

Waldemar Lahtinen

JÄTTEENPOLTON KUONAN ROUTAERISTÄVYYS- JA KANTAVUUSOMINAISUUDET

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Syyskuu 2021

TIIVISTELMÄ

Waldemar Lahtinen: Jätteenpolton kuonan routaeristävyys- ja kantavuusominaisuudet
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka
Syyskuu 2021

Työssä tutkittiin jätteenpoltossa syntyvästä pohjakuonasta seulotun ja käsitellyn kuonalajitetuotteen soveltuvuutta tierakentamiseen routaeristävyys- ja kantavuusominaisuuksien kannalta. Päättökysymys oli, miten kuonan tekniset ominaisuudet eroavat perinteisestä kiviaineksesta ja millaisia eroja niiden käyttäytymisessä voitiin havaita koerakenteessa syksystä 2020 kevääseen 2021 ulottuneen seurantajakson aikana. Tutkimusmenetelmänä oli kirjallisuusselvityksen lisäksi tapaustutkimus, joka pohjautui Fortum Waste Solutions Oy:n toteuttamalta Hausjärven koerakenteelta tehtäviin mittauksiin. Näitä mittauksia olivat jatkuvat lämpötilamittaukset koerakenteen eri kerroksista, kantavuusmittaukset pudotuspainolaitteistolla sekä vaaitsemalla tehdyt routanoususeurannat. Kirjallisuustutkimuksessa etsittiin teoretietoja tierakentamisesta keskittyen pääasiassa routaeristävyys- ja kantavuusominaisuuksiin.

Routaeristävyyttä tutkittiin lämpötilamittausten ja näihin tukeutuvien laskelmien avulla. Tavoitteena oli selvittää, johtavatko kuonalajitteet lämpöä huonommin vai paremmin kuin luonnonkiviaines. Kantavuusominaisuuksista tutkittiin, tapahtuuko kuonassa rakentamisen jälkeistä lujittumista sekä miten kuonarakoiden mekaaninen hauraus mahdollisesti vaikuttaa sen kestävyteen tierakenteessa.

Lähtöoletuksena oli aiempien tutkimusten perusteella, että huokoinen kuonalajite toimii rakenteessa parempana lämmöneristeenä kuin perinteinen kiviaines. Lämpötilamittaukset osoittivat oletuksen pitävän paikkansa, sillä rakennekerroksen syvyydestä riippuen talven 2020–2021 pakkasmäärillä kuonarakenteen jäätyminen tapahtui viikosta kuukauteen hitaammin kuin perinteisillä materiaaleilla rakennetussa referenssirakenteessa. Toisaalta kuonarakenteet myös sulivat hitaammin ja vastustivat muutenkin lämpötilanvaihteluita tehokkaammin kuin referenssirakenne.

Saatujen tulosten perusteella kuonalajitteita käyttämällä olisi routamitoituksen puolesta mahdollista rakentaa selkeästi ohuempia rakennekerroksia kuin perinteisillä materiaaleilla, ja kuonalajitteiden paremman lämmöneristävyuden taustalla on ensisijaisesti niiden korkea vesipitoisuus.

Avainsanat: tierakentaminen, infra, routa, kantavuus, jätteenpolto, pohjakuona, kiertotalous

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TIERAKENTEEN ROUTAMITOITUS	2
2.1 Roudan tunkeutumissyvyys kerroksellisessa rakenteessa	2
2.2 Routamitoitus Väyläviraston suunnitteluohjeissa	5
3. TIERAKENTEEN KANTAVUUSMITOITUS	6
4. KOERAKENTEEN ESITTELY	8
5. ROUTAERISTÄVYYS JA ROUTIMINEN.....	11
5.1 Lämpötilamittaukset	11
5.2 Roudan tunkeutumissyvyuden laskennallinen arviointi	17
5.3 Kuonalajitteiden vastaavuusarvot routamitoituksessa	19
5.4 Routanousu ja routavauriot	20
5.5 Routaturpoama	22
6. KANTAVUUDET	24
6.1 Kantavuusmittaukset.....	24
6.2 Kantavuusarvojen vertailu	25
6.3 SCI- ja BCI- indeksit.....	27
7. JOHTOPÄÄTÖKSET	29
LÄHTEET	31
LIITE A:.....	1

1. JOHDANTO

Jätteenpoltossa syntyvän käsitellyn pohjakuonan hyötykäyttö on tärkeä tutkimuskohde, sillä kuonaa syntyy Suomessa vuosittain noin 300 000 tonnia (Erityisjäte, 2020) ja sen tämänhetkinen pääkäyttökohde, kaatopaikkarakentaminen, on vähenemässä jätteiden uusiokäytön alati lisääntyessä. Kuonalle halutaan löytää uusia, taloudellisestikin merkittävämpiä käyttökohteita. Kiviaineksen korvaaminen tien rakenteissa käsitellyllä yhdyskuntajätteen polton kuonalla voisi säästää luonnonmateriaaleja kiertotalouden periaatteiden mukaisesti. Suomessa yhdyskuntajätteen polttaminen on yleistynyt vasta vuoden 2016 jälkeen. Kuonan teknisiä ominaisuuksia ja käyttömahdollisuuksia on tutkittu mm. Tampereen yliopiston (Sormunen, 2017) ja ammattikorkeakoulun (Söderholm, 2020) opinnäytetöissä.

Fortum Waste Solutions Oy on rakentanut Hausjärvelle koerakenteen, jossa kiviaineksen tilalla on käytetty kuonalajitteita suodatin- ja jakavissa kerroksissa. Oletus on, että huokoinen ja hauras kuonalajite käyttäytyy lämpötekniisesti ja mekaanisen rasituksen alaisena eri tavalla kuin perinteiset rakennusmateriaalit kuten luonnonkiviaines. Päättökysymys on, miten tierakenteessa käytetyn käsitellyn kuonan routaeristävyys- ja kantavuusominaisuudet eroavat kiviaineksesta, ja tavoitteena on näiden ominaisuuksien tutkiminen. Routaeristävydestä on kiinnostavaa tutkia, johtaako kuona lämpöä huonommin vai paremmin kuin luonnonkiviaines. Kantavuusominaisuuksista halutaan saada selville, tapahtuuko kuonassa rakentamisen jälkeistä lujittumista sekä miten kuonarakenteen mekaaninen hauraus mahdollisesti vaikuttaa sen kestävyteen ja miten rakenteen kantavuus muuttuu seurantajakson aikana.

Tutkimusmenetelmänä on kirjallisuus- ja tapaustutkimus. Kirjallisuustutkimuksen ja teoriaosuuden pääpaino on kuonalajitteen mekaanisissa ominaisuuksissa ja lämpöeristävydessä, eikä työssä tarkastella pohjakuonan muita ominaisuuksia tai jätteenpolttoa laajemmin.

Tapaustutkimus perustuu koerakenteesta tehtäviin seurantamittauksiin ja niihin tukeutuviin takaisinlaskentoihin. Näitä mittauksia ovat kantavuusmittaukset, vaaitsemalla tehtävät routanoususeurannat sekä jatkuvat lämpötilamittaukset koerakenteen eri kerroksista aikavälillä 2.1.2021 – 23.4.2021. Mittaustulosten perusteella lasketaan kuonarakenteen ominaisuuksia ja verrataan niitä referenssirakenteeseen.

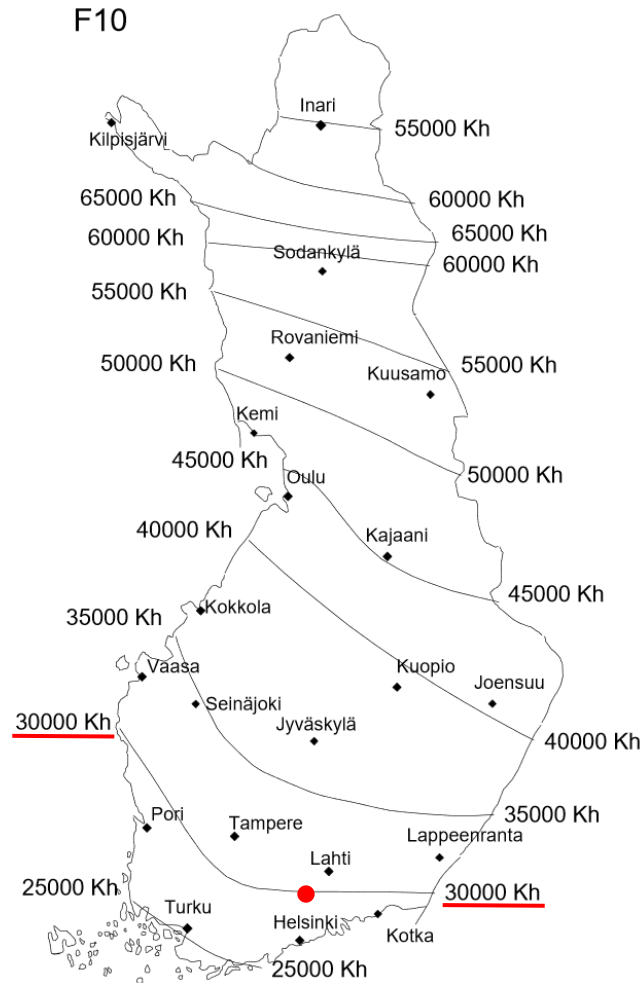
2. TIERAKENTEEN ROUTAMITOITUS

Maan tai tierakenteen routaantuminen tarkoittaa niihin sitoutuneen huokosveden jäätymistä ja jäätyneen etenemistä maakerroksissa. Routiminen puolestaan tarkoittaa tilanetta, jossa maakerroksen tilavuus kasvaa routaantumisen myötä aiheuttaen rakenteen pinnalle routanousua. Tie alkaa routaantua silloin, kun ilman lämpötila tienpinnalla laskee 0°C :n alle. Routimisen muita perusedellytyksiä ovat routiva maalaji, veden saataavuus jäätyneessä ja jäätyneen päällä vaikuttavan kuormituksen olevan routimispainetta pienempi. (Ehrola, 1996.)

Routiminen aiheuttaa tiehen pohjamaasta syntyvän routanousun myötä pinnan epätasaisuuksia, halkeamia ja reikiä. Mikäli tien alusrakenne on routiva, on tierakenne mitoitettava routanousun vähentämiseksi. Mitoitettavaan routanousuun vaikuttaa tien vaatimusluokka ja nopeusrajoitus, sillä tien epätasaisuudet hyvin vilkkaasti liikennöidyillä moottoriteillä haittaavat useamman matkantekoa ja aiheuttavat myös enemmän vaaratilanteita kuin vastaavat epätasaisuudet harvaan liikennöidyillä, alemman luokan teillä, joilla on matalampi nopeusrajoitus. Routanousua hallitaan esimerkiksi paksummilla rakennekerroksilla, joiden läpi routa ei pääse tunkeutumaan, paremmin lämpöä eristävillä materiaaleilla, pohjamaan tasalaatuistamisella routanousuerojen pienentämiseksi, pohjaveden virtauksia säätelemällä, päällysrakenteiden lujittamisella ja siirtymäkiiloja käyttämällä. (Väylävirasto 2018.)

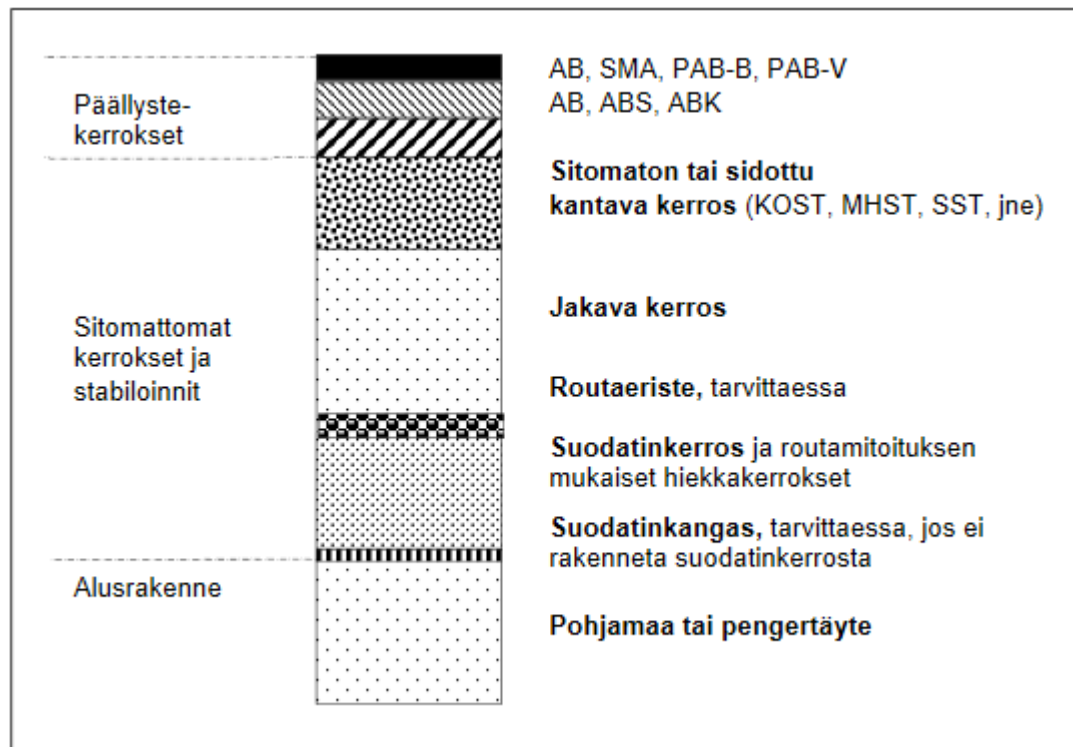
2.1 Roudan tunkeutumissyvyys kerroksellisessa rakenteessa

Tierakenteen roudansyvyyttä tutkittaessa keskeisimpiä asioita on pakkasmäärä. Pakkasmäärä tarkoittaa pakkaskauden tunti- tai vuorokausikohtaisten keskilämpötilojen summaa. Pakkaskausi alkaa, kun vuorokauden keskilämpötila laskee syksyllä ensimmäistä kertaa alle nollan celsiusasteen, ja loppuu, kun keskilämpötila keväällä nousee pysyvästi yli nollan celsiusasteen. Ehrolan (1996) mukaan tierakenteen routamitoituksessa voidaan käyttää arvoa F_{10} , joka kuvaa keskimäärin kerran kymmenessä vuodessa toistuvaa maksimipakkasmäärää. Väyläviraston (2018) nykyisessä suunnitteluohjeessa routamitoituksen lähtökohdaksi annetut mitoituspakkasmäärät ovat kuitenkin lähempänä kerran kahdessa vuodessa toistuvaa pakkasmäärää F_2 . Rata- sekä asuinrakentamisessa routamitoitusarvo on tyypillisesti F_{50} . Keskimäärin kymmenen vuoden välein Suomessa toistuvat pakkasmäärät on esitetty kuvassa 1. Koerakenne on merkitty kuvaan punaisella pisteellä ja se sijaitsee alueella, jossa F_{10} -arvo on 30 000 Kh (Hausjärvi).



Kuva 1. Kerran kymmenessä vuodessa kertyvä pakkasmäärä Suomessa (VTT, 2000). Koerakenteen sijainti merkitty punaisella pisteellä.

Tierakenne koostuu useista eri rakennekerroksista, jotka poikkeavat toisistaan sekä mekaanisten että lämpöteknisten ominaisuuksiensa osalta. Roudan aiheuttamia vaurioita voi lisätä vielä se, että yksittäiset kerroksetkaan eivät aina ole tasalaatuisia, vaan niissä saattaa olla sekoittuneena lämpöteknisesti eri tavoilla käyttäytyviä materiaaleja tai niihin on esimerkiksi pidätynyt erilainen määrä vettä. Routa vaikuttaa Ehrolan mukaan tierakenteeseen pääasiassa alusrakenteen kautta, vaikka routanousun vaikutukset kohdistuvat myös päällysrakenteeseen. Tien päällysrakenne on lähtökohtaisesti routimaton.



Kuva 2. Tierakenteen tyypillisiä kerroksia (Väylävirasto, 2018).

Kuvassa 2 on tien periaatteellinen poikkileikkaus. Routamitoituksen perusteella laskeaan suodatinkerroksen tarvittava paksuus routimista vastaan. Lisäksi voidaan aina käyttää routaeristettä kuten solumuovilevyä, mikä voi olla tarpeen erityisesti tilanteessa, jossa tien tasausviivan määrätty korkeus ei salli riittävän paksun suodatinkerroksen rakentamista ilman maan leikkausta.

Teoreettisesti roudan syvyyttä kerroksellisessa tierakenteessa voidaan arvioida kaavalla:

$$F_n = q_n d_n \left(\frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{d_n}{2\lambda_n} \right) \quad (1)$$

jossa F_n on kerroksen n jäätymiseen tarvittava pakkasmäärä, d on kerroksen paksuus, λ on kerroksen lämmönjohtavuus ja q on lyhennelmä kaavasta:

$$q = iW\gamma + C_1 T_s - \frac{1}{2} C_2 T_t \quad (2)$$

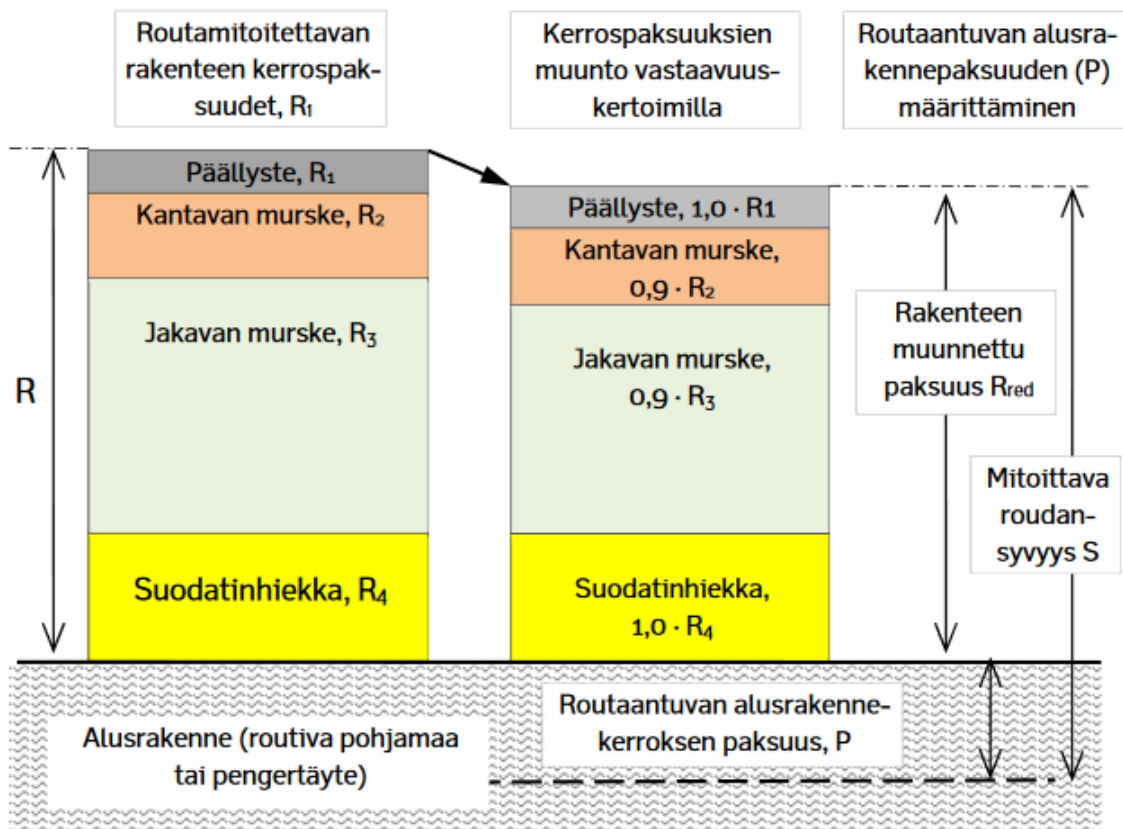
jossa i on veden jäätymislämpö, W on kosteuspitoisuus paino-osina, γ on kuivairtitiheys, C_1 on sulan ja C_2 jäätyneen maan tilavuuslämpökapasiteetti sekä maan lämpötila T_s jäämisprosessin alussa eli käytännössä vuoden keskilämpötila ja T_t sen aikana eli käytännössä pakkaskauden keskilämpötila. Kaava perustuu Stefanin vuonna 1890 esittelemään ja Beskow'n vuonna 1935 parantelemaan laskentamalliin. (Ehrola, 1996.)

2.2 Routamitoitus Väyläviraston suunnitteluohjeissa

Mitoittava roudansyvyys koerakenteen sijaintialueella on F_2 -arvon perusteella 1,6 metriä. Tämä roudansyvyys on laskettu hiekan parametreillä. Rakenteiden todelliset kerrospaksuudet on muunnettava hiekkaa vastaaviksi laskennallisiksi paksuuksiksi kaavalla:

$$R_{red} = (a_1 R_1) + (a_2 R_2) + \dots + (a_n R_n) \quad (3)$$

jossa R_{red} on rakenteen laskennallinen kokonaispaksuus, a kerroksen materiaalin vastaavuusarvo hiekkaan verrattuna eristävyden kannalta ja R rakennekerroksen paksuus. Laskennallisten paksuuksien mitoituskaava ei perustu kaavan 1 roudansyvyyden laskentaan. Kuvassa 3 on esitetty periaatekuva laskennallisesta kokonaispaksuudesta. (Väylävirasto, 2018.)



Kuva 3. Laskennallisen kokonaispaksuuden periaatekuva (Väylävirasto, 2018).

Tässä työssä laskettiin koerakenteessa käytetyille kuonalajitetuotteille alustavat vastaavuusarvot a tapaustutkimuksen tulosten perusteella.

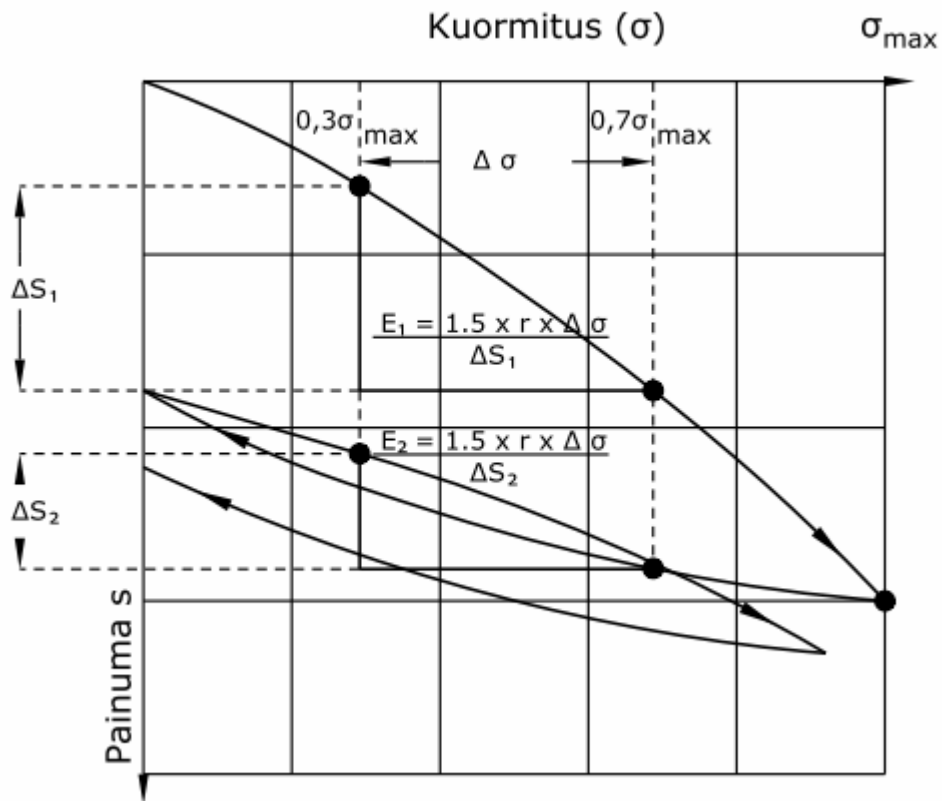
3. TIERAKENTEEN KANTAVUUSMITOITUS

Tierakenteen kantavuudella tarkoitetaan rakenteen kykyä toimia sen pintaan kohdistuvan pystyjännityksen alaisena. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, millaisen painuman minkäkin suuruinen jännitys rakenteeseen aiheuttaa. Tierakenteen kantavuusmitoitus tehdään Odemarkin kaavalla. Lähtötiedoiksi tarvitaan tällöin rakennekerrosten jäykkyyksiä kuvaavien moduuliarvojen lisäksi päällystetyyppi, tavoitekantavuus, päällystekerrosten vähimmäispaksuus ja alusrakenteen eli pohjamaan tai penkereen kantavuus (Väylävirasto, 2018). Kun tie rakentuu useasta eri kerroksesta, lasketaan Odemarkin kaavalla kantavuusarvo jokaiselle kerrokselle pohjalta ylöspäin ylimmän rakennekerroksen pintaan asti. Odemarkin kaava on:

$$E_p = \frac{E_A}{\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,81 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^2}}\right) \cdot \frac{E_A}{E} + \sqrt{1 + 0,81 \cdot \left(\frac{h}{a}\right)^2} \cdot \left(\frac{E}{E_A}\right)^{\frac{2}{3}}} \quad (4)$$

jossa E_A on mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus, E_p on mitoitettavan kerroksen päältä saavutettava kantavuus, E on mitoitettavan kerroksen E-moduuli ja h mitoitettavan kerroksen paksuus. Kantavuudet ja E-moduuli syötetään kaavaan yksikössä MPa ja kerrospaksuus metreinä. (Väylävirasto, 2018).

Tierakenteen kantavuus voidaan tarkistaa tekemällä rakenteelle levykuormitus- tai pudotuspainolaitemittauksia, jotka ovat osa työnaikaista laadunvalvontaa ja rakenteen toiminnan seuranta. Menetelmä soveltuu paitsi sorasta ja murskeesta, myös ominaisuuksiltaan niitä vastaavista uusiomateriaaleista tehtyjen kerrosten tutkimiseen (InfraRYL, 2020). InfraRYLin liitteen 2 mukaan saatuja tuloksia verrataan kantavuudelle eli muodonmuutosmoduulille ja tiiviyssuhteelle Väyläviraston suunnitteluohjeessa annettuihin vaatimuksiin.



Kuva 4. Muodonmuutosmoduulin määrittäminen (InfraRYL, 2020).

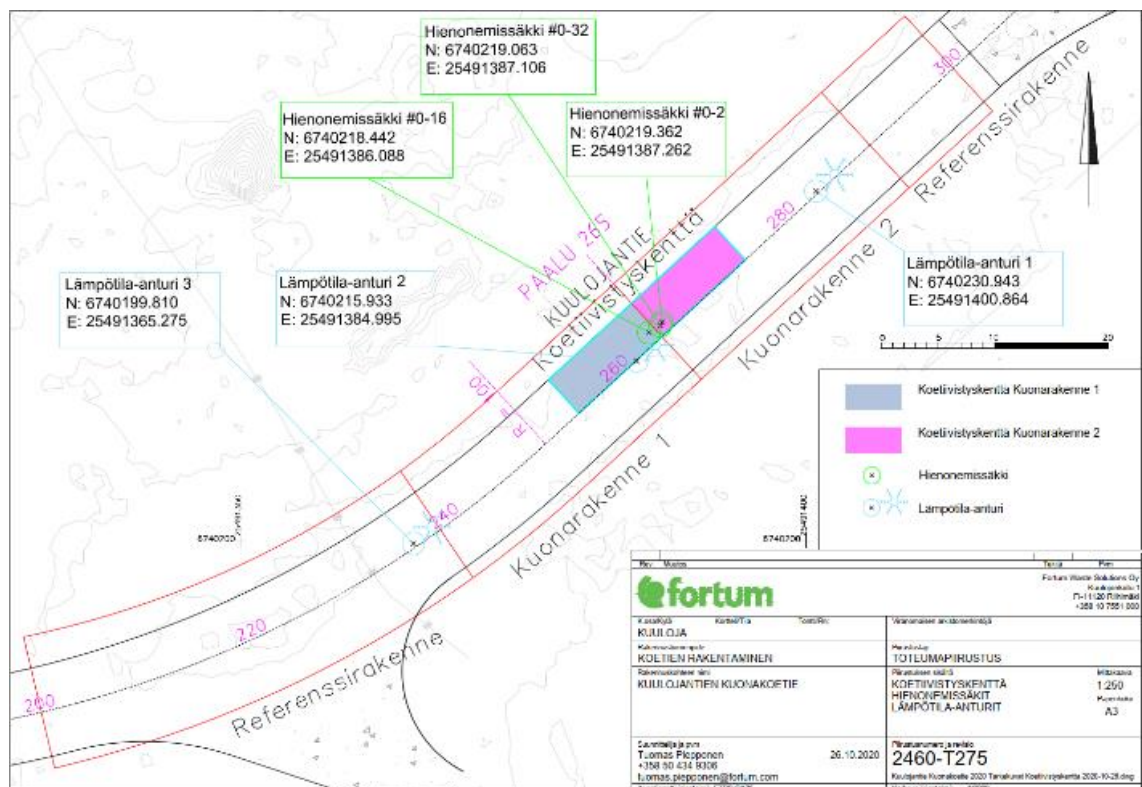
Muodonmuutosmoduuli määritetään kuvan 4 mukaisesti maksimirasitukseen nähden kuormitusvälillä 30–70 % siten, että ensimmäisen mittauksen aiheuttama painuma S_1 tuottaa ensimmäisen kantavuusarvon E_1 ja toisen mittauksen painuma S_2 moduuliarvon E_2 . Mitattuja tuloksia tavoitekantavuuteen vertaillessa käytetään yleensä moduuliarvoa E_2 , jossa ensimmäisessä mittauksessa mahdollisesti häirinneet pinnan epätasaisuudet eivät enää vaikuta.

4. KOERAKENTEEN ESITTELY

Fortum Waste Solutions Oy rakennutti kesällä 2020 koerakenteen Riihimäen jätteenpolttolaitoksen lähelle Hausjärven Kuulojantielle. Koerakenteiden rakentaminen ja instrumentointi on kuvattu Söderholmin (2020) opinnäytetyössä.

Koerakenne koostuu neljästä osasta: koerakenteen alku- ja loppuosaan tavanomaisesta kiviaineksesta rakennetusta referenssirakenteesta ja kahdesta kuonarakenneosuksesta, jotka eroavat toisistaan suodatinkerroksessa käytetyn kuonan rakeisuuden osalta.

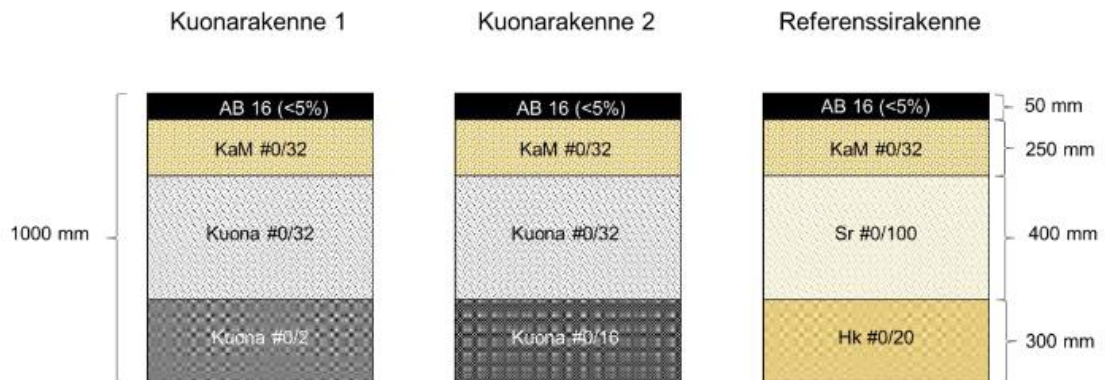
Kuvassa 5 on esitetty rakenteiden sijainnit ja kuonarakenteisiin kuormitettujen pohjakuonarakaiden hienonemisen arvioimista varten asennettujen hienonemissäkkien sijainnit. Sormusen (2017) mukaan pohjakuona voi voimakkaan kuormituksen alaisena olla taipuvainen hienontumiseen, eikä se siksi sovellu käytettäväksi kantavassa kerroksessa ainakaan ilman sideainetta.



Kuva 5. Koerakenteen toteumapiirustus (Söderholm, 2020).

Kuten kuvasta 6 selviää, referenssi- ja kuonarakenteet olivat rakennekerrospaksuuksiltaan yhtenevät. Niin referenssi- kuin kuonarakenteissakin kantava kerros (250 mm KaM #0/32 mm) ja päällyste (50 mm AB 16) olivat kerrospaksuuksiltaan ja materiaaleiltaan

samanlaiset. Referenssirakenteessa 400 mm paksuinen jakava kerros tehtiin #0/100 mm sorasta ja 300 mm paksuinen suodatinkerros #0/20 mm hiekasta. Kuonarakenteissa jakavaan kerrokseen käytettiin #0/32 mm kuonaa ja suodatinkerrokseen joko #0/2 mm (kuonarakenne 1) tai #0/16 mm (kuonarakenne 2) kuonalajitteita. Rakenteiden poikkileikkaukset on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Rakenteiden poikkileikkauskuvat (Söderholm, 2020).

Referenssirakenteissa ja molemmissa kuonarakenteissa on lämpötila-antureita 9 cm syvyydestä alkaen 10 senttimetrin välein aina 199 cm syvyyteen saakka. Näistä antureista saatavalla jatkuvalla lämpötiladatalla tutkittiin roudan etenemistä rakenteissa. Lämpötilamittauksia tehtiin kahden tunnin välein. Koerakenteessa tehtiin lisäksi vaaitsemalla routanousumittauksia kahden viikon välein 5.11.2020 alkaen aina 21.4.2021 saakka. Kantavuusmittaukset tehtiin raskaalla pudotuspainolaitteistolla asfaltin päältä syksyllä 2020 ja keväällä 2021.

Rakentamisessa käytettävät kuonalajitteet olivat peräisin Fortumin Riihimäen tuotantolaitokselta. Tuotteet on valmistettu erottelemalla ensin metallit kuonasta mekaanisella käsittelylaitteistolla. Tästä prosessista jäljelle jäävät eri raekoon omaavat mineraaliainekset on suhteutettu maarakentamiseen sopivan raekokojakauman aikaansaamiseksi. Eri rakennekerroksissa käytettyjen kuonalajitteiden (#0/2 mm, #0/16 mm ja #0/32 mm) raekokolajitteet on koostettu taulukkoon 1. (Söderholm, 2020.)

Taulukko 1. Kuonatuotteiden raekokolajitteet painoprosenttiosuuksina (Söderholm, 2020).

Kerros	0/2 mm	2/16 mm	6/16 mm	16/45 mm
Suodatin (#0/2 mm)	100	-	-	-
Suodatin (#0/16 mm)	65	25	10	-
Jakava (#0/32 mm)	15	20	30	35

Rakenteiden alla oleva pohjamaa ei ole kauttaaltaan samanlaista. Läntisen referenssirakenteen 1 alla pohjamaa on pääosin kosteampaa ja siltistä, kuonarakenteiden alla hiekkamoreenia ja itäisen referenssirakenteen 2 alla täyttömaata. Koerakenteiden toimintaa vertaillaan ensisijaisesti päällysrakenteiden osalta, jolloin pohjamaan vaihtelu ei vaikuta oleellisesti tässä tutkimuksessa tehtyihin analyysiin ja päätelmiin.

Söderholmin (2020) opinnäytetyössä koerakenteen molemmille kaistoille laskettiin Väyläviraston ohjeen mukaiset kuormituskertaluvut *KKL*, jotka olivat sisääntulokaistalle 354 123 ja ulostulokaistalle 361 992. Raskaita ajoneuvoja väylällä ajoi vuoden 2020 tammikuun ja toukokuun välillä päivittäin noin 23 kappaletta ja henkilöautoja 5–10 kappaletta (Söderholm, 2020). Väyläviraston (2018) mukaan kuormituskertaluku *KKL* kuvaa tielle raskaasta liikenteestä aiheutuvaa rasiitusta.

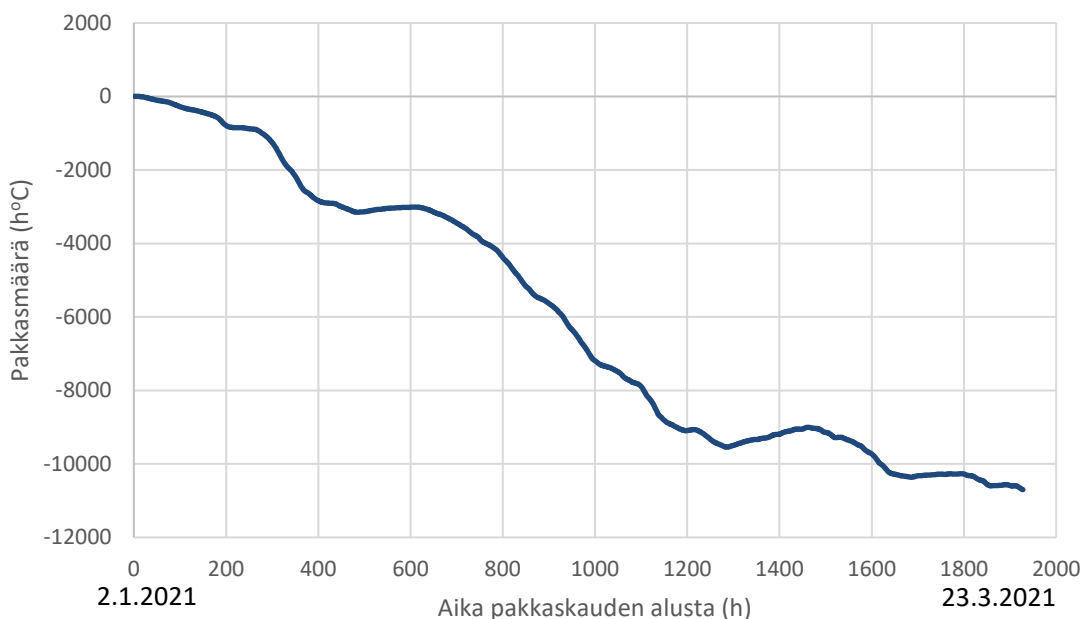
5. ROUTAERISTÄVYYS JA ROUTIMINEN

Tässä luvussa tarkastellaan koerakenteen toimivuutta routaeristävyuden näkökulmasta suhteessa vertailurakenteeseen. Koerakenteesta tehtyjen seurantamittausten perusteella arvioidaan, millainen pakkasmäärä on tarvittu, että routa on edennyt kuhunkin kerrokseen asti, ja miten koerakenteen routiminen eroaa referenssirakenteen routimisesta.

5.1 Lämpötilamittaukset

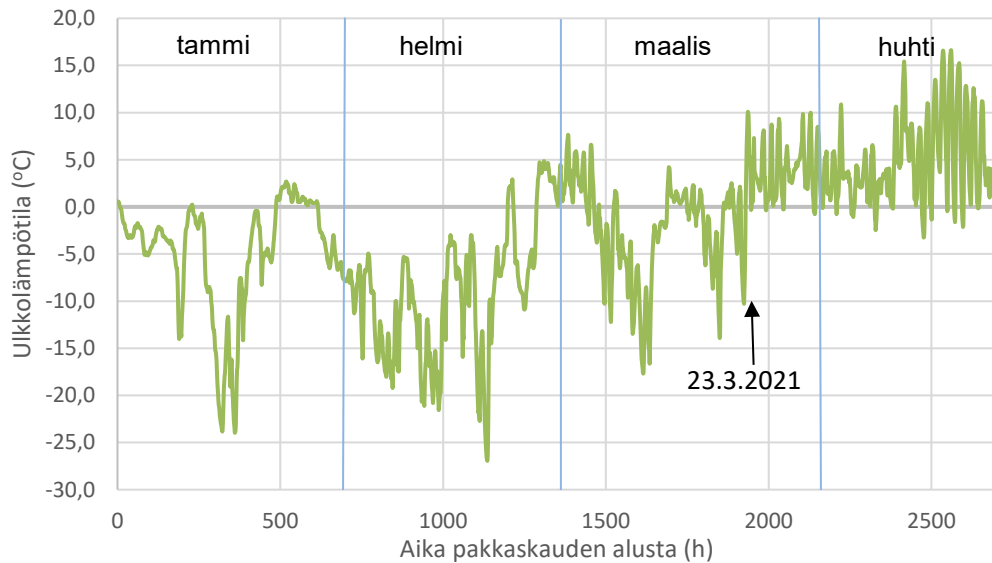
Säätietojen osalta käytettiin mittauksissa Ilmatieteen laitoksen mittaustietoja Hyvinkään kylän mittausasemalta, joka sijaitsee noin 20 kilometrin päässä koerakenteista. Ulkolämpötilojen perusteella pakkaskausi alkoi koerakenteiden sijaintialueella 2.1.2021, jolloin vuorokauden keskilämpötila laski ensimmäisen kerran pysyvästi alle nollan celsiusasteen. Pakkaskausi loppui 24.3.2021, jonka jälkeen lämpötila laski nollan alapuolelle enää satunnaisesti yöaikaan. Pakkaskausi kesti talvella 2020–2021 yhteensä 81 päivää eli 1 944 tuntia. Pakkasmäärä tällä ajanjaksolla oli 10 700,00 h°C (Ilmatieteen laitos, 2021).

Kuvassa 7 on esitetty pakkasmäärän kertymä tunneittain koko pakkaskauden ajalta Ilmatieteen laitoksen mittausten perusteella. Pakkaskausi alkoi mittausten perusteella 2.1.2021 kello 00:00 ja päättyi 23.3.2021 kello 23:00. Kuvassa 8 on ulkoilman lämpötila pakkaskauden alusta seurantajakson päättymiseen 23.4.2021 saakka.



Kuva 7. Pakkasmäärän kertymä tunneittain (Ilmatieteen laitos, 2021).

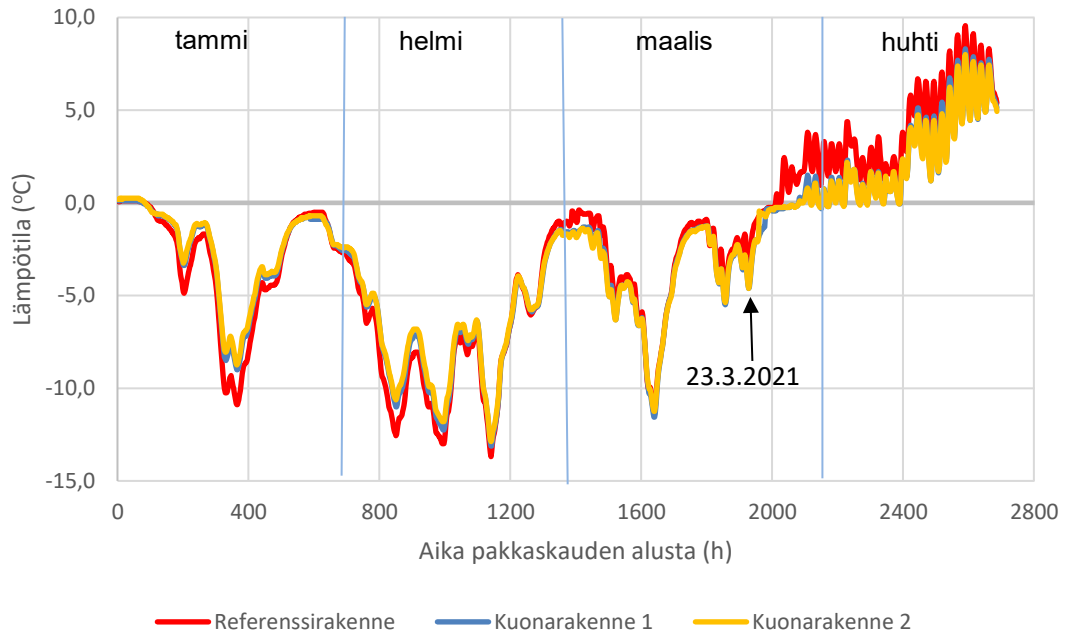
Kuvasta 7 nähdään, että pakkasmäärän kertymä oli melko tasaista koko pakkaskauden ajan. Pakkaskauden viimeisinä viikkoina ulkolämpötilan noustessa pakkaskertymän kasvu pysähtyi.



Kuva 8. Ulkolämpötila Hyvinkäänkylän mittausasemalla (Ilmatieteen laitos, 2021).

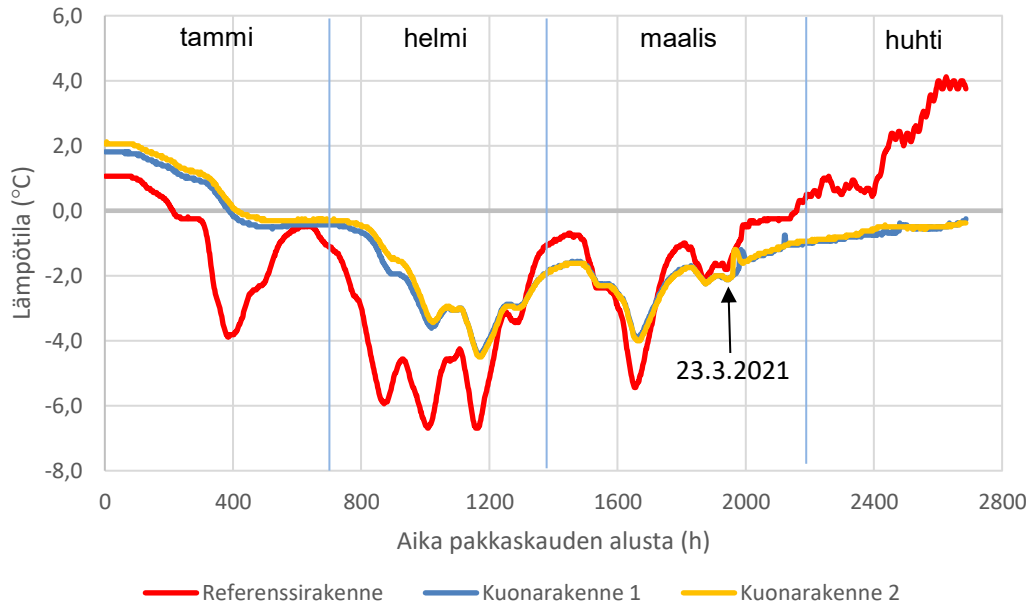
Kuvan 8 lämpötilamittauksista nähdään, että pakkaskauden aikana ulkolämpötila vaihteli pääsääntöisesti viiden ja kahdenkymmenen pakkasasteen välillä. Lämpötila myös nousi yli nollan asteen muutaman kerran talven aikana. Pakkaskauden päättyttyä sulamisvaiheen aikana ulkolämpötila vaihteli voimakkaasti enimmillään yli 15 asteesta aina satunnaisiin yöpakkasiin saakka.

Kuvassa 6 on esitetty referenssi- ja koerakenteiden eri kerrosten paksuudet. Kantavan ja jakavan kerroksen raja oli 0,3 metrin syvyydessä, jakavan ja suodatinkerroksen raja 0,7 metrin syvyydessä ja alusrakenne alkoi 1,0 metrin syvyydessä. Pakkasmäärän kertymän avulla tutkittiin roudan etenemistä läntisessä referenssirakenteessa ja kuonarakenteissa näiden kerrosrajojen kohdalla sekä 2 metrin syvyydessä alusrakenteessa. Saadut tulokset on koottu kuviin 9–12. Kuvaajissa on esitetty tuloksia 23.4.2021 saakka, jotta mahdolliset rakenteiden väliset eroavaisuudet myös sulamisvaiheen osalta tulevat näkyviin.



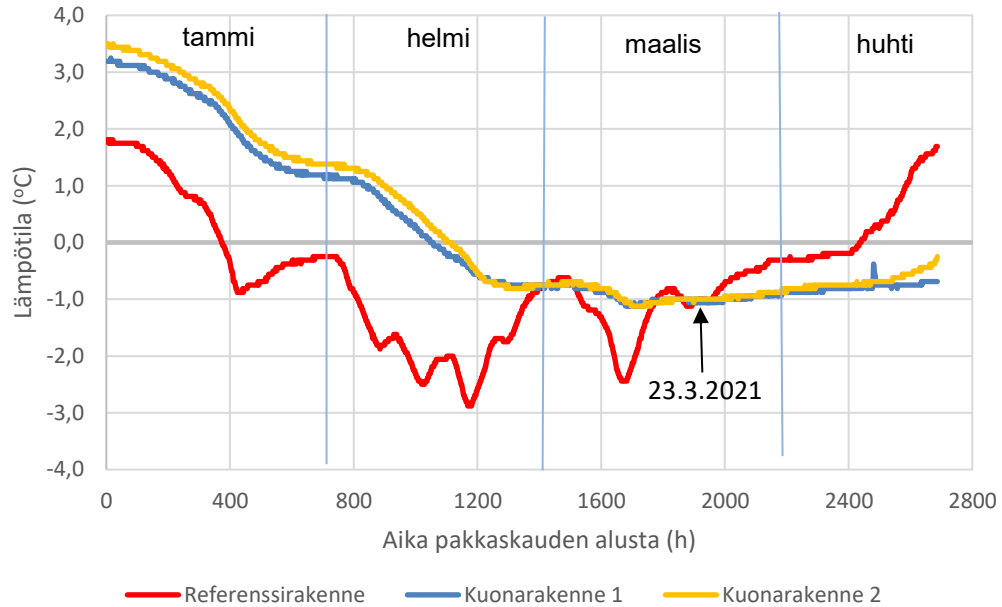
Kuva 9. Lämpötilat rakenteissa 29 cm syvyydellä (2.1.2021 – 23.4.2021).

Kaikki kolme rakennetta – läntinen referenssirakenne 1, kuonarakenne 1 ja kuonarakenne 2 – ovat 0,3 metrin syvyyteen asti käytännössä samanlaiset, joten niiden voisi olettaa käyttäytyvän siihen syvyyteen saakka myös lämpöteknisesti samalla tavalla. Kuvassa 9 esitetyt lämpötilamittausten tulokset 0,29 metrin syvyydeltä eli kantavan kerroksen alapinnasta osoittavat tämän teorian paikkansapitäväksi, sillä rakenteiden välillä ei ole tällä syvyydellä jäätymisvaiheessa juurikaan eroja lämpötiloissa pakkaskauden aikana. Kaikissa rakenteissa routaantuminen ulottui kantavaan kerrokseen jo muutamassa päivässä ulkolämpötilan laskettua pakkasen puolelle. Sulamisvaiheessa on havaittavissa pieni ero päällysrakenteen yläosan lämpötilakehityksessä referenssirakenteen ja hitaammin lämpenevien kuonarakenteiden välillä.



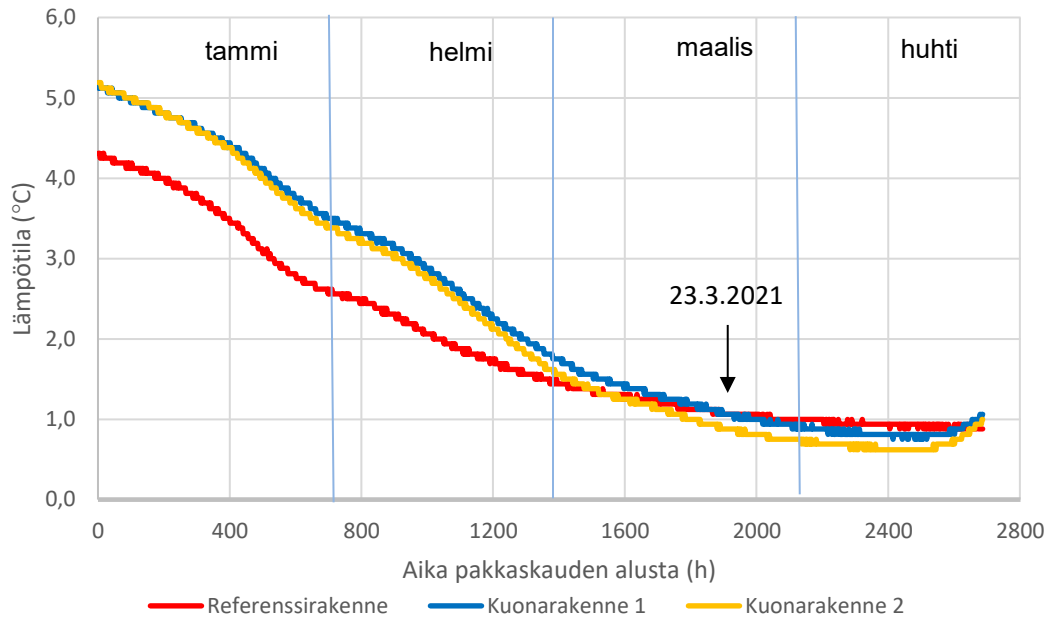
Kuva 10. Lämpötilat rakenteissa 69 cm syvyydellä (2.1.2021 – 23.4.2021).

Kuonarakenteet 1 ja 2 ovat 0,7 metrin syvyyteen asti rakenteeltaan samanlaisia keskenään. Referenssirakenteessa on jakavassa kerroksessa soraa. Kuvassa 10 on esitetty lämpötilamittausten tulokset 0,69 metrin syvyydellä eli jakavan kerroksen alapinnassa. Tuloksista voidaan havaita, että tällä syvyydellä kuonarakenteiden lämpötekninen käyttäytyminen alkaa erota merkittävästi referenssirakenteesta. Referenssirakenne saavutti routarajan 0,69 metrin syvyydessä illalla 10.1.2021. Kuonarakenteessa 1 lämpötila oli tällöin vielä +1,25°C ja kuonarakenteessa 2 lämpötila oli +1,5°C. Molemmissa kuonarakenteissa lämpötila laski alle nollan asteen reilun viikon referenssirakennetta myöhemmin – kuonarakenteessa 1 illalla 18.1.2021 ja kuonarakenteessa 2 aamupäivällä 19.1.2021. Pakkasjakson jälkeen referenssirakenteen lämpötila nousi kuonarakenteita nopeammin, ja jo pakkasjakson aikana referenssirakenne myötäili ulkolämpötilan muutoksia voimakkaammin kuin kuonarakenteet.



Kuva 11. Lämpötilat rakenteissa 99 cm syvyydellä (2.1.2021 – 23.4.2021).

Noin metrin syvyydellä, suodatinkerroksen ja alusrakenteen rajalla, kuonarakenteiden erot lämpötilakäyttäytymisessä referenssirakenteeseen verrattuna tulevat vieläkin selvemmin esiin. Rakenteiden lämpötilamittausten tulokset 0,99 metrin syvyydeltä on esitetty kuvassa 11. Referenssirakenteessa lämpötila painui alle nollan celsiusasteen ilta-päivällä 17.1.2021. Kuonarakenteessa 1 lämpötila laski pakkasen puolelle lähes kuu-kautta myöhemmin, aamuyöllä 15.2.2021, ja kuonarakenteessa 2 ilta-päivällä 17.2.2021. Routa siis eteni metrin syvyyteen talven 2020–2021 pakkasmäärällä koerakenteissa noin kuukauden hitaammin kuin referenssirakenteessa. Toisaalta kuonarakenteet myös sulivat hitaammin kuin referenssirakenne, jossa lämpötila nousi yli nollan asteen 14.4.2021. Molemissa kuonarakenteissa lämpötila nousi yli nollan asteen viikkoa myöhemmin, seurantajakson loppumisen jälkeen 24.4.2021.



Kuva 12. Lämpötilat rakenteissa 199 cm syvyydellä (2.1.2021 – 23.4.2021).

Syvimmällä sijaitsevat lämpötila-anturit olivat 199 cm syvyydellä rakenteen pinnasta, ja näiden mittaustulokset on esitetty kuvassa 12. Talven 2020–2021 pakkasmäärällä routa ei edennyt näin syväälle, vaan kaikkien rakenteiden lämpötila jäi lopulta plussan puolelle, noin yhteen celsiusasteeseen. Suuren osan talvesta referenssirakenteen lämpötila pysytteli tasaisesti noin yhden celsiusasteen verran matalampana kuin kuonarakenteissa, mutta aivan pakkaskauden lopussa, 15. – 17.3.2021, lämpötila kuonarakenteiden alapuolella laski referenssirakenteen kanssa samalle tasolle. Kuonarakenteen 2 alla lämpötila laski 0,2 °C matalammaksi kuin referenssirakenteessa. Taulukossa 2 on esitetty, miten paljon pakkaskertymää on vaadittu edellisen kerroksen jäätyneen jälkeen, jotta lämpötila on kussakin kerroksessa laskenut kauttaaltaan alle nollan asteen.

Lämpötila-anturit olivat rakenteissa 10 cm syvyyseroilla, joten pohjamaan syvin jäätyneet kohta tarkoittaa syvimmällä ollut lämpötila-anturia, jossa lämpötila laski alle nollan asteen. Referenssirakenteen 1 pohjamaassa tämä syvyys oli 149 cm ja molempien kuonarakenteiden pohjamaassa 159 cm. Mittaustavasta johtuen syvimmän jäätyneen kohdan selvittämisen virhemarginaali on ± 5 cm.

Taulukko 2. Eri rakennekerrosten jäätymiseen tarvittu pakkasmäärät.

Jäätymiseen vaadittu pakkasmäärät kerroksittain (Kh)			
Kerros	Referenssirakenne 1	Kuonarakenne 1	Kuonarakenne 2
Kantava	228	188	228
Jakava	619	2 623	2 674
Suodatin	1 779	4 819	5 350
Pohjamaa (syvimmillään)	6 323	2 263	1 816

Kuvissa 9–12 esitetyistä lämpötilakuvaajista nähdään, että kuonarakenteet paitsi jäätyvät, myös sulavat huomattavasti hitaammin kuin referenssirakenne. Hitaamman lämpenemisen myötä kuonarakenneosuuksien pintaosa on pidemmän ajan alltiina toistuvalla jäätymiselle ja sulamiselle. Kappaleessa 5.4 kuvattu vaurioinventointi kuitenkin osoitti, ettei rakenteesta tästä huolimatta havaittu minkäänlaisia routavaurioita.

Vaikka routa eteni suodatinkerroksen ja alusrakenteen rajalle kuonarakenteissa merkittävästi referenssirakennetta hitaammin, tämän jälkeen jäätyminen itse pohjamaassa tapahtui taulukon 2 tulosten perusteella kuonarakenteiden alla nopeammin kuin referenssirakenteessa. Tätä selittää kappaleessa 4 kuvatut eroavaisuudet pohjamaassa – referenssirakenteen 1 alla olevan kostean, silttisen pohjamaan jäätymisvastus oletetaan merkittävästi korkeammaksi kuin kuonarakenteiden alla olevan kuivan moreenin (Ehrola, 1996).

5.2 Roudan tunkeutumissyvyyden laskennallinen arviointi

Roudan tunkeutumissyvyyttä arvioidaan kaavaan (1) pohjautuvalla kerroksellisen rakenteen laskentamallilla (Ehrola, 1996, s. 92). Laskennassa on käytetty lähtötietoina Riihimäen vuoden 2020 keskilämpötilana 4,6 °C ja pakkaskauden 2020–2021 keskilämpötilana -5,4 °C (Ilmatieteen laitos, 2021). Kuonatuotteille arvioidaan lämmönjohtavuuskerroimet lämpötilatietojen, vesipitoisuuksien ja kuivairtitiheyksien perusteella.

Taulukossa 3 on esitetty koerakenteiden rakentamisen aikana tehtyjen uunikuivatuskokeiden (Söderholm, 2020) perusteella arvioidut kerrosten keskimääräiset vesipitoisuudet. Pohjamaalle vesipitoisuudeksi oletettiin noin 15 paino-%.

Taulukko 3. Rakentamisen aikaiset keskiarvovesipitoisuudet painoprosentteina rakennekerroksittain.

Vesipitoisuudet rakennekerroksittain (paino-%)			
Kerros	Referenssi	Kuona 1	Kuona 2
Suodatin	2,9	17,9	19,9
Jakava	2,4	10,7	10,8
Kantava	3,6	4,0	4,2

Taulukon 3 arviot vesipitoisuudesta eivät ole tarkkoja arvoja rakenteen vallitsevasta vesipitoisuudesta, sillä niissä ei ole huomioitu rakenteessa rakentamisen jälkeen ja käytön aikana tapahtuvaa kuivumista tai kastumista. Epätarkkuutta aiheuttaa myös se, että #0/16 mm kuonalajitetta oli rakentamisvaiheessa kasteltu työmaalla optimaalisemman vesipitoisuuden saavuttamiseksi. Laskennassa vesipitoisuutta täytyikin arvioida tapauskohtaisesti.

Rakenteissa toteutuvien lämmönjohtavuuskertoimien arviointiin tähtäävässä roudan tunkeutumissyvyyden laskennassa käytettiin lähtötietona Söderholmin (2020) raportoimia Proctor-kokeiden tuloksia kuonien kuivairtotehiyksiä maksimiarvoista ja Troxler-mittauksista laskettuja lajitteiden tiiviyksasteita. Näiden pohjalta arvioitiin rakenteissa vallitsevia kuivairtotehiyksiä, jotka on koostettu yhdessä lähtöarvojen kanssa taulukkoon 4.

Taulukko 4. Söderholmin (2020) raportoimat kuivairtotehiyksiä maksimiarvot ja tiiviyksasteet sekä näiden pohjalta arvioidut vallitsevat kuivairtotehiydet.

Kuonalajite	Kuivairtotehiyden maksimiarvo (kg/m ³)	Tiiviyksaste (%)	Vallitseva kuivairtotehiys (kg/m ³)
#0/2 mm	1 686	92	1 550
#0/16 mm	1 882	92	1 750
#0/32 mm	2 038	95	1 950

Söderholmin raportoimien laboratoriomääritysten perusteella tiedettiin #0/2 mm kuonan lämmönjohtavuuskertoimen olevan 0,66 W/mK (vesipitoisuudessa 17,8 %) ja #0/16 mm kuonan 0,9 W/mK (vesipitoisuudessa 18,7 %). Tunnettujen lähtöarvojen perusteella etsittiin realistinen rakenteen vesipitoisuus, jolla kaavaan (1) pohjautuvalla laskennalla saavutettiin näitä lämmönjohtavuusarvoja mukailevia tuloksia. Iteroinnin tulokset on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Lämmönjohtavuuskertoimet kuonalajitteille.

Kuonalajite	Lämmönjohtavuuskerroin (W/mK)	Vesipitoisuus (paino-%)
#0/2 mm	0,66	12,6
#0/16 mm	0,94	13,8
#0/32 mm	0,91	9,0

Tulosten laskennassa ilmeni, että lämmönjohtavuuskerrointa merkittävämpi tekijä kuonarakenteiden lämmönjohtavuusominaisuuksien taustalla on rakenteen vesipitoisuus. Huokoisessa kuonarakenteessa voi olla sitoutuneena enemmän vettä (Söderholmin raportoimat optimivesipitoisuudet 13–20 paino-%) kuin hiekassa (5–15 paino-%, InfraRYL, 2020) tai sorassa (5–10 paino-%, InfraRYL, 2020). Vesipitoisuuden muutamien prosenttiyksiköiden suuruinen vaihtelu vaikutti jäätymiseen vaadittavaan pakkasmäärään enemmän kuin realististen lämmönjohtavuuskerroin-arvojen haarukointi. Tämä hankaloitti tarkkojen lämmönjohtavuuskertoimien määrittämistä. Kun vesipitoisuuden vaikutus tulokseen oli näin suuri, olisi sen arvion oltava mahdollisimman luotettava. Käytännössä tämä on kuitenkin vaikeaa, koska koerakenteisiin ei ole asennettu kosteustilan seuranta-mittausta, joka sekään ei toisaalta olisi tuottanut rakenteesta kuin pistemäisiä tuloksia.

5.3 Kuonalajitteiden vastaavuusarvot routamitoituksessa

Jotta saatiin määritettyä rakenteiden routamitoitukseen soveltuvat vastaavuusarvot a kuonalajitteille, korjattiin kaavaan (1) pohjautuvissa roudansyvyuden arvioinnin laskelmissa referenssirakenteen kerrosten paksuutta niin, että kunkin kerroksen jäätymiseen vaadittu pakkasmäärä saatiin vastaamaan vastaavan kuonakerroksen jäätymiseen vaadittua pakkasmäärää. Näin saatiin selville hiekan ja soran vesipitoisuuksilla, kuivairtotehyksillä ja lämmönjohtavuusarvoilla, miten paljon ohuempaa kuonarakenteen rakennekerrosta referenssirakenteen rakennekerros vastaa. Liitteessä A on kuvattuna esimerkki kantavan kerroksen laskennasta.

Näin tehdyn laskelman tuloksena jakavassa kerroksessa 0,4 metrin paksuinen kerros #0/32 mm kuonaa vastasi lämmönjohtavuudeltaan 1,05 metrin paksuista kerrosta #0/100 mm soraa.

Suodatinkerroksessa 0,3 metrin paksuinen kerros #0/2 mm kuonaa vastasi lämmönjohtavuudeltaan 0,69 metrin paksuista kerrosta #0/20 mm hiekkaa ja 0,3 metriä #0/16 mm kuonaa vastasi 0,75 metrin paksuista kerrosta #0/20 mm hiekkaa. Suodatinkerroksen

tuloksista saatiin suoraan vastaavuusarvo *a* hiekkään nähden, joka oli #0/2 mm kuonalle 2,3 ja #0/16 mm kuonalle 2,5.

Vastaavuusarvo #0/32 mm kuonalle saatiin käyttämällä tietoa, että soran vastaavuusarvo *a* on 0,9 (Väylävirasto, 2018). Näin ollen #0/32 mm kuonan vastaavuusarvoksi laskettiin 2,3. Vastaavuusarvojen laskennasta saadut tulokset on esitetty taulukossa 6.

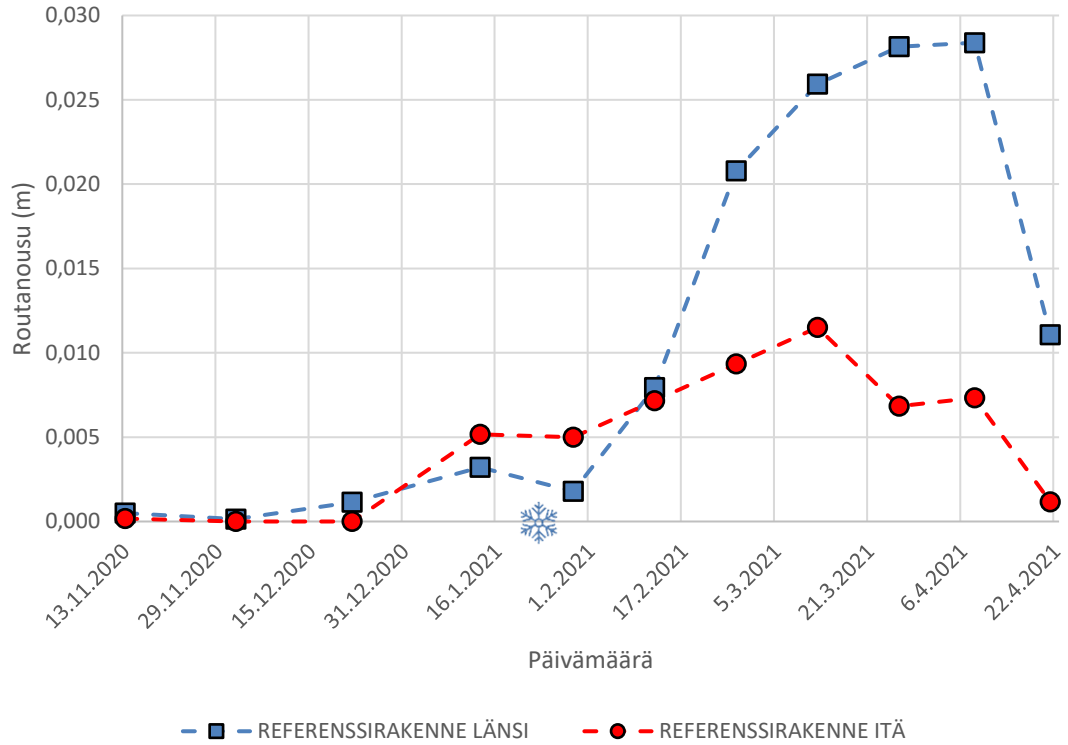
Taulukko 6. *Kuonien vastaavuusarvot *a* hiekkään verrattuna.*

Kuonalajite	Vastaavuusarvo <i>a</i>
#0/2 mm	2,3
#0/16 mm	2,5
#0/32 mm	2,3

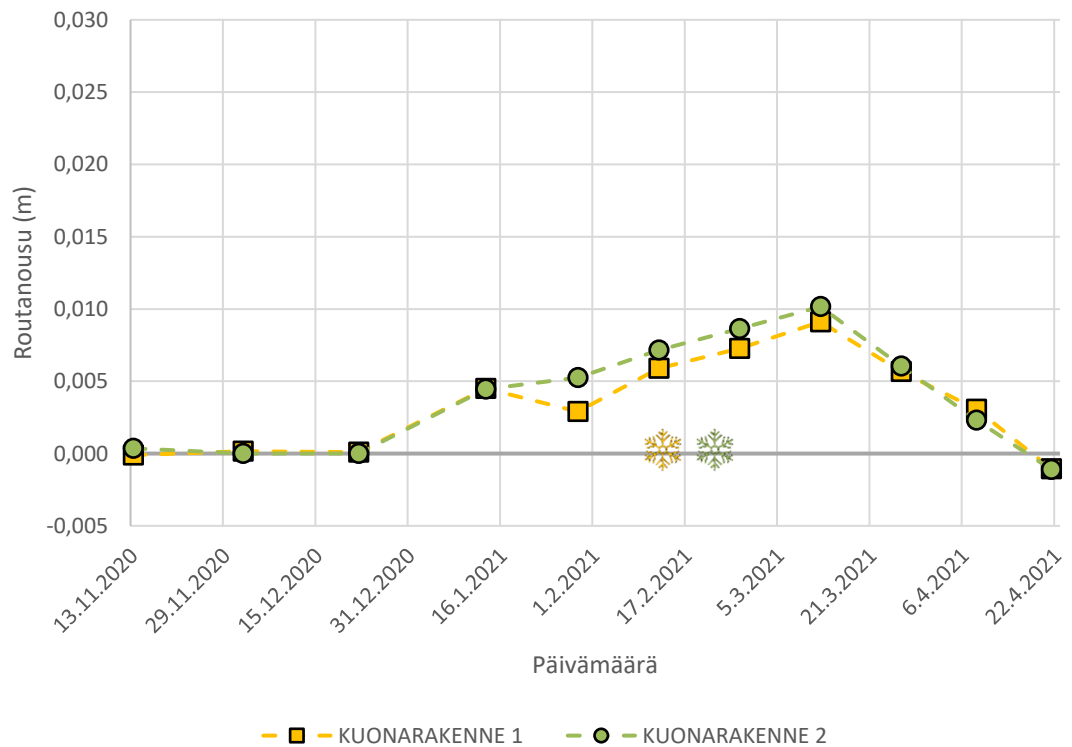
Taulukon 6 tuloksista nähdään, että hieno- ja karkeampirakeinenkin kuonalajite vastaa talven 2020–2021 mittauksien perusteella kaksi kertaa paksumpaa hiekkakerrosta routautumisen näkökulmasta. Tulosten hyödyntämisessä on kuitenkin huomioitava, että havainnot kattavat kuitenkin vasta yhden talven yhdellä koetiellä.

5.4 Routanousu ja routavauriot

Koerakenteesta mitataan routanousu vaaitsemalla kahden viikon välein marraskuusta 2020 alkaen kolmena talvena. Mittauksia tekee Fortum Waste Solutions Oy sekä alihankkija. Routanousu on mittauspisteiden korkeusaseman muutos verrattuna lähtötilanteeseen eli 5.11.2020 mitattuun korkeusasemaan. Mittauspisteitä oli läntisessä referenssirakenteessa 1 yhteensä 14 kappaletta, kuonarakenteissa 1 ja 2 molemmissa 20 kappaletta sekä itäisessä referenssirakenteessa 2 yhteensä 6 kappaletta. Tässä työssä raportoidaan ensimmäisen talven aikana (2020–2021) vaaitsemalla saadut mittauksien tulokset, jotka on esitetty referenssirakenteiden osalta kuvassa 13 ja kuonarakenteiden osalta kuvassa 14. Hetki, jolloin routaraja saavutti kussakin rakenteessa pohjamaan pinnan, on merkitty aikajanelle tähdellä.



Kuva 13. Routanousumittausten keskiarvotulokset referenssirakenteissa ensimmäisenä talvena 2020–2021. Pohjamaan jäätymisen alkamiskohta merkitty tähdellä.



Kuva 14. Routanousumittausten keskiarvotulokset kuonarakenteissa ensimmäisenä talvena 2020–2021. Pohjamaiden jäätymisen alkamiskohdat merkitty tähdillä.

Mittaustuloksista nähdään, että kokonaisroutanousua oli läntisessä referenssirakenteessa tapahtunut noin kolme kertaa enemmän kuin muissa rakenteissa. Referenssirakenteissa, joissa pohjamaan jäätyminen alkoi kuukautta aikaisemmin kuin kuonarakenteissa, merkittävin routanousu syntyi juuri pohjamaan jäätyksen aikana. Yksittäisissä mittauspisteissä routanousu oli läntisen referenssirakenteen alueella enimmillään 33 millimetriä ja itäisen referenssirakenteen alueella 13 millimetriä. Kuonarakenteen 1 alueella routanousu oli vastaavasti yksittäisissä mittauspisteissä suurimmillaan 11 ja kuonarakenteen 2 alueella suurimmillaan 12 millimetriä. Huhtikuun lopulla kuonarakenteista on mitattu 1–2 millimetrin painumia syksyn ensimmäiseen mittaukseen verrattuna, mutta osa näistä tuloksista oli mittaajan toimesta raportoitu lumiauran tai muun työkoneneen vaurioittamiksi kohdiksi.

Koerakenteelle tehtiin 12.5.2021 pudotuspainolaitemittausten yhteydessä vaurioinventointi. Vaurioinventoinnissa noudatettiin Annika Sormusen tekemää koetien tarkkailusuunnitelmaa, jonka laadinnassa oli sovellettu Tielaitoksen sisäistä julkaisua 13/1994 Päälystevaurioiden inventointiohje. Inventointiin osallistui neljä Fortum Waste Solutions Oy:n edustajaa ja tämän kandidaatintyön tekijä. Tiestä ei havaittu ensimmäisen talven jälkeen minkäänlaisia routavaurioita, mutta havaintoja edellä mainituista talvikunnossapidon aiheuttamista vaurioista tehtiin muutamia. Lisäksi tiessä oli joitain rakennusvaiheessa syntyneitä epäkohtia, kuten keikkuvia kaivonkansia ja epäonnistuneita asfalttisaumoja. Havaitut vauriot valokuvattiin ja niiden sijainti merkittiin vaurioraporttiin kevään 2022 vaurioinventoinnissa tapahtuvaa seurantaa varten. Liitteessä B on esitetty vaurioinventoinnin aikana otettuja valokuvia.

5.5 Routaturpoama

Routaturpoama laskettiin kullekin kerrokselle kuvissa 13 ja 14 esitettyjen routanousutulosten perusteella. Kerroksen routaturpoama on tarkasteltavan kerroksen jäätyessä tapahtunut routanousu jaettuna kerrospaksuudella.

Kantavan kerroksen osalta tuloksien laskenta olisi vaikeaa, sillä lämpötilamittausten perusteella kantavan kerroksen jäätyminen alkoi 22.12.2020 tehdyn vaaitusmittauksen jälkeen ja kantava kerros oli lämpötilamittausten perusteella kokonaan jäänyt ennen seuraavaa vaaitusmittausta 13.1.2021.

Läntisen referenssirakenteen jakava kerros oli myös ehtinyt jäätyä näiden samojen vaaitusmittausten välissä. Suodatinkerroksen jäätyksen aikana läntinen referenssirakenne painui vaaitusten perusteella alaspäin 1 millimetrin eli tiivistyi. Ilmiö voi johtua myös lämpötilan laskiessa tapahtuvasta kutistumisesta.

Kuonarakenteen 1 yläpinta painui 2 millimetriä alaspäin jakavan kerroksen jäätyksen aikana ja kohosi 4 millimetriä suodatinkerroksen jäätyksen aikana. Kuonarakenteen 2 yläpinta nousi 1 millimetrin jakavan kerroksen jäätyessä ja 4 millimetriä suodatinkerroksen jäätyessä. Lähtökohtaisesti yhden millimetrin suuruusluokkaa olevat nousut ja painumat voi kuitenkin jättää huomiotta mittaustarkkuuden vuoksi.

Taulukko 7. Kuonarakenteiden routaturpoamat.

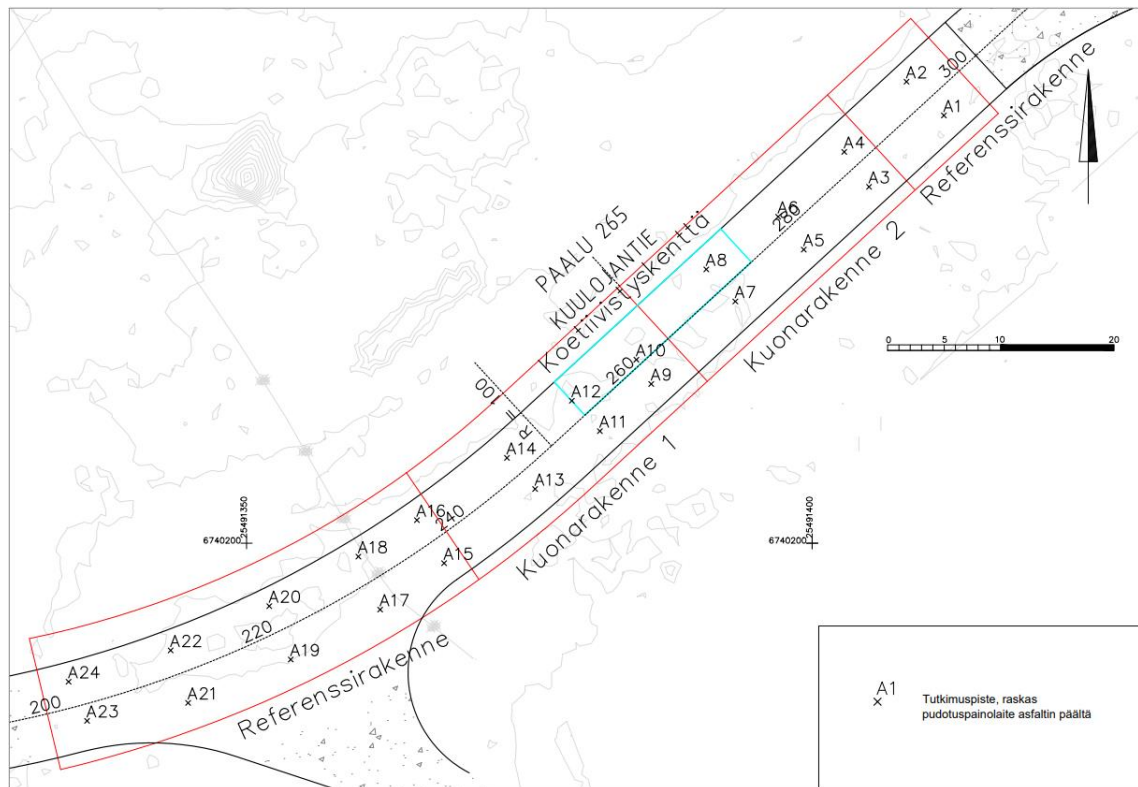
	Kuona-rakenne 1	Kuona-rakenne 2	Kuona-rakenne 1	Kuona-rakenne 2
	Pinnan korkeusaseman muutos (mm)		Pinnan korkeusaseman muutos (%)	
Jakava kerros	-2 mm	1 mm	-0,5 %	0,25 %
Suodatin-kerros	4 mm	4 mm	1,33 %	1,33 %

Taulukossa 7 on esitetty kuonarakenteiden kerrosten jäätyksen aikana tapahtunut routaturpoama millimetreinä ja prosentteina. Väyläviraston (2018) ohjeessa ensimmäinen nollasta poikkeava routaturpoamaluokka on 3 %, joten mittaustulosten perusteella koerakenteissa kuonalajitteita voi pitää käytännössä lähes routimattomina.

6. KANTAVUUDET

6.1 Kantavuusmittaukset

Alihankkija teki kantavuusmittaukset pudotuspainolaitteistolla. Ensimmäinen mittaus tehtiin 9.10.2020 ja toinen 12.5.2021. Mittauspisteitä oli kaikkiaan 24 kappaletta, joista 12 oli referenssirakenteiden päällä. Mittauspisteiden sijainnit koerakenneosuudella on esitetty kuvassa 15. Muodonmuutosmoduulit laskettiin sekä VTT:n käyttämällä lineaarisella monikerroskalkennalla että Odemarkin vastinpaksuusmenetelmällä, mutta alihankkija raportoi vain jälkimmäisen menetelmän tulokset, koska lineaarinen menetelmä antoi heidän arvionsa mukaan epärealistisia arvoja erityisesti päällysteelle ja kantavalle kerrokselle.



Kuva 15. Pudotuspainolaitteiston tutkimuspisteet A1 – A24.

Laskelmissa käytetyt maaperäkartan mukaiset arviot kallionpinnan syvyydestä olivat kuonarakenteille 10 metriä ja läntiselle referenssirakenteelle 7,5 metriä. Itäisen referenssirakenteen alla kallio sijaitsi niin syvällä, ettei sitä huomioitu laskennassa. Kuvassa 16 on alihankkijan käyttämä pudotuspainolaitteisto Kuulojantien koerakenteella.



Kuva 16. Pudotuspainolaiteisto koerakenteella.

6.2 Kantavuusarvojen vertailu

Alihankkija teki kaavassa (3) esiteltyyn Odermarkin menetelmään perustuvan takaisinlaskennan rakennekerrosten muodonmuutosmoduuleista. Mittauspisteiden takaisinlaskennan tulosten keskiarvoista laskettu kooste on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Rakennekerrosten muodonmuutosmoduulit (MPa).

Vuosi	Referenssi-rakenne itä		Referenssi-rakenne länsi		Kuonarakenne 1		Kuonarakenne 2	
	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021
Päällyste	8 334	12 584	7 635	13 775	5 504	11 447	2 856	10 644
Kantava	129	239	150	195	155	221	221	261
Jakava	174	255	137	191	89	103	88	121
Suodatin	91	132	82	115	57	81	71	82

Tulosten perusteella jokaisessa rakenteessa on tapahtunut talven aikana jäykistymistä eli muodonmuutosmoduuli on kasvanut verrattuna rakentamisen jälkeen 9.10.2020 tehdyn mittauksen tuloksiin. Alihankkijan mukaan ohuen, vain 50 mm paksuisen, päällysteen osalta luotettavaa moduuliarvoa ei ole mahdollista laskea, vaan päällysteen moduuliarvon merkittävä kasvaminen on seurausta rakenteen kantavuuden parantumisesta ylipäätään.

Väyläviraston (2018) mukaan asfalttibetonin moduulin oletusarvo on 2500 MPa, kantavan kerroksen #0/32 mm murskeen 200 MPa, jakavan kerroksen #0/100 mm soran 280 MPa ja suodatinkerroksen hiekan 100 MPa. Referenssirakenteen jakavan kerroksen sora lukuun ottamatta ovat kaikki referenssirakenteen kerrokset jäykkyydeltään oletusarvoja vastaavia.

Aiempien kenttämittausten ja laboratoriotutkimusten perusteella kuonatuotteiden muodonmuutosmoduuleiksi esitettiin #0/2 mm kuonalajitteelle (kuonarakenteen 1 suodatinkerros) 85 MPa, #0/16 mm kuonalajitteelle (kuonarakenteen 2 suodatinkerros) 95 MPa ja #0/32 mm kuonalajitteelle (kuonarakenteiden jakavat kerrokset) 110 MPa (Söderholm, 2020). Taulukossa 8 esitetyistä tuloksista nähdään, että #0/2 mm ja #0/32 mm kuonalajitteille saavutetut moduuliarvot vastaavat oletusarvoja. Kuonarakenteen 2 #0/16 mm kuonalajitteen moduuliarvo on jäänyt oletusarvosta hieman yli 10 MPa.

6.3 SCI- ja BCI- indeksit

Kantavuusmittaustulosten perusteella määritettiin muodonmuutosmoduulien lisäksi taulukossa 9 esitetyt indeksit eli *Surface Curvature Index* (SCI), joka kuvaa päällysrakenteen yläosan kantavuutta, ja *Base Curvature Index* (BCI) joka kuvaa tien kykyä jakaa kuormitusta heikon pohjamaan päällä (Saarenketo, 2020). Saarenkedon mukaan BCI-indeksi on hyvä ollessaan alle 10, tyydyttävä ollessaan 10–30, riittämätön ollessaan 30–40 ja heikko ollessaan 40–60. Tätä alemmat tulokset määritellään erittäin heikoiksi. SCI-indeksille vastaavat rajat ovat hyvälle alle 120, tyydyttävälle 120–200, riittämättömälle 200–250 ja heikolle 250–400.

Taulukko 9. BCI- ja SCI-tulosten keskiarvot koerakenteessa, vähintään tyydyttävät arvot lihavoitu.

Rakenne	9.10.2020		12.5.2021	
	BCI (tyydyttävä <30)	SCI (tyydyttävä <200)	BCI (tyydyttävä <30)	SCI (tyydyttävä <200)
Referenssi itä	15	273	20	170
Kuona 2	26	290	28	180
Kuona 1	32	304	34	201
Referenssi länsi	24	284	32	183

Taulukon 9 tuloksista nähdään, että päällysrakenteen yläosan kantavuus on SCI-arvon pienenemisen perusteella parantunut rakenteessa talven aikana. Tämä tarkoittaa, että rakenteiden yläosan jäykkyys on kasvanut. Tien alusrakenteen kyky ottaa kuormitusta vastaan on BCI-arvon perusteella pysynyt suunnilleen samana mittauksen välisenä ajanjaksona, sillä arvo on noussut, mutta kuonarakenteissa vain muutaman yksikön ja referenssirakenteissa 5–6 yksikköä. BCI-tulosten lievä heikkeneminen saattaa johtua esimerkiksi siitä, että mittaukset tehtiin toukokuussa heti roudan sulamisen jälkeen, jolloin routanousun aiheuttama rakenteen ja pohjamaan löyhtyminen ei ollut vielä ehtinyt palautua. Saarenkedon ehdottamien raja-arvojen mukaan koerakenteen tulokset asettuvat molempien indeksien osalta kevään mittauksessa käytännössä kaikkien rakenteiden osalta tyydyttäviksi. Syksyllä SCI-arvot olivat jopa heikkoja, mikä toisaalta ei ole epätavallista vasta rakennetulle rakenteelle.

Heikot SCI-arvot voivat indikoida rakenteen alttiutta tyyppin 1 urautumiselle, jota muodostuu, kun renkaan alla tapahtuu sitomattoman materiaalin plastista leikkautumista. Tämä johtuu yleensä kantavan kerroksen riittämättömästä leikkauslujuudesta. Heikot BCI-arvot puolestaan voivat ilmentää alttiutta tyyppin 2 urautumisesta, jossa muodonmuutokset

tapautuvat tierakenteen ja pohjamaan rajapinnassa, ja painuma tapahtuu koko rakenteessa rakennepaksuuksien pysyessä ennallaan. Tyypin 2 urautumisriski on ongelma lähinnä ohutrakenteisemmillä teillä. (Roadex, 2012.)

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Kuulojantien kuonakoerakenteella tehtiin talven 2020–2021 aikana rakenteiden lämpötilaseuranta, vaaitusmittauksia ja kantavuusmittauksia. Näiden mittaustulosten ja laskennallisen analyysin perusteella kuonalajitteiden lämmöneristävyys- ja routivuusominaisuudet eroavat luonnonkiviaineksista paitsi rakenteiden jäätyminen, myös sulamisen aikana. Mittausajankohdan talvi 2020–2021 oli melko edustava, sillä pakkasjakso kesti yli kaksi kuukautta ja routa pääsi siten tunkeutumaan syvälle päällysrakenteiden läpi. Pakkasmäärän osalta talvi jäi kuitenkin noin kolmasosaan keskimäärin kymmenen vuoden välein toistuvasta F_{10} -pakkasmäärästä. Seurannan jatkaminen tuo tulevien talvien osalta toivottavasti lisätietoa kuonarakenteiden toimimisesta myös erilaisten pakkasjaksojen aikana.

Lämpötilamittausten perusteella molemmat kuonarakenteet jäätyivät selvästi hitaammin kuin referenssirakenne. Suodatinkerrosten #0/2 mm ja #0/16 mm kuonalajitteiden lämpöteknisellä käyttäytymisellä ei ollut tulosten perusteella merkittäviä eroja keskenään. Koko pakkaskauden ajan molemmat kuonarakenteet myös seurasivat ulkolämpötilan muutoksia maltillisemmin kuin referenssirakenne, jossa lämpötila rakennekerroksissa nousi ja laski selvemmin ulkolämpötilan vaihteluiden mukana. Sulamiskauden aikana kuonarakenteet vastaavasti pysyivät jäässä pidempään kuin referenssirakenne. Tutkimukset osoittivat, että merkittävin tekijä kuonalajitteiden lämpöteknisten ominaisuuksien taustalla oli pienen lämmönjohtavuuskertoimen ohella kuonien korkea vesipitoisuus, joka osaltaan hidasti rakenteen jäätymistä ja roudan tunkeutumista syvemmälle. Korkeampi vesipitoisuus aiheutti myös kuonarakenteiden hitaamman sulamisen, koska suurempi jäätyneen veden määrä vaati enemmän lämpöä sulaakseen.

Tulosten perusteella vaikuttaa siltä, että kuonalajitteita käyttämällä voisi jakavasta kerroksesta ja suodatinkerroksesta rakentaa routamitoituksen puolesta kerrospaksuuskiltaan ohuempia rakenteita kuin luonnonkivimateriaaleja käyttämällä. Kuonalajitteiden vastaavuusarvoiksi laskettiin #0/2 mm ja #0/32 mm kuonalajitteille 2,3 sekä #0/16 mm kuonalajitteelle 2,5.

Keväällä 2021 koerakenteelle tehdyssä vaurioinventoinnissa ei havaittu mitään roudan aiheuttamia vaurioita. Suodatinkerroksen kuonajakeissa havaittiin vaaitusmittauksilla vain vähäistä, neljän millimetrin luokkaa olevaa, routanousua, mikä vastaa noin yhden prosentin routaturpoamaa, joten kuonalajitteita voi vaaitustulosten perusteella pitää käytännössä routimattomina.

Kevään 2021 kantavuusmittausten perusteella kaikkien koerakenteiden kantavuudet kehittivät syksyn 2020 mittauksiin verrattuna. Seurannan jatkaminen on tärkeää, jotta rakenteiden lopullisesta kantavuuden kehittymisestä tai heikkenemisestä saadaan pitkäaikaisempaa tietoa.

LÄHTEET

Sormunen, L.A. (2017) Recovered Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash: Aggregate-Like Products for Civil Engineering Structures. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/114469>

Väylävirasto (2018) Tierakenteen suunnittelu. Saatavissa: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2018-38_tierakenteen_suunnittelu_web.pdf

Ehrola, E. (1996) Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Helsinki: Rakennustieto.

Söderholm, A. (2020) Jätteenpolton pohjakuona tierakenteessa: koerakenteen rakentaminen ja tutkimus pohjakuonan teknisistä ominaisuuksista. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/349589>

Erityisjäte (2020). Jätteenpolton pohjakuonat, suunnitteluohje. Saatavissa: <https://www.erityisjate.fi/palvelut-ja-tuotteet/jatteenpolton-pohjakuonat/>

VTT, 2000. Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelma. Ilmastorasitus. Saatavissa: <https://docplayer.fi/4942587-Ilmastorasitus-pakkasmaaran-ja-sulamiskauden-pituuden-maaritys.html>

Ilmatieteen laitos (2021). Lämpötilamittaukset Hyvinkäänkylästä ja Riihimäeltä. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>

InfraRYL. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. 2020. Liite 2

FinMEAS -mittausdata koerakenteesta

Saarenketo, T. (2020) RAK-23340 Tien rakenteen parantaminen ja kunnossapito -luentomateriaali.

Roadex (2012). Pysyvät muodonmuutokset, urautumisen luokittelu. Verkkokurssi. Saatavissa: <https://www.roadex.org/fi/e-learning/kurssit/pysyvat-muodonmuutokset/3-pysyvat-muodonmuutokset-urautumisen-luokittelu/>

LIITE A:

Esimerkki kuonalajitteiden vastaavuusarvon Excel-laskennasta. Keskeiset kohdat alleviivattu mustalla.

1) Tierakenteelle:																	
Paksuus	Rood	Vesipit	C1	C2	Lamda	qn	qn	qn*dn	di/Lamdai	di/2Lamdai	Fn	Ref.	Kuona 1	Kuona 2			
m	kg/m3	paino-os.	kJ/m3K	kJ/m3K	W/Km	kJ/m3	Wh/m3	Wh/m2	Km2/W	Km2/W	Kh						
Kantava	0,3	2500	0,036	2378	2171	2	35047	9735	2921	0,15	0,08	219	227,7	187,8	227,7		
Jakava	0,4	1995	0,029	1839	1706	2,2	23119	6422	2569	0,18	0,09	619	619,1	2623,5	2674,5		

1) Tierakenteelle:																	
Paksuus	Rood	Vesipit	C1	C2	Lamda	qn	qn	qn*dn	di/Lamdai	di/2Lamdai	Fn	Ref.	Kuona 1	Kuona 2			
m	kg/m3	paino-os.	kJ/m3K	kJ/m3K	W/Km	kJ/m3	Wh/m3	Wh/m2	Km2/W	Km2/W	Kh						
Kantava	0,3	2500	0,036	2378	2171	2	35047	9735	2921	0,15	0,08	219	227,7	187,8	227,7		
Jakava	1,05	1995	0,029	1839	1706	2,2	23119	6422	6743	0,48	0,24	2621	619,1	2623,5	2674,5		

Laskennan lähtötietoina ja oletuksena käytetyt arvot: Sulan maa-aineksen ominaislämpökapasiteetti 0,8 kJ/kgK, sulan veden ominaislämpökapasiteetti 4,2 kJ/kgK. Jäätäneen maan ominaislämpökapasiteetti 0,8 kJ/kgK, jään ominaislämpökapasiteetti 1,9 kJ/kgK. Veden jäätymislämpö 333 kJ/kg. Vuoden keskilämpötila 4,6 °C ja pakkaskauden -5,4 °C. S-kerroin 0,7. Lämpötilagradientti 3 K/m. Pakkasmäärä 10 700 Kh, F₁₀-arvo 30 000 Kh, pakkasaika 1944 h.

Ylemmässä taulukossa on 0,4 metrin paksuinen kerros jakavan kerroksen #0/100 mm soraa. Kerros on laskennallisesti jäänyt pakkasmäärällä 619 Kh. Tämä arvo on sama kuin viereisessä keltaisessa sarakkeessa oleva lämpötilamittausten tuloksena saatu jäätymiseen vaadittu pakkasmäärä.

Kuonarakenteissa jakava kerros koostui #0/32 mm kuonalajitteesta, jonka kerrospaksuus oli 0,4 metriä, eli sama kuin referenssirakenteessa. Kuonarakenteiden jakavan kerroksen jäätymiseen tarvittiin n. 2600 Kh pakkasmäärä (sinisellä ja vihreällä korostetut sarakkeet taulukossa).

Alemmassa taulukossa on kokeilemalla selvitetty, miten paksu jakavan kerroksen olisi oltava, jos se edelleen koostuisi referenssirakenteen #0/100 mm sorasta, jotta jäätymiseen olisi vaadittu kuonarakenteiden n. 2600 Kh pakkasmäärä. Tulos on 1,05 metriä, jolloin vastaavuusarvon laskennassa 0,4 metrin paksuinen kerros #0/32 mm kuonalajitetta vastaa 1,05 metrin paksuista kerrosta #0/100 mm soraa.

Vastaavalla tavalla suodatinkerroksen #0/2 mm kuonalajitteelle saatiin vastinpaksuudet hiekkaan verrattuna. Suodatinkerroksen vastinpaksuuden laskennassa jakavassa kerroksessa pidettiin 1,05 metrin "laskennallinen" sorakerros. Mikäli jakavaan kerrokseen olisi jätetty laskennassa alkuperäinen 0,4 metrin sorakerros, olisivat suodatinkerroksen vastinpaksuudet kasvaneet vielä korkeammiksi.

Laskuesimerkki: 0,3 metrin paksuinen kerros #0/2 mm kuonalajitetta kuonarakenteessa 1 vastasi paksuudeltaan 0,69 metrin paksuista hiekkakerrosta. Kaavaa (3) mukaillen $a = \text{rakenteen laskennallinen kokonaispaksuus} / \text{rakennekerroksen paksuus} = 0,69 \text{ m} / 0,3 \text{ m} = 2,3$.

LIITE B:

Kevään 2021 vaurioinventoinnin yhteydessä tehtyjä havaintoja.



Kuva 17. Asfaltin sauma koko tien pituudella. Sauman vieressä myös kovettunutta soraa (Vaurioinventointi 2021, Fortum Waste Solutions Oy).



Kuva 18. Talvikunnossapidon aiheuttamaa vauriota tien pinnassa (Vaurioinventointi 2021, Fortum Waste Solutions Oy).