cdot G_+ \cdot t \cdot \lambda_u \cdot \sum_{k=1}^n \frac{d_k}{\lambda_k} \quad (21)$$

Alimman jäätyvän kerroksen roudan syvyyden ratkaisu vaatii iterointia. (Nurmikolu & Kolisoja, 2002)

4.3 Routanousun laskennallinen arviointi

Routanousun suuruutta voidaan arvioida mm. segregatiopotentialiteorian avulla. Sen mukaan jäälinssin muodostuminen jäätymisvyöhykkeen yläpuolella alkaa jäätymisvyöhykkeen yläosan saavuttaessa ns. segregatiolämpötilan. Veden virtaus jäätymisvyöhykkeessä tapahtuu lämpötilagradienttia vastaavan vedenpainegradientin myötävaikutuksesta. Veden virtaus pysähtyy jääkerrokseen, jonka takana veden virtaus on olematonta. Jäälinssin kasvu loppuu, kun jäätymisvyöhykkeen vedenläpäisevyys lähestyy nollaa. (Ehrola, 1996)

Segregatiopotentialiteorian mukaan veden virtausnopeus jäälinssin kasvuprosessin aikana on suoraan verrannollinen jäätymisvyöhykkeen lämpötilagradienttiin:

$$v(t) = SP_0(t) \cdot G_-(t) \quad (22)$$

jossa

$v(t)$ on	veden virtausnopeus muodostuvaan jäälinssiin (m/h)
$SP_0(t)$	segregatiopotentialiaali (m^2/Kh)
$G_-(t)$	lämpötilagradientti jäätyneessä kerroksessa routarajalla ($^{\circ}C/m$)

Routanousu voidaan laskea, kun tiedetään segregatiopotentialiaali (routimiskerroin) ja jäätymisvyöhykkeen lämpötilagradientti. Lisäksi, kun huomioidaan maassa olevan huokosveden jäätymisestä aiheutuva n. 9 % tilavuudenkasvu, saadaan routanousulle kaava:

$$h_s = 1,09 \cdot t \cdot SP_{\sigma} \cdot G_- \quad (23)$$

jossa

h_s on	routarintaman ulkopuolisesta lähteestä imeytyneen veden aiheuttama routanousu (m)
SP_{σ}	todellista kuormitusta vastaava segregatiopotentialiaali (m^2/Kh)
t	tarkasteltava ajanjakso (h)
G_-	lämpötilagradientti jäätyneessä kerroksessa routarajalla ($^{\circ}C/m$)

Segregatiopotentialiaali voidaan määrittää likimääräisesti laboratoriossa routanousukokeen perusteella, arvioida maalajiominaisuuksien mukaan tai määrittää kenttähavainnoista. Takaisinlaskenta havainnoista voidaan tehdä, jos on käytettävissä mitattu roudan

syvyys, routanousu, pakkasmäärä sekä tiedetään pohjamaan ominaisuudet. Koska segregatiopotentiali riippuu yläpuolisesta kuormituksesta ja pohjavedenpinnan asemasta, mittausten perusteella määritettyä arvoa ei voida yleistää koskemaan tiettyä maalajia. Jännitystilariippuvuus saadaan laskettua:

$$SP_{\sigma} = SP_0 \cdot e^{-a \cdot q} \quad (24)$$

jossa

SP_{σ} on	segregatiopotentiali kuormalla σ (m^2/Kh)
SP_0	segregatiopotentiali nollakuormalla (m^2/Kh)
e	neperin luku
a	kerroin (MPa^{-1})
q	kokonaiskuorma (MPa)

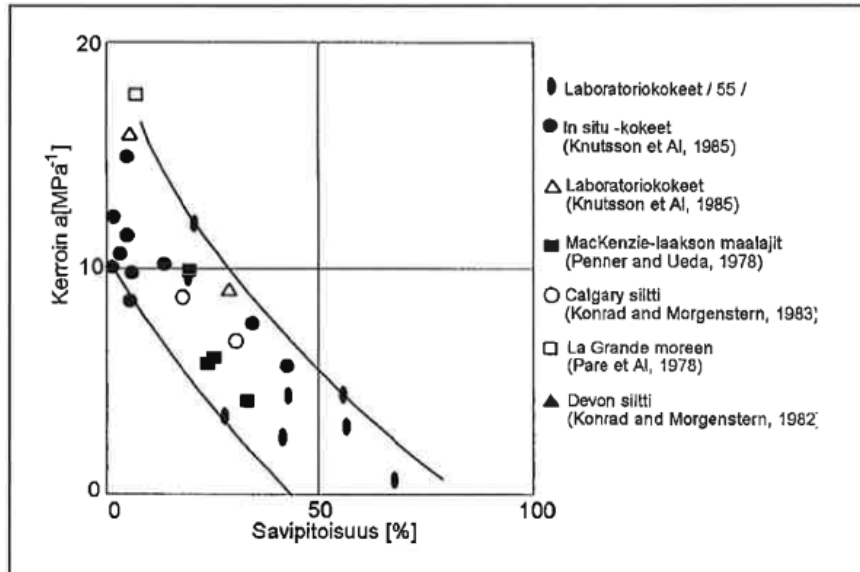
Kerroin a riippuu maan savipitoisuudesta kuvan 25 mukaisesti. Kertoimen arvo vaihtelee 0–15 välillä savipitoisuuden mukaan.

Maassa olevan huokosveden jäätymisestä aiheutuvan in-situ-routanousun suuruus voidaan laskea, kun jäätyvä maaperä on veden kyllästämä (Ehrola, 1996) (Nurmikolu & Kolisoja, 2002):

$$h_0 = 0,09 \cdot \frac{w}{100} \cdot \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \cdot z \quad (25)$$

jossa

h_0 on	huokosveden in-situ jäätymisestä aiheutuva routanousu (m)
w	maan vesipitoisuus (p-%)
γ_d	maan kuivatilavuuspaino (kN/m^3)
γ_w	veden tilavuuspaino (kN/m^3)
z	jäätyvän kerroksen paksuus (m)



Kuva 25. Kuormitustekijän a riippuvuus savipitoisuudesta. (Jessberger & Jagow) (Ehrola, 1996)

4.4 Tierakenteen routamitoitus

Tierakenteen suunnittelun yhteydessä tehdään routamitoitus, kun mitoitettava tieosuus sijaitsee routivalla alusrakenteella. Routamitoituksella pyritään rajoittamaan haitallisen suurta routanousua. Routamitoituksella ei yleensä kuitenkaan tavoitella täysin routimattomaa ratkaisua. Routamitoitus on ohjeistettu Väyläviraston julkaisussa Tierakenteen suunnittelu (Väylävirasto, 2018).

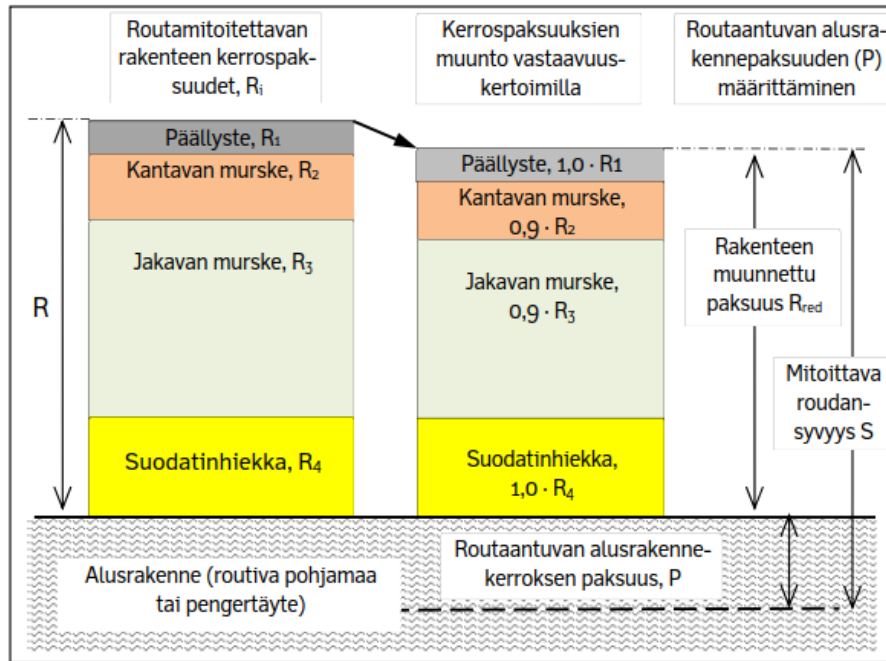
Tierakenteen routamitoituksen lähtökohtana on mitoituspaikkakunnan vallitseviin ilmasto-olosuhteisiin perustuva mitoittava roudansyvyys. Aiemmissä kappaleissa esitetyjä roudan syvyyden laskentamenetelmiä ei käytetä maanteiden routamitoituksessa. Routaantuvan alusrakenteen paksuus saadaan laskettua, kun mitoittavasta roudansyvyydestä vähennetään päällysrakenteen laskennallinen paksuus kuvan 26 periaatteen mukaisesti. Lähtökohtana päällysrakennepaksuudelle on kuormituskestävyyksimitoituksen tuloksen mukainen rakenne. Päällysrakennekerrokset muunnetaan laskennalliseen paksuuteen redusoimalla todelliset kerrospaksuudet eristävyydeltään hiekkaa vastaaviksi:

$$R_{red} = (a_1 \cdot R_1) + (a_2 \cdot R_2) + \dots + (a_n \cdot R_n) \quad (26)$$

jossa

a_i on kerroksen i materiaalin vastaavuus eristävyysden kannalta

R_i rakennekerroksen i paksuus (mm)



Kuva 26. Routaantuvan alusrakennekerroksen paksuuden määrittäminen. (Väylävirasto, 2018)

Erilaisia materiaalien vastaavuuskertoimia on esitetty taulukossa 2.

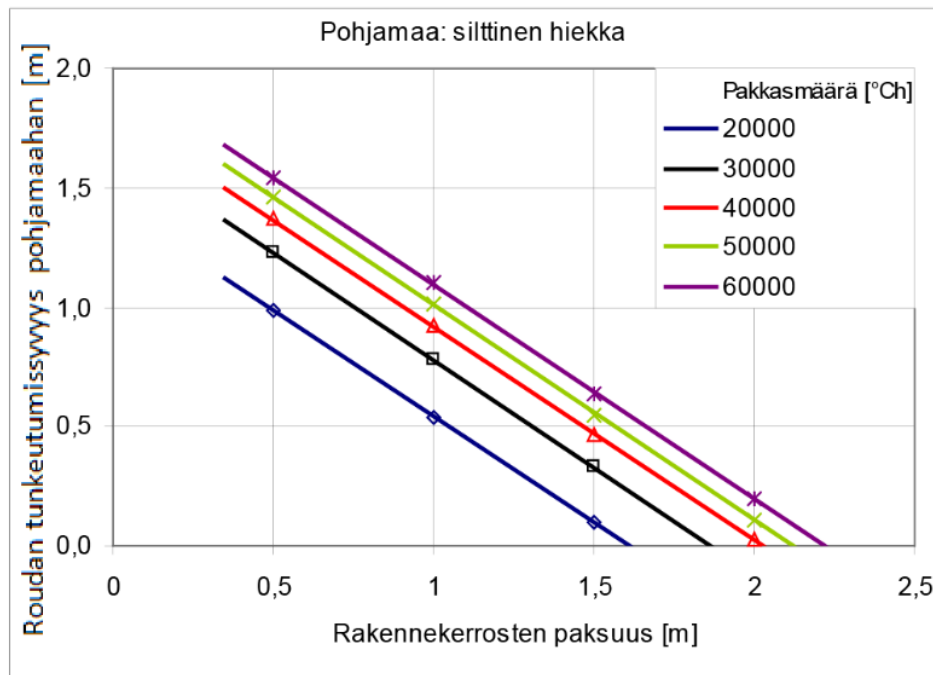
Taulukko 2. Materiaalin vastaavuus eristävyden kannalta (a) (Väylävirasto, 2018)

Kerrosmateriaali	Materiaalin vastaavuus eristävyden kannalta, a _i
Suodatinkerroksen hiekka	1,0
Bitumilla sidotut päällysteet	1,0
Päällysrakenteen stabiloidut kerrokset	1,0
Sora, jakavaan kerrokseen soveltuva sorainen hiekka (srHk), murske, suurirakeinen murske, betonimurske	0,9
Louhe (Ø = 300 mm tai suurempi)	0,8
Kuonamurske, kappalekuona	1,6
Kuonahiekka, masuunihiekka	1,7
Kevytsora (KS) 0,7 m syvyydessä, kuivairtoisuus rakenteessa enintään 400 kg/m ³ ja KS:n alla on 0,15 m kuivatuskerros	4
Vaahtolastimurske (VaM) 0,7 m syvyydessä, kuivairtoisuus rakenteessa enintään 400 kg/m ³ ja VaM:n alla on 0,15 m kuivatuskerros	4
Suulakepuristettu polystyreeni (XPS) 0,7 m syvyydessä, kun XPS:n alla on 0,15 m kuivatuskerros	20
Paisutettu polystyreeni (EPS) 0,7 m syvyydessä, kun EPS:n alla on 0,15 m kuivatuskerros	15

Routaantuvan alusrakennepaksuuden perusteella voidaan määrittää tierakenteen laskennallinen routanousu, kun tiedetään lisäksi alusrakenteen routaturpoama (%). Sallit-

tuun laskennalliseen routanousuun vaikuttaa mm. tien vaatimusluokka, pohjamaan tasalaatuisuus ja tierakenteen vaurioherkkyys. Jos laskennallinen routanousu ylittää sallitun, kasvatetaan tierakenteen kerrospaksuuksia vähentämään alusrakenteeseen tunkeutuvan roudan syvyyttä. (Väylävirasto, 2018)

Katurakenteiden suunnittelun routamitoitus Katu2020-ohjeen mukaan eroaa tierakenteiden routamitoituksesta. Katurakenteen routamitoituksen lähtökohta on mitoituspakkasmäärän valinta kerran 5:ssä (F5) tai kerran 10:ssä (F10) vuodessa toistuvan pakkasmäärän mukaan. Routanousu lasketaan segregatiopotentiaalin ja routivan kerroksen lämpötilagradientin avulla (kaava 23). Ohjeen mukaan roudan syvyyttä pohjamaassa voidaan arvioida eri maalajeille laadittujen mitoituskäyrästäjien avulla (esim. kuva 27). Tällaisten mitoituskäyrästäjien käytössä tulee huomioida maaperäolosuhteet, joiden perusteella käyrät on laadittu. Muutoin voitaneen käyttää mm. tässä työssä esitettyjä laskentamalleja. Katurakenteen suurimman sallitun routanousun laskennassa voidaan käyttää mitoitusohjelmia, jotka huomioivat erilaiset rakenteen dimensiot, materiaaliominaisuudet sekä ympäristö- ja ilmasto-olosuhteet. (Suomen kuntatekniikan yhdistys, 2020)



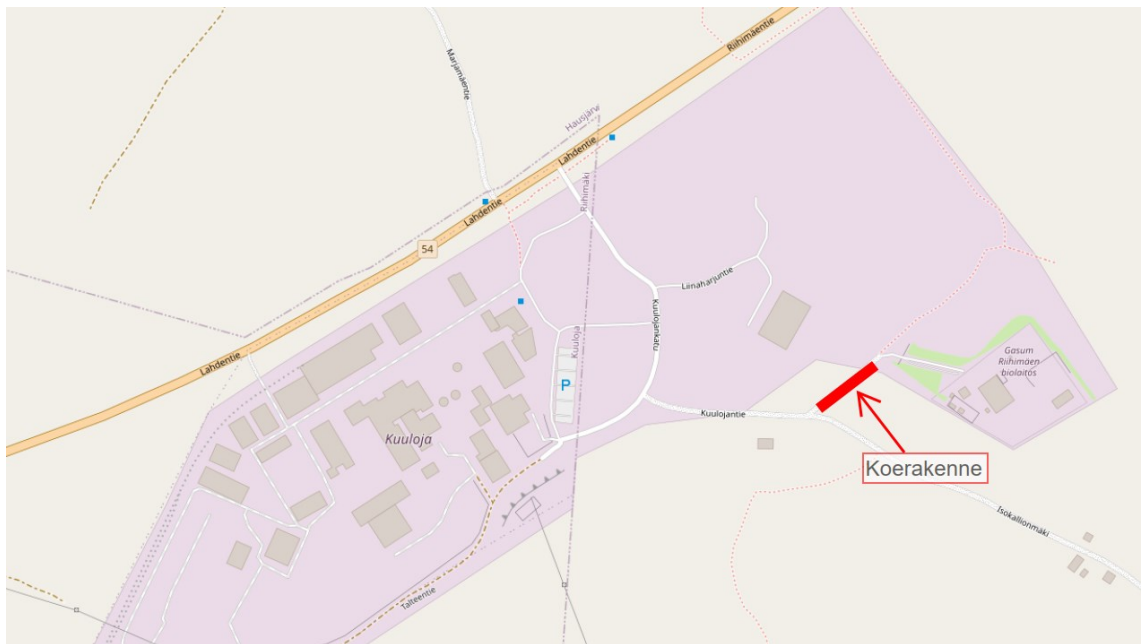
Kuva 27. Roudan tunkeutumissyvyys pohjamaahan rakennekerrosten paksuuden funktiona silttisessä hiekassa. (Suomen kuntatekniikan yhdistys, 2020)

5. KOERAKENNEKOHTEET

5.1 Koerakenteiden kuvaus

5.1.1 Kuulojantie

Tässä työssä ensisijaisesti tutkittu koerakennekohde sijaitsee Hausjärven kunnan alueella Fortum Waste Solutions Oy:n Riihimäen voimalaitos- ja käsittelykeskusalueen välittömässä läheisyydessä (kuva 28). Matkaa Riihimäen keskustaan koekohteelta on noin 7 km kantatie 54 kautta. Koekohte on rakennettu osaksi Kuulojantien katurakennetta, joka on yleisen liikenteen käytössä. Kuulojantien kautta kulkee mm. Gasum Oy:n bio-kaasulaitoksen raskas liikenne. Fortumin Riihimäen laitoksella käsitellään vaarallisia jätteitä, yhdyskuntajätettä sekä muita jättejakeita. Polttolaitos tuottaa myös kaukolämpöä ja sähköä Riihimäen ja Hyvinkään alueille. (Fortum, 2023)



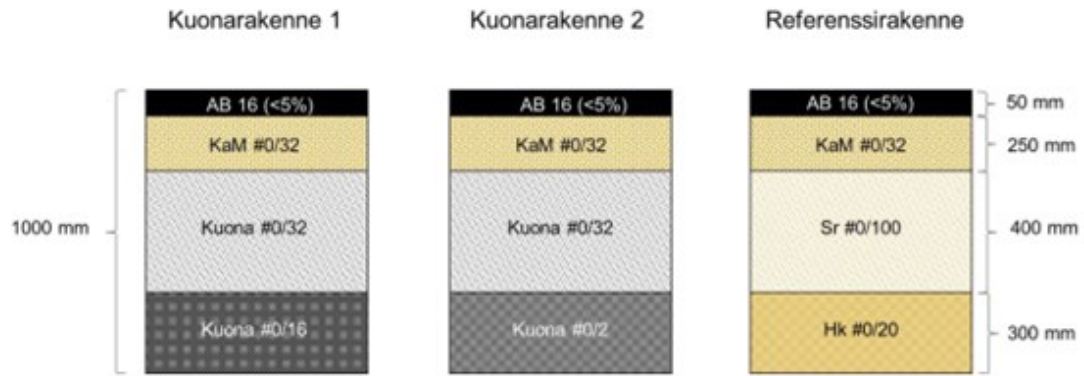
Kuva 28. Kuulojantien koerakenteen sijainti. (Open Street Map, 2024)

Koerakenne toteutettiin syksyllä 2020 ja sillä on tarkoitus selvittää Fortumin Riihimäen jätteenpolttolaitoksella syntyvän käsitellyn kuonan ominaisuuksia ja hyödyntämistä maarakenteissa, kuten tierakenteiden rakennekerroksissa. Koerakenteen pitkäaikaisseurannalla pyritään myös saamaan tietoa rakenteen käyttäytymisestä Väylävirastolta mahdollisesti haettavaa uusiomateriaalin materiaalihyväksyntää varten.



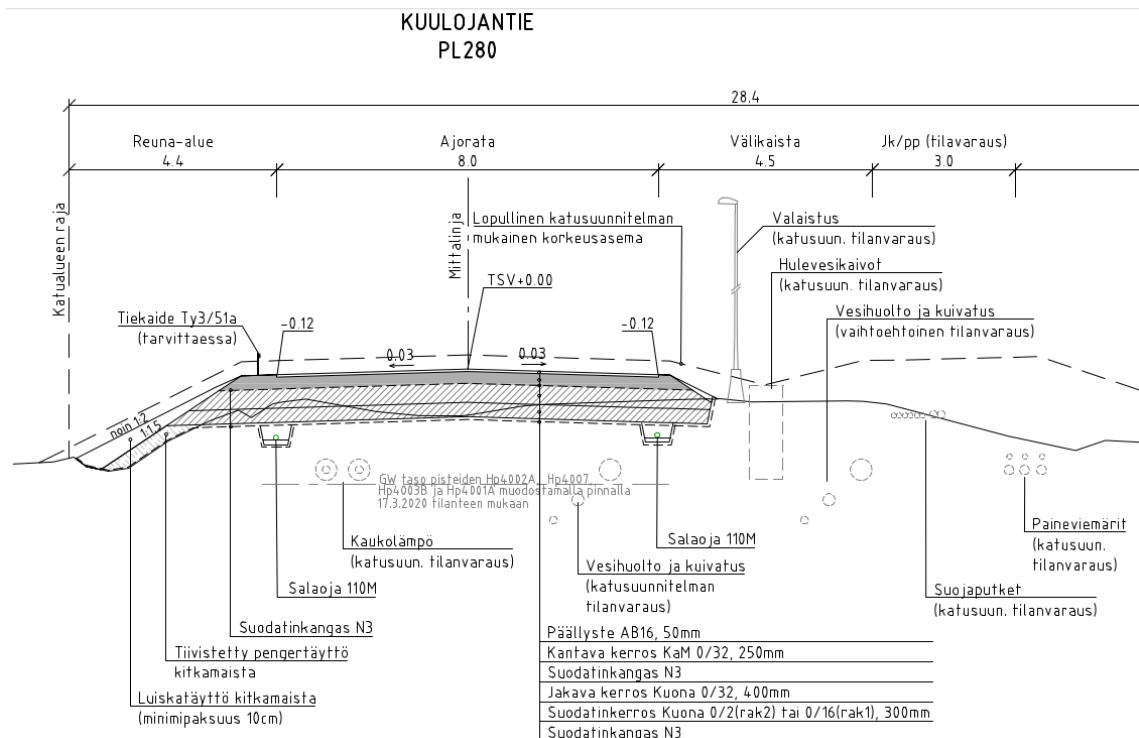
Kuva 29. Koerakenne Kuulojantiellä alkaa asfaltoidusta osuudesta.

Koerakenne on noin 100 m pitkä asfaltoitu osuus Kuulojantietä. Muutoin Kuulojantie on sorapintainen. Koerakenne on jaettu tien pituussuunnassa neljään lohkoon käytettyjen rakennekerrosten tyyppiratkaisuiden mukaan. Koerakenteen päihin on sijoitettu kokonaan luonnonkiviaineksista toteutetut referenssiosuudet ja niiden välissä ovat rakenteet, joissa kuonamateriaaleja on käytetty jakavassa ja suodatinkerroksessa. Rakennetyypit on esitetty kuvassa 30. Kaikissa rakennetyypeissä kerrospaksuudet ja siten rakenteiden kokonaispaksuudet ovat yhtenevät. Päälyste sekä kantava kerros ovat samanlaiset kaikissa rakenteissa. Molemmissa kuonarakenteissa jakavassa kerroksessa on käytetty samaa 0/32 mm lajitetta. Suodatinkerros on kaikissa rakenteissa erotettu pohjamaasta suodatinkankaalla. Rakenteet on mitoitettu InfraRYL:n mukaisen katuluokan 6 mukaan, jolloin tavoitekantavuus päälysteen päältä on 175 MPa. Jakavan kerroksen kuonan mitoitusmoduulina on käytetty 120 MPa ja suodatinkerroksen kuonan 70 MPa. Pohjamaa vaihtelee koerakenteen mitalla ollen referenssirakenteen 1 kohdalla savea, kuonarakenteiden kohdalla hiekkamoreenia ja referenssirakenteen 2 kohdalla täyttömaata.



Kuva 30. Rakennekerrosten tyyppiratkaisut koerakenteessa. (Fortum Waste Solutions Oy) muokattu kuonarakenteiden nimet.

Kuulojantien tasausviiva koerakenteen kohdalla noudattelee pääasiassa olemassa olevaa maan pintaa, jolloin rakennekerrokset ovat käytännössä maaleikkauksessa. Pohjaveden pinnan on arvioitu olevan yli 2 m syvyydellä rakenteen alapinnasta. Kuvassa 31 on Kuulojantien suunniteltu rakennepoikkileikkaus paalulta 280 kuonarakenteen 2 kohdalta.

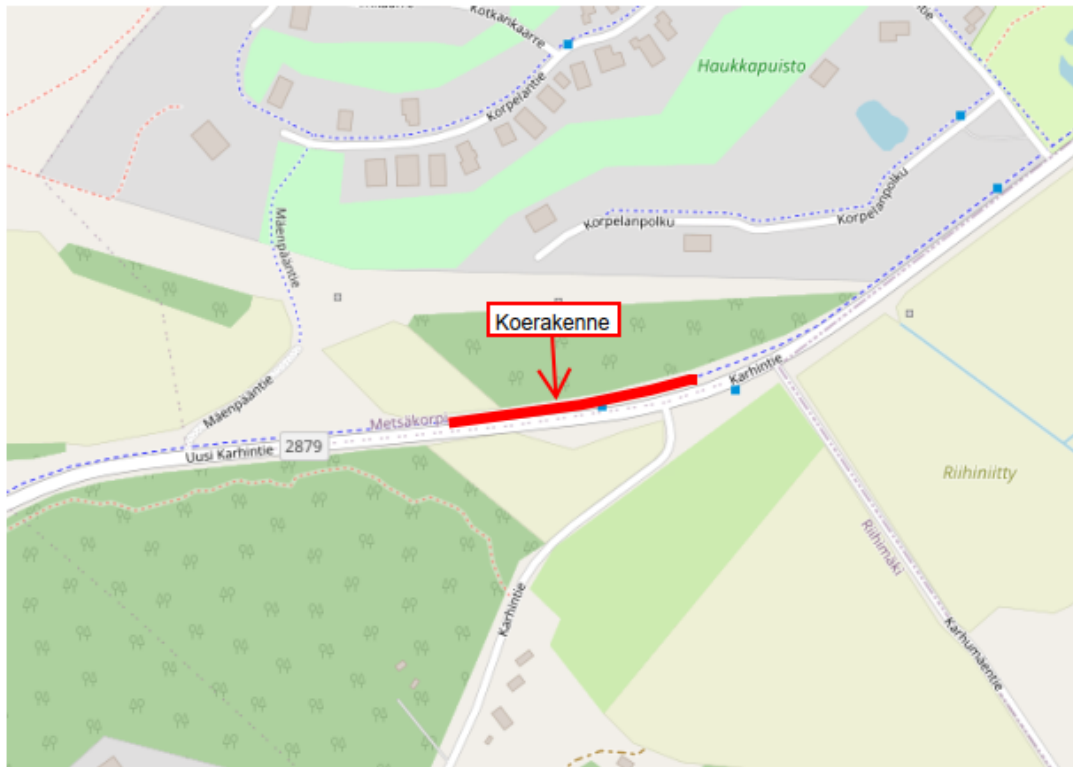


Kuva 31. Kuulojantien rakennepoikkileikkaus. (Ramboll Finland Oy)

5.1.2 Mt 2879 Riihimäki-Hikiä kevyenliikenteenväylä

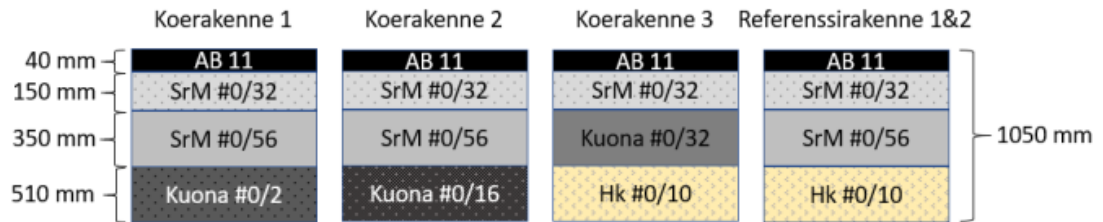
Edellisessä kappaleessa esitellyn Kuulojantien koerakenteen vertailevana aineistona käytettiin vuonna 2021 rakennettua kevyenliikenteenväylää. Osaksi kyseistä väylää oli

toteutettu noin 200 m osuus, jossa käytettiin vastaavia kuonatuotteita kuin Kuulojantiellä. Kohteen seuranta koostui pudotuspainolaitemittauksista, routanousuvaaituksista ja vaurioinventoinneista. Lämpötilaseurantaa ei tässä kohteessa ollut. Tästä syystä vertailu rajoittui kuormituskestävyyden arviointiin. Tämän kohteen mittauksia ei ole tässä työssä käytetty myöskään kuonamateriaalien E-moduulien takaisinlaskennassa. Kohde sijaitsee maantien 2879 varrella noin kolmen kilometrin etäisyydellä Riihimäen keskustasta. Sijainti on esitetty kuvassa 32.



Kuva 32. Riihimäki-Hikiä kevyenliikenteenväylän koerakenteen sijainti. (Open Street Map, 2024)

Kevyenliikenteenväylällä pohjakuonaa on käytetty kolmessa erilaisessa rakennetyypissä. Käytetyt kuonalajitteet ovat samat kuin Kuulojantielläkin, mutta kussakin rakenteessa on vain yhtä kuonalajitetta. KKR1:ssä ja KKR2:ssa 0/2 ja 0/16 mm kuonaa on käytetty suodatinkerroksessa ja KKR3:ssa on 0/32 mm kuonaa jakavassa kerroksessa. Muut kerrokset on tehty luonnon kiviaineksista. Lisäksi koerakenteen molempiin päihin on tehty referenssirakenteet, joissa on käytetty pelkästään luonnonkiviaineksia. Rakeneratkaisut on esitetty kuvassa 33. Kohteen tarkempi kuvaus ja rakentaminen on esitetty Matikan (2021) opinnäytetyössä.



Kuva 33. Riihimäki-Hikiä KLV:n rakenneratkaisut. (Matikka, 2021)

5.2 Käytetyn pohjakuonan materiaaliominaisuudet

Koerakenteissa käytetyt kuonatuotteet on valmistettu suhteuttamalla ne pohjakuonan käsittelyn yhteydessä syntyvistä mineraalilajitteista. Suhteutetuista materiaaleista on otettu näytteitä, joille on tehty teknisten ja ympäristökelpoisuusominaisuuksien määrittäviä vuoden 2020 aikana. Tehdyt kokeet ja niiden tulokset on kuvattu tarkemmin Anniina Söderholmin (2020) opinnäytetyössä. Taulukkoon 3 on koottu tämän työn kannalta olennaisimpia kuonamateriaalien teknisiä ominaisuuksia.

Taulukko 3. Kuonatuotteiden testatut materiaaliominaisuudet sekä niiden määrittämiseen liittyviä parametreja. (Standardi mainittu, jos tiedossa)

Ominaisuus		0/2 mm	0/16 mm	0/32 mm
Mineraalilajitteiden osuudet kuonatuotteissa (m%)	0/2 mm	100	65	15
	2/16 mm	-	25	20
	6/16 mm	-	10	30
	16/45 mm	-	-	35
Maksimikuivairtoisuus Proctor-kokeessa SFS-EN 13286-2	w (%)	19,7	17,0	13,0
	$\rho_{d,max}$ (kg/m ³)	1685,9	1882,0	2037,9
Vedenläpäisevyys (20 °C)	γ (kN/m ³)	13,5	14,9	16,6
	i	3,0	3,0	2,6
	k (m/s)	$5,9 \cdot 10^{-6}$	$9,6 \cdot 10^{-6}$	$8,6 \cdot 10^{-6}$
Lämmönjohtavuus sulana	ρ_d (kg/m ³)	1420	1540	-
	w (%)	17,8	18,7	-
	λ_s (W/mK)	0,66	0,9	-
Veden kapillaarinen nousukorkeus (tiivistettynä) SFS-EN 1097-10:2014	ρ_d (kg/m ³)	1350	1470	1520
	tiiviyysaste (%)	82	80	79
	w% (tiivistys)	9,9	7	4,1
	nousukorkeus (mm)	635	455	565
Resilient-moduuli sykliisellä kolmiakiaalikojeella ($\theta=200$ kPa) SFS-EN 13286-7:2004 Method B	ρ_d (kg/m ³)	1370	1550	1720
	k_1	853	537	1140
	k_2	0,558	0,823	0,774
	M_r (MPa)	126	95	195
Staattinen kolmiakiaalikoje	φ (°)	40,6	39,8	42,3
	c (kPa)	71,9	46,7	89,0
Routanousukoe	ρ_d (kg/m ³)	1390	1560	1680
	w_A (%)	20,2	18,1	14,2
	w_L (%)	34,8	30,6	25,1
	SP (mm ₂ /Kh)	2,01	2,51	2,29

5.3 Kuulojantien rakentaminen ja rakentamisen aikaiset mittaukset

Kuulojantien rakentamisen yhteydessä valmiilta maaleikkauspinnalta otetuista maanäytteistä on määritetty pohjamaan rakeisuudet. Pohjamaan kantavuus on määritetty levykuormituskokeilla maaleikkauspinnalta. Jokaisen valmiin rakennekerroksen päältä levykuormituskokeet on tehty ennen ylemmän kerroksen rakentamista. Samalla on myös tehty sitomattomille rakennekerroksille Troxler-mittaukset kuivairtoisuuden ja tiiviyssas-

teen selvittämiseksi. Rakentamisprosessi ja mittaukset on kuvattu tarkemmin Söderholm (2020) opinnäytetyössä. Taulukossa 4 on esitetty tämän työn kannalta kiinnostavat tulokset.

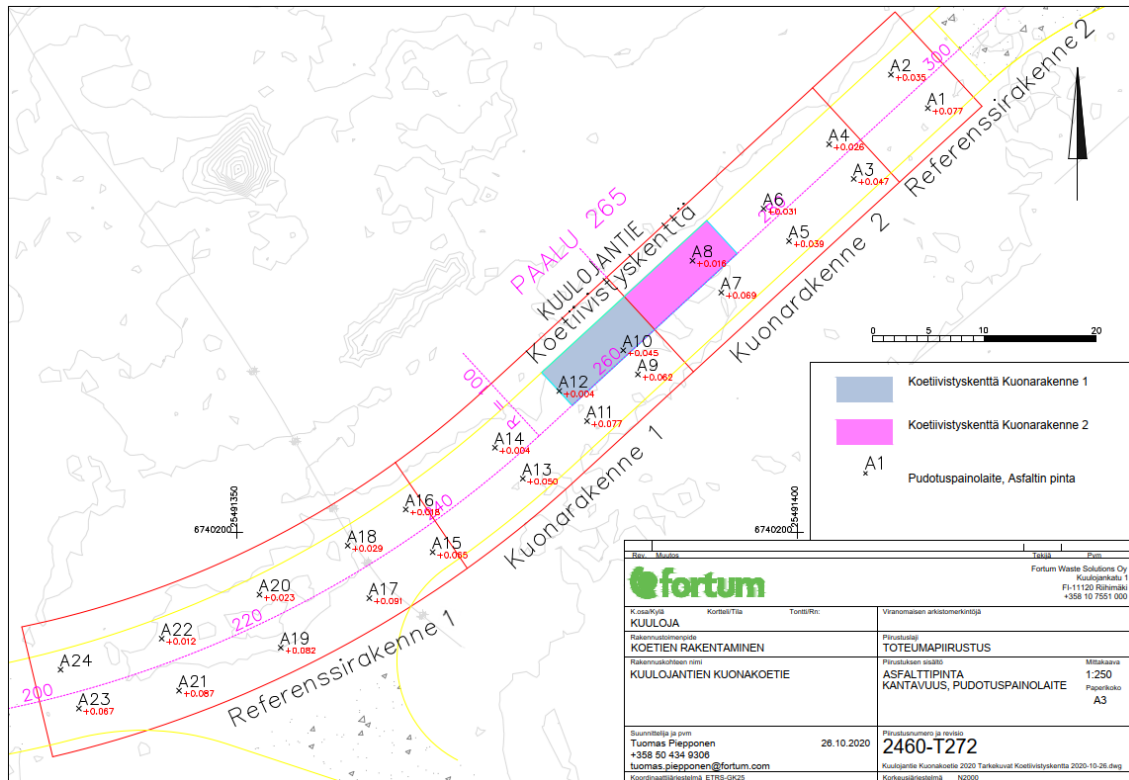
Taulukko 4. Rakentamisen aikaiset levykuormitus- ja Troxler-mittaukset kunkin rakenteen keskiarvona.

Ominaisuus		REF1	KKR1	KKR2	REF2
E2-moduuli levykuormituskokeella (MPa)	Kantava	184	147	146	273
	Jakava	108	98	103	162
	Suodatin	45	83	86	112
	Pohjamaa	36	57	172	150
Kuivairtoteiheyden Troxler- mittauksella (w%:lla korjattu), (kg/m ³)	Kantava	2047	2080	2056	2092
	Jakava	2016	1845	1874	2032
	Suodatin	1890	1738	1562	1884
Tiiviyssaste laskettuna kuivairtoteiheydestä (%)	Kantava	96	97	96	98
	Jakava	94	91	92	95
	Suodatin	93	92	93	92

5.4 Kuulojantien seurantamittaukset

Koerakenteelle laaditun tarkkailusuunnitelman mukaan rakenteesta on seurattu jäykkyyden kehitystä päällysteen pinnalta pudotuspainolaitteella, roudan syvyyttä lämpötilamittauksilla, routanousua routavaaituksilla sekä tehty keväisin vaurioinventointeja. Rakennemateriaalien hienontumisen seuraamista varten koerakenteeseen on rakennusvaiheessa asennettu hienonemissäkit, jotka on tarkoitus myöhemmin kaivaa esiin. Tämän työn kirjoitushetkellä hienonemissäkkejä ei vielä oltu kaivettu esiin.

Pudotuspainolaitemittauksia koerakenteelle on tehty kolmen vuoden seurantajaksolla kahdesti jokaisen vuoden aikana. Syksyllä ennen maan jäätymistä ja keväällä/alkukesästä roudan sulamisen jälkeen. Ensimmäinen mittaus tehtiin syksyllä 2020 pian kohteen rakentamisen valmistuttua. Pudotuspainolaitemittaukset on tehty tien keskilinjan molemmilta puolilta ennalta määrättyistä mittauspisteistä. Yhteensä mittauspisteitä on 24 kpl ja niiden sijainnit on esitetty kuvassa 33. Mittausten tulokset on kirjattu mittausraportteihin.



Kuva 33. Kuulojantien pudotuspainolaitemittausten sijainnit.

Roudan syvyyttä koerakenteissa on seurattu rakenteisiin asennetuilla kolmella lämpötilasauvalla. Lämpötilasauvat on sijoitettu referenssirakenne 1:een sekä kumpaankin kuonarakenteeseen. Referenssirakenne 2:ssa ei ole ollut lämpötilaseurantaa. Lämpötilasauvat on toimittanut Finmeas Oy. Finmeasin palveluun on sisältynyt lämpötilatietojen keruu palvelimelle, josta kertynyt data on mahdollista ladata analysoitavaksi. Lämpötilaseuranta aloitettiin syksyllä 2020 hyvissä ajoin ennen maan jäätymistä. Lämpötilaseuranta kattoi myös ulkoilman lämpötilan mittauksen koerakenteen kohdalla.

Routavaaituksia on tehty kahden viikon välein jokaisen seurantavuoden aikana syksystä ennen roudan tuloa kevääseen roudan sulamiseen asti. Tosin syksyn 2022 ja kevään 2023 välillä vaaitusmittauksia on ollut noin kuukauden välein. Routavaaituspisteitä koerakenteella on ollut yhteensä 60 kpl jakautuen tasaisesti koko rakenteen alalle. Vaaitusten ideana on ollut mitata tien pinnan korkeusasema aina samoista sijainneista joka mitauskerran yhteydessä.

Koerakenteen vaurioinventointi on tehty jokaisen seurantavuoden keväällä/alkukesästä ennalta määrätyn suunnitelman mukaan. Tarkoituksena on ollut kartoittaa rakenteeseen edeltävän talven aikana mahdollisesti syntyneitä routavaurioita tai tien käytöstä aiheutuneita muutoksia sekä verrata niitä edellisen raportoinnin tuloksiin. Vaurioinventoinneista on laadittu kirjalliset raportit.

Kesäkuussa 2023 rakenteista otettiin näytteitä. Näytteenotto tapahtui ikkunatyypisellä rakennenäytteenottimella, jolloin jokaisesta rakennekerroksesta saatiin kerättyä materiaalia laboratoriotutkimuksia varten. Näytteenottopisteitä oli yksi kussakin referenssirakenteessa ja kolme kummassakin kuonarakenteessa. Kuvia näytteenotosta on esitetty liitteessä F. Näytteistä tutkittiin vesipitoisuus, rakeisuus, vedenläpäisevyys (k-arvo) sekä tehtiin joitain liukoisuustestejä. Tutkitut vesipitoisuudet ovat taulukossa 5.

Taulukko 5. Rakennemateriaalien vesipitoisuudet 29.6.2023 otetuista näytteistä.

Rakennekerros	REF1	KKR1	KKR2	REF2
Kantava	KaM 0/32 mm 2,2 %	KaM 0/32 mm 2,2 %	KaM 0/32 mm 2,1 %	KaM 0/32 mm 3,2 %
Jakava	Sr 0/100 mm 2,4 %	JpKu 0/32 mm 11,0 %	JpKu 0/32 mm 11,9 %	Sr 0/100 mm 2,0 %
Suodatin	Hk 0/20 mm 2,1 %	JpKu 0/16 mm 16,4 %	JpKu 0/2 mm 21,5 %	Hk 0/20 mm 3,5 %

6. MITTAUSTULOKSET

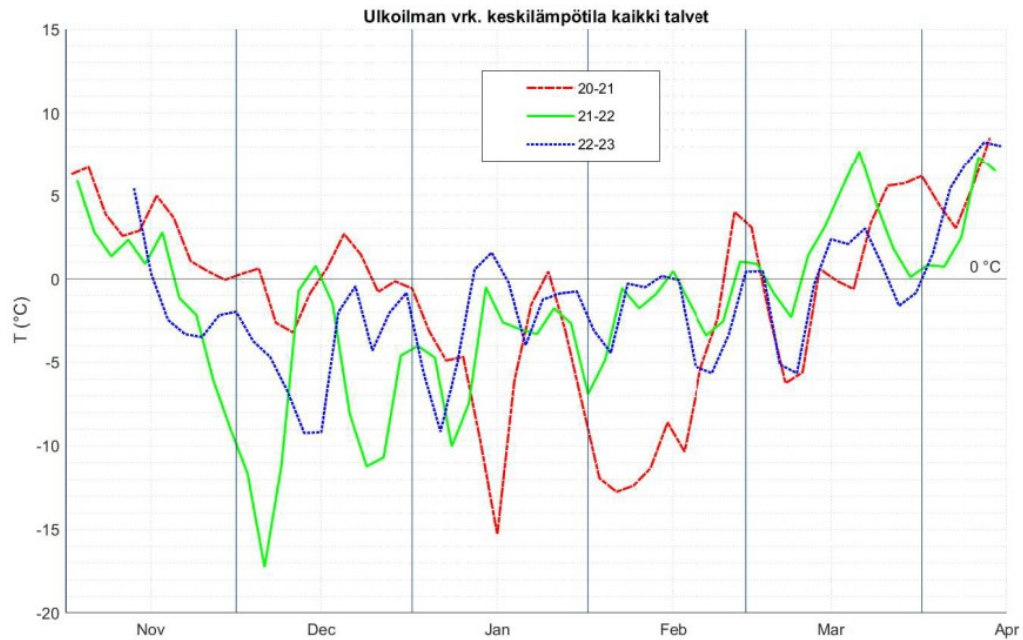
6.1 Lämpötilamittaukset

Koerakenteiden lämpötilaseurantaa on tehty jatkuvalla menettelyllä rakentamisesta lähtien. Tässä työssä käytetty mittausdata on kerätty lokakuulta 2020 kesäkuulle 2023.

6.1.1 Ilman lämpötila seurantajaksolla

Ulkoilman lämpötilaa seurattiin koerakenteen yhteyteen asennetulla lämpötila-anturilla. Anturi sijaitsi mittausjärjestelmän keskusyksikön yhteydessä, joka oli sijoitettuna kaappiin koetien sivuojaan. Anturin korkeusasema vastasi likimain tien pinnan tasoa. Lähin Ilmatieteenlaitoksen sääasema on Hyvinkäällä Hyvinkään kylässä, joka sijaitsee noin 19 km etäisyydellä koekohteesta. Ilmatieteenlaitoksen ja koekohteen lämpötila-anturin tuottamaa dataa vertailtiin keskenään, jotta voitiin varmistua lämpötilaseurannan uskottavuudesta. Vertailun perusteella suuressa kuvassa eroja ei ollut. Hetkellisesti lämpötilat saattoivat erota toisistaan, mikä selittyy mittauskohteiden sijainnin ja mikroilmaston eroista. Koerakenteen lämpötila-anturin sijainnin epäiltiin kuitenkin olevan tiettyyn aikaan vuorokaudesta alttiina suoralle auringon paisteelle, sillä lämpötilalukemat saattoivat kesäpäivinä kohota epäuskottavan korkeiksi. Tällä ei kuitenkaan katsottu olevan tässä yhteydessä merkitystä mielenkiinnon kohteena olevien ajanjaksojen sijoittuessa talvikauden jolloin auringon säteilyenergia on alhainen. Anturin lämpötilaseurannasta muodostettiin vuorokautiset keskiarvot, jotka on esitetty kuvassa 34. Luettavuuden vuoksi lämpötilakäyriin tehtiin kolmen kalenteripäivän välein laskettu viiden peräkkäisen päivän mittauksista muodostettu limittyvä keskiarvotasointus.

Keskiarvoistuksesta huolimatta kuvasta 34 huomataan talvien eroavan toisistaan merkittävästi. Talvella 2020–2021 lyhyttä pakkasjaksoa lukuun ottamatta lämpötila painui pysyvästi nollan alapuolelle vasta joulukuun loppupuolella. Tammi-helmikuussa esiintyi kovia pakkasia, jonka jälkeen lämpötila nousi plussan puolelle maaliskuun lyhyttä pakkasjaksoa lukuun ottamatta. Talven ajallinen kesto jäi tämän seurantajakson lyhyimmäksi. Talvella 2021–2022 lämpötila laski nollan alapuolelle jo marraskuun puolivälin jälkeen ja heti perään seurasi voimakas pakkasjakso. Kovimmat pakkaset ajoittuivatkin alkutalveen ja heikkenivät kohti maaliskuun alkupuolta, jolloin lämpötila nousi pysyvästi plussan puolelle. Talven 2022–2023 osalta lämpötila laski pakkasen puolelle jo marraskuun puolivälissä. Talven kulku oli hyvin vaihteleva ja lyhyiden pakkasjaksojen välillä lämpötila kävi plussan puolella. Talven päättymisajankohta oli maaliskuun vaihteessa.



Kuva 34. Ulkoilman vuorokauden keskilämpötila tasoitettuna kolmen päivän välein.

Kirjallisuudessa roudan syvyyden arvioinnissa merkittävimäksi tekijäksi nostetaan talven pakkasmäärä. Se lasketaan vuorokauden keskilämpötilasta kaavalla (VTT, 2007):

$$F = 24 \cdot \sum_j (T_f - T_{d,j}) \quad (27)$$

jossa

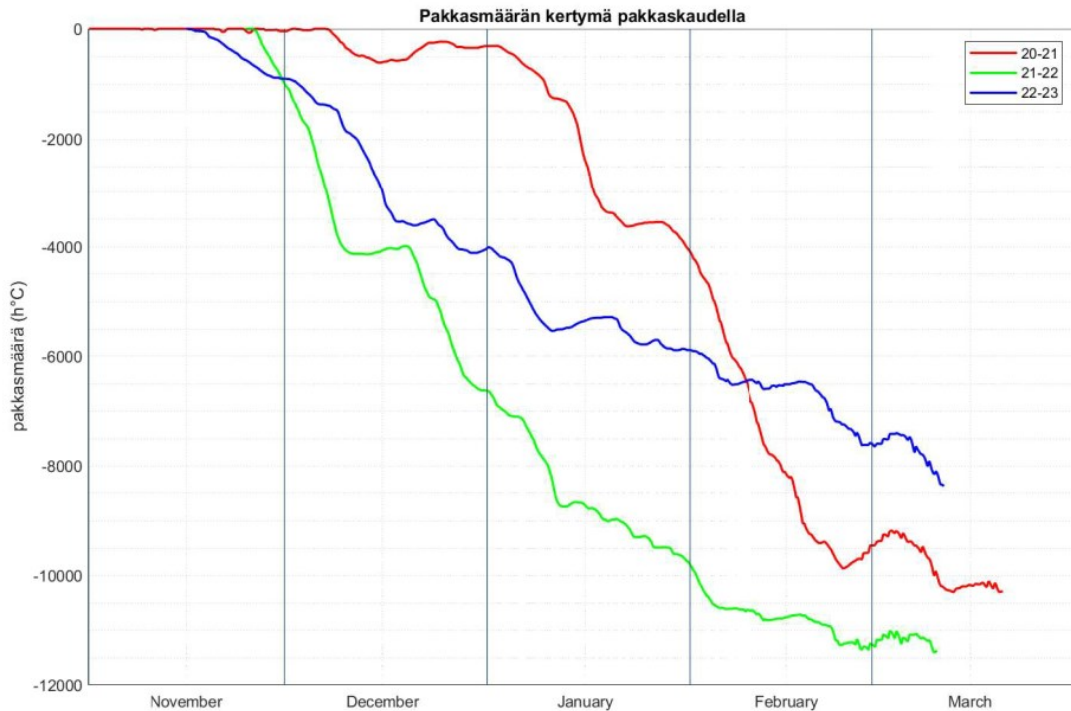
F talven pakkasmäärä (Kh)

T_f jäätymispiste 0 °C

$T_{d,j}$ vuorokauden keskilämpötila päivälle j (°C)

Kaava 27 huomioi sekä positiiviset että negatiiviset lämpötilalukemat. Periaatteessa pakkasmäärän laskenta tulisi aloittaa, kun vuorokauden keskilämpötila painuu pysyvästi nollan alapuolelle ja lopettaa keväällä keskilämpötilan kohotessa pysyvästi nollan yläpuolelle. Tässä työssä pakkasmäärän laskenta tehtiin Matlab-ohjelmalla. Matlab on MathWorksin kehittämä alusta ohjelmoinnille ja numeeriselle laskennalle, jolla voidaan mm. analysoida dataa ja kehittää malleja. (MathWorks, 2023) Ohjelmassa pakkasmäärän laskenta päivittäisistä lämpötilahavainnoista tehtiin yhtälön 27 periaatteella, mutta kahden tunnin mittaisilla aika-askeleilla. Jokaisella aika-askeleella laskettu pakkasmäärä lisättiin kumulatiiviseen summaan, jonka kertymä asetettiin alkamaan laskentavuoden syksyllä ajankohdasta, jolloin lämpötila oli varmasti plussan puolella. Kunkin aika-askeleen pakkasmäärä (lämpötila) etumerkin mukaan, joko lisäsi tai vähensi kumulatiivista

pakkasmäärää. Laskentakoodi hyödynsi eräänlaista pakkasmäärän lattiafunktiota, joka esti plusasteiden kumuloitumisen ”positiiviseksi pakkasmääräksi” pyöristämällä summan noltaan tällaisessa tapauksessa. Pakkasmäärän kertymät on esitetty kuvassa 35 kaikkien talvien osalta.



Kuva 35. Pakkasmäärän kertymät ajan funktiona kaikkina talvina.

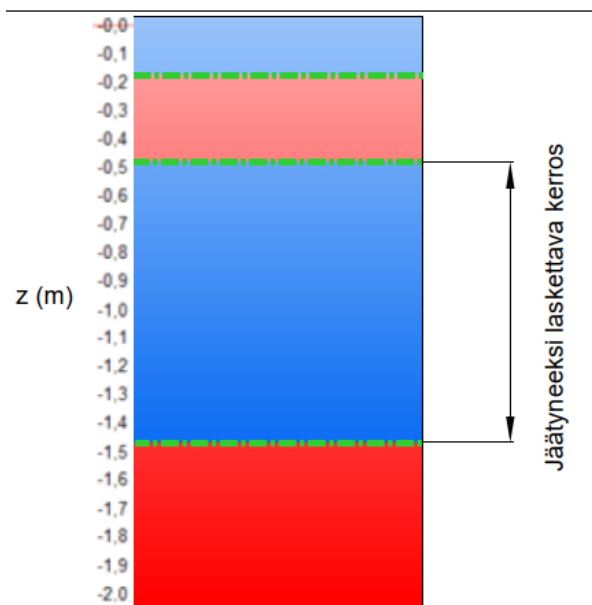
Tarkasteltaessa kaikkien talvien pakkasmääriä huomataan, ettei yksikään talvista ole keskimääräisesti erityisen kova. Vuosien 1961–1990 säähavaintojen pohjalta laadittujen tilastollisten pakkasmäärien mukaan keskimäärin kerran kahdessa vuodessa toistuva pakkasmäärä Riihimäen seudulla on n. 18 000 Kh. (VTT, 2007) Seurantatalvien lukemat eivät yllä edes siihen. Vaikka oletettavasti uusimpien tilastojen pakkasmäärät ovat olleet vähenemään päin, eivät seurantatalvet todennäköisesti siltikään edusta tilastollisesti keskimääräistä talvea. Pakkasmäärien osalta talvet ovat kuitenkin erilaisia tarjoten jatkoanalyysiä varten keskenään erilaista tietoa. Talvella 2020–2021 pakkasmäärän suurin kertymä tapahtuu talven loppupuolella, kun taas talvella 2021–2022 voimakkaammat pakkaset sijoittuvat alkutalveen. Tasaisinta pakkasmäärän kertymä on talvella 2022–2023, jolloin plus- ja miinusasteet vuorottelevat läpi talven kulun.

6.1.2 Roudan syvyys ja routanousu

Roudan syvyyden kehitystä seurattiin koerakenteisiin asennettujen lämpötila-antureiden avulla. Jokaiseen kolmeen rakennetyyppiin oli asennettu pystysuora lämpötilasauva,

jossa lämpötila-anturit oli sijoitettu 10 cm välein. Ylin anturi sijaitsi 9 cm syvyydellä asfaltin yläpinnasta ja alin pohjanmaassa 199 cm syvyydellä. Kunkin anturin lämpötilalukema tallennettiin FinMeasin palvelimelle kahden tunnin välein koko seuranta-ajalta. Palvelimelta data saatiin ladattua kunkin rakenteen osalta taulukkomuodossa.

Roudan syvyys ei suoraan ollut luettavissa taulukosta, vaan data sisälsi antureiden lämpötilalukemat kullakin ajanhetkellä. Roudan syvyyden mallintamiseksi datataulukko luettiin Matlabiin. Matlab-koodi kävi läpi taulukon kahden tunnin aika-askeleittain interpoloimalla syvyyden, jolla lämpötilan nollaraja sijaitsi. Laskennan tuloksena saatiin kahden tunnin välein syvyydet, joilla lämpötila maassa oli 0 °C. Tässä tulee huomioida se tosiasia, että varsinkin keväällä roudan sulamisen yhteydessä lämpötila rakenteessa saattaa olla nollassa useammalla syvyydellä samanaikaisesti. Tällöin rakenteen sulaminen tapahtuu routarajan alapuolelta ja maan pinnalta käsin yhtä aikaa. Kovat yöpakkaset kuitenkin jäädyttävät jo kertaalleen sulaneen rakenteen pintaosan kuvan 36 mukaisesti. Tässä työssä jäätyneen maan rajoiksi määritettiin syvyyden suhteen alimman yhtenäisesti jäätyneen vyöhykkeen rajat.

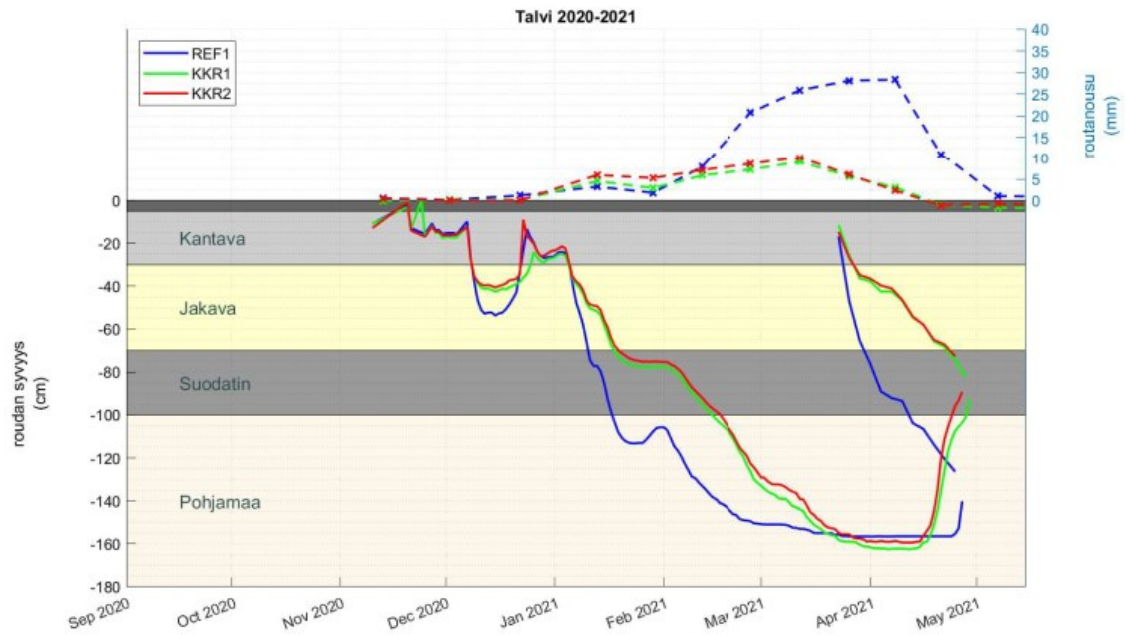


Kuva 36. Routarajojen määrittely tilanteessa, jossa maassa on useampi routaantunut vyöhyke (sinisellä). Vihreä katkoviiva kuvaa lämpötilan nollarajaa.

Routanousua seurattiin mittaamalla rakenteen pinnan korkeusasemaa useasta kohtaa kahdesti kuussa ensimmäisenä ja toisena seurantalvena sekä noin kuukauden välein kolmantena talvena. Kunkin mittausajankohdan osalta mitatuista havainnoista laskettiin keskiarvo kullekin rakenteelle.

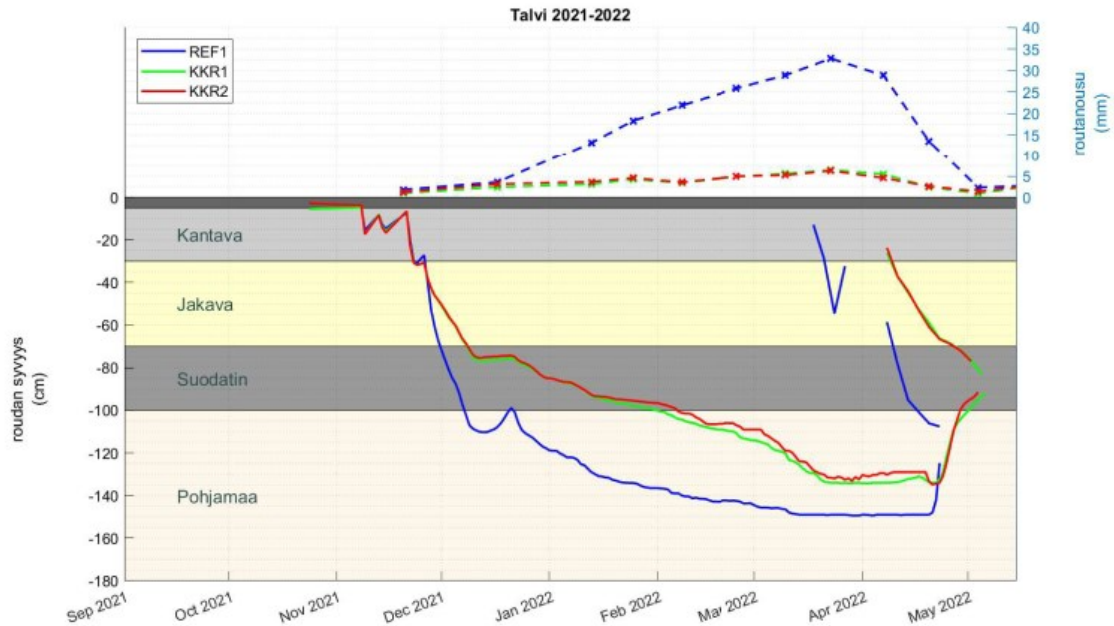
Roudan syvyyksistä ja routanousuista muodostettiin kuvaajat analyysiä varten jokaisen seurantalven osalta. Rakennekerrosten paksuudet ovat kaikissa rakennetyypeissä samat, jolloin roudan syvyyksien vertailu helpottui. Routanousun havaittiin referenssirakenne 1:ssä olevan huomattavasti suurempaa kuin muissa koerakenteissa roudan tunkeutuessa pohjamaahan. Tämän voidaan katsoa olevan seurausta pohjamaan erilaisuudesta (mm. vesipitoisuus, rakeisuus) eri rakenteissa. Referenssirakenne 2:n routanousukuvaajia ei ole yhdistetty muiden rakenteiden vastaaviin kuvaajiin rakenteesta puuttuvan lämpötilaseurannan takia, jolloin niiden sitominen roudan syvyyteen ei olisi onnistunut. Mainittakoon kuitenkin referenssirakenne 2:n routanousuhavaintojen olevan samaa luokkaa kuonarakenteiden kanssa.

Kuvasta 37 nähdään selvästi kuonarakenteiden ja referenssirakenteen erilainen jääty-miskäyttäytyminen. Kantavan kerroksen ollessa kaikissa rakenteissa samanlainen eroa roudan syvyydessä ei juurikaan synny. Kuonakerrosten osalta sen sijaan jäätyminen tapahtuu hitaammin. Jakava kerros jäätyn kokonaan noin viikon ja suodatinkerros noin kuu-kauden referenssirakenteen vastaavia myöhemmin. Samaten keväällä routa oli sulanut rakennekerroksista referenssirakenteessa noin kaksi viikkoa kuonarakenteita myöhemmin. Pohjamaan jäätyriskäyttäytymisestä ei kannata vetää eri rakenteiden välille kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä pohjamaan erilaisuudesta johtuen, vaikka roudan syvyys kuonarakenteissa näyttääkin olevan referenssirakennetta suurempi. Routanousu kaikissa rakenteissa on samaa luokkaa rakennekerrosten jäätyamisen aikana. Merkittävin routanousu näyttää syntyvän pohjamaan jäätyessä. Sulamisen yhteydessä referenssirakenteen routanousu näyttää häviävän kuonarakenteita hitaammin, mikä on todennäköisesti seurausta pohjamaan hitaammasta sulamisesta rakennekerrokseen verrattuna. Kuonarakenteiden sulamisen lopussa routanousu pienenee muutaman millimetrin lähtötilannetta alemmaksi, joka voidaan tulkita vesipitoisuuden muutosten mahdollistamaksi rakenteen tiivistymiseksi.



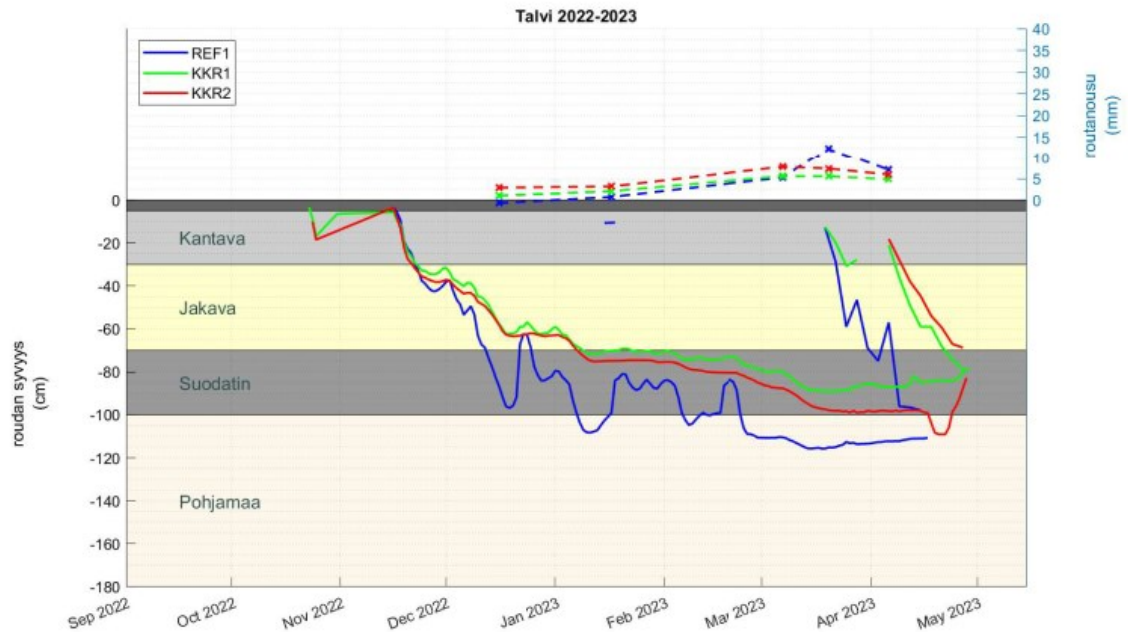
Kuva 37. Roudan syvyys ja routanousu talvella 2020–2021.

Kuvassa 38 on esitetty talven 2021–2022 tilanne. Rouda ei tunkeutunut yhtä syvälle pohjamaahan kuin ensimmäisenä talvena, vaikka koko talven pakkasmäärä toisena talvena oli seurantajakson suurin. Nyt referenssirakenteen pohjamaa jäättyi kuonarakenteita syvemmälle ja sulii kokonaisuudessaan aikaisemmin. Tästä huomataan, ettei pelkän pakkasmäärän perusteella voida arvioida luotettavasti roudan syvyyttä etenkin silloin, kun lämpötila talven aikana vaihtelee jatkuvasti nollan molemmiin puolin. Rakennekerrosten jäätymisen ja routanousun osalta voidaan tehdä samat havainnot kuin ensimmäisenä talvena.



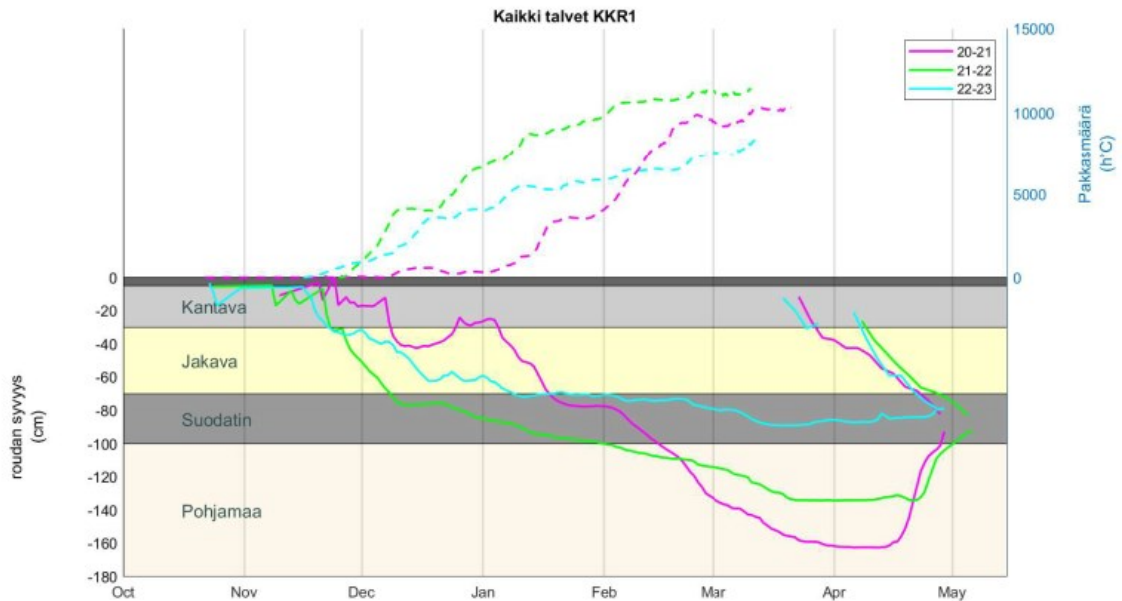
Kuva 38. Roudan syvyys ja routanousu talvella 2021–2022.

Kuva 39 esittää talven 2022–2023 havaintoja. Tämän talven pakkasmäärä jäi seuranta-jakson alhaisimmaksi, joka käy ilmi roudan syvyydestä. Kuonarakenteissa suodatinkerros ei jäänyt kunnolla kokonaan ja referenssirakenteessakin routa tunkeutui pohjamaahan vasta talven loppupuolella. Kuonarakenteissa nähdään aiemmista talvista poiketen selkeä ero suodatinkerroksen jäätymisessä eri kuonamateriaalien välillä. Rakeisuudeltaan 0/2 mm kuonamateriaalissa suodatinkerros jäätynyt talven lopulla hetkellisesti kokonaan, kun taas 0/16 mm materiaalissa routaraja saavutti vain suodatinkerroksen puolivälin. Lämpötilojen suuri vaihtelu talven aikana näkyy paljon selkeämmin referenssirakenteen jäätyiskäyttäytymisessä kuin kuonarakenteissa, jotka eivät vaikuta reagoivan lämpötilamuutoksiin yhtä herkästi. Routanousumittaukset kolmantena seurantalvena toteutettiin aikaisempia harvemmin. Lämpötilojen vaihtelun takia routanousuhavaintoja oli hankala yhdistää rakennekerrosrajojen jäätyksen ajankohtiin.



Kuva 39. Roudan syvyys ja routanousu talvella 2022–2023.

Eri talvien välisiä eroja havainnollistettiin lisäksi laatimalla yhdistetyt kuvaajat roudan syvyyksistä kaikkina seurantalvina. Kuvassa 40 on esimerkkinä roudan syvyyden kuvaajat kuonakoerakenteen 1 osalta. Muut kuvaajat on esitetty liitteessä B. Siinä nähdään selkeästi eri talvien olleen keskenään hyvin erilaisia. Voidaan myös todeta talven 2020–2021 pakkasmäärän nopean kertymisen vaikuttaneen roudan syvyyttä lisäävästi enemmän kuin absoluuttisesti suuremman pakkasmäärän hitaamman kumuloitumisen talvella 2021–2022, mikä onkin teorian kannalta järkeenkäypä tulos. Laskettaessa roudan syvyyttä yksinkertaisella analyttisellä menetelmällä, joka ei huomioi lämpötilagradientin muutosta maassa routaantumisen edetessä, johtaa tällaisessa tilanteessa virheelliseen lopputulokseen.



Kuva 40. Roudan syvyydet kuonarakenne 1:ssä sekä pakkasmäärät kaikkina seurantaluvina.

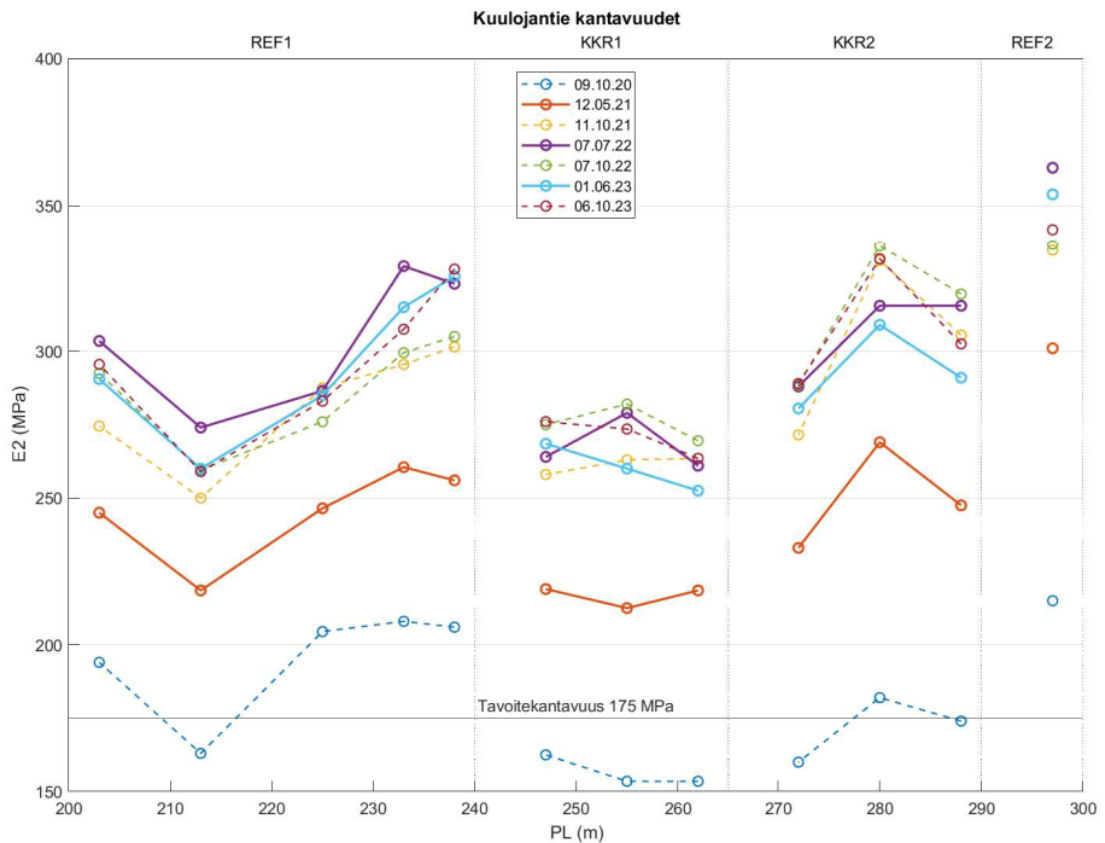
6.2 Kantavuusmittaukset

Tässä kappaleessa käsitellyt kantavuusmittaukset on tehty pudotuspainolaitteella. Seurantajaksolla pudotuspainolaitemittauksia Kuulojantien koerakenteella on tehty vuosittain kahdesti. Ensimmäinen heti rakentamisen jälkeen lokakuussa 2020 ja viimeisin lokakuussa 2023. Rakentamisen aikana on tehty pohjamaasta ja rakennekerroksista myös levykuormituskokeita. Niiden tuloksia tässä työssä on hyödynnetty lähinnä pohjamaan osalta rakennekerrosten moduularvojen takaisinlaskennassa. Vertailukohteena Kuulojantielle on käytetty vuonna 2021 rakennettua Riihimäki-Hikiä kevyenliikenteenväylää, jossa on käytetty samoja kuonatuotteita. Kyseiseltä kevyenliikenteenväylältä on tehty pudotuspainolaitemittauksia vuosina 2021 -2023.

6.2.1 Kuulojantie

Kuvassa 41 on esitetty Kuulojantien pudotuspainolaitemittaukset paalulukeman mukaan. Kantavuudet ovat päällysteen päältä mitattuja lämpötilakorjattuja E2-moduuleja. Mittauksia on tehty pareittain keskilinjan molemmin puolin. Kuvassa 41 näkyvät kantavuudet on laskettu näiden kahden mittauksen keskiarvona. Tuloksista nähdään kuonarakenteiden kantavuuden osittain alittavan tavoitekantavuuden heti rakentamisen jälkeen syksyllä 2020. Tilanne kuitenkin paranee jo seuraavan vuoden kevään mittauksissa, jolloin kantavuudet ovat reilusti tavoitearvon yläpuolella. Kuvaajista käy ilmi myös suurimpien kantavuusarvojen ajoittuminen referenssirakenteissa heinäkuulle 2022, kun taas kuonarakenteilla vastaava tilanne on lokakuussa 2022. Tämä on todennäköisesti seurausta ra-

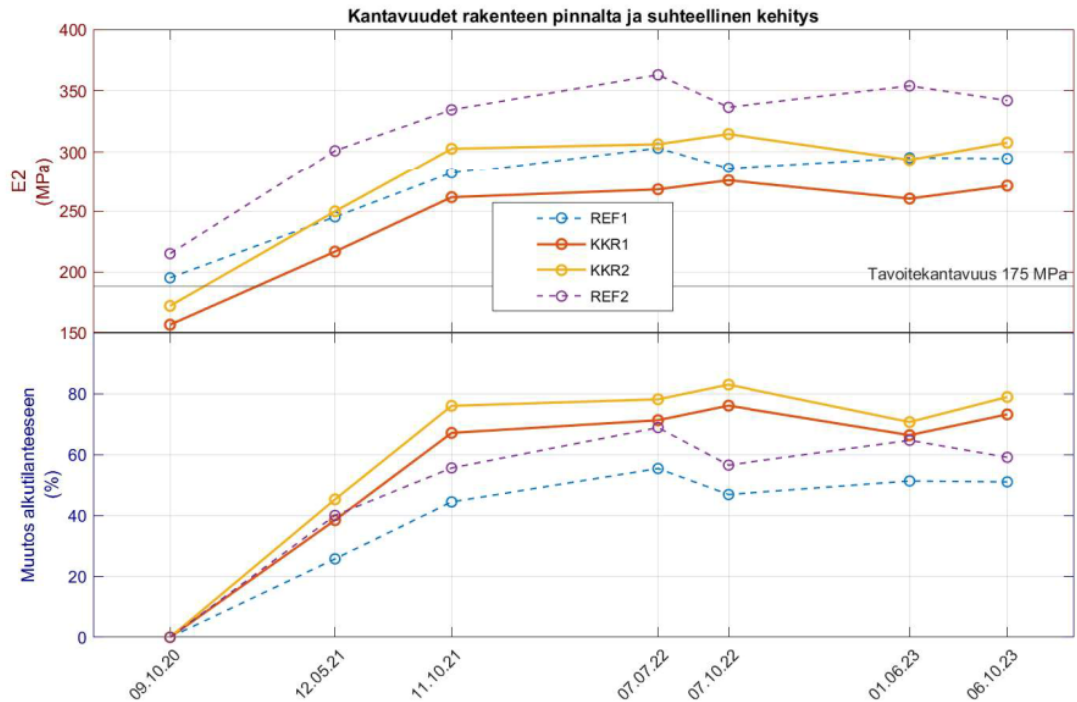
kenteissa vallitsevista kosteusolosuhteista. Kuivaan kesäaikaan rakenteen vesipitoisuuden lasku edesauttaa soramurskeen toimintaa jäykkyyttä lisäävästi. Kuonarakenteissa ei tällaista pienimuotoista jäykkyyden kasvua kesäkaudella havaittu, joka todennäköisesti johtuu vesipitoisuuden vähäisemmistä muutoksista kuonamateriaalissa. Luonnonkiviaineiksissa vesipitoisuus on ylipäättään kuonarakenteita matalampi, jolloin näennäisen koheesion jäykistävä vaikutus mobilisoituu nopeammin.



Kuva 41. E2-moduulit pudotuspainolaitemittauksista Kuulojantiellä.

Kuvan 42 yläosassa on pudotuspainolaitemittauksista laskettu keskiarvot rakenteittain jokaisena mittauskertana. Alempi kuvaaja ilmentää kantavuuksien muutosta ensimmäiseen rakentamisen jälkeiseen mittaukseen verrattuna. Ilmeisin havainto kuvasta on kantavuuksien kehittyminen ensimmäisen vuoden aikana lähes lineaarisesti. Kuonarakenteiden kantavuudet pysyvät tämän jälkeen melko muuttumattomina. Referenssirakenteissa on hieman enemmän muutosta mittausajankohdasta riippuen. Tämä on kaikesta seurauksena kosteustilan vaihtelusta rakenteissa, jolle referenssimateriaalit näyttävät olevan hieman kuonamateriaaleja herkempiä. Koska kohteessa ei ole ollut kosteusseuranta, ei voida todeta minkälaisesta muutoksesta on ollut kyse. Toisaalta kuonamateriaalit saattavat säilyttää vesipitoisuutensa kiviaineiksia paremmin olosuhteiden muuttuessa.

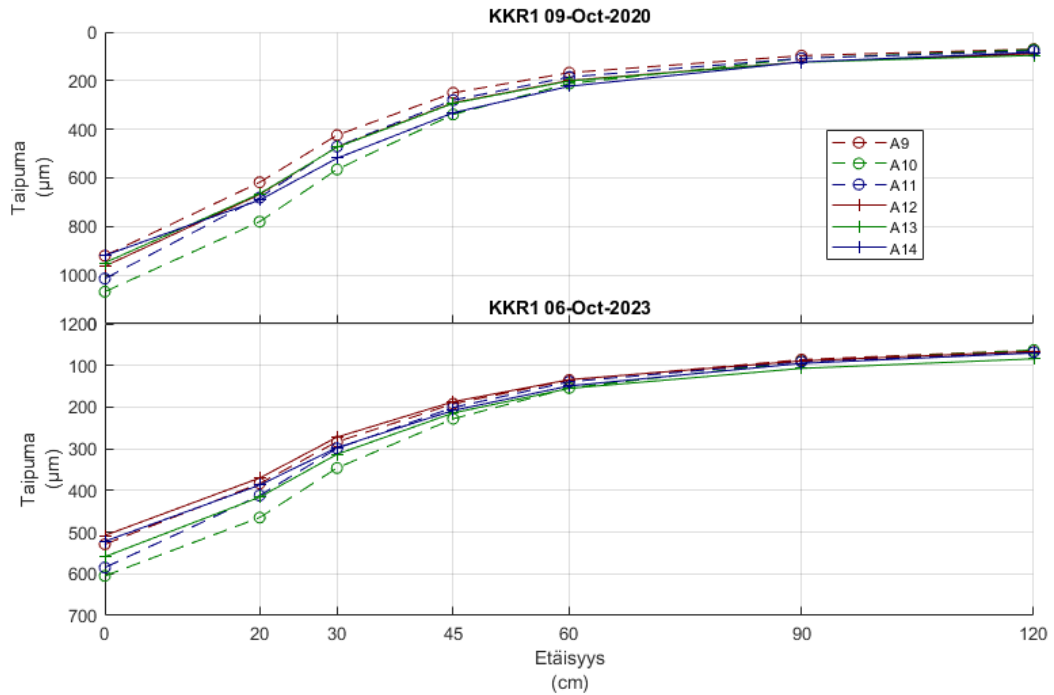
Odotetusti referenssirakenne 2:n kantavuudet ovat noin 50 MPa referenssirakennetta 1 parempia kantavammasta pohjamaasta johtuen. Pohjamaaerot näkyvät kuvassa 41 kantavuuden vaihteluna eri rakenteiden alueella. Kuonarakenne 2:n kantavuudet ovat kauttaaltaan noin 30 MPa kuonarakennetta 1 parempia. Koska näiden rakenteiden ainoa ero on suodatinkerroksen materiaalissa, vaikuttaa 0/2 mm kuonalajite omaavan suuremman moduuliarvon kuin 0/16 mm lajite. Toisaalta todennäköinen syy tähän eroon johtuu pohjamaasta, joka on kuonarakenteen 2 kohdalla selvästi kantavampaa.



Kuva 42. Kuulojantien jäykkyyden kehitys.

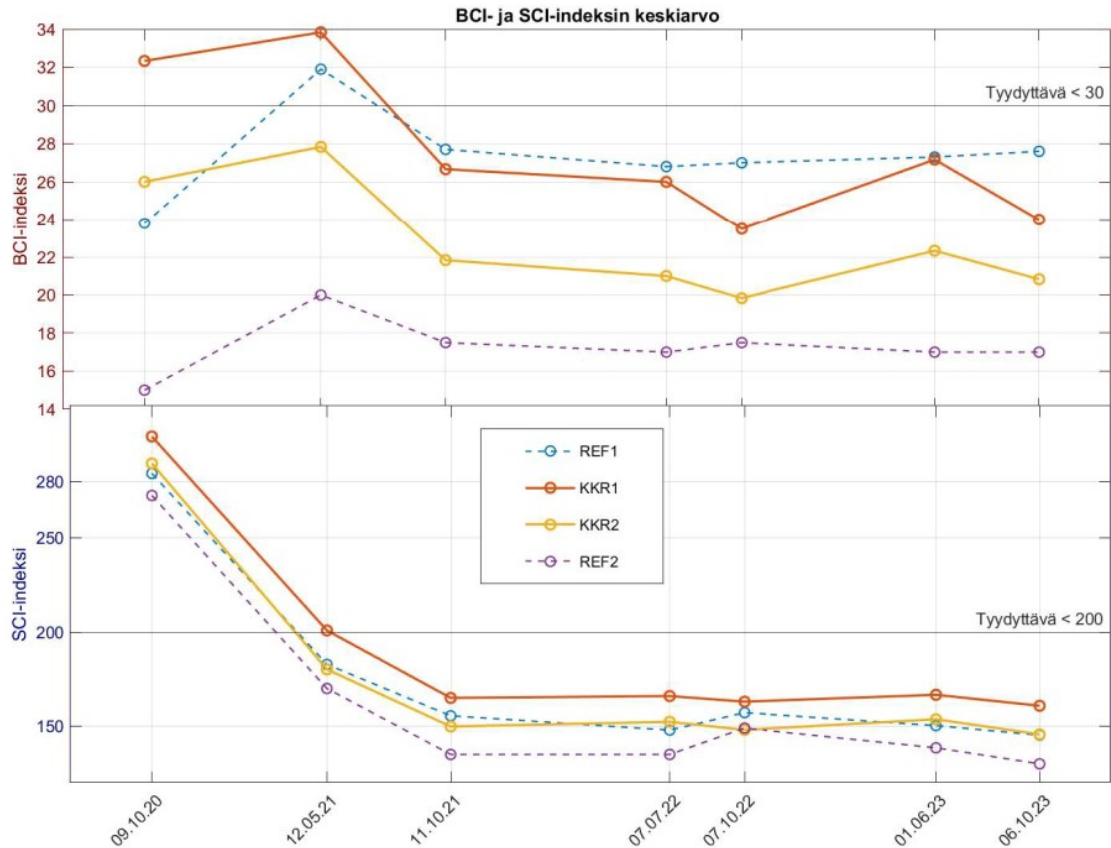
Kun tarkastellaan kantavuuden muutosta alkutilanteeseen, kuonarakenteiden kantavuuden voidaan todeta kehittyneen ensimmäisen vuoden jälkeen n. 70 % heti rakentamisen jälkeiseen tilanteeseen verrattuna ja pysyvän siinä myöhemmissä mittauksissa. Samassa ajassa referenssirakenteet saavuttavat noin 50 % alkutilannetta suuremman kantavuuden. Jos kuonarakenteissa tapahtuisi merkittävää lujittumista, pitäisi sen näkyä suurempana erona referenssirakenteisiin nähden. Yllä olevien kuvioiden tulkinnassa tulee kuitenkin huomioida, että esitetyt kantavuusarvot ovat koko rakennetta kuvaavia, eikä niiden perusteella voida tehdä päätelmiä koskien tiettyä rakennekerrosta.

Pudotuspainolaitemittausten yhteydessä havaittujen taipumien hajonta rakenteittain oli suurinta 0–300 mm etäisyydellä kuormituspisteen keskeltä eikä hajonta näyttänyt pienevän mittausten välillä rakenteiden kantavuuden lisääntyessä. Kuvassa 43 on esitetty taipumat ensimmäisellä ja viimeisellä mittauskerralla. Taipumien hajonta on 100 µm sisällä molemmissa mittauksissa.



Kuva 43. Taipumasuppiloiden hajonta kuonarakenne 1:ssä ensimmäisessä ja viimeisessä mittauksessa. Mittauspisteiden sijainnit näkyvät kuvassa 33.

Rakenteen eri osien käyttäytymisestä saadaan paremmin tietoa vertailemalla eri taipumaindeksien arvoja. Kuvassa 44 on esitetty Kuulojantien mittauksista laskettujen BCI- ja SCI-indeksien keskiarvot mittauskerroittain. SCI on laskettu 200 mm etäisyydeltä kuormituspisteestä ja BCI 900-1200 mm lukemien erotuksena. BCI-lukema kuvaa liikennekuormituksen aiheuttamaa vaurioriskiä tierakenteen alaosassa ja pohjamaassa. Kaikissa rakenteissa BCI nousee rakentamisen jälkeisenä keväänä. Tähän on syynä mahdollisesti mittausajankohta. Roudan syvyyden kuvaajista huomataan pohjamaassa olleen roudan sulaneen vasta huhtikuun lopulla, jolloin sulamispehmenemisen vaikutukset maassa ovat olleet vielä mittaushetkellä läsnä. Muutoin BCI kehittyi rakenteen kantavuutta vastaavasti. Tässä kohteessa pohjamaan vaikutus korostuu BCI-arvossa, sillä kuvaajien järjestys ylhäältä alas vastaa rakenteiden järjestystä koekohteessa. Siitä ei siten saada tehtyä tarkempia tulkintoja kuona- ja kiviaineskerrosten eroavaisuuksista.

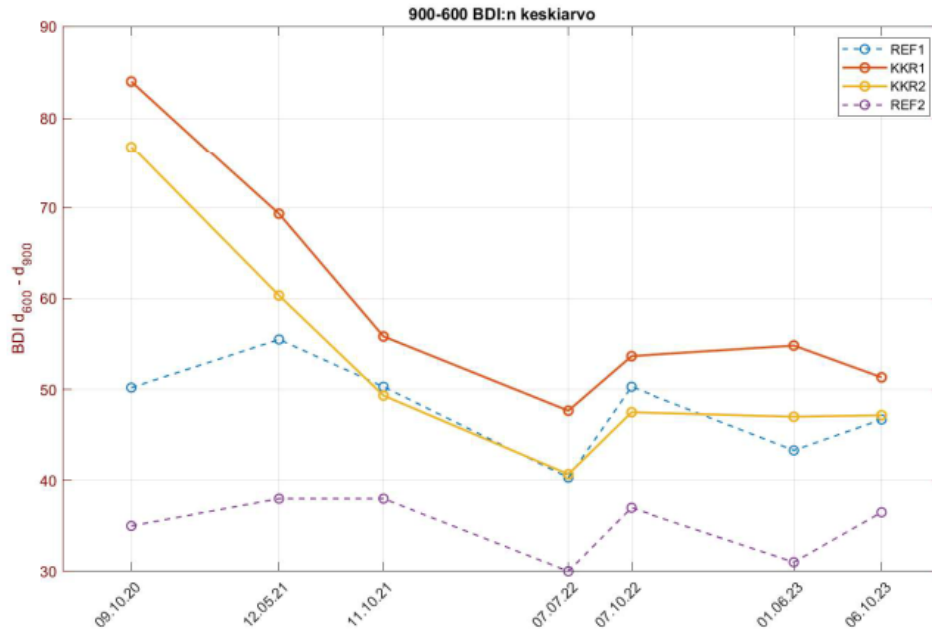


Kuva 44. Kuulojantien BCI- ja SCI-indeksin keskiarvojen kehitys.

SCI-indeksi kuvaa tien pinnan eli päällysteen ja kantavan kerroksen yläosan taipumusta ja siten niiden vaurioitumisriskiä. SCI-arvo riippuu lämpötilasta BCI-arvoa enemmän. Tässä kohteessa SCI noudattelee rakenteen jäykkyyden kehitystä hyvinkin suoraan. Tyydyttävä lukema saavutetaan jo ensimmäisenä mittauskeväänä ja kehitys tasaantuu ensimmäisen vuoden jälkeen. Indeksien luokittelu on johdettu kuvasta 20. Kuvaaajien perusteella jäykkyyden lisäys vaikuttaakin pääasiassa kehittyneen kantavassa kerroksessa.

Koska edelliset käyrät kuvaavat huonosti rakennetta syvyydeltä, jossa kuonarakenteet sijaitsevat, laskettiin taipumista vielä 600 ja 900 mm etäisyydellä pudotuskohdasta olevien antureiden taipumalukemien erotus. Siitä käytetään nimitystä BDI (base damage index). Kuvassa 45 on esitetty kyseisen indeksin lasketut arvot. Referenssirakenteiden arvot pysyvät kutakuinkin samoina vuodenaikavaihtelua lukuun ottamatta, jolloin voidaan olettaa jäykkyyden kehityksen niissä tapahtuvan pääasiassa rakenteen muissa osissa. Kuonarakenteissa sen sijaan merkittävä parannus tapahtuu ensimmäisen vuoden aikana, jolloin koko rakenteen kantavuuden pääasiallinen lisääntyminenkin tapahtuu. Tähän saattaa olla syynä jäykkyyden kasvu kuonarakenteiden alemmissa kerroksissa.

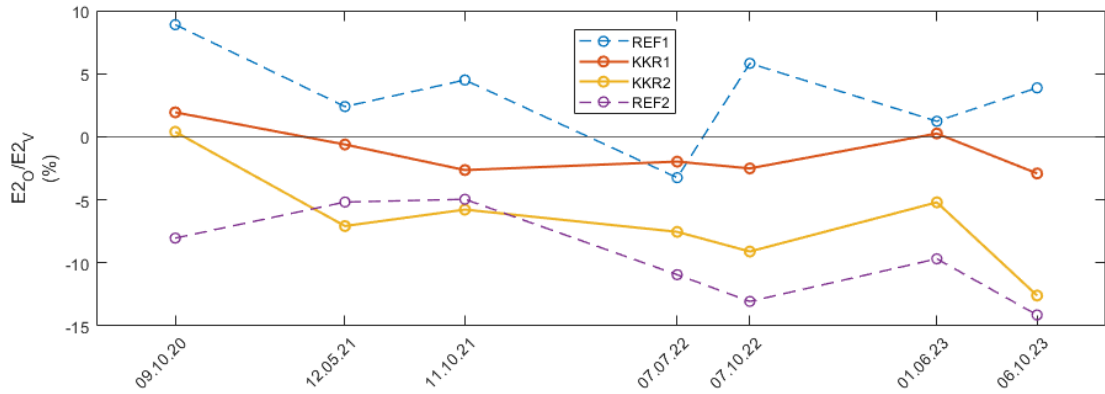
Jäykkyys kiviainesrakenteiden alaosassa vaikutta kuitenkin seurannan lopussakin olevan kuonarakenteiden vastaavaa korkeampi.



Kuva 45. 600 ja 900 mm etäisyydellä olevien taipumien erotus (BDI) kuvaa rakenteen alempia kerroksia, erityisesti suodatinkerroksen materiaalin ominaisuuksia Kuulojantiellä.

Tätä työtä tehdessä käytössä olivat vuosien 2021 ja 2022 kesäkuulla koerakenteelle tehdyt vaurioinventointiraportit. Raporttien tietojen perusteella millään koerakenteen osuudella ei ollut havaittavissa rakenteen pinnalta näkyviä epätasaisen routanousun tai alhaisen kantavuuden aiheuttamia vaurioita.

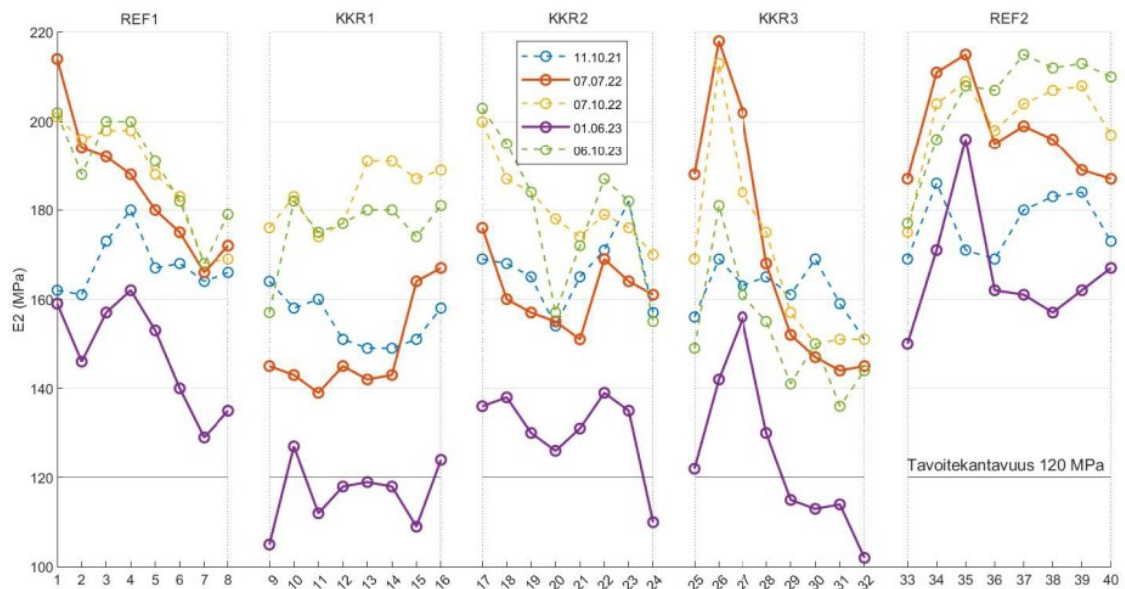
Koerakenteen ajorata on asfaltoitu 8 m leveydeltä, jolloin siihen muodostuu käytännössä kaksi ajokaistaa. Kantavuusmittaukset on tehty aina samalta paalulta molemmilta ajokaistoilta. Mittauspiste on sijainnut kutakuinkin ajokaistan keskellä. Kantavuuksien kehitystä tarkasteltiin laskemalla jokaiselta mittauskerralta E2-moduulin keskiarvo kunkin rakenteen molemmilta ajokaistoilta erikseen. Oikean kaistan mittausten keskiarvon suhde vasemman kaistan mittausten keskiarvoon on esitetty kuvassa 46. Negatiivinen osuus kuvassa tarkoittaa vasemman puolen kantavuuden olevan oikeaa suurempi ja päinvastoin. Tuloksista voidaan havaita jäykkyyden kehittyvän hienoisesti enemmän vasemmalla kaistalla. Suurin ero ensimmäisen ja viimeisen mittauksen välillä on kuonarakenteessa 2. Siinä kaistojen kantavuuksien suhde on kasvanut vasemman puolen hyväksi 13,0 %-yksikköä. Raskaan liikenteen määriä Gasumin laitokselle on vertailtu kaistoittain Söderholmin työssä. Kuormattujen ajoneuvojen määrä oikealla kaistalla on ollut suurempi kuin vasemmalla, mutta vasemman kaistan keskimääräiset kuormatut ajoneuvopainot ovat olleet suuremmat. (Söderholm, 2020)



Kuva 46. Kuulojantien jäykkyyden kehitys ajokaistoittain. Kuvassa on vertailtu rakenteittain ajokaistojen kantavuuksien keskiarvoja. Pystyakseli kuvaa oikean kaistan kantavuuksien keskiarvon suhdetta vasemman kaistan vastaavaan keskiarvoon. Negatiivinen lukema tarkoittaa vasemman kaistan suurempaa suhteellista kantavuutta.

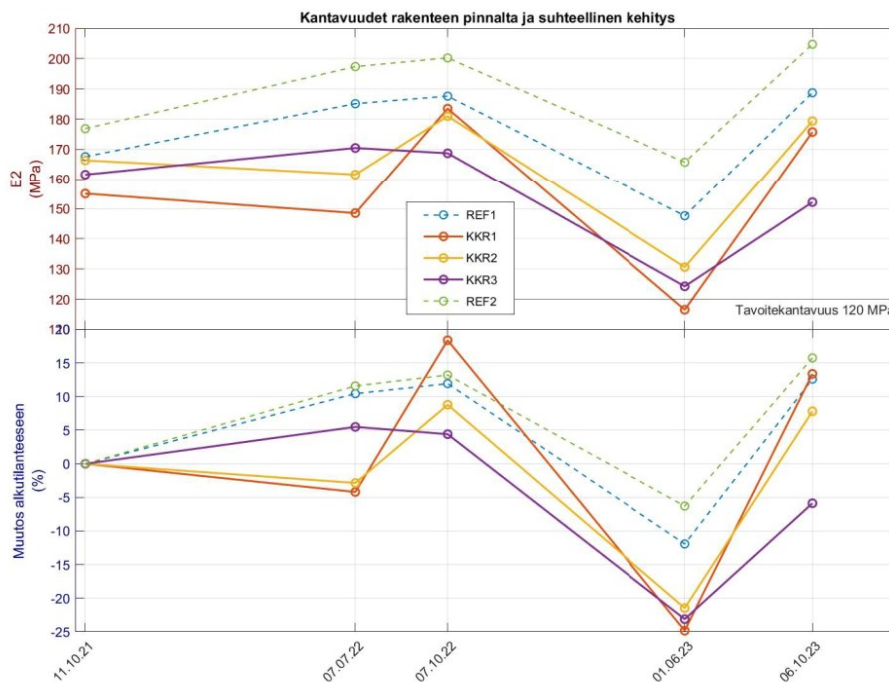
6.2.2 Riihimäki-Hikiä kevyenliikenteenväylä

Kuvassa 48 on esitetty kaikkien kevyenliikenteenväylältä tehtyjen pudotuspainolaitemittauksien tulokset. Rakenteet täyttivät kantavuusvaatimuksen lukuun ottamatta kevään 2023 mittauksia, jolloin kuonarakenteista saadut tulokset ovat paikoin sen alapuolella. Kyseisessä mittauksessa tulos on myös referenssirakenteiden huonoin. Todennäköinen syy tälle lienee keväällä tapahtunut sulamispehmeneminen, joka ei mittaushetkellä ole vielä ehtinyt tiivistyä. Tässä kohteessa erona Kuulojantiehen on raskaan liikenteen ja sen tiivistysvaikutuksen puuttuminen.



Kuva 48. Riihimäki-Hikiä kevyenliikenteenväylän kantavuusmittauksien tulokset mittauspisteen mukaan.

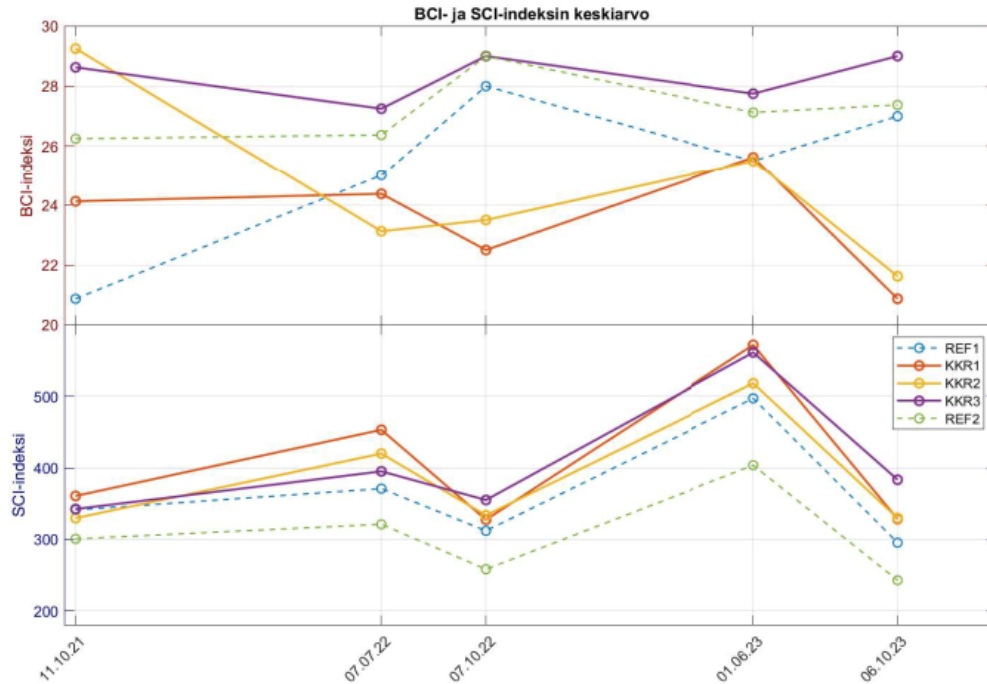
Kuvassa 49 on esitetty rakenteen jäykkyyden kehittyminen mittauskertojen mukaan sekä jäykkyyden suhteellinen muutos alkutilanteeseen. Molemmissa on eroa verrattuna Kuu-
lojantien vastaaviin mittauksiin. Referenssi- ja kuonarakenteiden jäykkyys kehitty sa-
maan tahtiin ja suhteellinen jäykkyyden muutos jää Kuulojantien rakenteita vähäisem-
mäksi. Aluksi KKR1 ja KKR2 rakenteiden jäykkyys näyttää jopa hieman alentuvan en-
simmäisen talven aikana. KKR3:n viimeinen mittaustulos on myös alkutilannetta hei-
kompi. Vaikuttaakin siltä, että kuonarakenteiden jäykkyys ei juurikaan parane ilman lii-
kenteen aiheuttamaa ulkoista kuormitusta. Pohjamaaerot eivät myöskään näy kanta-
vuustuloksissa. Pohjamaa on pehmeämpää koerakenteen loppupäässä eikä levykuor-
mituskoetta rakentamisen aikana saatu pohjamaasta tehtyä referenssirakenne 2:n alu-
eella. Toisaalta suunnitelman mukaan kevyenliikenteenväylä on koerakenteen kohdalla
penkereellä, joka tasaa pohjamaan kantavuuseroja.



Kuva 49. Riihimäki-Hikiä kevyenliikenteenväylän jäykkyyden kehitys ja muutos alkutilanteeseen.

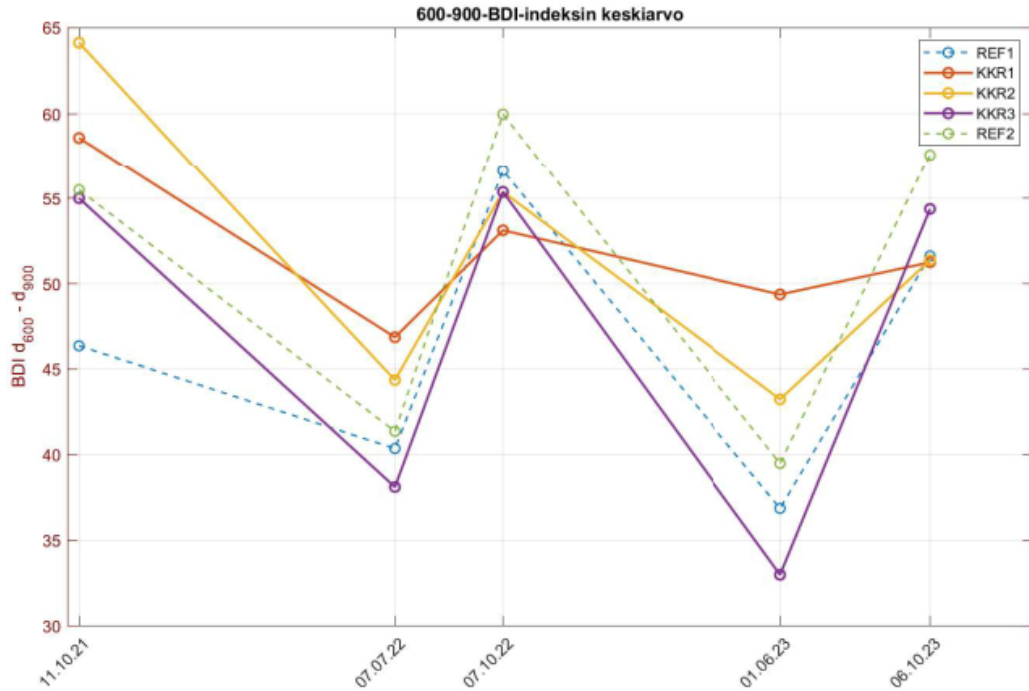
Kuvan 50 mukaisesti BCI-indeksi on kaikkein alhaisin rakenteissa, joissa suodatinkerros on tehty kuonasta. Toisaalta tässä juuri tulee pohjamaan eroavaisuudet esiin. Koerakenteen loppupään osioissa BCI on kaikkein heikoin. SCI-arvot noudattavat rakenteen jäykkyyden trendiä. Referenssirakenteiden SCI on kaikkein pienin ja pinnalta mitattu kantavuus suurin. 1.6.2023 tehty mittaus ja siinä tapahtunut kantavuuden heikkeneminen kaikissa rakennetyypeissä näkyy erityisesti SCI:n nousuna niin ikään kaikissa rakenteissa. Rakenteen pohjaosan käyttäytymistä kuvaavassa BCI-indeksissä ei vastaavaa muutosta

näy, vaan referenssirakenteiden osalta siinä on jopa hienoista parannusta edelliseen mittaukseen. Tästä voidaan päätellä ongelman olleen kyseisenä keväänä ylemmissä rakennekerroksissa, eikä ongelma koske erityisesti kuonarakenteita. Huomattakoon myös SCI- ja BCI-arvojen pysyneen alkutilanteeseen nähden suhteellisen muuttumattomina, mikä saattaa kertoa liikennekuorman tiivistävän vaikutuksen puuttumisesta kevyenliikenteenväylällä.



Kuva 50. Riihimäki-Hikiä kevyenliikenteenväylän BCI- ja SCI-indeksien keskiarvot.

Tarkasteltaessa kuvan 51 esittämää 600 ja 900 mm etäisyydellä kuormituksen keskipisteestä olevien antureiden taipumien erotusta, nähdään kaikkien rakennetyyppien noudattavan samaa kehitystä. Käyttäytyminen on tosin täysin päinvastaista SCI-indeksin kanssa. Ensimmäisen mittauksen jälkeen rakenteet, joissa kuonamateriaalia on käytetty suodatinkerroksessa vaikuttavat reagoivan olosuhteiden muutoksiin mittausten välillä vähemmän kuin rakenteet, joissa suodatinmateriaalina on hiekka. Samanlaista käyttäytymistä on havaittavissa myös Kuulojantien rakenteissa.



Kuva 51. 600 ja 900 mm etäisyydellä kuormituksen keskipisteestä olevien taipumien erotus kuvaa rakenteen alempia kerroksia Riihimäki-Hikiä kevyenliikenteenväylällä.

Kaiken kaikkiaan Riihimäki-Hikiä KLV:n mittaukset näyttävät tukevan Kuulojantien tuloksia sen johtopäätöksen osalta, että kuonarakenteiden jäykkyys kehittyi huippuunsa ensimmäisen vuoden aikana ja pysyy siinä. Tätä kirjoittaessa kevyenliikenteenväylälle oli ehditty laatia kesäkuussa 2022 vaurioinventointiraportti, jonka mukaan inventointikynnyksen ylittäviä vaurioita ei havaittu. Myöhemmissä tarkasteluissa selvinnee, oliko kesäkuussa 2023 kaikissa rakenteissa mitattu hetkellinen jäykkyyden aleneminen aiheuttanut jotain näkyviä vaurioita.

7. MITOITUSPARAMETRIEN MÄÄRITTÄMINEN

7.1 Lämpötekniikan ominaisuuksien määrittäminen takaisinlaskemalla mittauksista

7.1.1 Lämmönjohtavuus, laskentatapa I

Kun yhtälön 6 mukaista lämpötasetta tarkastellaan jäätyvässä rakenteessa, voidaan karkeasti olettaa lämpövirran jäätyneen rakennekerroksen läpi koostuvan routarajan alapuolelta virtaavasta lämmöstä sekä routarajalla jäätyvän maan jäätyislämmöstä. Maan jäätyislämmön ollessa suhteessa jäätyislämpöön vähäistä, voidaan se tässä jättää tarkastelun ulkopuolelle. Tällöin yhtälö 6 saa muodon:

$$dQ_- = dQ_f + dQ_+, \text{ (Wh/m}^2\text{)} \quad (28)$$

jossa

dQ_- on tasealueelta ylöspäin poistuva lämpö

dQ_f tasealueella vapautuva maaperän jäätyislämpö

dQ_+ tasealueelle virtaava sulan maan jäätyislämpö routarajan alapuolella

Sovellettaessa kaavan 4 Fourierin yhtälöä kaavaan 28, saadaan johdettua seuraava differentiaaliyhtälö:

$$\lambda_f \cdot G_-(t) \cdot dt = \lambda_u \cdot G_+(t) \cdot dt + q_f \cdot dz \quad (29)$$

jossa

λ_f jäätyneen maakerroksen lämmönjohtavuus (Wh/mK)

$G_-(t)$ lämpötilagradientti tarkasteltavassa jäätyneessä kerroksessa ajanhetkellä t ($^{\circ}\text{C/m}$)

λ_u sulan maakerroksen lämmönjohtavuus (Wh/mK)

$G_+(t)$ lämpötilagradientti tarkasteltavassa kerroksessa routarajan alapuolella ajanhetkellä t ($^{\circ}\text{C/m}$)

q_f jäätyislämpö (sulamislämpö) tarkasteltavassa kerroksessa tilavuutta kohti, Wh/m³

Separoituva differentiaaliyhtälö voidaan integroida puolittain koko tarkasteltavan ajanjakson sekä roudansyvyyden muutoksen yli, jolloin yhtälöstä saadaan ratkaistua jäätyneen maakerroksen lämmönjohtavuus:

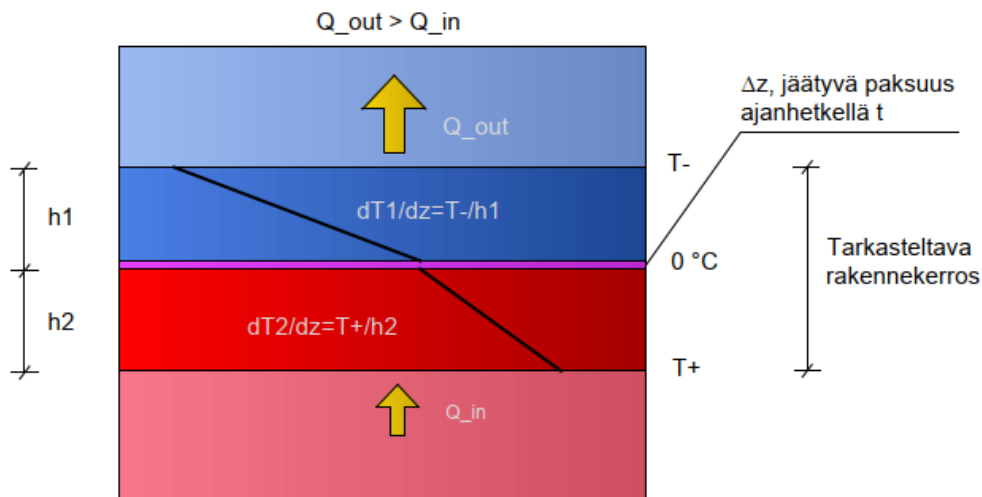
$$\lambda_f = \frac{\lambda_u \cdot \int_{\Omega} \mathbf{G}_+(t) \cdot dt + q_f \cdot \int_l dz}{\int_{\Omega} \mathbf{G}_-(t) \cdot dt} \quad (30)$$

jossa

Ω tarkasteltava ajanjakso (h)

l roudan syvyyden muutos tarkasteltavana ajanjaksona (m)

Lämpötilagradientit tarkasteltavassa kerroksessa saadaan laskettua koerakenteen lämpötilamittauksista kahden tunnin välein. Samalla kahden tunnin aikajaksolla voidaan määrittää roudan syvyyden muutos. Roudan syvyyden muutos voi olla positiivinen tai negatiivinen. Tällöin kaavassa olevan jäätymislämmön etumerkki määräytyy sen mukaan, tapahtuuko kerroksessa jäätymistä vai sulamista. Tarkastelun aloitusajankohta on se ajanhetki, jolloin routaraja koerakenteessa saavuttaa tarkasteltavan kerroksen yläpinnan. Tarkastelu päätetään ajanhetkellä, kun routaraja saavuttaa tarkasteltavan kerroksen alapinnan. Huomataan myös, että lämpötaseyhtälö toteutuu silloinkin, kun roudan syvyys vaihtelee tarkasteltavassa kerroksessa edestakaisin, eli tapahtuu sekä jäätymistä, että sulamista. Myöskään roudan syvyyden jatkuva muutos laskenta-ajanjaksolla ei ole edellytys lämpötaseen toteutumiseksi. Kuvassa 52 on havainnollistettu laskenta-parametrien määrittystä eräällä ajanhetkellä t , kun tarkasteltava kerros on jäähtynyt kerroksen puolivälin korkeudelle.



Kuva 52. Lämpötilagradientin määrittäminen ajanhetkellä t jäätyneessä ja sulassa osassa tarkasteltavaa kerrosta.

Tehdään vielä yksinkertaistus, että $dt \approx \Delta t_i$ ja $dz \approx \Delta z_i$. Lisäksi tiedetään, että lämpötilamittauksia on kahden tunnin välein, jolloin $\Delta t_i = \Delta t = 2$ h. Nyt lämpövirtojen kokonaismäärät tarkasteluajanjaksolla saadaan summaamalla kullakin kahden tunnin aika-askeleella virrannut lämpömäärä yhteen, jolloin yhtälöstä 30 voidaan johtaa laskentamallin ydin:

$$\lambda_f = \frac{\lambda_u \cdot \Delta t \cdot \sum_{i=1}^n G_+(t_i) + w \cdot \rho_d \cdot L_w \cdot \sum_{i=1}^n \Delta z_i}{\Delta t \cdot \sum_{i=1}^n G_-(t_i)} \quad (31)$$

jossa

λ_f	tarkasteltavan materiaalin lämmönjohtavuus jäätyneenä (Wh/mK)
$G_-(t_i)$	lämpötilagradientti tarkasteltavan kerroksen jäätyneessä osassa ajanhetkellä t_i (°C/m)
λ_u	tarkasteltavan materiaalin lämmönjohtavuus sulana (Wh/mK)
$G_+(t_i)$	lämpötilagradientti tarkasteltavan kerroksen sulassa osassa routarajan alapuolella ajanhetkellä t_i (°C/m)
Δt	aika-askel (2 h)
Δz_i	routan syvyyden muutos aika-askeleella t_i (m)
n	aika-askeleiden lukumäärä tarkasteluajanjaksolla
w	tarkasteltavan materiaalin vesipitoisuus paino-osina
ρ_d	tarkasteltavan materiaalin kuivairtoteiheys (kg/m ³)
L_w	veden jäätyislämpö (≈ 93 Wh/kg)

Laskentamalli toteutettiin Matlab-ohjelmalla. FinMeasin palvelimelta ladattu koerakenteen lämpötilamittausdata luettiin taulukkona Matlabiin. Lämpötilan nollaraja syvyyden suhteen kullakin ajanhetkellä määritettiin antureiden lukemien perusteella interpoloimalla antureiden väliltä, jos lämpötilan nollapiste ei sattunut sillä hetkellä olemaan jonkin anturin kohdalla. Näin saatiin luotua laskentataulukko, jossa joka rivillä oli aika sekä sitä vastaava roudansyvyys. Roudansyvyyden perusteella laskettiin lämpötilagradientit jäätyneessä maassa routarajan yläpuolella ja sulassa maassa routarajan alapuolella. Näin taulukkoon saatiin lisättyä vielä lämpötilagradienttien arvot jokaisella ajanhetkellä.

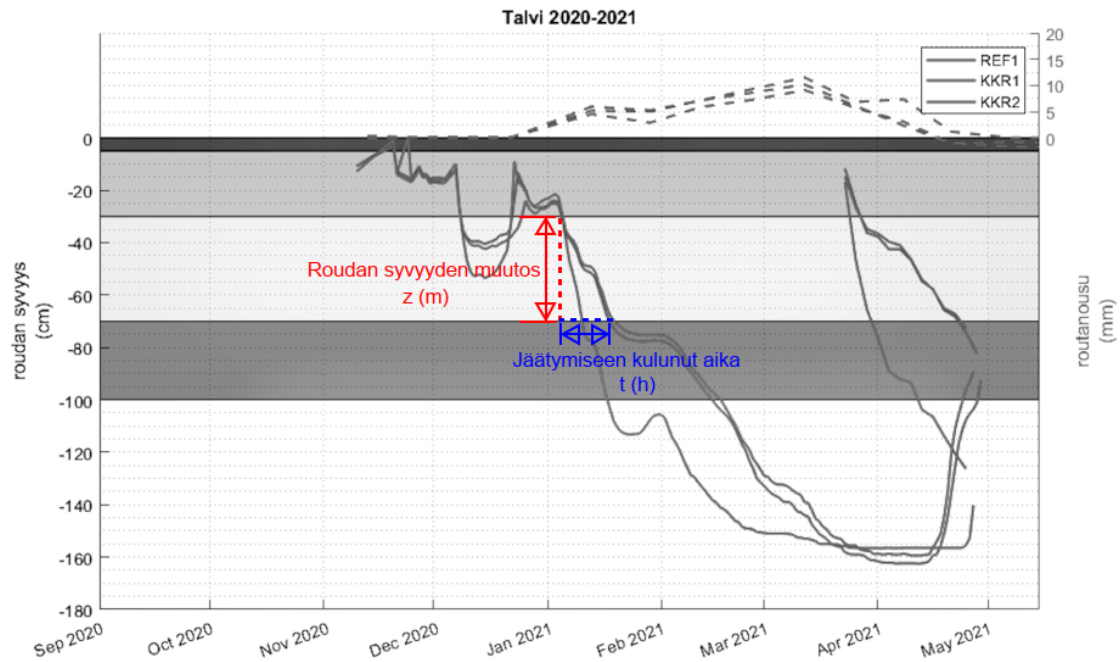
Yhtälön 31 implementointia varten luotiin Matlabiin funktio, joka ottaa syötteen halutun kerroksen rajat syvyyden suhteen, laskenta-ajanjakson sekä kerroksen materiaali-parametreista sulan tilan lämmönjohtavuuden, kuivairtoteiheyden ja vesipitoisuuden. Funktio lukee yllä mainitusta laskentataulukosta tarvittavat tiedot halutulta ajanjaksolta ja palauttaa jäätyneen tilan lämmönjohtavuuden tarkastellun kerroksen materiaalille.

Laskenta tehtiin erikseen jokaiselle sitomattomalle rakennekerrokselle kaikkina kolmena talvena molemmille kuona- ja referenssirakenteille. Materiaalien kuivairtoteiheydet saatiin syksyllä 2020 rakentamisen yhteydessä tehdyistä Troxler-mittauksista korjattuna todellisella vesipitoisuudella (Söderholm, 2020) Troxlerilla mitattuja kuivairtoteiheyksiä ei tietyvästi ole kalibroitu millään muulla menetelmällä, mutta verrattaessa laboratoriossa määritettyihin maksimikuivairtoteiheyksiin, tulokset vaikuttavat uskottavilta. Aiemmissä tutkimuksissa vesivolumetrimittauksiin verrattuna Troxlerilla saadut märkätiheydet pohjakuonassa ovat olleet oikean suuntaisia. (Lehtonen, 2010) Vesipitoisuudet arvioitiin 29.6.2023 otetuista rakennenäytteistä määritettyjen arvojen mukaan. Sulan tilan lämmönjohtavuudet saatiin kuonamateriaaleille tehtyjen laboratoriokokeiden tuloksista. (Söderholm, 2020) Laboratoriokokeet on tehty eri vesipitoisuudella (taulukko 3) kuin laskennassa on käytetty. Arvioitaessa lämmönjohtavuuksia kaavalla 13, voidaan todeta vesipitoisuuksien eron muuttavan lämmönjohtavuuksia alle 5 %. Näin pieni sulan tilan lämmönjohtavuuden muutos vaikuttaa laskentamallissa hyvin vähän. Kantavan kerroksen murskeen sekä referenssirakenteen jakavan ja suodatinkerroksen materiaalien sulan tilan lämmönjohtavuudet arvioitiin kirjallisuudesta löytyneiden arvojen keskimääräisenä lukemana. (Nurmikolu & Kolisoja, 2002) (VTT, 2007) (Leivo & Rantala, 2000) Laskennan lähtöarvot ovat taulukossa 6.

Taulukko 6. Laskennassa lähtöarvot.

Lähtöarvo	JpKu-0/32 jakava	JpKu-0/16 suodatin	JpKu-0/2 suodatin	Sr-0/100 jakava	Hk-0/20 suodatin	KaM-0/32 kantava
w%	10,5	16,4	21,5	2,5	2,1	2,2
ρ_d (kg/m ³)	1880	1700	1500	2000	1900	2000
λ_u (W/Km)	0,85	0,9	0,65	1,8	1,7	1,8

Kappaleessa 6 esitettyjen roudan syvyyden kuvaajien perusteella määritettiin jokaiselle koerakenteelle kunkin kerroksen jäätyneen alkamisen ajankohta sekä aika, jolloin kerros oli kokonaan jäässä. Tämä toistettiin jokaisen havaintotalven kohdalla. Käytännön syistä tarkastelua ei kuitenkaan voitu tehdä heti kerroksen jäätyneestä alkaen, sillä lämpötilagradientin arvoa ei pystytty tarkasti määrittämään jäätyneessä kerroksessa, kun kerros ei ollut vielä alkanut jäätyä. Muutoinkin lämpötilagradientit piti laskea siten, että lämpötilaero määritettiin vähintään yhden anturivälin etäisyydeltä virhemarginaalin pienentämiseksi. Lämpötila-arvojen interpolointi antureiden väliltä gradienttien laskemisessa aiheutti liikaa heilahtelua gradienttien arvoihin kahden tunnin mittausväleillä. Kuva 53 selventää laskenta-ajanjakson määräytymistä jakavan kerroksen jäätyneessä kuonakerroksella 1 osalta. Käytännössä laskentafunktio ratkaisi tarkasteluajankohdan syötettyjen kerrosrajojen ja tarkastelun kohteena olevan talven perusteella.



Kuva 53. Laskenta-ajanjakson määräytyminen kerroksittain.

Laskentamallin periaatteella olisi voitu tehdä sama arviointi myös roudan sulamisen yhteydessä. Asiaa hankaloittaa kuitenkin se tosiasia, että roudan sulaminen keväällä tapahtuu sekä maan pinnalta että routarajan alapuolelta käsin. Tämä hankaloittaa lämpövirran suunnan arvioimista jäätyneessä maassa. Routarajan alapuolelta tapahtuva sulaminen voidaan vielä järkevästi mallintaa sen tasaisemman luonteen vuoksi, mutta maan pinnalta käsin virtaava lämpö vaihtelee voimakkaasti keväällä lisääntyvän auringon säteilyenergian vuoksi. Lisäksi yöpakkasten aiheuttama maan pintakerrosten jäätyminen muuttaa lämmönjohtavuutta ja siten lämpövirtaa tarkasteltavalle tasealueelle.

Laskennan tuloksena saatiin jäätyneen tilan lämmönjohtavuusarvot kaikille kuonamateriaaleille sekä referenssirakenteen soralle ja hiekalle. Vertailun vuoksi laskettiin myös kantavan kerroksen murskeen lämmönjohtavuus kaikkien rakenteiden osalta. Seuranta-ajanjakson talvien ollessa erilaisia oli tuloksissa odotetusti vuosittaista vaihtelua. Lämmönjohtavuudet seurantalavikohtaisesti sekä niiden keskiarvot on kerätty taulukkoon 7.

Taulukko 7. Jäätyneen tilan lämmönjohtavuudet laskettuna talvikohtaisesti rakennemateriaaleille.

λ_f (W/Km)	JpKu-0/32		JpKu-0/16	JpKu-0/2	Sr-0/100	Hk-0/20	KaM-0/32
Talvi	KKR1	KKR2	KKR1	KKR2	REF1	REF1	Kaikki
2020-2021	1,60	1,34	1,70	1,19	1,86	1,96	2,03
2021-2022	1,27	1,28	1,09	1,08	1,81	1,80	2,15
2022-2023	1,27	1,48	1,54	1,30	2,24	2,03	2,14
Keskiarvo	1,37	1,36	1,45	1,19	1,96	1,93	2,11

Laskentamallissa tulos riippuu tutkittavan materiaalin jäätymislämmöstä. Sen määräävät vesipitoisuus ja kuivairtoteiheys. Vesipitoisuuden voidaan olettaa pysyvän rakenteessa lähellä rakennenyhteistä mitattuja arvoja. Herkkyystarkastelun perusteella yhden prosenttiyksikön muutos vesipitoisuudessa vaikuttaa lämmönjohtavuuteen alle 0,05 W/Km. Kuivairtoteiheyden muuttuessa 100:lla kg/m³ vaikutus on samaa luokkaa.

7.1.2 Lämmönjohtavuus, laskentatapa II

Kun tarkastellaan koko rakenteen läpi virtaavaa lämpö määrää aikayksikössä silloin, kun rakenteessa ei tapahdu veden olomuodon muutosta, voidaan energian säilymislain nojalla todeta rakenteeseen ja siitä ulos virtaavan lämpö määrän olevan samat. Lämpövirran aiheuttaa rakenteen ala- ja yläpintojen välinen lämpötilaero. Tällainen tarkastelu olettaa lämpövirran olevan stationääristä eli lämpöä ei varastoidu tasealueelle. Seuranta-ajan lämpötilakuvaajista huomataan, ettei näin kuitenkaan ole. Lämpövirtaa epästationääritilassa voidaan kuvata yksiulotteisessa mallissa yhtälöllä (Kujala, 1994):

$$-\frac{\partial q_z}{\partial z} \cdot dz + q \cdot dz = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dz \quad (32)$$

jossa

$\partial q_z / \partial z$	yksikkötilavuudessa tapahtuva energian kehitysnopeus
q	tasealueen sisällä tapahtuvan faasimuunnoksen energia
$\partial T / \partial t$	lämpötilan muutosnopeus
ρ	aineen tiheys
c	aineen ominaislämpökapasiteetti

Lämpövirran mallintaminen mittauksista yllä olevan yhtälön mukaisesti edellyttäisi tarkasteltavan materiaalin tilavuuslämpökapasiteetin tuntemista. Kuonamateriaaleille ei tällaista tietoa ollut saatavilla. Tilavuuslämpökapasiteetin arvioiminen jollain tarkkuudella taas toisi tarkasteluun lisää muuttujia. Niinpä tämän kappaleen laskentamallissa oletuksena on pitkän seuranta-ajan vaikutus lämpötaseeseen siten, että lämmön varastoituminen eli jäätyneen maan jäähtyminen ja lämpeneminen kumoavat toisensa tarkastelu-ajanjaksolla tai niiden merkitys koko seuranta-ajalla jää pieneksi, jolloin tarkastelu voidaan tehdä stationääritilassa.

Fourierin lain mukaan lämpövirta pinta-alayksikössä riippuu ainoastaan lämpötilagradientista ja lämmönjohtavuudesta. Tarkastellaan lämpövirtaa kahden päällekkäisen kerroksen läpi. Merkitään kummankin kerroksen läpi kulkeva lämpövuoto yhtä suureksi, jolloin päädytään yhtälöön:

$$q_1 = q_2 \Rightarrow \lambda_1 \frac{dT_1}{dz} = \lambda_2 \frac{dT_2}{dz} \quad (33)$$

jossa

q_k	lämpövuoto kerroksen k läpi (W/m^2)
dT_k/dz	lämpötilagradientti kerroksessa k ($^{\circ}C/m$)
λ_k	lämmönjohtavuus kerroksessa k (Wh/mK)
k	kerroksen numero

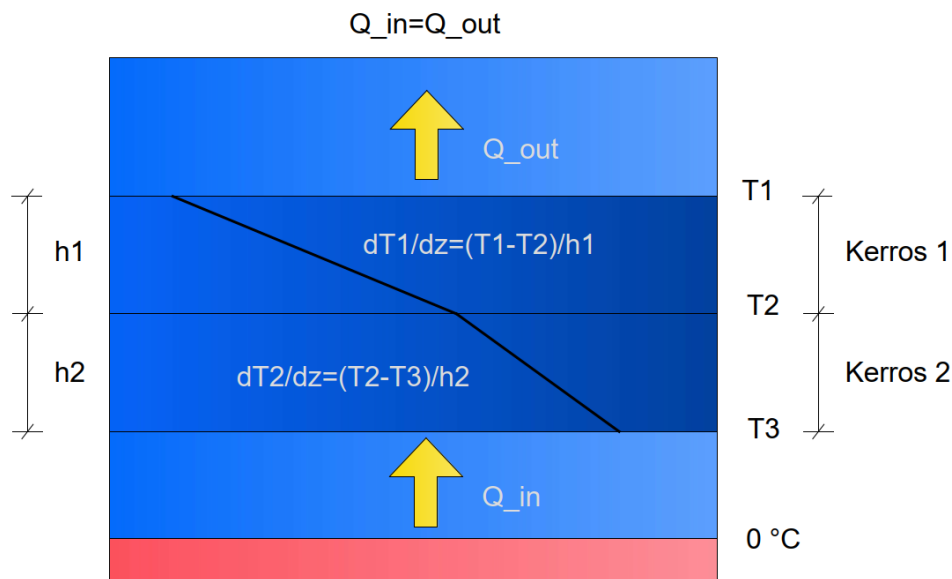
Nyt lämpötilamittauksista voidaan laskea päällekkäisten kerrosten lämpötilagradienttien suhde tarkasteluajanjaksolla kahden tunnin aika-askeleissa:

$$\frac{\frac{dT_1}{dz}}{\frac{dT_2}{dz}} = \frac{\sum_{i=1}^n G_1(t_i)}{\sum_{i=1}^n G_2(t_i)} \quad (34)$$

jossa

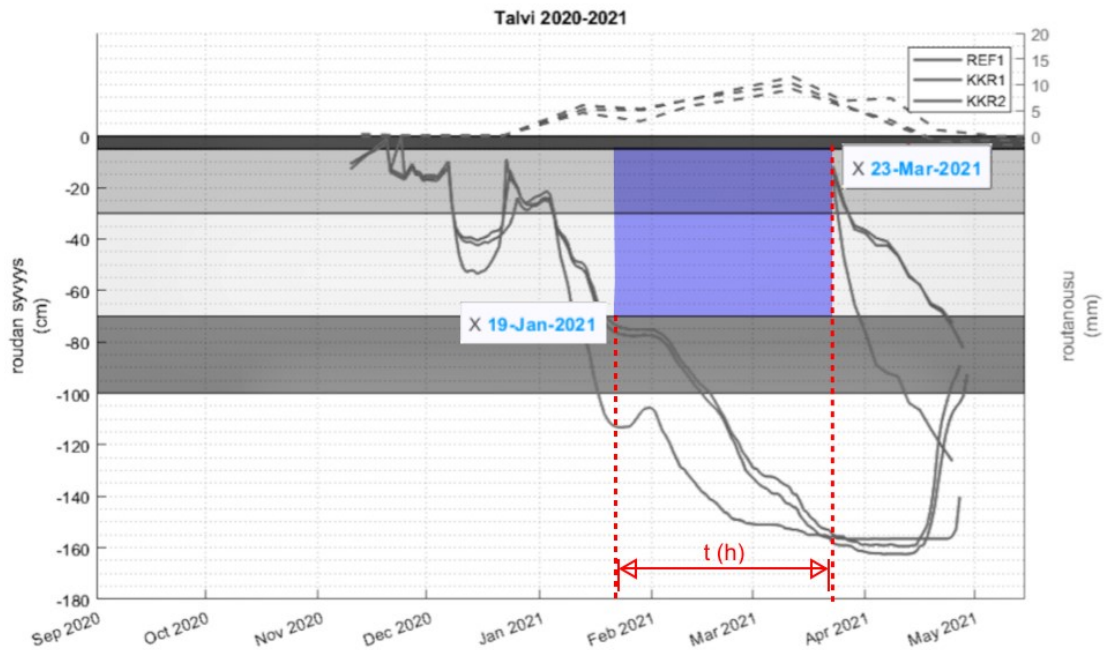
$G_k(t_i)$	lämpötilagradientti kerroksessa k ajanhetkellä t_i ($^{\circ}C/m$)
n	aika-askelten lukumäärä tarkasteluajanjaksolla

Yhdistämällä yhtälöt 33 ja 34 saadaan ratkaistua toisen kerroksen lämmönjohtavuus, kun toinen tiedetään. Edellytyksenä on valita tarkastelujakso siten, että päällekkäiset kerrokset ovat molemmat jäätyneenä koko tarkastelujakson ajan, jolloin lämpöä ei vapaudu tai varastoidu faasimuunnoksen seurauksena. Kuvassa 54 on esitetty laskennan periaate. Kuvan tilanteessa jäätyneessä maassa lämpötila $T_1 < T_3$, jolloin lämpövirta suuntautuu ylöspäin.



Kuva 54. Lämpövirrat jäätyneessä maassa ja lämpötilagradienttien määrittäminen ajankohdalla t .

Oletuksena on pidemmän tarkastelujakson vaikuttavan ratkaisun tarkkuutta lisäävästi. Tarkastelujakson valinta tehtiin roudan syvyyden kuvaajista valitsemalla sellainen aikaväli, jolloin molemmat tarkasteltavat kerrokset olivat jäässä. Kuva 55 selvittää esimerkiksi jakavan ja kantavan kerroksen tarkastelujakson valintaa kuonakoerakenteessa talvella 2020–2021.



Kuva 55. KKR1 kantavan ja jakavan kerroksen laskenta-ajanjakson määrittäminen kuvasta talvelle 2020-2021.

Tämäkin laskentamalli implementoitiin Matlabin lukemalla kaikkien kolmen lämpötila-anturin data omiksi taulukoikseen. Taulukko-datasta muodostettiin joka kerrokselle gradienttitaulukko, jossa on kaikkien kerrosten lämpötilagradientin arvo kahden tunnin välein. Gradientti laskettiin määrittämällä lämpötilaero kerrosrajoilla ja jakamalla se kerrospaksuudella kuvan 54 periaatteen mukaisesti. Matlabin luotiin laskentafunktio, joka ottaa syötteenä aikavälin ja kahden päällekkäisen kerroksen tunnuksen. Funktio summaa kerrosten lämpötilagradienttien arvot kahden tunnin aika-askeleella koko valitulla ajanjaksolla ja palauttaa niiden suhteen kaavan 34 mukaisesti.

Laskennan tulokset on kirjattu taulukkoon 8. Taulukon lukema tarkoittaa materiaalin lämmönjohtavuuden suhdetta ylemmän kerroksen materiaalin lämmönjohtavuuteen. Esimerkiksi jakavan kerroksen 0/32 mm kuonalajitteen lämmönjohtavuuden suhde on laskettu vertaamalla kantavan kerroksen kalliomurskeen lämmönjohtavuuteen. Taulukosta

huomataan heti, että talven 2022–2023 mittaukset poikkeavat muista talvista. Tämä oli oikeastaan odotettu tulos tällä laskentamenetelmällä, johtuen riittävän pitkän ehjän pakkasjakson puutteesta kyseisenä talvena. Varsinkin suodatinkerroksen jäätyminen kuonarakenteissa oli puutteellista, jolloin lämpötilagradientin arvo jouduttiin laskemaan osittain jäätyneen kerroksen mukaan. Roudan syvyyden edestakainen vaihtelu referenssirakenteessa ja kuonarakenteiden suodatinkerroksissa oli kyseisenä talvena niin suurta, että niistä saadut tulokset jouduttiin hylkäämään jatkolaskelmista.

Taulukko 8. Kerrosmateriaalin lämmönjohtavuuden suhde ylemmän kerroksen lämmönjohtavuuteen. Epäkelpot arvot merkitty punaisella. Ne eivät ole mukana keskiarvossa eivätkä jatkolaskelmissa.

Talvi	JpKu-0/32		JpKu-0/16	JpKu-0/2	Sr-0/100	Hk-0/20
	KKR1	KKR2	KKR1	KKR2	REF1	REF1
2020-2021	0,48	0,60	0,95	0,89	0,88	0,99
2021-2022	0,33	0,54	0,97	0,78	1,02	0,89
2022-2023	0,78	0,81	1,14	1,13	0,59	1,18
Keskiarvo	0,53	0,65	0,96	0,84	0,95	0,94

Yllä olevien arvojen perusteella tuntemattomat lämmönjohtavuudet ratkaistiin yhtälöllä:

$$\lambda_1 = \lambda_2 \frac{\frac{dT_2}{dz}}{\frac{dT_1}{dz}} \quad (35)$$

jossa

λ_1 tuntematon lämmönjohtavuus (Wh/mK)

λ_2 tunnetun materiaalin lämmönjohtavuus (Wh/mK)

$\frac{dT_2}{dz} / \frac{dT_1}{dz}$ lämpötilagradienttien suhde

Kuten yllä olevasta kaavasta käy ilmi, on tämän laskentamallin etuna, ettei tutkittavan materiaalin ominaisuuksista tarvitse tietää mitään lämmönjohtavuuden selvittämiseksi. Merkittävin virhelähde muodostuu vastaavasti tunnetun materiaalin lämmönjohtavuuden arviosta sekä ilman lämpötilan suuresta vaihtelusta laskenta-ajanjaksolla, joka lisää materiaalien tilavuuslämpökapasiteettien vaikutusta todellisiin lämpövirtoihin. Lämmönjohtavuudet laskettiin perustana kantavan kerroksen kalliomurskeen tunnettu lämmönjohtavuus. Siten saatiin yhtälön 35 avulla laskettua jakavan kerroksen 0/32 mm kuonan lämmönjohtavuus. Kalliomurskeen lämmönjohtavuuden jäätyneenä arvioitiin kirjallisuuden ja laskentavan I tuloksen perusteella olevan keskimäärin 2,0 Wh/mK. Suodatinkerroksen

lämmönjohtavuudet laskettiin jakavan kerroksen tuloksen perusteella. Jäätyneen tilan lämmönjohtavuudet kaikkien talvien keskiarvoina on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 9. Jäätyneen tilan lämmönjohtavuudet laskettuna kalliomurskeen tunnetun lämmönjohtavuuden perusteella seurantalvien keskiarvona.

λ_f (W/Km)	JpKu-0/32	JpKu-0/16	JpKu-0/2
	1,18	1,13	0,98

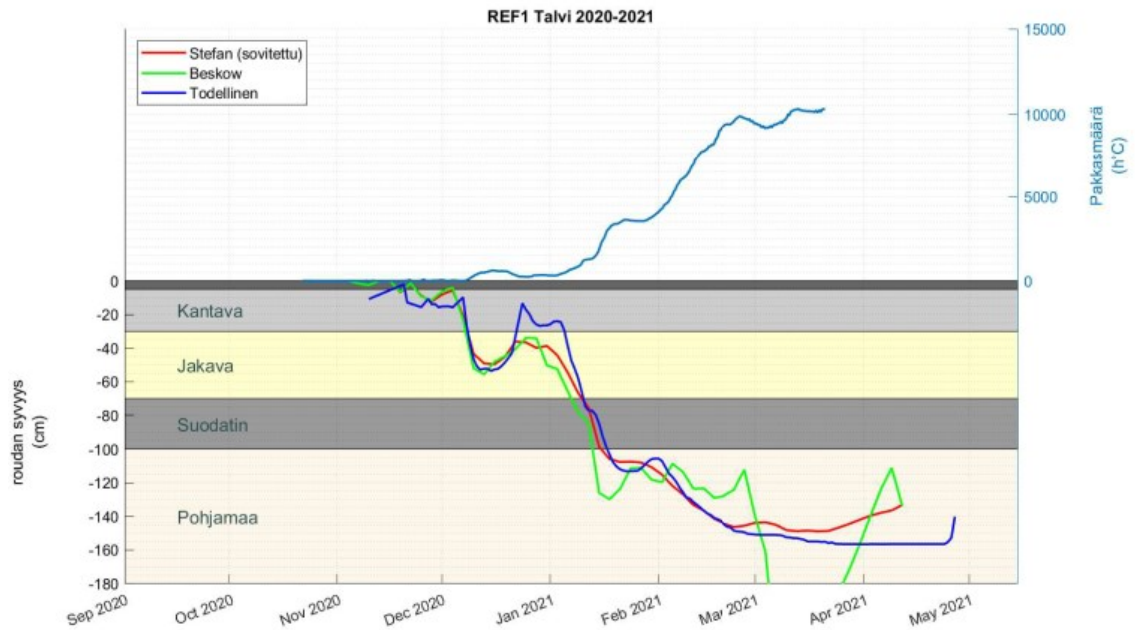
7.1.3 Tulosten vertailu

Edellä esitetyt laskentamenetelmät lämmönjohtavuuden määrittämiseksi tähtäävät ensisijaisesti vertailukelpoisten parametrien tuottamiseen, jotta kuonarakenteen lämmöneristyskykyä voitaisiin arvioida suhteessa tunnettuihin luonnonmateriaaleihin, kuten kalliomurskeeseen ja hiekkaan. Tarkoituksena ei niinkään ole pyrkiä selvittämään absoluuttisen tarkkoja materiaaliparametreja. Näiden menetelmien etuna on ainakin teoriassa saada yleisluontoisempia laskenta-arvoja kuin vertailemalla pelkästään kuonarakenteen ja referenssirakenteen jäätymiseen tarvittavaa pakkasmäärää. Tämä etenkin siitä syystä, että referenssirakenne, jossa lämpötila-anturit ovat, sijaitsee erilaisella pohjamaalla kuin kuonarakenteet. Lämpövirrat kerroksissa jo itsessään sisältävät pohjamaan vaikutuksen ylempien rakenteiden jäätymiseen, jolloin niiden perusteella mallinnettujen arvojen pitäisi olla yleistettävissä erilaisiin maaperäolosuhteisiin.

Analyttiset menetelmät

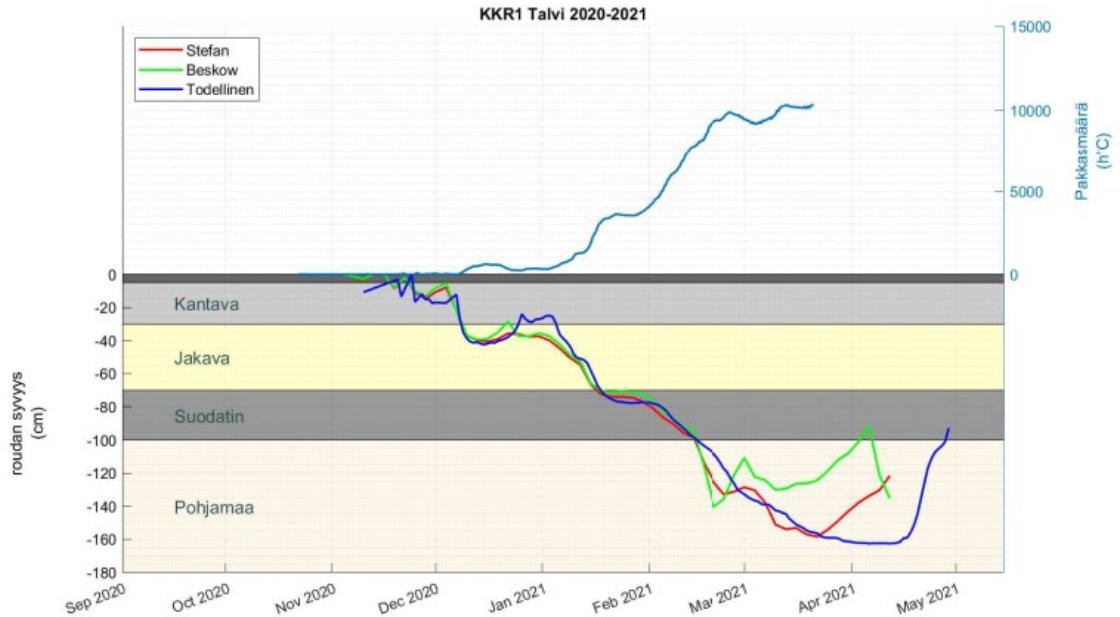
Jotta eri rakennemateriaalien jäätymiskäyttäytymisen vertailu olisi mielekäästä, tulisi käytössä olla sellainen malli, jonka käyttäytyminen vastaa sekä referenssi- että kuonarakenteen todellista jäätymiskäyttäytymistä. Kappaleessa 4 esitetyt roudan syvyyden laskentamallit ovat tähän tarkoitukseen tarpeeksi yksinkertaisia niiden huomioidessa mahdollisimman vähän eri muuttujia. Niiden perusteella pystyttiin luomaan Matlabiin funktiot, joilla roudan syvyyden mallintaminen onnistui kappaleessa 6 esitetyn kumuloituvan pakkasmäärän sekä ajan funktiona. Yhtälöitä 19, 20 ja 21 soveltaen kirjoitettiin roudan syvyyden laskentamalli sekä Stefanin että Beskowin laskentamenetelmille. Kuten kappaleessa 4 todettiin, antaa Stefanin malli liian suuria roudan syvyyksiä alhaisen vesipitoisuuden omaavissa maissa. Tämä tuli ilmi mallinnettaessa roudan syvyyttä referenssirakenteessa, joka koostuu suhteellisen kuivista luonnonkiviaineksista. Roudan syvyyttä mallinnettiin kaikkina kolmena talvena ja Stefanin mallin lämmönjohtavuuden arvoja jouduttiin alentamaan keinotekoisesti, jotta malli vastaisi todellista käyttäytymistä. Kuvassa 56 nähdään myös Beskowin mallinnus, joka vastaa todellista käyttäytymistä paremmin

ilman mallinnusparametrien keinotekoista sovitusta. Pohjamaan osalta parametrit valittiin sen tarkemmin miettimättä, sillä arvioitaessa roudan syvyyttä kerroksellisessa rakenteessa osittaispakkasmäärämenetelmällä yhtälön 19 mukaan, ei pohjamaan ominaisuudet vaikuta ylempien kerrosten jäätymiseen tarvittavaan pakkasmäärään.



Kuva 56. Laskennallinen ja todellinen roudan syvyys referenssirakenteessa talvella 2020–2021.

Kuonarakenteiden jäätymiskäyttäytymistä mallinnettaessa huomattiin kummankin laskentamenetelmän vastaavan yllättävän hyvin todellista roudansyvyyttä. Kuvasta 57 käy ilmi kummankin laskentamenetelmän ennustavan koko rakenteen jäätymisen ajankohdan hyvin lähelle todellista kuonarakenteessa 1 ensimmäisenä seurantalvena. Muiden talvien ja rakenteiden kuvaajat on esitetty liitteessä C. Laskentaparametreina käytettiin laskentatavalla II määritettyjä jäätyneen tilan lämmönjohtavuuksia sekä taulukon 6 arvoja. Tästä vedettiin johtopäätös, että lämmöneristävyyden vertailu voitaisiin tehdä näitä arvoja käyttäen.



Kuva 57. Laskennallinen ja todellinen roudansyvyys kuonakoerakenteessa 1 talvella 2020–2021.

Routamallinnus elementtimenetelmällä

Jotta takaisinlaskentamenetelmien todenmukaisuutta voitaisiin arvioida toista kautta, tehtiin mallinnus vielä Geostudion Temp/W-ohjelmalla. Geostudio on geotekninen mallinnus- ja laskentaohjelmisto, johon kuuluu maaperän lämpö- ja routailmiöiden mallinnukseen tarkoitettu lisäosa Temp/W. Temp/W perustuu elementtimenetelmään (FEM) ja mallinnus voidaan tehdä yksi-, kaksi, tai kolmiulotteisesti. Analyysi voidaan suorittaa sekä stationääri- että epästationääritilassa. Lämpökäyttäytymisen mallintamiseen ohjelmassa on valittavissa muutama eri malli, joista monimutkaisemmat pyrkivät realistisempaan lopputulokseen suuremmalla laskentaparametrien määrällä. (GEO-SLOPE International, Ltd., 2014)

Tässä työssä laskenta päädyttiin tekemään epästationääritilassa Simple thermal -mallilla. Ohjelmassa se tarkoittaa lämpövirran mallintamista elementtien solmupisteiden välillä ratkaisemalla kaavan 32 periaatteen mukaisen yhtälön pohjalta muodostettua yhtälösystemiä numeerisesti aika-askeleittain. Simple thermal-mallin parametreja ovat rakennemateriaalien lämmönjohtavuudet ja tilavuuslämpökapasiteetit sulana ja jäätyneenä sekä vesipitoisuus. (GEO-SLOPE International, Ltd., 2014) Geometriaksi valittiin yksiulotteinen geometria, jolloin lämmön siirtymien mallissa voi tapahtua vain pystysuunnassa. Tällöin oletetaan tien olevan äärettömän pitkä ja leveä sekä täysin homogeeninen.

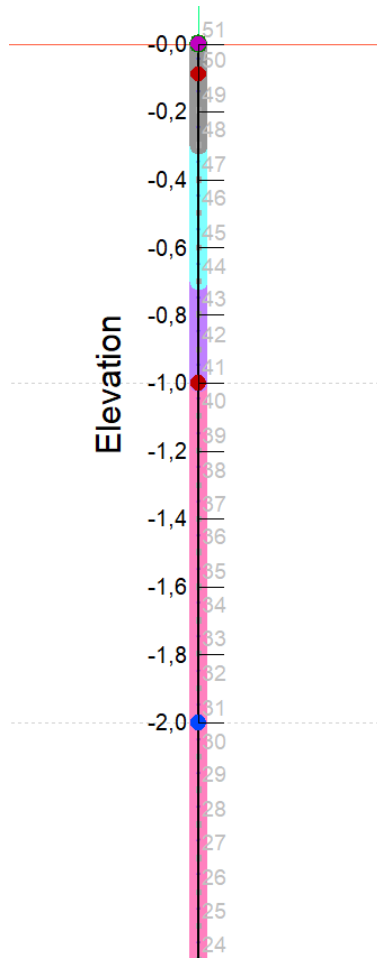
Käytännössä tarkastelualue diskretoitiin 10 cm pituisilla yksiulotteisilla janaelementeillä. Kuvassa 58 on ruutukaappaus elementtimallista. Kaikille kolmelle koerakenteelle luotiin

vastaavanlaiset mallit. Reunaehdoiksi kuhunkin malliin luettiin ilman lämpötila sekä alimman ja ylimmän anturin lämpötilatiedot kolmen mittausvuoden ajalta. Ohjelma muodosti lämpötilatiedoista askelfunktiot ajan suhteen, jolloin lämpötilalukema elementtimallin halettuihin solmupisteisiin saatiin kahden tunnin välein muuttuvina vakioarvoina. Maan pinnalla olevaan solmuun nro: 51 sidottiin ulkolämpötila-anturin lukema. Tiedossa oli, ettei maanpinnan lämpötila vastaa aina ilman lämpötilaa, joten solmu 50 sidottiin 9 cm syvyydellä olevan anturin lukemaan. Mallin parametreina käytettiin takaisinlaskennoista saatuja lämmönjohtavuuksia, mitattuja vesipitoisuuksia sekä kaavoilla 8 ja 9 arvioituja tilavuuslämpökapasiteetteja. Kyseiset yhtälöt on tehty kiviainesten ominaisuuksia ajatellen. Niitä jouduttiin kuitenkin käyttämään myös kuonamateriaaleille paremman arvion puuttuessa. Laskennan lähtöarvot eri materiaaleille ovat taulukossa 10. Ohjelmalla saatiin ratkaisuna lämpötilalukema jokaisessa solmupisteessä yhden päivän välein kolmen vuoden ajalta.

Taulukko 10. Temp/W-laskennan lähtöarvot eri materiaaleille. Kuonamateriaaleille laskenta on tehty kummankin takaisinlaskentamallin antamalla lämmönjohtavuuksilla.

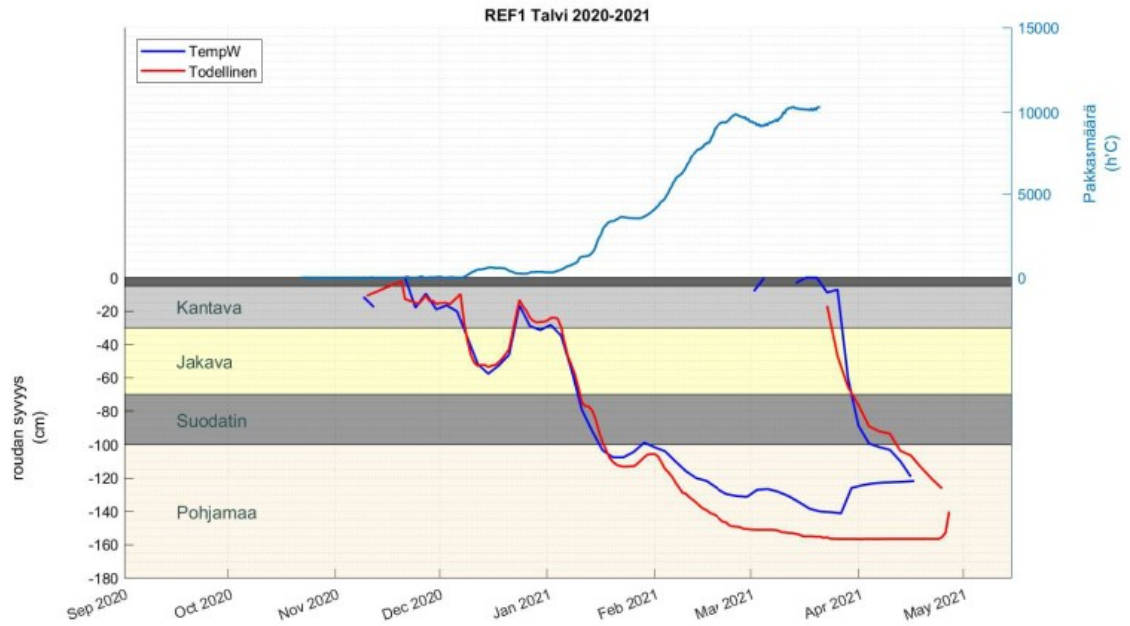
	JpKu 0/32		JpKu 0/16		JpKu 0/2		KaM 0/32	Sr 0/100	Hk 0/20	Pohjamaa	
	Tapa I	Tapa II	Tapa I	Tapa II	Tapa I	Tapa II	Kantava	Jakava	Suodatin	Sa	HkMr
C_u (kJ/m ³ /°C)	2227	2227	2448	2448	2449	2449	1691	2022	1774	2833	1959
C_f (kJ/m ³ /°C)	1830	1830	1865	1865	1790	1790	1599	1608	1595	2020	1658
λ_u (kJ/m/sec/°C)	0,00085	0,00085	0,0009	0,0009	0,00065	0,00065	0,0018	0,002	0,0019	0,001	0,0013
λ_f (kJ/m/sec/°C)	0,00137	0,00118	0,0014	0,0012	0,00128	0,0011	0,002	0,0022	0,002	0,0018	0,0018
w%	11	11	16,4	16,4	21	21	2,3	2,2	2,4	24	8

Laskentoja tehdessä huomattiin pohjamaan ominaisuuksilla olevan merkittävä vaikutus roudan syvyyden kehitykseen myös rakennekerroksissa. Tämän välttämiseksi lämpötila rakennekerrosten alapinnalla olisi voitu sitoa sillä syvyydellä olevan lämpötila-anturin todelliseen lukemaan. Huonona puolena kyseisessä menettelyssä olisi ollut se, että roudan syvyys saavuttaisi rakenteen alapinnan aina samalla ajanhetkellä riippumatta materiaali-parametreista, joten ajatuksesta päätettiin luopua.

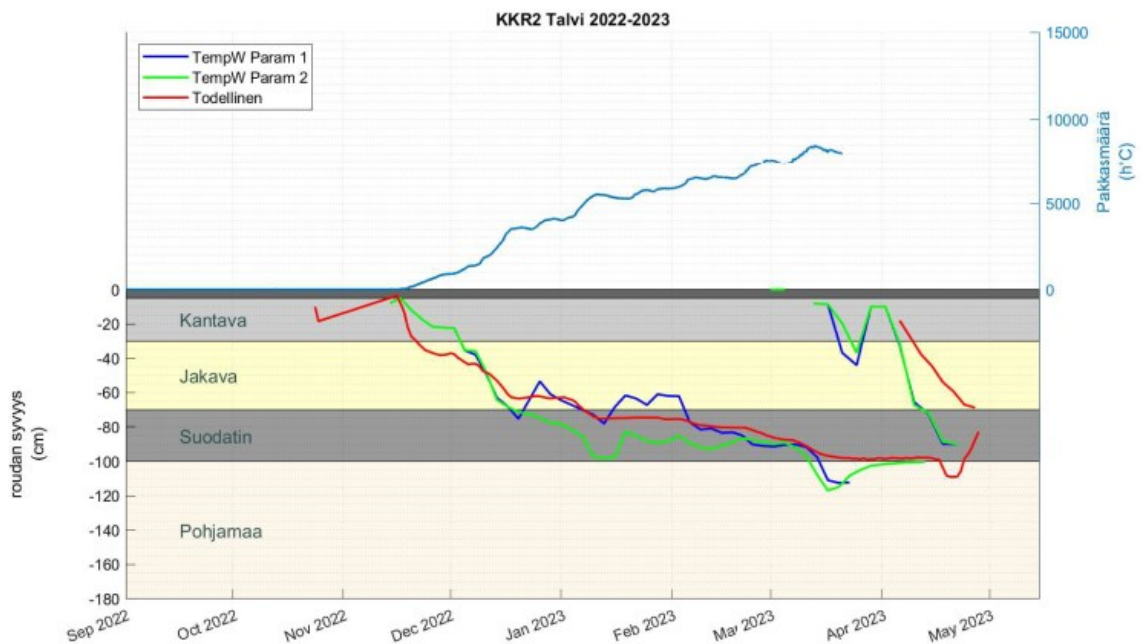


Kuva 58. Temp/W:lla luotu elementtimalli. Harmaalla on solmupisteiden numerointi, väritetyt alueet kuvaavat maakerroksia ja värilliset pallot reunaehtoja.

Ohjelmasta saatiin siirrettyä taulukkomuotoon solmupisteiden lämpötilatiedot päivämäärittäin. Taulukko luettiin Matlabiin ja siitä mallinnettiin roudan syvyyden kuvaajat samalla periaatteella kuin todellisten lämpötila-antureidenkin kohdalla. Kuvissa 59 ja 60 on otteita Temp/W:n tuottamien roudansyvyyksien vertailusta todellisiin arvoihin. Loput kuvaajat on esitetty liitteessä D.



Kuva 59. TempW-laskennan vertailu referenssirakenteessa todelliseen roudan syvyyteen talvella 2020–2021.



Kuva 60. TempW-laskenta tehty kummankin takaisinlaskentamenetelmän tuottamilla lämmönjohtavuuksilla kuonarakenne 2:ssa talvella 2022–2023.

Routamallinnuksen tuloksista kuonarakenteissa kävi ilmi suuri hajonta elementtimenetelmän antaman ja todellisen roudan syvyyden välillä eri talvien osalta. Eri lämmönjohtavuuksilla tehdyillä mallinnoilla ei suoraan voinut sanoa, että toisella laskentatavalla tulokset olisivat olleet järjestään lähempänä todellista roudan syvyyttä. Vertaillen ku-

vien 59 ja 60 mallinnettua roudan kehitystä, tulee väkisin mieleen ajatus, kuonarakenteiden tilavuuslämpökapasiteetit ovat osuneet mallinnuksessa kiviaineksia huonommin kohdalleen. Suuri tilavuuslämpökapasiteetti toimii kuten kondensaattori virtapiirissä tasaten ulkoisen lämpötilan vaihtelun vaikutusta materiaalin sisäisen lämpötilan kehitysnopeuteen (kaava 33). Myös jäätyneen ja sulaneen tilan tilavuuslämpökapasiteettien suhteella on vaikutusta roudan syvyyden vaihteluun. Näiden parametrien selvittäminen ei kuitenkaan ollut tämän työn tavoitteena. Huomion arvoista on myös se tosiasia, että todellinen roudansyvyys on mallinnettu 10 cm välein sijoitettujen lämpötila-antureiden lukemista interpoloimalla, joten siihen vertaaminenkaan ei ole täysin yksikäsitteistä. Laskentamenetelmien tulosten vertailu päädyttiin tekemään laskemalla mallinnetun roudansyvyyden keskimääräinen poikkeama mitatusta roudan syvyydestä rakennekerrosten jäätyneen osalta kaavalla:

$$z_{keskim} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} |z(t)_{lask} - z(t)_{tod}| dt}{h_{rak}} \quad (36)$$

jossa

z_{keskim}	lasketun roudan syvyyden keskimääräinen poikkeama todellisesta (m)
$z(t)_{lask}$	mallinnettu roudan syvyys ajan hetkellä t (m)
$z(t)_{tod}$	mitattu roudan syvyys ajan hetkellä t (m)
h_{rak}	aikavälillä t_0-t_1 todellisuudessa jäätyneen rakennekerrospaksuus (m)

Itseisarvo kaavassa 36 mitätöi syvyyden poikkeaman etumerkin, jolloin erimerkkiset poikkeaman arvot eri ajanhetkinä eivät pääse kumoamaan toisiaan vaan kaava antaa poikkeaman magnitudin. Toisaalta tuloksesta ei nyt voinut päätellä poikkeaman suuntaa. Siksi laskennat tehtiin myös ilman itseisarvoa. Taulukossa 11 on esitetty kummankin takaisinlaskentamenetelmän lämmönjohtavuuksilla mallinnettujen roudansyvyyksien keskimääräinen poikkeama mitatusta roudan syvyydestä. Niiden perusteella 0/2 mm kuonajaitetta sisältävän rakenteen lämmönjohtavuus vaikuttaa olevan laskettuja arvoja alhaisempi. Samaa indikoi myös Temp/W:lla tehty mallinnus laskettuja arvoja pienemmällä lämmönjohtavuudella. Muutoin saadut lämmönjohtavuudet vaikuttavat oikean suuntaisilta ja poikkeama menee jo paikoin mittaustarkkuuden alle. Taulukon 11 arvoista voidaan vielä mainita, että ne on laskettu koko rakennetta koskien, eikä yksittäisten kerrosten perusteella.

Taulukko 11. Temp/W:lla lasketun roudan syvyyden poikkeama mitatusta roudan syvyydestä kaikkien talvien keskiarvona eri rakenteissa.

	KKR1		KKR2		REF1
	Tapa I	Tapa II	Tapa I	Tapa II	
Erotus itseisarvolla (cm)	8,6	8,5	14,8	12,3	9,4
Erotus ilman itseisarvoa (cm)	5,6	3,3	11,8	10,1	4,9

7.1.4 Vastaavuusarvojen määrittäminen

Kohdassa 4.4 esitelty tierakenteen routamitoitukseen liittyvä vastaavuusarvo määritettiin kuonamateriaaleille tekemällä vertailu referenssirakenteen kiviainesmateriaaleihin. Koska materiaaleista oli käytettävissä vain vesipitoisuus, kuivairtoteisyys ja lämmönjohtavuus, tehtiin vertailu yksinkertaisella Stefanin roudan syvyyden laskentamenetelmällä. Referenssimateriaalin arvot sovitettiin Stefanin kaavaan siten, että niillä kaavan 36 perusteella ilman itseisarvoa lasketut roudan syvyyden poikkeamat mitatusta roudan syvyyksistä kolmen talven keskiarvona jäivät mahdollisimman pieniksi (tässä 0,58 cm). Vastaavuusarvo saatiin verrantona kaavasta 15 johdettuna:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{f1} \cdot F}{q_{f1}}}}{\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_{f2} \cdot F}{q_{f2}}}} = \frac{\sqrt{\frac{\lambda_{f1}}{w_1 \cdot \rho_{d1}}}}{\sqrt{\frac{\lambda_{f2}}{w_2 \cdot \rho_{d2}}}} \quad (37)$$

jossa

z_1/z_2	vertailurakenteen roudan syvyyden suhde kuonarakenteen roudan syvyyteen
F	pakkasmäärä (Kh)
λ_{fi}	rakennekerrosmateriaalin lämmönjohtavuus jäätyneenä (Wh/mK)
q_{fi}	rakennekerrosmateriaalin jäätymislämpö tilavuutta kohden (Wh/m ³)
ρ_{di}	rakennekerrosmateriaalin kuivairtoteisyys (kg/m ³)
w_i	rakennekerrosmateriaalin vesipitoisuus paino-osina
i	vertailumateriaalille i=1, kuonamateriaalille i=2

Kuonamateriaalien lämmönjohtavuuden arvoiksi valittiin takaisinlaskentatavalla II määritetyt arvot. Jakavan kerroksen kuonan vastaavuusarvo kerrottiin lisäksi 0,9:lla sen vertailuparin ollessa kalliomurskettä. Vertailevien mallinnusten perusteella voidaan otaksua takaisinlaskennoilla saatujen arvojen olevan ennemminkin hieman liian suuria kuin pieniä. Materiaalikohtaisten mitoitusparametrien haarukoimiseksi tämä tulos kuitenkin sopii,

jolloin vältytään yliarvioimasta lämmöneristävyyttä erilaisissa olosuhteissa. Lasketut vastaavuusarvot ovat taulukossa 12. Suodatinkerroksessa olevien kuonamateriaalien jakavan kerroksen materiaalia korkeampi vastaavuusarvo ei välttämättä täysin selity niiden suuremmalla jäätymisvastuksella, vaan merkitystä saattaa jonkin verran olla niiden vertailumateriaalina käytetyn hiekan suhteellisen alhaisella vesipitoisuudella (2,1 %). Vanhemmissa tierakenteen routamitoituskäyrästöissä suodatinkerroksen hiekan vesipitoisuudeksi on arvioitu 12 % (Saarelainen & Kivikoski, 2000), joka tosin vaikuttaa hieman suurelta. Väyläviraston nykyisessä Tierakenteen suunnittelu -ohjeessa ei ole mainittu verrokkihiekan vesipitoisuutta tai lämmönjohtavuutta. Toisaalta koska hiekan ja murskeen vastaavuusarvot (taulukko 2) ovat lähellä toisiaan, ei niiden vesipitoisuudessa voi olla kovin suurta eroa.

Taulukko 12. Kuonamateriaalien lasketut vastaavuusarvot routamitoituksessa hiekaan verrattuna. Vaihteluväli ilmaisee hajonnan lämmönjohtavuuden määrityksessä.

	JpKu 0/32	JpKu 0/16	JpKu 0/2
Vastaavuusarvo	1,4-1,7	1,9-2,1	2,0-2,3

7.1.5 Segregaatiopotentiaalin takaisinlaskenta

Kaavan 23 mukaan rakennemateriaalin segregaatiopotentiaali kuormitettuna voidaan laskea, kun tunnetaan routanousu tietyllä aikavälillä sekä jäätyneen kerroksen lämpötilagradientti routarajan yläpuolella. Lämpötilagradientin määrittäminen on tehty jo aiemmissa laskentavaiheissa ja routanousu saadaan routavaaitusten perusteella. Segregaatiopotentiaalin takaisinlaskenta tehtiin määrittämällä jakavan ja suodatinkerroksen jäätyneeseen kulunut aika routan syvyyden mallinnoista jokaisessa rakennetyypissä. Lämpötilagradientin arvoina käytettiin kyseisillä aikaväleillä vallinneita keskimääräisen lämpötilagradientin arvoja tarkasteltavan kerroksen jäätyneessä osassa. Routanousun arvot jouduttiin interpoloimaan todellisten mittausten väliltä, sillä kerroksen jäätyminen saattoi esimerkiksi joissain tapauksissa tapahtua kahden vaaituksen välisenä aikana. Samasta syystä talven 2022-2023 osalta ei segregaatiopotentiaalin laskentaa voitu tehdä ollenkaan, kun vaaituksia oli tehty vain noin kuukauden välein. Laskennan tulokset ovat taulukossa 13.

Taulukko 13. Segregaatiopotentiaalit koerakenteittain ja rakennemateriaaleittain

SP _σ (mm ² /Kh)	REF1		KKR1		KKR2	
	Sr 0/100 mm	Hk 0/20 mm	JpKu 0/32 mm	JpKu 0/16 mm	JpKu 0/32 mm	JpKu 0/2 mm
Talvi 2020-2021	0,6	0,1	0,5	0,3	0,5	0,3
Talvi 2021-2022	0,2	0,4	0,1	0,2	0,1	0,1
Talvi 2022-2023	-	-	-	-	-	-
Keskiarvo	0,4	0,2	0,3	0,2	0,3	0,2

Laskennan tulokset vastaavat materiaalin segregaatiopotentiaalia siinä kuormitustilassa, jossa se tässä tutkimuksessa rakenteessa on. Kaavalla 24 voidaan määrittää segregaatiopotentiaalin vertailuarvo nollakuormalla, kun tiedetään todellisen kuormituksen suuruus (MPa) sekä savipitoisuuden perusteella määräytyvä kerroin a (MPa⁻¹). Kuormitus jakavan kerroksen puolivälissä kuonarakenteilla on n. 0,010 MPa ja suodatinkerroksen puolivälissä 0,016 MPa. Kuonamateriaaleille tehdyissä rakeisuustutkimuksissa ei savilajitetta ole näytteissä ollut ollenkaan. Jos kertoimelle a käytetään arvoa väliltä 10-15 MPa⁻¹ eivät kaavalla 24 lasketut nollakuorman segregaatiopotentiaalin arvot muutu merkittävästi taulukon 13 arvoista. Laboratoriossa määritettyihin routimiskertoimen arvoihin (taulukko 3) verrattuna lasketut segregaatiopotentiaalit ovat kertaluokkaa pienempiä. Verokkimateriaalien routivuutta ei ollut testattu laboratoriossa, mutta todennäköisesti kyse on routanousukokeen määritystavasta, jossa tutkittavan materiaalin alapinta on vedenpinnan alapuolella, jolloin veden saantia ei ole rajoitettu. Absoluuttisia arvoja tärkeämpää on tässä kohtaa huomio, ettei kuonamateriaalien segregaatiopotentiaali poikkea juurikaan kiviainesten vastaavasta ollen pikemminkin hieman alhaisempi. Eli kuonat olivat käytännöllisesti katsoen routimattomia. Jotain eroavaisuutta saattaa syntyä kuona- ja referenssirakenteiden erilaisesta pohjamaasta, etenkin siinä olevasta vesipitoisuudesta ja veden virtauspotentiaalista. Pohjaveden pinnan korkeudella on silläkin vaikutuksensa. Tässä pohjaveden pinnan arvioitu etäisyys rakenteiden alapinnasta on ollut muutaman metrin luokkaa. Joka tapauksessa jo pelkästään routavaaitusten perusteella voidaan todeta, etteivät rakenteet ole routineet. Minkään yksittäisen rakennekerroksen jäätyminen aiheuttama routanousu ei ylittänyt 2,5 mm. Tulokset ovat linjassa myös kirjallisuusvertailun kanssa. Katu2020-ohjeessa todetaan alle 0,5 mm²/Kh segregaatiopotentiaalin omaavan materiaalin olevan routimatonta.

Routaturpoamalla tarkoitetaan rakennekerroksen pinnan korkeusaseman muutosta suhteessa kerroksen paksuuteen. Rakennemateriaalien routaturpoama laskettiin routavaaitusten perusteella käyttäen samoja arvoja kuin yllä olevassa segregaatiopotentiaalin määrittämisessä. Talven 2022-2023 mittaukset jätettiin pois laskelmista liian harvan mitausvälin vuoksi. Tulokset on esitetty taulukossa 14. Näidenkin perusteella kuonamateria-

riaalit ovat käytännössä routimattomia. Kuonamateriaalien luonnonkiviaineksia aavistuksen verran suurempi routaturpoama selittynee niiden sisältämän huokosveden suuremmasta määrästä ja siten sen jäätymisestä johtuvasta suuremmasta routanoususta kaavan 25 mukaisesti.

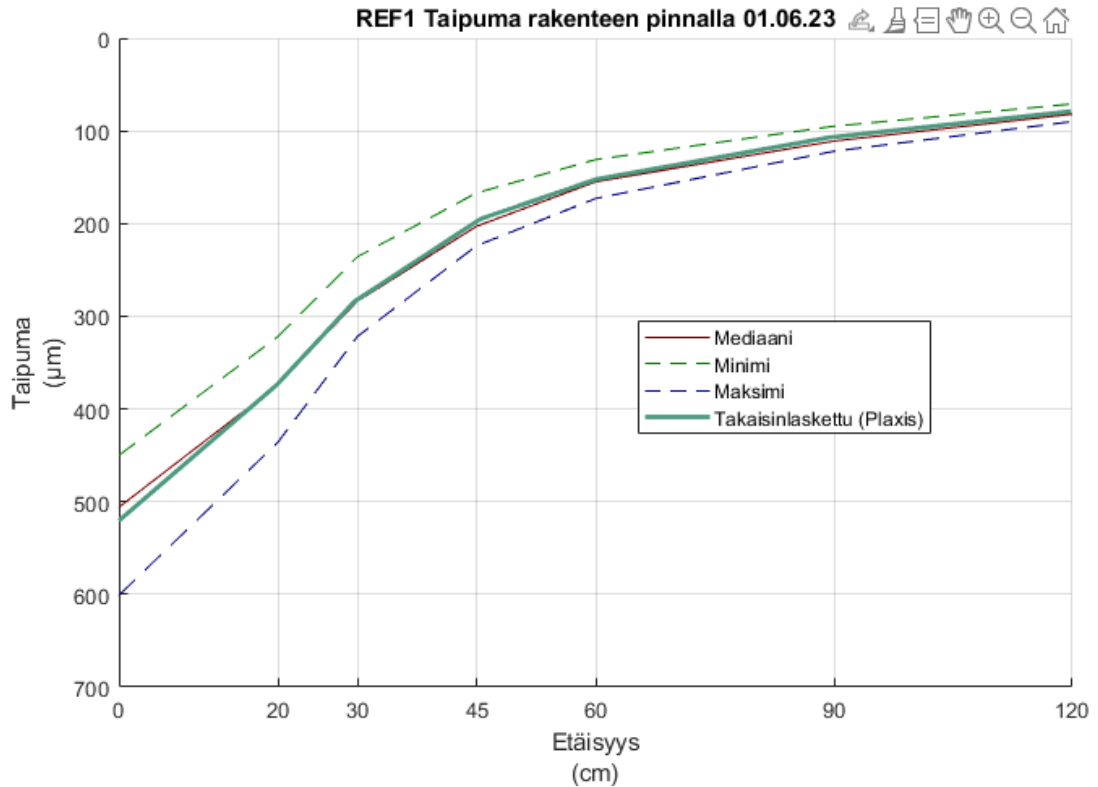
Taulukko 14. Rakennemateriaalien routaturpoamat laskettuna routanousu- ja routahavainnoista.

Routaturpoama (%)	REF1		KKR1		KKR2	
	Sr 0/100 mm	Hk 0/20 mm	JpKu 0/32 mm	JpKu 0/16 mm	JpKu 0/32 mm	JpKu 0/2 mm
Talvi 2020-2021	0,6 %	0,1 %	1,0 %	0,7 %	1,4 %	0,7 %
Talvi 2021-2022	0,1 %	0,8 %	0,2 %	0,6 %	0,3 %	0,4 %
Talvi 2022-2023	-	-	-	-	-	-
Keskiarvo	0,4 %	0,4 %	0,6 %	0,7 %	0,8 %	0,5 %

7.2 Rakennekerrosmoduulien takaisinlaskenta mittauksista

Rakennekerrosten moduulien takaisinlaskenta tehtiin Plaxis 2D-ohjelmistolla. Plaxis on Bentleyyn markkinoima elementtimenetelmään perustuva mallinnusympäristö geotekniisiin ongelmiin, kuten muodonmuutosten ja stabiliteetin laskentaan. Ohjelmassa mallin geometria ja kuormitukset voidaan luoda CAD-suunnittelua vastaavalla tavalla piirtämällä. Plaxiksella voidaan maan käyttäytymistä mallintaa usealla erilaisella materiaalmallilla. (Bentley, 2023) Tässä työssä takaisinlaskenta tehtiin luomalla aksiaalisymmetrinen geometria pudotuspainolaitteen kuormituksen simuloimiseksi. Tämä tarkoittaa, että muodonmuutokset voivat tapahtua säteittäisesti kuormituspisteen ympärillä, kuten todellisuudessaakin tien pinnalla pudotuspainon vaikutuksesta. Rakennekerrokset ja pohjamaa mallinnettiin lineaarielastisella materiaalmallilla, jolloin pysyviä muodonmuutoksia ei oteta huomioon.

Laskennan idea oli saada iteroitua rakennekerroksille sellaiset moduularvot, että mallin pinnalta määritetty taipumasuppilo vastasi pudotuspainolaitteen taipumasuppiloa. Jokaiselle rakenteelle tietyinä päivinä tehdyistä pudotuspainolaitemittauksista määritettiin mediaanitaipumasuppilo, johon Plaxis-laskennan sovitusta tehtiin. Mittauspisteiden määrän ollessa parillinen mediaaniksi valittiin lähimpänä keskimääräistä taipumaa ollut kuvaaja. Referenssirakenne 2:sta oli tehty vain kaksi PPL-mittausta, joten siinä sovitusta haettiin kuvitteelliseen keskimääräiseen kuvaajaan. Taipuma-arvoina käytettiin lämpötilakorjaamattomia arvoja. Kuvassa 61 on esimerkki sovituksesta referenssirakenne 1:n kohdalla.



Kuva 61. Taipumasuppilon sovitus referenssirakenteesta tehtyjen PPL-mittausten mediaanikuvaajaan. Kuvassa näkyvät myös ko. mittausajankohdan pienin ja suurin mitattu taipumasuppilo.

Iteroidut moduulit on listattu taulukkoon 15. Tuloksista on huomioitavaa, että ne eivät välttämättä ole numeroarvoltaan samoja kuin jollain muulla menetelmällä tai ohjelmalla lasketut moduulit taikka laboratoriotestien arvot. Tässä työssä takaisinlaskennan tuloksena määritettyihin mitoitusarvoihin pätee periaate niiden käytöstä vertailussa luonnon kiviaineksista tehtyihin rakenteisiin. Numeerisen arvon perusteella voidaan myös seurata jäykkyyden muutosta eri rakennekerroksissa. Lasketut E-moduuliarvot eri rakennemateriaaleille pätevät niillä syvyyksillä, joilta ne on määritetty. Lukema edustaa rakennekerroksen keskimääräistä moduulia. E-moduulin ollessa jännitystilasta riippuvainen saa se lähtökohtaisesti suurempia arvoja kerroksen ylä- kuin alaosassa. Laskennan tarkkuuden lisäämiseksi kerrokset olisi voitu jakaa useampiin osiin ja määrittää eri osille omat moduuliarvot, mutta tällä ei katsottu saatavan mitään lisähyötyä laskentatulosten ollessa muutenkin riippuvaisia valituista oletuksista. Virhelähteitä ovat muun muassa sitomattomien rakennekerrosten mallintaminen lineaarielastisena, jolloin niihin voi syntyä vetojännityksiä, mitä ei todellisuudessa tapahdu sekä rakenteiden oletaminen homogeenisiksi ja isotrooppisiksi. Tosin laskentamallin tarkastelun perusteella syntyneiden vetojännitysten määrä oli vähäinen. Lisäksi laskentamalli sisältää muitakin yksinkertaistuksia, joilla saattaa olla merkitystä tuloksiin.

Taulukko 15. Plaxis 2D:lla takaisinlasketut moduulit eri rakennekerroksille mitauspäivämäärittäin. Takaisinlaskenta on tehty lämpötilakorjaamattomien taipumien perusteella.

PVM	Lämpötila (°C)	REF1 (MPa)				
		Päällyste AB	Kantava KaM 0/32	Jakava Sr 0/100	Suodatin Hk 0/20	Pohja Savi
2020-10-09	12,7	5000	170	160	180	75
2021-05-12	17,7	14000	260	130	150	65
2021-10-11	11,9	16000	260	180	130	75
2022-07-07	30,5	15500	260	220	190	75
2022-10-07	10,5	14000	240	240	190	75
2023-06-01	15,0	17000	300	220	190	60
2023-10-06	6,0	17000	300	220	190	70
PVM	Lämpötila (°C)	KKR1 (MPa)				
		Päällyste AB	Kantava KaM 0/32	Jakava JpKu 0/32	Suodatin JpKu 0/16	Pohja HkMr
2020-10-09	12,8	4500	160	80	90	120
2021-05-12	16,0	10000	230	110	90	120
2021-10-11	11,5	14000	250	180	90	120
2022-07-07	28,8	14000	250	180	100	120
2022-10-07	10,5	14000	250	180	90	120
2023-06-01	14,5	14000	250	170	90	100
2023-10-06	5,2	14000	260	180	90	120
PVM	Lämpötila (°C)	KKR2 (MPa)				
		Päällyste AB	Kantava KaM 0/32	Jakava JpKu 0/32	Suodatin JpKu 0/2	Pohja HkMr
2020-10-09	12,8	3500	230	70	120	140
2021-05-12	16,7	13000	260	120	100	140
2021-10-11	11,5	18000	300	160	120	140
2022-07-07	28,8	18000	300	200	120	140
2022-10-07	10,3	19000	330	150	160	150
2023-06-01	14,5	18000	270	180	120	140
2023-10-06	5,2	18000	270	180	120	140
PVM	Lämpötila (°C)	REF2 (MPa)				
		Päällyste AB	Kantava KaM 0/32	Jakava Sr 0/100	Suodatin Hk 0/20	Pohja Täyttö
2020-10-09	12,5	7500	170	200	120	130
2021-05-12	17,5	10000	300	200	200	130
2021-10-11	11,0	17000	330	200	200	130
2022-07-07	28,5	17000	300	300	220	130
2022-10-07	10,5	17000	350	210	210	140
2023-06-01	15,0	17000	300	280	220	130
2023-10-06	5,5	17000	320	260	200	140

Laskennan tuloksista nähdään, että asfaltin moduulia on jouduttu reilusti yliarvioimaan taipumasuppilon sovittamiseksi. Tämä voi olla ainakin osittain seurausta ohuesta (50 mm) päällysteestä, jonka kuormaa jakava vaikutus ei laskentamallissa toimi odotetulla

tavalla. Päälysteen moduulin suuri kasvu alussa ei varmastikaan johdu sen ominaisuuksien muuttumisesta, vaan rakenteen kantavuuden paranemisesta yleensäkin. Moduulin käyttäytymiselle tällä tavalla ei löydetty mitään suoraan selittävää tekijää. Taulukosta 15 käy ilmi jo kappaleen 6 kantavuuskuvaajien tulkinnastakin selvinnyt jäykkyyden parantuminen ensimmäisen vuoden aikana. Referenssirakenteissa suurin muutos tapahtuu kantavan kerroksen moduulin kasvussa, vaikka rakenteen jäykkyys toki lisääntyy kauttaaltaan. Kuonarakenteissakin kantavan kerroksen jäykkyys lisääntyy ensimmäisen mittauksen jälkeen, muttei aivan samassa suhteessa referenssirakenteisiin nähden.

Kuonarakenteissa jakavan kerroksen moduuli yli kaksinkertaistuu ensimmäisen vuoden aikana. Toisaalta kummankaan kuonarakenteen moduuli suodatinkerroksessa ei muutu alkutilanteesta juurikaan. Tästä ei voi kuitenkaan päätellä suoraan, että jakavan kerroksen materiaali olisi jollain tapaa lujittuvaa ja suodatinkerroksen materiaalissa jäykkyys ei voisi lisääntyä. Todennäköisesti enemmän jakavan kerroksen jäykkyyden lisääntymiseen vaikuttaa kerrosten väliset jännitystilaerot. Liikennekuormituksen tiivistävä vaikutus on voimakkaampaa rakenteen ylemmissä osissa. Joissain yksittäisissä mittauksissa on nähtävissä suodatinkerroksessa tilapäinen moduulin kasvaminen. Tämä johtuu oletettavasti siitä, että tällaisessa mittauksessa ylempien kerrosten kyky jakaa kuormitusta on olosuhteiden takia tilapäisesti alentunut, jolloin jännitystila suodatinkerroksessa kasvaa ja sitä myöden kerroksen moduulikin. Jakavan kerroksen 0/32 mm kuonan moduuli jää 24 % pienemmäksi verrattaessa vastaavaan luonnonkiviainekseen ensimmäisen vuoden jälkeen rakentamisesta tehtyjen mittausten perusteella. Vastaavalla tavalla lasketuna 0/16 ja 0/2 mm kuonille moduulit ovat hiekkaan verrattuna 53 % ja 34 % pienempiä.

Rakenteen jäykkyyden kehittymistä eri rakennekerroksissa ja pohjamaassa arvioitiin laskemalla kuonarakenteiden takaisinlaskettujen moduulien suhteet eri kerroksissa referenssirakenteiden vastaaviin kerroksiin. Referenssirakenteiden kerrosten vertailuarvo laskettiin keskiarvona molemmista referenssirakenteista. Taulukon 16 arvoista nähdään jo aiemmin todettu jakavan kerroksen kuonan moduulin kasvu ensimmäisen vuoden aikana suhteessa kiviainesrakenteeseen. Pohjamaasta ei tule eroa rakennetyyppien välille vaan muutokset tapahtuvat rakennekerroksissa. Referenssirakenteiden suodatinkerroksessa tapahtuu suhteellisesti enemmän jäykkyyden lisäystä kuonarakenteisiin verrattuna. Tämän voi olettaa johtuvan hiekan vesipitoisuuden muutoksesta ajan myötä tasolle, jossa näennäisen koheesion mobilisoitunut vaikutus on suurempi.

Taulukko 16. Kuonarakenteiden takaisinlasketun moduulin suhde referenssirakenteiden takaisinlaskettuun arvoon vastaavassa rakennekerroksessa.

PVM	KKR1				
	Päällyste AB	Kantava KaM 0/32	Jakava JpKu 0/32	Suodatin JpKu 0/16	Pohja HkMr
2020-10-09	72 %	94 %	44 %	60 %	117 %
2021-05-12	83 %	82 %	67 %	51 %	123 %
2021-10-11	85 %	85 %	95 %	55 %	117 %
2022-07-07	86 %	89 %	69 %	49 %	117 %
2022-10-07	90 %	85 %	80 %	45 %	112 %
2023-06-01	82 %	83 %	68 %	44 %	105 %
2023-10-06	82 %	84 %	75 %	46 %	114 %
PVM	KKR2				
	Päällyste AB	Kantava KaM 0/32	Jakava JpKu 0/32	Suodatin JpKu 0/2	Pohja HkMr
2020-10-09	56 %	135 %	39 %	80 %	137 %
2021-05-12	108 %	93 %	73 %	57 %	144 %
2021-10-11	109 %	102 %	84 %	73 %	137 %
2022-07-07	111 %	107 %	77 %	59 %	137 %
2022-10-07	123 %	112 %	67 %	80 %	140 %
2023-06-01	106 %	90 %	72 %	59 %	147 %
2023-10-06	106 %	87 %	75 %	62 %	133 %

Ensimmäisen mittauksen perusteella laskettuja moduuleita verrattiin rakentamisen yhteydessä tehtyjen levykuormituskokeiden tuloksiin. Vertailun tulokset on esitetty taulukossa 17. Suurimmat erot näkyvät referenssirakenne 1:n jakavassa ja suodatinkerroksessa sekä referenssirakenne 2:n kantavan kerroksen moduulissa. Tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia, sillä takaisinlaskenta on tehty koko rakenteen päältä tehdyistä mittauksista ja levykuormituskoe on tehty suoraan tutkittujen rakennekerroksen päältä. Tällöin jännitystaso eri kerroksissa on erilainen, joka vaikuttaa moduuliin. Ylempien kerrosten rakentaminen on myös voinut vaikuttaa alempia kerroksia tiivistävästi. Lisäksi pohjamaan vaikutus on voimakkaampi alempien kuin ylempien kerrosten levykuormituskokeessa. Tämä todennäköisesti selittää alhaista jäykkyyttä referenssirakenteen 1 suodatinkerroksessa levykuormituskokeessa.

Taulukko 17. Rakentamisen yhteydessä mitattujen levykuormituskokeiden tulokset kyseisen kerroksen päältä sekä takaisinlasketut moduulit ensimmäisen PPL-mittauksen tuloksista.

E ₂ ja E (MPa)	REF1		KKR1		KKR2		REF2	
	Levyk.	Plaxis	Levyk.	Plaxis	Levyk.	Plaxis	Levyk.	Plaxis
Kantava	154	170	147	160	146	230	273	170
Jakava	90	160	98	80	103	70	162	200
Suodatin	37	180	83	90	86	120	112	120

Lasketuista moduuleista määritettiin mitoitusmoduulit kuonamateriaaleille Väyläviraston ohjeessa "Uusiomateriaalien käyttö väylärakentamisessa" esitetyllä vertailuparimenetelmällä. Uuden materiaalin moduuli saadaan vertaamalla sitä vastaavan luonnonmateriaalirakenteen samalla menetelmällä takaisinlaskettuun moduuliin kaavalla: (Väylävirasto, 2022)

$$E = E_t \cdot \frac{E_p}{E_{pt}} \quad (38)$$

jossa

E	uusiomateriaalin alustava mitoitusmoduuli
E_t	uusiomateriaalin takaisinlaskettu moduuli
E_{pt}	perinteisen materiaalin takaisinlaskettu moduuli
E_p	perinteisen materiaalin mitoitusmoduuli

Väyläviraston ohjeessa yllä olevaa kaavaa tulisi käyttää siinä tapauksessa, että uusiomateriaalin moduulin hajonta on pienempää kuin vastaavalla luonnonmateriaalilla. Muutoin moduulimääritys tulee tehdä huomioiden takaisinlaskennan keskihajonta seuraavan kaavan mukaisesti:

$$E = \frac{E_p}{E_{pt} - S_{pt}} \cdot (E_t - S_t) \quad (39)$$

jossa

S_t	Uusiomateriaalin takaisinlasketun moduulin keskihajonta
S_{pt}	Perinteisen materiaalin takaisinlasketun moduulin keskihajonta

Referenssirakenteiden mitoituksessa Odemarkin yhtälöllä jakavan kerroksen kiviainekselle on käytetty moduulina 200 MPa ja suodatinkerroksen hiekalle 100 MPa. Näihin moduuliarvoihin päädytään, kun verrataan rakennenyhteistä (29.6.2023) määritettyjä raakeisuuskäyriä Väyläviraston Tierakenteen suunnittelu -ohjeen käyrästöihin. Vaikkei Plaxis-mallinnettu moduuli vastaakaan todellista moduuliarvoa, tarkasteltaessa eri kerrosten moduulien suhteita referenssirakenteissa vaikuttaa suodatinkerros toimivan 100 MPa korkeammalla moduulilla. Takaisinlasketut moduulit määritettiin kaikille rakenteille 11.10.2021-6.10.2023 tehtyjen mittausten keskiarvon perusteella, sillä sinä aikana moduuliarvot vaikuttivat stabiloituneen lopulliselle tasolle. Näistä mittauksista laskettiin myös keskihajonnat. Keskihajonta jakavassa kerroksessa oli suurempaa kuonarakenteessa kuin referenssirakenteessa, joten 0/32 mm kuonan mitoitusmoduuli laskettiin kaavalla 39. Taulukossa 18 on esitetty laskennan tulokset ja käytetyt parametrit.

Taulukko 18. Vertailuparitekniikalla lasketut mitoitusmoduulit (MPa) kuonamateriaaleille 11.10.2021-6.10.2023 tehdyistä PPL-mittauksista laskettujen moduulien keskiarvojen perusteella.

Referenssirakenne, REF1 ja REF2 keskiarvo		Takaisinlaskennan keskihajonta	Takaisinlaskettu moduuli	Mitoitusmoduuli rakeisuuskäyristä
Jakava	Sr 0/100 mm	13	233	200
Suodatin	Hk 0/20 mm	21	194	100
Kuonarakenne		Takaisinlaskennan keskihajonta	Takaisinlaskettu moduuli	Laskettu mitoitusmoduuli
Jakava	JpKu 0/32 mm	35	176	130
Suodatin	JpKu 0/16 mm	4	92	50
	JpKu 0/2 mm	16	128	70

Jos 0/32 mm kuonan takaisinlaskennan keskihajonta olisi ollut pienempää kuin vertailumateriaalilla, olisi mitoitusmoduuliksi saatu noin 150 MPa kaavalla 38 laskettuna. Suodatinkerroksen kuonamateriaalien mitoitusmoduulit jäävät verrattain alhaisiksi. Tämä johtuu referenssirakenteen suodatinhiekan takaisinlasketun ja arvioidun mitoitusmoduulin korkeasta suhteesta. Vertailun vuoksi kaavalla 1 laskettiin resilient-moduulin arvo käyttäen taulukon 3 materiaaliparametreja ja Plaxis-mallista määritettyjä pääjännitysten summia jakavassa ja suodatinkerroksessa. Näin saadut resilient-moduuliarvot olivat huomattavasti alempia kuin taulukon 18 kuonien mitoitusmoduulit. Tämä johtuu todennäköisesti syklisessä kolmiaksaalikokeessa käytetyistä jännitystasoista ja k1- ja k2-arvojen sovituksista niihin. Resilient moduulia ei ole määritetty niin alhaisella jännitystasolla (Söderholm, 2020), joka tässä rakenteessa suodatinkerroksessa keskimäärin valitsee (n. 40 kPa), jolloin päädytään moduulin ekstrapolointiin. Toinen syy alhaisempiin arvoihin saattaa olla, ettei kolmiaksaalikokeessa testattujen näytteiden tiiviystila ole ollut koerakennetta vastaava. Tästä syystä tarkoituksena ollut kuonamateriaalien moduuliarvojen haarukointi eri jännitystasoille (syvyyksille) mitoitettavaksi jätettiin tekemättä. Kuten aiemmin todettua, nyt esitetyt kuonarakenteiden mitoituservot edustavat tilannetta, jossa kuonarakennekerros sijaitsee mitoitettavassa rakenteessa samalla syvyydellä (jännitystasolla) kuin tässä tutkitussa koerakenteessa. Kolmiaksaalikokeen resilient-moduulien materiaaliparametrien suhteita kuonamateriaalien mitoitusmoduuleihin vertaamalla vaikuttavat materiaalien moduulien keskinäiset suhteet järkeen käyvä.

Kuonarakenteille lasketuilla mitoitusmoduuleilla määritettiin kantavuus rakenteen pinnalla Odemarkin kaavalla ja verrattiin saatuja tuloksia pudotuspainolaitteella mitattuihin kantavuuksiin. Referenssirakenteen moduuleina kaavassa käytettiin yllä olevan taulukon mitoitusmoduuleja. Pohjamaan kantavuutena käytettiin rakentamisen aikaisia levykuorimituskokeen arvoja (taulukko 4) Tulokset on esitetty taulukossa 19. Siitä ilmenee raken-

teiden saavuttavan kutakuinkin laskennallisen kantavuuden ensimmäisen ja toisen mittauksen välillä. Ensimmäisen vuoden jälkeen saavutettavaa lopullista kantavuutta Odemarkin yhtälö aliarvioi kaikille rakenteille. Tämä lienee normaali tilanne mitoitettaessa rakenteita ko. yhtälöllä kiviainesten rakeisuuskäyriin perustuvilla moduuliarvoilla niihin sisältyvän varmuuden takia.

Taulukko 19. Odemarkin kaavalla laskettu kantavuus päällysteen pinnalta takaisinlasketuilla mitoitusmoduuleilla sekä PPL:lla mitatut kantavuudet.

E ja E ₂ (MPa)	REF1	KKR1	KKR2	REF2
Odemark	256	216	235	277
Mitatut kantavuudet:				
2020-10-09	195	157	172	215
2021-05-12	245	217	250	301
2021-10-11...2023-10-6 KA	292	267	305	346

Kantavuusmittausten ajankohtia tarkasteltiin vielä suhteessa keväällä tapahtuvaan roudan sulamiseen ja takaisinlaskettuihin moduuleihin. Roudan sulaminen eri rakenteissa ja PPL-mittausten ajankohta keväällä on listattu taulukkoon 20. Päivämäärät tarkoittavat tilannetta, kun routa on kokonaan sulanut rakenteesta ja pohjamaasta. Käytännössä kuonarakenteissa viimeisenä sulaa suodatinkerros ja referenssirakenteessa pohjamaa. Referenssirakenteessa rakennekerrokset vapautuivat roudasta keskimäärin 2...3 viikkoa ennen kuonarakenteita. Keväällä 2021 PPL-mittauksen ajankohta on ollut noin kaksi viikkoa roudan sulamisen jälkeen. Voidaankin olettaa rakenteessa ja pohjamaassa tapahtuneen sulamispehmenemisen vaikuttaneen vielä tällöin. Se ilmenee referenssirakenne 1:ssä etenkin pohjamaan ja jakavan kerroksen alhaisina moduuleina. Kuonarakenteissa ei vastaavanlaista alenemaa näy. Myös referenssirakenteiden BCI-lukema on kyseisenä keväänä kohonnut kuonarakenteita enemmän, joka viittaa heikentyneeseen pohjamaan kantavuuteen. Vuonna 2022 ensimmäinen mittaus on tehty heinäkuussa, jolloin rakenteiden vesipitoisuus on jo ehtinyt laskea roudan sulamisen jäljiltä eikä kyseisellä mittauskerralla lasketut moduuliarvot poikkeaa keskimääräisistä lasketuista moduuleista. Talven 2022-2023 vaihteleva sää ei myöskään näytä vaikuttaneen rakenteiden toimintaan. Koska kaikki PPL-mittaukset on tehty vasta roudan sulamisen jälkeen, ei kuonarakenteiden hitaamman sulamisen mahdollisesti aiheuttaman kelirikon voimakkuutta päästy arvioimaan

Taulukko 20. Roudan sulamisen ja pudotuspainolaitemittauksen ajankohta vuosittain.

	REF1	KKR1	KKR2	PPL-mittaus
2021	27.4.	29.4.	27.4.	12.5.
2022	23.4.	6.5.	4.5.	7.7.
2023	16.4.	29.4.	28.4.	1.6.

Rakenteiden kantavuuden parantumisen voidaan arvioida olevan ainakin osittain rakenteissa tapahtuvan tiivistymisen aikaan saamaa. Toinen merkittävä tekijä on rakenteiden vesipitoisuus. Hienorakeisissa materiaaleissa alhainen vesipitoisuus saattaa edesauttaa näennäisen koheesion kehittymistä ja siten lisätä jäykkyyttä. Rakenteiden tiivistymistä arvioitiin vertaamalla syksyisin ennen routaa tehtyjä pintavaaituksia. Taulukossa 21 on esitettyä kunkin rakenteen vaaitusten keskiarvojen kehitys vuosittain. Pinnan korkeusaseman muutostahti noudattelee PPL-mittauksilla todettua rakenteiden suhteellista jäykkyyden kehitystä.

Taulukko 21. Asfaltin pinnan korkeusaseman muutos Kuulojantiellä rakenteittain. Mittaukset on tehty syksyisin ennen routaa.

Erotus (mm)	REF1	KKR1	KKR2	REF2
10/2020	0	0	0	0
10/2021	-7,1	-11,9	-8,1	-6,8
10/2022	-11,1	-13,2	-9,5	-11,0

Vertailukohteena olleelle Riihimäki-Hikiä kevyenliikenteenväylälle laskettiin vastaavanlainen pinnan tasauksen muutos (taulukko 22). Siinä näyttää, että maaperässä tai rakenteissa olisi tapahtunut pikemminkin löyhtymistä, kuin tiivistymistä. Tosin kantavuuden kehittyminenkin on ollut mittauksissa suhteellisesti Kuulojantietä vähäisempää. Kevyenliikenteen väylältä puuttuu raskas liikenne kokonaan, jota taas Kuulojantiellä on merkittävästi. (Söderholm, 2020) Siitä voidaan päätellä ainakin osan Kuulojantien korkeusaseman muutoksesta liittyvän rakenteiden tiivistymiseen. Jos korkeusaseman muutos liittyisi pelkästään pohjamaassa tapahtuvaan konsolidaatiopainumaan, pitäisi pohjamaaerojen näkyä selvemmin eri rakenteiden välisissä tuloksissa.

Taulukko 22. Asfaltin pinnan korkeusaseman muutos Riihimäki-Hikiä KLV:llä rakenteittain. Vaaitukset on tehty syksyisin ennen routaa.

Erotus (mm)	REF1	KKR1	KKR2	KKR3	REF2
10/2021	0	0	0	0	0
10/2022	0,1	0,6	24,5	4,4	1,0

8. TULOSTEN ANALYSOINTI JA JATKOTUTKIMUSSUOSITUKSET

8.1 Pohjakuonan lämpötekniset ominaisuudet

Koerakenteiden lämpötilaseurannan painopiste oli roudan syvyyden ja routivuuden mallintamisessa. Lämpötilaseurannoista pystyttiin johtamaan selkeästi roudan syvyyden kehitys koerakenteissa ja pohjamaassa kaikkina seurantajakson talvina sekä vertaamaan sitä pakkasmäärän kehitykseen. Koska lämpötilamittaukset oli toteutettu kahden tunnin välein, saatiin niistä muodostettua tarkempaa analyysiä varten riittävän kattavat lähtötiedot. Tarkoitus oli selvittää kuonamateriaalin vastaavuus lämmöneristävyudessa luonnonkiviaineksiin nähden. Materiaalin jäätymisvastuksen kannalta merkittävimmiksi suureiksi katsottiin vesipitoisuus ja lämmönjohtavuus jäätyneenä. Jäätymisvastukseen vaikuttavat lukuisat muutkin materiaaliin ja ympäristöolosuhteisiin liittyvät tekijät. Analysoinnin periaatteena oli kuitenkin keskittyä tiettyjen suureiden tutkimiseen, jotta laskentamallien muuttumiselta turhan monimutkaiseksi välttyttiin. Lähtökohtana oli tuottaa ennemminkin tunnettuihin materiaaleihin nähden vertailukelpoista tietoa kuin fysikaalisessa mielessä absoluuttisia arvoja. Tämä näkökulma on myös tierakenteiden käytännön mitoituksen lähtökohta, jossa routaeristävyuden kannalta riittävä rakennepaksuus määräytyy suhteessa luonnonhiekkiaan.

Tutkimuksessa lämmönjohtavuuden arviointi perustuu rakenteiden lämpötilakehitykseen, joka on laskentamalleissa sovitettu vastaamaan termodynamiikan pääperiaatteita. Laskentamallien luonti tältä pohjalta tuntuu luonnolliselta valinnalta saatavilla olleen kattavan tiedonkeruun ansiosta. Lämpötilamallinnuksia koerakenteista, joissa on käytetty uusiomateriaaleja, oli heikosti löydettävissä. Mallinnukselle ei liene olemassa mitään yleisesti käytettävää menetelmää. Ilmeisesti jonkin verran on käytetty lämpötilakehityksen sovitusta elementtimenetelmään perustuvilla ohjelmistoilla. Toinen seikka, joka vaikutti laskentamallien kehitykseen, oli tekijän oma mielenkiinto datankäsittelyyn sekä erilaisten menetelmien ja teorian yhteensovittamiseen. Koska vastaavanlaisia tutkimuksia ei ollut vertailevaksi aineistoksi, tehtiin vertailua kattavasti tunnettuihin analyttisiin roudan syvyyden laskentamenetelmiin sekä elementtimenetelmään perustuvaan laskentaan. Yksikertaisin tapa verrata kuonarakenteiden ja luonnonkiviainesrakenteiden eristävyyttä olisi ollut määrittää vastaavilla syvyyksillä olleiden kerrosten jäätymiseen tarvittavaa pakkasmäärää ja verrata sitä, mutta tällöin ylempien kerrosten ja pohjamaan vai-

kutusta ei olisi voitu sulkea pois. Tulokset olisivat vastanneet kuonamateriaalin käyttäytymistä tutkimuksen kohteena olleen rakenteen kaltaisessa tilanteessa. Käytetyn lämpövirtoihin perustuvan analyysin ideana oli minimoida tällaisten tekijöiden vaikutus sekä kattavasti hyödyntää kerättyä dataa.

Takaisinlaskentojen perusteella kaikilla kuonalajitteilla oli luonnonkiviaineksia alhaisempi lämmönjohtavuus jäätyneenä, joka todennäköisesti on seurausta kuonan huokoisesta rakenteesta. Jäätyneen tilan lämmönjohtavuudet olivat korkeampia verrattuna laboratoriossa määritettyihin sulan tilan lämmönjohtavuuksiin. Tämä oli odotettua ja johtuu todennäköisesti kuonien korkeasta vesipitoisuudesta. Korkea vesipitoisuus vaikuttaa kuonissa myös suurempana jäätymisvastuksena, jolloin ne ovat kokonaisuudessaan eristävydeltään luonnonkiviaineksia parempia. Karkeampi 0/32 mm kuonalajite vastaa noin 1,5 kertaista ja hienommat 0/2 ja 0/16 mm lajitteen kuonat noin kaksinkertaista hiekkakerrosta eristävydeltään. Tämä oli ilman laskelmiakin selkeästi nähtävissä roudan syvyyden mallinuksissa, joissa kuonakerrokset jäätivät vertailurakenteita hitaammin. Varsinainen eristemateriaali kuten kevytsora tai vaahtolasi ei pohjakuona tämän tutkimuksen pohjalta kuitenkaan ole. Jos tierakennetta tarkasteltaisiin pelkästään routaeristävyyden kannalta, voitaisiin pohjakuonalla päästä luonnonkiviaineksia ohuempisiin kerospaksuuksiin. Tierakenteessa on lisäksi huomioitava rakenteen kuormituskestävyys, jota indikoivana suureena suomalaisessa tierakenteiden mitoituskäytännössä käytetään rakenteen kokonaisjäykkyyttä eli niin kutsuttua kantavuutta. Kantavuus kuonatuotteita käytettäessä vaikuttaa olevan luonnonkiviainesrakenteita alhaisempi. Eristävää ominaisuutta voitaisiin pyrkiä hyödyntämään muissa käyttökohteissa, joissa on alhaisemmat vaatimukset materiaalin jäykkyyden suhteen. Toisaalta kuonarakenteet myös sulavat kiviainesrakenteita hitaammin. Sulaminen tapahtuu kuonarakenteissa viimeisenä jakavassa ja suodatinkerroksessa. Tämä saattaa altistaa kantavan kerroksen sulamisveden vaikutukselle keväällä pidemmän aikaa, kun se ei pääse kuivattumaan ja siten pidentää kelirikkoa. Kiviainesrakenteissa sulaminen tapahtui viimeiseksi pohjamaassa.

Routanousumittausten ja segregatiopotentialimääritysten perusteella pohjakuona on routimatonta. Nämä arviot perustuvat tässä työssä tutkittuihin olosuhteisiin. Segregatiopotentiali riippuu saatavilla olevasta vedestä. Koerakenteiden kohdalla pohjavedenpinnan voidaan arvioida olevan sellaisella etäisyydellä, ettei jäätymisvyöhykkeeseen virtaavaa vettä ole maassa tarjolla määrättömästi. Voidaankin todeta kuonien olevan routimattomia pohjavedenpinnan yläpuolisissa rakenteissa. Segregatiopotentialin arvot eivät vastaa laboratoriotutkimuksissa saatuja arvoja. Tässä oletettavasti on taustalla laboratorionkokeessa vallitsevat olosuhteet, joissa veden virtausta muodostuvaan jäälinssiin

ei ole rajoitettu. Käytännössä uusiomateriaalien käyttökohteet määräytyvät MARA-asetuksen ehdoilla, jossa rakenteen alapinnan etäisyydelle pohjaveden pinnasta on säädetty ohjearvot. Pohjakuonan voidaan katsoa olevan routimatonta olosuhteissa, joihin sen hyödyntäminen pääsääntöisesti liittyy. Tässä arvioidun perusteella yleisestikään ei nähdä estettä käyttää pohjakuonaa tierakenteessa lämpötila- ja routakäyttämisen näkökulmasta.

8.2 Pohjakuonarakenteiden kuormituskestävyys

Koerakenteiden jäykkyyttä Kuulojantiellä seurattiin rakentamisen valmistumisesta lähtien kolmen vuoden ajan kaksi kertaa vuodessa tehdyillä pudotuspainolaitemittauksilla. Mittauspisteet oli vakioitu. Tässä työssä vertailuaineistona oli Kuulojantietä vuosi myöhemmin rakennettu kevyenliikenteenväylä. Kantavuusmittauksista laadittiin kunkin rakennetyypin osalta kuvaajat, joista oli selkeästi havaittavissa trendi jäykkyyden kehitymisestä rakentamista seuraavan vuoden aikana suurin piirtein lopulliseen arvoon ja pysyvän siinä. Jäykkyyden kehitys kuona- ja referenssirakenteissa oli verrattavissa toisiinsa. Ero oli noin 20 %-yksikköä suurempi jäykkyyden kasvu kuonarakenteiden hyväksi verrattaessa lähtötilanteeseen. Rakenteen kokonaisjäykkyys oli referenssirakenteissa absoluuttisesti suurempi sekä alku- että lopputilanteessa. Tutkimuksen lähtöolettamana ollut kuonamateriaalin mahdollinen lujittuminen ajan kuluessa ei ainakaan näissä mittauksissa tullut esille, vaan sen olisi pitänyt näkyä selkeästi suurempana erona referenssirakenteisiin nähden. Jäykkyyden kasvu eri rakennekerroksissa voidaan katsoa johtuvan materiaalien raerakenteissa ja vesipitoisuudessa tapahtuvista muutoksista. Vesipitoisuuden muutos tietyille tasolle lisää näennäistä koheesiota rakeiden välillä ja liikennekuormituksen tiivistävä vaikutus saa rakeet asettumaan tilaan, jossa rakeiden särmät ikään kuin lukkiutuvat, jolloin materiaalin jäykkyys kasvaa. Näiden ilmiöiden voidaan otaksua tapahtuneen sekä kuona- että vertailumateriaaleille. Tätä selitystä tukee lisäksi havainto Kuulojantien koerakenteiden pinnan korkeusaseman muutoksesta ensimmäisen vuoden aikana, joka viittaa rakenteissa tapahtuvaan tiivistymiseen ja osuu yksin jäykkyyden kehittymisen kanssa. Vertailukohteena olleessa kevyenliikenteenväylässä ei vastaavaa muutosta pinnan korkeusasemassa ollut havaittavissa, kuten ei myöskään jäykkyyden merkittävää muutosta missään rakennetyypissä. Kevyenliikenteen väylältä puuttuu lisäksi raskas liikenne. Tässä nähdään myös tutkimuksen kannalta saavutettava hyöty, kun mittaustuloksia saadaan erilaisissa olosuhteissa seuratuista koerakenteista.

Kuulojantien pudotuspainolaitemittausten perusteella rakennemateriaaleille takaisinlaskettiin moduularvot. Laskenta tehtiin pudotuspainolaitemittauksista muodostettujen taipumasuppliloiden perusteella elementtimenetelmäohjelmistolla. Tulosten perusteella

kuonamateriaalien moduulit ovat luonnonkiviaineeksi alhaisemmat. Jäykkyyden kasvu kuonarakenteissa tapahtui kantavan kerroksen lisäksi pääosin jakavassa kerroksessa. Suoraa syytä kuonien kiviaineeksi alhaisemmille arvoille ei tämän tutkimuksen perusteella ole pääteltävissä, mutta tulokset ovat linjassa laboratoriotutkimusten sekä esimerkiksi Ruotsissa vastaavalla tavalla määritettyjen moduulien kanssa. Todennäköisesti asiaan vaikuttaa kuonan huokoinen rakenne, joka aiheuttaa joustoa rakeiden välille. Takaisinlaskenta tuotti päällystekerrokselle epärealistisen korkeita arvoja kaikissa rakenteissa. Tällä on varmasti vaikutusta muille kerroksille laskettujen moduulien absoluuttiseen oikeellisuuteen. Referenssirakenteiden suodatinmateriaaleille saadut arvot olivat huomattavasti rakeisuuskäyriin perustuvia moduuliarvoja korkeampia. Tästä syystä vertailuparimenetelmällä määritetyt suodatinkerroksen kuonien mitoitusmoduulit jäivät kohdalaisen alhaisiksi etenkin 0/16 mm lajitteen osalta. Vaikka molemmille 0/2 mm ja 0/16 mm kuonalajitteille käytettäisiin samaa 70 MPa mitoitusmoduulia oltaisiin todennäköisesti vielä tuntuvasti varmalla puolella. Suodatinkerroksessa käytettyjen kuonien moduulit olivat tosin jo lähtöolettamien perusteella jakavan kerroksen kuonamateriaalia alhaisemmat, johtuen kerrosten välisestä jännitystasoerosta. Siksi saadut tulokset eivät ole yleistettävissä suoraan käytettäväksi mitoitettaessa rakenteita muilla syvyyksillä (jännityksillä).

Rakenteiden vaurioherkkyyttä analysoitiin taipumasuppiloista laskettujen taipumaindeksien avulla. Taipumaindeksit olivat kuonarakenteiden osalta tyydyttävällä puolella, joten niiden perusteella ei ole odotettavissa rakenteiden vaurioitumista. Myöskään koerakenteille vuosittain tehtyjen vaurioinventointien perusteella rakenteisiin ei ollut ilmaantunut tien pinnalta havaittavissa olevia vaurioita. Kaiken kaikkiaan tässä työssä ei tullut ilmi seikkoja, jotka viittaisivat kuonan käytön olevan soveltumatonta käytettäväksi tien jakavassa tai suodatinkerroksessa. Jäykkyyden kehityksessä ei näkynyt merkkejä, joiden perusteella kuonarakenteiden kantavuuden voisi olettaa heikentyvän ajan myötä. Tosin varmempaa näyttöä asiasta saadaan vasta pidemmän seuranta-ajan jälkeen. Toisaalta kuonamateriaaleissa ei tämän tutkimuksen pohjalta tapahtunut sellaista jäykkyyden kasvua, jonka voisi olettaa johtuvan materiaalisesta tapahtuvasta kemiallisesta lujittumisesta. Samaan lopputulokseen on päädytty myös ruotsalaisissa seurantatutkimuksissa. (Arm, et al., 2008) Ilmeisesti aiemmin tuotetuissa pohjakuonissa on ollut mukana enemmän lentotuhkaa, jonka sisältämä kalkki on edesauttanut lujittumista.

8.3 Jatkotutkimussuositukset

Tämän työn pohjalta koerakenteiden seurantamittauksia kannattaa jatkaa ainakin jonkin aikaa. Vaikka seurantatalvet olivat olosuhteiltaan keskenään erilaisia, olisi mielekäästä

tutkia lämmöneristävyyttä myös sellaisen talven mittauksen perusteella, joka vastaisi pakkasmäärältään enemmän keskimääräistä, esimerkiksi viiden vuoden tilastollista pakkasmäärää. Tällöin mitoitusarvojen voitaisiin katsoa olevan varmemmalla puolella. Nyt takaisinlaskentoja häiritseviä tapahtuvia toistuvia jäätyminen-sulamiskäyttäytymisen. Koekohdekohtaisten olosuhteiden vaikutusta ei kuitenkaan voi kokonaan poissulkea useammallakaan mittauksella. Jos lämpötilamallinnuksia katsoo tarpeelliseksi jatkokehittää, voi mallinnusta yrittää tehdä epästationääritilaan perustuvan osittaisdifferentiaaliyhtälön pohjalta. Tämä tosin edellyttää tilavuuslämpökapasiteettien arvioimista.

Jos routavaaituksia aiotaan jatkaa, tulisi niitä tihentää ajallisesti jäätyminen ja sulaminen yhteydessä. Tämä saattaa olla haastavaa saada ajoitettua oikein ja edellyttää sääolosuhteiden seuranta, jotta mittausmäärä saadaan optimoituja järkeväksi. Nyt routavaaitukset olivat liian harvasti toteutettuja, jotta niiden yhdistäminen rakennekerrosrajojen jäätyminen ajankohtiin olisi saatu tehtyä tarpeeksi tarkkaan. Tosin tässä tapauksessa routanousu oli ylipäättään niin vähäistä, että kuonarakenteet voitiin katsoa routimattomiksi käytössä olleilla mittauksilla. Joissain seurantakohteissa on käytetty jatkuvatoimisia siirtymäantureita, mutta niiden antama tieto on pistemäinen eikä siten välttämättä kovin luotettava. Useammasta pisteestä toteutettu takymetrimittaus on luotettavampi, kun epäkelvot tulokset voidaan helpommin havaita. Muutoin vaaituksia pystyttiin hyödyntämään rakenteen sulan kauden korkeusaseman vuosittaisen muutoksen seurannassa, jolla saatiin arvokasta tietoa kantavuuden kehityksen taustasyistä.

Kantavuuksien seuranta suositellaan jatkamaan, jotta voidaan osoittaa materiaalin jäykkyyden säilyvän myös pidemmällä ajalla. Kantavuusmittauksen ajankohtaa voi harvita kevätkaudella paremmin sopivaksi roudan sulamisen ajankohtaan, jolloin pystytään vertailemaan referenssi- ja kuonarakenteissa tapahtuvan kelirikon vaikutusta. Tässä työssä ei päästy arvioimaan mikä rooli kuonamateriaalin hienontumisella on rakenteen jäykkyyden näkökulmasta tai tapahtuuko sellaista edes. Koerakenteeseen asennettuja hienontumissäkkejä ei ollut tutkittu tämän seurantajakson aikana. Vaurioinventointia on syytä jatkaa, jotta mahdollisesti esiin tulevat vauriot osataan jatkoselvityksissä ajoittaa oikein niiden syy-seuraussuhteiden selvittämiseksi.

Moduularvojen laskenta jatkossa kannattaa tehdä samalla periaatteella, kuin tässä työssä vertailukelpoisuuden varmistamiseksi. Työssä tuli ilmi Odemarkin vastinpaksuusmenetelmän epäluotettavuus takaisinlaskennassa varsinkin alempien kerrosten osalta. Esimerkiksi suodatinkerroksen moduulin suurikaan muutos kaavassa ei välttämättä vaikuta rakenteen pinnan kantavuuteen läheskään samassa suhteessa, joten pelkästään

sen perusteella tehtävät tulkinnat alempien kerrosten osalta jäävät vähintäänkin kyseenalaisiksi. Moduuliarvoja voi jatkotutkimuksissa takaisinlaskea myös ajokaistakohtaisesti, jolloin niiden vertailu tiellä liikkuviin tilastoituihin ajoneuvopainoihin olisi mahdollista.

Rakenteiden pitkäaikaiskäyttämisen arvioimiseksi kannattaa koerakenteille lähitulevaisuudessa tehdä uramittauksia. Niistä saadaan tietoa rakennekerrosten deformaatiosta. Tässä kohteessa rakennekerrosten kokonaispaksuus on sen verran suuri, että mahdollinen urautuminen voitaneen yhdistää rakennekerroksissa tapahtuvaan deformaatioon pohjamaan vaikutuksen ollessa vähäinen.

Mietittäessä pohjakuonan muita hyödyntämismahdollisuuksia kannattaa kiinnittää huomiota kohteisiin, joissa materiaalin lämmöneristävyttä ja luonnonkiviaineksia pienempää tilavuuspainoa pystyttäisiin hyödyntämään täysimääräisesti. Voisiko pohjakuonalla olla esimerkiksi pehmeikkörakentamiseen soveltuvia ominaisuuksia?

8.4 Suosituksia koerakentamiseen uusiomateriaaleilla

Oletettavasti koerakentaminen eri uusiomateriaalien osalta jatkuu myös tulevaisuudessa. Tarvittavat tutkimustoimenpiteet riippuvat koekohteella tehtävän tutkimuksen tavoitteista. Tässä työssä tuli ilmi joitain seikkoja, joita kannattaa jatkossa huomioida suunniteltaessa uusia koerakenteita tässä työssä tutkittuja asioita vastaavien ominaisuuksien selvittämiseksi.

Koerakenteen sijoittelulla on merkitystä tavoiteltaessa vertailukelpoista tietoa referenssimateriaalin ja uusiomateriaalin välille. Pohjamaaeroihin kohteella kannattaa kiinnittää huomiota, jotta tutkittavat rakenteet olisivat samanlaisella maaperällä. Ymmärrettävästi rakenteen sijoittamista ohjaavat muutkin käytännön seikat, mutta pohjamaalla on suuri vaikutus routa- ja kantavuuskäyttämiseen. Suomen olosuhteissa maalajivaihtelu voi olla hyvinkin pienipiirteistä. Olisi toivottavaa, että tutkittavaa rakennetta kohti olisi aikakin yksi vertailurakenne vastaavanlaisella maaperällä. Tässä työssä lämpötilaseuranta oli toteutettu referenssirakenteen siihen osaan, joka poikkesi pohjamaaltaan kaikkein eniten muista rakenteista.

Vertailumateriaaleille tulisi suorittaa samat laboratoriotutkimukset, kuin tutkittavillekin uusiomateriaaleille ainakin jatkotutkimusten kannalta kriittisten testien osalta. Tällöin pystytään arvioimaan ovatko kenttä- ja laboratoriomittaukset keskenään linjassa. Tässä työssä olisi ollut hyötyä, jos lämpöteknisten ja jäykkyysominaisuuksien määrittäykset olisi tehty myös kiviaineksille. Näytteenotto verrokkimateriaaleille olisi helppo toteuttaa raken-

tamisen aikana työmaalle toimitetuista eristä. Standardikiviainesten oletaminen ”tunnetuiksi” saattaa houkuttaa resurssien säästämiseksi, mutta etsittäessä tietoa niiden ominaisuuksista kirjallisuudesta päädytään hyvinkin laajaan skaalaan eri arvoja. Lämpötilamallinnuksen lähtötiedoksi kannattaa harkita selvitettävän uusiomateriaalin tilavuuslämpökapasiteetti, joka saattaa poiketa kiviainesten vastaavasta.

Laboratorio- ja kenttämittauksia suunniteltaessa olisi hyvä arvioida tiettyjen menetelmien soveltuvuutta uusiomateriaaleille. Maksimaalisen tiivystilan määrittämiseen käytettävä modifioitu Proctor-koe ei välttämättä sovellu huokoisille materiaaleille sen rikkoessa rakeita. Kentällä tiivyyttä mitattaessa saattaa olla vaikea päästä laboratorioissa määritetyn arvon lähelle. Troxler-mittauksella saadaan hyvin tietoa rakenteen tiivystilasta, jos maksimikuivairtoisuus on määritetty oikein. Troxler kannattaa kuitenkin kalibroida hiekka- tai vesivolymetrimittauksella, jotta varmistetaan sen soveltuvuus testattavalle uusiomateriaalille.

Rakenteen vesipitoisuuden arviointiin kosteusmittaus voisi olla hyödyllinen. Vaikka se tuottaakin vain pistemäisiä tuloksia, voisi kosteuden seurannasta saada mielenkiintoista lisätietoa kantavuuden kehittymisen ja routamallinnusten tueksi. Siitä olisi myös hyötyä roudan sulamisen vaikutuksen seurannassa keväällä. Materiaalien vesipitoisuuden arviointi muutoin on hankalaa, vaatiessa käytännössä rakennenyhteistyötä.

Rakenteiden pintavaaituksia suunniteltaessa voisi olla aiheellista pohtia mahdollisuutta tehdä osa mittauksista pistepilvenä. Tässä tutkitun kaltaiselle pienialaiselle koerakenteelle tämän pitäisi olla helposti toteutettavissa nykyaikaisella takymetrikalustolla. Pistepilvestä olisi hyötyä, kun siitä pystyttäisiin analysoimaan rakennekerrosten deformaatiota indikoivaa urasyvyyden kehittymistä rakenteen pinnalla. Erilliset urasyvyyden mittauslaitteistot pohjautuvat laserskannaukseen ja GPS-paikannukseen, jolloin niistä saatavaa tietoa ei pystytä sitomaan luotettavasti absoluuttiseen korkeusasemaan. Rakenteen pintavaaitukset korkeusaseman seuraamiseksi jouduttaisiin tällöin tekemään takymetrillä erikseen.

9. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää jätteenpolton pohjakuonan pitkäaikaistoimivuutta tie- ja katurakenteissa suomalaisissa olosuhteissa. Jätteenpolton pohjakuonasta on vuosien varrella tehty tutkimuksia sen maarakennuskäytön soveltuvuuden arvioimiseksi. Pääosin tutkimukset ovat painottuneet kuonamateriaalien ympäristökelpoisuuden arviointiin haitta-aineiden liukoisuuksien perusteella. Suomessa toteutetut teknisen kelpoisuuden arviointiin tähtäävät koerakennetutkimukset ovat liittyneet enimmäkseen erilaisiin kenttä- ja kaatopaikkarakenteisiin. Kuonan käytöstä Suomessa osana tie- ja katurakenteita on olemassa vähänlaisesti laajamittaiseen seurantaan pohjautuvaa pitkäaikaista käyttökokemusta. Lähimmin suomalaisia olosuhteita vastaavia tutkimuksia on tehty jonkin verran muissa Pohjoismaissa kuten Ruotsissa. Käyttö tierakenteissa asettaa kuonamateriaalille omat vaatimuksensa lämpötilakäyttäytymisen ja jäykkyyden suhteen. Tällä tutkimuksella pyrittiin saamaan uutta tietoa pohjakuonan laajemman hyödyntämisen mahdollistamiseksi. Tutkimus perustui materiaalien ominaisuuksien arviointiin kenttämittauksista saadun tiedon pohjalta. Samalla osoitettiin käytännön koerakentamisen tärkeys uusiomateriaalin testauksessa. Laboratoriotutkimuksista on mahdollista johtaa tiettyjä trendejä ja tehdä vertailua muihin uusio- tai luonnonkiviaineisiin. Todellinen käyttäytyminen riippuu kuitenkin useista sellaisista tekijöistä, jotka laboratorio-olosuhteissa ovat joko vakioituja tai joiden vaikutus on suljettu pois.

Tutkimus tehtiin kolmen vuoden seuranta-aineiston pohjalta. Siitä mikä tällaisessa materiaalitutkimuksessa on pitkä tai riittävän pitkä seuranta-aika, ei varmasti ole mitään yleispätevää määritelmää. Ennemminkin olosuhteilla seuranta-aikana on enemmänkin merkitystä tutkimuksen yleispätevyyden kannalta. Erilaisista olosuhteista on mahdollista päätellä analyysistä johdettujen suureiden vaihteluväliä rakenteiden mitoitusta ajatellen. Toisaalta useamman mittauksen toistaminen toisiaan vastaavissa olosuhteissa tarjoaa tietoa siitä, mikä on analyysimenetelmästä johtuva osuus suureiden vaihteluvälissä. Tässä työssä tarkastelun kohteena olleella ajanjaksolla suurin merkitys oli erilaisten sääolosuhteiden vaikutuksella. Etenkin talvikaudet erosivat toisistaan merkittävästi. Toisaalta tutkimus tehtiin yhden ja saman laitoksen tuottamalle kuonamateriaalille. Yleisesti on tiedossa poltetun jätteen ja polttolaitoksen polttoprosessin vaikutus pohjakuonan ominaisuuksiin. Myös kuonan käsittely ja varastointi vaikuttavat materiaaliominaisuuksiin. Tämän työn tulosten voidaan kuitenkin katsoa määrittävän suuntaviivoja yleisemminkin jätteenpolton pohjakuonan hyödynnettävyyteen.

Koerakenteiden seurantamittausten sekä niistä tehtyjen takaisinlaskentojen perusteella saatiin vastauksena kappaleessa 1 esitettyihin tutkimuskysymyksiin seuraavat johtopäätökset:

1. kuonalajitteiden lämmönjohtavuudet jäätyneenä olivat luonnonkiviaineksia alhaisemmat ollen:
 - a. 0/32 mm kuonalajitteelle: 1,2...1,3 W/mK
 - b. 0/16 mm kuonalajitteelle: 1,1...1,4 W/mK
 - c. 0/2 mm kuonalajitteelle: 1,0...1,2 W/mK
2. kuonalajitteiden vastaavuusarvot lämmöneristävyydessä hiekkaan verrattuna olivat luonnonkiviaineksia jonkin verran korkeampia ollen:
 - a. 0/32 mm kuonalajitteelle: 1,4...1,7
 - b. 0/16 mm kuonalajitteelle: 1,9...2,1
 - c. 0/2 mm kuonalajitteelle: 2,0...2,3
3. segregatiopotentiaali kaikkien kuonalajitteiden osalta oli alle 0,5 mm²/Kh ja routaturpoama noin 0 %, joten kaikki tutkitut kuonalajitteet voidaan katsoa routimattomiksi ainakin pohjavedenpinnan yläpuolisissa rakenteissa
4. Väyläviraston ohjeistamalla vertailuparimenetelmällä määritetyt tierakenteen kuormituskestävyyksimitoituksessa käytettävät E-moduulit olivat jonkin verran luonnonkiviaineksia alhaisemmat ollen:
 - a. jakavan kerroksen 0/32 mm kuonalajitteelle: 130 MPa
 - b. suodatinkerroksen 0/16 mm kuonalajitteelle: 50 MPa
 - c. suodatinkerroksen 0/2 mm kuonalajitteelle: 70 MPa
5. kuonarakenteiden jäykkyyden kehitys tapahtui ensimmäisen vuoden aikana rakentamisesta, joka suhteellisesti vastasi luonnonkiviainesrakenteiden jäykkyyden kehitystä
6. tutkimuksessa ei havaittu kuonamateriaalin ikääntymisestä johtuvaa kemiallista lujuuden kasvua
7. pudotuspainolaitemittausten taipumasuppiloista määritettyjen taipumaindeksien perusteella pohjakuonarakenteille ei ole odotettavissa vaurioitumista. Vaurioinventointien perusteella kuonarakenteisiin ei ollut seuranta-aikana syntynyt vaurioita
8. jätteenpolton pohjakuona soveltuu käsiteltyjen seurantamittausten perusteella käytettäväksi tierakenteen jakavaan ja suodatinkerrokseen

LÄHTEET

Alkio, R. ym., 2001. *Tien rakennekerrosten materiaalit*. Saatavilla: <https://www.doria.fi/handle/10024/139041>

Arm, M. o.a., 2008. *Uppföljning av slaggrusprovvägar. Fallviktsmätning på provsträckor på Törringevägen i Malmö och Dåvamyran i Umeå*. Saatavilla: <https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/19093/uppfoljning-av-befintliga-slaggrusprovvarar-varmeforskrappport-916.pdf>

Arm, M. o.a., 2016. *Användning och modifiering av metallseparerat slaggrus*. Saatavilla: <https://energiforsk.se/program/askprogrammet/rapporter/anvandning-och-modifiering-av-metallseparerat-slaggrus-2016-331/>

Belt, J., Lämsä, V. P., Savolainen, M. & Ehrola, E., 2002. *Tierakenteen vaurioituminen ja tiestön kunto*. Saatavilla: <https://www.doria.fi/handle/10024/139074>

Bentley, 2023. *PLAXIS 2D*. Saatavilla: <https://www.bentley.com/software/plaxis-2d/>

Bröckl, M. ym., 2021. *Jätteenpolton kiertotalous- ja ilmastovaikutuksiin vaikuttaminen eri ohjauskeinoin*. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-093-6>

Bunge, R., 2016. *Recovery of metals from waste incinerator bottom ash*. Saatavilla: <https://vbsa.ch/wp-content/uploads/2016/07/Studie-Bunge-Internetversion.pdf>

Ehrola, E., 1996. *Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet*. s.l.:Rakennustieto Oy.

Euroopan Komissio, 2020. *Uusi kiertotalouden toimintasuunnitelma Puhtaamman ja kilpailukykyisemmän Euroopan puolesta*. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN>

Fortum, 2023. *Riihimäen laitosalue*. Saatavilla: <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisöille/kierratys-ja-jatepalvelut/recycling-waste-yhteystiedot-ja-toimipaikat/riihimaen-laitosalue>

GEO-SLOPE International, Ltd., 2014. *Thermal Modeling with TEMP/W*. Saatavilla: <https://ottegroup.com/wp-content/uploads/2021/02/temp-modeling-Sept2014.pdf>

Harju, I. ym., 2022. *Käsittelyn yhdyskuntajätteenpolton pohjakuonan käyttö infrarakentamisessa: ohjeistuksen käsikirjoitusluonnos koekäyttöön*. Saatavilla: <https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/K%C3%A4sitellyn%20yhdyskuntaj%C3%A4tteen%20pohjakuonan%20k%C3%A4ytt%C3%B6%20infrarakentamisessa%2C%20ohjeistuksen%20k%C3%A4sikirjoitusluonnos%20koek%C3%A4ytt%C3%B6%2031.3.2022.pdf>

Kaartinen, T. ym., 2010. *Pohjakuonan jalostus uusiomateriaaliksi*. Saatavilla: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2010/T2567.pdf>

Kaartinen, T., Laine-Ylijoki, J. & Wahlström, M., 2007. *Jätteen termisen käsittelyn tuhkien ja kuonien käsittely- ja sijoitusmahdollisuudet*. Saatavilla: <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2007/T2411.pdf>

Kalliainen, A. ym., 2011. *Radan eristys- ja välikerrosten tiiviys- ja kantavuustutkimus*. Saatavilla: <https://www.doria.fi/handle/10024/121366>

Kolisoja, P., 1993. *Sitomattomien kerrosten kiviainesten muodonmuutosominaisuudet*. Saatavilla: https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Ava-palvelin/pdf1/3200163-kiviainesten_muodonmuutosomin.pdf

Kujala, K., 1994. *Routanousun mallintaminen*. Saatavilla: <https://www.doria.fi/handle/10024/139491>

Laine-Ylijoki, J. ym., 2005. *Yhdyskuntajätteiden termisen käsittelyn kuonista ja tuhkista hyötykäytettäviä ja loppusijoitettavia tuotteita*. Saatavilla: <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2005/T2291.pdf>

Lehtonen, M., 2010. *Jätevoimalan arinakuonan hyötykäyttö*. Diplomityö. s.l.:s.n.

Leivo, V. & Rantala, J., 2000. *Maanvaraisten alapohjarakenteiden kosteuskäyttäytyminen*. Saatavilla: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/128252>

Liikennevirasto, 2018. *Tierakenteen suunnittelu*. Saatavilla: https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo_2018-38_tierakenteen_suunnittelu_web.pdf

Liimatta, L., Belt, J. & Ehrola, E., 1989. *Pudotuspainolaitteen käyttö tien rakenteellisen toiminnan arvioinnissa ja parantamistarpeen suunnittelussa*. Oulu: s.n.

MathWorks, 2023. *Matlab*. Saatavilla: https://se.mathworks.com/products/matlab.html?s_tid=hp_products_matlab

Matikka, S., 2021. *Jätteenpolton pohjakuonan käyttö kevyen liikenteen väylällä: kokemuksia Riihimäki - Hikiä hankkeesta*. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2021120724097>

Nurmikolu, A. & Kolisoja, P., 2002. *Ratarakenteen routasuojaus*. Saatavilla: <https://www.doria.fi/handle/10024/146360>

Olsson, D., 2012. *Användning av slaggrus från avfallsförbränning i anläggningskonstruktioner (Kartläggning av erfarenheter)*. Saatavilla: <https://www.lu.se/lup/publication/4468232>

Open Street Map, 2024. *Open Street Map*. Saatavilla: <https://www.openstreetmap.org/#map=16/60.7734/24.8348>

Piippo, H., Belt, J. & Ehrola, E., 1990. *Tien kantavuuden mittauslaitteet ja eri laitteilla määritetyt kantavuudet*. Oulu: s.n.

Pöyry Management Consulting Oy, 2015. *Jätteiden energiahöydyttäminen Suomessa: Energiateollisuus RY, loppuraportti*. Saatavilla: https://energia.fi/files/405/ET_Jatteiden_energiakaytto_Loppuraportti_161015.pdf

ROADDEX, 2023. *Roadex Network eLearning*. Saatavilla: <https://www.roadex.org/fi/e-learning/>

Saarelainen, S. & Kivikoski, H., 2000. *Tierakenteen routamitoitus, TPPT työraportti*. Espoo: VTT Yhdyskuntatekniikka.

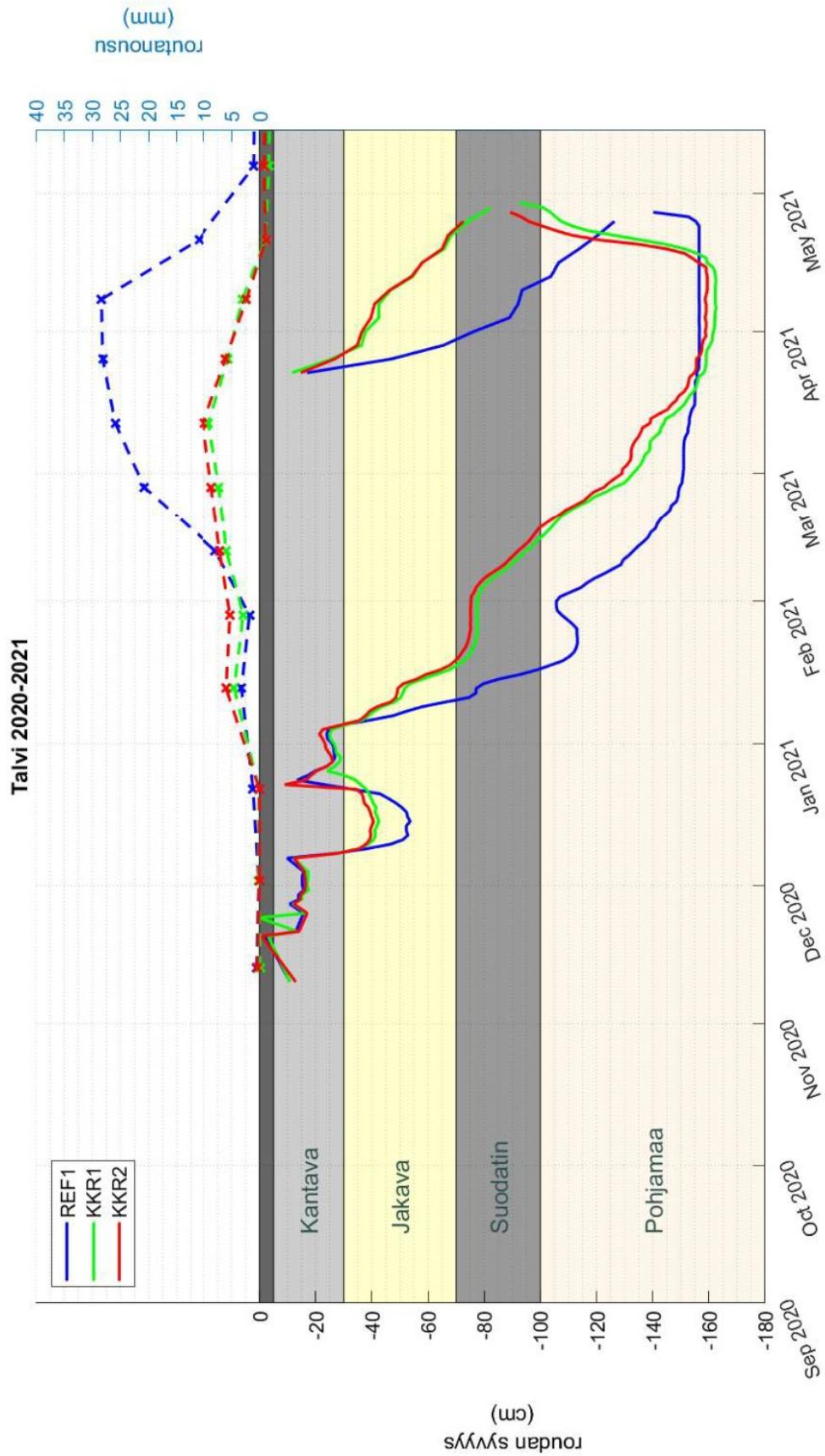
Saarela, M., 2017. *Rakentamattoman soratien rakenteen parantaminen*. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2017060111932>

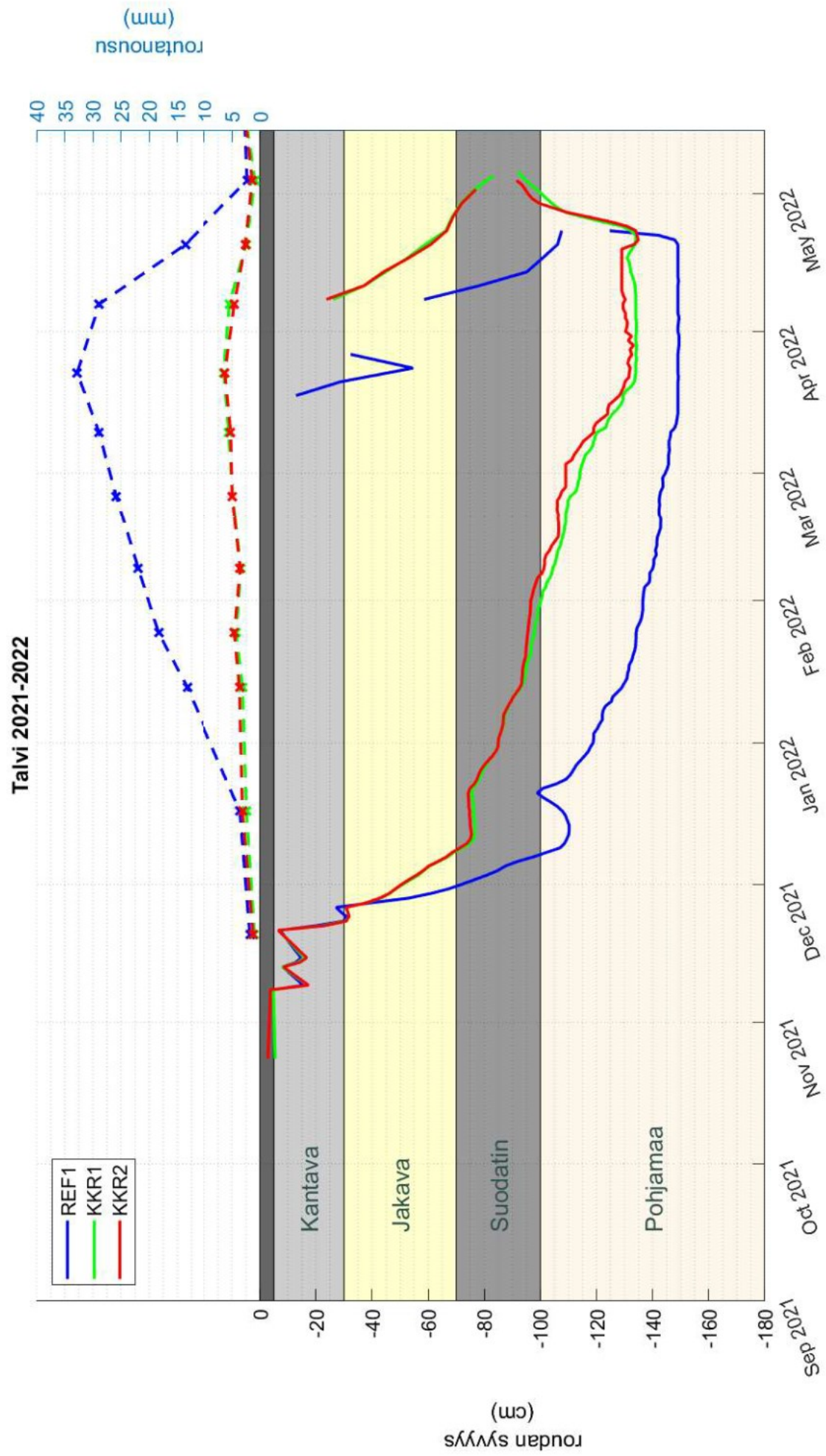
Salovaara, J., 2017. *Jätteenpolttotekniikat Suomessa*. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2017112150804>

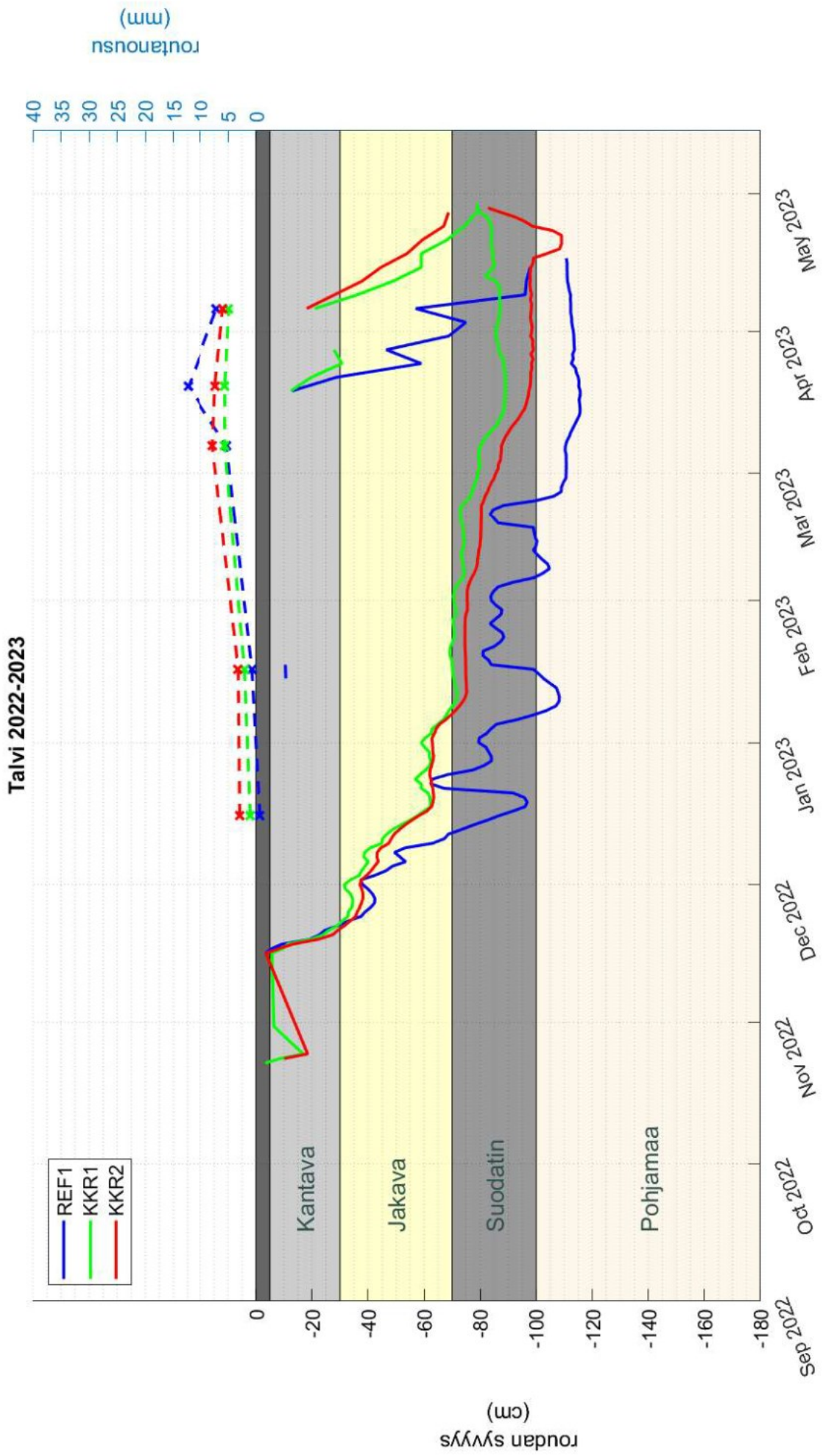
Sormunen, L. A., 2017. *Recovered Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash: Aggregate-Like Products for Civil Engineering Structures*. Tampere: s.n.

- Spoof, H. & Petäjä, S., 2000. *Pudotuspainolaitemittaus (PPL-mittaus)*. Saatavilla: <https://cris.vtt.fi/en/publications/pudotuspainolaitemittaus-ppl-mittaus>
- Statens Geotekniska Institut, 2006. *Handbok: Slaggrus i väg -och anläggningsarbeten*. Saatavilla: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1299898/FULLTEXT01.pdf>
- Suomen Erityisjäte, 2018. *Jätteenpolton pohjakuona: ohje materiaalin hyödyntämiseen maarakentamisessa*. Saatavilla: <https://www.erityisjate.fi/client/erityisjate/userfiles/suomen-erityisjate-kuonaohje-a5-20180301-vs2.pdf>
- Suomen Erityisjäte, 2023. *Pohjoismaiden ensimmäinen ADR-kuivaerotuslaitteisto*. Saatavilla: <https://www.erityisjate.fi/tutkimus-tulevaisuus/innovaatiot-ja-teknologiat/pohjoismaiden-ensimmainen-adr-kuivaerotuslait/>
- Suomen kuntatekniikan yhdistys, 2020. *Kadun suunnittelun ohjeet*. Saatavilla: <https://katu2020.info/2020/>
- Söderholm, A., 2020. *Jätteenpolton pohjakuona tierakenteessa: koerakenteen rakentaminen ja tutkimus pohjakuonan teknisistä ominaisuuksista*. Saatavilla: <https://www.theseus.fi/handle/10024/349589>
- Tielaitos, 1993. *Tierakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset*. Saatavilla: https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Tiehallinto/pdf2/yleiset_perusteet.pdf
- Tilastokeskus, 2023a. *Ilmastopäästöt toimialoittain, 2008-2020*. Saatavilla: https://pxweb2.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_tilma/statfin_tilma_pxt_11ig.px/ [Haettu 22 9 2023].
- Tilastokeskus, 2023b. *Jätetilasto 2021*. Saatavilla: https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_jate/statfin_jate_pxt_12cv.px/ [Haettu 22 9 2023].
- Vesanto, P., Ruonala, S. & Nuutala, M., 2006. *Jätteenpolton parhaan käytettävissä olevan tekniikan (BAT) vertailuasiakirjan käyttö suomalaisessa toimintaympäristössä*. Saatavilla: <http://hdl.handle.net/10138/38712>
- VTT, 2007. *Talonrakennuksen routasuojausohjeet*. Tampere: s.n.
- Väylävirasto, 2018. *Tierakenteen suunnittelu*. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-317-632-4>
- Väylävirasto, 2021. *Tien poikkileikkauksen suunnittelu*. Saatavilla: https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2021-16_tien_poikkileikkauksen_web.pdf
- Väylävirasto, 2022. *Uusiomateriaalien käyttö väylärakentamisessa*. Saatavilla: https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2022-20_uusiomateriaalien_kaytto_web.pdf

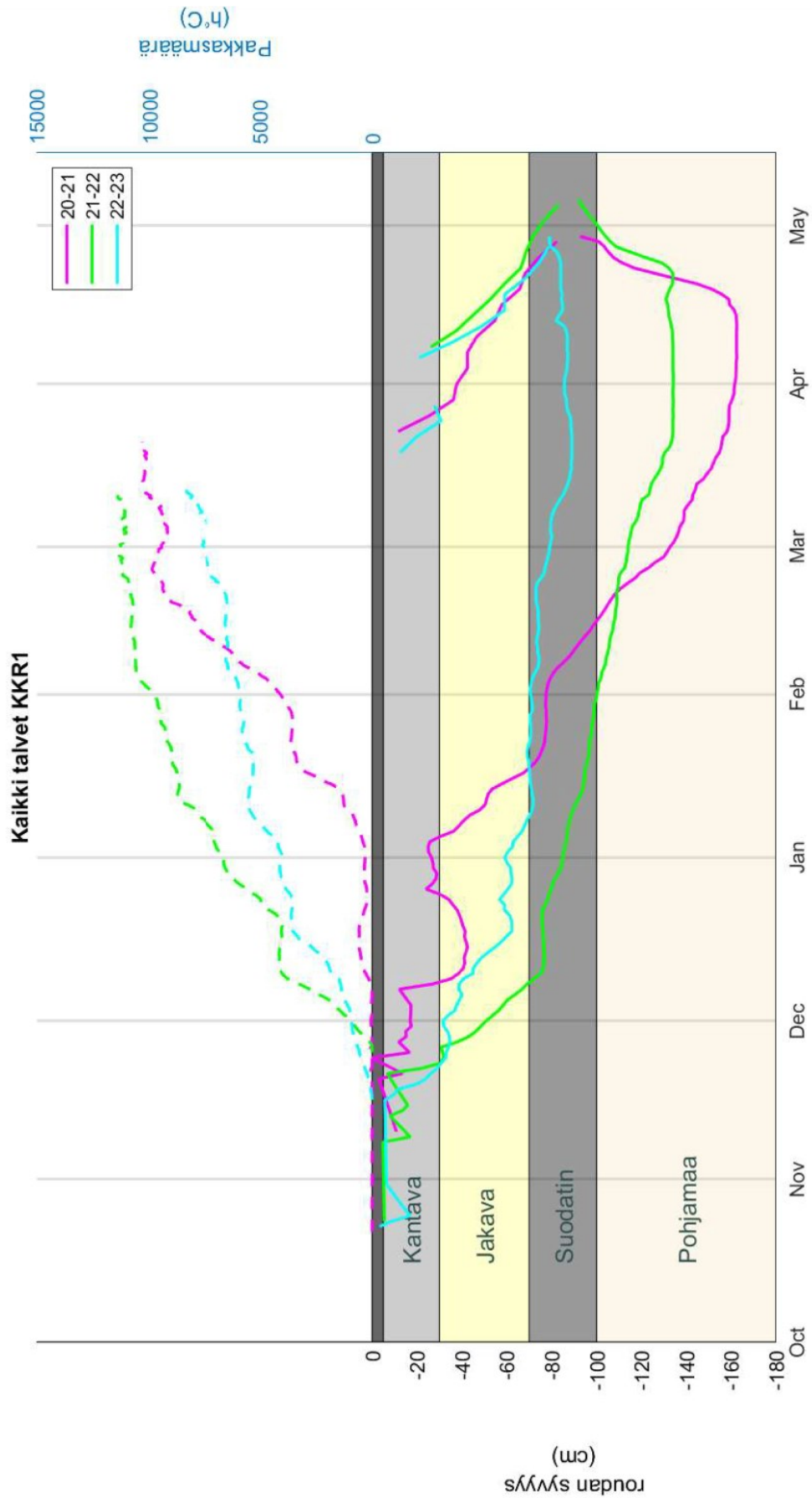
LIITE A: ROUDAN SYVYYDEN KUVAAJAT TALVIEN MUKAAN

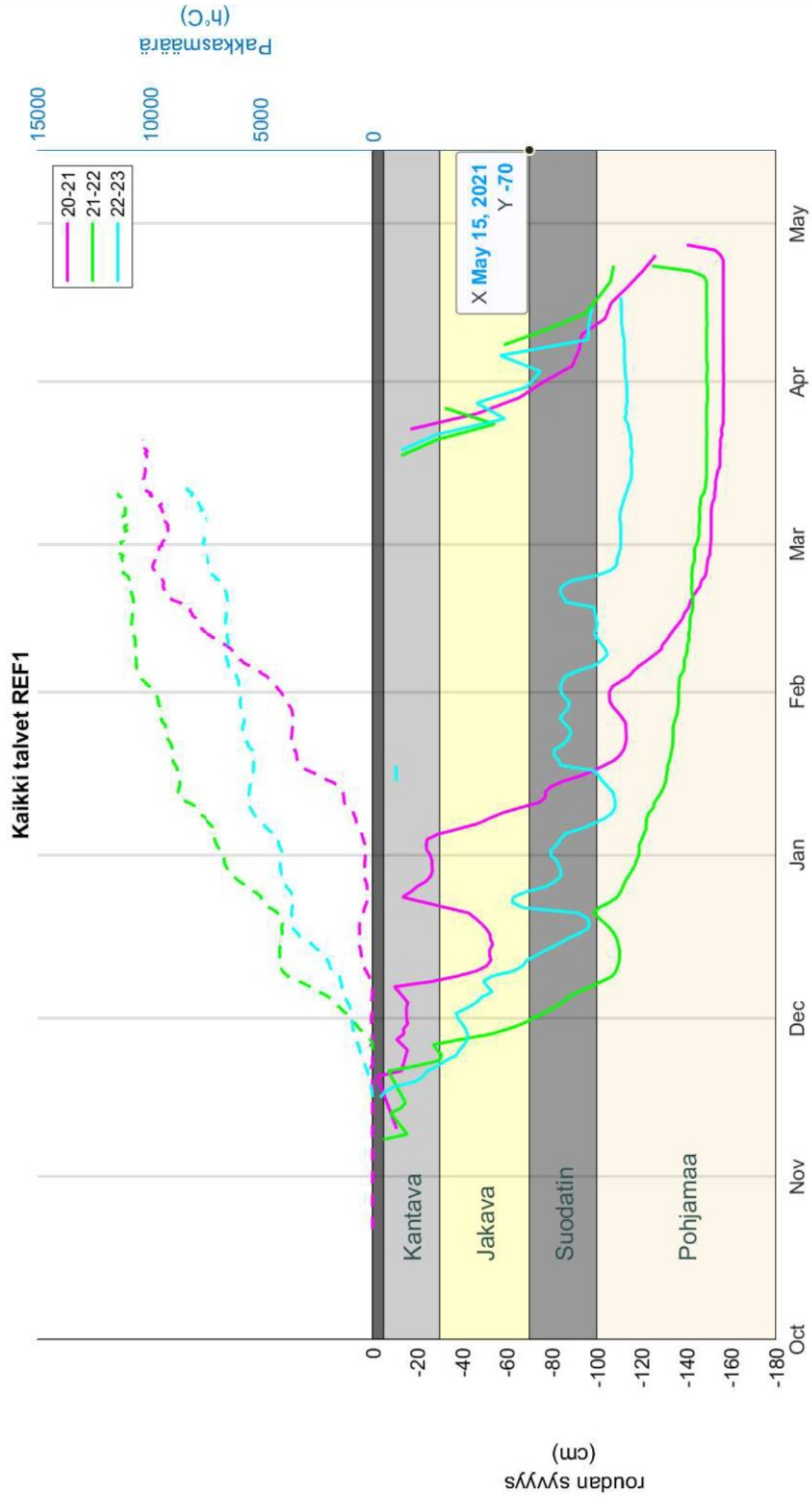


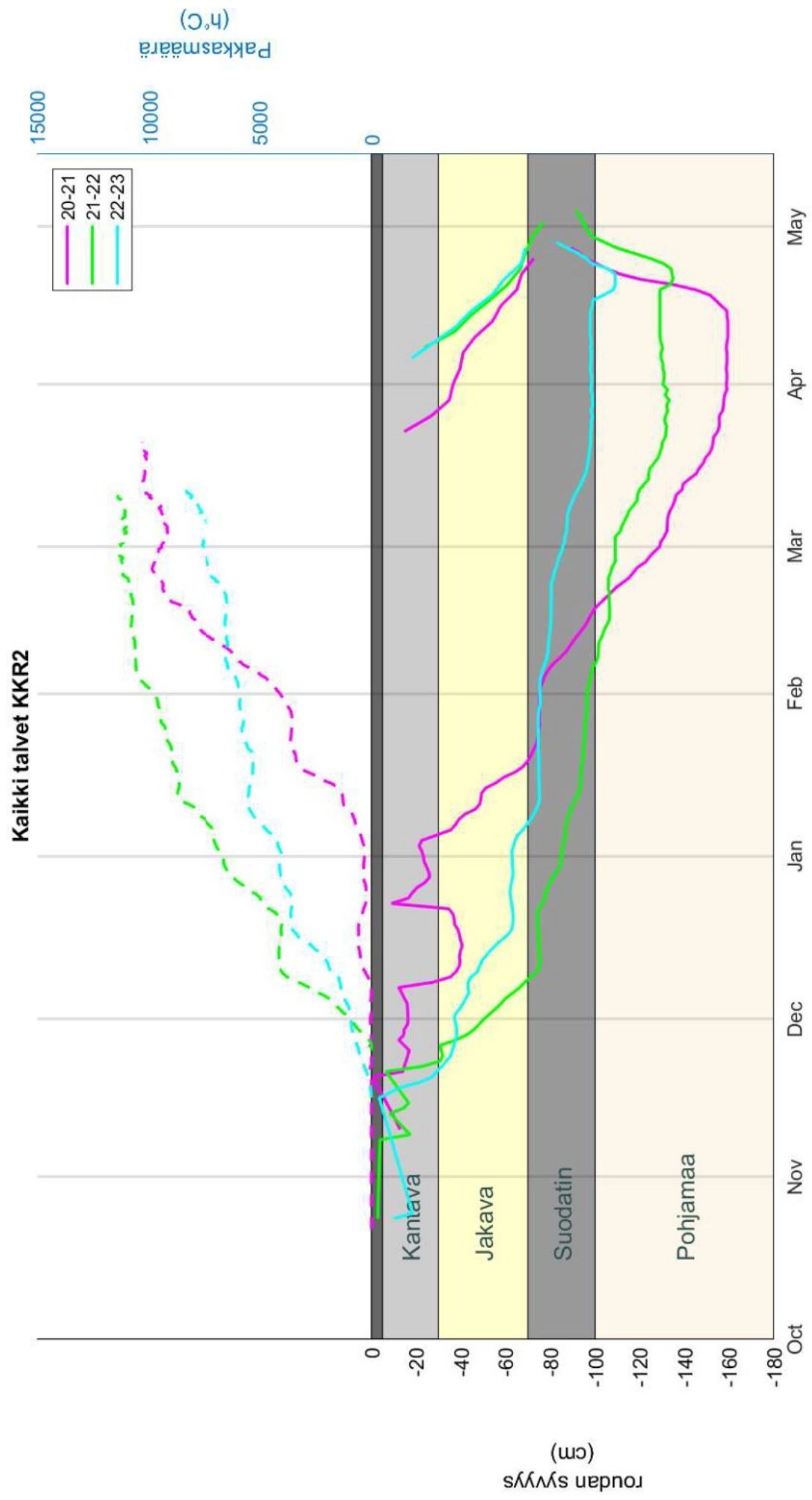




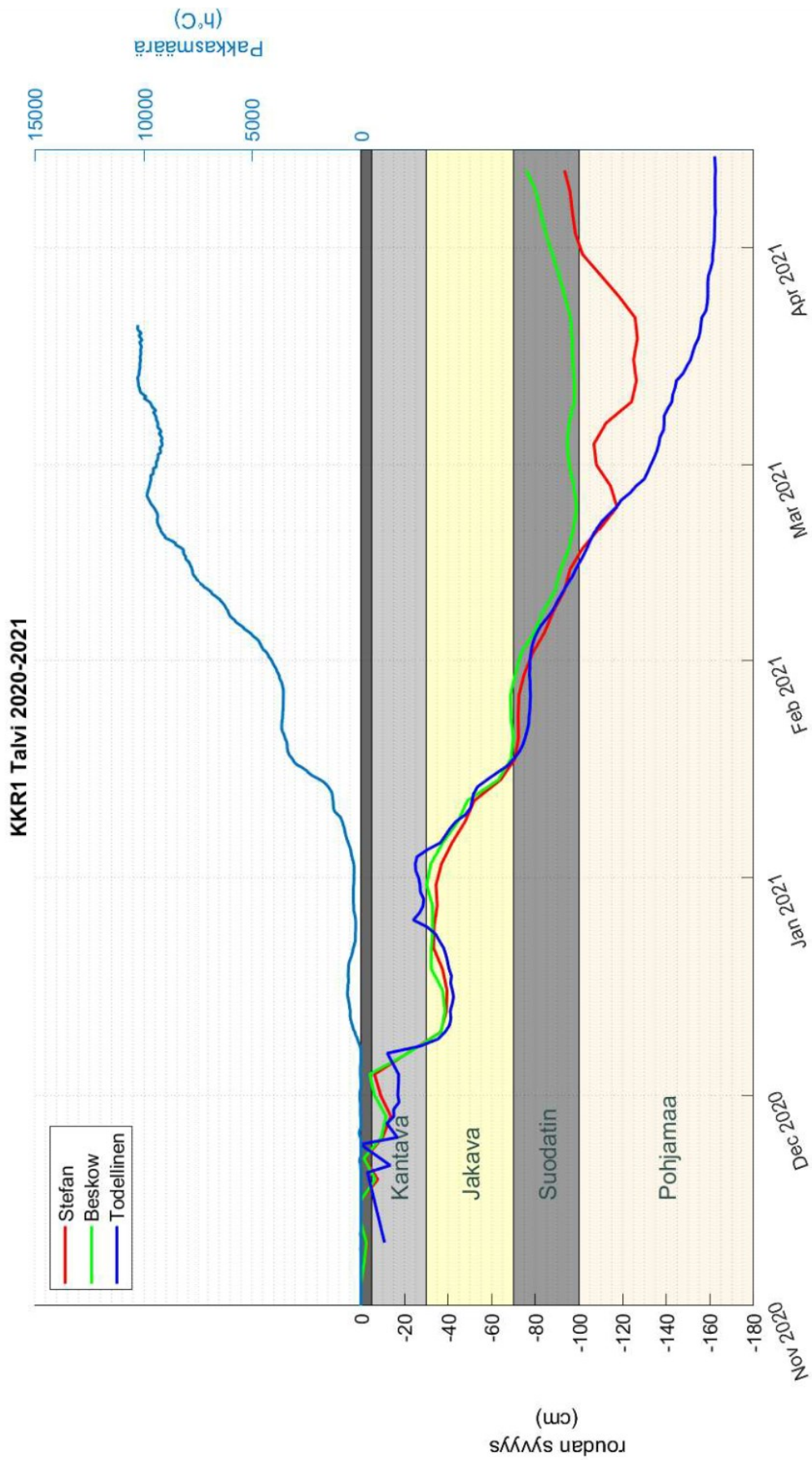
LIITE B: ROUDAN SYVYYDEN KUVAAJAT RAKENTEIDEN MUKAAN

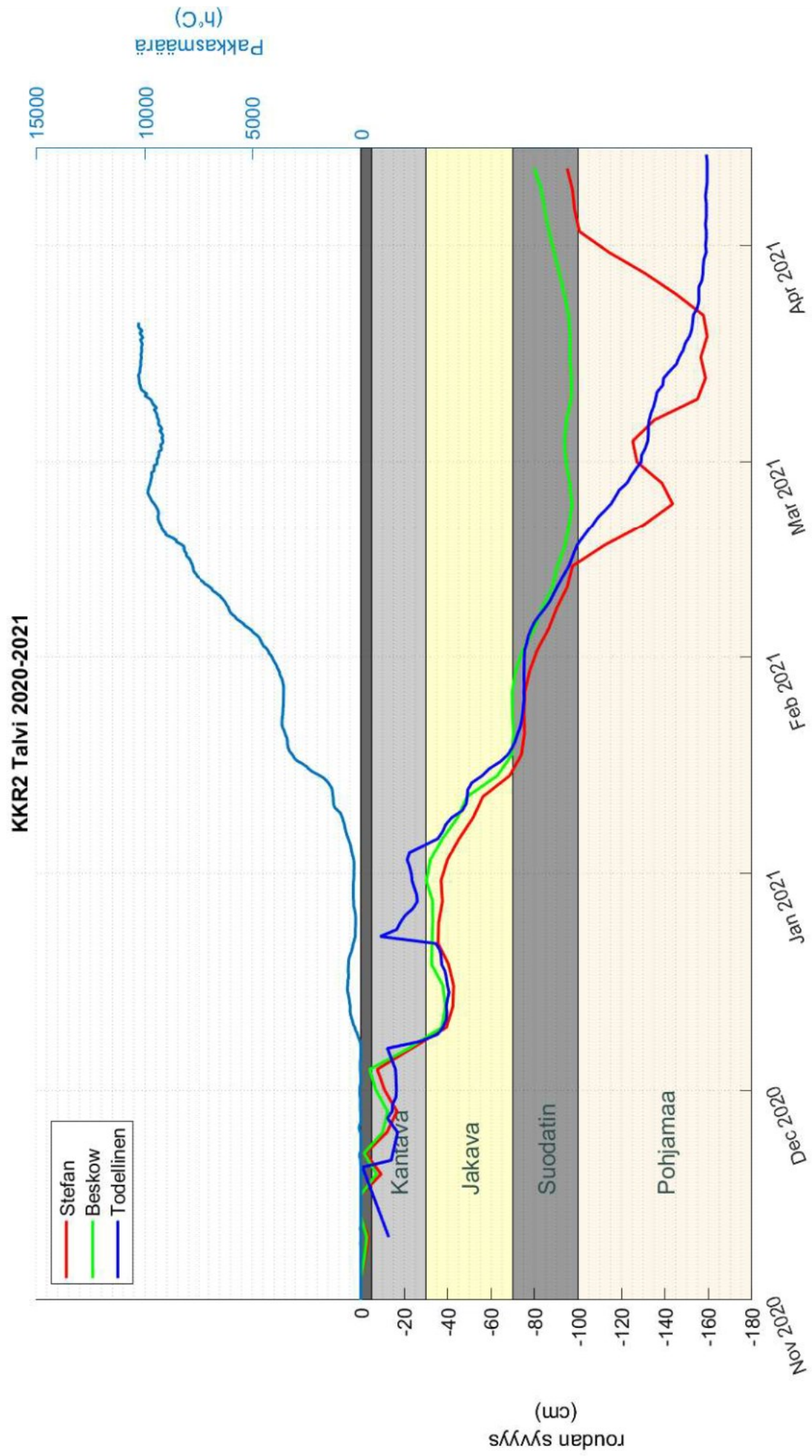


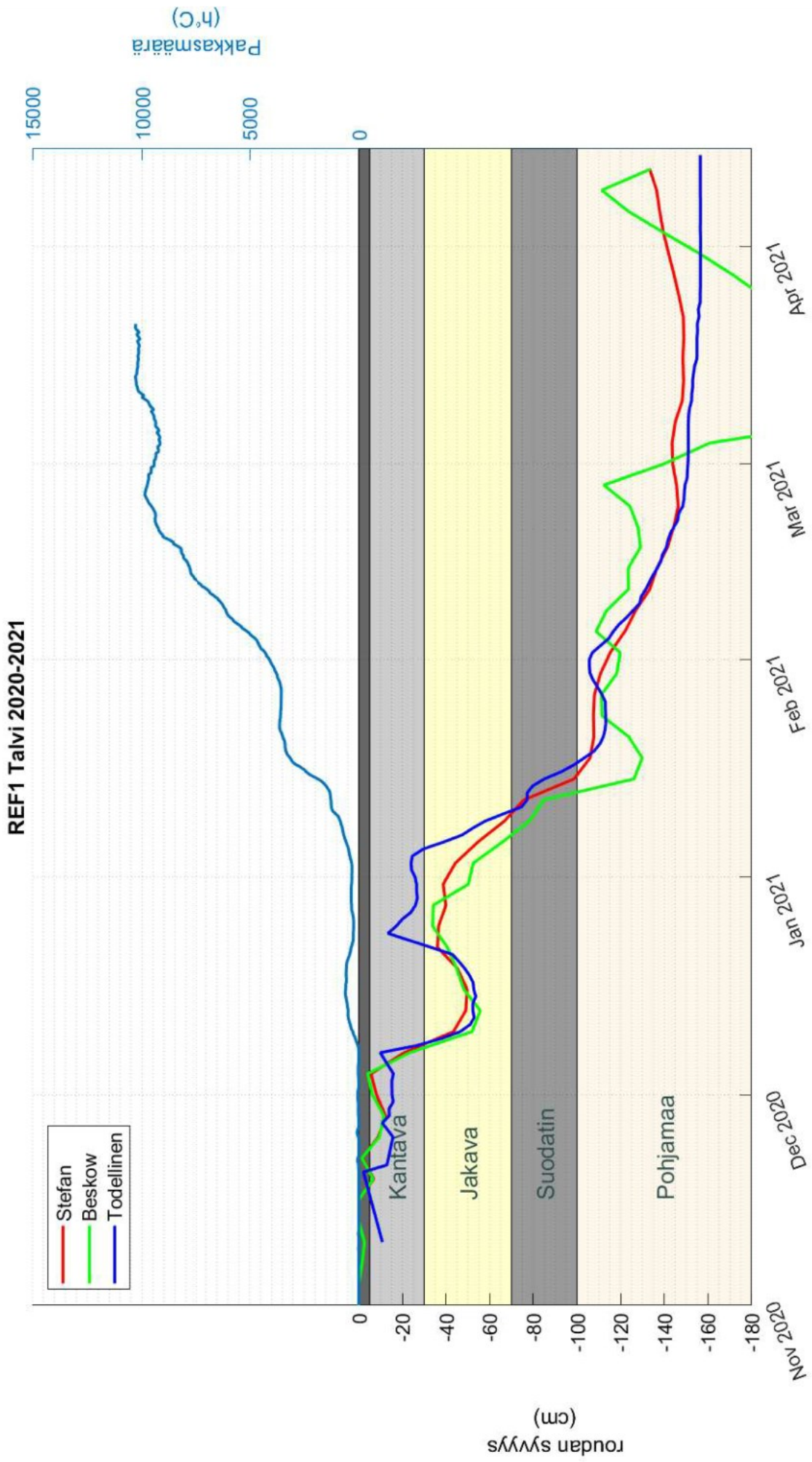


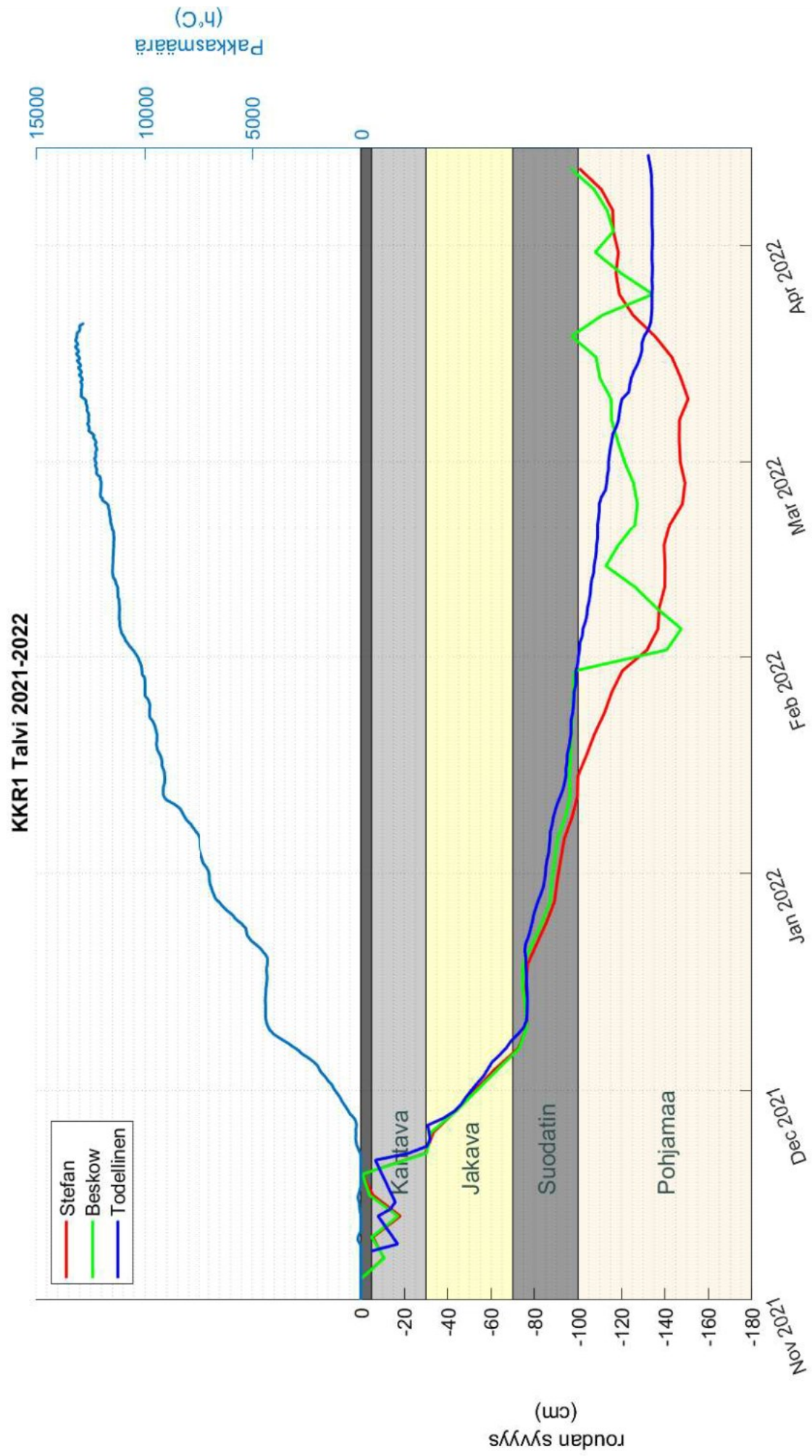


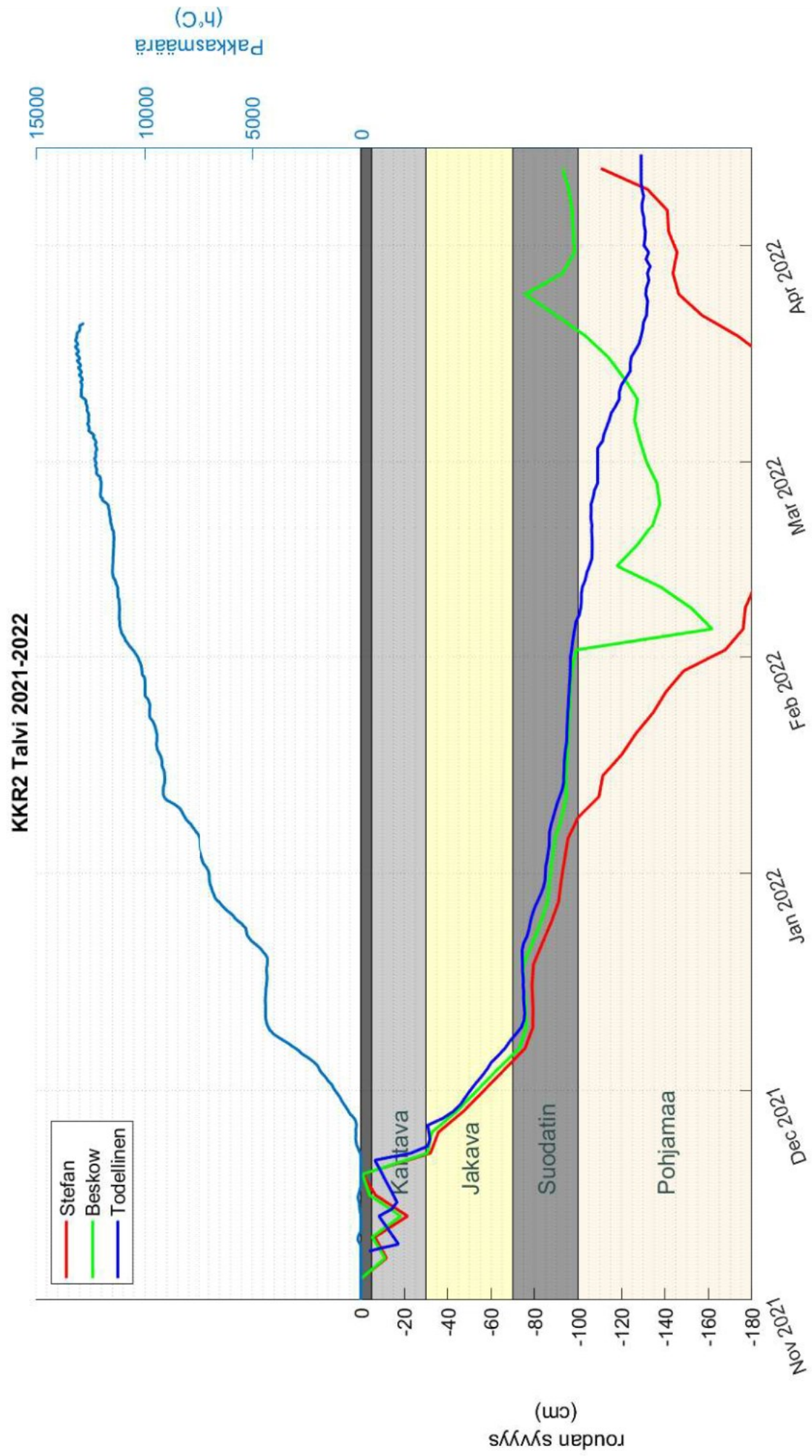
LIITE C: ROUDAN SYVYYDEN KUVAAJAT LASKETTUNA ANALYYTISESTI



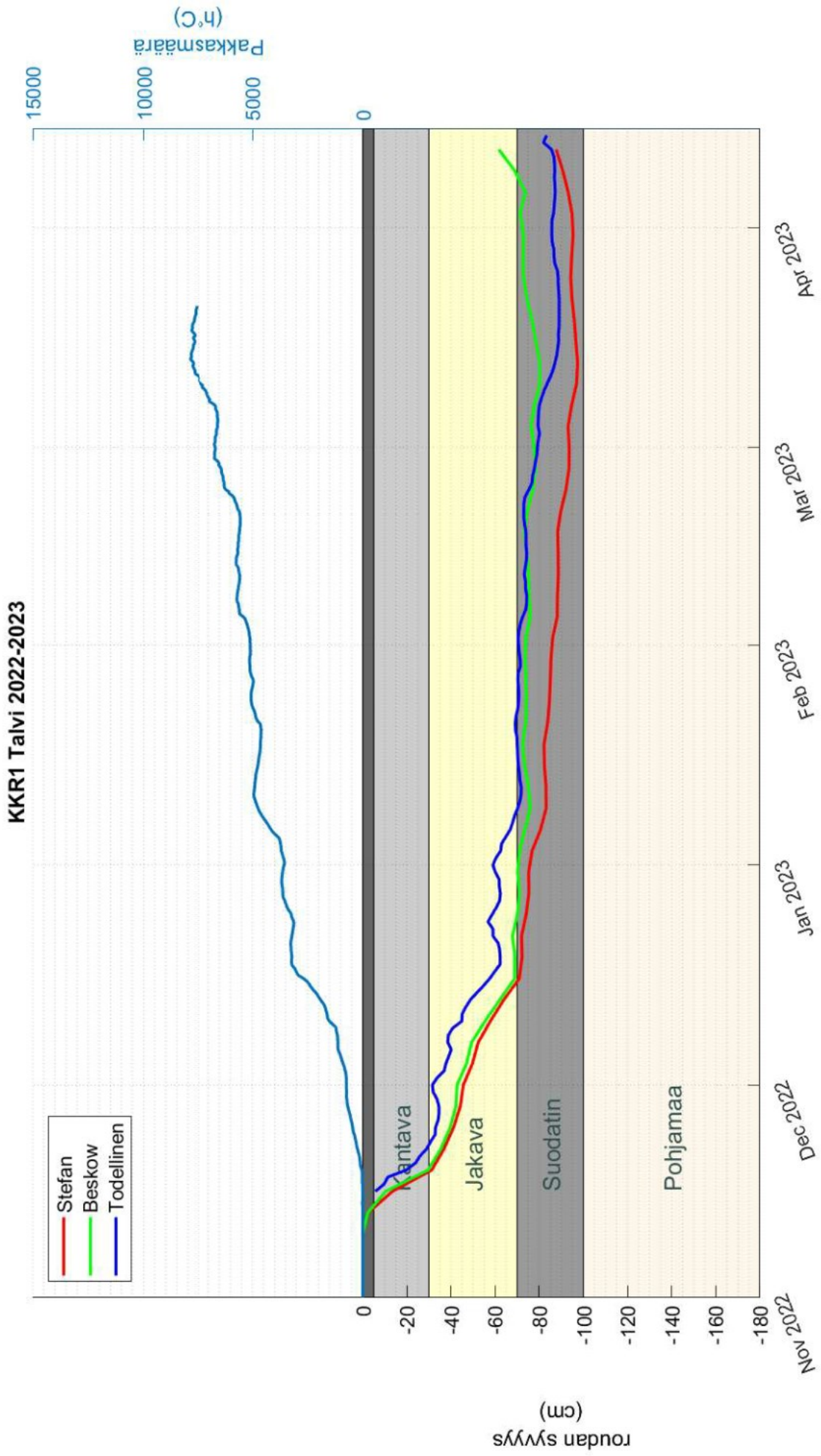


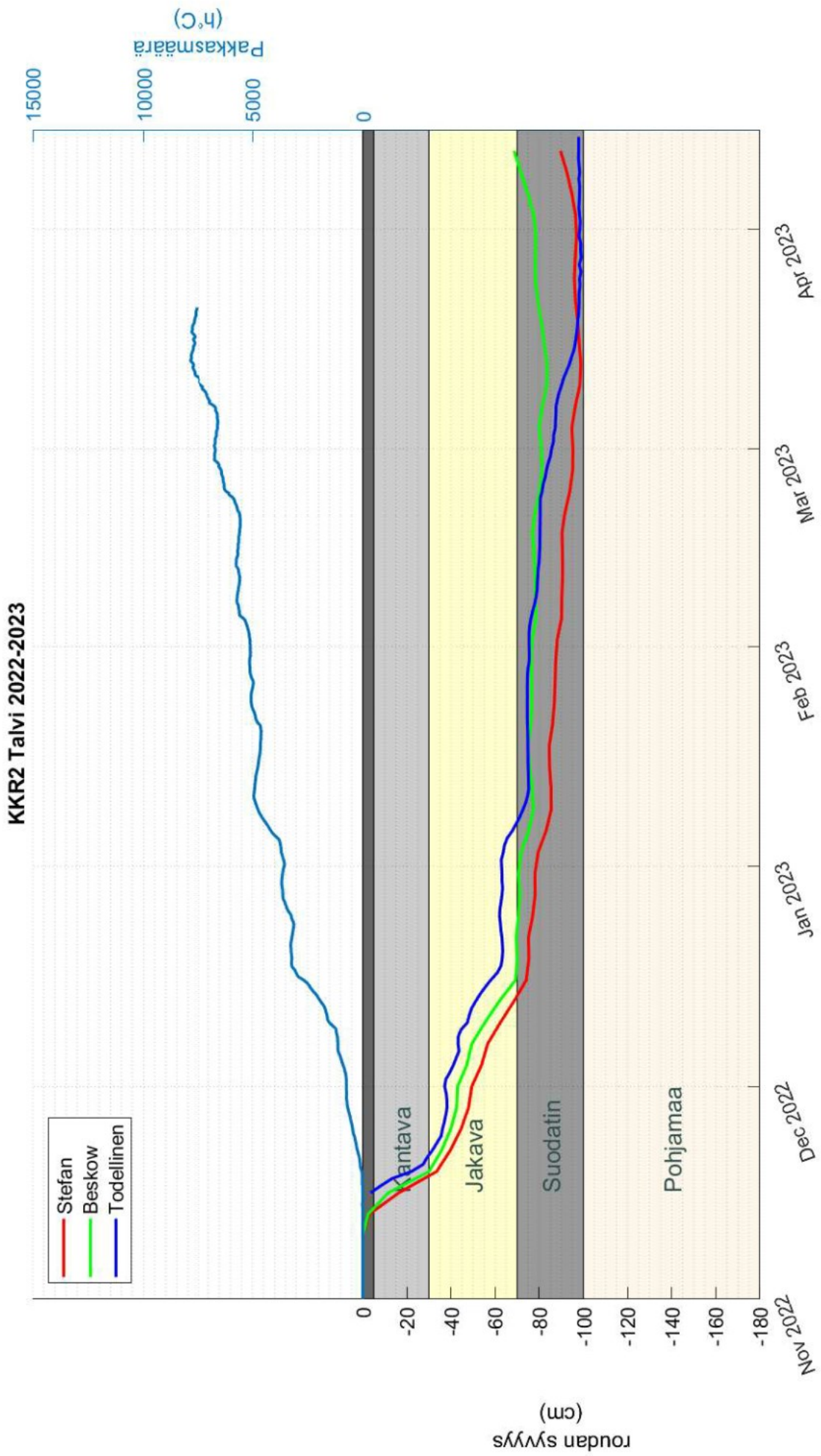


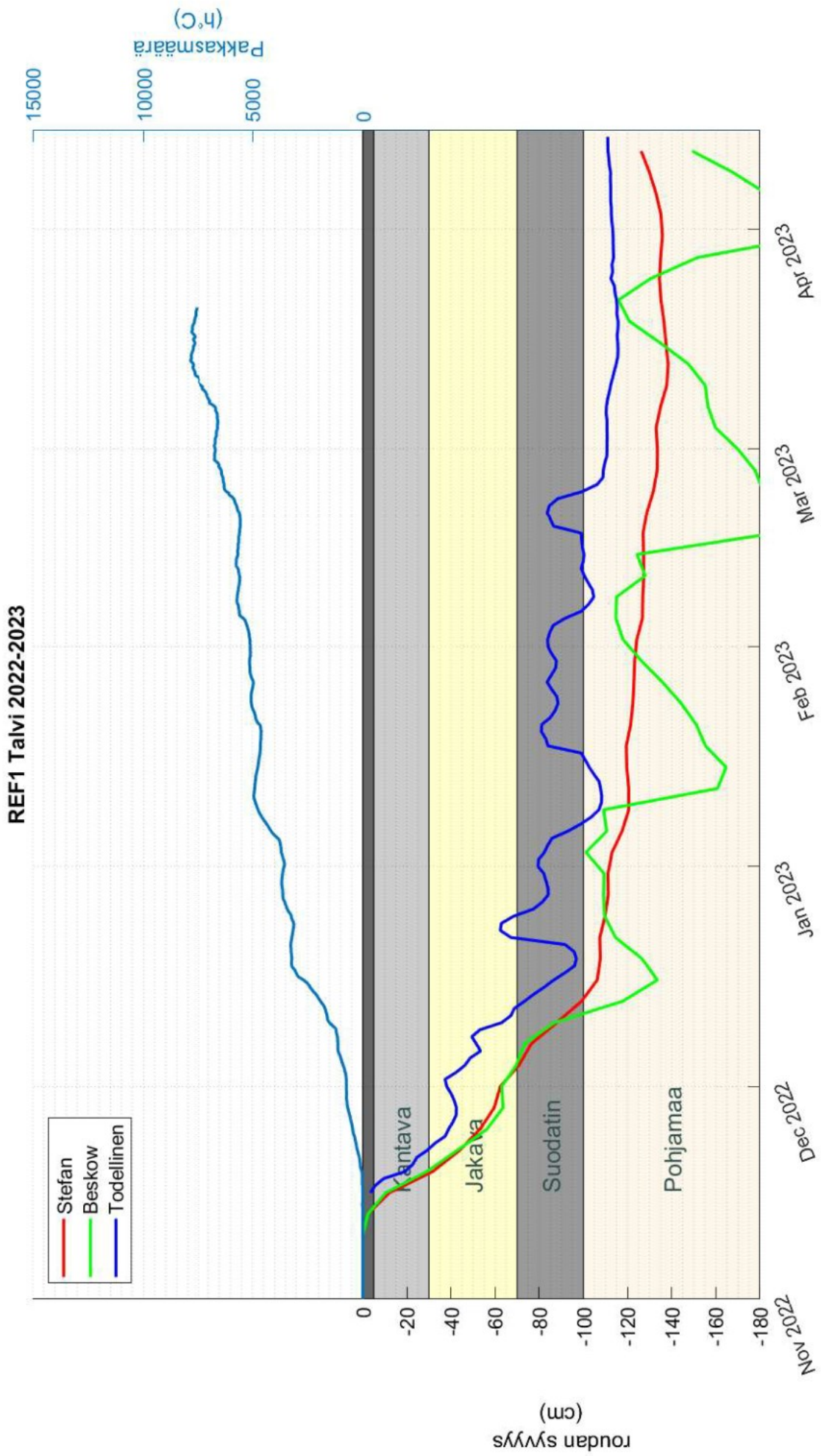




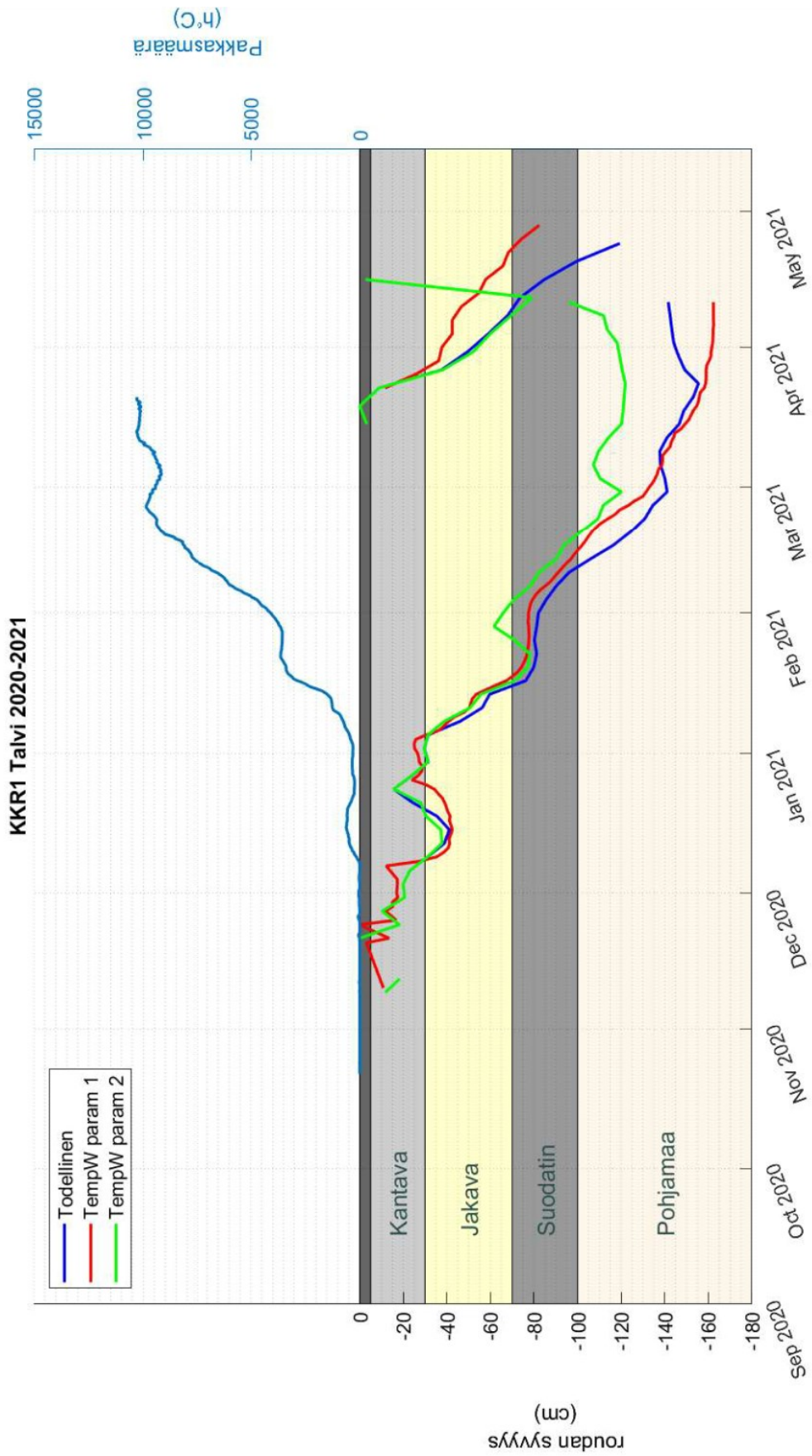


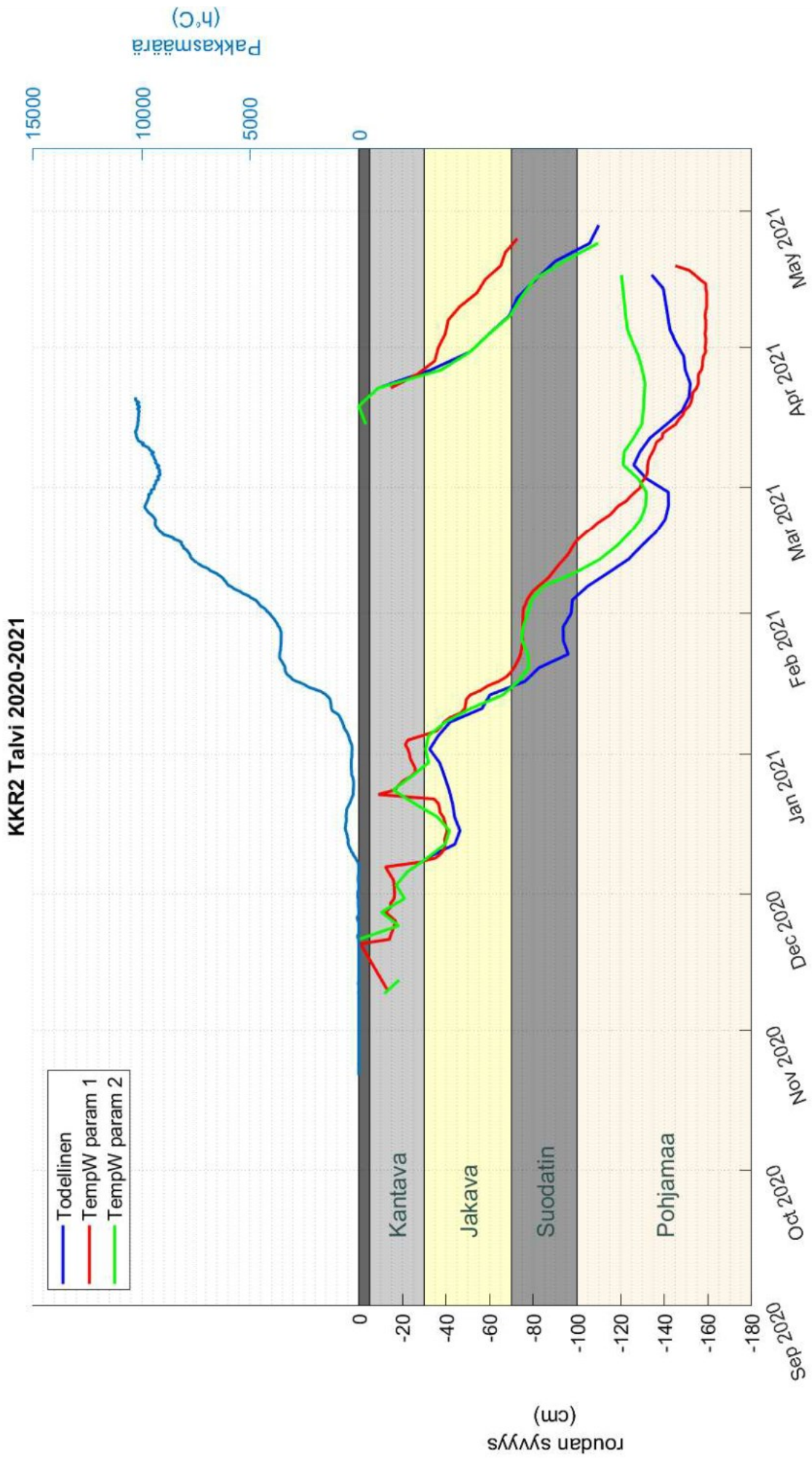


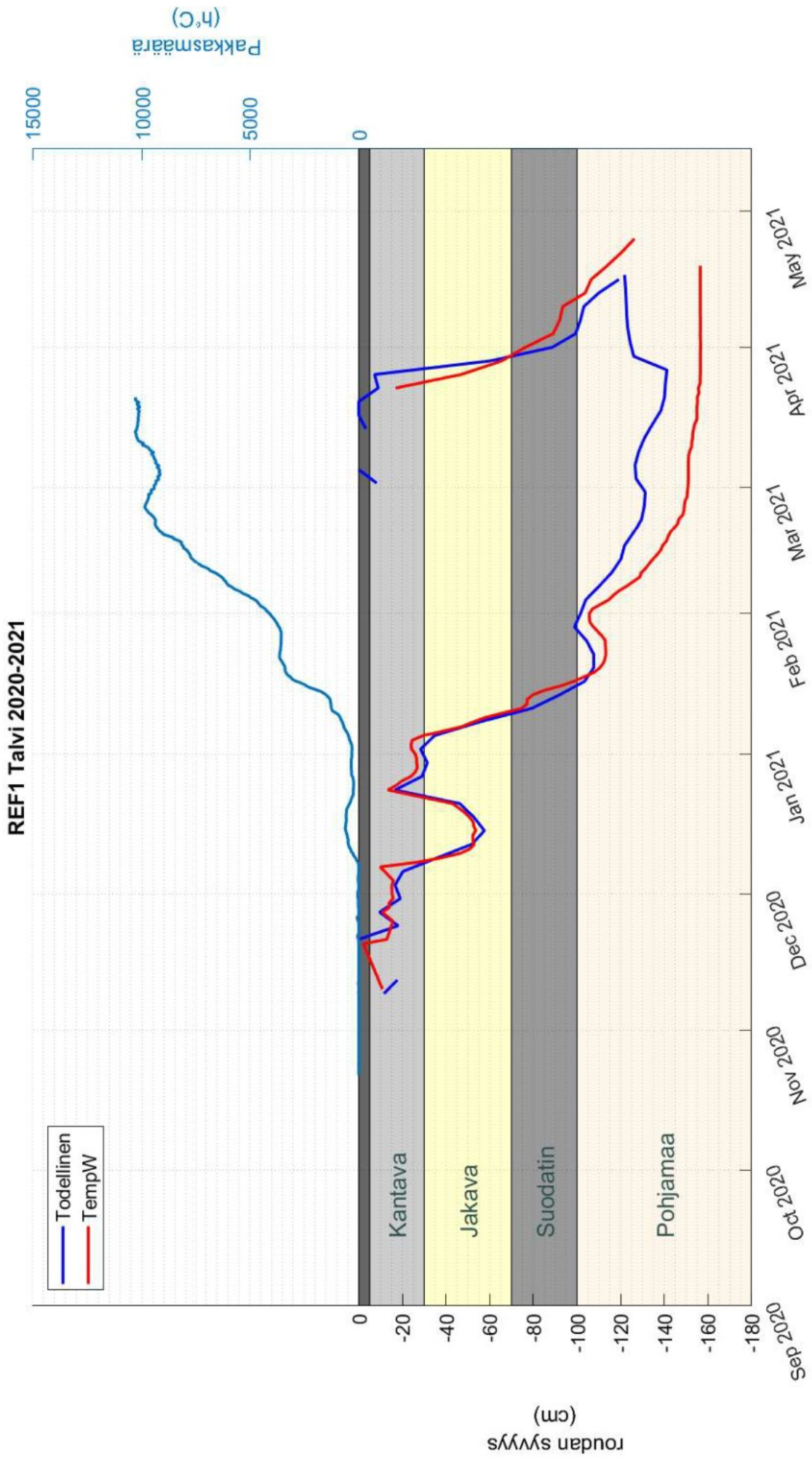


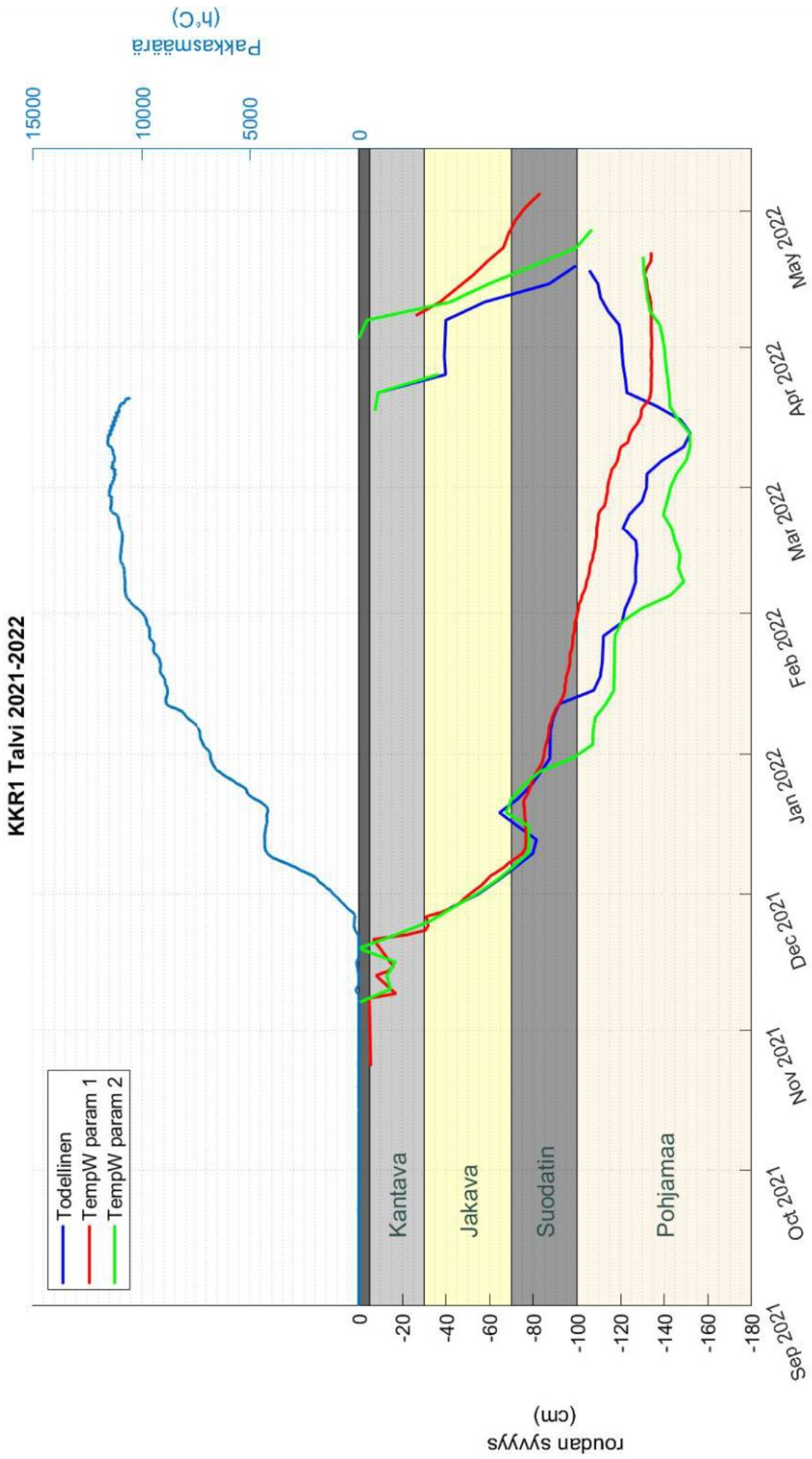


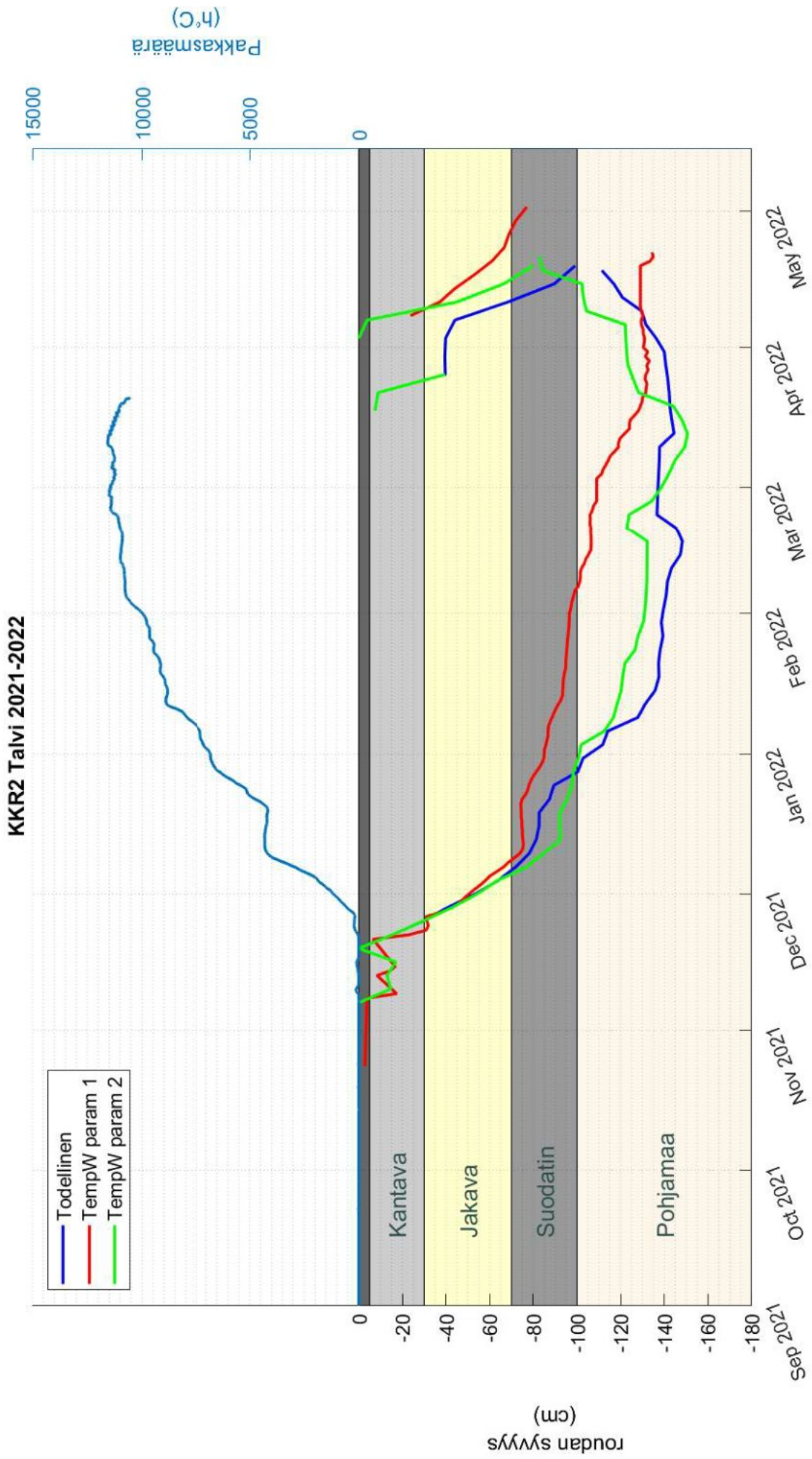
LIITE D: ROUDAN SYVYYDEN KUVAAJAT TEMP/W

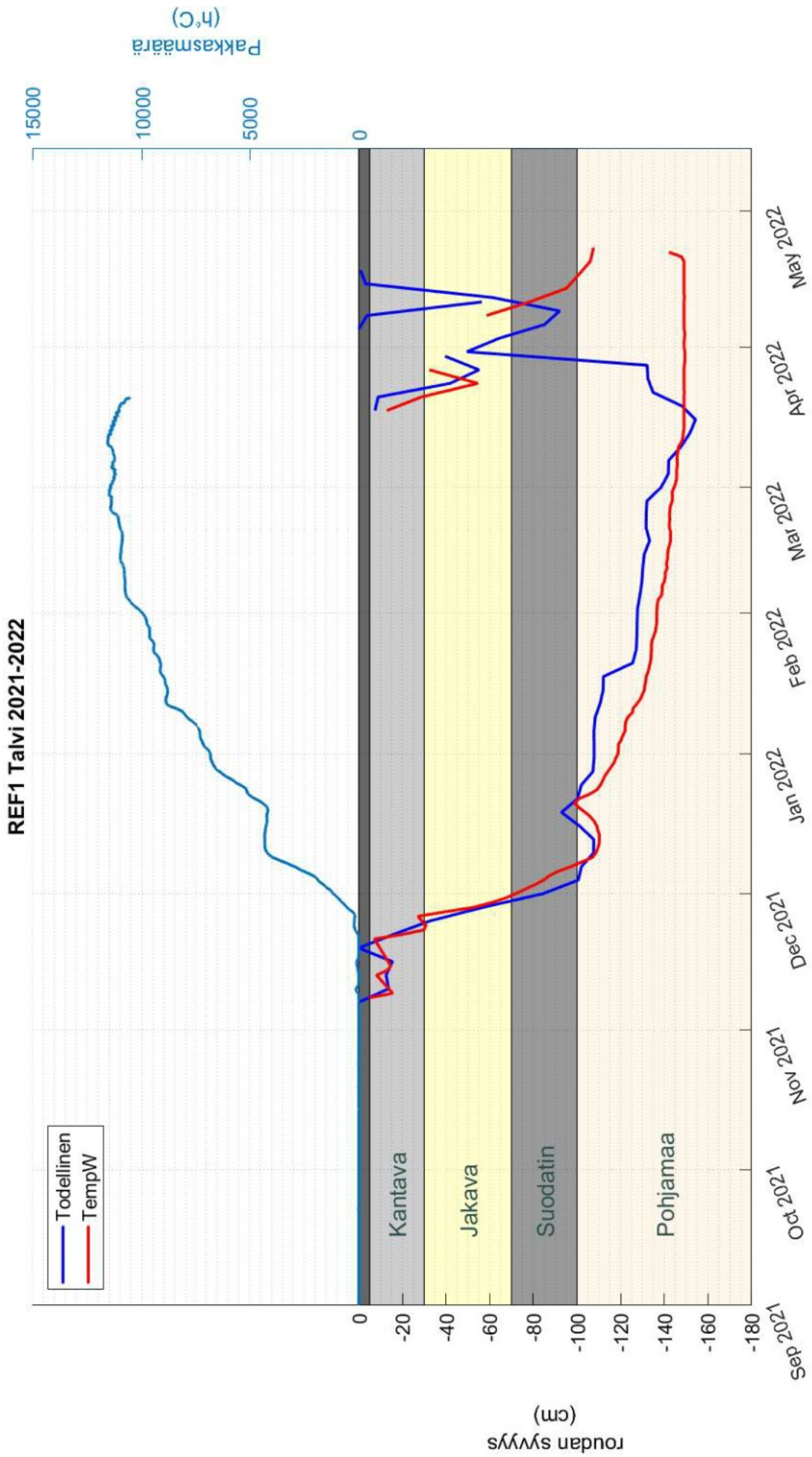


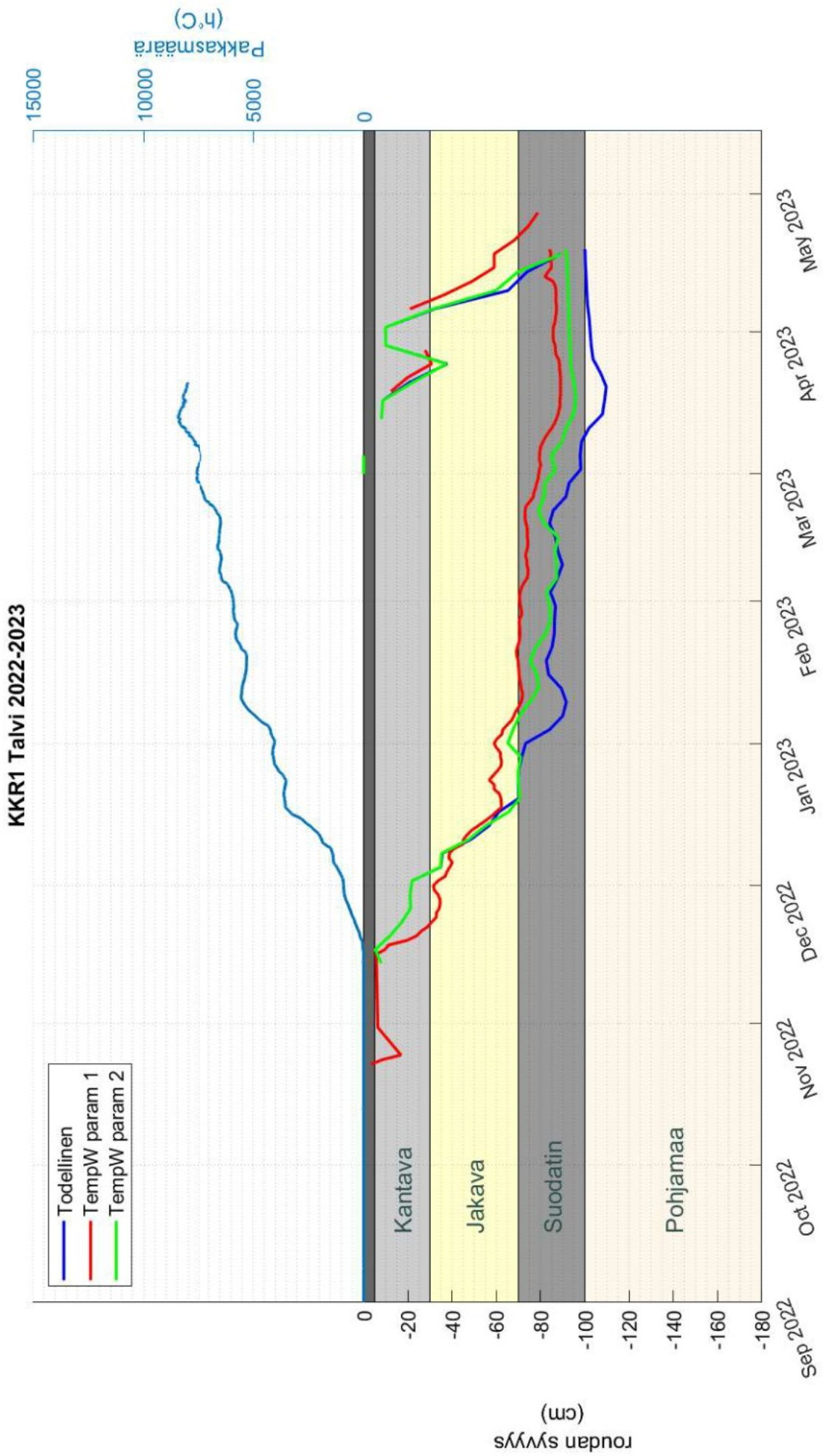


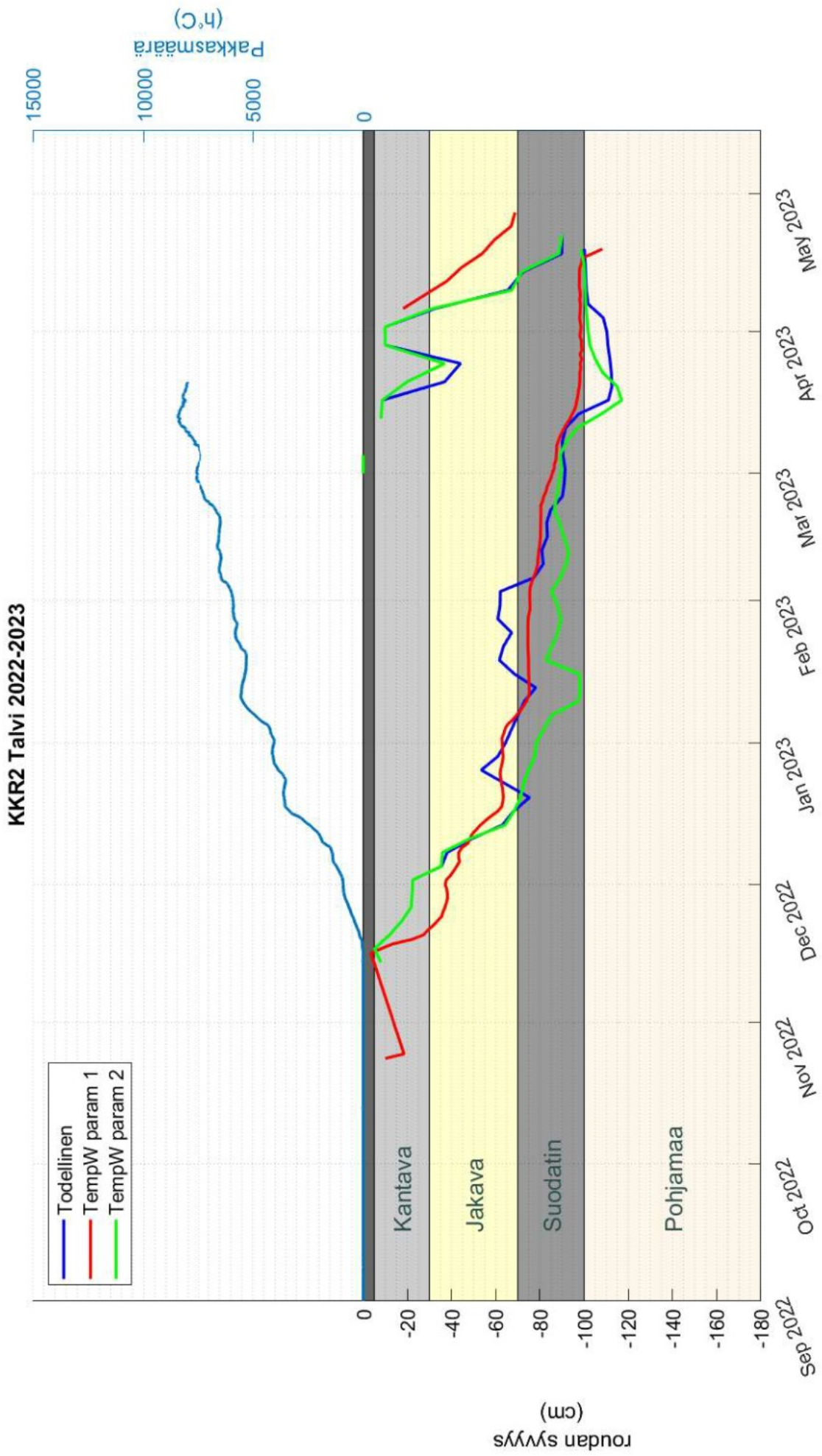


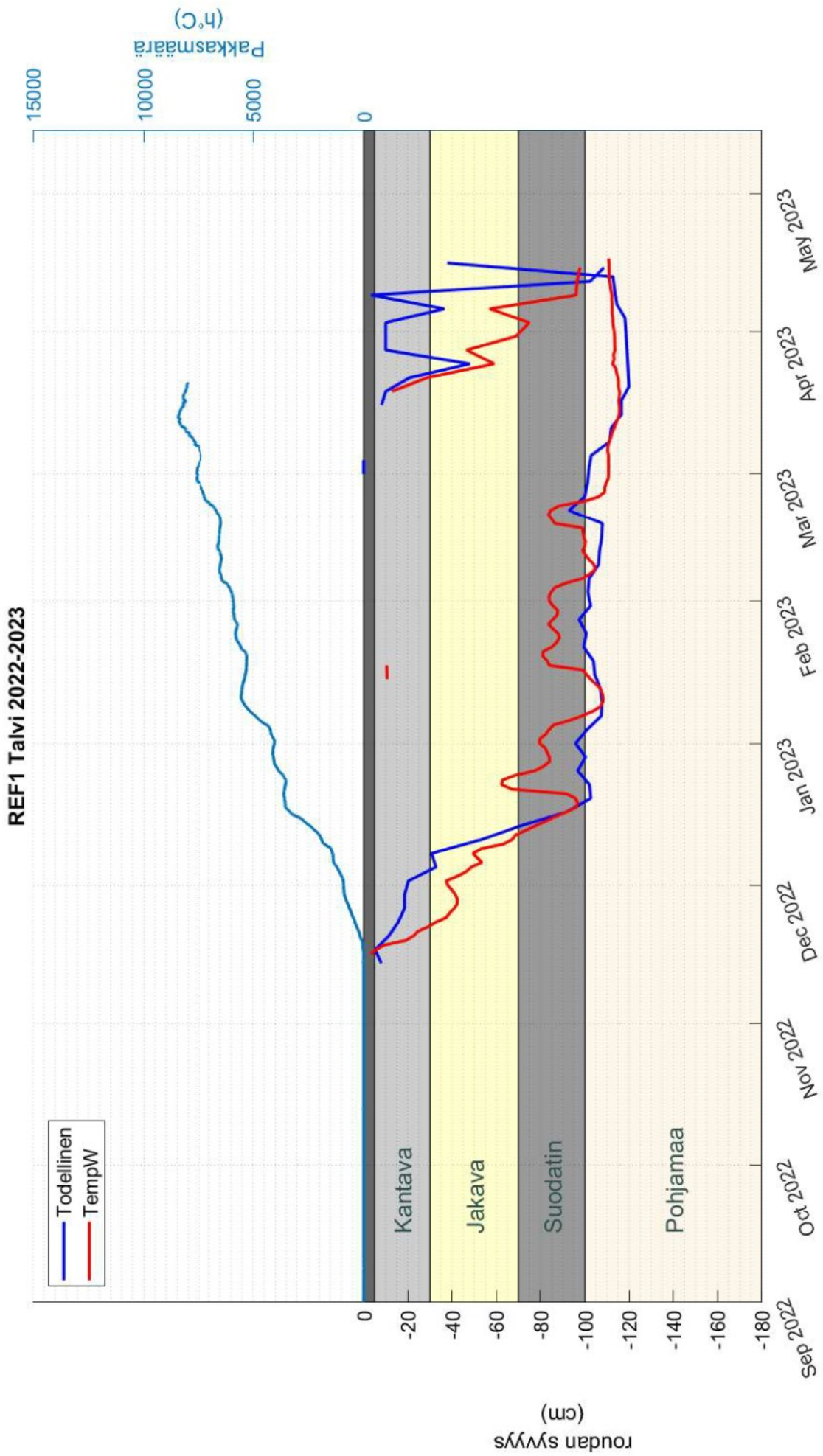












LIITE E: RAKENNENÄYTTEENOTON TULOKSET

ANALYYSITULOSTE

Sivu 1(1)



7.12.2023 10:07

23KU00110

Näytteryhmä:	KU	Kuonanäytteryhmä	Näytteenottoaika:	29.6.2023
Projekti:	HWFI230009/79	Kuona koerakenne 29.6.2023	Kirjauspäivä:	4.7.2023
	00/1		Näyte saapui:	4.7.2023
Asiakas:	RWS/EC	Fortum Waste Solutions Oy	Tv valmiiksi:	
			Valmistunut:	8.8.2023

Tutkimuskohde: 9 muut

Nimi: 23KU86,-92,-101,-104 kokooma Kantava kerros (KaM)

Huomautus: Rakeisuus, k-arvo

Määrittäminen	Tulos		Menetelmä
Nopea vedenläpäisevyys	3,0E-03	m/s	
	11015,50	g	
	10795,90	g	
Rakeisuus, pesuseulonta	OK		SFS-EN 933-1
Seulottavan massan alkupaino	10800	g	SFS-EN 933-1
Seula 63 mm läpäisy-%	100	%	SFS-EN 933-1
Seula 45 mm läpäisy-%	100	%	SFS-EN 933-1
Seula 31.5 mm läpäisy-%	99,1	%	SFS-EN 933-1
Seula 22.4 mm läpäisy-%	88,9	%	SFS-EN 933-1
Seula 16 mm läpäisy-%	76,8	%	SFS-EN 933-1
Seula 11.2 mm läpäisy-%	67,4	%	SFS-EN 933-1
Seula 8 mm läpäisy-%	59,5	%	SFS-EN 933-1
Seula 6 mm läpäisy-%	54,4	%	SFS-EN 933-1
Seula 4 mm läpäisy-%	46,9	%	SFS-EN 933-1
Seula 2 mm läpäisy-%	35,6	%	SFS-EN 933-1
Seula 1 mm läpäisy-%	25,9	%	SFS-EN 933-1
Seula 0.5 mm läpäisy-%	18,5	%	SFS-EN 933-1
Seula 0.25 mm läpäisy-%	13,1	%	SFS-EN 933-1
Seula 0.125 mm läpäisy-%	10,1	%	SFS-EN 933-1
Seula 0.063 mm läpäisy-%	5,5	%	SFS-EN 933-1
Hienoaines (läpäissyt 0,063mm seulan)	5,02	%	SFS-EN 933-1

Huomautukset:

ANALYYSITULOSTE
7.12.2023 10:06
23KU00111

Sivu 1(1)



Näytteryhmä:	KU	Kuonanäytteryhmä	Näytteenottoaika:	29.6.2023
Projekti:	HWFI230009/79	Kuona koerakenne 29.6.2023	Kirjauspäivä:	4.7.2023
	00/1		Näyte saapui:	4.7.2023
Asiakas:	RWS/EC	Fortum Waste Solutions Oy	Tv valmiiksi:	
			Valmistunut:	8.8.2023

Tutkimuskohde: 9 muut

Nimi: **23KU85,-106 kokooma Jakava kerros (KaM)**
 Huomautus: Rakeisuus, k-arvo

Määrittys	Tulos		Menetelmä
Nopea vedenläpäisevyys	3,0E-03	m/s	
	1219,50	g	
	1204,20	g	
Rakeisuus, pesuseulonta	OK		SFS-EN 933-1
Seulottavan massan alkupaino	1200	g	SFS-EN 933-1
Seula 63 mm läpäisy-%	100	%	SFS-EN 933-1
Seula 45 mm läpäisy-%	100	%	SFS-EN 933-1
Seula 31.5 mm läpäisy-%	95,1	%	SFS-EN 933-1
Seula 22.4 mm läpäisy-%	84,5	%	SFS-EN 933-1
Seula 16 mm läpäisy-%	67,8	%	SFS-EN 933-1
Seula 11.2 mm läpäisy-%	56,3	%	SFS-EN 933-1
Seula 8 mm läpäisy-%	49,0	%	SFS-EN 933-1
Seula 6 mm läpäisy-%	43,3	%	SFS-EN 933-1
Seula 4 mm läpäisy-%	36,5	%	SFS-EN 933-1
Seula 2 mm läpäisy-%	28,1	%	SFS-EN 933-1
Seula 1 mm läpäisy-%	19,2	%	SFS-EN 933-1
Seula 0.5 mm läpäisy-%	11,4	%	SFS-EN 933-1
Seula 0.25 mm läpäisy-%	7,32	%	SFS-EN 933-1
Seula 0.125 mm läpäisy-%	5,08	%	SFS-EN 933-1
Seula 0.063 mm läpäisy-%	3,6	%	SFS-EN 933-1
Hienoaines (läpäissyt 0,063mm seulan)	0,905	%	SFS-EN 933-1

Huomautukset:

ANALYYSITULOSTE
7.12.2023 10:04
23KU00112

Sivu 1(1)



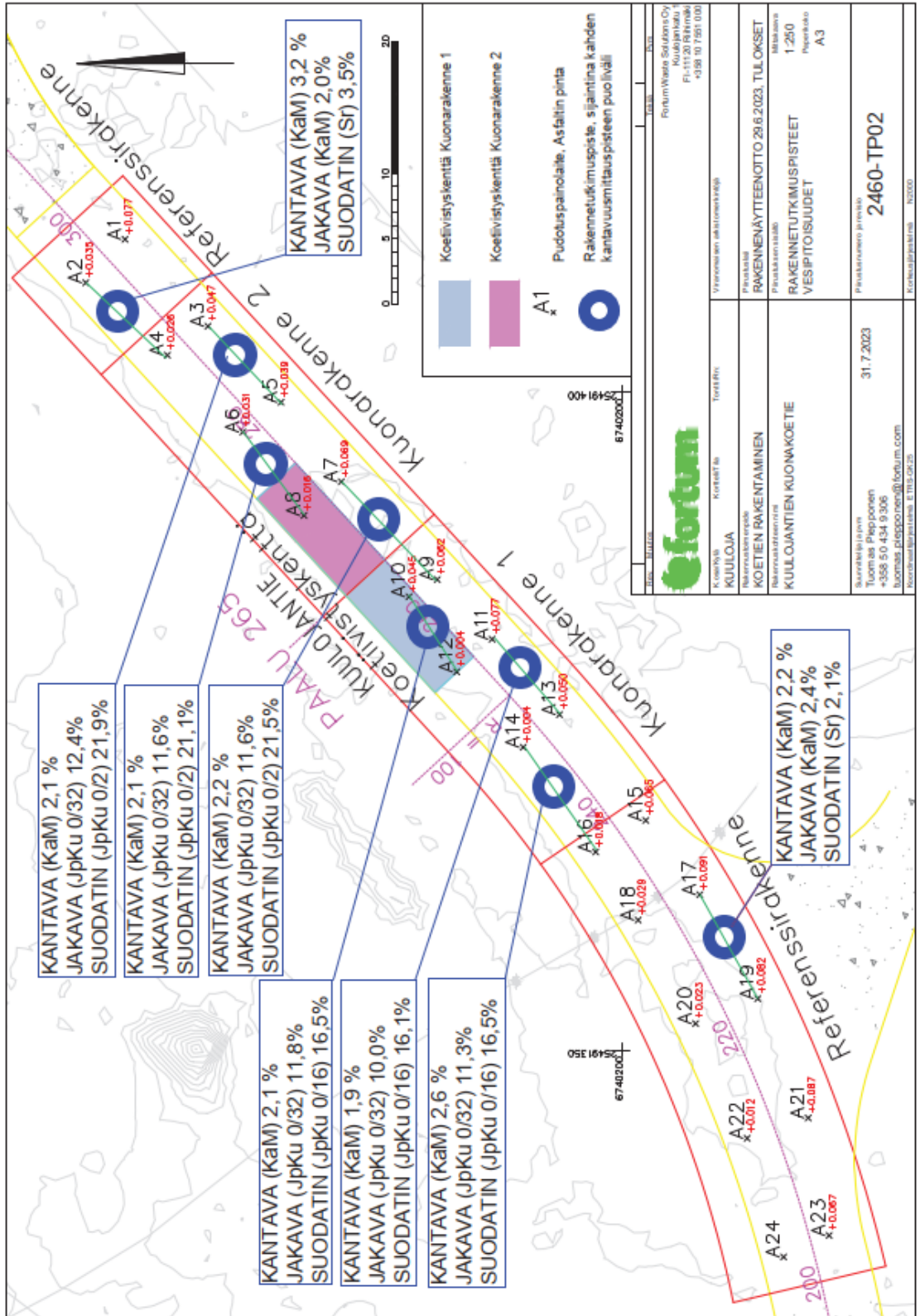
Näyteryhmä:	KU	Kuonanäyteryhmä	Näytteenottoaika:	29.6.2023
Projekti:	HWFI230009/79 00/1	Kuona koerakenne 29.6.2023	Kirjauspäivä:	4.7.2023
Asiakas:	RWS/EC	Fortum Waste Solutions Oy	Näyte saapui:	4.7.2023
			Tv valmiiksi:	
			Valmistunut:	8.8.2023

Tutkimuskohde: 9 muut

Nimi: 23KU84,-105 kokooma Suodatinkerros (Sr/Hk)
Huomautus: Rakeisuus, k-arvo

Määrittäminen	Tulos		Menetelmä
Nopea vedenläpäisevyys	5,0E-04	m/s	
	13079,30	g	
	12753,10	g	
Rakeisuus, pesuseulonta	OK		SFS-EN 933-1
Seulottavan massan alkupaino	12800	g	SFS-EN 933-1
Seula 63 mm läpäisy-%	100	%	SFS-EN 933-1
Seula 45 mm läpäisy-%	98,0	%	SFS-EN 933-1
Seula 31.5 mm läpäisy-%	94,0	%	SFS-EN 933-1
Seula 22.4 mm läpäisy-%	89,8	%	SFS-EN 933-1
Seula 16 mm läpäisy-%	84,7	%	SFS-EN 933-1
Seula 11.2 mm läpäisy-%	79,4	%	SFS-EN 933-1
Seula 8 mm läpäisy-%	75,1	%	SFS-EN 933-1
Seula 6 mm läpäisy-%	71,8	%	SFS-EN 933-1
Seula 4 mm läpäisy-%	67,0	%	SFS-EN 933-1
Seula 2 mm läpäisy-%	56,3	%	SFS-EN 933-1
Seula 1 mm läpäisy-%	40,9	%	SFS-EN 933-1
Seula 0.5 mm läpäisy-%	23,3	%	SFS-EN 933-1
Seula 0.25 mm läpäisy-%	12,5	%	SFS-EN 933-1
Seula 0.125 mm läpäisy-%	5,82	%	SFS-EN 933-1
Seula 0.063 mm läpäisy-%	2,5	%	SFS-EN 933-1
Hienoaines (läpäissyt 0,063mm seulan)	2,23	%	SFS-EN 933-1

Huomautukset:



LIITE F: RAKENNENÄYTTEENOTON VALOKUVAT

KKR1 kantava 1



KKR1 kantava 2



KKR1 jakava 1



KKR1 jakava 2



KKR1 suodatin 1



KKR1 suodatin 2



KKR1 pohjamaa 1



KKR1 pohjamaa 2



KKR2 jakava



KKR2 kantava



KKR2 suodatin

REF2 päällysrakenne 1



REF2 päällysrakenne 2



REF2 pohjamaa



REF1 kantava



REF1 jakava



REF1 suodatin



REF1 pohjamaa

