



Jätteenpolton pohjakuona tierakenteessa

Koerakenteen rakentaminen ja tutkimus pohjakuonan
teknisistä ominaisuuksista

Anniina Söderholm

OPINNÄYTETYÖ
Marraskuu 2020

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutusohjelma
Infrarakentaminen

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutusohjelma
Infrarakentaminen

SÖDERHOLM, ANNIINA:

Jätteenpolton pohjakuona tierakenteessa
Koerakenteen rakentaminen ja tutkimus pohjakuonan teknisistä ominaisuuksista

Opinnäytetyö 77 sivua, joista liitteitä 7 sivua
Marraskuu 2020

Jätteenpolto on nykyään yleisin yhteiskuntajätteen käsittelymuoto Suomessa, ja polton lopputuotteena syntyy yli 300 000 tonnia pohjakuonaa vuosittain. Euroopan Unionin tavoitteena on kiertotalouden edistäminen, ja siihen kuuluu myös jätteiden materiaalihyötykäyttö. Pohjakuonasta on käsittelemällä kehitetty kiviainesten kaltaisia tuotteita, joita voidaan käyttää maarakentamisessa korvaamaan luonnonkiviaineksia.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa on esitelty jätteenpolton prosesseja ja nykytilannetta Suomessa, pohjakuonien käsittelytekniikoita, sekä pohjakuonatuotteiden käyttökohteita ja ominaisuuksia maarakentamisessa.

Fortum Waste Solutions Oy toteutti Riihimäen laitosalueen yhteyteen koerakenteen kesällä 2020, jossa käytettiin pohjakuonatuotteita suodatinkerroksessa sekä jakavassa kerroksessa. Tässä työssä on raportoitu koerakenteen rakentamisprosessi, koerakenteesta tehtyjen mittausten ja tutkimusten tulokset sekä kuonatuotteista tehtyjen laboratoriotutkimusten tulokset. Tavoitteena oli tuottaa tietoa kuonatuotteiden teknisistä ominaisuuksista väylärakenteessa sekä materiaalien todellisista käyttöolosuhteista työmaalla.

Koerakenteen rakentaminen onnistui hyvin, ja kuonamateriaaleja voitiin käsitellä työmaalla samaan tapaan ja samoilla työkoneilla kuin luonnonkiviaineksia. Kenttätutkimusten tuloksista kuonamateriaaleille laskettujen E-Moduulien perusteella tuotteet soveltuvat esimerkiksi tien alempiin rakennekerroksiin. Tämä työ loi pohjan sille, että kenttätutkimusten syy-seuraussuhteita voidaan tutkia koerakenteen tarkkailun jatkuessa vielä pitkäaikaiskestävyyden ja routivuuden osalta.

Asiasanat: pohjakuona, jätteenpolto, kiertotalous, maarakennus, kenttätutkimus

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Construction Engineering
Civil Engineering

SÖDERHOLM; ANNIINA:
Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash in Road Building
Field Performance Study of the Technical Properties of MSWI BA

Bachelor's thesis 77 pages, appendices 7 pages
November 2020

Waste incineration is nowadays the most common treatment process for municipal solid waste in Finland. Over 300 000 tons of bottom ash is formed annually as a by-product from waste incineration process. The European Union is aiming towards circular economy, and this includes utilization of recycled products rather than dumping them on landfills. Municipal solid waste bottom ash (MSWI BA) has been used to create aggregate-like products that can be used in various civil engineering structures.

The purpose of this study was to gather information on the properties of MSWI BA used as a part of a road structure. The material properties were studied in a field performance study, where Fortum Waste Solutions Ltd constructed a road structure in summer 2020, where bottom ash products were used in the filtration layer and sub-base layer. The data was collected with laboratory analysis and field examination.

Constructing the test structure was successful and it was found that the MSWI BA products behaved on site in a similar manner as natural rock aggregates. The E-Modulus values obtained for the MSWI BA products indicated that these materials can be used in the lower structural layers of road structures. The monitoring of the test structure will continue for bearing capacity and frost susceptibility. This study laid the groundwork for reviewing the properties of these products in the lower structural layers of road structure in the long term.

Key words: bottom ash, municipal solid waste incineration, circular economy, civil engineering, field performance study

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	YLEISTÄ	9
	2.1 Jätteenpoltto Suomessa.....	9
	2.2 Polttoprosessi ja pohjakuonan muodostuminen	11
3	JÄTTEENPOLTON POHJAKUONA MAARAKENNUKSESSA	13
	3.1 Kuonan käsittely maarakennustuotteeksi	13
	3.2 Hyödyntäminen ja käyttökohteet	15
	3.3 Tekniset ja mekaaniset ominaisuudet	16
4	LABORATORIOTUTKIMUKSET ENNEN RAKENTAMISTA.....	19
	4.1 Testausmenetelmät.....	19
	4.2 Testitulokset.....	22
5	KOERAKENNE	37
	5.1 Rakenteen kuvaus	37
	5.1.1 Kuonatuotteet	38
	5.2 Rakennuspaikka ja pohjamaa	39
	5.3 Liikennekuormitus	39
	5.4 Koerakenteen rakentamisprosessi	40
6	KOERAKENTEEN TUTKIMUKSET	43
	6.1 Mittausmenetelmät ja tutkimusten toteutus	43
	6.1.1 Pohjamaa	43
	6.1.2 Koekenttä, tiivistyskertojen määrä ja hienoneminen	45
	6.1.3 Tiiviyssmittaukset	47
	6.1.4 Kantavuus.....	48
	6.2 Mittaustulokset	50
	6.2.1 Hienoneminen	50
	6.2.2 Tiiviys	51
	6.2.3 Kantavuus.....	53
	6.2.4 E-Moduulit	56
	6.3 Mittaukset rakentamisen jälkeen	62
	6.3.1 Kantavuus.....	62
	6.3.2 Roudan syvyys	62
	6.3.3 Routanousu ja vaurioinventointi.....	63
7	YHTEENVETO.....	65
	LÄHTEET.....	67
	LIITTEET.....	70
	Liite 1. Ympäristökelpoisuustulokset.....	71

Liite 2. Kolmiakksiaalikoekiden ja routanousukokeiden parametreja	73
Liite 3. Koerakenteen pituusleikkaussuunnitelma	74
Liite 4. Kartta jatkotutkimuksena tehtävistä kantavuuskokeista.....	75
Liite 5. Koerakenteen kantavuusmittausten tulokset kuvaajina	76
Liite 6. Koerakenteen luonnonkiviainesten rakeisuudet	77

LYHENTEET JA TERMIT

γ	Tilavuuspaino, kN/m^3
γ_d	Kuivatilavuuspaino, kN/m^3
$\gamma_{d,max}$	Maksimikuivatilavuuspaino, kN/m^3
ρ	Irtotiheys, kg/m^3
ρ_d	Kuivairtotiheys, kg/m^3
$\rho_{d,max}$	Maksimikuivairtotiheys, kg/m^3
w	Vesipitoisuus, %
g	Putoamiskiihtyvyys, m/s^2
k	Vedenläpäisevyyskerroin
φ	Kitkakulma
c	Koheesio
k	Vedenläpäisevyyskerroin
SP	Routimiskerroin
E	Materiaalin E-Moduuliarvo

1 JOHDANTO

Suomessa pyritään muiden EU-maiden tavoin noudattamaan yhä paremmin kiertotaloustavoitteita, ja tämä koskee myös jätteiden materiaalihyötykäyttöä. Tämän opinnäytetyön ja toteutetun koerakenteen taustalla on idea lisäarvon tuottamisesta jätteenpoltossa syntyville pohjakuonille hyödyntämällä niitä maarakentamisessa. Kuonista suunnitelluilla maarakennustuotteilla on monia luonnonkiviaineksia muistuttavia teknisiä ominaisuuksia, ja niiden hyötykäyttäminen väylä- ja kenttärakenteissa kävisi useilla eri tavoilla yhteen kiertotalouden tavoitteiden kanssa. Kiertotaloudessa yhtenä ajatuksena on se, että materiaaleja kierrätetään ja uusiokäytetään sellaiseen tarkoitukseen, jossa niistä saadaan eniten hyötyä. Jätteenpolton pohjakuonia on Suomessa sijoitettu enimmäkseen kaatopaikkojen rakenteisiin ja valtateiden meluvalleihin, vaikka niillä voisi olla teknisien ominaisuuksiensa puolesta merkittäviä käyttömahdollisuuksia myös korkeatasoisemmassa maarakentamisessa. Niiden hyötykäyttö vähentäisi myös tarvetta neitseellisten kiviainesten louhintaan ja suojelisi siten luonnonvaroja.

Opinnäytetyössä tutkittiin jätteenpolton pohjakuonien mineraaliaineksista jalostettuja kiviainesten kaltaisia maarakennustuotteita. Tavoitteena oli tutkia kuonien rakennettavuutta ja soveltuvuutta tien alempien rakennekerrosten materiaaliksi, testata rakentamiseen sopivia mittaus- ja laaduntarkkailumenetelmiä sekä tuottaa laboratoriotutkimuksilla ja kenttämittauksilla tietoa kuonatuotteiden teknisistä ominaisuuksista. Rakentamisen yhteydessä tuotettiin myös dataa mahdollisesti myöhemmin haettavaa Väyläviraston yleistä materiaalihyväksyntää varten. Pitkän tähtäimen tavoitteena työn toimeksiantajalla Fortum Waste Solutions Oy:llä on saada tuotteistettua jätteenpolton pohjakuonasta jalostetut maarakennustuotteet siten, että niitä voitaisiin hyödyntää maarakentamisessa laajemmassa mittakaavassa.

Opinnäytetyön tarkoitus oli koerakenneprojektin raportointi, esittäen kootusti rakentamista ennen toteutetut laboratoriotutkimukset sekä rakentamisen aikana tehdyt tutkimukset ja mittaukset. Työssä on myös esitelty rakentamisen jälkeen tehtävä tarkkailu ja mittausmenetelmät, rajaten pois näiden tulosten raportointi. Työn teoriaosuus rajattiin koskemaan jätteenpoltossa syntyvän pohjakuonan

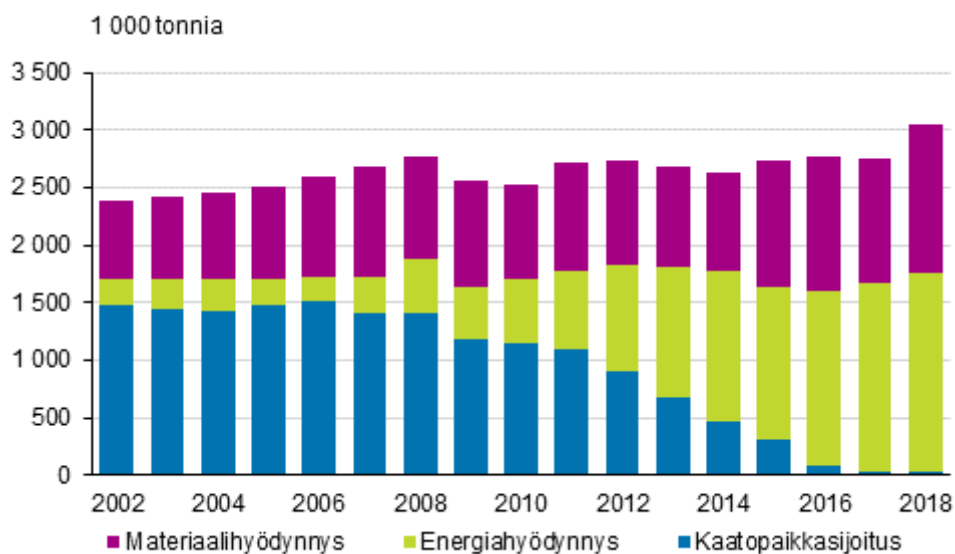
tekniisiä ominaisuuksia, jättäen ympäristökelpoisuuteen liittyvien asioiden sekä ilmoitus- ja lupa-asioiden tarkastelun pois työstä.

2 YLEISTÄ

2.1 Jätteenpolitto Suomessa

Tilastokeskuksen jätetilaston mukaan yhdyskuntajätteen kokonaismäärä Suomessa oli vuonna 2018 noin kolme miljoonaa tonnia, josta energiana polttamalla hyödynnettiin noin 57 % (Tilastokeskus: Jätetilasto, 2018). Suomessa poltetaan myös muita jätelaatujia, mutta tässä työssä keskitytään yhdyskuntajätteen ja siitä syntyvään pohjakuonaan.

Jätteenpolton yleistyminen on ollut voimakasta ja nopeaa, ja se on syrjäyttänyt viime vuosikymmenen aikana kaatopaikkasijoituksen yhdyskuntajätteen loppukäsittelymuotona. Poltettavan jätteen määrä on kasvanut osaltaan vuonna 2016 voimaan tulleen orgaanisen jätteen kaatopaikkakiellon ansiosta (Tilastokeskus: Jätetilasto, 2018). Kuviossa 1. on esitetty yhdyskuntajätteen määrän ja käsittelytapojen kehitystä Suomessa vuosina 2002-2018.



KUVIO 1. Yhdyskuntajätteet käsittelytavoittain Suomessa vuosina 2002-2018. (Tilastokeskus: Jätetilasto, 2018)

Jätteestä saadaan poltettaessa energiaa, jota hyödynnetään yleisesti sähkönä ja kaukolämpönä. Polttaminen myös pienentää jätteen määrää. Polttamisesta jää kuitenkin jäljelle pohjakuonaa, yleisesti noin 20-30 % voimalassa hyödynnetyn jätteen massasta (Kaartinen, Laine-Ylijoki & Wahlström, 2007). Syntyvä

kuonan määrä on Suomessa arviolta noin 300 000 tonnia vuosittain (Ympäristöministeriö: Kohti kierrätysyhteiskuntaa, 2008).

Jätteenpolttoa valvovat Suomessa ELY-keskukset, ja toimintaa ohjaa ympäristönsuojelulaki. Polttolaitokset eritellään ympäristönsuojelulaissa (527/2014) kahden luokkaan: jätteenpolttolaitoksiin ja rinnakkaispolttolaitoksiin. Lain mukaan jätteenpolttolaitoksella tarkoitetaan ”yksikköä, joka on tarkoitettu jätteiden lämpökäsittelyyn, riippumatta siitä, hyödynnetäänkö poltossa syntyvä lämpö vai ei” ja rinnakkaispolttolaitoksella ”yksikköä, jonka pääasiallisena tarkoituksena on tuottaa energiaa tai aineellisia tuotteita ja jossa käytetään jätettä vakinaisena tai lisäpolttoaineena”. (527/2014)

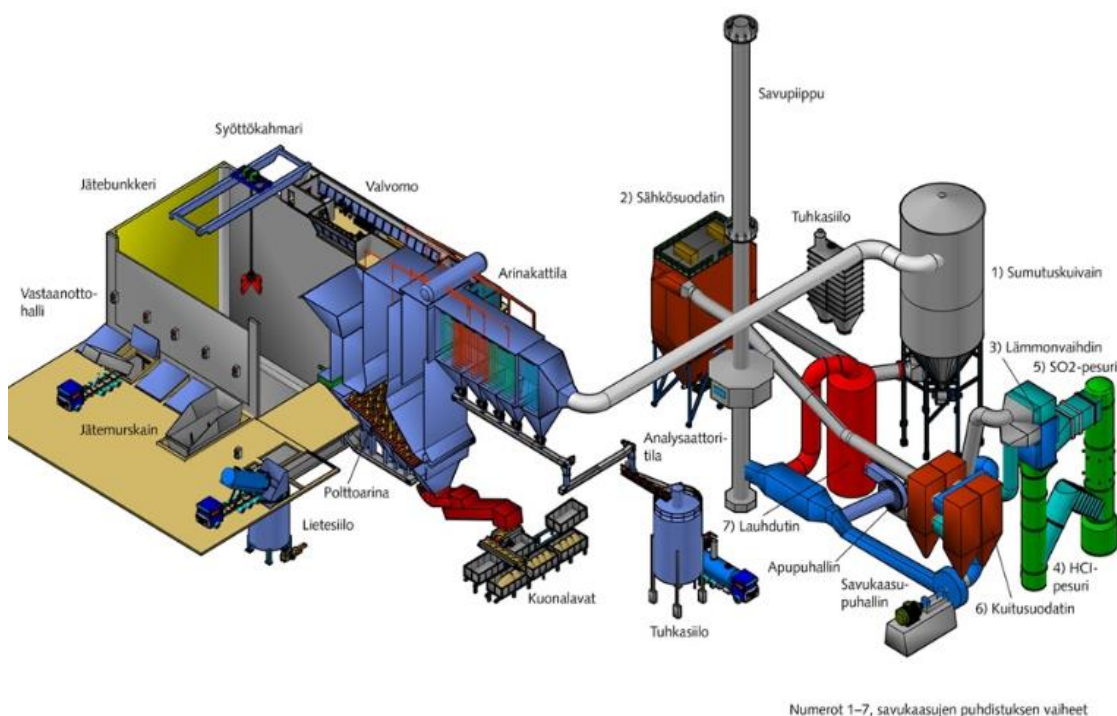
Suomessa toimii yhdeksän yhdyskuntajätteen polttolaitosta, joiden yhdistetty jätteenpolttokapasiteetti vuodessa on Suomen Kiertovoima ry:n mukaan yhteensä 1,7 miljoonaa tonnia (KIVO, 2017). Lisäksi vuonna 2021 Saloon on valmistumassa uusi Korvenmäen ekovoimalaitos, jonka ympäristöluvan mukainen polttokapasiteetti on 120 000 tonnia vuodessa (Lounavoima). Kaikki Suomen jättevoimalaitokset Lahden ja Leppävirran laitoksia lukuun ottamatta ovat arinapolttolaitoksia (KIVO, 2017). Tässä työssä käsitellään vain arinapolttotekniikalla syntyviä pohjakuonia, sillä muilla tekniikoilla syntyvän kuonan ominaisuudet ja käsittely poikkeavat arinapolttetusta. Arinapolttotekniikka on yleisin polttotekniikka myös muualla Euroopassa, joten siitä syntyviä kuonia on määrällisesti merkittävästi enemmän. Vuonna 2017 EU:n alueella syntyi noin 19 miljoonaa tonnia jätteenpolton pohjakuonia (CEWEP, 2019).

2.2 Polttoprosessi ja pohjakuonan muodostuminen

Arinapolttotekniikkaa käytettäessä ei ole yleensä tarpeen esikäsitellä jätettä, vaan erittäin suurien kappaleiden rikkominen tai poistaminen riittävät. Lisäksi tekniikka mahdollistaa jätteen laadunvaihtelun polttoprosessin häiriintymättä, joten se sopii hyvin yhdyskuntajätteen polttoon. (Ramboll Finland Oy, 2008).

Fortumin Riihimäen laitosalueella on kolme termisen käsittelyn polttolaitosta, joista yksi on vaarallisen jätteen käsittelyyn tarkoitettu rumpu-uunitekniikalla toimiva korkealämpötilapolttolaitos, ja kahdessa poltetaan arinatekniikalla syntyä paikkalajiteltua yhdyskuntajätettä ja erilaisia teollisuusjätteitä (Fortum).

Riihimäen Voimala 1 on otettu käyttöön vuonna 2007 ja Voimala 2 vuonna 2012. Kuvassa 1. on esitetty jätteenpolton prosessin osat Riihimäen Voimala 1:ssä. (Fortum)



KUVA 1. Fortum Riihimäen Voimala 1:n jätteenpoltojärjestelmä. (Fortum)

Jätteet puretaan syöttöbunkkeriin, jossa ne sekoitetaan tasalaatuisiksi ja siirretään kahmarilla tulipesään. Porrasarinalla jäte kuivuu, syttyy palamaan ja palaa voimakkaasti, minkä jälkeen palamaton aines putoaa vedellä täytettyyn sammuusaltaaseen. Voimala 1:n arina on 64 m² suuruinen ja polttoaineteho on 55 MW.

Savukaasunpuhdistuksen osia ovat sumutuskuivain, sähkösuodatin, lämmönvaihdin, suolahappo- ja rikkioksidipesurit, kuitusuodatin sekä savukaasun lauhdutin. Puhdistuksessa käytetään erilaisia kemikaaleja kuten sammutettua kalkkia ja aktiivihiliä. Aktiivihili pidättää elohopeaa ja dioksiineja, ja kuitusuodattimessa poistuvat pölymäisen kalkin kanssa reagoineet haitalliset aineet. Savukaasupuhaltimen jälkeen piipun alaosassa sijaitseva märkäpesuri varmistaa puhdistustuloksen. (Fortum)

Savukaasujen puhdistuksessa syntyvät jätteet kuten lentotuhka ja APC-jätteet luokitellaan pääsääntöisesti vaaralliseksi jätteeksi, koska ne sisältävät kriittisiä liukoisia aineita kuten arseenia, elohopeaa, lyijyä tai suoloja. Lentotuhka voidaan yleensä sijoittaa esikäsittelyn jälkeen vaarallisen jätteen kaatopaikalle. (JLY – Jätelaitosyhdistys ry.) Tässä työssä nämä poltosta syntyvät jätteet on rajattu tarkastelun ulkopuolelle.

Polton lopputuotteena jäävä palamaton materiaali on jätteenpolton pohjakuonaa, joka koostuu suurimmaksi osaksi mineraaleista, rautapitoisista metalleista, rautaa sisältämättömistä metalleista, ja palamattomasta orgaanisesta materiaalista. Noin 80-85 p-% pohjakuonasta on mineraaleja (lasi, keramiikka, kivi tiili, betoni, tuhka, sulamistuotteet), 10-12 p-% rautapitoisia metalleja ja 2-5 p-% rautaa sisältämättömiä metalleja (CEWEP, 2019). Poltto-olosuhteilla sekä polttoon syötettävän jätteen koostumuksella on suuri vaikutus jäljelle jäävän kuonan ominaisuuksiin ja koostumukseen, minkä vuoksi eri ainesosien pitoisuuksissa voi olla vaihtelua.

3 JÄTTEENPOLTON POHJAKUONA MAARAKENNUKSESSA

Jätteenpolton pohjakuonien hyötykäyttöä on pyritty edistämään Suomessa lain-säädännöllä. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa määritellyissä kohteissa, eli uusittu MARA-asetus (843/2017), astui voimaan vuoden 2018 alussa. Käsitelty jätteenpolton pohjakuona sisällytettiin uudistuksessa ko. asetuksen säädelyihin jätelaatuihin. Sen käyttöön maarakentamisessa ei ole asetuksen voimaantulon jälkeen tarvinnut enää hakea ympäristönsuojelulain (527/2014) mukaista ympäristölupaa, mikäli kuonatuote ja rakennuskohde täyttävät MARA-asetuksen (843/2017) mukaiset ehdot. Kevyempi ilmoitusmenettely helpottaa kuonatuotteiden hyödyntämistä maarakennuskohteissa. Asetus sisältää kuitenkin vaatimuksia muun muassa jätteen hyödyntämispaikalle, rakennepaksuudelle- ja tyypille. Lisäksi jätteen tuottajan vastuulla on osoittaa materiaalin ympäristökelpoisuus ja tekniset ominaisuudet MARA-asetuksen (843/2017) 4 §:ssä määriteltyjen vaatimusten mukaan.

3.1 Kuonan käsittely maarakennustuotteeksi

Tässä työssä kuvailtu Fortumin pohjakuonan käsittelyprosessi tähtää siihen, että kuonasta saataisiin eroteltua metallit mahdollisimman tarkasti, ja lisäksi jalostettua maarakennuskäyttöön soveltuvia materiaaleja. Muita erilaisia pohjakuonan jalostusmenetelmiä on kuvailtu esimerkiksi VTT:n tiedotteessa: Pohjakuonan jalostus uusiomateriaaliksi (Kaartinen ym., 2011).

Poltosta tuleva raakakuona on pääosin harmaanruskeaa, hiekaista soraa muistuttavaa ainesta, josta voidaan kuitenkin selkeästi silmämääräisesti erottaa seassa olevia metallikappaleita. Raakakuonan sisältämien kappaleiden raekoot jakautuvat laajalle alueelle (Kaartinen ym., 2011). Käsittely maarakennukseen sopivaksi aggregaatiksi perustuu siihen, että metallit erotellaan mekaanisesti mineraalimassasta, ja mineraaliaines jaotellaan eri rakeisuuksien mukaan. Fortumin käsittelyprosessissa syntyvät mineraalijakeet ovat noin 0-2 mm, 2-6 mm, 6-16 mm ja 16-45 mm. Näistä mineraalijakeista suhteuttamalla saadaan eri käyttötarkoituksiin soveltuvia maarakennustuotteita. Kuonasta erotellut metallit toimitetaan edelleen jatkojalostukseen.

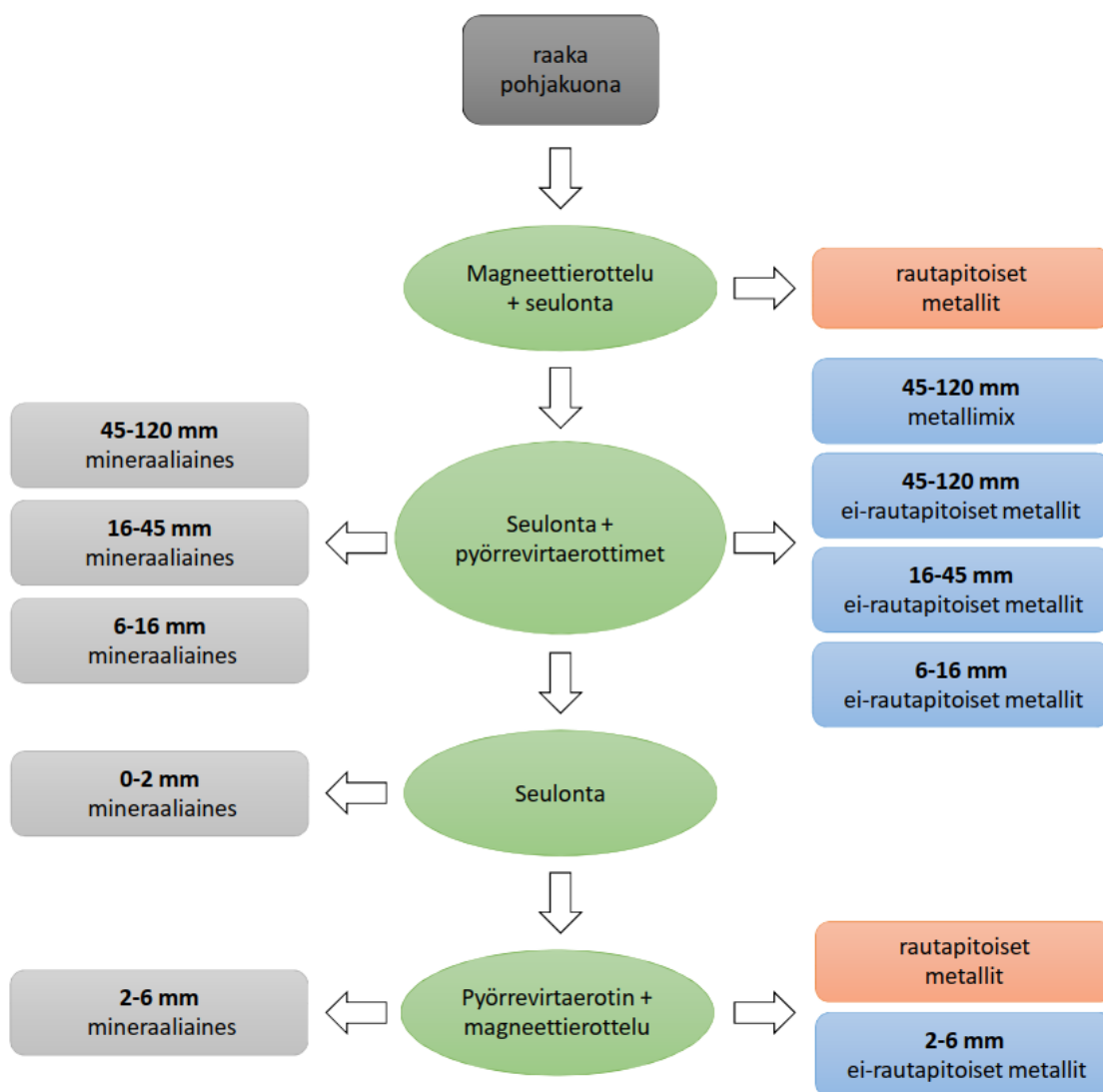
Kuonan käsittelylaitos Riihimäellä koostuu syöttösuppilosta, erilaisista kuljettimista sekä käsittelylaitteistoista. Keskeisimmät prosessit ovat seulonta, rautapitoisten metallien erotus magneettierottimilla sekä ei-rautapitoisten metallien erotus Eddy Current -pyörrevirtaerottimilla. Kuvassa 2. on esitetty pohjakuonien käsittelylaitos Riihimäen laitosalueella ja kuviossa 2. yksinkertaistettu käsittelyprosessi.



KUVA 2. Kuonan käsittelylaitos Fortumin Riihimäen laitosalueella. (Fortum)

Pohjakuonasta erotellaan rautapitoisia metallipartikkeleita magneettierottimella. Kuljetinhihna siirtää kuonan magneettierottimelle, jossa voimakas magneetti erottaa rautapitoiset metallit muusta aineksesta omaan kasaansa. Jäljelle jäävä aines siirtyy kuljettimella seuraavaan käsittelyvaiheeseen.

Kuonasta erotellaan ei-magneettiset metallit pyörrevirtaerottimella, jonka toiminta perustuu roottorin pinnalla pyöriviin erinapaisiin magneetteihin, jotka synnyttävät voimakkaan vaihtuvan magneettikentän. Magneettikenttä aiheuttaa sähköä johtavissa kappaleissa pyörrevirtoja, jotka kehittävät kappaleille oman vastakkaisen magneettikentän ja alkavat hylkimään roottoria. Roottoria hylkivät kappaleet lentävät kuljettimelta mineraaliainesta pidemmälle ja siten erottuvat muusta aineksesta. (Bunge, 2017)



KUVIO 2. Pohjakuonien käsittelyprosessi Fortumilla.

3.2 Hyödyntäminen ja käyttökohteet

Jätteenpolton pohjakuonaa on onnistuneesti hyödynnetty Euroopassa erilaisissa maarakennuskohteissa viime vuosikymmeninä. Prosessoituna sitä voidaan käyttää korvaamaan hiekkaa, soraa ja mursketta erilaisissa käyttökohteissa. Kuonan hyötykäyttäjämaita ovat Suomen lisäksi esimerkiksi Alankomaat ja Tanska, joissa lähes 100% kuonasta hyödynnetään maarakentamisessa tai betoniteollisuuden tuotteissa (Blasenbauer ym., 2020). Tutkimusta kuonan soveltuvuudesta eri maarakennuskohteisiin on tehty myös Aasiassa. (Seraj ym., 2017.)

Tyypillisimpiä käyttökohteita maarakentamisessa ovat olleet erilaiset täytöt, kuten meluvallit ja maisemointitäytöt. Myös kaatopaikkojen peittorakenteissa pohjakuonaa on käytetty useissa eri maissa. (Kaartinen ym., 2011.) Näitä kohteita yhdistää se, että käytettävälle materiaalille ei ole tarve asettaa niin suuria teknisiä vaatimuksia kuin esimerkiksi väylärakenteissa. Käyttöä kaatopaikkarakenteissa on edesauttanut myös se, että ympäristölupia uusiomateriaalin käyttöön on ollut helpompi saada näille alueille.

Potentiaalisia käyttökohteita pohjakuonalle ovat myös erilaisten liikenneväylien, pysäköintialueiden ja kenttärakenteiden päällysrakenteet. Näissä kuonamateriaalien käyttö on rajoitettu enimmäkseen alempiin rakennekerrokseen (suodatin- ja/tai jakava kerros), sillä materiaalilla on taipumus hienonemiseen rasituksessa (Sormunen, 2017). Tanskassa pohjakuonaa on testattu onnistuneesti myös kantavan kerroksen rakentamisessa suoraan asfalttikerroksen alla (Kallesøe, Dyhr-Jensen, 2018). Huomioitavaa kuitenkin on, että Tanskassa käytetyt päällystekerrokset ovat melko paksuja Suomeen verrattuna.

Maarakennuksen ohella kuonalla on myös muita tutkittuja käyttökohteita. Betonin valmistuksessa pohjakuonaa on mahdollista käyttää aggregaattina, korvaten osan tarvittavista luonnonkiviaineksista. Myös pohjakuonan käyttöä sementin korvaajana on tutkittu, sillä se sisältää joitakin samoja kemiallisia komponentteja kuin sementti. Käyttöä lasi- ja keramiikkatuotteiden ainesosana on myös tutkittu. (Seraj, S. ym. 2017.)

3.3 Tekniset ja mekaaniset ominaisuudet

Tutkimusten perusteella pohjakuonan tekniset ja mekaaniset ominaisuudet poikkeavat jonkin verran luonnonkivimateriaalien ominaisuuksista. Pohjakuona on melko huokoista ja kevyttä materiaalia, jolla on suuri ominaispinta-ala (Kaartinen ym., 2011). Keskeisiä tutkittavia ominaisuuksia ovat optimivesipitoisuus, tiivistyvyys ja maksimitilavuuspaino, vedenläpäisevyys, hienoneminen, E-moduuliarvot sekä lämmönjohtavuus. Pohjakuonatuotteiden tekniset ominaisuudet riippuvat luonnonkiviainesten tapaan mineraalijakeen raakoosta.

Kuonatuotteiden laboratorio- ja kenttätutkimuksissa on huomioitava se, että koheet on alun perin suunniteltu luonnonkiviaineksille tai murskatuille kiviaineksille. Tämä täytyy pitää mielessä tuloksia arvioitaessa ja verrattaessa niitä luonnon- ja murskattujen kiviainesten vastaaviin tuloksiin. On myös huomioitava, että kuonatuotteiden ominaisuudet vaihtelevat polttolaitoksesta ja polton jälkeisestä käsittelyprosessista riippuen, joten eri laitokset eivät tuota ominaisuuksiltaan täysin samanlaisia materiaaleja.

Kuonatuotteet ovat jonkin verran luonnonkiviaineksia kevyempiä. Eräässä tutkimuksessa suodatinkerroksen kuonalle saatiin maksimikuivatilavuuspainoksi $14,7 \text{ kN/m}^3$ ja jakavan kerroksen kuonalle noin $17,2 \text{ kN/m}^3$ (Sormunen, 2017). Luonnonkiviaineksilla maksimikuivatilavuuspaino on noin $20 \dots 22 \text{ kN/m}^3$ (InfraRYL).

Pohjakuonatuotteiden optimivesipitoisuus on suurempi kuin vastaavan rakeisuuden luonnonkiviaineksilla. Optimivesipitoisuus suodatinkerroksen kuonamateriaaleille eräässä tutkimuksessa oli noin 27 % ja jakavan kerroksen materiaalille noin 17,5 % (Sormunen, 2017), kun taas hiekalle optimivesipitoisuus on noin 7 % ja soralle noin 10 % (InfraRYL). Vesipitoisuus vaikuttaa materiaalin tiivistymiseen työmaalla. Mikäli vesipitoisuus on optimivesipitoisuutta alhaisempi, materiaali ei tiivisty kunnolla. On havaittu myös, että liian korkea vesipitoisuus aiheuttaa kuonan pehmenemistä, joten on kiinnitettävä huomiota myös siihen, ettei optimivesipitoisuutta merkittävästi ylitetä. (Sormunen, 2017)

Pohjakuonan on todettu tutkimuksissa olevan altis hienontumiselle kuormituksen alaisena, minkä vuoksi sitä ei suositella käytettäväksi kantavassa kerroksessa sellaisenaan (Sormunen, 2017). Hienonemista tutkittiin tässä työssä sekä materiaalinäytteillä rakentamisen aikana tiivistettäessä, että rakenteeseen jätetyillä hienonemissäkeillä, joiden sisältöä analysoidaan muutaman vuoden kuluttua rakentamisesta. Los Angeles -testillä kuonalle on saatu arvoja 40-60 % (Kaartinen ym., 2011). InfraRYL 2020/1 kohdan 21310.1 mukaan kantavan kerroksen luonnonkiviaineksille tai kalliomurskeille Los Angeles -luku saa olla enintään 30 (luokka LA_{30}), mutta hankekohtaisesti tilaaja voi myös hyväksyä luokat LA_{33} ja LA_{40} . Uusiomateriaaleille ei ole toistaiseksi InfraRYL mukaista vaatimusta, mutta LA-luku pitää niidenkin osalta ilmoittaa.

Kuonamateriaalien routivuus on moniulotteinen asia, ja routivuusominaisuudet kiinnostavat erityisesti kausittaisen roudan esiintymisalueella olevissa maissa. Routivuuteen vaikuttavat materiaalin rakeisuus sekä muut materiaaliominaisuudet kuten lämmönjohtavuus ja vedenläpäisevyys. Käytössä olevat laboratoriotutkimusmenetelmät ja ohjeet routivuuden määrittämiseksi on kehitetty luonnonkiviaineiksille, joten suoria johtopäätöksiä kuonatuotteiden routivuudelle ei voida niiden perusteella tehdä. Liettualaisessa tutkimuksessa pohjakuona ei täyttänyt suodatinkerrokselle (Liettuassa 'pakkasenkestävä kerros') asetettuja pakkasenkestävyysvaatimuksia, mutta tutkimuksessa todettiin, että hyvän vedenläpäisykyvyn takia kuonan käyttömahdollisuuksia kannattaisi kuitenkin harkita ja tutkia lisää kenttätutkimuksilla (Vaitkus ym., 2017).

Tässä työssä tutkittujen kuonatuotteiden teknisiä ominaisuuksia on esitelty tarkemmin kappaleissa 4.2 sekä 6.2.

4 LABORATORIOTUTKIMUKSET ENNEN RAKENTAMISTA

Fortum teetti Tampereen yliopiston tutkimuskeskus Terran (entinen Maa-, pohja- ja ratarakenteiden yksikkö) Geolaboratoriossa (GEOLA) kokeita koerakenteessa käytettäville kuonatuotteille. Tutkimustuloksia käytettiin myös kuonatuotteiden CE-merkinnässä. Näytteet toimitettiin Tampereen yliopistolle 28.1.2020, ja testit toteutettiin 4.2. - 14.9.2020 välisenä aikana.

Testatut tuotteet suhteutettiin jalostuksen yhteydessä syntyvistä mineraalijakeista koerakenteessa käytettäviin jakeisiin 0/2 mm, 0/16 mm ja 0/32 mm Fortumin Kuulojan käsittelykeskuksessa ennen laboratorioon lähettämistä. Näytteenotto kuonatuotteista tehtiin Fortumin toimesta, ja näytteitä esikäsiteltiin Tampereen yliopistolla jakamalla toimitetuista tuotteista testinäytteet eri määrityksiä varten. Kokeita tehtiin kuonatuotteiden mekaanisten ominaisuuksien sekä ympäristökelpoisuuden selvittämiseksi.

4.1 Testausmenetelmät

Jokaisesta käytettävästä kuonajakeesta tehtiin kolme rinnakkaista rakeisuustutkimusta pesuseulonnalla standardien SFS-EN 933-1:2012 ja SFS-EN 933-10 mukaisesti. Hienorakeisimman 0/2mm jakeen hienoaineksen (<0,02 mm) raekokajakauma määritettiin hydrometrikokeella standardin SFS-EN ISO 17892-4:2016 (PANK 2103) mukaisesti ja hydrometrikoenäytteelle tehtiin pieni pesuseulonta.

Kiintotiheys ja vedenimeytyminen määritettiin standardin SFS-EN 1097-6:2014 kohtien 8 ja 9 mukaisesti. Vesiliukoiset sulfaatit määritettiin standardin SFS-EN 12457-2 mukaisella 1-vaiheisella ravistelutestillä L/S suhteella 10. Kokonaisrikkipitoisuus määritettiin ALS Finland Oy:ssä standardin ISO 11885:2009 mukaisesti. Hehkutushäviö määritettiin menetelmän SFS-EN 1744-7 mukaisesti. Radioaktiivisuus ja aktiivisuusindeksit määritettiin STUK:ssa.

Jakeille 0/16 mm sekä 0/32 mm määritettiin metallipitoisuus standardin SFS-EN 1744-8 mukaan ja uusiokiviaineksen luokittelutesti standardin SFS-EN 933-11

mukaan kuitenkin niin, että betonituotteiden (R_c), luonnonkiviaineksen (R_u) ja bitumisten materiaalien (R_a) osuutta ei määritelty niiden silmämäärin olemattomaksi havaitun määrän vuoksi.

Karkearakeisimmalle 0/32 mm jakeelle määritettiin jäädytys-sulatuskestävyys standardin SFS-EN 1367-1:2008 mukaisesti

Proctor-kokeet kuonajakeille tehtiin maksimikuivatilavuuspainon sekä optimivesipitoisuuden selvittämiseksi. Mittaukset toteutettiin viidellä eri vesipitoisuudella. Proctor-kokeet suoritettiin sekä TAY:n geolaboratoriossa että Fortumin omassa maalaboratoriossa.

Alle 16 mm jakeille tehtiin vertailun vuoksi kokeet myös ICT-kiertotiivistyslaitteella samoilla massoilla ja samoissa vesipitoisuuksissa kuin Proctor -kokeessa. Kiertotiivistyslaitteella käytettiin kahta työmäärää, 2 bar/40 kierrosta ja 3 bar/120 kierrosta.

Kuonatuotteiden ympäristökelpoisuus määritettiin MARA-asetuksessa (843/2017) vaaditun kaksivaiheisen ravistelutestin mukaisesti standardia SFS-EN 12457-3 noudattaen. Määritykset tehtiin Fortumin kemian laboratoriossa.

Vedenläpäisevyyskoe tehtiin jäykkäseinämaisessä sellissä vakiopainemenetelmällä. Vedenimeytymiskorkeus määritettiin standardia SFS-EN 1097-10:2014 mukailleen.

Vedenimeytyskorkeuden määrittäminen tehtiin niin sanotulla suoralla menetelmällä läpinäkyvissä, noin 1 m mittaisissa akryyliputkissa. Putkien sisähalkaisija oli 0/2 mm kuonalle 56-64 mm, 0/16 mm kuonalle 100 mm ja 0/32 mm kuonalle 214 mm. Alun perin melko kosteita kuonanäytteitä ilmakeivattiin ensin pienempään kosteuteen, jossa näytteet tehtiin eri tiiviyksiin. Kokeen alussa putken alapää upotettiin 5cm syvyyteen vesijohtovettä ja veden kapillaarista nousua seurattiin mittamalla selvästi näkyvän, tummemmaksi kastuneen rajapinnan etäisyyttä vapaasta vedenpinnasta.

Lämmönjohtavuus määritettiin jakeille 0/2 mm ja 0/16 mm lämpösauvamenetelmällä käyttämällä Huksefluxin TP02 lämmönjohtosondia. Näytteet rakennettiin kerroksittain tiivistämällä metallisylinteriin lähellä optimivesipitoisuutta. Tiivistämisessä pyrittiin 86 % suhteelliseen tiiviyteen määritetystä maksimikuivatilavuuspainosta. Kyllästettyyn näytteeseen lisättiin vettä tiivistämisen jälkeen niin paljon, että vesi nousi näytteen pinnan tasolle, jonka jälkeen näytteen annettiin tekeytyä yön yli ennen mittauksia.

Syklinen kolmiaksaalikoe tehtiin Tampereen yliopiston Maa-, pohja- ja ratarakenteet (MPR) yksikön kehittämällä kuormituslaitteistolla. Kolmiaksaalikokeessa resilient-moduulien määrittäminen toteutettiin SFS-EN 13286-7:en 2004 Method B:n mukaisesti käyttämällä 0/16 mm ja 0/32 mm jakeissa alhaisen kuormitustason (low stress level) jännitystasojen määrittämiseksi. 0/2 mm jakeissa käytettiin low stress leveliä alhaisempia jännitystasojen, kuitenkin käyttäen kuormitussarjoissa paljon samoja jännitystasojen kuin alhaisen kuormitustason kuormitussarjassa. Syklisen kuormituksen jälkeen samalle näytteelle tehtiin kylästämättömänä moniportainen staattinen avoin kolmiaksaalikoe 20, 40, 70 ja 130 kPa:n sellipaineilla, joissa kullakin sellipaineella arvioitiin murron läheneminen ja kuormitus keskeytettiin ennen murtoa, lukuun ottamatta 130 kPa sellipaineen koekappaleita, joka kuormitettiin loppuun asti.

Koekappaleiden halkaisijat olivat 200 mm ja korkeudet noin 400 mm kokeiden alussa. Koekappaleet pyrittiin sullomaan tavoitetiiviyteen 86 % maksimikuivairto- tiheydestä ja tiivistysvesipitoisuuden ollessa lähellä optimivesipitoisuutta. Täryttimellä tiivistystyötä tehtiin 0/2 mm jakeella yhteensä 65 sekuntia, ja koekappale ei kahdessa viimeisessä kerroksessa tahtonut tiivistyä enempää tärytyksen jatkuessa. 0/32 mm jakeella täryttimellä tiivistystyötä tehtiin yhteensä 66 sekuntia, ja koekappale ei tahtonut viimeisessä kerroksessa tiivistyä enempää tärytyksen jatkuessa. 0/16 mm jakeella koekappale tiivistyi täryttimellä helposti, ja tiivistystyötä tehtiin yhteensä 15 sekuntia.

Resilient moduulimäärittämisessä esikuormituspulsseja ajettiin 0/2 mm jakeelle 1500 kpl, 0/16 mm jakeelle 2000 kpl ja 0/32 mm jakeelle 1000 kpl. Kaikkien koekappaleiden esikuormituksessa palautumattomat muodonmuutokset olivat pieniä ja ne stabiloituivat.

Kokeista määritettyjen resilient-moduulien perusteella sovitettiin k_1 ja k_2 arvot yhtälöön, jossa M on resilient-moduuli (kPa), θ on pääjännitysten summa (kPa), θ_0 on vertailulukku (100 kPa), k_1 on materiaaliparametri (moduuliluku) ja k_2 on materiaaliparametri (jännityseksponentti). Ensimmäistä eli 20 kPa:n sellipaineen pienimmällä kuormituspulssilla mitattua resilient-moduulia ei käytetty k_1 ja k_2 arvojen määrittämisessä.

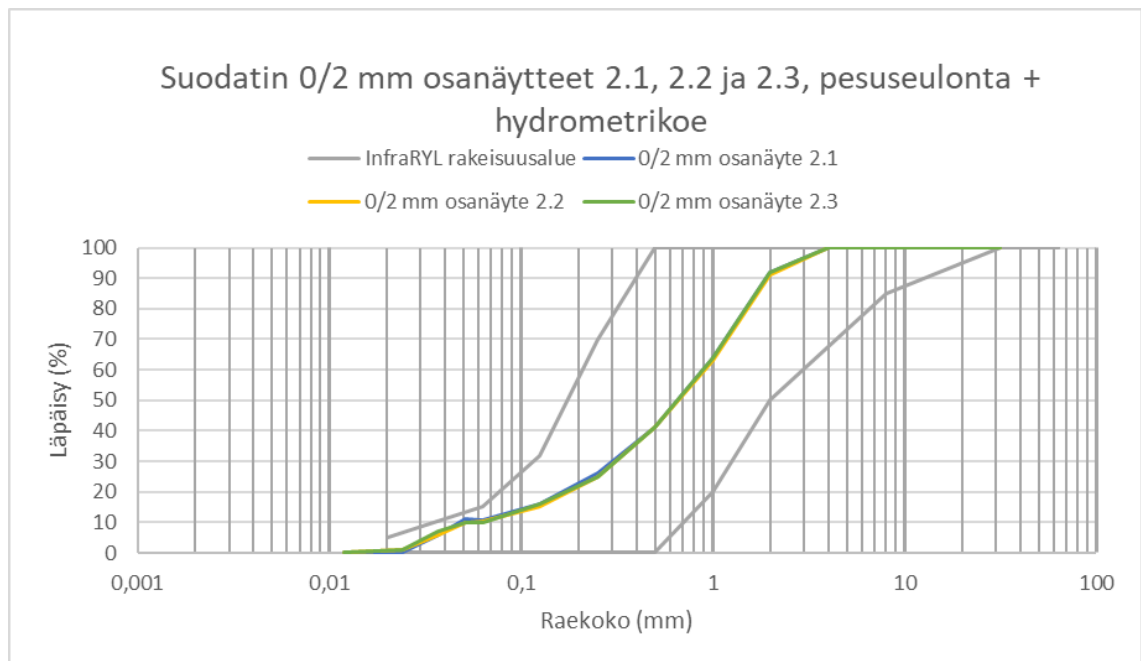
$$M = k_1 \theta_0 (\theta / \theta_0)^{k_2}$$

Routimiskerroin määritettiin GEOLA:n routanousukoelaitteistolla, jossa koekappale on viidestä renkaasta koostuvan muotin sisällä.

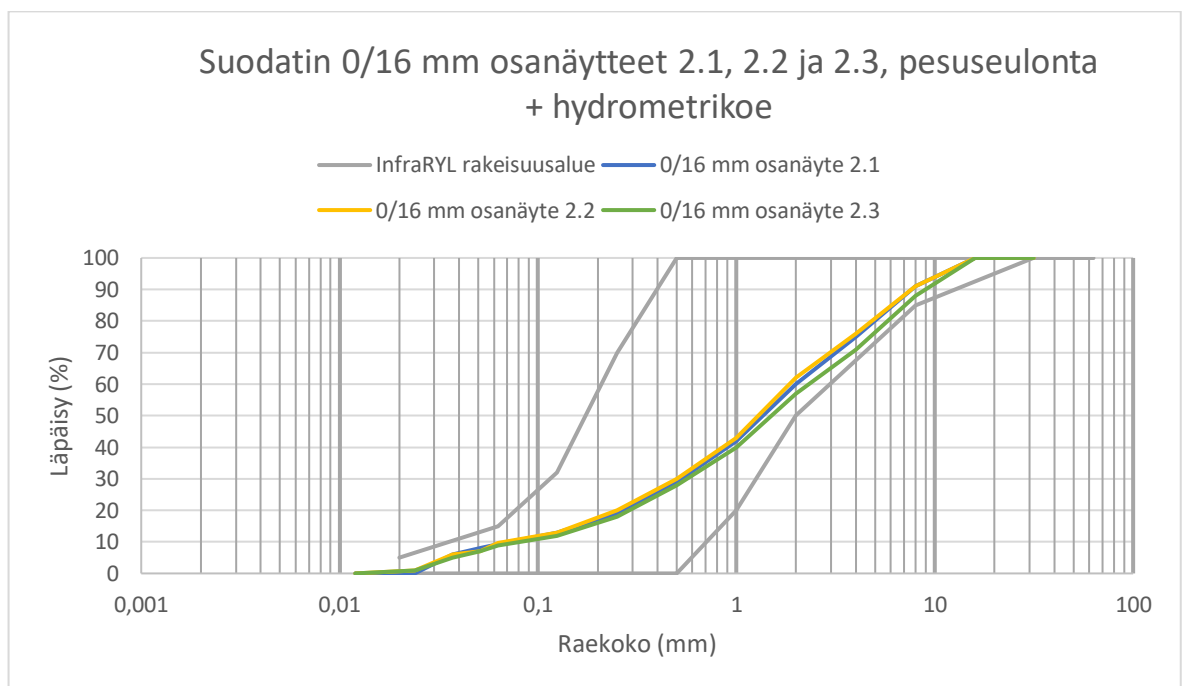
4.2 Testitulokset

Rakeisuus

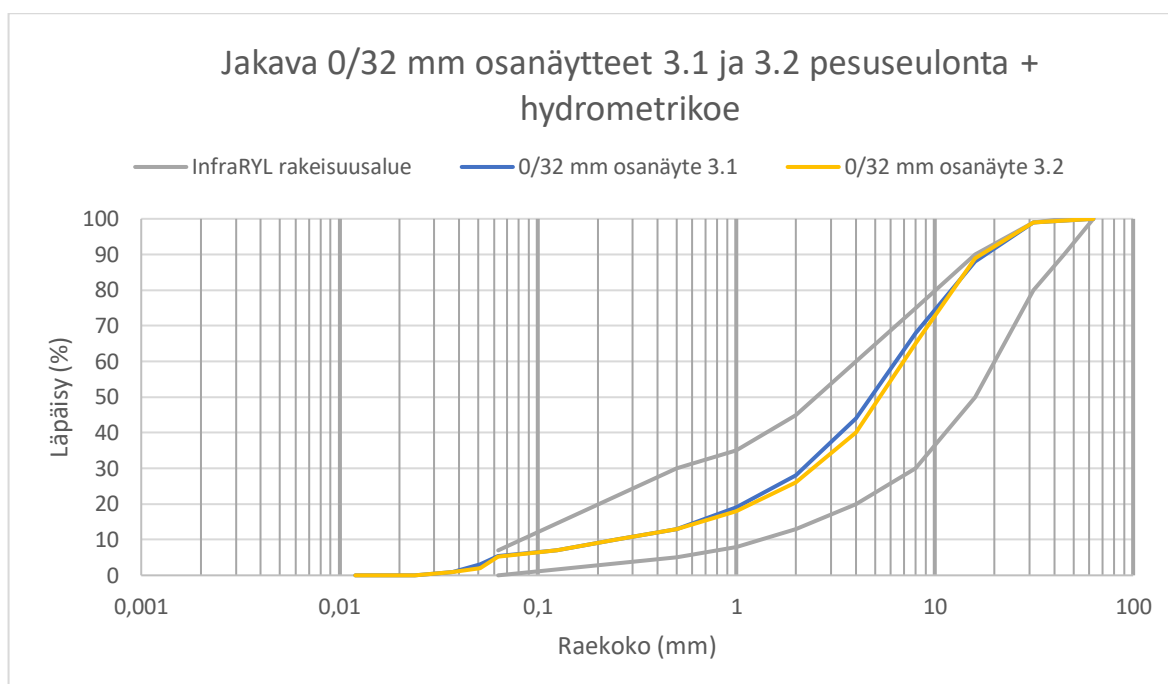
Kuvioissa 3, 4 ja 5 on esitetty kootusti jokaisen osanäytteen rakeisuuskäyrät lajikkeittain, sekä harmaalla InfraRYL 2010 kohtien 21110.1.1 ja 21210.1.2 vaatimusten mukainen rakeisuusalue suodatinkerroksen sekä jakavan kerroksen materiaaleille. Kuvaajista huomataan, että kuonatuotteiden rakeisuus pysyy vaatimusten mukaisella alueella. Tosin jakavan kerroksen 0-32 mm käyrät ovat yläpäästään aivan InfraRYL vaatimusten ylärajalla, seulan 31,5 mm läpäisyprosentin ollessa 99 %, joka on sama kuin InfraRYL suurin sallittu läpäisyprosentti.



KUVIO 3. 0/2 mm kuonajakeen rakeisuuskäyrä.



KUVIO 4. 0/16 mm kuonajakeen rakeisuuskäyrä.



KUVIO 5. 0/32 mm kuonajakeen rakeisuuskäyrä.

Taulukossa 1. on esitetty CE-merkintää varten tehtyjen laboratoriokokeiden tulokset.

Vedenimeytyminen

Vedenimeytyminen WA_{24} [%] kuvaa materiaalin vedenimukykyä. Testissä mitataan prosentteina näytteen massan lisäystä, joka aiheutuu veden tunkeutumisesta uunikuivatun kiviainenäytteen avoimiin huokosiin. Huokoisilla kiviainekilla, joihin vertautuvaksi pohjakuona voidaan ominaisuuksiensa perusteella lukea, vedenimukyvyn arvot riippuvat suuresti raekoosta. (SFS-EN 1097-6.) Taulukosta 1. huomataan, että hienorakeisimmalla 0-2 mm jakeella vedenimukyky WA_{24} on melkein kaksinkertainen karkeampiin kuonajakeisiin verrattuna. InfraRYL liitteessä T17 (2017) on sitomattoman jakavan ja suodatinkerroksen luonnonkiviaineksille esitetty vaatimukseksi $WA_{24} < 1$ %. Betonimurskeille vedenimeytymistesti ei InfraRYL liitteen T18 mukaan sovellu, eikä niille ole määritetty raja-arvoa. Luonnonkiviainesten ja kalliomurskeiden vedenimukyky on merkittävästi kuonatuotteita alhaisempi. Liikenneviraston Väylärakenteiden valtakunnallisessa kiviainestutkimuksessa on kenttätutkimuksissa SrM 0-32 mm jakeelle saatu arvoja $WA_{24} = 0,29...0,52$ % ja KaM 0-32 mm jakeelle $WA_{24} = 0,12...0,17$ % (LIVI 18/2016). ASM Kiviainespalvelu Oy:n kiviainesten CE-merkinnöissä

KaM 0-6 mm ja 0-16 mm jakeille on ilmoitettu arvo $WA_{24} = 0,4 \%$ (ASM Kiviainespalvelu Oy, 2017). Korkea vedenimukyky voi heikentää materiaalien routivuusominaisuuksia, mutta pelkästään tämän ominaisuuden perusteella ei voida todeta onko materiaali routivaa vai ei, vaan routivuuden selvittämiseksi tarvitaan lisätutkimuksia. Luonnonkiviaineksille kehitetty tutkimusmenetelmä ei myöskään välttämättä sovellu sellaisenaan kuonamateriaalien tutkimiseen, kuten se ei sovellu esimerkiksi betonimurskeiden tutkimiseen.

Kiintotiheys

Kiintotiheys [Mg/m^3] lasketaan kiintoaineksen massan suhteesta kiintoaineksen tilavuuteen. Materiaalin kiintotiheys on vedenimukyvyn tavoin riippuvainen testatun lajikkeen raekoosta. Kiintotiheydestä on ilmoitettu kolme eri arvoa: ρ_a kuvaa näennäistä kiintotiheyttä, ρ_{rd} kiintotiheyttä uunikuivattuna ja ρ_{ssd} kiintotiheyttä kyllästettynä ja pintakuivattuna. Kaksi yleisimmin käytettyä parametria ovat uunikuivattu kiintotiheys sekä kyllästetty ja pintakuivattu kiintotiheys. Näennäinen kiintotiheys on harvinaisemmin käytetty, ja tarkoittaa kuivatun näytteen massan suhdetta sen syrjäyttämän vesimäärän massaan sisältäen suljetut huokokset muttei avoimia huokosia. Kuonajakeiden kiintotiheydet olivat kokeissa hie-man matalampia kuin luonnonkiviaineksilla ja murskeilla (taulukko 1.). Liikenneviraston valtakunnallisessa kiviainestutkimuksessa oli SrM 0-32 mm kiintotiheydeksi saatu n. $2,7 Mg/m^3$ (Liikennevirasto, 18/2016).

Hehkutushäviö

Hehkutushäviö [%] edustaa näytteessä olevan kosteuden ja haihtuvien aineiden osuutta. Jätteenpolttoasetuksen (362/2003) mukaan jätteenpolton pohjakuonan hehkutushäviön on oltava alle viisi prosenttia aineksen kuivapainosta. Alle viiden prosentin tulokseen päästiin jokaisen testatun kuonajakeen kohdalla (taulukko 1.). Alhainen hehkutushäviö kuvaa osaltaan jätteen palamisen täydellisyyttä polttolaitoksessa.

Los Angeles -luku

Los Angeles kokeella määritellään materiaalin iskunkestävyyttä pyörittämällä testattavaa materiaalia ja teräskuulia teräsrummussa. Saatu tulos eli Los Angeles -luku kertoo prosentuaalisesti, kuinka paljon kiviaines on hienontunut. Jakan kerroksen luonnonkiviainekselle ei ole InfraRYL vaatimusta, ilmoitettu arvo riittää. Kantavalle kerrokselle vaatimus on LA_{30} . 0-32 mm kuonajakeelle saatiin Los Angeles -luvuksi 43. Pohjakuona on kuitenkin hienonemiselle altis materiaali, ja onkin huomioitava, että luonnonkiviaineksille suunniteltu iskunkestävyystesti on verrattain raju tällaisille materiaaleille, eikä se välttämättä ole tarkoituksenmukainen kuonatuotteiden tutkimiseen. Betonimurskeelle rakeisuudella 0-45 mm on saatu Väyläviraston tutkimuksessa LA -luvuksi 38...39, ja rakeisuuden 0-63 mm LA -luvuksi 37 (Väylävirasto, 13/2019).

Radioaktiivisuusindeksi

Radioaktiivisuusindeksi kuvaa rakennusmateriaaleista aiheutuvaa ulkoista gamma-säteilyä (STUK, 2010). Radioaktiivisuusindeksille määritettiin neljä eri arvoa kustakin kuonajakeesta. Säteilyturvakeskuksen ohjeessa 'Rakennusmateriaalien ja tuhkan radioaktiivisuus' on esitetty toimenpidearvot eri käyttötarkoituksiin käytettäville rakennusmateriaaleille. Toimenpidearvon ylittymistä arvioidaan radioaktiivisuusindeksin avulla. Aktiivisuusindeksi I_1 on tarkoitettu talonrakennustuotantoon käytettäville valmiille materiaaleille, I_2 katujen, teiden ja vastaavien rakentamiseen käytettäville materiaaleille, I_3 läjitettäville sekä maantäyttöön ja maisemanrakentamiseen käytettäville materiaaleille ja I_4 tuhkan käsittelyyn. Kaikissa neljässä luokassa pätee sama ohjeistus: mikäli aktiivisuusindeksi arvo on 1 tai pienempi, materiaalille ei aseteta radioaktiivisuuden vuoksi käyttörajotuksia. (STUK, 2010). Tehtyjen tutkimusten perusteella kaikki kuonajakeet alittavat osoitetun arvon kaikissa neljässä luokassa.

Uusiokiviaineksen luokittelu

Uusiokiviaineksen luokittelutestissä on kuusi eri luokkaa. Näistä betonituotteiden (Rc), luonnonkiviaineksen (Ru) ja bitumisten materiaalien (Ra) osuuksia ei määritetty niiden silmämääräisesti olemattomaksi havaitun määrän vuoksi. Poltetun tiilen (Rb), lasin (Rg) sekä muiden materiaalien (X) osuudet määritettiin. Muut materiaalit tässä tapauksessa sisältävät lähinnä sekalaisia metalleja, sillä muut luokkaan X kuuluvat materiaalit kuten puu, muovi ja kumi ovat palamisprosessissa palaneet. Annettu tulos kuvaa kyseisen materiaalin prosentuaalista osuutta näytteen massasta. Verrattuna betonimurskeille tehtyihin luokittelutesteihin, kuonatuotteissa korostuvat eri pitoisuudet. Betonimurskeille kirjassa Concrete Recycling (de Larrard, Colina, 2019) toteutetuissa luokittelutesteissä betonituotteiden (Rc) osuus on suuri, välillä $Rc = 65,5 \dots 94,9 \%$, kun kuonatuotteissa sitä ei ollut ollenkaan. Muiden materiaalien (X) ja lasin (Rg) osuus oli betonimurskeissä hyvin pieni, välillä $X = 0,01 \dots 0,02$ ja $Rg = 0 \dots 0,3$, ja poltetun tiilen (Rb) osuus melko samalla alueella kuin kuonissa, välillä $0,6 \dots 32,5$. Luonnonkiviainesta (Ru) ja bitumisia materiaaleja (Ra) esiintyi tutkituissa betonimurskeissa vaihdellen, $Ru = 0,03 \dots 32,5$ ja $Ra = 0,3 \dots 2,5$, ja kuonatuotteissa ei ollenkaan.

Jäädytys-sulatuskestävyys

Jäädytys-sulatuskestävyys täytyy InfraRYL:n mukaan testata jakavan ja kantavan kerroksen luonnonkiviaineksilta, mikäli niiden $WA_{24} > 1 \%$. Jäädytys-sulatuskestävyyden raja-arvoksi on tällöin annettu $\leq 4 \%$. Testattu 0-32 mm kuonajae ylittää InfraRYL vaatimuksen luonnonkiviaineksille (4,9...7,2 %). InfraRYL:ssä ohjeistetaan betonimurskeiden osalta, että jäädytys-sulatus testi ei sovellu betonimurskeen laadunarviointiin, sillä betonimurskeen pakkasenkestävyys perustuu routimattomuuteen ja puristuslujuuden kehitykseen. Vaikka kuonilla jäädytys-sulatuskestävyyden arvo on korkea, se ei välttämättä tarkoita sitä, että materiaali on routivaa, vaan lisätutkimusta tarvitaan erityisesti kenttäkokeilla.

TAULUKKO 1. Laboratoriokokeiden tutkimustuloksia

Ominaisuus		0/2 mm			0/16 mm				0/32 mm										
<i>Vedenimeytyminen</i>	0,063/4 mm	10,95			5,23				4,57										
<i>WA₂₄ [%]</i>	4/16 mm	-			6,72				-										
	4/32 mm	-			-				6,06										
<i>Kiintotiheys [Mg/m³]</i>		ρ_a	ρ_{rd}	ρ_{ssd}	ρ_a	ρ_{rd}	ρ_{ssd}	ρ_a	ρ_{rd}	ρ_{ssd}									
	0,063/4 mm	2,84	2,17	2,40	2,77	2,42	2,54	2,85	2,52	2,64									
	4/16 mm	-	-	-	2,75	2,32	2,48	-	-	-									
	4/32 mm	-	-	-	-	-	-	2,74	2,35	2,49									
<i>Metallipitoisuus [%]</i>		magneettiset		ei magneettiset		magneettiset		ei magneettiset		magneettiset		ei magneettiset							
	4/8 mm	-	-	-	16,2	0	13,9	0,1											
	8/16 mm	-	-	-	10,1	0,5	9,9	0,1											
	16/32 mm	-	-	-	-	-	4,6	4,5											
<i>Vesiliukoiset sulfaatit [mg/kg]</i>		6100			11000				8800										
<i>Hehkutushäviö [%] <4mm aineksesta</i>		2,8			2,9				2,4										
<i>Kokonaisrikki [mg/kg]</i>		7260			8720				9190										
<i>Jäädytys-sulatuskestävyys</i>	4/8 mm	-			-				< 2 mm:ksi 6,6/6,7/7,1 % keskiarvo 6,8 %										
	8/16 mm	-			-				< 4 mm:ksi 7,2/7,8/6,3 % keskiarvo 7,2 %										
	16/32 mm	-			-				< 16 mm:ksi 5,4/4,4 % keskiarvo 4,9 %										
<i>Uusiokiviaineksen luokittelu</i>	4/8 mm	Rc	Ru	Rb	Ra	Rg	X	Rc	Ru	Rb	Ra	Rg	X ₂₎	Rc	Ru	Rb	Ra	Rg	X ₂₎
	8/16 mm	-	-	-	-	-	-	¹⁾	¹⁾	1,5	¹⁾	5,3	16,2	¹⁾	¹⁾	2,1	¹⁾	6,3	14
	16/32 mm	-	-	-	-	-	-	¹⁾	¹⁾	7,5	¹⁾	5,7	10,6	¹⁾	¹⁾	2,5	¹⁾	1,9	10
<i>Los Angeles -luku</i>		-			-				43										
<i>Radioaktiivisuusindeksi</i>		<i>I</i> ₁	<i>I</i> ₂	<i>I</i> ₃	<i>I</i> ₄	<i>I</i> ₁	<i>I</i> ₂	<i>I</i> ₃	<i>I</i> ₄	<i>I</i> ₁	<i>I</i> ₂	<i>I</i> ₃	<i>I</i> ₄						
		0,30	0,12	0,04	0,02	0,33	0,13	0,05	0,02	0,30	0,12	0,04	0,02						

1) ei määritetty

2) sisältää vain metallit

Proctor-koe

Taulukossa 2. on esitetty Fortumin maalaboratoriossa Proctor-kokeella määritetyt maksimikuivatilavuuspainot sekä optimivesipitoisuudet, joita on käytetty kapaleessa 6.2.2. esitettyjen tiivysasteiden laskentaan. Sulkeissa on esitetty Tampereen yliopiston laboratoriossa määritetyt arvot, joita käytettiin muiden ao. tulosten tiivystilan määrittämisessä. Kokeiden mukaan optimivesipitoisuus on kuonamateriaaleille korkeampi kuin luonnonkiviaineksille. InfraRYL mukaan soran ja soramoreenin optimivesipitoisuus vaihtelee välillä 5...10 % ja hiekan välillä 5...15 % (InfraRYL). Saadut optimivesipitoisuudet olivat matalampia kuin Sormusen väitöskirjan tutkimuksessa (suodatinkerros 27,7 % ja jakava kerros 17,5 %) (Sormunen, 2017). Syynä tähän voisi olla mahdollisesti erot kuonan käsittelyprosessissa, sillä tässä työssä ei käytetty ollenkaan ballistista erotinta. Maksimikuivatilavuuspainot kuonatuotteille olivat matalammat kuin vastaaville luonnonkiviaineksille. Hiekalle maksimikuivatilavuuspaino on noin 20 kN/m³ ja soralle noin 21 kN/m³ (InfraRYL).

TAULUKKO 2. Proctor-kokeissa mitatut maksimikuivairtoteiheydet, $\rho_{d,max}$, niitä vastaavat vesipitoisuudet, w , ja maksimikuivatilavuuspainot $\gamma_{d,max}$.

Lajite	$\rho_{d,max}$, kg/m ³	w , %	$\gamma_{d,max}$, kN/m ³
0/2 mm	1685,9	19,7	16,54
0/16 mm	1882,0 (1830)	17,0 (16,7)	18,46 (17,92)
0/32 mm	2037,9 (1950)	13,0 (13,5)	19,99 (19,13)

ICT-kiertotiivistys

Vertailun vuoksi maksimikuivatilavuuspainot ja optimivesipitoisuudet tutkittiin myös ICT-kiertotiivistyksellä. ICT-kiertotiivistyksestä saadut tulokset on esitetty taulukossa 3. Tuloksista voidaan huomata, että arvot ovat linjassa Proctor -kokeen tulosten kanssa, ja ICT-kiertotiivistystä voidaan tarvittaessa käyttää korvaamaan Proctor -koetta kuonien tutkimisessa, kunhan kierrosmäärä ja paine ovat oikeat (3bar/120 kierrosta).

TAULUKKO 3. Suurimmat ICT-kiertotiivistyksessä mitatut maksimikuivairtotiheydet, $\rho_{d,max}$, niitä vastaavat vesipitoisuudet, w ja maksimikuivatilavuuspainot $\gamma_{d,max}$.

<i>Lajite</i>	<i>paine/kierrosten määrä</i>	$\rho_d, \text{kg/m}^3$	$w, \%$	$\gamma_{d,max}, \text{kN/m}^3$
<i>0/2 mm</i>	2bar/40 kierrosta	1512,3	21,0	14,84
	3bar/120 kierrosta	1647,3	20,4	16,16
<i>0/16 mm</i>	2bar/40 kierrosta	1709,9	19,0	16,77
	3bar/120 kierrosta	1811,2	16,9	17,77

Vedenläpäisevyys

Vedenläpäisevyyskokeen tulokset on esitetty taulukossa 4. Vedenläpäisevyyskerroin k kuvaa materiaalin hydraulista johtavuutta; mitä suurempi k -arvo, sitä paremmin materiaali läpäisee vettä. Kuonatuotteiden vedenläpäisevyyskerroimet olivat samaa suurusluokkaa kaikilla kolmella tuotteella. Luonnonkiviaineksiin verrattuna saman suurusluokan vedenläpäisevyyskerroin on esimerkiksi karkealla hiedalla (Salaojayhdistys, 2013).

TAULUKKO 4. Määritetty vedenläpäisevyyskerroin, k , koekappaleen kuivatilavuuspaino, Y , ja hydraulinen gradientti, i , joissa vedenläpäisevyyskerroin määritettiin.

<i>Lajite</i>	$Y, \text{kN/m}^3$	$k, \text{m/s (20}^\circ\text{C)}$	i
<i>0/2 mm</i>	13,5	$5,9 \cdot 10^{-6}$	3,0
<i>0/16 mm</i>	14,9	$9,6 \cdot 10^{-6}$	3,0
<i>0/32 mm</i>	16,6	$8,6 \cdot 10^{-6}$	2,6

Lämmönjohtavuus

Lämmönjohtavuuskokeen tulokset on esitetty taulukossa 5. Kuonatuotteiden lämmönjohtavuuden arvot olivat selvästi luonnonkiviaineksia alhaisemmat. Moreenille lämmönjohtavuuden arvoksi on saatu 1,3 W/mK, hiekalle 2,2 W/mK ja siltille 1,7 W/mK Tampereen teknillisen korkeakoulun tutkimuksessa (Leivo, Rantala,

2000). Esimerkiksi erittäin hyvin lämpöä eristävänä pidetyn vaahtolasin lämmönjohtavuus vaihtelee välillä 0,10...0,15 W/mK (Foamit, 2012). Outokummun ferrokromikuonasta tuottaman OKTO-eristeen lämmönjohtavuus vaihtelee optimikos-teudessa välillä 0,55...0,56 W/mK (Destia, 2019).

TAULUKKO 5. Lämmönjohtavuus.

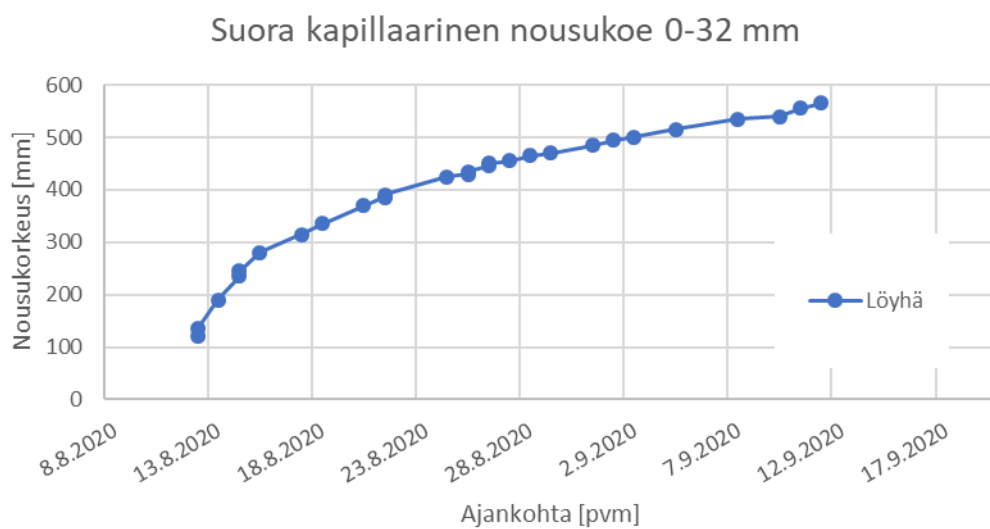
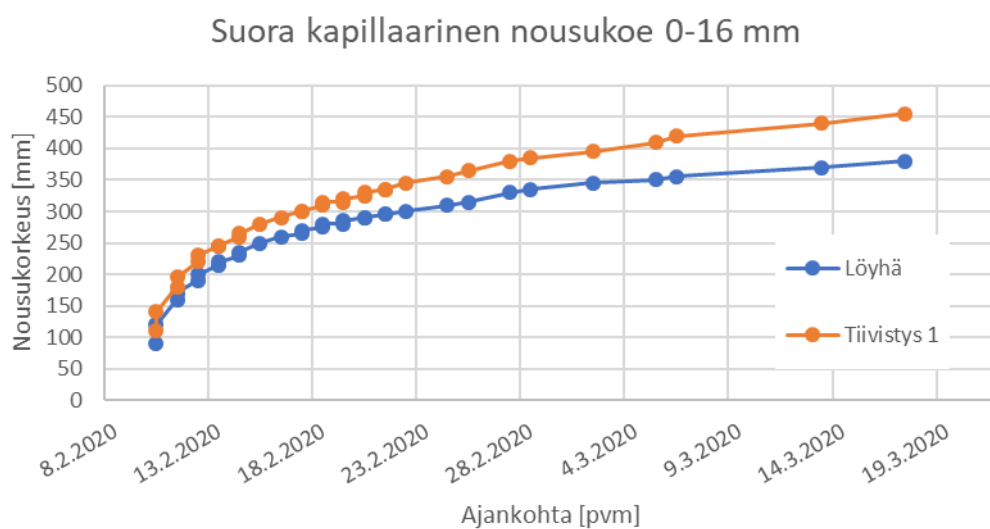
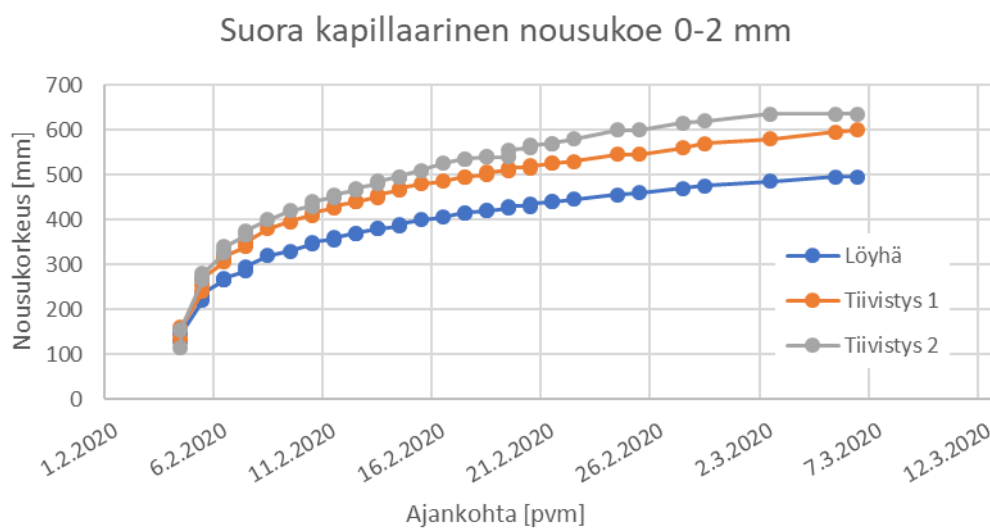
Lajite	Kuivairtoteheys Mg/m ³	w, %	Lämmönjohtavuus W/mK
0/2 mm	1,42	17,8	0,66
0/16 mm	1,54	18,7	0,9

Kapillaarinen vedenimeytymiskorkeus

Kapillaarisen nousukokeen kuvaajat on esitetty kuviossa 6. ja vedenimeytymiskorkeudet taulukossa 6. Vedenimeytymiskorkeutta mitataan luonnonkiviaineksilta ja murskeilta yleensä vain kapillaarikatsoon käytettäviltä materiaaleilta, jolloin vedenimukorkeuden on oltava matalampi kuin rakennekerroksen paksuus. Kuonatuotteilla vedenimeytymiskorkeus oli melko korkea, ja testeissä kapillaarinen nousu ei tasaantunut ennen kuin koe päätettiin lopettaa. Normaalisti luonnonkiviaineksilla koe lopetetaan viimeistään 28-30 vrk kohdalla (PANK, 2016), kun kuonatuotteilla kokeita jatkettiin jopa 36 päivää.

TAULUKKO 6. Vedenimeytymiskorkeus ja koekappaleiden kuivairtotehdet sekä tiivistysvesipitoisuus $w_{tiivistys}$.

Lajite		ρ_d g/cm ³	% ρ_{dmax} :sta	$w_{tiivistys}$ %	nousukorkeus mm
0/2 mm	löyhä	1,13	69	10,5	495
	tiivistys 1	1,35	82	9,9	600
	tiivistys 2	1,33	81	9,9	635
0/16 mm	löyhä	1,32	72	7,5	380
	tiivistys 1	1,47	80	7,1	455
0/32 mm	tiivistys 1	1,52	78	4,1	565



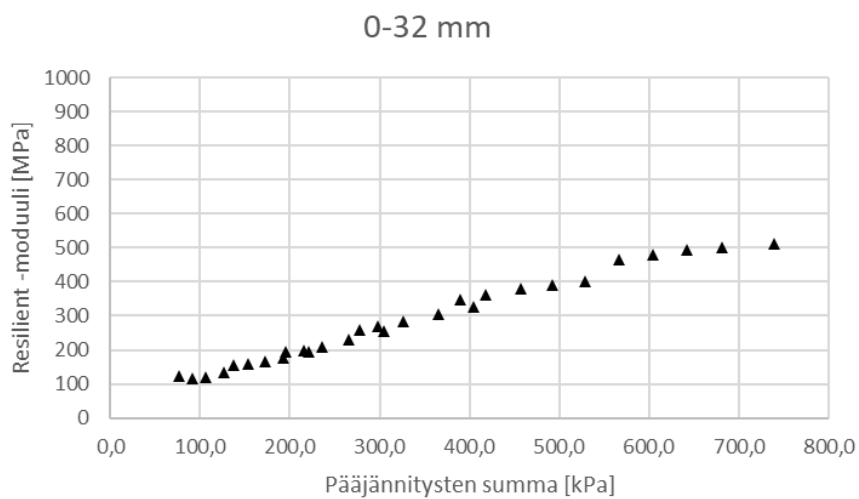
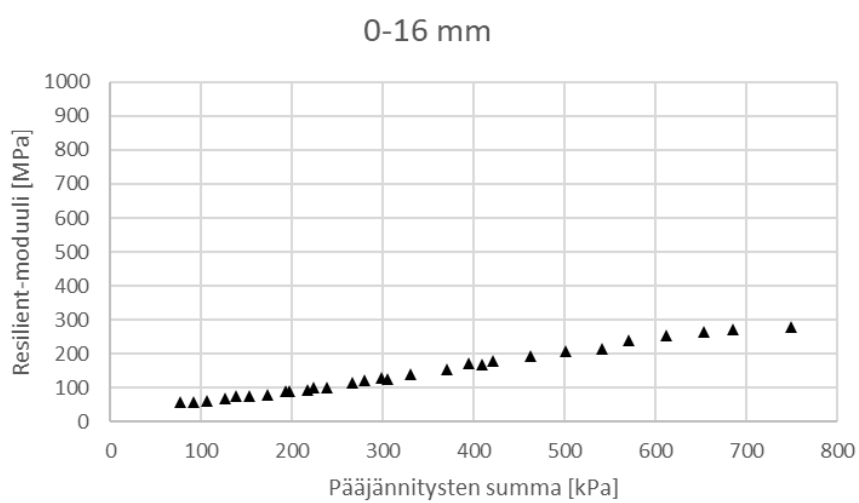
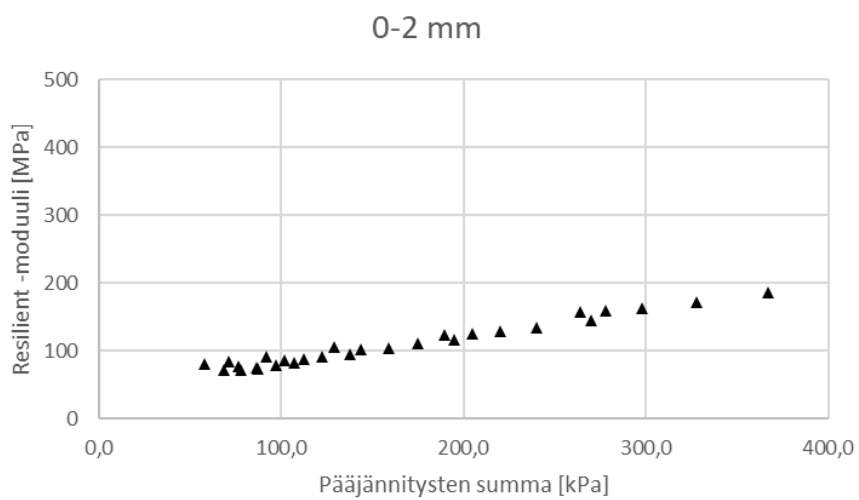
KUVIO 6. Kapillaarisen nousukokeen kuvaajat.

Kolmiaksaalikokeet

Syklisellä kolmiaksaalikokeella määritettiin kuonatuotteiden lujuusominaisuuksia. Resilient-moduulimääritysten tulokset on esitetty taulukossa 7. ja kuviossa 7. Kuonamateriaalien käyttäytyminen oli voimakkaasti epälineaarista jännitystason suhteen, mikä ei ole tyypillistä luonnonkiviaineilla. Tuloksista huomataan, että 0-16 mm kuonajakeen resilient -moduuli on vastoin odotuksia alhaisempi kuin 0-2 mm jakeen. Syynä tähän voisi olla esimerkiksi alhainen Proctor-kokeen tulos (kts. Taulukko 2.), joka on vaikuttanut näytekappaleen tiiveysasteeseen (näytteet tiivistettiin 86% tiiveyteen Proctor-kokeen tuloksesta). Jatkotutkimuksena Proctor-kokeet voitaisiin vielä 0-16 mm jakeelle uusia, ja mikäli maksimikuivatilavuuspainolle saataisiin suurempi arvo kuin tässä työssä, myös kolmiaksaalikoe kannattaisi tehdä uudelleen.

TAULUKKO 7. Koekappaleiden todennäköiset kuivairtotiheydet kuormituksen alkaessa, ρ_d , ja koekappaleista määritetyt, k_1 ja k_2 parametrit. Lisäksi k_1 ja k_2 parametreilla määritetyt resilient-moduulit on esitetty pääjännityksen summan (θ) ollessa 200 kPa.

<i>Lajite</i>	ρ_d , <i>kg/m³</i>	k_1	k_2	m_r , <i>MPa</i> ($\theta=200\text{kPa}$)
<i>0/2 mm</i>	1,37	853	0,558	126
<i>0/16 mm</i>	1,55	537	0,823	95
<i>0732 mm</i>	1,72	1140	0,774	195



KUVIO 7. Resilient -moduulimäärittysten kuvaajat.

Moniportaisella staattisella avoimella kolmiakσιαalikokeella määritettiin kuonaja-keille kitkakulmat ja koheesiot, jotka on esitetty taulukossa 8. Tuloksista huomataan, että 0-16 mm kuonalla kitkakulma oli alhaisempi kuin 0-2 mm kuonalla. Koekappaleen tiivysasteeseen mahdollisesti vaikuttanut alhainen Proctor-kokeen tulos voi olla syynä myös tähän tulokseen.

TAULUKKO 8. Kyllästämättömistä koekappaleista moniportaisella staattisella kolmiakσιαalikokeella määritetyt kitkakulmat, φ ja koheesiot, c .

Lajite	φ	c , kPa
0/2 mm	40,6°	71,9
0/16 mm	39,8°	46,7
0/32 mm	42,3°	89,0

Routanousukoe

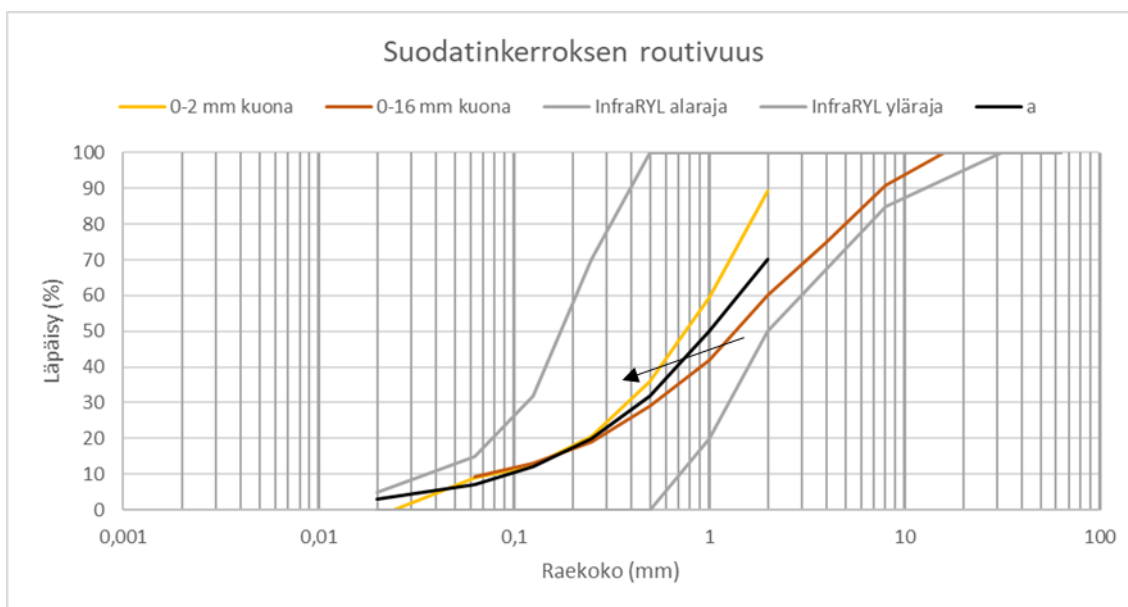
Routanousukoekappaleen indeksitiedot ja routimiskertoimet SP on esitetty taulukossa 9. ISSMFE esittää yleispiirteisen luokituksen, jonka mukaan materiaali on routimatonta, mikäli routimiskerroin $SP < 0,5 \text{ mm}^2/\text{Kh}$. ISSMFE:n luokitusehdotuksen (1989) mukaan tarkoittaisi, että materiaalit ovat jonkin verran routivia (medium=1,5-3,3 mm^2/K).

TAULUKKO 9. Routanousukoekappaleiden kuivairtitiheydet, ρ_d ja vesipitoisuudet alussa w_A sekä koekappaleiden routimiskertoimet, SP, ja puretuista koekappaleista määritetyt vesipitoisuudet, w_L .

Lajite	ρ_d , Mg/m ³	w_A , %	w_L , %	SP, mm^2/Kh
0/2 mm	1,39	20,2	34,8	2,01
0/16 mm	1,56	18,1	30,6	2,51
0/32 mm	1,68	14,2	25,1	2,29

Suoraviivaisia päätelmiä kuonamateriaalien routivuudesta tierakenteessa ei kuitenkaan voida pelkän routimiskertoimen perusteella tehdä, sillä luokitus on suunniteltu luonnonkiviaineksille, eikä välttämättä sovellu kuonamateriaalien arvioin-

tiin. Rakeisuusominaisuuksien perusteella arvioituna RIL:n ohjeen (2013) mukaan kuonatuotteiden katsotaan olevan routimattomia. Kuitenkin kuvioista 8. huomataan, että 0-16 mm kuonan rakeisuuskäyrä ylittää InfraRYL suodatinkerroksen routimattomuusehdon ohjekäyrän (InfraRYL kuva 21110:K1). Routivuuteen vaikuttavat myös muut materiaaliominaisuudet, kuten vedenläpäisykyky ja lämmönjohtavuus. Kuonatuotteille tehdyt laboratoriotutkimukset luovat kuitenkin pohjan, joihin koerakenteelle toteutettavia jatkotarkkailuja routivuuden osalta voidaan vertailla ja tutkia syy-seuraussuhteita.



KUVIO 8. Suodatinkerroksen rakeisuuskäyrä ei saa normaalisti ylittää mustaa viivaa nuolen suunnassa (InfraRYL kuvaa 21110:K1 mukailten).

Ympäristökelpoisuus

Ympäristökelpoisuuskokeiden tulokset on esitetty liitteessä 1. verrattuna MARA-asetuksessa (843/2017) annettuihin raja-arvoihin. Materiaalit täyttivät päällysteille välille asetetut kelpoisuusstandardit, joten kohteelle voitiin tehdä MARA-asetuksen mukainen ilmoitus jätteen hyödyntämisestä rakennuskohteessa.

5 KOERAKENNE

Koerakenteen tarkoituksena oli tuottaa tietoa kuonamateriaalien teknisestä käyttäytymisestä maarakentamisessa sekä materiaalin todellisista käyttöolosuhteista. Tarkoituksena oli myös hankkia dataa mahdollisesti myöhemmin haettavaa Väyläviraston materiaalihyväksyntää varten.

Koerakenne rakennettiin Fortumin Riihimäen laitosalueen yhteyteen Kuulojantielle, joka sijaitsee Hausjärven kunnan puolella. Koerakenteen tarkempi sijainti on esitetty kuvassa 6. Ennen rakentamista koerakenteesta luotiin yksityiskohtainen tarkkailusuunnitelma. Sen tekemisessä konsultoitiin sekä Tampereen yliopistoa, että Väylävirastoa, jotta suunnitelmasta saatiin mahdollisimman kattava, ja tutkimuksilla saataisiin riittävän luotettavaa tietoa materiaalien käyttäytymisestä todellisessa rakennuskohteessa.

Koerakenteen suunnitelmat hyväksyttiin Hausjärven kunnan teknisellä johtajalla, ja kohteen rakentamiseen haettiin MARA-asetuksen (843/2017) mukainen jätteen hyödyntämislupa Hämeen ELY-keskukselta.

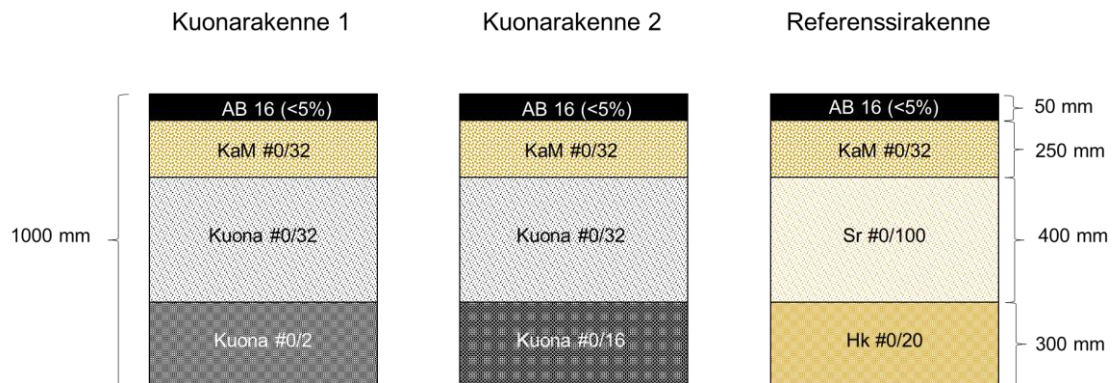
Rakentamisen aikana tutkimussuunnitelmasta poikettiin joiltakin osin esimerkiksi pohjamaan ominaisuuksien takia. Tehdyt muutokset on kuvattu tässä raportissa.

5.1 Rakenteen kuvaus

Koerakenteen pituus oli yhteensä noin 100 m, josta noin 50 metrin mittaisella matkalla käytettiin suodatin- ja jakavassa kerroksessa kuonatuotteita. Alkuperäisen suunnitelman mukaan rakenteen itäinen pääty oli tarkoitus tehdä kuonatuotteista ja läntinen pääty luonnonkiviaineksista, mutta maaleikkausta tehtäessä toisesta päästä paljastui täyttömaata. Kuonatuotteista rakennettua osuutta siirrettiin kesemmälle siten, että itäisessä päässä 10 m matkalla ja läntisessä 40 m matkalla on käytetty luonnonkiviaineksia verrokkirakenteena. Siirtämällä kuonarakennetta saatiin vertailurakenteesta mittaustuloksia sekä koerakenteita pehmeämmältä, että jäykemmältä alusrakenteelta. Kuonarakenne on vielä jaettu

kahteen 25 metrin osaan, joista toisessa käytettiin suodatinkerroksessa 0/2 mm materiaalia ja toisessa 0/16 mm materiaalia.

Koerakenteen suunnitelmien mukaiset rakennekerrospaksuudet on esitetty kuvassa 3. Rakenne tehtiin samanlaisena koko poikkileikkauksen leveydeltä. Kaikki rakenteet tehtiin pohjamaan päälle.



KUVA 3. Koerakenteen eri rakennetyyppien kerrospaksuudet. (Annika Sormunen)

5.1.1 Kuonatuotteet

Rakenteessa käytetyt kuonatuotteet valmistettiin suhteuttamalla Riihimäen pohjakuonien jalostuksen yhteydessä syntyvistä kuonan mineraaliaineksista (0/2 mm, 2/6 mm, 6/16 mm ja 16/45 mm). Käytetyt tuotteet olivat: suodatinkerrokseen soveltuvat hieno (0/2 mm) ja karkea (0/16 mm) materiaali, sekä jakavaan kerrokseen soveltuva kuonasora/murske (0/32 mm).

Kuonatuotteet suhteutettiin heinä-elokuussa Kuulojan käsittelykeskuksessa ja välivarastoitettiin katetussa hallissa, kunnes rakentaminen voitiin aloittaa. Käytetyt kuonatuotteet ja niissä käytettyjen käsittelystä syntyvien erikokoisten mineraalijakeiden osuudet (p-%) on esitetty taulukossa 10.

TAULUKKO 10. Kuonatuotteissa käytettyjen mineraalijakeiden p-% -osuudet.

<i>Eri mineraalijakeiden p-% -osuudet kuonatuotteissa</i>				
<i>Tuote</i>	0/2 mm	2/16 mm	6/16 mm	16/45 mm
<i>suodatin 0/2 mm</i>	100	-	-	-
<i>suodatin 0/16 mm</i>	65	25	10	-
<i>jakava 0/32 mm</i>	15	20	30	35

5.2 Rakennuspaikka ja pohjamaa

Rakennuspaikka sijaitsi olemassa olevan Kuulojantien luoteispuolella, mukaillen vanhan tien muotoa. Vanhalla tiellä oli koko koerakenteen rakentamisen ajan liikenne avoinna tien päässä sijaitsevalle Gasumin biotuotelaitokselle.

Kuulojantieltä löytyi aiemmin toteutettuja pohjatutkimuksia, jotka sisälsivät 3kpl puristin-heijarikairauksia sekä 2kpl häiriintyneitä maanäytesarjoja. Tutkimuspisteiden kohdalla maanpinta vaihteli tasolla +106.75...+109.08. Pohjaveden pinta on 26.11.2015 mitattu tasolle +102.71. Pohjatutkimusten perusteella ylimpänä maakerroksena oli ohut, noin 1...1,5 m paksuinen täyttökerros. Täytön alla oli noin 2...8 m paksuinen kerros laihaa savea/savista silttiä, jonka vesipitoisuus vaihteli välillä 10...40 %. Tämän kerrostuman alla oli tiivis pohjamooreeni. Aiemmin suoritettut pohjatutkimukset on esitetty suunnitelman mukaisessa pituusleikkauksessa liitteessä 3.

5.3 Liikennekuormitus

Koerakenne sijaitsee Kuulojantiellä, joka johtaa Gasumin biotuotelaitokselle. Tieltä on myös kulku Fortumin Riihimäen käsittelykeskuksen sivuportille. Tiealueella kuljetaan molempiin suuntiin raskailla kuormatuilla ajoneuvoilla, jotka kuljettavat jätettä laitokselle sekä käsittelyn läpi käynnyttä lannoitevalmistetta pois laitokselta. Raskaita ajoneuvoja kulkee ajoväylällä noin 23 kappaletta päivässä ja henkilöautoja 5-10 kappaletta päivässä.

Laitokselle ajavia jätekuormia on määrällisesti enemmän, mutta niiden keskimääräinen paino on pienempi kuin laitokselta pois ajavien kuormien. Pois lähtevissä

kuormissa on kevään ja syksyn lannoituskaudella selvä piikki, kun laitoksen varastot ajetaan tyhjiksi. Liikennemääriä ja kuormien painoja seurattiin tammi-toukokuussa 2020 ja saatiin seuraavat tulokset:

- Sisään tulevia 1513 kpl, paino yhteensä 23 224 tn
- Pois lähteviä 973 kpl, paino yhteensä 32 244 tn

Rakenteeseen kohdistuva epätasainen liikennesitus otettiin huomioon koerakenteen tutkimuksia suunnitellessa. Mittauksia sijoitettiin rakenteen molemmille kaistoille, jotta voitiin havainnoida, onko erilaisella kuormituksella vaikutusta mitattaviin ominaisuuksiin.

Tien molemmille kaistoille laskettiin kuormituskertaluvut (KKL_{SUUNTA}) vuonna 2020 laskettujen liikennemäärien perusteella Liikenneviraston ohjeen 38/2018 kaavalla 9 (Liikennevirasto, 2018).

$$KKL_{SUUNTA} = L \cdot (5,5 \cdot KA_{YHD,TÄYSI\ RAAKA-A} + 2,1 \cdot KA_{YHD,MUU}) \cdot 7300(vrk/20a)$$

jossa leveyskerroin $L = 1,4$ (kaistan leveys 4 m)

Lasketut kuormituskertaluvut kaistoittain:

$$KKL_{SUUNTA,SISÄÄN\ TULEVAT} = 354\ 123$$

$$KKL_{SUUNTA,ULOS\ AJAVAT} = 361\ 992$$

5.4 Koerakenteen rakentamisprosessi

Koerakenne rakennettiin vuoden 2020 elo-syyskuussa. Käytetyt kuonamateriaalit oli pääosin valmistettu ja suhteutettu jo aiemmin, ja varastoitu katettuun varastohalliin Fortumin laitosalueelle. Rakentamisessa käytettiin tavanomaisia tietömaan työkoneita, kuten tela-alustaista kaivinkonetta ja täryjyrää. Rakentaminen kuonatuotteilla oli pääosin hyvin samankaltaista kuin luonnonkiviaineksilla. Kuona ei rakentaessa pölissyt ja sitä oli helppo käsitellä ja siirtää työkoneilla. Materiaalin taipumus hienonemiseen ei vaikuttanut rakentamiseen, kuonan päältä voitiin ajaa kaivinkoneella ja sen tiivistäminen onnistui luonnonmateriaalien tapaan valssijyrällä.



KUVA 4. Jakavan kerroksen kuonaa varastokasalla.

Ulkonäöltään varsinkin hienorakeisemmat kuonajakeet muistuttavat luonnonki-
viaineisia, tosin väri on tummempi kuten kuvasta 5. huomataan. Jakavan ker-
roksen suurempirakeisessa kuonassa voidaan silmämääräisesti erottaa joitakin
keramiikan yms. palasia, jotka eivät kuitenkaan vaikuttaneet rakentamiseen.

Kuonamateriaaleilla rakennettaessa on huomioitava niiden korkeampi optimive-
sipitoisuus ja sen tärkeys tiivistyvyyden kannalta. Rakentamisen alussa huomati-
tiin, että suodatinkerroksen kuona oli päässyt kuivumaan varastoitaessa (varas-
tokasoja ei oltu peitetty, vaikka näin oli tarkoitus). Kuonaa kasteltiin sekä työ-
maalla että varastokasalla, ja todettiin kastelun olevan työmaaolosuhteissa
melko hankalaa siten, että vesi saadaan imeytettyä kuonamateriaaliin tasai-
sesti. Jatkoa ajatellen on tärkeää huolehtia, että kuonamateriaalit ovat työ-
maalle toimitettaessa mahdollisimman lähellä optimivesipitoisuutta, esimerkiksi
peittämällä varastokasat pressulla, joka estää veden haihtumista. Jatkoa varten
on myös ratkaistava sopivin veden syöttötapa, eli kastellaanko kuonaa varasto-
kasalla vai esimerkiksi suhteuttamisen yhteydessä. Vesipitoisuus on kuitenkin

tärkeä huomioida myös luonnonkiviaineksilla rakentaessa, jotta ne saadaan tiivistettyä hyvin. Työmaalle ulkopuoliselta toimittajalta tilatun suodatinkerroksen hiekan tiivistyksessä oli myös hankaluuksia ja se vaikutti silmämääräisesti kuivalta, mikä viittaa siihen, että myös se alitti optimivesipitoisuuden.

Rakentamista rankkasateella tulisi välttää, sillä kastuessaan pinnasta yli optimivesipitoisuuden kuona voi liettyä.

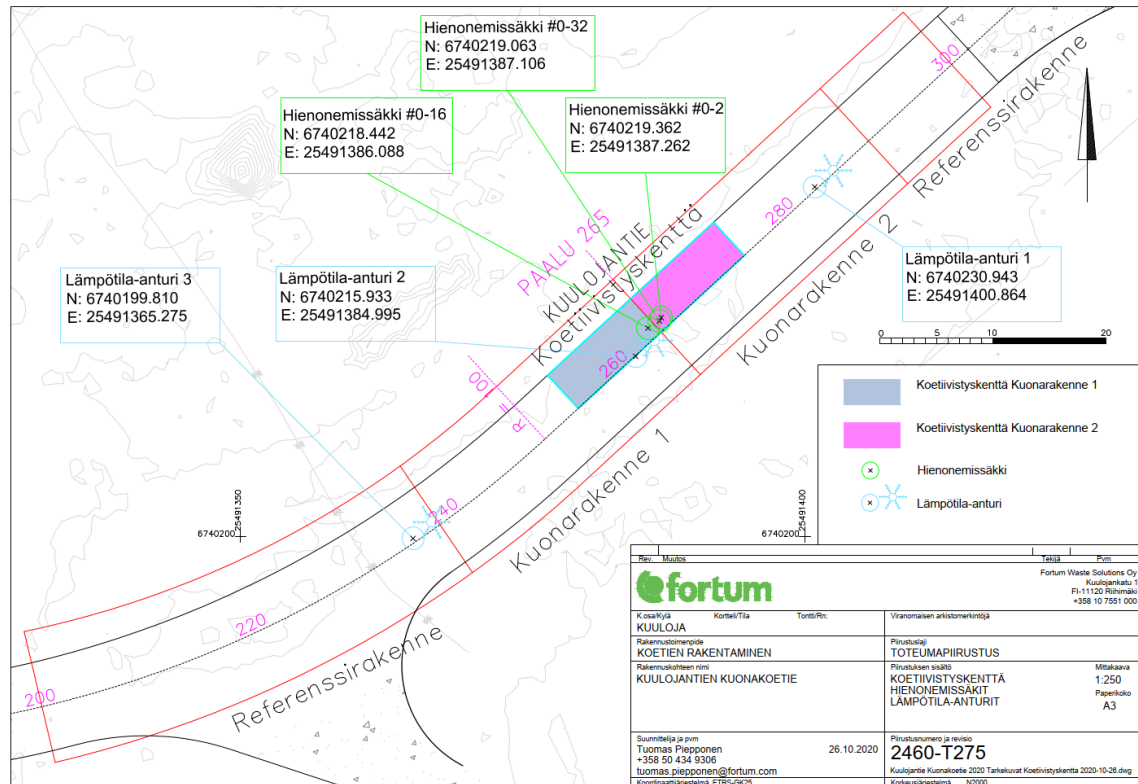


KUVA 5. Yleiskuva rakennustyömaasta.

6 KOERAKENTEEN TUTKIMUKSET

6.1 Mittausmenetelmät ja tutkimusten toteutus

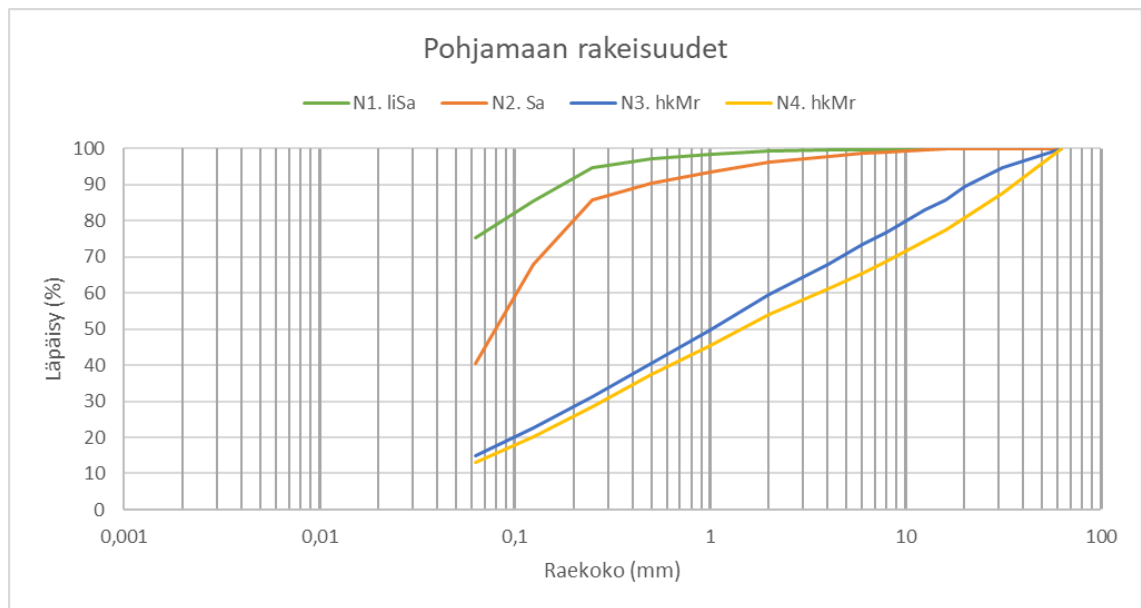
Kuvassa 6. on esitetty rakenteisiin asennettujen lämpötila-anturien, hienonemissäkkien, koetiivistyskentän sekä eri rakennetyyppien sijainnit koerakenteessa.



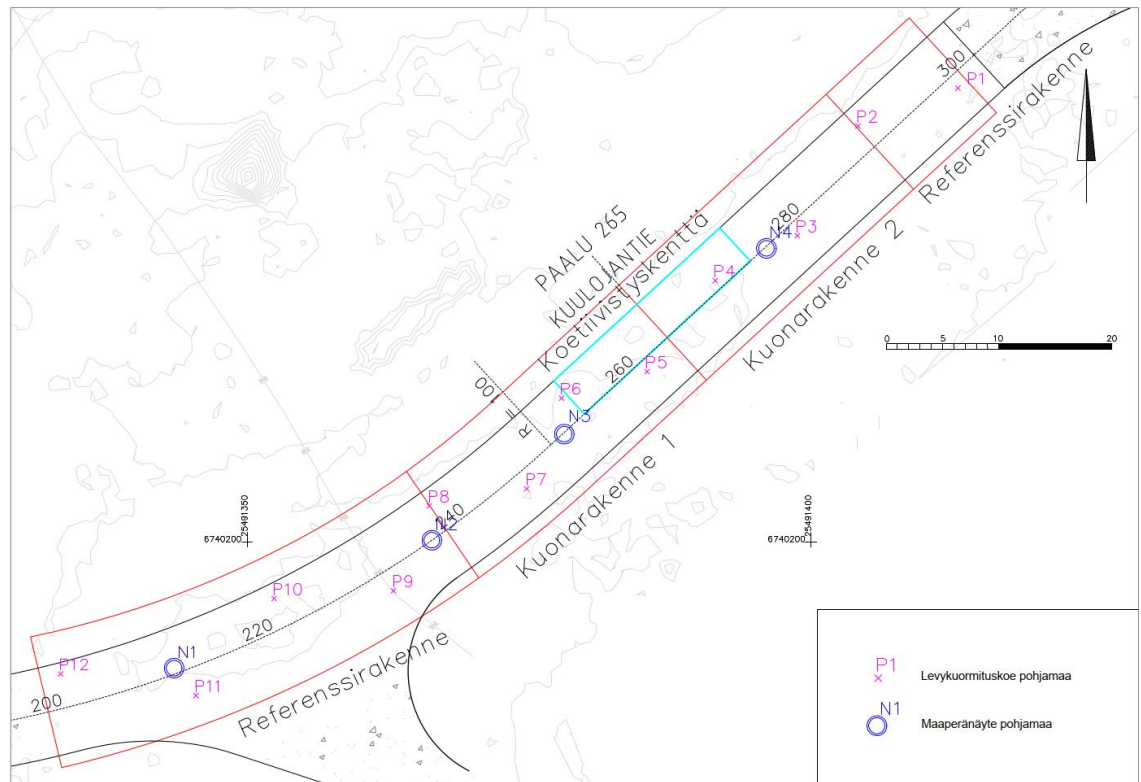
KUVA 6. Kartta koerakenteesta ja toteutuneista lämpötila-antureiden ja hienonemissäkkien sijainneista.

6.1.1 Pohjamaa

Rakennuspaikalle tehtiin maaleikkaus suunniteltujen rakennekerrosten alapinnan tasoon. Pohjamaasta otettiin 4kpl häiriintyneitä maanäytteitä, joista tutkittiin rakeisuus pesuseulonnalla. Maaperänäytteiden perusteella rakenteen länsipäässä pohjamaa oli savea ja rakenteen itäpäässä hiekkamoreenia. Silmämääräisesti itäpään pohjamaan arvioitiin olevan pintaosistaan aiemmin rakennettua täyttöä. Maaperänäytteiden perusteella piirretyt pohjamaan rakeisuuskäyrät, sekä niiden perusteella tulkitut maalajit on esitetty kuviossa 9. Kuvassa 7. on esitetty näytepisteiden sijainnit.



KUVIO 9. Pohjamaan rakeisuudet.



KUVA 7. Pohjamaasta otettujen rakeisuusnäytteiden sekä pohjamaan päältä tehtyjen levykuormituskokeiden sijainnit.

Pohjamaan päältä tehtiin 12 kpl kantavuusmittauksia levykuormituskokeella, käyttäen vastapainona 24 tn painoista kaivinkonetta. Levykuormituskokeissa käytettiin kolmea mittakelloa mahdollisimman tarkan mittaustuloksen saavuttamiseksi. Jokaista kuormituspistettä kuormitettiin ensin 3,5 kN esikuormituksella,

joka poistettiin ja mittakellot nollattiin. Sitten kuormitusta nostettiin 10 kN portaissa aina 60 kN saakka, ja kirjattiin painumat ylös kussakin portaassa. Tämän jälkeen kuormitus ja mittakellot nollattiin, ja mittaus tehtiin uudelleen. Ensimmäisen kuormituksen maksimitaipumasta saatiin moduularvo E1 ja toisen kuormituksen maksimitaipumasta moduularvo E2, jotka laskettiin InfraRYL Liite 2 kohdan K1 mukaisesti. Saaduista kantavuusarvoista laskettiin näiden välinen suhdeluku E1/E2 joka kuvaa rakenteen tiiveyttä. Mittauspisteiden sijainnit rakenteessa on esitetty kuvassa 7.

6.1.2 Koekenttä, tiivistyskertojen määrä ja hienoneminen

Jokaiselle kuonarakenteelle (suodatinkerros 0/2 mm, suodatinkerros 0/16 mm ja jakava kerros 0/32 mm) selvitettiin sopiva tiivistyskertojen määrä koekentän avulla. Jokaisen koekentän koko oli noin 5x20 m ja koekentän sijainti rakenteessa on esitetty kuvassa 6. Koekentät rakennettiin osaksi valmista rakennetta. Kaikki materiaalit tiivistettiin yhdessä kerroksessa. Tiivistyksessä käytettiin 7,5 tn valsijyrää. Jokaisen tiivistyskerran jälkeen otettiin 5 kpl mittauksia Loadman kevytpudotuspainolaitteella tiivistetyn kerroksen päältä. Maksimitiivistyskertojen määrä päätettiin sen mukaan, kun mittaustulosten mukaan rakenteen kantavuus ei enää huomattavasti parantunut. Lisäksi tarkkailtiin materiaalin hienonemista silmämääräisesti.

0/2 mm suodatinkerroksen kerrospaksuus oli 300 mm. Koetiivistyksessä ensimmäiset kaksi kertaa tiivistettiin korkealla amplitudilla. Yhteensä yliajokertoja tuli seitsemän.

0/16 mm suodatinkerroksen kerrospaksuus oli 300 mm. Koetiivistyskentässä ensimmäinen tiivistyskerta tehtiin korkealla amplitudilla, ja seuraavat tiivistyskerrat matalalla amplitudilla. Yhteensä yliajokertoja tuli viisi.

0/32 mm jakavan kerroksen kerrospaksuus oli 400 mm. Koetiivistyksessä ensimmäiset kolme tiivistyskertaa käytettiin korkeata amplitudia, ja loput matalaa. Yliajokertoja tuli yhteensä kuusi.

0/2 mm kuonajakeelle sopivaksi tiivistyskertojen määräksi valittiin Loadman-mittausten perusteella 6 tiivistyskertaa, 0/16 mm kuonajakeelle 5 tiivistyskertaa ja

0/32 mm jakeelle 6 tiivistyskertaa. Koetiivistyksen jälkeen jokaisesta Loadman - tutkimuspisteestä otettiin maaperänäyte koko rakennekerroksen paksuudelta, joista tutkittiin laboratorioissa vesipitoisuus sekä rakeisuus tiivistyksen aiheuttaman materiaalin hienonemisen arviointia varten.

Koerakenteeseen asennettiin kolme hienonemissäkkiä, yksi kutakin rakenteessa käytettyä kuonalajitetta kohden. Säkit olivat 40 litran punottuja PP-muovinauhasäkkejä, jotka täytettiin kuonamateriaalilla ja suljettiin nippusiteillä tiiviisti. Säkit asennettiin osaksi kutakin rakennekerrosta, samalle syvyydelle jossa kyseistä materiaalia käytettiin rakenteessa, ja tiivistettiin normaalisti. Säkkien sijoituskohta on esitetty kuvassa 6. Säkit asennettiin lähelle tien keskikohtaa, jotta niihin kohdistuisi mahdollisimman paljon räsitusta. Muutaman vuoden päästä rakentamisen jälkeen säkit kaivetaan ylös, jonka jälkeen säkitettyjen materiaalien rakeisuudet tutkitaan ja tuloksia verrataan koekentässä tiivistetyn materiaalin rakeisuustuloksiin.



KUVA 8. Hienonemissäkin asennus jakavaan kerrokseen.

6.1.3 Tiiviysmittaukset

Jokaisen tiivistetyn rakennekerroksen päältä tehtiin 24 kpl tiiviysmittauksia Troxler-säteilymittauslaitteella. Mittaukset pyrittiin tekemään samoista kohdista kuin rakennekerrosten levykuormituskokeet, ja samoja mittauskohtia käytettiin jokaisen kerroksen kohdalla.



KUVA 9. Troxler-säteilymittaus jakavasta kerroksesta.

Troxler-laitteella mitataan säteilylähteen lähettämän radioaktiivisen säteilyn kulkeutumista mitattavan materiaalin läpi. Säteilyn voimakkuus on suoraan verrannollinen väliaineen tiheyteen. Mittaukset tehtiin suoramittauksena. Mitattavaan kerrokseen tehtiin reikä, johon sauvan päässä sijaitseva säteilylähde työnnettiin. Mittauksia tehtiin 10 cm välein eri syvyyksiltä 30cm syvyyteen saakka. Jokaisessa pisteessä mittausaika oli vähintään minuutin.

Säteilymittauslaite ei näytä kuonien osalta oikeita vesipitoisuuslukemia. Tämän takia jokaisesta mittauspisteestä otettiin myös yksi maanäyte, josta analysoitiin

laboratoriossa vesipitoisuus (%). Vesipitoisuustuloksia käytettiin korjaamaan säteilymittauslaitteella saadut tiiviysaste-tulokset. Tiiviysaste laskettiin kaavalla:

$$D = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d,max}} \cdot 100\%$$

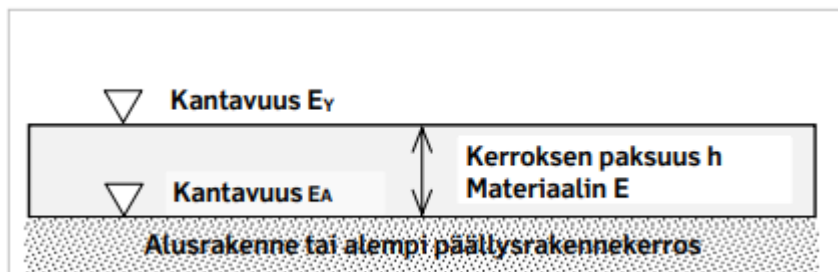
jossa:

γ_d on kuivatilavuuspaino tarkasteltavassa tilassa
 $\gamma_{d,max}$ on maksimikuivatilavuuspaino

Laskennassa käytettiin laboratoriotutkimusten perusteella kullekin kuonajakeelle määritettyjä maksimikuivatilavuuspainoja (taulukko 12.)

6.1.4 Kantavuus

Kantavuusmittaukset toteutettiin jokaisen valmiin rakennekerroksen päältä samalla kolmen mittakellon levykuormituskokeella kuin pohjamaan päältä. Levykuormituskokeita tehtiin 24 kpl kustakin kerroksesta, ja ne sijoituivat tasaisesti rakenteeseen molemmille kaistoille. Jokaisen kerroksen kohdalla käytettiin samoja mittauskohtia, ja kokeiden xyz-sijainnit mitattiin takymetrillä. Näin saatiin myös selville tarkat kerrospaksuudet, joita hyödynnettiin laskettaessa tuotteiden E-moduularvoja. E-moduularvot laskettiin takaisinlaskennan avulla levykuormituskokeiden mittaustuloksista Odemarkin menetelmällä, joka on yleisin Suomessa tiesuunnittelussa käytettävä kantavuusmitoitusmenetelmä (Liikennevirasto, 38/2018).



KUVIO 10. Odemarkin menetelmässä käytettävät käsitteet. (Liikennevirasto 38/2018)

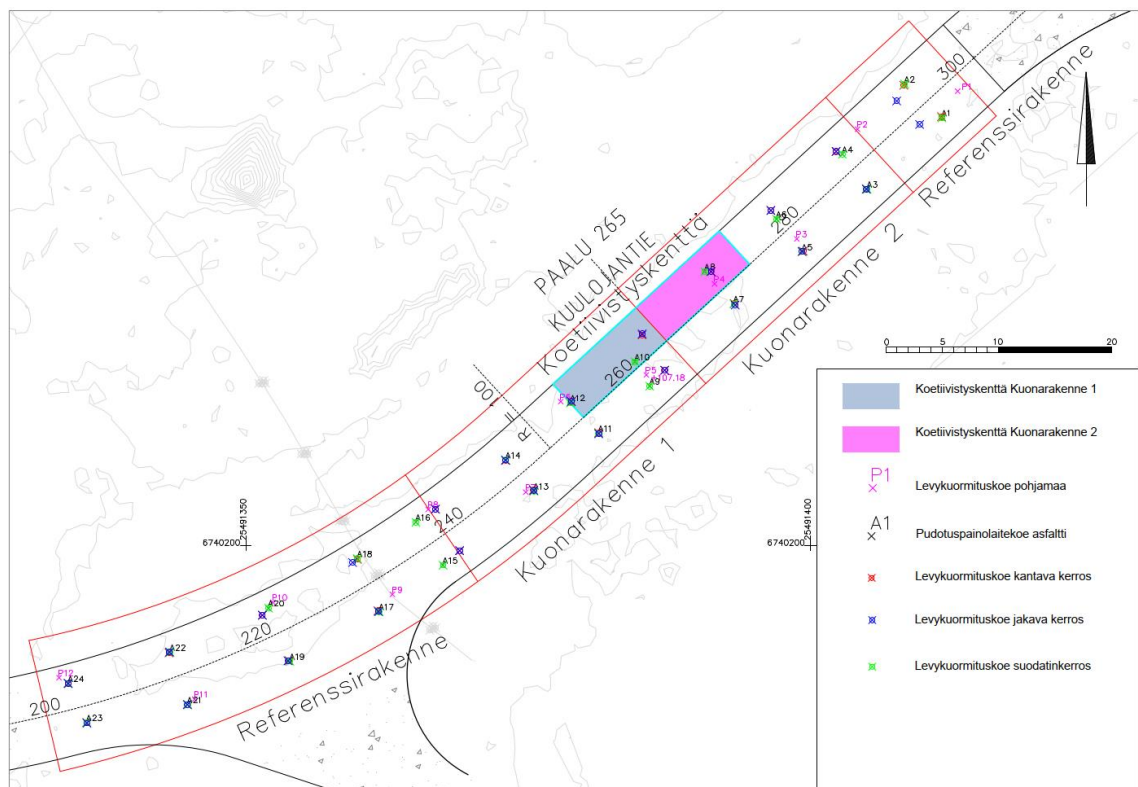
Odemarkin kantavuusyhtälö:

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

jossa:

- E_A mitoitettavan kerroksen alapinnan kantavuus [MPa]
 E_y mitoitettavan kerroksen yläpinnan kantavuus [MPa]
 E mitoitettavan kerroksen materiaalin E-moduuli [MPa]
 h mitoitettavan kerroksen paksuus [m]

Levykuormituskokeiden sijainnit on esitetty kuvassa 10.



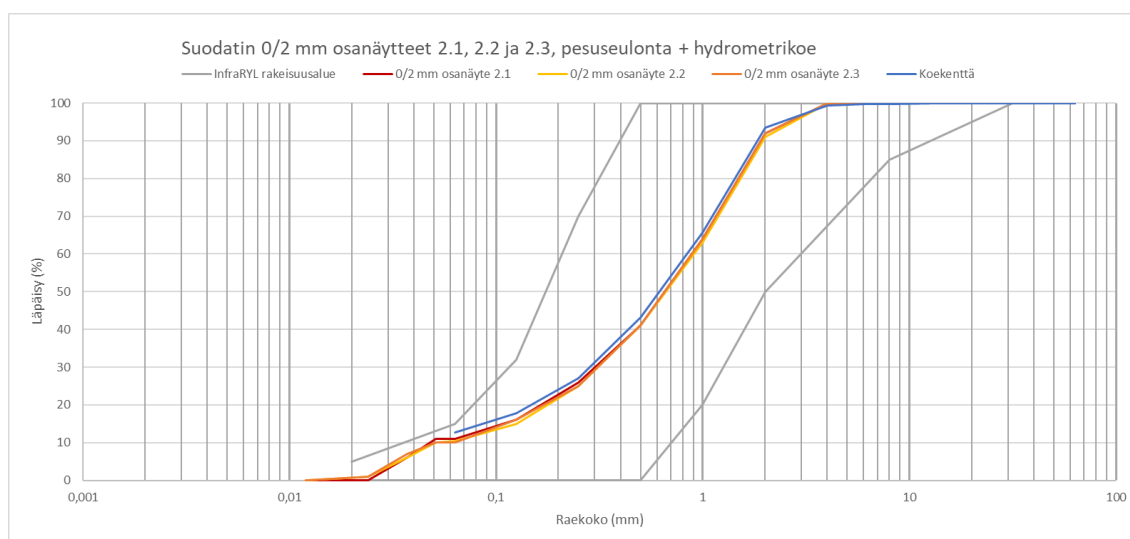
KUVA 10. Kantavuuskokeiden mittauspisteet pohjamaan, rakennekerrosten ja asfaltin päältä.

6.2 Mittaustulokset

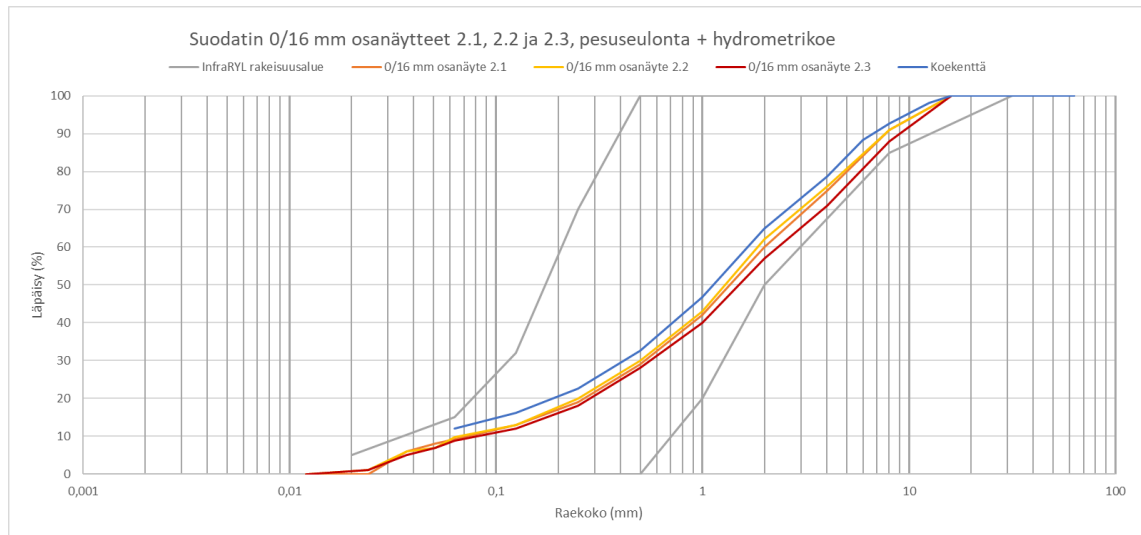
6.2.1 Hienoneminen

Rakentamisen aikaista hienonemista tarkkailtiin sekä silmämääräisesti että koekentästä otetuilla materiaalinäytteillä. Näytteistä tutkittiin rakeisuus laboratoriossa ja käyriä verrattiin ennen rakentamista tutkittuihin rakeisuuksiin. Rakeisuuskäyrät on esitetty kuvioissa 11...13. Rakeisuuskäyriä vertaamalla huomataan, että merkittävää hienonemista ei ole tiivistyksessä tapahtunut. Silmämääräisessä tarkkailussa koetiivistyksen aikana ei myöskään huomattu materiaalien hienonemista.

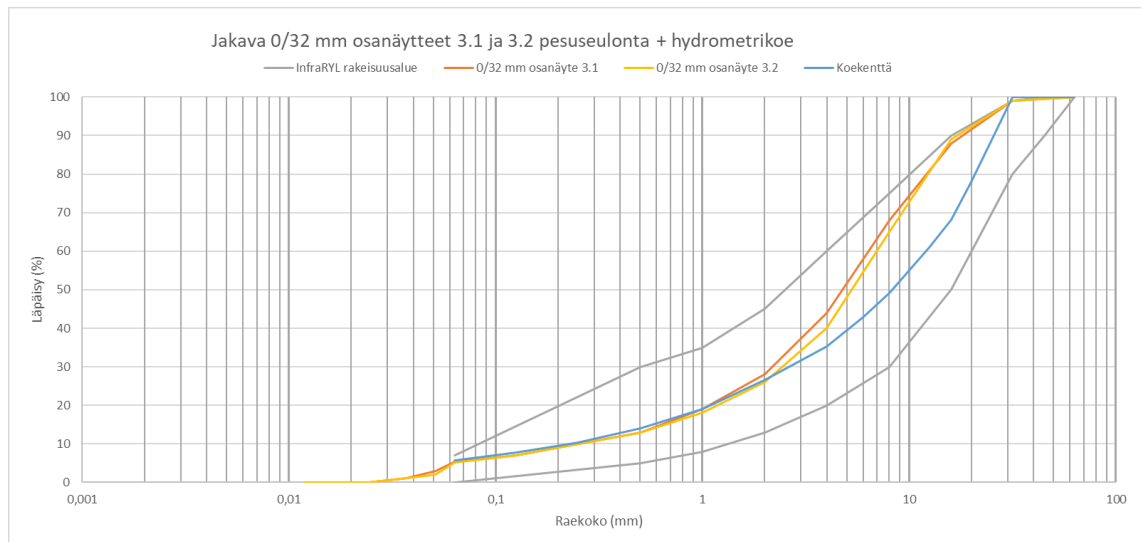
Rakeisuustuloksia tarkasteltaessa on huomioitava näytteenoton merkitys, sillä valmiista tiivistetystä rakenteesta on hankala ottaa edustavaa näytettä. Huomioitavaa on myös, että hienoneminen tiivistyksen aikana ei kuvaa materiaalin hienonemista oikeassa rakenteessa liikennekuormien alla. Liikenteen aiheuttaman hienonemisen tarkkailua varten asennettiin rakenteeseen hienonemissäkit, joiden tuloksia voidaan tarkastella vasta muutaman vuoden päästä, kun säkit kaivetaan rakenteesta. Tässä vaiheessa voidaan kuitenkin todeta, että kuonamateriaalit eivät hienone rakentamisen aikana siinä määrin, että hienonemista tarvitsi varoa työmaalla.



KUVIO 11. Suodatinkerroksen 0-2 mm kuonan rakeisuus ennen rakentamista ja koekentän tiivistyksen jälkeen.



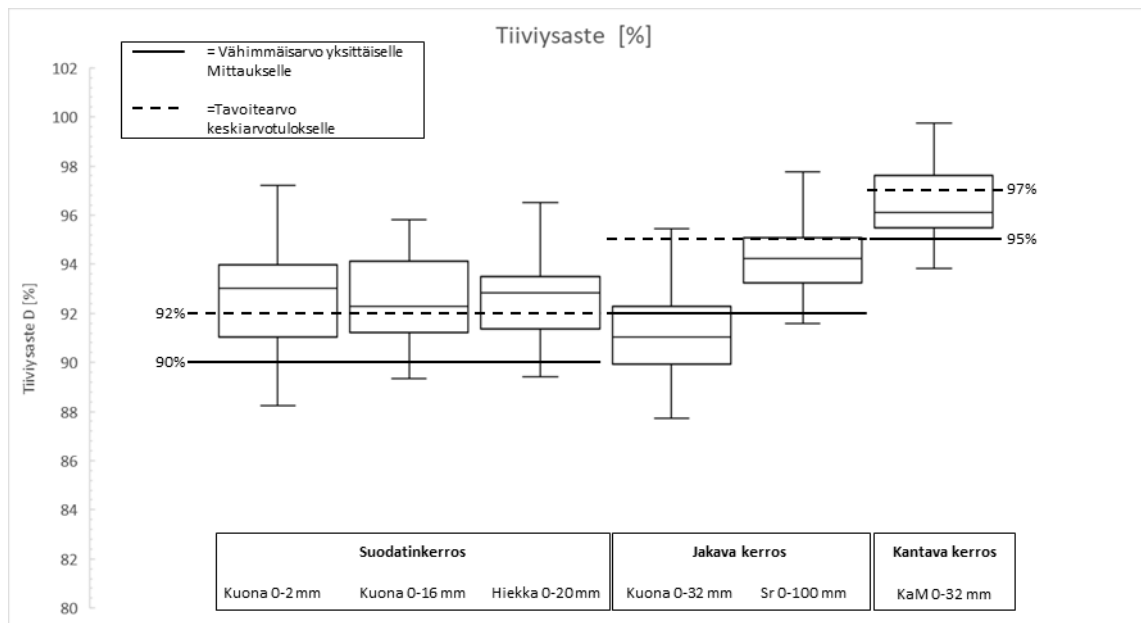
KUVIO 12. Suodatinkerroksen 0-16 mm kuonan rakeisuus ennen rakentamista ja koekentän tiivistyksen jälkeen.



KUVIO 13. Jakavan kerroksen 0-32 mm kuonan rakeisuus ennen rakentamista ja koekentän tiivistyksen jälkeen.

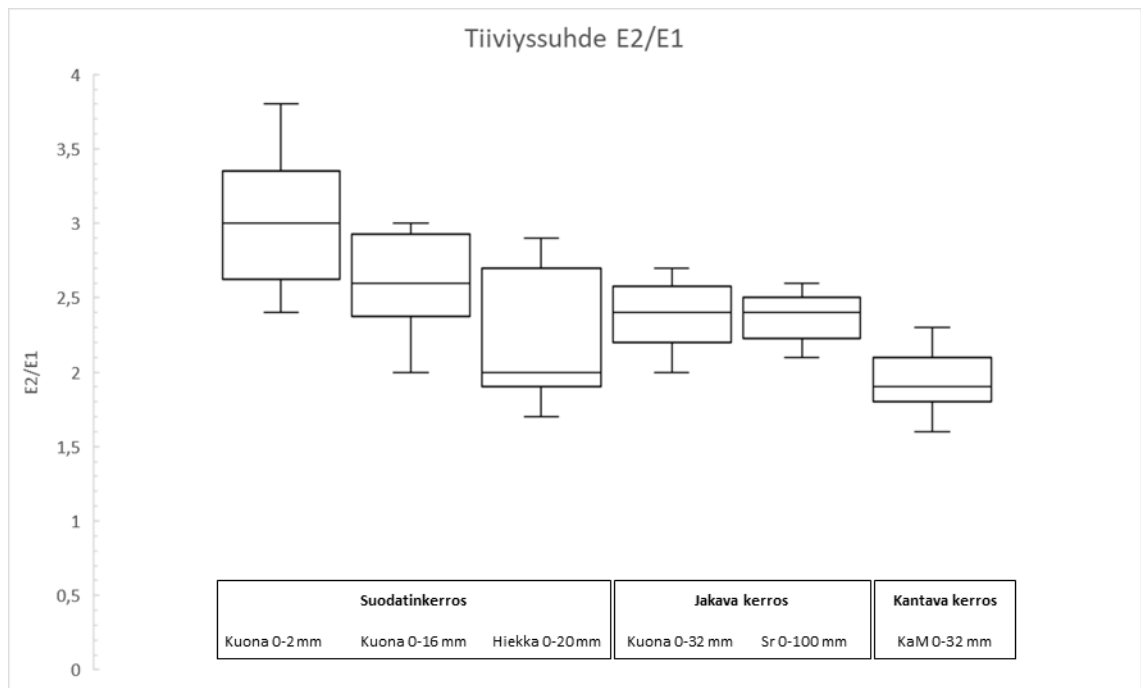
6.2.2 Tiiviys

Troxler-mittauksista lasketut tiiviyssasteet on esitetty kuviossa 14. ja tiiviyssasteiden laskennassa käytetyt parametrit taulukossa 2. InfraRYL:ssä esitettyjä tiiviyssuhteita vastaaville luonnonkiviaineksista rakennetuille rakennekerroksille ei kaikilta osin saavutettu.



KUVIO 14. Rakennekerrosten tiiviyysasteet D, ja InfraRYL tiiviyysastevaatimukset luonnonkiviaineksista rakennetuille rakennekerroksille.

Levykuormituskokeiden perusteella määritetyt E2/E1 tiiviyssuhteet on esitetty kuviossa 15. Pelkkien E2/E1 arvojen perusteella vaikuttaisi, että suodatinkerroksen materiaaleja ei onnistuttu tiivistämään hyvin. Kuitenkin kovin tasarakeisilla materiaaleilla E1 arvo jää helposti matalaksi, jolloin myös suhdeluku kasvaa. Erityisesti suodatinkerroksen osalta kelpoisuuden osoittaminen perustuu InfraRYL:ssä ensisijaisesti tiiviyysasteeseen. Suodatinkerroksessa tiiviyysaste täytti vaatimukset varsin hyvin, toisaalta kantavan kerroksen osalta ei päästy aivan tavoitteisiin. Saatujen tulosten perusteella vaikuttaisi siltä, että Troxler-säteilymittaus sopii paremmin hienorakeisen kuonan tiiviyden mittaukseen ja levykuormituskoe karkearakeisemmän kuonan mittaukseen.



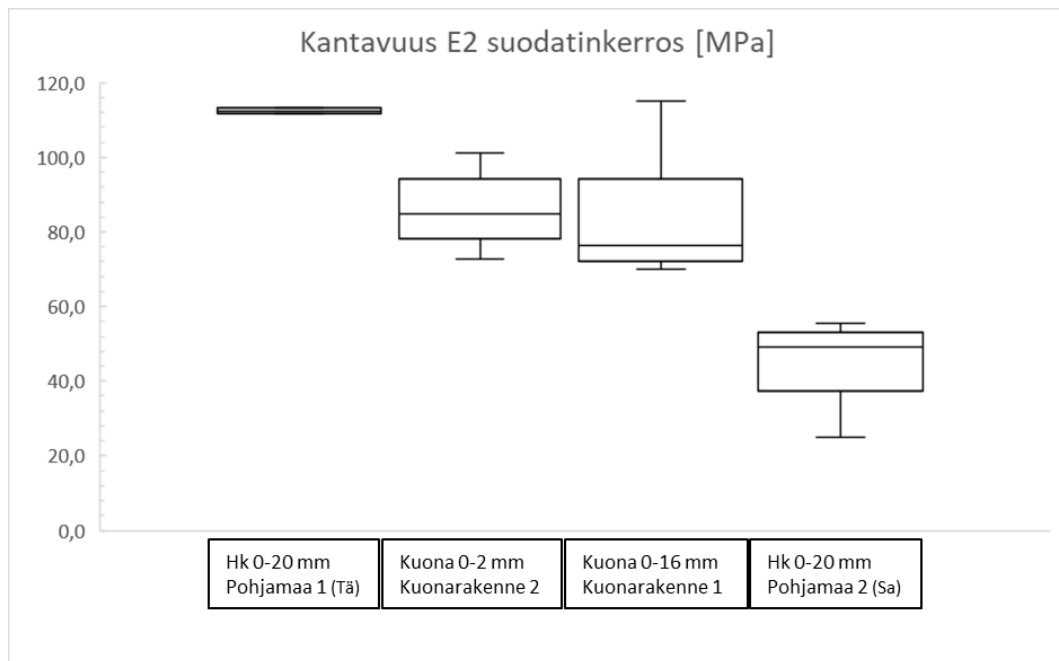
KUVIO 15. Levykuormituskokeilla määritetyt tiiviyssuhteet E2/E1 kunkin rakennekerroksen päältä.

Jatkoa varten voisi kokeilla kuonan tiivistämistä ohuemmissa kerroksissa, jolloin saavutettaisiin todennäköisesti parempia tuloksia tiiviyden suhteen. Esimerkiksi 400 mm paksuinen jakava kerros voitaisiin jakaa tiivistettäväksi kahdessa osassa. Huomiota on kiinnitettävä myös siihen, että työmaalle toimitettava kuona on oikeassa vesipitoisuudessa. Tiiviyssmittausten tuloksiin ja niiden suureen vaihteluväliin erityisesti suodatinkerroksessa vaikutti se, että materiaalia kasteltiin työmaalla, minkä johdosta kosteus ei ollut täysin tasainen rakenteessa.

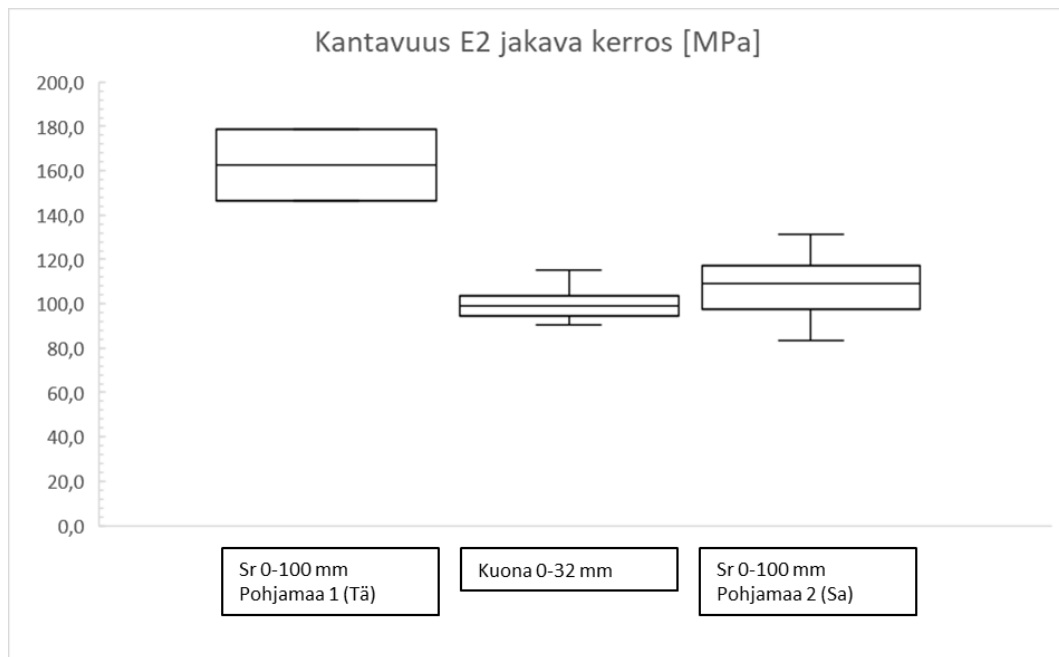
6.2.3 Kantavuus

Pohjamaan kantavuuksien vaihteluväli oli suuri, sillä toisessa päässä pohjamaa oli pintaosistaan selkeästi rakennettua täyttöä, keskiosistaan hiekkamoreenia ja loppupäästä savea. Laskentaa varten pohjamaa jaettiin kolmeen osaan, joille arvioitiin pohjamaan päältä tehtyjen levykuormituskokeiden perusteella edustavat kantavuusarvot, 35 MPa savelle (levykuormituspisteet 15-24), 50 MPa hiekkamoreenille (levykuormituspisteet 5-14) ja 150 MPa täytön osudelle (levykuormituspisteet 1-4).

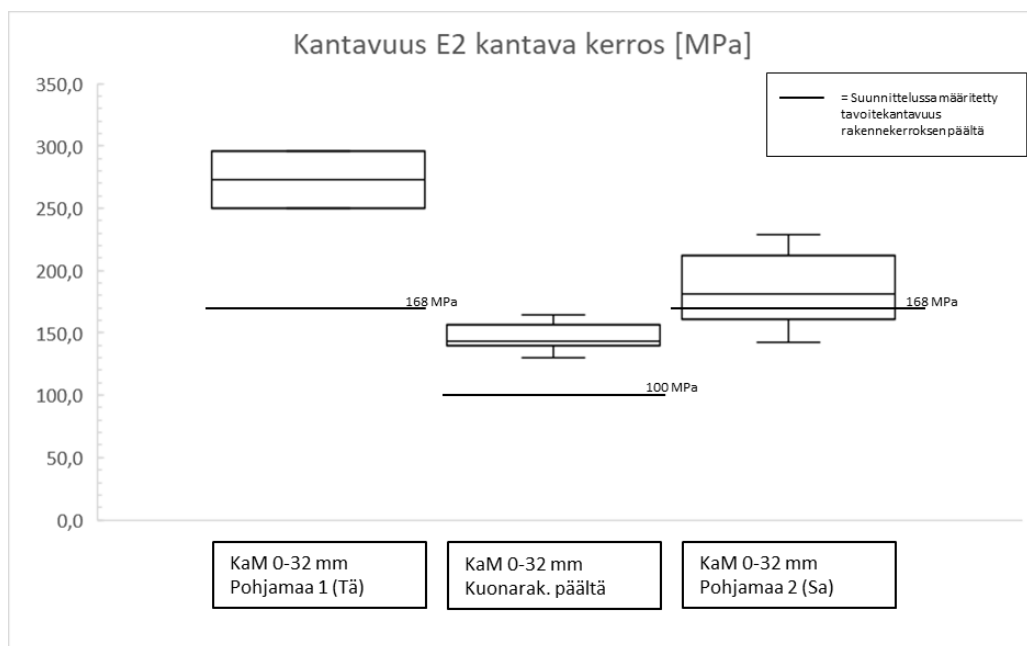
Levykuormituskokeilla saadut kantavuustulokset kunkin eri rakennekerrostyyppin päältä on esitetty kuvioissa 16...18. Kantavalle kerrokselle oli määritetty suunnitteluvaiheessa kantavuusvaatimukseksi 100 MPa kuonarakenteen päältä ja 168 MPa referenssirakenteen päältä. Vaatimukset saavutettiin sekä kuonarakenteen että referenssirakenteen osalta, mikä kertoo rakennusprosessin ja tiivistyksen onnistumisesta. Suodatinkerroksesta huomioitavaa on, että referenssirakenne sijoittui toisessa päässä rakennetta hyvän kantavuuden täytön päälle, ja toisessa päässä heikomman kantavuuden saven päälle. Tulokset on siksi eroteltu pohjamaan perusteella referenssirakenteen osalta.



KUVIO 16. Levykuormituskokeilla mitatut kantavuudet E2 suodatinkerroksen päältä.



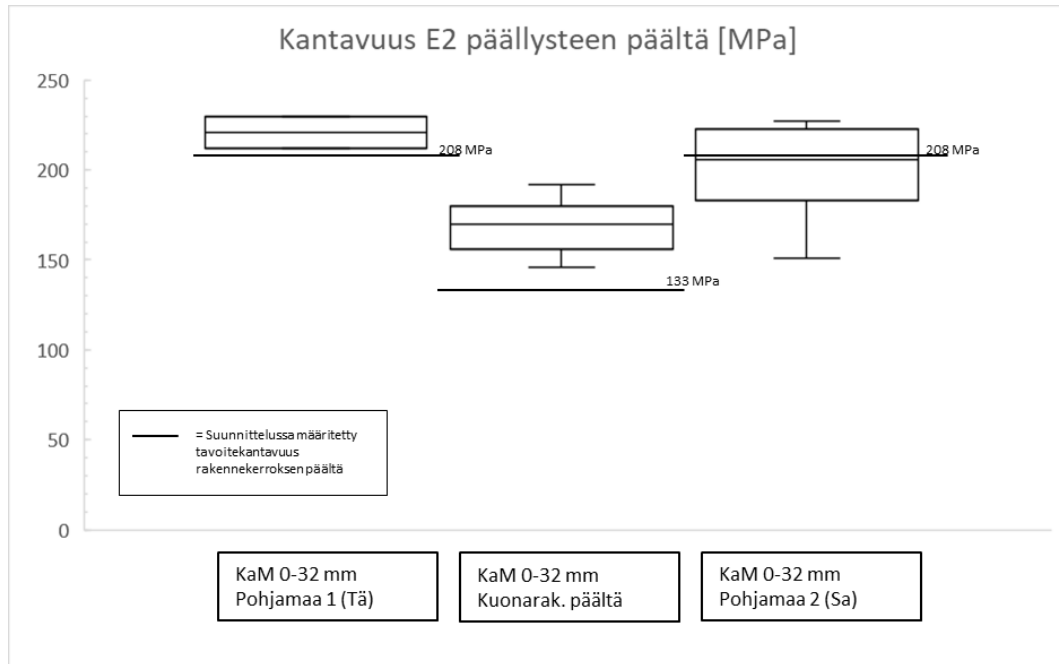
KUVIO 17. Levykuormituskokeilla mitatut kantavuudet E2 jakavan kerroksen päältä.



KUVIO 18. Levykuormituskokeilla mitatut kantavuudet E2 kantavan kerroksen päältä.

Raskaalla pudotuspainolaitteella mitatut kantavuudet päällysteen päältä, sekä suunnitteluvaiheessa arvioidut tavoitekantavuudet on esitetty kuviossa 19. Tuloksiin vaikuttaa se, että päällysteeksi valittiin ohut AB 16 50 mm, jotta mahdolliset muodonmuutokset näkyvät myöhemmässä tarkkailussa selvemmin. Aiemmassa tutkimuksessa on todettu kuonamateriaalien jäykkyys- ja lujuusominaisuuksien

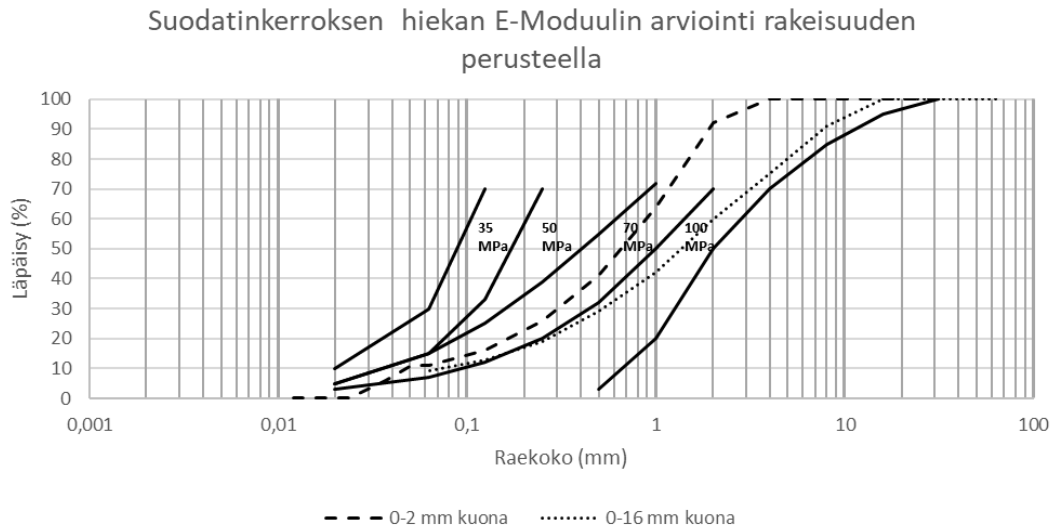
parantuvan rakenteessa ajan myötä (Sormunen, 2017), ja se on oletettavaa myös tässä rakenteessa.



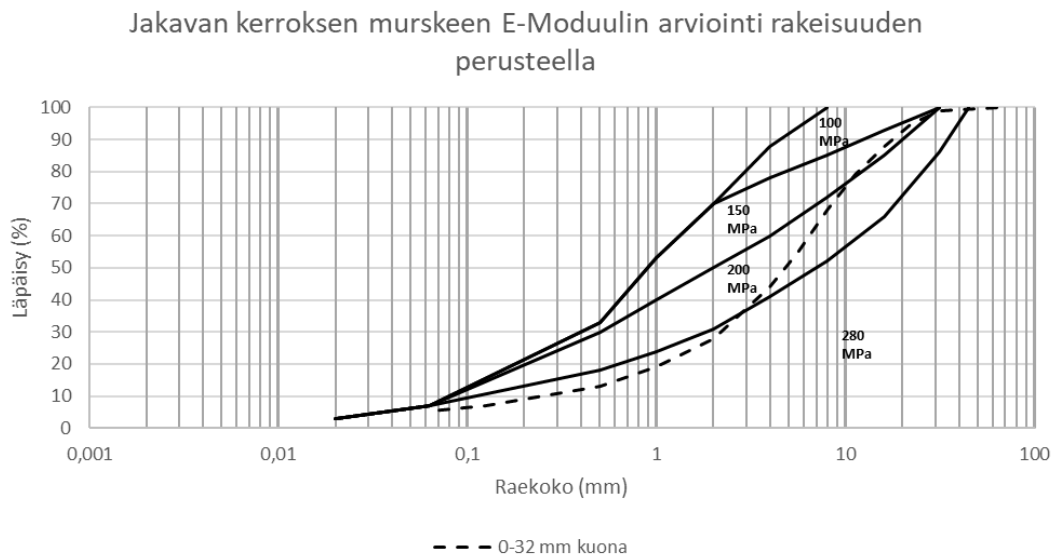
KUVIO 19. Raskaalla pudotuspainolaitteella mitattu kantavuus E2 päällysteen päältä.

6.2.4 E-Moduulit

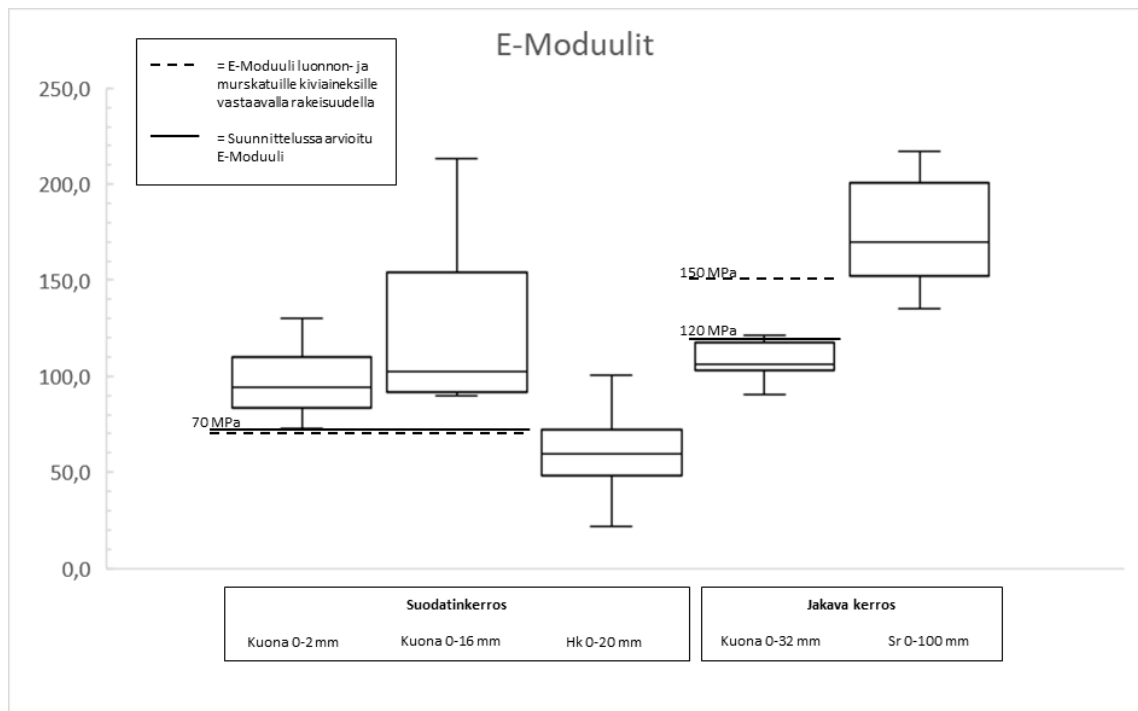
Koerakenteessa käytetyille pohjakuonatuotteille takaisinlaskettiin E-Moduuliarvot Odemarkin menetelmällä kantavuusmittausten tuloksista. Kuviossa 22. on esitetty takaisinlasketut E-Moduuliarvot kuonatuotteille ja referenssirakenteen tuotteille. Vertailuarvona on esitetty vastaavan rakeisuuden perusteella kuvioista 20. ja 21. arvioidut luonnonkiviainesten E-Moduuliarvoja sekä suunnitteluvaiheessa arvioituja E-Moduuliarvoja. Tiehallinnon ohjeen mukaan E-Moduuliarvoksi valitaan heikoin arvo, jonka alueella rakeisuuskäyrä käy (Tiehallinto, 2005).



KUVIO 20. Suodatinkerroksen kuonatuotteiden (0-2 mm ja 0-16 mm) rakeisuuskäyrät, sekä suodatinkerroksen luonnonhiekan E-moduuleja edustavat rakeisuusalueet. (Tiehallinto, 2005)



KUVIO 21. Jakavan kerroksen kuonan (0-32 mm) rakeisuuskäyrä, sekä kalliomurskeiden E-Moduuleja edustavat rakeisuusalueet. (Tiehallinto, 2005)



KUVIO 22. Takaisinlasketut Odemarkin E-Moduuliarvot koerakenteen rakennekerrosten tuotteille

Referenssirakenteen luonnonkiviainesten takaisinlasketut E-Moduuliarvot vastaavat hyvin taulukkoarvoja luonnonkiviaineksille, mistä voidaan päätellä myös kuonamateriaaleille laskettujen E-Moduuliarvojen olevan edustavia.

Kuonamateriaaleille määritettiin mitoitusmoduulit käyttäen vertailuparitekniikkaa ja kenttämittauksien perusteella takaisinlaskettuja kuonamateriaalien ja referenssirakenteen luonnonkiviainesten E-Moduuliarvoja. Laskenta tehtiin käyttäen seuraavia laskentakaavoja (Kaava 1. ja Kaava 2.) Väyläviraston luonnosvaiheessa olevasta 'Uusiomateriaalien käyttö väylärakentamisessa' -ohjeesta (Väylävirasto, 2019). Lasketut mitoitusmoduulit on esitetty taulukossa 12.

Kaava 1: (Jos laboratoriossa tutkitun uusiomateriaalin moduulin hajonta on pienempi kuin vastaavalla luonnonmateriaalilla)

$$E = E_t \cdot \frac{E_p}{E_{pt}}$$

jossa:

E = Uuden materiaalin alustava mitoitusmoduuli

E_t = Uuden materiaalin takaisinlaskettu moduuli

E_{pt} = Perinteisen materiaalin takaisinlaskettu moduuli

E_p = Perinteisen materiaalin mitoitusmoduuli

Kaava 2: (Jos laboratoriossa tutkitun moduulin vaihtelu on suurempi kuin perinteisellä materiaalilla)

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

jossa:

S_t = Uuden materiaalin takaisinlasketun moduulin keskihajonta

S_{pt} = Perinteisen materiaalin takaisinlasketun moduulin keskihajonta

Kuona 0-2 mm (hajonta pienempi kuin hk 0-20 mm → kaava 1.)

$$E = E_t \cdot \frac{E_p}{E_{pt}} = 96,8 \cdot \frac{70}{60,7} = 111,5 \sim 110$$

Kuona 0-16 mm (hajonta suurempi kuin hk 0-20 mm → kaava 2.)

$$E = \frac{E_p}{E_{pt} - S_{pt}} \cdot (E_t - S_t) = \frac{70}{60,7 - 23,96} \cdot (122,4 - 47,8) = 142,1 \sim 140$$

Kuona 0-32 mm (hajonta pienempi kuin sr 0-100 mm → kaava 1.)

$$E = E_t \cdot \frac{E_p}{E_{pt}} = 108,2 \cdot \frac{200}{168} = 128,8 \sim 130$$

TAULUKKO 11. Kuonamateriaaleille vertailuparitekniikalla lasketut mitoitusmoduulit, mittaustuloksista takaisinlaskettujen E-Moduulien keskiarvo, rakeisuuden perusteella arvioitujen E-moduulit (kuviot 20-21), sekä Tampereen yliopistolla kolmiakσιαalikokeilla määritetyt resilient-moduulit pääjännityksen summan ollessa 200 kPa.

<i>Kuona- tuote</i>	Vertailuparitekniikalla laskettu mitoitusmoduuli E [MPa]	Kenttämittauksista takaisinlaskettu E-Moduuli (keskiarvo) [MPa]	Rakeisuuden perusteella arvioitu E-Moduuli [MPa]	Resilient-moduuli kolmiakσιαalikokeista, pääjännityksen summa 200kPa [MPa]
<i>0/2 mm</i>	110	96,8	70	126
<i>0/16 mm</i>	140	122,4 (104)*	70	95**
<i>0/32 mm</i>	130	108,2	150	195

* 0-16 mm kuonajakeen mittaustuloksissa oli yksi huomattavasti muita korkeampi tulos. Sulkeissa ilmoitettu luku on mitausten keskiarvo tämä yksittäinen korkeampi tulos poistettuna.

** 0-16 mm tulos on oletettua alaisempi, syynä tähän voisi olla esimerkiksi alhainen Proctor-kokeen tulos, joka on vaikuttanut näytekapaleen tiiveysasteeseen (näytteet tiivistettiin 86% tiiveyteen Proctor-kokeen tuloksesta).

Vertailuparitekniikalla lasketut mitoitusmoduulit ovat suodatinkerroksen materiaaleille korkeammat kuin niille suunnitteluvaiheessa arvioitu E-Moduuliarvo 70 MPa. Mitoitusmoduulin suuruutta arvioitaessa on huomioitava muuttujat, jotka voivat vaikuttaa nostamalla tai laskemalla mitoitusarvoa. Tuloksiin vaikuttaa esimerkiksi mitausten onnistuminen ja ajoitus. Kuonamateriaali voi mahdollisesti lujittua rakenteessa nopeammin kuin luonnonmateriaali, etenkin jos työmaalle toimitetut luonnonmateriaalit eivät ole olleet optimivesipitoisuudessa. Kuten kuvasta 9. nähdään, kaikkia levykuormituskokeita ei onnistuttu mittaamaan täysin samasta sijainnista. Tämä aiheuttaa myös epätarkkuutta laskentaan, vaikka koepisteitä olikin useita jokaisesta erilaisesta rakenteesta.

Työmaalla suodatinkerroksen luonnonhiekan tiivistyksessä oli jonkin verran hankaluutta, koska se toimitettiin liian kuivana työmaalle. Mikäli referenssirakenteesta olisi saatu paremman tiivistyksen ansiosta korkeampia kantavuusarvoja, olisi se vertailuparitekniikalla laskettaessa pienentänyt suodatinkerroksen kuo-

natuotteille laskettavaa mitoitusarvoa, eli vertailuparitekniikan kaavoja käytettäessä on huomioitava myös referenssirakenteen tiivistymisen onnistuminen. Mitoitusmoduulien arvioinnissa on huomioitava myös se, että aiempien tutkimustulosten perusteella kuonamateriaalien odotetaan lujittuvan rakenteessa ajan myötä. Tässä työssä esitellyt mittaukset suoritettiin rakentamisen aikana.

Kenttämittausten ja laboratoriokokeiden tulosten sekä vertailuparitekniikalla laskettujen arvojen perusteella kuonatuotteiden alustaviksi E-Moduularvoiksi esitetään 0-2 mm kuonalle 85 MPa, 0-16 mm kuonalle 95 MPa ja 0-32 mm kuonalle 110 MPa. Nämä ovat alhaisempia kuin mitä mittaustulosten perusteella laskettiin, koska ne sisältävät varmuuskertoimen ja ottavat huomioon sen, että materiaali tulee todennäköisesti lujittumaan vielä rakenteessa.

6.3 Mittaukset rakentamisen jälkeen

Rakentamisen jälkeen koerakennetta tarkkaillaan vielä pitkäaikaiskestävyyden ja routivuuden osalta. Mittausmenetelmät sekä suunniteltu seuranta-aikataulu on kuvattu tässä raportissa. Tutkimusten tulosten raportointi on rajattu tästä työstä pois.

6.3.1 Kantavuus

Vähintään kolmen vuoden ajan rakentamisen jälkeen rakenteen kantavuutta seurataan päällysteen päältä tehtävillä kantavuusmittauksilla kerran tai mahdollisesti kaksi kertaa vuodessa. Mittaukset toteutetaan raskaalla pudotuspainolaitteella. Mittauksia tehdään kerralla yhteensä 24 kpl, 12 kpl kuonarakenteesta sekä 12 kpl referenssirakenteesta. Mittauksia suoritetaan tasaisesti molemmilta kaistoilta, ja ne suoritetaan samoista kohdista. Mittauspisteiden sijainnit on esitetty liitteessä 4. Mittaukset pyritään tekemään aina samaan aikaan vuodesta (esimerkiksi syksyllä ennen syyssateiden alkua), jotta saadaan tietoa materiaalin käyttäytymisestä rakenteessa ajan myötä. Saatujen mittaustulosten avulla takaisin lasketaan eri rakennekerrosmateriaalien E-moduuliarvoja ajan funktiona. Mikäli mittauksia toteutetaan kaksi kertaa vuodessa, mittaukset ajoitetaan eri vuodenaikoihin (esim. kevät ja syksy), jolloin voidaan tutkia myös vuodenaikavaihteluiden vaikutusta rakenteeseen.

Kantavuusmittaukset asfaltin päältä on tehty ensimmäisen kerran pian rakentamisen jälkeen. Näistä mittauksista on esitetty tulokset kuviossa 19.

6.3.2 Roudan syvyys

Koerakenteeseen asennettiin 3 kpl etäluettavia lämpötila-antureita. Antureiden sijainnit on esitetty kuvassa 6. Anturit sijoitettiin siten, että kussakin erilaisessa rakennetyypissä on yksi anturi. FWS asensi ennen rakentamista antureita varten suojaputket, jotka tiivistettiin osaksi rakennetta. Finmeas Oy:n toimesta asennettiin suojaputkiin asfaltoimisen jälkeen kuhunkin yksi automaattisesti luettava lämpötilasauva, jossa on kalibroituja antureita 10 cm välein. Lämpötiladata siirtyy tien

reunaan asennettuihin ohjausyksiköiden kautta luettavaksi tietokoneella tai mobiililaitteella. Lämpötilan kehittymistä rakenteessa seurataan vähintään yhden talven ajan. Seuraamista jatketaan tarvittaessa pidemmälle, mikäli rakentamisen jälkeinen talvi 2020-2021 ei vastaa sääolosuhteiltaan ns. normaalia talvea.

6.3.3 Routanousu ja vaurioinventointi

Koerakenteen routanousua tarkkaillaan vaaituksen avulla marraskuun 2020 puolivälistä huhtikuun 2021 puoleen väliin saakka, tai niin kauan, kunnes routa on sulanut. Mittauspisteitä on yhteensä 60 kpl, 20 kpl kummassakin erilaisessa kuonarakenteessa sekä 20 kpl referenssirakenteen kohdalla. Samoja mittauskohtia tulee käyttää jokaisella mittauskerralla, joten mittauspaikkojen sijainnit tulee mitata takymetrillä. Lisäksi mittauspisteet merkitään asfalttiin.

Jokainen vaaitustaso kirjataan ylös jokaisella mittauskerralla, jotta voidaan tarkastella mahdollista routanousua suhteessa roudan tunkeutumissyvyyteen tarkkailujakson aikana. Routanousumittauksia tehdään vähintään kolmen talven ajan. Vaaitustulosten ja roudan syvyyssmittausten avulla lasketaan materiaaleille eristävyyskertoimia myöhemmin määriteltävällä tavalla.

Lisäksi tehdään vaurioinventointi keväisin roudan sulamisen jälkeen huhti- tai toukokuussa riippuen kevään etenemisestä. Inventoinnin aikana tien pinnan tulee olla lumeton ja jäätön, mieluiten hieman kosteana, koska tällöin mahdolliset vauriot ovat parhaiten näkyvissä. Tarkastelualueena on liikenteelle alttiina ollut osuus eli koko ajoradan leveys, pl. 20 cm päällysteen reunasta. Pientareilta inventoidaan ainoastaan reunapainumat. Kaarteissa otetaan huomioon vauriot aivan päällysteen reunaan saakka, koska siinä liikenteen ajorata voi olla lähempänä tien reunaa.

Arvioitavat vauriotyypit ovat:

- pituushalkeamat
- poikkihalkeamat
- verkkohalkeamat
- reiät + purkaumat
- leveät halkeamat
- reunapainuma

Reunapainuma ja leveät halkeamat arvioidaan juoksumetreinä ja muut vauriotyypit prosentteina päällysteen kokonaispinta-alasta. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että arvioidaan ehjän/vaurioituneen pinta-alan osuutta ja jaetaan vaurioituneen osuuden vallitsevien vauriotyyppien kesken oikeassa suhteessa.

Vaurioinventoinnissa saadaan laskennallisesti vauriosumma ($m^2/100 m$), joka kuvastaa rikkinäisen päällysteen pinta-alaa 100 m koejaksolla. Vauriosumma lasketaan seuraavalla kaavalla, jossa V on kunkin vauriotyyppin vauriomäärä:

$$VS = [0,1 \cdot 5 \cdot (V_{\text{pakkask.}}) + 0,5 \cdot 5 \cdot (V_{\text{muu poikkih.kapea}}) + 1,0 \cdot 5 \cdot (V_{\text{muu poikkih.leveä}}) + 0,5 \cdot (V_{\text{pituush.}}) + 1,0 \cdot (V_{\text{pituush.leveä}}) + 0,1 \cdot (V_{\text{saumah.kapea}}) + 0,5 \cdot (V_{\text{saumah.leveä}}) + 1,0 \cdot (V_{\text{verkkoh.}}) + 1,0 \cdot (V_{\text{reikä}}) + 1,0 \cdot (V_{\text{purkauma}})]/100$$

– metrinen lukumäärä

Vaurioinventoinnin suunnittelussa on käytetty soveltuvin osin apuna Tiehallinnon julkaisua 13/1994 (Päällystevaurioiden inventointiohje). Em. ohjeessa on kuvattu tarkemmin, miten eri vauriotyypit inventoidaan, joten työn toteuttajan tulee tutustua ko. ohjeeseen ennen työn aloittamista. Mahdolliset vauriot kuvataan ja kirjataan ylös myöhemmin laadittavalle lomakkeelle. Tiedot tallennetaan Fortum Waste Solutions Oy:n yhteiselle Sharepoint-sivustolle.

7 YHTEENVETO

Koerakenteen rakentaminen onnistui pääsääntöisesti hyvin. Rakentamisessa pystyttiin käyttämään normaalia maarakennustyömaan kalustoa, ja kuonamateriaaleilla rakentaminen oli samankaltaista kuin luonnonkiviaineiksilla. Suoritetut tutkimukset ja mittaukset olivat laajat, ja koerakennetta ja saatuja tuloksia voidaan hyödyntää referenssinä tulevaisuuden projektien suunnittelussa ja toteutuksessa. Koerakenteen toimintaan liittyvien johtopäätöksien tekoon edesauttoi rakentamisen aikaisen dokumentoinnin huolellinen suunnittelu etukäteen.

Rakentamisprosessissa nousi esiin, että työmaalle toimitettavien kuonamateriaalien on oltava kosteudeltaan mahdollisimman lähellä optimivesipitoisuutta, jotta ne saadaan tiivistettyä rakenteeseen onnistuneesti. Tämä seikka ei kuitenkaan poikkea luonnonkiviaineiksista, vaikka kuonamateriaaleilla on korkeampi optimivesipitoisuus, sillä hankaluutta oli myös liian kuivana työmaalle toimitetun hiekan tiivistämisessä.

Kenttätutkimusmenetelmistä kantavuusmittauksiin käytetyt Loadman- kevyt pudospainolaite sekä levykuormituskoe kaivinkonetta vastapainona käyttäen soveltuivat molemmat hyvin kuonamateriaaleille. Troxler- säteilymittauslaitteen käyttö tiiviiden mittaukseen osoittautui hankalaksi, sillä mittaus näyttää kuonien osalta väärä vesipitoisuuksia. Troxler-mittausten tuloksia ei saada heti työmaalla käyttöön, vaan mittauksen yhteydessä kuonarakenteesta on otettava materiaalinäyte, josta tutkitaan laboratoriossa vesipitoisuus ja lasketaan korjatut tiiviyssasteet. Troxler-mittaus osoittautui kuitenkin suodatinkerroksen materiaaleille paremmaksi menetelmäksi tiiviiden mittaukseen kuin levykuormituskoe.

Laboratoriotuloksia tarkasteltaessa korostui se, että käytössä olevat menetelmät on suunniteltu ensisijaisesti luonnonkiviainesten tutkimiseen. Kuonalle ja muille uusiomateriaaleille ei voida välttämättä käyttää samoja vaatimuksia ja raja-arvoja kuin luonnonkiviaineiksille, vaan materiaalien toimivuus rakenteissa osoitetaan ensisijaisesti kenttätutkimuksilla. Jatkossa olisi tarpeen, että kuonille ja uusiomateriaaleille olisi olemassa yleisesti hyväksytyjä raja-arvoja niiden teknisten kelpoisuuksien arviointiin, mikä helpottaisi niiden hyödyntämistä rakentamishankkeissa huomattavasti.

Tämän työn perusteella voidaan todeta, että tutkitut kuonamateriaalit soveltuvat käytettäväksi tierakenteiden alemmissa rakennekerroksissa. Kantavuustulokset ja niiden perusteella kuonatuotteille lasketut E-Moduuliarvot vastasivat ko. rakennekerroksille asetettuja vaatimuksia. Referenssirakenteen luonnonkiviainek-sille tehtyjen vertailulaskelmien perusteella tuloksia voidaan pitää luotettavina. Kenttämittausten ja laboratoriokokeiden tulosten sekä vertailuparitekniikkaa käyttäen tehtyjen laskelmien perusteella kuonatuotteiden alustaviksi E-Moduuliarvoiksi esitetään 0-2 mm kuonatuotteelle 85 MPa, 0-16 mm kuonatuotteelle 95 MPa ja 0-32 mm kuonatuotteelle 110 MPa. Routivuuden osalta avoimeksi jäi, miten kuonien verrattain hyvä lämmöneristävyys ja vedenläpäisevyys, ja toisaalta korkea vedenimukyky sekä routimiskerroin todellisuudessa vaikuttavat kuonatuotteiden routivuuteen tierakenteessa.

Koerakenteen tarkkailu jatkuu pitkäaikaiskestävyyden sekä routivuuden osalta. Jatkotutkimuksissa tarkkaillaan tierakenteen kantavuuden kehitystä, seurataan roudan syvyyttä rakenteeseen asennetuilla lämpötila-antureilla, tehdään routanousu ja vaurioinventointia sekä tutkitaan kuonamateriaalien hienonemista liikennekuormien vaikutuksesta kaivamalla ylös rakenteeseen asennetut hienonemissäkit. Tämä työ ja saadut tulokset laboratoriokokeista ja kenttätutkimuksista luovat pohjan, johon koerakenteelle tehtävien jatkotutkimusten tuloksia voidaan vertailla ja tutkia syy-seuraussuhteita pitkäaikaiskestävyydelle ja routivuudelle.

Vastaavaa tutkimusta kuonatuotteiden routivuudesta tierakenteessa ei ole tehty kattavasti muissa maissa eikä Suomessa, joten tulokset tulevat olemaan arvokkaita arvioitaessa kuonamateriaalien soveltuvuutta väylärakenteisiin. Jatkotutkimuksena olisi kiinnostavaa tutkia kuonan kestävyyttä myös kantavassa kerroksessa erilaisten rasiusten alla, esimerkiksi päällystetyllä kevyen liikenteen väylällä, jossa kantavuusvaatimukset ovat vähäisemmät. Lisäksi koerakentamisessa rakenteen toteutuskustannukset eivät vastaa todellisia, joten kiinnostavaa olisi myös jatkotutkimus koskien kuonatuotteilla rakentamisen kustannuksia ja kulurakennetta normaalilla työmaalla. Tutkimustieto kuonamateriaalien ominaisuuksista toivottavasti rohkaisee hyödyntämään materiaaleja laajemmin entistä korkeatasoisemmissa maarakennuskohteissa.

LÄHTEET

ASM Kiviainespalvelu Oy. 2017. Kiviainesten suoritusasoilmoitukset. Luettu 10.10.2020. <http://asmkiviainespalvelu.fi/wp-content/uploads/2018/01/Suoritusasoilmoitukset-Vantaa.pdf>

Blasenbauer, D. Huber, F. Lederer, J. ym. 2020. Legal Situation and Current Practice of Waste Incineration Bottom Ash Utilisation in Europe. Luettu 28.9.2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X19307275?via%3Dihub>

Bunge, R. 2017. Recovery of Metals from Waste Incinerator Bottom Ash. Luettu 27.9.2020. https://www.igenass.ch/fileadmin/user_upload/igenass.ch/Dokumente/Publikationen/Metals_from_MWIBA_2017.pdf

CEWEP. 2019. Confederation of European Waste-to-Energy Plants. Bottom Ash Fact Sheet. Data päivitetty 5/2019. Luettu 22.9.2020. <https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2017/09/FINAL-Bottom-Ash-factsheet.pdf>

de Larrard, F. Colina, H. 2019. Concrete Recycling. New York: CRC Press, Taylor & Francis Group.

Destia Oy. 2019. OKTO-rakennustuotteiden suunnittelu- ja rakentamishoje tie-, katu- ja maarakenteissa. Luettu 20.10.2020. https://www.destia.fi/media/tiedostot/pdf-tiedostot/okto-suunnittelu-ja-mitoitusohje_13022020.pdf

Foamit. 2012. Suunnittelu ja rakennusohje. Luettu 20.10.2020. http://www.foamit.fi/wp-content/uploads/2016/10/Suunnittelu-ja_Rakennusohje.pdf

Fortum Oy. Käsittelyprosessien kuvaukset. Luettu 20.8.2020. <https://www.fortum.fi/kierratys-ja-jatepalveluiden-kasittelyprosessien-kuvaukset-seka-sertifikaatit>

InfraRYL. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. 2020/1.

ISSMFE. 1989. The International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. Technical Committee on Frost TC-8. Luettu 20.10.2020. https://www.issmge.org/uploads/publications/1/33/1989_02_0171.pdf

JLY – Jätelaitosyhdistys ry. Tuhkien käsittely. Luettu 20.8.2020. <http://vanha.jly.fi/energia41.php?treeviewid=tree3&nodeid=41>

Jätteenpolttoasetus. 15.5.2003/362. Valtioneuvoston asetus jätteen polttamisesta. 15.5.2003/362

Kaartinen, T. Laine-Ylijoki, J. Wahlström, M. 2007. Jätteen termisen käsittelyn tuhkien ja kuonien käsittely- ja sijoitusmahdollisuudet. Helsinki: VTT.

Kaartinen, T. Laine-Ylijoki, J. Koivuhuhta, A. Korhonen, T. Luukkanen, S. Mörsky, P. Neitola, R. Punkkinen, H. Wahlström, M. 2011. Pohjakuonan jalostus uusiomateriaaliksi. Kuopio: VTT.

Kallesøe, J. Dyhr-Jensen, S. 2018. Recovery of Resources in Bottom Ash. Luettu 28.9.2020. https://www.vivis.de/wp-content/uploads/RTU/2018_RTU_39-46_Dyhr-Jensen.pdf

KIVO ry. 2017. Suomen kiertovoima ry. Jätehuolto ja kiertotalous. Luettu 10.8.2020. <https://kivo.fi/yymmarramme/jatehuolto-ja-kiertotalous/>

Leivo, V. Rantala, K. 2000. Maanvaraisten alapohjarakenteiden kosteuskäyttäytyminen. Julkaisu 106, Rakennustekniikan osasto, Tampereen teknillinen korkeakoulu.

Liikenneviraston ohjeita 38/2018. Tierakenteen suunnittelu. 28.11.2018

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 18/2016. Väylärakenteiden valtakunnallinen kiviainestutkimus. 17.3.2016.

Lounavoima Oy. Tietoa laitoksesta. Luettu 10.8.2020. <https://www.lounavoima.fi/laitos/>

MARA-asetus. Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. 7.12.2017/843

PANK. 2016. Päällystealan neuvottelukunta. Soveltamisohje vedenimeytymiskorkeuden määrittämiseksi. Liite menetelmään SFS-EN 1097-10 vedenimeytymiskorkeus.

Ramboll Finland Oy. 2008. Jätteen energiakäyttöhanke. Ympäristövaikutusten arviointiselostus. Luettu 10.9.2020. https://www.ymparisto.fi/fi-fi/Asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/Ymparistovaikutusten_arviointi/YVAhankkeet/Jatteen_energiakayttohanke_Westenergy_Oy_Ab_Stormossen_Musta-saari

RIL. 2013. 261-2013 Routasuojaus – rakennukset ja infrarakenteet.

Salaojayhdistys. 2013. Hydrologien perusteet ja maan vesitalous. Powerpointesitys. Luettu 20.10.2020. <https://www.salaojayhdistys.fi/fi/opetusmateriaalit/>

Seraj, S. Nikrawan, M. Ramezaniapour, AA. Zendeheel, P. 2017. Evaluation of the application of municipal solid waste incinerator (MSWI) ash in civil engineering using sustainability approach. Luettu 10.9.2020. https://www.researchgate.net/publication/321493128_EVALUATION_OF_THE_APPLICATION_OF_MUNICIPAL_SOLID_WASTE_INCINERATOR_MSWI_ASH_IN_CIVIL_ENGINEERING_USING_SUSTAINABILITY_APPROACH

SFS 2014, SFS-EN 1097-6. Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 6: Determination of particle density and water absorption.

Sormunen, A. 2007. Recovered municipal solid waste incineration bottom ash: Aggregate-like products for civil engineering structures. Väitöskirja. Tampereen teknillinen yliopisto.

STUK. 2010. Säteilyturvakeskus. ST 12.2: Rakennusmateriaalien ja tuhkan radioaktiivisuus. Helsinki. Luettu 22.10.2020. <https://www.stuklex.fi/fi/ohje/ST12-2>

Tilastokeskus. 2018. Jätetilasto. Luettu 10.8.2020. https://www.stat.fi/til/jate/2018/jate_2018_2020-06-17_fi.pdf

Tiehallinto. 27.1.2005. Tietoa tiensuunnitteluun nro 71D. Luettu 22.10.2020. <https://julkaisut.vayla.fi/thohje/tts71d.pdf>

Vaitkus, A. Grazulyte, J. Vorobjovas, V. Sernas, O. Kleiziene, R. 2017. Potential of MSWI Bottom Ash to Be Used as Aggregate in Road building materials. Lietua: VGTU Press. https://www.researchgate.net/publication/324043846_Potential_of_MSWI_bottom_ash_to_be_used_as_aggregate_in_road_building_materials

Väylävirasto. 2019. Luonnos: Uusiomateriaalien käyttö väylärakentamisessa.

Väyläviraston tutkimuksia. 13/2019. Väylärakenteiden valtakunnallinen kiviaines- ja geosynteettitutkimus. Luettu 15.10.2020. https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vt_2019-13_vaylarakenteiden_valtakunnallinen_web.pdf

Ympäristöministeriö. 2008. Kohti kierrätysyhteiskuntaa: Valtakunnallinen jätesuunnitelma vuoteen 2016. https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38363/SY_32_2008.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Ympäristönsuojelulaki 27.6.2014/527.

LIITTEET

Liite 1. Kuonatuotteiden ympäristökelpoisuustulokset

Liite 2. Kolmiaksaalikokeiden ja routanousukokeiden parametreja.

Liite 3. Koerakenteen pituusleikkaussuunnitelma.

Liite 4. Kartta jatkotutkimuksena tehtävistä kantavuuskokeista

Liite 5. Koerakenteen kantavuusmittausten tuloksia kuvaajina.

Liite 1. Ympäristökelpoisuustulokset

1 (2)

Ympäristökelpoisuus MARA-asetuksen mukaiset raja-arvot

Väylä, jätteen kerrospaksuus <1,5m, päällystetty

Haitallinen aine	Yksikkö	Raja-arvo	0-2mm (LS10)	0-2mm(LS2)	0-2mm(LS10)	0-2mm (LS2)	0-16mm(LS10)	0-16mm(LS2)
Liennut orgaaninen hiili (DOC)	mg/kg	500	220	150	200	140	<120	46
Elohopea (Hg)	mg/kg	0,03	<0,0010	<0,00020	<0,0010	<0,020	<0,0010	<0,00020
Arseeni (As)	mg/kg	2	<0,1	<0,020	<0,10	<0,020	<0,10	<0,020
Barium (Ba)	mg/kg	100	1,8	1	1,8	0,8	1,8	0,93
Kadmium (Cd)	mg/kg	0,06	<0,01	<0,0020	<0,010	<0,0020	<0,010	<0,0020
Kromi (Cr)	mg/kg	10	2,3	1,6	2,4	1,6	2,6	1,8
Kupari (Cu)	mg/kg	10	0,43	0,23	0,64	0,25	0,34	0,15
Molybdeenin (Mo)	mg/kg	6	2,9	1,9	2,9	1,8	2,7	1,7
Nikkeli (Ni)	mg/kg	2	<0,050	<0,010	<0,050	<0,010	<0,050	<0,010
Lyijy (Pb)	mg/kg	2	<0,1	<0,020	<0,10	<0,020	<0,10	<0,020
Antimoni (Sb)	mg/kg	0,7	<0,25	<0,020	<0,24	<0,020	<0,50	<0,10
Seleeni (Se)	mg/kg	1	<0,10	<0,020	<0,13	0,063	<0,13	0,062
Vanadiini (V)	mg/kg	3	<0,11	<0,020	0,12	0,026	<0,11	<0,020
Sinkki (Zn)	mg/kg	15	<0,050	<0,010	<0,41	<0,010	<0,050	<0,010
Fluoridi (F-)	mg/kg	150	9,3	0,99	9	1,1	12	2
Kloridi (Cl-)	mg/kg	11000	2500	2400	2600	2500	2000	2000
Sulfaatti (SO42-)	mg/kg	18000	8700	4400	8450	4400	8600	4400

Liite 1. Ympäristökelpoisuustulokset

2 (2)

Ympäristökelpoisuus MARA-asetuksen mukaiset raja-arvot

Väylä, jätteen kerrospaksuus <1,5m, päällystetty

Haitallinen aine	Yksikkö	Raja-arvo	0-16mm(LS10)	0-16mm(LS2)	0-32mm(LS10)	0-32mm(LS2)	0-32mm(LS10)	0-32mm(LS2)
Liennut orgaaninen hiili (DOC)	mg/kg	500	<120	43	<110	27	<100	22
Elohopea (Hg)	mg/kg	0,03	<0,0010	<0,00020	<0,0010	<0,00020	<0,0010	<0,00020
Arseeni (As)	mg/kg	2	<0,10	<0,020	<0,10	<0,020	<0,10	<0,020
Barium (Ba)	mg/kg	100	1,8	0,87	1,6	0,75	1,8	0,75
Kadmium (Cd)	mg/kg	0,06	<0,010	<0,0020	<0,010	<0,0020	<0,010	<0,0020
Kromi (Cr)	mg/kg	10	2,3	1,6	0,3	0,16	0,05	0,01
Kupari (Cu)	mg/kg	10	0,35	0,15	0,3	0,13	0,21	0,086
Molybdeenin (Mo)	mg/kg	6	2,5	1,5	1,4	0,87	1,5	0,87
Nikkeli (Ni)	mg/kg	2	<0,050	<0,010	<0,050	<0,010	<0,050	<0,010
Lyijy (Pb)	mg/kg	2	<0,10	<0,020	<0,10	<0,020	<0,10	<0,020
Antimoni (Sb)	mg/kg	0,7	<0,50	<0,10	<0,50	<0,10	0,42	0,068
Seleeni (Se)	mg/kg	1	<0,13	0,052	<0,11	0,027	<0,10	0,024
Vanadiini (V)	mg/kg	3	0,11	0,02	0,21	0,052	<0,10	<0,020
Sinkki (Zn)	mg/kg	15	<0,050	<0,010	<0,056	<0,010	<0,050	<0,010
Fluoridi (F-)	mg/kg	150	12	2	10	1,7	12	2,1
Kloridi (Cl-)	mg/kg	11000	2000	1900	1200	1200	1300	1200
Sulfaatti (SO42-)	mg/kg	18000	8600	4200	5000	3000	5400	3300

Liite 2. Kolmiaksiaalikoekiden ja routanousukokeiden parametreja

Taulukossa 12. on esitetty syklisen kolmiaksiaalikokeen koekappaleiden tilavuuspaino, oletettu vesipitoisuus ja kuivatilavuuspaino. Kokeiden jälkeen koekappaleiden eri korkeustasoilta määritettiin vesipitoisuudet, jotka on esitetty taulukossa 13.

TAULUKKO 12. Koekappaleiden irtotiheys, ρ , oletettu tiivistysvesipitoisuus, w ja sen perusteella laskettu kuivairtoteheys, ρ_d

<i>Lajite</i>	$\rho, \text{kg/m}^3$	$w, \%$	$\rho_d, \text{kg/m}^3$
<i>0/2 mm</i>	1,63	18,4	1,37
<i>0/16 mm</i>	1,82	17,8	1,55
<i>0/32 mm</i>	1,89	10,3	1,72

TAULUKKO 13. Koekappaleista kuormituksen jälkeen eri korkeustasoilta määritetyt vesipitoisuudet sekä niiden keskiarvot.

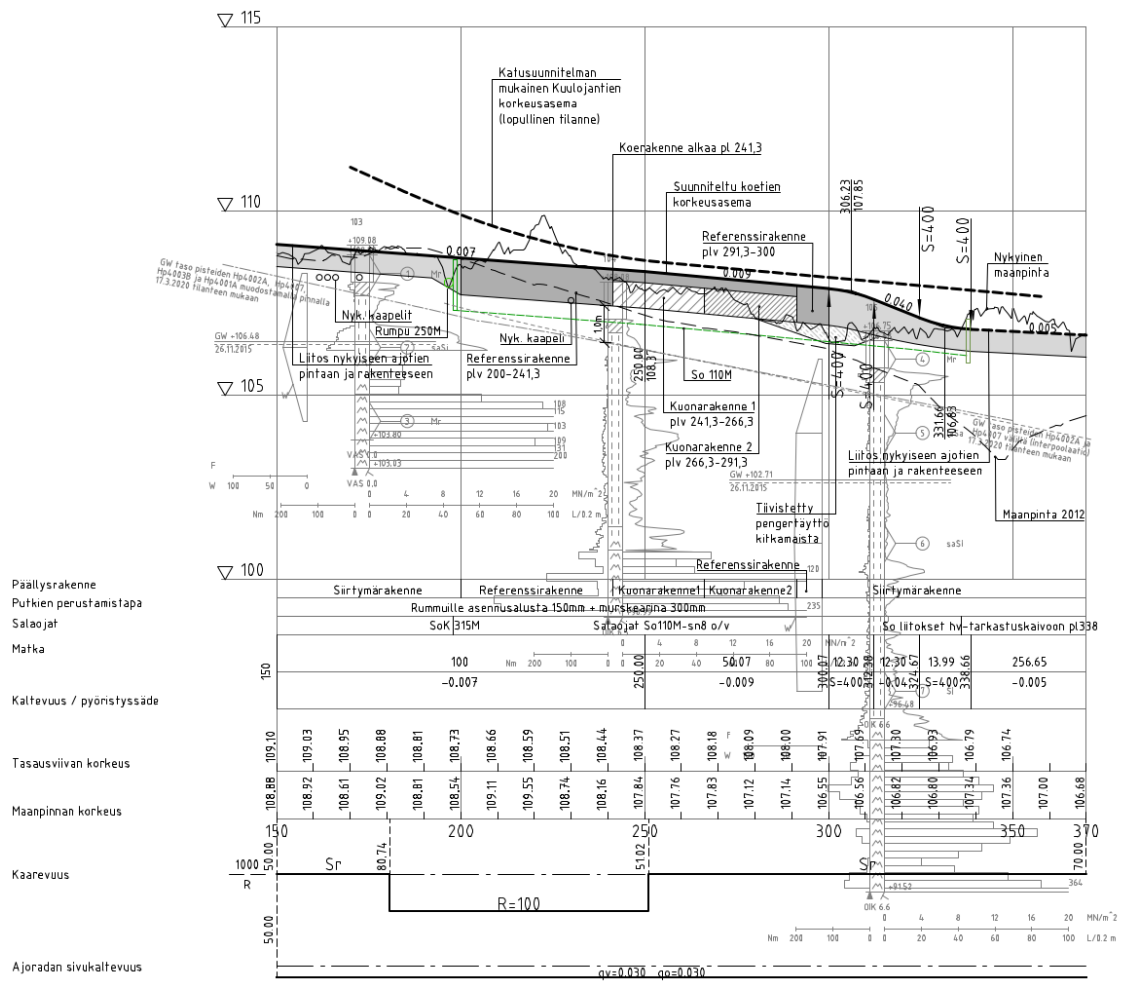
<i>Lajite</i>	<i>Yläosa</i>	<i>Keski</i>	<i>Alaosa</i>	<i>Ka</i>
	$w, \%$	$w, \%$	$w, \%$	$w, \%$
<i>0/2 mm</i>	18,0	18,4	18,6	18,4
<i>0/16 mm</i>	17,3	17,6	18,7	17,8
<i>0/32 mm</i>	9,9	10,3	10,6	10,3

TAULUKKO 14. Routanousukoekappaleiden eri korkeuksilta määritetyt vesipitoisuudet lopussa ja niiden keskiarvo, w_L .

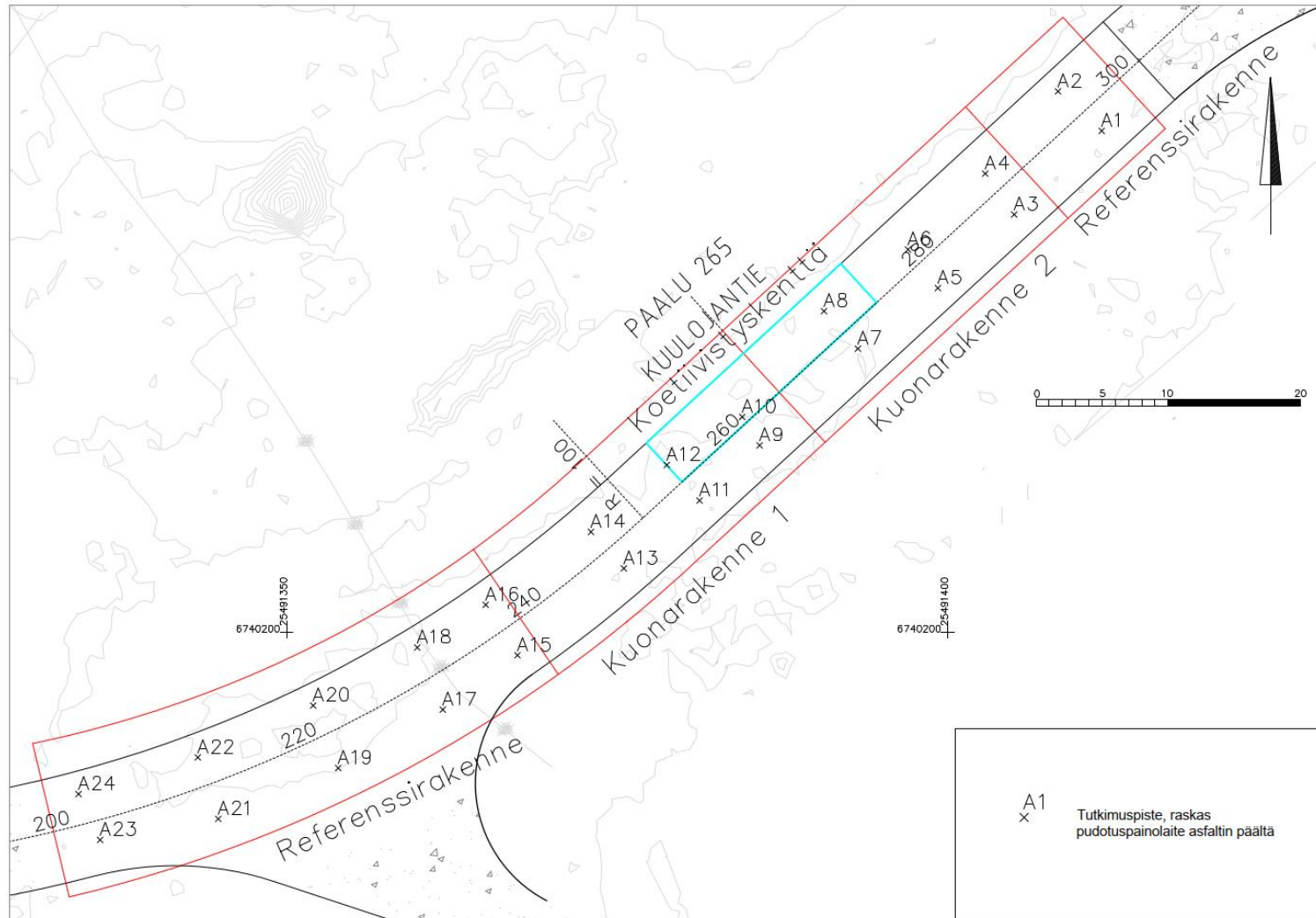
<i>Lajite</i>	$w_{\text{yläosa}}, \%$	$w_{\text{keski}}, \%$	$w_{\text{alaosa}}, \%$	$w_L, \%$
<i>0/2 mm</i>	37,0	40,8	34,9	38,4
<i>0/16 mm</i>	31,9	33,2	25,3	30,6
<i>0/32 mm</i>	24,1	26,3	23,7	25,1

Liite 3. Koerakenteen pituusleikkaussuunnitelma

(Ramboll Finland Oy)

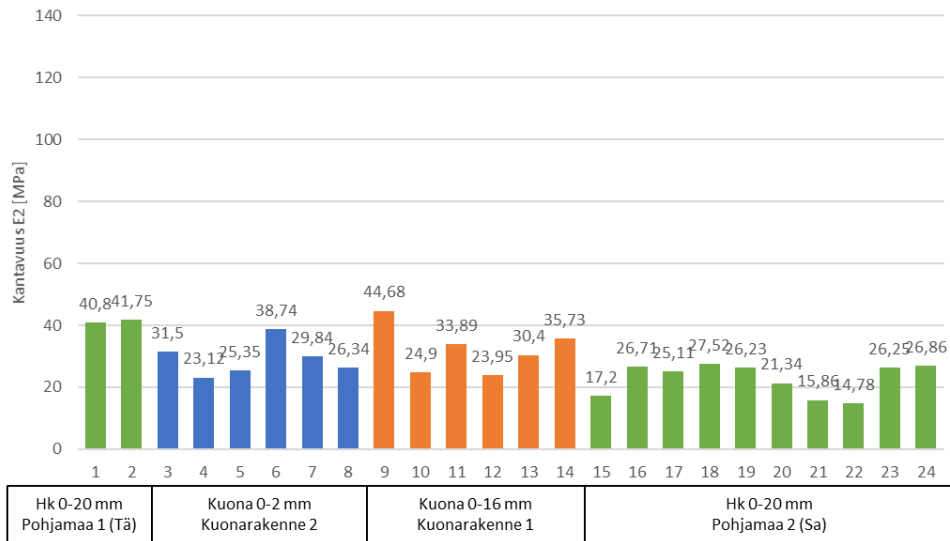


Liite 4. Kartta jatkotutkimuksena tehtävistä kantavuuskokeista

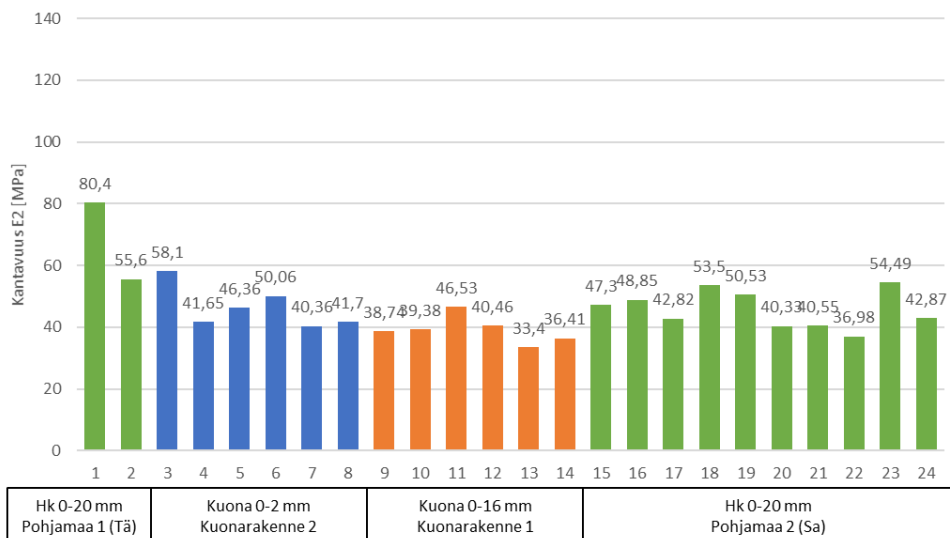


Liite 5. Koerakenteen kantavuusmittausten tulokset kuvaajina

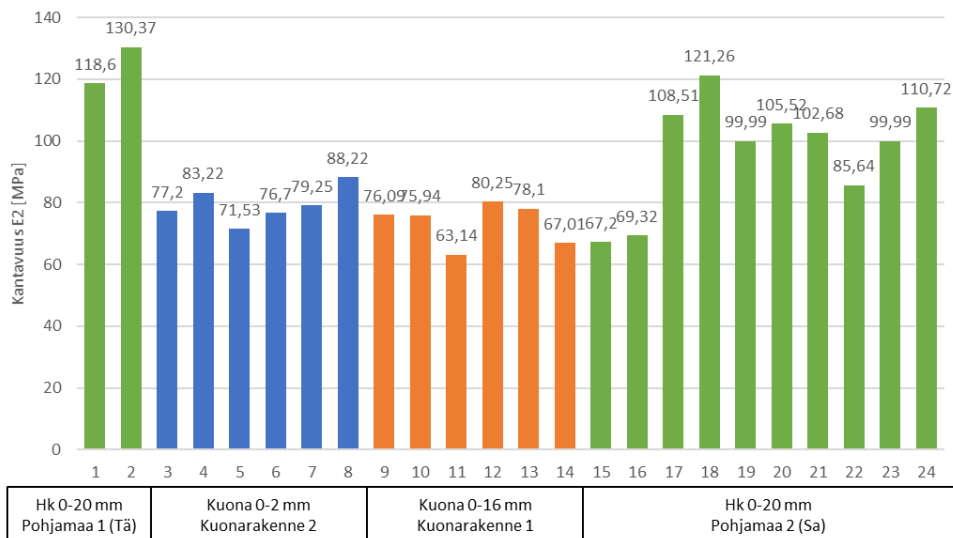
Suodatinkerroksen kantavuustulokset



Jakavan kerroksen kantavuustulokset



Kantavan kerroksen kantavuustulokset



Liite 6. Koerakenteen luonnonkiviainesten rakeisuudet

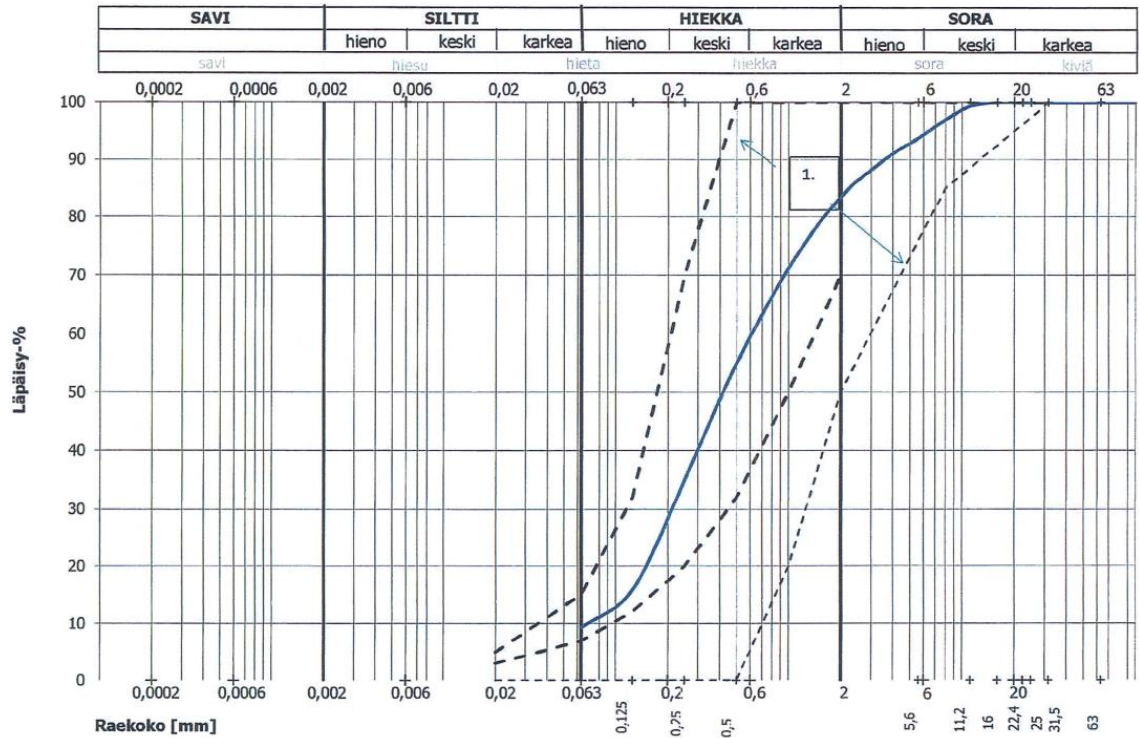
Koerakenteen suodatinkerroksen hiekan (0-20 mm) rakeisuuskäyrä. Toimittaja Maanrakennus Jalo Oy, tutkimuksen suorittanut Maavakio Oy



101/2020 Maanrakennus Jalo Oy, eristyshiekka

InfraRYL 21110:K1

14.7.2020 Anniina Nieminen



Koerakenteen jakavan kerroksen soran (0-100 mm) rakeisuuskäyrä. Toimittaja Hämeen Kuljetus Oy, tutkimuksen suorittanut Cetovoi Oy

