

JÄTTEENPOLTON POHJAKUONAN KÄYTTÖ KEVYEN LIIKENTEEEN VÄYLÄLLÄ

Kokemuksia Riihimäki – Hikiä hankkeesta



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö

Hämeen korkeakoulukeskus, rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri

(AMK)

Syksy, 2021

Sami Matikka

Tekijä Sami Matikka

Vuosi 2021

Työn nimi Jätteenpolton pohjakuonan käyttö kevyen liikenteen väylällä

Ohjaajat Jari Mustonen, Annika Sormunen

TIIVISTELMÄ

Suomessa jätteenpolto on yleisin yhdyskuntajätteen käsittelymuoto ja sen myötä syntyy n. 300 000 tn pohjakuonaa vuosittain. Suomen ja muun Euroopan Unionin tavoitteena on kiertotalouden vahvistaminen, mukaan lukien jätteiden hyötykäyttö. Tämän opinnäytetyön tilaajana toimi Fortum Waste Solutions Oy. Yhtiö on tuotteistanut jätteenpolton pohjakuonasta jalostettuja keinokiviaineeksi suodatin- ja jakavaan kerrokseen, ja tämän työn tarkoituksena oli selvittää näiden materiaalien toimivuutta kevyen liikenteen väylällä ja erityisesti raportoida rakennustyön aikaisia kokemuksia.

Koerakenne toteutettiin osaksi Riihimäki–Hikiä-välistä kevyen liikenteen väylää, jossa käytettiin suodatinkerroksessa ja jakavassa kerroksessa kuonamateriaaleja. Tässä opinnäytetyössä on raportoitu rakentamisprosessi, koerakenteeseen tehtyjen tutkimusten ja mittausten tulokset, sekä laboratoriossa tehtyjä tutkimuksia materiaaleista. Tilaajan tavoitteena oli saada tietoa materiaalin käyttäytymisestä rakenteessa ja sen todellisissa käyttöolosuhteissa.

Koerakenteen rakentaminen onnistui hyvin, ja kuonamateriaalien kanssa voitiin käyttää normaalia maarakennuskalustoa. Myös urakoitsija ja maanomistaja olivat tyytyväisiä kuonamateriaaleihin ja niiden käyttöön. Työn aikaisten mittausten ja tutkimusten perusteella kuonamateriaalit soveltuvat lujuusominaisuuksien perusteella hyvin tierakenteiden alempiin rakennekerrokseen, mikä vahvistaa jo aiemmin saatua tutkimustietoa materiaalien soveltuvista käyttökohteista. Lisäksi tällä kohteella jatketaan rakenteen seuranta tulevana vuosina, jotta saadaan myös materiaalien pitkäaikaiskestävyydestä (esim. routivuus) lisätietoa.

Avainsanat Jätteiden hyötykäyttö, kiertotalous, maarakennus, pohjakuona.

Sivut 32 sivua, joista liitteitä 5 sivua

Author Sami Matikka

Year 2021

Subject Use of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash in pedestrian and Bicycle Ways

Supervisor Jari Mustonen, Annika Sormunen

ABSTRACT

Incineration is the most common form of municipal waste treatment in Finland, generating around 300,000 tonnes of bottom ash per year. Finland and the rest of the European Union aim to strengthen the circular economy, including the recovery of waste. This thesis was commissioned by Fortum Waste Solutions Oy. The company has produced artificial aggregates processed from incinerator bottom ash for use in the filtration and sub-base layer of road structures, and the purpose of this thesis was to investigate the performance of these materials on a pedestrian route and, in particular, to report the experiences during construction.

The test structure was implemented as part of a pedestrian route between Riihimäki to Hikiä, where slag materials were used in the filtration layer and the sub-base layer. This thesis reports the construction process, the results of the tests and measurements conducted on the test structure, and the laboratory tests conducted on the materials. The commissioner's objective was to obtain information about the behaviour of the materials in the structure and in the actual conditions of use.

The construction of the test structure went well, and normal civil engineering equipment could be used with the slag materials. The contractor and the landowner were also satisfied with the slag materials and their use. Based on the measurements and studies carried out during the project, the slag materials were concluded to be suitable based on their strength properties for use in the lower structural layers of the road structures in pedestrian routes, which confirms previous research on their potential applications. In addition, monitoring of the structure will continue at this site in the coming years to provide further information on the long-term durability (e.g. frost heave properties) of the materials.

Keywords Waste utilization, bottom ash, circular economy, civil engineering

Pages 32 pages and appendices 5 pages

Sisällys

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | JOHDANTO..... | 1 |
| 2 | KIERTOTALOUSHMATERIAALIT MAARAKENTAMISESSA..... | 1 |
| 2.1 | Kuonan käytön vaatimukset | 2 |
| 2.1.1 | Alueelliset rajoitukset | 2 |
| 2.1.2 | Haitalliset aineet ja muut laatuvaatimukset | 3 |
| 2.1.3 | Tekniset vaatimukset | 4 |
| 3 | KOERAKENNE JA TEHDYT TUTKIMUKSET | 4 |
| 3.1 | Rakenteen kuvaus | 5 |
| 3.2 | Kuonatuotteet | 6 |
| 3.3 | Laboratorioanalyysit | 7 |
| 3.3.1 | Rakeisuusanalyysi..... | 7 |
| 3.3.2 | Proctor-koee..... | 9 |
| 3.3.3 | Ympäristökelpoisuus | 10 |
| 3.4 | Kenttämittaukset rakentamisen aikana..... | 10 |
| 3.4.1 | Kantavuus..... | 10 |
| 3.4.2 | Kantavuusmittausten tulokset | 12 |
| 3.4.3 | Takaisinlaskennat | 15 |
| 3.5 | Kenttämittaukset rakentamisen jälkeen..... | 19 |
| 3.5.1 | Kantavuus..... | 19 |
| 3.5.2 | Routanousu ja vaurioinventointi..... | 19 |
| 4 | RAKENNUSTEKNISET HAVAINNOT..... | 20 |
| 4.1 | Rakentaminen | 20 |
| 4.2 | Tiivistäminen | 22 |
| 4.3 | Sääolosuhteet | 24 |
| 5 | YHTEENVETO | 24 |
| | Lähteet..... | 26 |

Liitteet

- Liite 1 Ympäristökelpoisuustulokset.
- Liite 2 Koetiivistyskentän Loadman-mittausten tulokset.

1 JOHDANTO

Suomen sekä muiden EU-maiden yhteisenä tahtotilana on noudattaa yhä paremmin kiertotaloustavoitteita. Tämä koskee myös rakennusalaan, jossa tavoitteena on hyödyntää enenevässä määrin uusiutuvia luonnonvaroja sekä kierrätysmateriaaleja, joihin myös jätteenpolton pohjakuona kuuluu. Kuona eroaa ominaisuuksiltaan luonnonkiviaineksista, minkä takia niiden toimivuus rakenteissa tulee testata ja varmentaa. Tämän opinnäytetyön ja koerakenteen tarkoituksena oli saada lisää tietoa kuonatuotteiden teknisestä toimivuudesta isommassa mittakaavassa ja materiaalin todellisista käyttöolosuhteista, sekä tuottaa lisää dataa Väylävirastolle materiaalin teknisen kelpoisuuden arviointia varten.

Suomessa jätteenpolton pohjakuonia on hyödynnetty lähinnä kaatopaikkojen rakenteissa ja meluvälillä, vaikka niillä olisi edellytyksiä teknisien ominaisuuksiensa puolesta laajempaan käyttöön maarakentamisessa. Jätteenpolton pohjakuonan käytöllä voitaisiin korvata neitseellisten kiviainesten käyttöä, ja näin vähentää tarvetta kiviainesten louhinnalle sekä soranottoalueille.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli raportoida koerakenneprojektin rakentamisen aikaiset mittaukset, rakentamisen aikana tulleet havainnot, sekä esittää rakentamisen jälkeen tehtävät tarkkailut ja mittaukset. Työn tilaajan toimi Fortum Waste Solutions Oy, jonka tavoitteena on saada tuotteistettua jätteenpolton pohjakuonot hyödynnettäviksi maarakennuksessa korkeamman arvon kohteissa.

2 KIERTOTALOUSHYÖDYNTÄMÄT MAARAKENTAMISESSA

Jätteiden hyötykäyttöä on pyritty Suomessa edistämään lainsäädännöllä (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa eli ns. MARA-asetus 843/2017). Uudistuksen myötä käsitelty jätteenpolton pohjakuona sisältyy asetuksen sovellusalan mukaisesti jätelajikkeisiin. Uuden asetuksen myötä pohjakuonan käytölle ei tarvitse hakea ympäristönsuojelulain (527/2014) mukaista ympäristölupaa, mikäli rakennuskohde ja kuonatuote täyttävät MARA-asetuksen (843/2017) ehdot.

Lupaprosessin ohjaamisella kevyempää ilmoitusmenetelmää kohti on pyritty helpottamaan uusiomateriaalin käyttöä rakennuskohteissa.

MARA-asetuksen soveltamisalaan kuuluvat jätteet

- Betonimurske sekä kevytbetoni- ja kevytsorajätteet
- Kivihiilen, turpeen ja puuperäisen aineksen polton lentotuhkat, pohjatuhkat ja leijupetihiekka
- Tiilimurske
- Asfalttimurske ja -rouhe
- Käsitelty jätteenpolton pohjakuona
- Valimohiekat
- Kalkit
- Kokonaiset renkaat ja rengasrouhe
- Rakenteesta poistettu jäte

2.1 Kuonan käytön vaatimukset

MARA-asetus mahdollistaa jätteenpolton pohjakuonien ammattimaisen tai laitospäivän hyödyntämisen seuraavissa maarakentamisenkohteissa, joita ovat väylät (mukaan lukien metsäautotiet), kentät ja näiden rakennekerrokset sekä teollisuus- ja varastorakennusten pohjarakenteet silloin, kun rakentaminen perustuu lakisääteiseen suunnitelmaan, lupaan, ilmoitusmenettelyyn tai kunnan rakennusjärjestykseen. (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa, 843/2017)

2.1.1 Alueelliset rajoitukset

Asetusta ei sovelleta asumiseen tai lasten leikkipaikaksi tarkoitettulla alueella, ravintokasvien viljelykseen tarkoitettulla alueella, luonnonsuojelualueella, 1- ja 2- luokan pohjavesialueella eikä sisämaan tulvavaara-alueella. (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa, 843/2017 2 §)

jätettä sisältävän rakennekerroksen etäisyys pohjaveden enimmäiskorkeudesta on vähintään yksi metri ja maarakentamiskohteen etäisyys vesilain (587/2011) 1 luvun 3 §:n 1 momentin 3 kohdassa tarkoitetusta vesistöstä, talousvesikäyttöön tarkoitetusta kaivosta tai lähteestä on vähintään 30 metriä. (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa, 843/2017 4 §)

2.1.2 Haitalliset aineet ja muut laatuvaatimukset

Jätteenpolton kuonasta tulee ottaa jokaista 5000 tn kohden yksi kokoomanäyte, joka muodostuu 50 osanäytteestä. Tästä näytteestä tehdään liukoisuusmääritykset seuraaville haitta-aineille:

- Antimoni (Sb)
- Arseeni (As)
- Barium (Ba)
- Kadmium (Cd)
- Kromi (Cr)
- Kupari (Cu)
- Elohopea (Hg)
- Lyijy (Pb)
- Molybdeeni (Mo)
- Nikkeli (Ni)
- Vanadiini (V)
- Sinkki (Zn)
- Seleen (Se)
- Fluori (F)
- Sulfaatti (SO_4^{2-})
- Kloridi (Cl^-)
- Liuennut orgaaninen hiili (DOC)

Näiden lisäksi yksittäisistä näytteistä määritetään BTEX-yhdisteet sekä fenoliset yhdisteet. (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa, 843/2017 liite 3)

Jätteen enimmäiskerrospaksuus väylä-, kenttä- sekä teollisuus- ja varastorakennuksen pohjarakenteissa on 1,5 m. Käsitellyn jätteenpolton kuonan suurin sallittu raekoko on 50 mm. Näiden lisäksi kuonan tulee täyttää maarakentamiskohteen tekniset ja toiminnalliset vaatimukset, jotka on annettu määräyksissä, ohjeissa sekä hankkeen

rakennuttajan suunnitelmissa. (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteen hyödyntämisestä maarakentamisessa, 843/2017 liite 2).

2.1.3 Tekniset vaatimukset

Kuonamateriaaleille ei vielä ole olemassa erillisiä teknisiä vaatimuksia InfraRYL:ssä, kuten esimerkiksi betonimurskeille ja masuunikuonille on. Kuonamateriaalit pitää kuitenkin CE-merkitä kiviainesstandardin SFS-EN-13242+A1 mukaisesti, mikäli niitä käytetään maarakennushankkeissa (tai tekninen kelpoisuus pitää pystyä muutoin osoittamaan). Tällä hetkellä Suomessa ollaan kansallisesti luomassa infraohjekorttia, jossa on tarkoitus esittää kuonamateriaaleille mm. käyttöluokat ja materiaaliominaisuudet. Materiaalitoimittajat ovat laatineet myös omia käyttöohjeita kuonille. (Henkilökohtainen tiedonanto, intranet, Fortum Recycling & Waste, Jätteenpolton pohjakuonasta jalostetun kuonatoran hyödyntäminen maarakentamisessa).

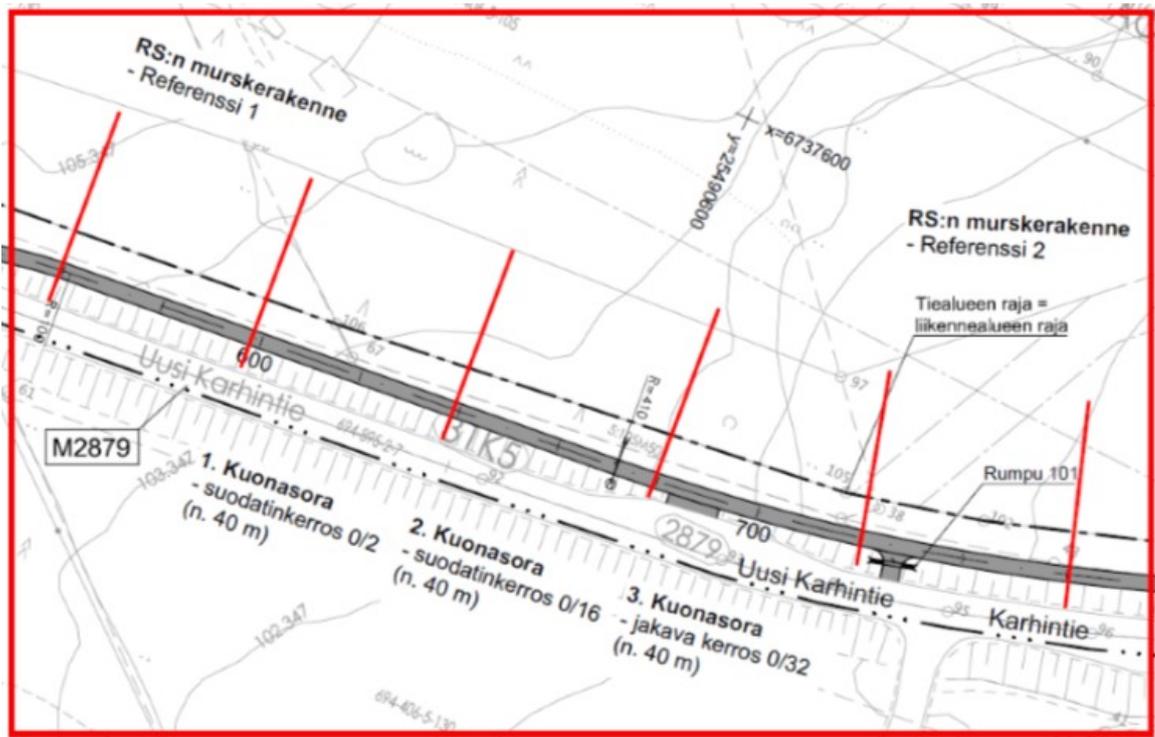
Eri toiminnanharjoittajien kuonaohjeissa kuvataan mm. kuonan matkaa jätteestä maarakennusmateriaaliksi, sen hyödyntämistä maarakentamisessa ja tuotteen tilaamista sekä saatavuutta. (Suomen Erityisjäte Oy, 2018). Ohjeet ovat kattavat ja kertovat kaiken oleellisen tiedon, kun harkitaan kuonamateriaalien käyttöä maarakennusprojektissa.

3 KOERAKENNE JA TEHDYT TUTKIMUKSET

Koerakenteen tarkoituksena oli hankkia tietoa kuonatuotteiden teknisistä ominaisuuksista ja toimivuudesta todellisissa käyttöolosuhteissa, sekä tuottaa lisää dataa Väylävirastolle materiaalien teknisen kelpoisuuden arviointia varten.

Koerakenne rakennettiin Riihimäki – Hikiän Mt2879 välille rakennettavalle kevyenliikenteenväylälle. Rakenteen tarkempi sijainti on esitetty kuvassa 1.

Kuva 1. Koerakenteen sijainti.



Koerakenteen suunnitelmat hyväksyttiin Riihimäen kaupungilla (kiinteistön omistaja), jotka poikkesivat alkuperäisistä vain rakenteen oikeaan reunaan lisätyn salaojan kohdalta. Kohteelle haettiin MARA-asetuksen mukainen lupa Hämeen ELY-keskukselta (HAMELY/446/2021).

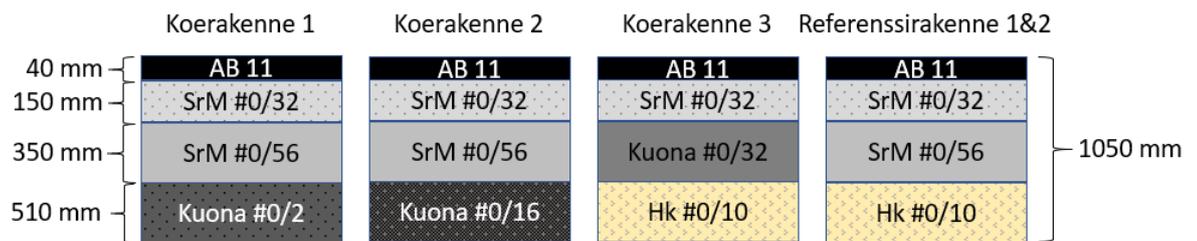
3.1 Rakenteen kuvaus

Koerakenteen pituus oli 200 metriä, josta noin 120 metrin matkalla käytettiin suodatin- tai jakavassa kerroksessa kuonatuotteita. Loput 80 metriä rakennettiin verrokkirakenteeksi luonnonkiviaineksilla. Verrokkirakenteen tarkoituksena oli laskea kuonille keskeiset mitoitusparametrit vertailuparitekniikkaa (Väylävirasto, 2020) käyttäen.

Kuonarakenne jaettiin kolmeen 40 metrin osaan, joista ensimmäisessä käytettiin 0/2 mm jaetta suodatinkerroksessa, toisessa 0/16 mm jaetta suodatinkerroksessa ja viimeisessä 0/32 mm jaetta jakavassa kerroksessa. 40 metrin verrokkirakenteet sijaitsivat kuonarakenteen molemmissa päissä (Kuva 1).

Rakenteet tehtiin koko poikkileikkauksen leveydeltä samanlaisina. Kaikki rakenteet tehtiin pengerryksen päälle, jonka kerrospaksuudet olivat paaluvälillä 600–640 n. 1,0...1,3 m ja paaluvälillä 640–720 n. 0,7...0,8 m. Suunnitelmien mukaiset rakennekerrospaksuudet on esitetty kuvassa 2.

Kuva 2. Koerakenteen eri rakenteiden kerrospaksuudet ja materiaalit.



3.2 Kuonatuotteet

Rakenteessa käytettävät kuonatuotteet valmistettiin Hausjärven materiaalikierrätyskeskuksessa ennen rakentamisen aloittamista, ja varastoitii katetussa hallissa peitettynä. Kuonamateriaalia käytettiin yhteensä n. 660 tn. Rakenteessa käytetyt kuonatuotteet olivat suodatin 0/2 mm, suodatin 0/16 mm ja jakava 0/32 mm. Kuonatuotteissa käytettyjen mineraalijakeiden (p-%) osuudet on esitetty taulukossa 1. Kuonamateriaali on väriltään todella tummaa, mutta muuten ulkonäöltään hyvin samanlaista kuin luonnonkiviaines, kuten kuvasta 3 voidaan todeta. 0/32 mm kuonatuotteessa oli havaittavissa jonkin verran keraamisia ja metallisia partikkeleja (Kuva 3).

Taulukko 1. Kuonatuotteissa käytettyjen mineraalijakeiden p-%.

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

Kuva 3. Pohjakuona ja luonnonkiviaines.



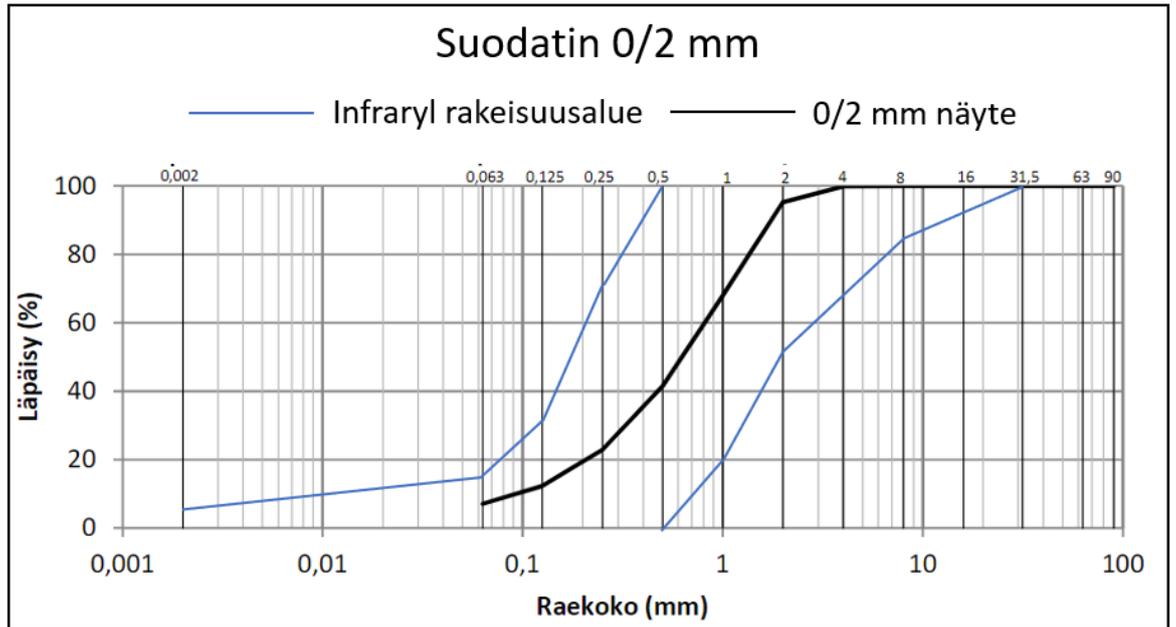
3.3 Laboratorioanalyysit

Ennen rakentamista materiaaleille tehtiin CE-merkintää varten analyyskejä laboratoriossa. Materiaaleista tehtävät näytteet otettiin kuonatuotteiden suhteuttamisen jälkeen Hausjärven materiaalikierrätyskeskuksella.

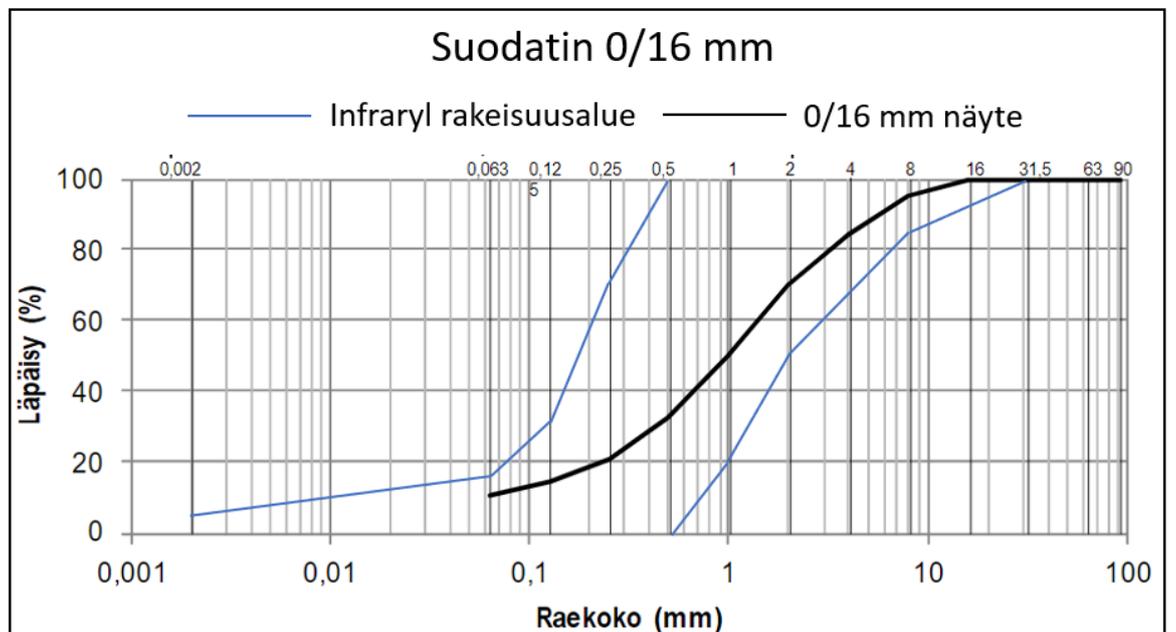
3.3.1 Rakeisuusanalyysi

Jokaiselle kuonatuotteelle tehtiin yksi rakeisuusanalyysi standardien SFS-EN 933-1 ja SFS-EN 933-10 mukaisesti pesuseulonnalla. Suodatinkerroksen ja jakavan kerroksen kuonalajikkeiden rakeisuuskäyrät on esitetty kuvissa 4, 5 ja 6. Kuvissa on esitetty myös InfraRYL 2018 kohtien 21110.1.1 ja 21210.1.3.1 mukainen rakeisuuden sallittu vaihteluväli. Kuonalajikkeiden rakeisuudet täyttivät niille määrätyt vaatimukset.

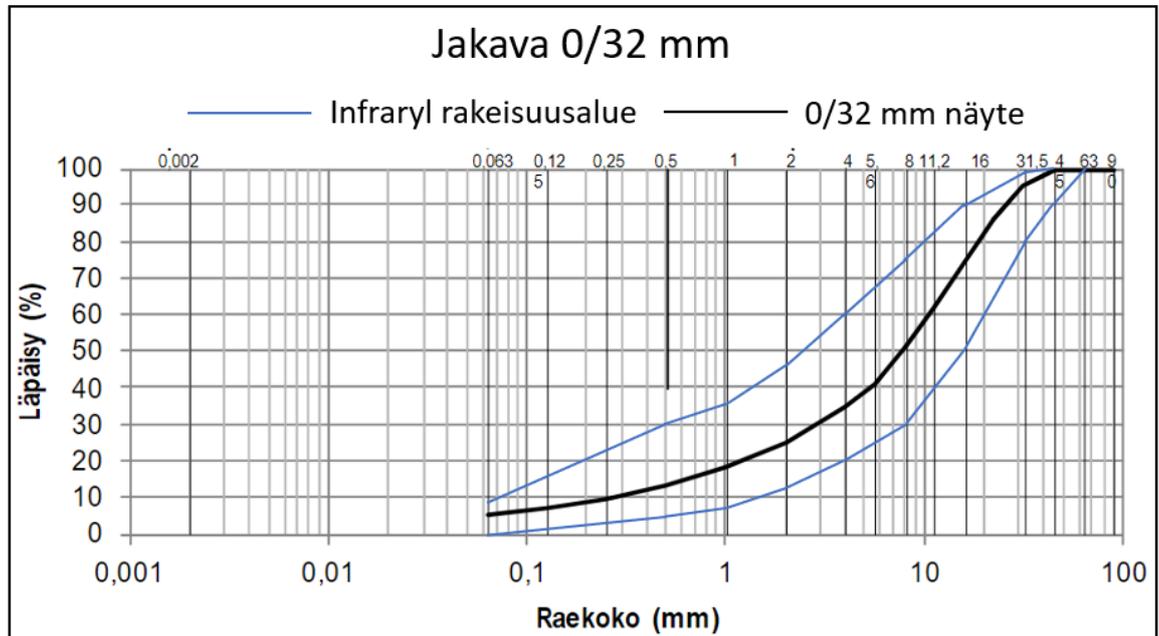
Kuva 4. Suodatinkerroksen 0/2 mm kuonan rakeisuuskäyrä.



Kuva 5. Suodatinkerroksen 0/16 mm kuonan rakeisuuskäyrä.



Kuva 6. Jakavan kerroksen 0/32 mm kuonan rakeisuuskäyrä (rakeisuusaluevaatimus Gc).



3.3.2 Proctor-koe

Maksimikuivatilavuuspainon ja optimivesipitoisuuden selvittämiseksi kaikille kuonatuotteille tehtiin Proctor-kokeet. Mittaukset suoritettiin viidellä eri vesipitoisuudella, ja saadut tulokset on esitetty taulukossa 2. Kokeiden tuloksista voidaan huomata, että kuonamateriaaleilla on suuremmat optimivesipitoisuudet kuin luonnonkiviaineksilla. InfraRYL antaa suodatinkerroksessa käytetylle hiekalle optimivesipitoisuuden välille 5...15 % ja jakavassa kerroksessa käytetylle soralle 5...10 % (InfraRYL 21110 liite 2, 2018/1), kun kuonalla vastaavat luvut ovat suodatinkerroksessa käytetyille lajikkeille 20...22,2 % ja jakavan kerroksen lajikkeelle 14,5 %. Maksimikuivatilavuuspainoltaan kuonamateriaalit ovat kevyempiä kuin luonnonkiviainekset. InfraRYL antaa kuivatilavuuspainoksi hiekalle 1,7...2,2 t/m³ ja soralle 2,0...2,2 t/m³ (InfraRYL 21110 liite 2, 2018/1), kun kuonalla luvut ovat Suodatinkerroksen lajikkeille 1,6...1,7 t/m³ ja jakavan kerroksen lajikkeelle 1,85 t/m³

Taulukko 2. Proctor-kokeella saadut kuonatuotteiden optimivesipitoisuudet ja maksimikuivatilavuuspainot.

| lajike | optimivesipitoisuus (%) | maksimikuivatilavuuspaino (kg/m ³) |
|---------|---------------------------|---|
| 0/2 mm | 22,1 | 1 683,50 |
| 0/16 mm | 20,0 | 1 612,70 |
| 0/32 mm | 14,5 | 1 847,20 |

3.3.3 Ympäristökelpoisuus

Kuonatuotteista määritettiin ympäristökelpoisuus MARA-asetuksessa (843/2017) vaaditun kaksivaiheisen ravistelutestin mukaisesti standardia SFS-EN 12457-3 noudattaen. Analyysit tehtiin Fortumin kemian laboratoriossa ja saadut tulokset on esitetty liitteessä 1. Materiaalit täyttivät MARA-asetuksen mukaiset päällystetyn väylän kriteerit.

3.4 Kenttämittaukset rakentamisen aikana

3.4.1 Kantavuus

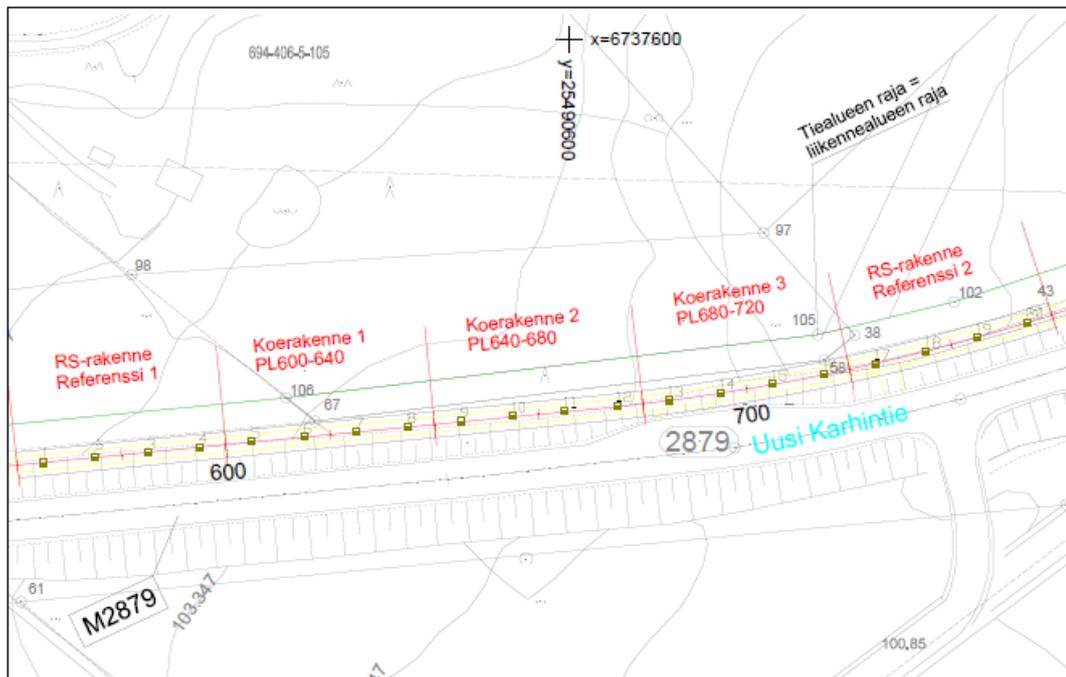
Jokaisen tiivistetyn rakennekerroksen päältä tehtiin kantavuusmittaukset kolmen mittakellon levykuormituskokeella. Tässä mittaustavassa mittakelloja on 3 kpl ja ne on sijoiteltu kuormituslevyn kehälle 120 ° jaolla, kuten kuvasta 7 nähdään.

Levykuormituskokeita mitattiin jokaisesta rakennekerroksesta 20 kpl (4 mittausta jokaisesta rakenteesta). Kuvassa 8 on esitetty levykuormituskokeiden mittauspisteet. Jokaisen kerroksen mittauspisteiden xyz-sijainnit mitattiin takymetrillä. Samalla saatiin selville tarkat kerrospaksuudet, joita tarvittiin takaisinlaskettaessa E-moduuliarvoja.

Kuva 7. Kolmen mittakellon levykuormituskoee.



Kuva 8. Levykuormituskokeiden mittauspisteet. (©Matti Havukainen, Fortum)

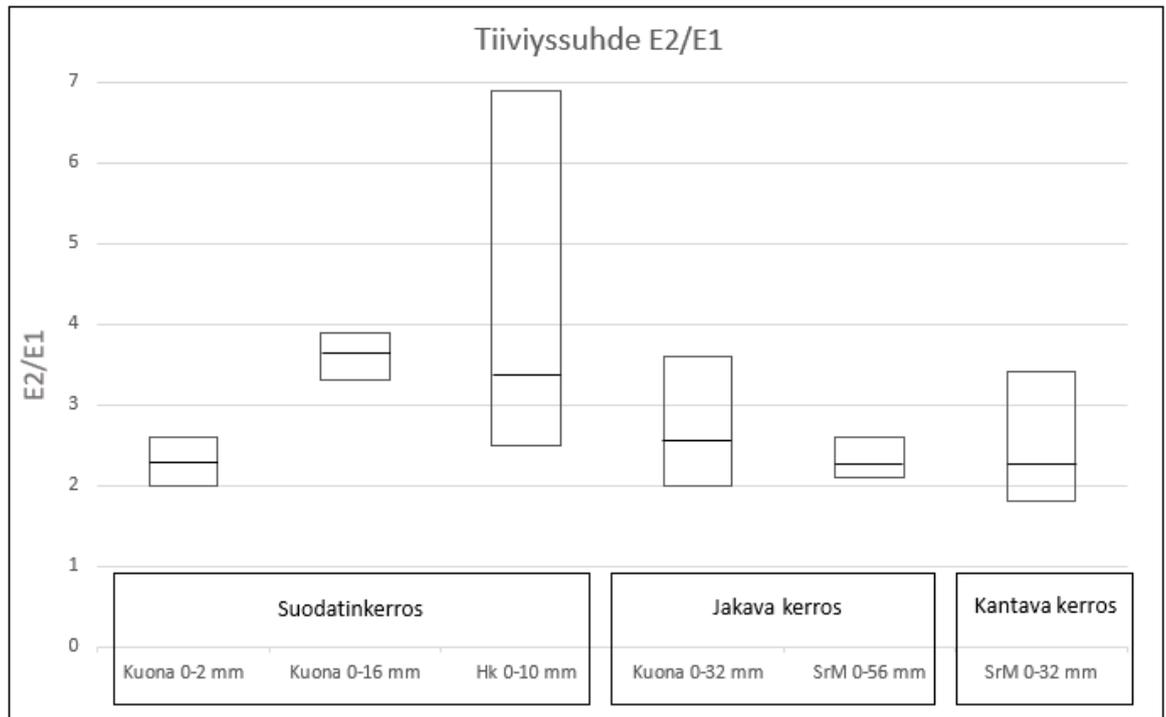


3.4.2 Kantavuusmittausten tulokset

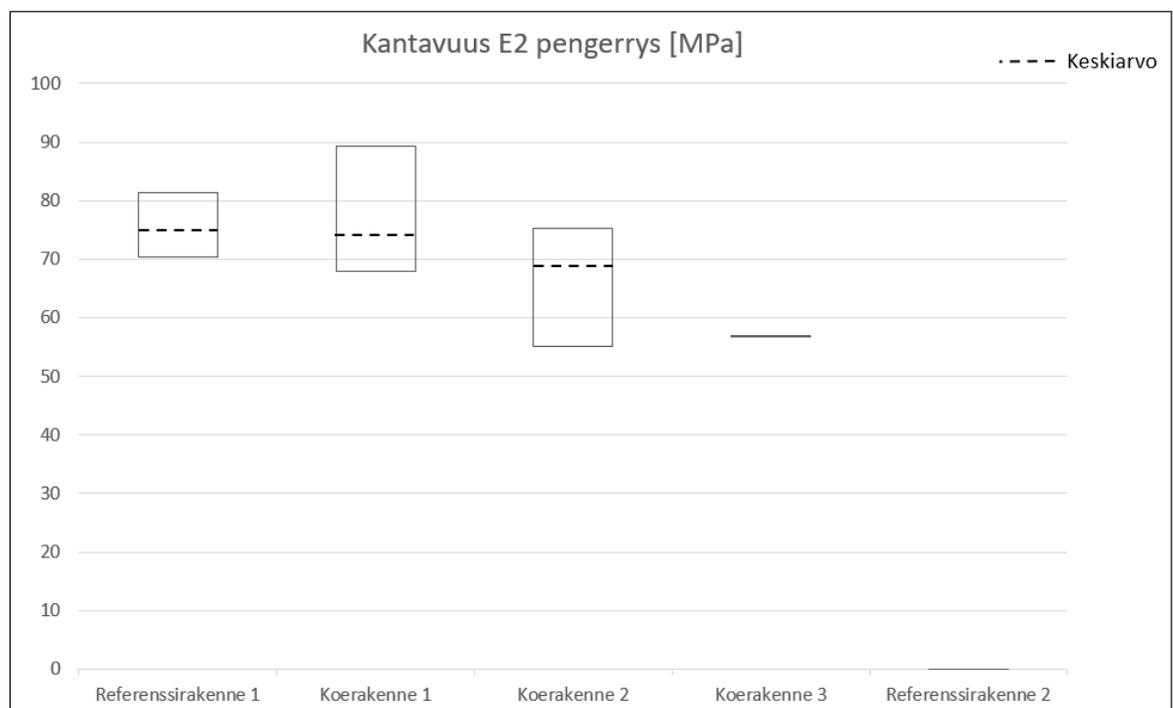
Koerakenteen loppupäässä pohjamaa oli erittäin märkää ja pehmeää. Tämä voidaan huomata pengerryksen päältä mitatuista tuloksista. (kuva 10.) Pohjamaan pehmeys heijastui vielä referenssirakenne 2:n suodatinkerrokseenkin, jonka vuoksi sieltä ei saatu mitattua kuin yksi levykuormituskoe. Rakenteet, joissa käytettiin suodatinkerroksessa kuonaa eivät täyttäneet jokaisesta mittauspisteestä kantavuuden suositusarvoja (suunnitteluvaiheessa laskennallisesti määritetyt arvot), mutta kaikki rakenteet kuitenkin ylittivät tavoitekantavuuden kantavan kerroksen päältä.

Levykuormituskokeiden perusteella määritetyt E2/E1 tiiviyssuhteet on esitettyinä kuvissa 9. Näiden tulosten perusteella näyttäisi siltä, että rakennekerroksia ei ole saatu täysin tiivistettyä tiivistystyön aikana. Suodatinkerroksessa erityisesti hiekalla havaittavat suuret tiiviyssuhteen vaihtelut johtuvat todennäköisesti siitä, että työmaalle toimitettu hiekka ei ole ollut vesipitoisuudeltaan optimissa. Tasarakeinen materiaali ei tiivisty yhtä hyvin kuin sekarakeinen materiaali, sillä tasarakeisen materiaalin rakeiden väliin jää tyhjää tilaa, joka ei täyty (Kuparinen, 2020, s. 10). InfraRYL mukaan suodatinkerroksen tiiviyys tulisi osoittaa ensisijaisesti tiiviyssuhteella, joka mitataan esim. Troxlerilla. Aiemmissa tutkimuksissa on kuitenkin havaittu, että Troxler-mittalaite ei sovellu kuonille, koska sen kemialliset ominaisuudet häiritsevät mittausta ja antavat väärän vesipitoisuustuloksen mittalaitteella (Sormunen, 2017).

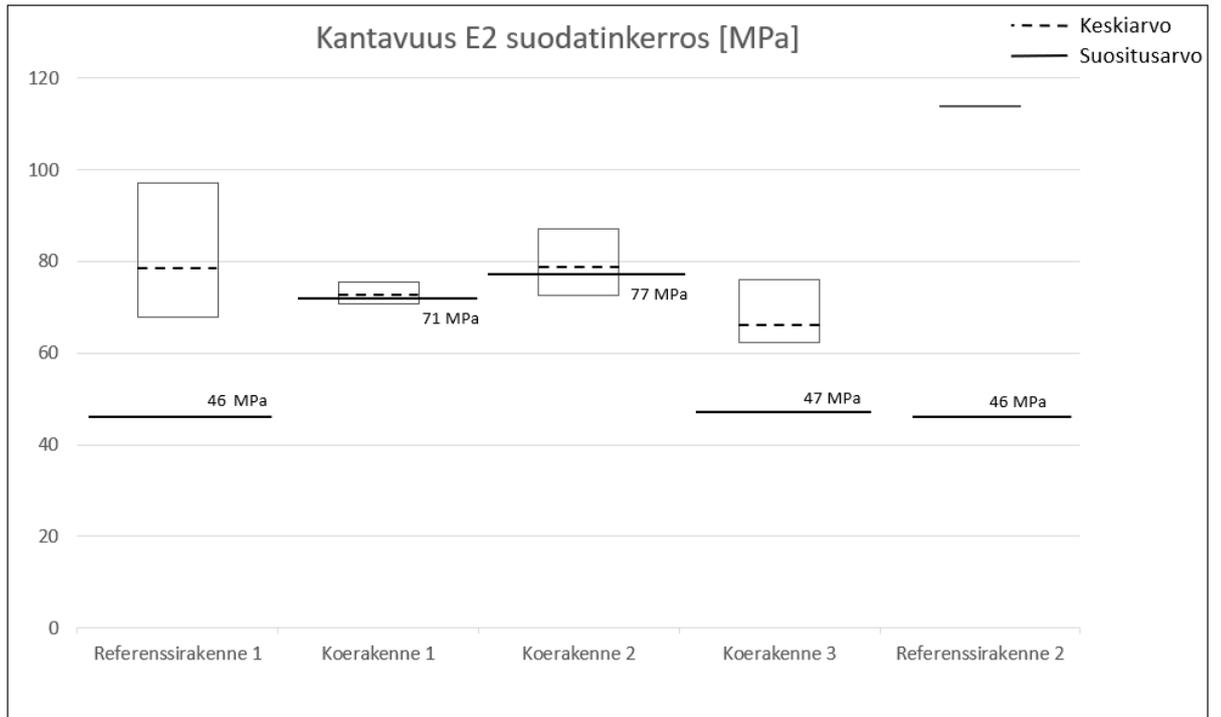
Kuva 9. Levykuormituskokeilla määritetyt tiiviyssuhteet E2/E1 kunkin rakenteen päältä.



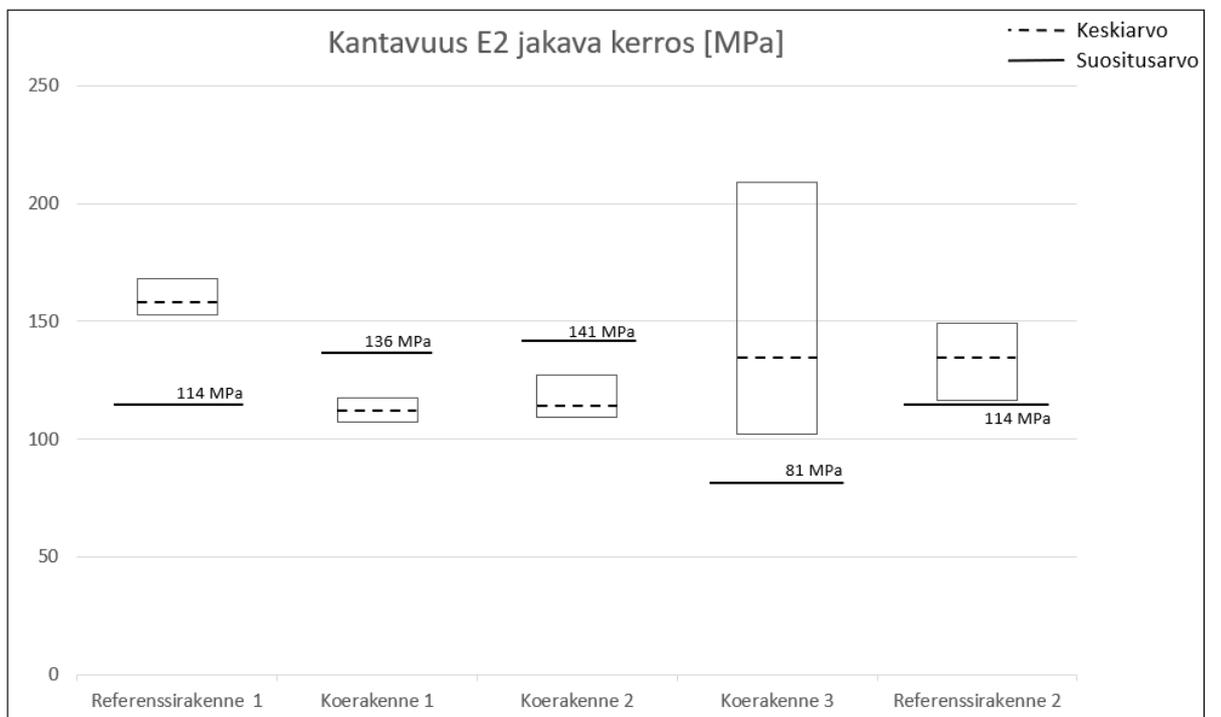
Kuva 10. Levykuormituskokeilla mitatut kantavuudet E2 pengerryksen päältä.



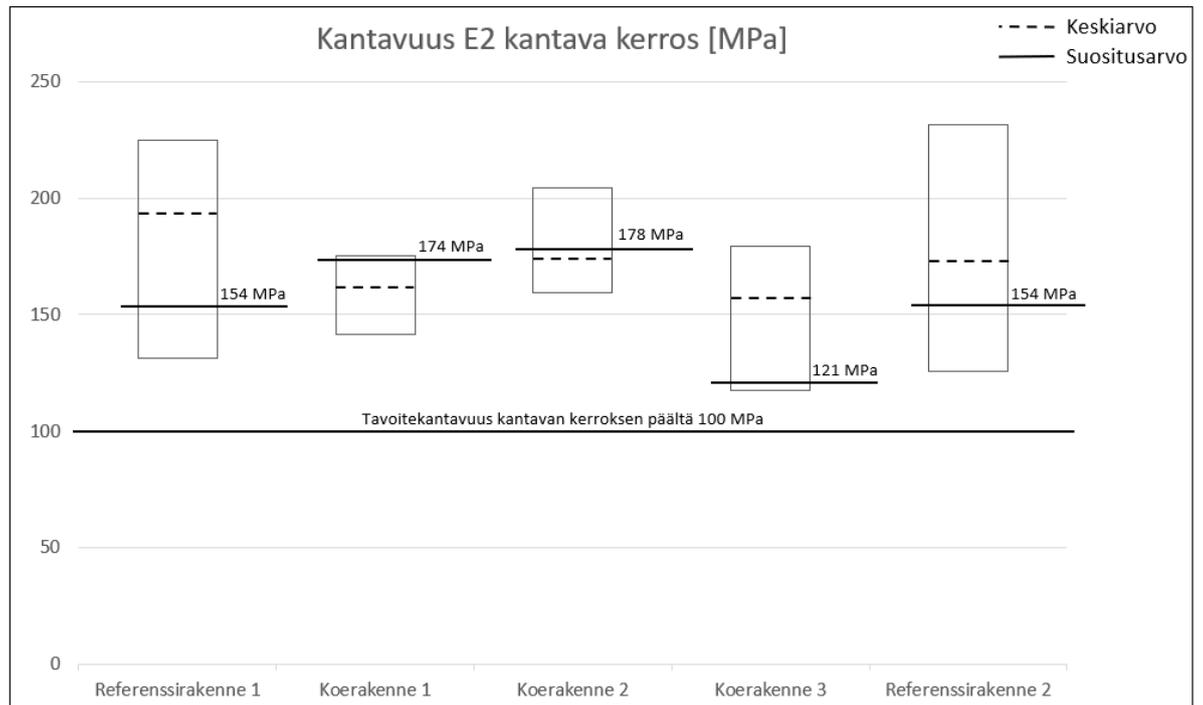
Kuva 11. Levykuormituskokeilla mitatut kantavuudet E2 suodatinkerroksen päältä.



Kuva 12. Levykuormituskokeilla mitatut kantavuudet E2 jakavan kerroksen päältä.



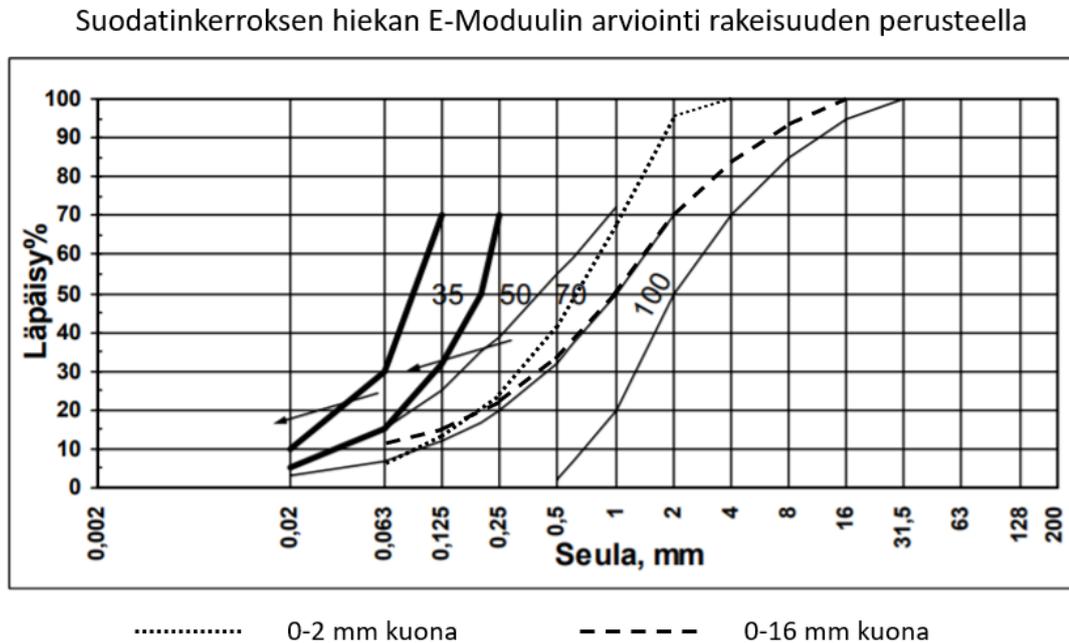
Kuva 13. Levykuormituskokeilla mitatut kantavuudet E2 kantavan kerroksen päältä.



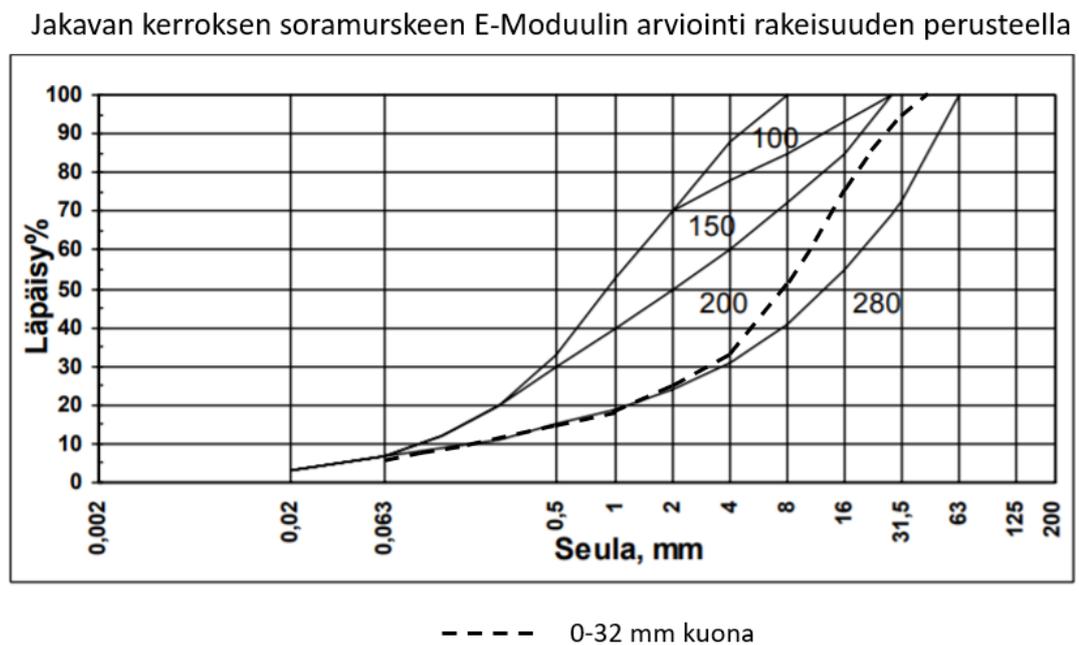
3.4.3 Takaisinlaskennat

Koerakenteessa käytetyille kuonamateriaaleille takaisinlaskettiin E-moduuliarvot Odemarkin menetelmällä kantavuusmittausten tuloksista. Kuonamateriaaleille ja referenssirakenteiden luonnonkiviaineiksille takaisinlasketut E-moduuliarvot on esitetty kuvassa 16. Vertailuarvona on esitetty rakeisuuden perusteella arvioidut E-moduulit (kuvissa 14. ja 15.). Tiehallinnon ohjeen mukaan, E-moduuliksi valitaan heikoin arvo, jonka alueella rakeisuuskäyrä käy (Tiehallinto, 2005).

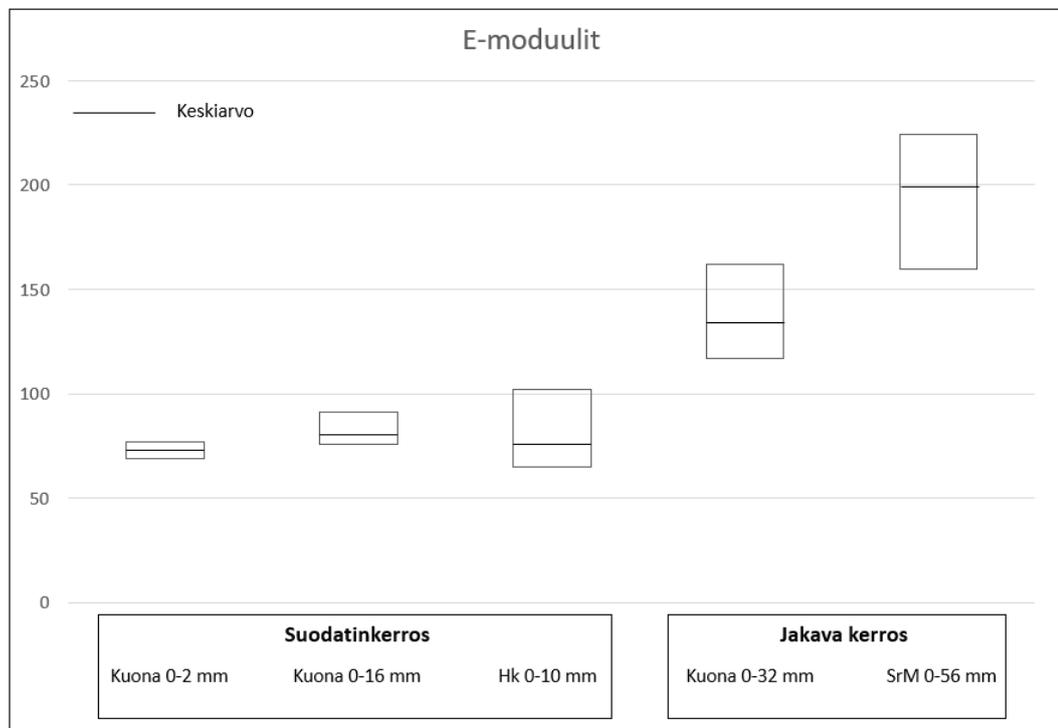
Kuva 14. Suodatinkerroksen kuonatuotteiden (0-2 mm ja 0-16 mm) rakeisuuskäyrät, sekä suodatinkerroksen luonnonhiekan E-moduuleja edustavat rakeisuusalueet. (Tiehallinto, 2005)



Kuva 15. Jakavan kerroksen kuonan (0-32 mm) rakeisuuskäyrä, sekä soramurskeiden E-moduuleja edustavat rakeisuusalueet. (Tiehallinto, 2005)



Kuva 16. Takaisinlasketut Odemarkin E-moduuliarvot koerakenteen rakennekerrosten tuotteille.



Kuonamateriaalien mitoitusmoduulit määritettiin käyttäen vertailuparitekniikkaa ja levykuormituskokeiden tuloksista takaisinlaskettuja kuonamateriaalien ja luonnon kiviainesten E-moduuliarvoja. Laskennassa käytettiin kaavaa 2. Väyläviraston `Uusiomateriaalien käyttö väylärakenteessa` -ohjeesta (Väylävirasto, 2020). Lasketut mitoitusmoduulit on esitetty taulukossa 3. Laskennasta saadut tulokset ovat samankaltaisia kuin aiemmissa tutkimuksissa lasketut E-moduuliarvot (Söderholm, 2020).

Kaava 2:

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

E = Uuden materiaalin alustava mitoitusmoduuli

E_t = Uuden materiaalin takaisinlaskettu moduuli

E_{pt} = Perinteisen materiaalin takaisinlaskettu moduuli

E_p = Perinteisen materiaalin mitoitusmoduuli

S_t = Uuden materiaalin takaisinlasketun moduulin keskihajonta

S_{pt} = Perinteisen materiaalin takaisinlasketun moduulin keskihajonta

Kuona 0-2 mm

$$E \frac{E_p}{E_{pt} - S_{pt}} \cdot (E_t - S_t) = \frac{70}{75,5 - 10,16} \cdot (72,5 - 3,32) = 74,11$$

Kuona 0-16 mm

$$E = \frac{E_p}{E_{pt} - S_{pt}} \cdot (E_t - S_t) = \frac{70}{75,5 - 10,16} \cdot (80,75 - 6,9) = 79,12$$

Kuona 0-32 mm

$$E = \frac{E_p}{E_{pt} - S_{pt}} \cdot (E_t - S_t) = \frac{280}{199,25 - 26,12} \cdot (206,75 - 130,2) = 123,8$$

Taulukko 3. Kuonamateriaaleille vertailuparitekniikalla lasketut mitoitusmoduulit, mittaustuloksista takaisinlaskettujen E-moduulien keskiarvo ja rakeisuuden perusteella arvioidut E-moduulit (kuvat 14-15).

| Kuona- tuote | Vertailuparitekniikalla laskettu mitoitusmoduuli E [Mpa] | Kenttämittauksista takaisinlaskettu E- moduuli (keskiarvo) [Mpa] | Rakeisuuden perusteella arvioitu E- Moduuli [Mpa] |
|-----------------|---|---|---|
| 0/2 mm | 74 | 72,5 | 70 |
| 0/16 mm | 79 | 80,75 | 70 |
| 0/32 mm | 124 | 206,75 (142,3)* | 200 |

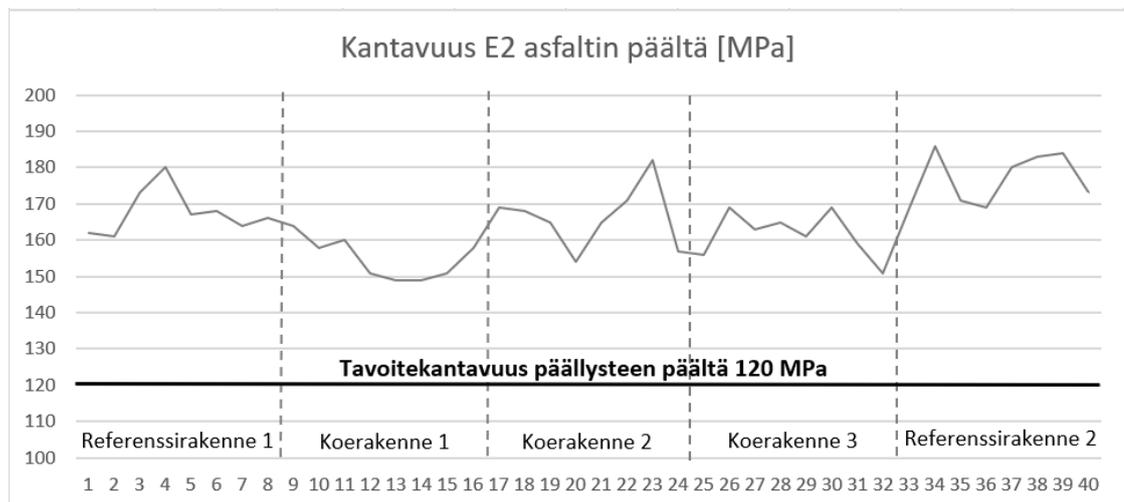
* 0-32 mm kuonajakkeen mittaustuloksissa oli yksi huomattavasti muita suurempi mittaustulos. Sulkeissa ilmoitettuna keskiarvo tämä yksi mittaustulos poistettuna.

3.5 Kenttämittaukset rakentamisen jälkeen

3.5.1 Kantavuus

Sidotun kantavan kerroksen päältä tehdään seuraavan kolmen vuoden ajan keväisin ja syksyisin kantavuusmittauksia raskaalla pudotuspainolaitteella rakentamisen jälkeen. Mittauksia tehdään 8 kappaletta jokaiseen kuona- ja verrokkirakenteeseen eli yhteensä 40. Mittaukset suoritetaan samoista mittauspisteistä ja suunnilleen samoin aikoina, jotta saadaan tietoa materiaalin mahdollisesta lujittumisesta ajan myötä. Tässä työssä raportoidaan ensimmäisen syksyn mittaustulokset, jotka suoritettiin 11.10.2021. Tavoitekantavuus päällysteen päältä oli 120MPa joka ylittyi jokaisen rakennekerroksen kohdalla. Kuvassa 17. on esitettyä ensimmäisen syksyn mittaustulokset.

Kuva 17. Pudotuspainolaitteella mitatut kantavuudet E2 asfaltin päältä.



3.5.2 Routanousu ja vaurioinventointi

Rakenteen routanousua seurataan vaituksilla kolmen talven ajan vähintään marraskuun puolivälistä huhtikuun puoliväliin saakka, tai kunnes routa on sulanut.

Mittauspisteitä on jokaisessa rakenteessa 8 kpl eli yhteensä 40 mittauspistettä. Vaaitustulokset otetaan ylös jokaisella mittauskerralla.

Vaurioinventointi suoritetaan keväisin roudan sulamisen jälkeen. Inventoitavan pinnan tulee olla lumeton, sekä jäätön ja mieluusti kostea, jolloin mahdolliset vauriot ovat parhaiten havaittavissa.

Arvioitavat vauriotyypit ovat:

- Pituushalkeamat
- Poikkihalkeamat
- Verkkohalkeamat
- Reiät ja purkaumat
- Leveät halkeamat
- Reunapainuma

Leveät halkeamat ja reunapainuma arvioidaan juoksumetreinä ja muut vauriotyypit prosentteina päällysteen kokonaispinta-alasta. Näiden mittauksien raportointi jää tämän opinnäytetyön ulkopuolelle.

4 RAKENNUSTEKNISET HAVAINNOT

Rakentaminen tapahtui toukokuussa 2021. Kuonatuotteet oli valmistettu etukäteen Hausjärven materiaalikeskuksella. Varastoinnissa oli tärkeää, että kasat oli peitetty huolellisesti, jotta optimivesipitoisuus pysyi lähellä optimaalista. Materiaalia kuljetettaessa oli varmistettava, että sitä ei pääse tahattomasti leviämään luontoon esim. pölyämisen muodossa eli kuormat toimitettiin peitettynä. Kuonalla rakennettaessa voitiin muutoin käyttää samaa konekalustoa kuin luonnonkiviaineilla tehtäessä.

4.1 Rakentaminen

Koerakenteen rakentaminen onnistui pääsääntöisesti hyvin. Kuonamateriaalit toimitettiin Hausjärven käsittelykeskukselta työmaalle tavallisella kuorma-autolla (kuva 18). Kuonaa toimitettaessa tuli kuormien olla peitettynä ja vaadittavat siirtoasiakirjat

mukana, koska kyseessä oli jätteen kuljettaminen. Kuormat jouduttiin kohteessa kippaamaan ajoväylältä ojaluiskaan, jonka seurauksena luiskat puhdistettiin työn loputtua, että kuonaa ei päätynyt muualle, kuin itse rakenteeseen.

Kuva 18. Kuonan toimitus kuorma-autolla työmaalle.



Kuonamateriaalien levittäminen rakenteeseen hoidettiin samalla telakaivinkoneella, kuin luonnonkiviainesten. (kuva 19). Levittäminen rakenteeseen sujui helposti ja työnjälki oli siistiä. Koneenkuljettaja ei ollut aiemmin työskennellyt kuonamateriaalien kanssa, mutta hänen mukaansa ei ollut eroa luonnonkiviaineksilla tekemiseen, ja kuona oli levitettävyydeltään jopa hieman parempaa kuin hiekka.

Kuva 19. Suodatinkerroksen tekoa kaivinkoneella.



4.2 Tiivistäminen

Suodatinkerroksessa molemmilla materiaaleilla 0/2 mm ja 0/16 mm käytettiin tiivistämisessä 6–8 yliajokertaa aiemman kokemuksen perusteella. Jakavan kerroksen materiaalin 0/32 mm tiivistysmäärä varmennettiin koetiivistyksellä. Koetiivistyskenttä oli kooltaan n. 4 x 10m . Jokaisen yliajokerran jälkeen tehtiin mittaukset kevyellä Loadman-pudotuspainolaitteella kolmesta eri kohdasta (kuva 21). Tiivistämistä jatkettiin siihen asti, kunnes tiivistymistä ei enää tapahtunut. Sopiva yliajokertojen määrä koetiivistyksen perusteella oli 7. Liitteessä 2. on esitetty kaikki Loadman-mittausten tulokset, joiden perusteella yliajokerta määritettiin. Rakenteen tiivistäminen suoritettiin 13 tn painoisella valssijyrällä, joka oli painavampi, kuin mitä alun perin oli suunnitelmissa määritetty. Tällä ei kuitenkaan ollut merkitystä kuonan tiivistämiseen. Kuvassa 20. tiivistämisessä käytetty valssijyrä.

Kuva 20. Koetiivistyskentän tiivistäminen.



Kuva 21. Loadman mittaus koetiivistyskentästä.



4.3 Sääolosuhteet

Kuonatuotteilla rakennettaessa sään vaihtelulla voi olla suurempi vaikutus, kuin luonnonkiviaineiksilla. Rankkasateella vaarana on kuonan pinnan liettyminen, kuten kuvassa 22 näkyy. Suodatinkerrosta rakennettaessa työmaalle osui rankka vesisadekuuro. 0/2 mm kuona läpäisi veden hyvin, mutta 0/16 mm kerroksen päälle vesi jäi seisomaan. Sateen päätyttyä vesi alkoi kuitenkin imeytyä rakenteeseen eikä siitä aiheutunut suurempia viivästyksiä. Sateen johdosta suodatinkerroksen kantavuusmittauksista jäi kuitenkin mittauspiste numero 10. mittaamatta.

Kuva 22. Liettynyt 0/16 mm kuonatuotteen pinta.



5 YHTEENVETO

Opinnäytetyön aihetta suunnitellessa Fortumilta tarjottiin tätä projektia, ja sen raportoimista opinnäytetyönä. Vuonna 2020 tehtiin saman tyylinen koerakenne jossa olin

mukana, joten tuntui luontevalta lähteä tähänkin projektiin mukaan. Työn tavoitteena oli selvittää kuonamateriaalien teknisiä ominaisuuksia ja toimivuutta todellisissa olosuhteissa, sekä tuottaa dataa Väyläviraston teknisen kelpoisuuden arviointia silmällä pitäen.

Koerakenteen rakentaminen sujui hyvin, eikä suurempia ongelmia tullut vastaan. Materiaalina kuona eroaa jonkin verran luonnonkiviaineksista, mutta niiden työstämisessä voidaan käyttää samaa konekalustoa. Kantavuusmittauksissa käytetty kolmen mittakellon levykuormituskoe kaivinkone vastapainona sekä koetiivistyskentässä käytetty Loadman kevyt pudotuspainolaite soveltuivat hyvin kuonamateriaalien mittauksiin.

Rakentamisen aikana nousi esiin, että kuonamateriaalien on oltava lähellä optimivesipitoisuutta, jotta saavutetaan riittävä tiiveysaste rakenteessa. Sääolosuhteilla on siis vaikutusta työn sujumiseen onnistuneesti. Suurimpana uhkana ovat kovat sateet ennen kuin kuonamateriaalit on ehditty tiivistää.

Koerakenteen aikana tehtyjen mittausten ja tutkimusten perusteella voitiin todeta, että kuonamateriaalit soveltuvat käytettäväksi tierakenteiden alempiin rakennekerroksiin. Suoritetut kantavuusmittaukset osoittivat, että rakenteelle asetetut vaatimukset täyttyivät.

Toteutuskustannuksia ei voida näin pienen rakenteen kohdalla verrata tavalliseen rakentamiseen. Jatkoa ajattelen olisikin kiinnostavaa tehdä kohde, jossa kuonamateriaalit olisivat jo alusta alkaen mukana hankinta-asiakirjoissa. Näin voitaisiin selvittää todelliset toteutuskustannukset. Tässä kohteessa rakennusprojekti oli jo alkanut, kun ryhdyimme suunnittelemaan koerakennetta kyseiselle kevyenliikenteenväylälle. Suunnitelmien, sopimusten ja lupien osalta olisi helpompaa, jos kuonamateriaalit olisivat mukana jo hankkeen alusta alkaen. Aikataulullisesti kuonamateriaaleilla rakentaminen on yhtä nopeaa kuin luonnonkiviaineksilla.

Tällaisten koerakentamisten avulla voidaan päästä siihen, että näillekin uusiomateriaaleille voidaan tulevaisuudessa mahdollisesti saada yleiset kansalliset hyväksytyt laatuvaatimukset.

Lähteet

Kuparinen, O. (2020). *Kalliomurskeen rakeisuuden vaikutus rakennekerrosten tiivistyvyyteen* [Kandidaatintyö, Tampereen yliopisto].

<https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/121028/KuparinenOtto.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

InfraRYL 21110 (1/2018). Suodatinkerrokset liite 2. Helsinki:Rakennustieto Oy.

[https://www.rakennustieto.fi/infraryl/extra/liitepopup.html.stx?xpointer=/InfraRYL/2018_1/tl/Liite_2_Kerrosrakenteiden_tiivistystyon_ja_tiiyidentarkkailun_menetelmat.xml%23xpointer\(//*\[@ID=!TLLiite2ID0EU_2018_1!\]\)](https://www.rakennustieto.fi/infraryl/extra/liitepopup.html.stx?xpointer=/InfraRYL/2018_1/tl/Liite_2_Kerrosrakenteiden_tiivistystyon_ja_tiiyidentarkkailun_menetelmat.xml%23xpointer(//*[@ID=!TLLiite2ID0EU_2018_1!]))

Sormunen, A. (2017). *Recovered Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash: Aggregate-Like Products For Civil Engineering Structures* [pro gradu-tutkielma, Tampereen teknillinen yliopisto].

https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/114469/sormunen_1503.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Suomen Erityisjäte Oy. (1/2018). *Jätteenpolton pohjakuona – ohje materiaalin hyödyntämiseen maarakentamisessa.*

<https://www.erityisjate.fi/client/erityisjate/userfiles/suomen-erityisjate-kuonaohje-a5-20180301-vs2.pdf>

Söderholm, A. (2020). *Jätteenpolton pohjakuona tierakenteessa – Koerakenteen rakentaminen ja tutkimus pohjakuonan teknisistä ominaisuuksista* [opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu].

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/349589/Soderholm_Anniina.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Tiehallinto. 27.1.2005. *Tietoa tiesuunnitteluun nro 71D.*

<https://julkaisut.vayla.fi/thohje/tts71d.pdf>

Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 843/2017.

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170843#Pidp446275008>

Väylävirasto. (6/2020). *Uusiomateriaalien käyttö väylärakentamisessa.*

https://julkaisut.vayla.fi/pdf11/vo_2020-06_uusiomateriaalien_kaytto_web.pdf

Liite 1: Ympäristökelpoisuustulokset

Ympäristökelpoisuus MARA-asetuksen mukaiset raja-arvot.

Väylä, jätteen kerrospaksuus <1,5m päällystetty.

| Aine | Yksikkö | Raja-arvo | näyte 0-2 mm | näyte 0-2 mm | näyte 0-16 mm | näyte 0-16 mm | näyte 0-32 mm | näyte 0-32 mm |
|--------------------------------|---------|---------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Liennut orgaaninen hiili (DOC) | mg/kg | 500 | 274 | 277 | <100 | <100 | <100 | <100 |
| Arseeni (As) | mg/kg | 2 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 |
| Barium (Ba) | mg/kg | 100 | <4,0 | <4,0 | <4,0 | <4,0 | <4,0 | <4,0 |
| Kadmium (Cd) | mg/kg | 0,06 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 | <0,01 |
| Kromi (Cr) | mg/kg | 10 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,3 | <0,1 | <0,1 |
| Kupari (Cu) | mg/kg | 10 | 0,8 | 0,8 | <0,4 | <0,4 | <0,4 | <0,4 |
| Elohopea (Hg) | mg/kg | 0,03 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 | <0,002 |
| Molybdeeni (Mo) | mg/kg | 6 | 3,1 | 3,1 | 2 | 2 | 2,1 | 1,5 |
| Nikkeli (Ni) | mg/kg | 2 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 |
| Lyijy (Pb) | mg/kg | 2 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 | <0,1 |
| Antimoni (Sb) | mg/kg | 0,7 | 0,43 | 0,42 | 0,27 | 0,26 | 0,41 | 0,38 |
| Seleeni (Se) | mg/kg | 1 | 0,09 | 0,09 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | 0,04 |
| Vanadiini (V) | mg/kg | 3 | <0,4 | <0,4 | <0,4 | <0,4 | <0,4 | <0,4 |
| Sinkki (Zn) | mg/kg | 15 | <0,8 | <0,8 | <0,8 | <0,8 | <0,8 | <0,8 |
| Kloridi (Cl-) | mg/kg | 11 000 | 2 428 | 2 455 | 1 897 | 1 938 | 1 181 | 1 086 |
| Fluoridi (F-) | mg/kg | 150 | 14 | 14 | 9,8 | 9,5 | 11 | 10 |
| Sulfaatti (SO42-) | mg/kg | 18 000 | 6 578 | 6 688 | 4 225 | 4 289 | 3 258 | 2 939 |

Liite 2: Koetiivistyskentän Loadman-mittausten tulokset

Jyräys 1.

| Mittauspiste 1. | | |
|-----------------|-------|-------|
| Pudotus | E MPa | E2/E1 |
| 1 | 42 | |
| 2 | 61 | 1,45 |
| 3 | 64 | 1,51 |
| 4 | 64 | 1,51 |
| 5 | 66 | 1,55 |
| 6 | 67 | 1,57 |
| 7 | 66 | 1,56 |
| 8 | | |
| 9 | | |
| 10 | | |
| Tulos | 67 | 1,57 |

| Mittauspiste 2. | | |
|-----------------|-------|-------|
| Pudotus | E MPa | E2/E1 |
| 1 | 33 | |
| 2 | 49 | 1,48 |
| 3 | 53 | 1,58 |
| 4 | 56 | 1,67 |
| 5 | 57 | 1,72 |
| 6 | 58 | 1,74 |
| 7 | 60 | 1,8 |
| 8 | 60 | 1,8 |
| 9 | 62 | 1,86 |
| 10 | 60 | 1,81 |
| Tulos | 62 | 1,86 |

| Mittauspiste 3. | | |
|-----------------|-------|-------|
| Pudotus | E MPa | E2/E1 |
| 1 | 34 | |
| 2 | 50 | 1,48 |
| 3 | 55 | 1,62 |
| 4 | 56 | 1,66 |
| 5 | 57 | 1,69 |
| 6 | 57 | 1,69 |
| 7 | 59 | 1,76 |
| 8 | 60 | 1,78 |
| 9 | 62 | 1,82 |
| 10 | 61 | 1,8 |
| Tulos | 62 | 1,82 |

Jyräys 2.

| Mittauspiste 1. | | |
|-----------------|-------|-------|
| Pudotus | E MPa | E2/E1 |
| 1 | 37 | |
| 2 | 54 | 1,45 |
| 3 | 58 | 1,57 |
| 4 | 59 | 1,6 |
| 5 | 61 | 1,64 |
| 6 | 63 | 1,69 |
| 7 | 63 | 1,69 |
| 8 | 64 | 1,72 |
| 9 | 64 | 1,73 |
| 10 | 64 | 1,74 |
| Tulos | 64 | 1,74 |

| Mittauspiste 2. | | |
|-----------------|-------|-------|
| Pudotus | E MPa | E2/E1 |
| 1 | 34 | |
| 2 | 51 | 1,51 |
| 3 | 58 | 1,7 |
| 4 | 63 | 1,86 |
| 5 | 65 | 1,9 |
| 6 | 67 | 1,95 |
| 7 | 67 | 1,98 |
| 8 | 68 | 1,99 |
| 9 | | |
| 10 | | |
| Tulos | 68 | 1,99 |

| Mittauspiste 3. | | |
|-----------------|-------|-------|
| Pudotus | E MPa | E2/E1 |
| 1 | 32 | |
| 2 | 48 | 1,48 |
| 3 | 56 | 1,71 |
| 4 | 59 | 1,81 |
| 5 | 62 | 1,9 |
| 6 | 63 | 1,94 |
| 7 | 64 | 1,97 |
| 8 | 65 | 1,99 |
| 9 | 66 | 2,03 |
| 10 | 67 | 2,04 |
| Tulos | 68 | 2,04 |

Jyräys 3.

| | | Mittauspiste 1. | |
|---------|--|-----------------|-------|
| Pudotus | | E MPa | E2/E1 |
| 1 | | 46 | |
| 2 | | 63 | 1,35 |
| 3 | | 64 | 1,39 |
| 4 | | 67 | 1,44 |
| 5 | | 69 | 1,49 |
| 6 | | 69 | 1,5 |
| 7 | | 72 | 1,56 |
| 8 | | 71 | 1,53 |
| 9 | | | |
| 10 | | | |
| Tulos | | 72 | 1,56 |

| | | Mittauspiste 2. | |
|--|--|-----------------|-------|
| | | E MPa | E2/E1 |
| | | 38 | |
| | | 62 | 1,6 |
| | | 66 | 1,7 |
| | | 68 | 1,77 |
| | | 68 | 1,75 |
| | | 70 | 1,81 |
| | | 70 | 1,81 |
| | | 71 | 1,83 |
| | | 72 | 1,86 |
| | | 70 | 1,82 |
| | | 72 | 1,86 |

| | | Mittauspiste 3. | |
|--|--|-----------------|-------|
| | | E MPa | E2/E1 |
| | | 41 | |
| | | 61 | 1,47 |
| | | 62 | 1,49 |
| | | 69 | 1,65 |
| | | 70 | 1,67 |
| | | 70 | 1,68 |
| | | 74 | 1,76 |
| | | 72 | 1,73 |
| | | | |
| | | | |
| | | 74 | 1,76 |

Jyräys 4.

| | | Mittauspiste 1. | |
|---------|--|-----------------|-------|
| Pudotus | | E MPa | E2/E1 |
| 1 | | 35 | |
| 2 | | 56 | 1,58 |
| 3 | | 59 | 1,67 |
| 4 | | 61 | 1,73 |
| 5 | | 67 | 1,89 |
| 6 | | 67 | 1,9 |
| 7 | | 69 | 1,94 |
| 8 | | 68 | 1,92 |
| 9 | | | |
| 10 | | | |
| Tulos | | 69 | 1,94 |

| | | Mittauspiste 2. | |
|--|--|-----------------|-------|
| | | E MPa | E2/E1 |
| | | 37 | |
| | | 58 | 1,59 |
| | | 63 | 1,7 |
| | | 66 | 1,78 |
| | | 68 | 1,84 |
| | | 69 | 1,88 |
| | | 69 | 1,87 |
| | | 71 | 1,93 |
| | | 71 | 1,92 |
| | | 71 | 1,94 |
| | | 71 | 1,94 |

| | | Mittauspiste 3. | |
|--|--|-----------------|-------|
| | | E MPa | E2/E1 |
| | | 42 | |
| | | 61 | 1,47 |
| | | 64 | 1,54 |
| | | 68 | 1,63 |
| | | 70 | 1,67 |
| | | 71 | 1,69 |
| | | 72 | 1,71 |
| | | 70 | 1,67 |
| | | | |
| | | | |
| | | 72 | 1,71 |

Jyräys 5.

| | | Mittauspiste 1. | |
|---------|--|-----------------|-------|
| Pudotus | | E MPa | E2/E1 |
| 1 | | 45 | |
| 2 | | 64 | 1,43 |
| 3 | | 70 | 1,55 |
| 4 | | 70 | 1,55 |
| 5 | | 70 | 1,56 |
| 6 | | | |
| 7 | | | |
| 8 | | | |
| 9 | | | |
| 10 | | | |
| 11 | | | |
| Tulos | | 70 | 1,56 |

| | | Mittauspiste 2. | |
|--|--|-----------------|-------|
| | | E MPa | E2/E1 |
| | | 41 | |
| | | 64 | 1,56 |
| | | 69 | 1,67 |
| | | 72 | 1,75 |
| | | 72 | 1,77 |
| | | 74 | 1,8 |
| | | 74 | 1,82 |
| | | 75 | 1,83 |
| | | 76 | 1,86 |
| | | 76 | 1,84 |
| | | 76 | 1,86 |
| | | 76 | 1,86 |

| | | Mittauspiste 3. | |
|--|--|-----------------|-------|
| | | E MPa | E2/E1 |
| | | 37 | |
| | | 61 | 1,61 |
| | | 67 | 1,77 |
| | | 68 | 1,8 |
| | | 72 | 1,9 |
| | | 73 | 1,93 |
| | | 73 | 1,93 |
| | | 75 | 1,98 |
| | | 75 | 1,98 |
| | | 76 | 2 |
| | | 75 | 1,99 |
| | | 76 | 2 |

Jyräys 6.

| | | Mittauspiste 1. | |
|---------|--|-----------------|-------|
| Pudotus | | E MPa | E2/E1 |
| 1 | | 33 | |
| 2 | | 56 | 1,66 |
| 3 | | 61 | 1,82 |
| 4 | | 64 | 1,9 |
| 5 | | 66 | 1,97 |
| 6 | | 66 | 1,97 |
| 7 | | 68 | 2,01 |
| 8 | | 69 | 2,04 |
| 9 | | 70 | 2,07 |
| 10 | | 70 | 2,08 |
| 11 | | 71 | 2,1 |
| 12 | | 65 | 1,93 |
| Tulos | | 71 | 2,1 |

| | | Mittauspiste 2. | |
|--|--|-----------------|-------|
| | | E MPa | E2/E1 |
| | | 39 | |
| | | 64 | 1,61 |
| | | 68 | 1,72 |
| | | 70 | 1,76 |
| | | 73 | 1,84 |
| | | 74 | 1,86 |
| | | 73 | 1,85 |
| | | | |
| | | | |
| | | 74 | 1,86 |

| | | Mittauspiste 3. | |
|--|--|-----------------|-------|
| | | E MPa | E2/E1 |
| | | 38 | |
| | | 63 | 1,65 |
| | | 67 | 1,77 |
| | | 71 | 1,87 |
| | | 73 | 1,92 |
| | | 74 | 1,95 |
| | | 74 | 1,94 |
| | | 74 | 1,95 |
| | | | |
| | | 74 | 1,95 |

Jyräys 7.

| Mittauspiste 1. | | |
|-----------------|-------|-------|
| Pudotus | E MPa | E2/E1 |
| 1 | 45 | |
| 2 | 65 | 1,44 |
| 3 | 70 | 1,53 |
| 4 | 71 | 1,56 |
| 5 | 72 | 1,57 |
| 6 | 73 | 1,6 |
| 7 | 74 | 1,62 |
| 8 | 74 | 1,64 |
| 9 | 73 | 1,6 |
| Tulos | 74 | 1,64 |

| Mittauspiste 2. | | |
|-----------------|-------|--|
| E MPa | E2/E1 | |
| 39 | | |
| 65 | 1,66 | |
| 70 | 1,79 | |
| 73 | 1,86 | |
| 75 | 1,92 | |
| 75 | 1,9 | |
| 76 | 1,93 | |
| 76 | 1,93 | |
| 76 | 1,94 | |
| 76 | 1,94 | |

| Mittauspiste 3. | | |
|-----------------|-------|--|
| E MPa | E2/E1 | |
| 39 | | |
| 64 | 1,62 | |
| 70 | 1,77 | |
| 71 | 1,81 | |
| 73 | 1,86 | |
| 75 | 1,9 | |
| 75 | 1,91 | |
| 75 | 1,91 | |
| 75 | 1,91 | |
| 75 | 1,91 | |

Jyräys 8.

| Mittauspiste 1. | | |
|-----------------|-------|-------|
| Pudotus | E MPa | E2/E1 |
| 1 | 40 | |
| 2 | 60 | 1,51 |
| 3 | 64 | 1,61 |
| 4 | 64 | 1,72 |
| 5 | 69 | 1,73 |
| 6 | 70 | 1,75 |
| 7 | 71 | 1,76 |
| 8 | 72 | 1,8 |
| 9 | 72 | 1,81 |
| 10 | 72 | 1,81 |
| Tulos | 72 | 1,81 |

| Mittauspiste 2. | | |
|-----------------|-------|--|
| E MPa | E2/E1 | |
| 39 | | |
| 64 | 1,63 | |
| 68 | 1,72 | |
| 72 | 1,8 | |
| 72 | 1,83 | |
| 74 | 1,87 | |
| 74 | 1,88 | |
| 76 | 1,91 | |
| 75 | 1,9 | |
| 76 | 1,91 | |

| Mittauspiste 3. | | |
|-----------------|-------|--|
| E MPa | E2/E1 | |
| 55 | | |
| 68 | 1,23 | |
| 74 | 1,34 | |
| 76 | 1,38 | |
| 76 | 1,39 | |
| 76 | 1,39 | |
| | | |
| | | |
| 76 | 1,39 | |