

Yhdyskuntajätteenpolton pohjakuonan teknis- ten ominaisuuksien vertailu

Tiivistelmä

Tekijä(t) Jarkko Härkisuo	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä 35	Valmistumisaika 2023
Työn nimi Yhdyskuntajätteenpolton pohjakuonan teknisten ominaisuuksien vertailu		
Tutkinto ja koulutusala Insinööri (AMK), rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus		
Toimeksiantajaorganisaatio Welado Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli vertailla yhdyskuntajätteenpolton pohjakuonien rakenneteknisiä ominaisuuksia materiaalintoimittajien toimittaman tutkimusaineiston sekä aiheesta tehtyjen opinnäyte-, diplomitöiden ja väitöskirjan pohjalta. Vertailusta tuotettiin kirjallinen selvitys Väylävirastolle osana uusiomateriaaliselvitystä pohjakuonan käytöstä ja pohjakuonien materiaalintoimittajien hakemaa teknisen soveltuvuuden arviointia, joka sallisi pohjakuonan käytön Väyläviraston hankkeissa. Tutkittavana oli aineistoa laboratoriokokeista ja koerakenteista, joista vertailtiin teknisiä ominaisuuksia InfraRYLissä ja Väyläviraston eri suunnitteluohjeissa esitettyihin teknisiin vaatimuksiin. Selvitystyössä tutkittiin erityisesti pohjakuonan routivuutta, E-moduulia ja hienontumista.</p> <p>Tutkimuksen perusteella pohjakuona soveltuisi sellaisenaan pengermateriaaliksi, johon Väylävirasto haluaa sen ensin sallia. Pohjakuonan soveltuvuutta muihin rakennosiin tarkasteltiin jatkoa ajatellen suodatinkerros- ja jakavan kerrosten osalta. Näiden rakennekerrosten käytön osalta suositellaan rakennettavan lisää koerakenteita, jotta saadaan kerättyä enemmän tutkimusaineistoa ja -tuloksia</p> <p>Selvityksessä tarkastellun aineiston perusteella kuonan tekniset ominaisuudet täyttävät sekä InfraRYL:n että Väyläviraston Tierakenteen suunnitteluohjeen pengermateriaaleille asettamat tekniset vaatimukset. Esille nousseet riskit ovat hallittavissa suunnittelu- ja käyttöohjeilla sekä materiaalintoimittajien laadunvarmistusjärjestelmillä.</p>		
Asiasanat yhdyskuntajätteenpolton pohjakuona, uusiomateriaali, pengermateriaali, suodatinkerros, jakava kerros		

Abstract

Author(s) Jarkko Härkisuo	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2023
	Number of Pages 35	
Title of Publication Comparison of technical characteristics of municipal solid waste incineration bottom ash		
Degree, Field of Study Bachelor of Engineering, Civil and Construction Engineering		
Organization of client Welado Oy		
Abstract <p>The purpose of this thesis was to compare technical characteristics of municipal solid waste incineration bottom ashes (MSWI BA) of different BA manufacturers by comparing given literature of BA manufacturers and theses, master's theses, and doctoral theses. There was produced statement for Finnish Transport Infrastructure Agency as part of recovered material statement and bottom ash manufacturers reach for material approval for bottom ash use in Finnish Transport Infrastructure Agency's projects. Compared matter was collected from laboratory and from experimental structures and it was compared to technical requirements in InfraRYL and designing guidelines of Finnish Transport Infrastructure Agency. The study focused specially on characteristics of ground frost in BA, E-Modulus of BA and pulverization of BA.</p> <p>Based on the study, BA would be suitable for use in bank structure which is also Finnish Transport Infrastructure Agency's first goal for BA in use. For future use, suitability of BA in road structural layers as in filtering and sub-base layers was also studied. In those road layers is recommended to construct more experimental structures to maintain more material of BA.</p> <p>The material studied in this study indicates, that BA's technical characteristics fulfills technical requirements for both InfraRYL and Finnish Transport Agency's designing guide for road structure banks. Identified risks can be managed by following designing and user manuals and material providers quality control protocols.</p>		
Keywords municipal solid waste incineration bottom ash, recovered material, bank material, filtered layer, sub-base layer		

Sisällys

1	Johdanto.....	2
2	Yhdyskuntajätteenpolton pohjakuona	3
2.1	Pohjakuona.....	3
2.2	Pohjakuonan polttomäärät ja polttoprosessit.....	4
2.3	Pohjakuonan jalostusprosessit.....	8
2.4	Pohjakuonan laatuvaatimukset	10
3	Jätteenpolton pohjakuonan hyödyntäminen	14
3.1	Ympäristökelpoisuus.....	14
3.1.1	MARA-asetus	14
3.1.2	Ympäristölupa.....	15
3.1.3	Tuotteistus ja sivutuotestatus.....	15
3.2	Tekniset vaatimukset	17
3.3	Pohjakuona maanrakentamisessa	19
3.3.1	Pohjakuonan hankinta	19
3.3.2	Hyödyntämiskohteet maarakentamisessa.....	20
3.4	Pohjakuonan käyttö Euroopan ja Yhdysvaltojen alueella	22
3.5	Pohjakuonan käytön vaikutus hiilijalanjälkeen.....	23
4	Selvitys kuonan teknisistä ominaisuuksista.....	24
4.1	Selvityksen rajaus.....	25
4.2	Pohjakuonan E-moduuli.....	26
4.3	Pohjakuonan routivuus	26
4.4	Pohjakuonan hienontuminen.....	27
4.5	Poltto- ja jalostusprosessin vaikutus pohjakuonan laatuun.....	28
4.6	Pohjakuonasta rakennettuja rakenteita	28
4.7	Pohjakuonan käyttökohteet.....	28
4.8	Materiaalintoimittajien tunnistamat riskit ja mahdollisuudet	29
4.9	Selvitystyössä havaitut riskit ja mahdollisuudet	31
4.10	Selvitystyön yhteenveto	31
5	Yhteenveto ja pohdinta	33
	Lähteet.....	35

Käsitteet

CLP-asetus:	Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus kemikaalien luokituksesta, merkinnöistä ja niiden pakkaamisesta.
E50-moduuli:	Rakenteen kuormittaminen puolella murtotilannetta vastaava jännityksestä.
Heterogeeninen:	Useasta eri kivilajista muodostunut mineraali.
Inerti:	Aines, joka ei reagoi kemiallisesti muiden aineiden kanssa.
InfraRYL:	Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset.
Kalsiitti:	Kalsiitti muodostaa kalkkikiven, jota käytetään muun muassa sementin raaka-aineena ja paperin valkaisussa.
Koostekiviaines:	Useasta eri raekoon kuonakiviaineksesta sekoittamalla valmistettu kuonajae.
MARA-asetus:	Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 843/2017.
Pyrolyysi:	Kemiallinen reaktio, jossa orgaanista kiinteää ainetta hajotetaan kuumentamalla ilman, että happi pääsee vaikuttamaan prosessiin.
Pyörrevirtaerotin:	Ei-magneettisten metallien erotteluun käytettävä laite, jonka luoma magneettikenttä erottelee materiaalit toisistaan materiaalin sähkönjohtavuuden mukaan.
Raakakuona:	Arinapoltoista syntyneitä kuonaa, jota ei ole vielä käsitelty eikä siitä ole poistettu metalleja tai muita ylimääräisiä aineksia.
REACH-asetus:	Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus kemikaalien rekisteröinnistä, arvioinnista, lupamenettelyistä ja rajoituksista.
Stabilointi:	Orgaaninen aines muutetaan epäorgaaniseksi tai erittäin hitaasti hajoavaksi.
Sullotun maan tekniikka:	Kostea maa-ainesta tiivistetään muottiin, josta valmistuu tiivis, yhtenäinen rakenne ja jonka muotit voidaan poistaa välittömästi tiivistyksen jälkeen.

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan yhdyskuntajätteenpolton pohjakuonan soveltuvuutta pengerrakenteeseen ja sen teknisiä ominaisuuksia verrattuna neitseelliseen maa-ainekseen. Työssä vertaillaan materiaalintoimittajien rakentamista koerakenteista ja laboratoriokoikeista saatuja tutkimustuloksia sekä keskenään materiaalintoimittajien välillä, että myös InfraRYLissä esitettyihin vaatimuksiin. Opinnäytetyön aihe on rajattu käsittelemään pohjakuonan soveltuvuutta pengerrakenteeseen aiemmin rakennetuista koerakenteista saaduista tutkimustuloksista materiaalintoimittajien toimittaman aineiston perusteella. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Welado Oy.

Rakennusala käyttää noin kolmanneksen maailman luonnonvaroista ja se tuottaa noin neljänneksen kaikesta syntyvästä kiinteästä jätteestä. Materiaalien kiertotalousaste, josta käy ilmi kierrätetyn materiaalin osuus verrattuna kaikkeen käytettyyn materiaaliin, oli Suomessa noin 7 % vuonna 2018, kun keskiarvo EU:ssa oli noin 11 %. Suomi on näin ollen hieman jäljessä muihin EU:n maihin verrattuna. (Valtioneuvoston periaatepäätös kiertotalouden strategisesta ohjelmasta 2021, 2.)

Aikaisemmin pohjakuonaa on käytetty kaatopaikkarakenteiden rakentamiseen, joka on hiljentynyt viimeisen vuosikymmenen aikana kasvaneen jätteiden kierrätyksen ja uusiokäytön lisääntyttyä. Pohjakuonalle on tarvetta löytää uusia käyttökohteita, joissa sillä voitaisiin korvata luonnonkiviaineksia ja näin ollen vähentää uusiutumattoman luonnonkiviaineksen käyttöä. Jalostamatonta raakakuonaa tuotetaan Suomessa noin 300 000 tonnia vuosittain. (Suomen Erityisjäte Oy, 2022.)

Tässä opinnäytetyössä vertaillaan pohjakuonan materiaalintoimittajien tuottaman aineiston pohjalta kerättyjä tutkimustuloksia pohjakuonan teknisten ominaisuuksien ja materiaalin tasalaatuisuuden osalta. Kerättyjen tulosten pohjalta laaditaan toimeksiantajan toimesta selvitys pohjakuonan käytöstä pengerrakenteessa, joka jää toimeksiantajan ja kolmannen osapuolen väliseksi selvitykseksi.

Welado Oy on Suomessa ja Ruotsissa toimiva riippumaton rakennusalan konsultointiyritys, joka tarjoaa palveluita energia-, kiinteistö-, teollisuus- ja väylärakentamisen saralla sekä liikkeenjohdon konsultoinnissa. Yritys on perustettu 2017 ja sen päätoimipaikka on Oulu. Yrityksessä työskentelee tällä hetkellä noin 300 henkilöä. Toimistoja Weladolla on tällä hetkellä 16 ja ne kattavat toiminta-alueenaan koko Suomen. Yrityksen liikevaihto vuonna 2022 oli 26 miljoonaa euroa.

2 Yhdyskuntajätteenpolton pohjakuona

2.1 Pohjakuona

Yhdyskuntajätteenpolton pohjakuonalla (jäljempänä kuona) tarkoitetaan yhdyskuntajätteenpoltosta syntyvää kuonaa, jonka koostumus on pääosin mineraaliainesta. Kuona sisältää noin 15–45 % palamatonta materiaalia, riippuen poltettavan yhdyskuntajätteen laadusta. (Harju ym. 2022 6.) Raakakuona, joka on jalostamatonta kuonaa, sisältää muun muassa lasia, rautapitoisia ja ei-rautapitoisia metalleja, kiviainesta, keramiikkaa, betonia ja tuhkaa. Jotta kuonaa voidaan hyödyntää maarakentamisessa, tulee kuonasta poistaa rauta- ja ei-rautapitoiset metallit. Metallien poistaminen parantaa kuonan käyttöominaisuuksia hyötykäytön osalta ja samalla saadaan kuonan sisältämä ei-rautapitoinen metallijae, kuten alumiini, kupari ja lyijy kierrätettyä. (Suomen Erityisjäte Oy 2022.) Käsiteltyä jätteenpolton kuonaa on sallittu käytettäväksi teollisuus- ja varastorakennusten pohjarakenteissa sekä väylä- ja kenttärakenteissa väylä- ja kenttärakenteissa (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 843/2017, liite 1). Kuvassa 1 on kuvattu kuonasta rakennettavaa kenttärakennetta.



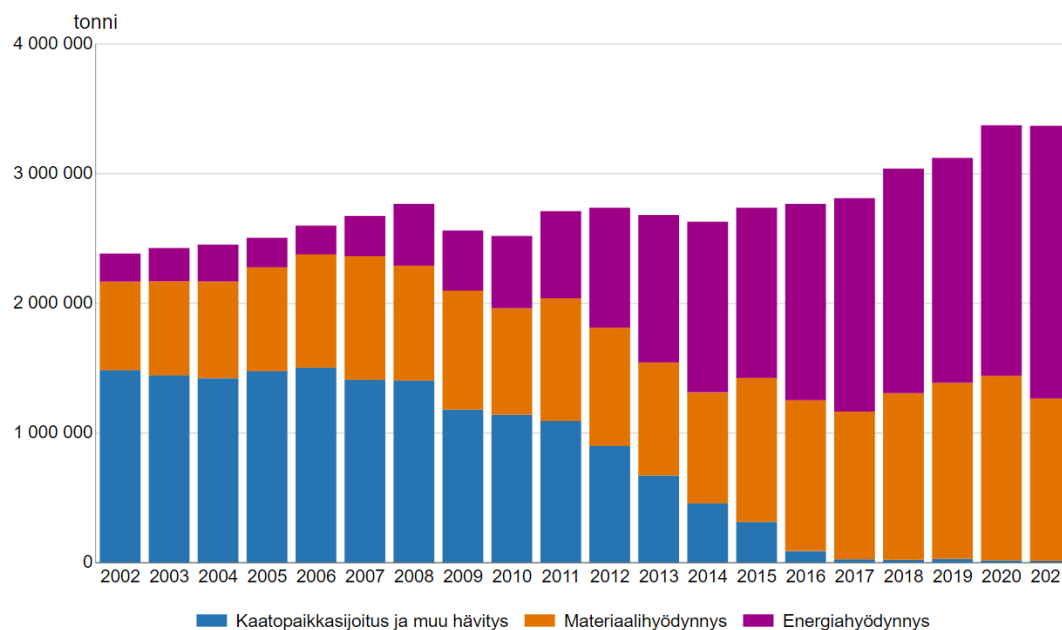
Kuva 1. Yhdyskuntajätteenpolton pohjakuonaa levitetään kenttärakenteeseen. Kuvan vasemmassa laidassa rakenteeseen sijoitettavia hienonemissäkkejä (Ahlqvist 2021)

Kuona on luonnonhiekkaa ja -sora muistuttavaa materiaalia, joka jää yhdyskuntajätteen polton jälkeen jätteenpolttolaitoksen arinan päälle. Tyypillisesti, pohjakuona jäädytetään heti polttoprosessin jälkeen, jonka seurauksena kuonan vesipitoisuus vaihtelee 15–25 % välillä. Kuonan nopean jäädyttämisen seurauksena kuona on osittain lasimainen, kevyt materiaali. Kuona on erittäin huokoista ja kevyttä ja sen kuivatiheys alle 100 mm raekoossa on noin 1500–2000 kg/m³. Kuonan raekoko jakaantuu yleisesti ottaen siten, että pohjakuonan massasta voi olla jopa 40 % alle 2 mm raekokoa ja alle 10 mm raekokoa on 80 %. (Kaartinen ym. 2010, 21.)

Kuona on useimmiten heterogeeninen materiaali, jonka suurimpina pitoisuuksia esiintyviä yhdisteitä ovat piin ja alumiinin oksidit. Pohjakuonan tyypillinen koostumus sisältää noin 2,5–3 % ei-magneettisia metalleja, 10 % magneettisia metalleja, 1–3 % orgaanista ainesta, joka on palamatonta sekä 80–85 % kuonaa. Kuonassa olevia alkuaineita, joiden pitoisuus on enemmän kuin 1 %, ovat rauta, pii, alumiini, kalsium, hiili, natrium, ja happi, jonka pitoisuus on suurin, noin 40 %. Kuonan painosta noin 80–90 % muodostuu näistä alkuaineista. Monet alkuaineista esiintyvät oksideina, mikä selittää myös suuren hapen pitoisuuden kuonassa. Alkuaineiden liukoisuus kuonasta voi vaihdella huomattavasti polttotekniikan, poltetun jätteen sekä poltto-olosuhteiden mukaan. Verrattuna inertteihin ja kivimäisiin materiaaleihin erityisesti kuparin, sinkin, lyijyn, sulfaatin ja orgaanisen hiilen liukoisuus saattaa esiintyä pohjakuonassa kohonneena. (Kaartinen ym. 2010, 22–23.)

2.2 Pohjakuonan polttomäärät ja polttoprosessit

Suomessa yhdyskuntajätettä tuotetaan vuosi vuodelta enemmän. Esimerkiksi vuoden 2020 aikana yhdyskuntajätettä tuotettiin 3 296 000 tonnia, joka tarkoittaa noin 170 000 tonnin kasvua edeltävään vuoteen verrattuna. Yhdyskuntajätteeksi luokitellaan asumisesta syntyvien jätteiden lisäksi niihin rinnastettavat teollisuudesta, kaupoista ja palveluista syntyvät jätteet, joita syntyy muun muassa toimistoista ja ruokaloista. Vuonna 2020 yhdyskuntajätteen energiahyödyntäminen oli noin 58 %, joka on 1 911 680 tonnia kyseisen vuoden yhdyskuntajätteen määrästä. Kaatopaikkasijoitukseen on 2020 päätynyt enää noin 0,5 % ja materiaalihyödynnykseen noin 42 % (kuvio 1). Kaatopaikkasijoitukseen menevä jäte sisältää muun muassa villa- ja asbestijätettä, joita ei voida polttaa tai käyttää uudelleen. (SVT 2021.) Aiempaan vuoteen verrattuna oli vuonna 2021 energiahyödyntämisen osuus kasvanut 62 %:iin ja materiaalihyödynnyksen osuus laski 37 %:iin. Kaatopaikkasijoituksen osuus laski entisestään 0,4 %:iin (SVT 2022).



Kuvio 1. Yhdyskuntajätteet käsittelytavoittain vuosina 2002–2021 (SVT 2022)

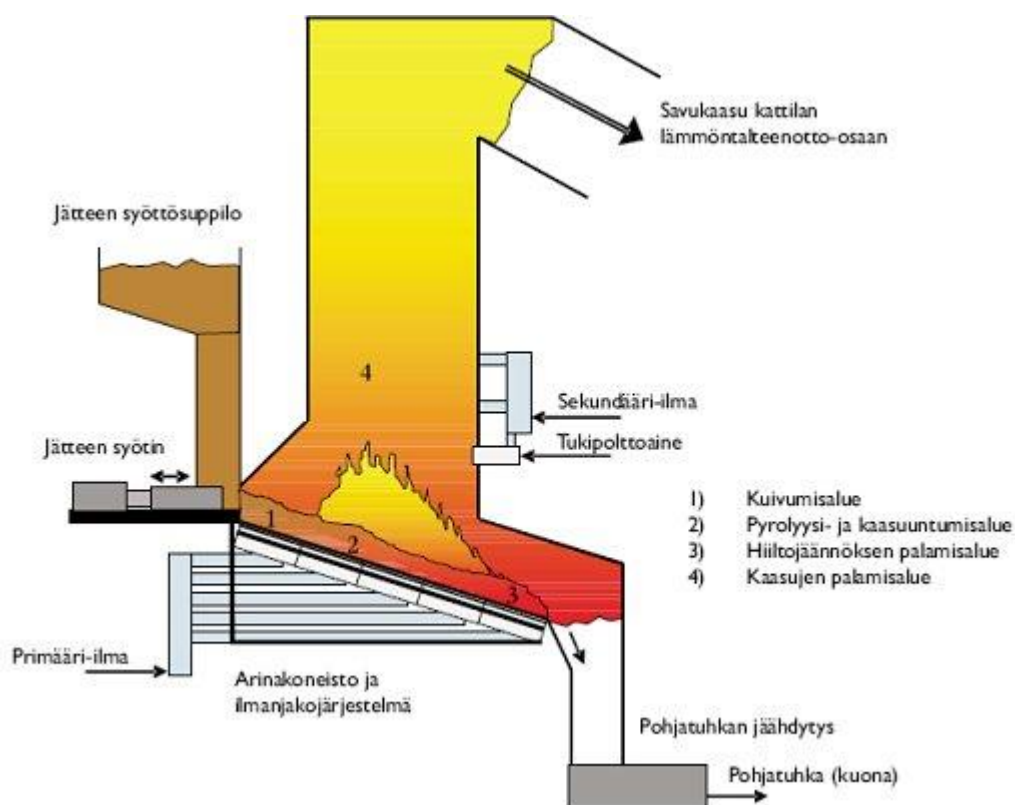
Vuoden 2022 lopussa Suomessa oli kymmenen jätteenpolttolaitosta, joiden yhteenlaskettu vuotuinen polttokapasiteetti on noin 2,1 Mt (Bröckl ym. 2021, 21). Näistä kahdeksassa on käytössä arinapolttotekniikka, joka on tässä työssä käsitellyn kuonan synnyn kannalta yleisin tekniikka sen tuottaessa noin 90 % syntyvästä yhdyskuntajätteenpolton kuonasta. Jätteenpolttolaitokset on esitettyä ympäristöluvan mukaisten vuosittaisten jätteenpolttomäärien kera taulukossa 1. Loput Suomessa syntyvät kuonat syntyvät kaasutus- ja leijupetipoltolla, joiden kuona poikkeaa arinapolttotekniikasta syntyvästä kuonasta ja näin ollen niitä käsitellään vain pintapuolisesti jäljempänä. Arinapolton etuna on se, ettei poltettavaa yhdyskuntajätettä tarvitse lajitella ja polttoprosessin kannalta on riittävää, että suuret kappaleet rikotaan. Arinapolttoprosessi sietää myös kostean jätteen polttamisen melko hyvin, joten siellä voidaan myös polttaa pieniä määriä yhdyskuntalietettä. (Jätelaitosyhdistys ry a.)

Polttolaitos	Ympäristöluvan mukainen vuosittainen jätteen polttomäärä
Fortum Waste Solutions Oy, Jätevoimala 1 & 2, Riihimäki	Voimala 1: 175 000 t/v Voimala 2: 160 000 t/v
Kotkan Energia Oy, Hyötyvoimalaitos, Kotka	100 000 t/v
Oulun Energia Oy, Laanilan ekovoimalaitos, Oulu	175 000 t/v
Westenergy Oy, Jätevoimala, Vaasa/Mustasaari	200 000 t/v
Vantaan Energia Oy, Jätevoimala, Vantaa	600 000 t/v
Lahti Energia Oy, Kymijärvi II, kaasutusvoimalaitos, Lahti	200 000–300 000 t/v
Tammervoima Oy, Hyötyvoimalaitos, Tampere	180 000 t/v
Riikinvoima Oy, Ekovoimalaitos, kiertoletijutekniikka, Leppävirta	170 000 t/v
Lounavoima Oy, Korvenmäen ekovoimalaitos, Salo	120 000 t/v

Taulukko 1. Jätteenpolttolaitokset Suomessa vuoden 2022 lopussa (mukailtu Bröckl ym. 2021, 22–24)

Arinapoltossa jätteesyötin kuljettaa arinakoneiston päälle polttokammioon jätteen, joka kulkiessaan kammioon kuivuu, pyrolysoituu, kaasuuntuu ja lopulta palaa (kuvio 2). Poltto-prosessin aikana polttokammioon syötetään primääristä ilmaa arinan alapuoliseen tilaan, josta se pakotetaan poltettavan jätteen joukkoon. Ilman tehtävänä on jäähdyttää arinaa ja tuoda happea polttokerrokseen. Arinapoltossa on myös mahdollisuus lämmittää primääristä ilmaa, jonka tehtävänä on vain esikuivattaa poltettava jäte. Sekundaarista ilmaa sen sijaan puhalletaan polttokammioon. Sekundaarisen ilman lisäyksellä pyritään luomaan täydellinen palamisprosessi ja palokaasujen riittävä sekoittuminen. (Jätelaitosyhdistys ry a.)

Jätteen palaessa syntyy runsaasti hiilidioksidia ja vesihöyryä, joita hyödynnetään kotitalouksien kaukolämmön, teollisuuden kaukolämmön sekä sähköntuotantoon. Prosessista syntyvää hiilidioksidia voidaan ottaa talteen ja hyödyntää kuonan jalostuksessa. Arinapolton viimeisessä vaiheessa palamaton materiaali ja poltossa syntynyt tuhkansekainen kuona kulkevat jäähdytyksen kautta säiliöön, johon pohjatuhka ja -kuona varastoidaan. (Jätelaitosyhdistys ry a.)



Kuvio 2. Arinatulipesän periaatekuva (Jätelaitosyhdistys ry a)

Kaasutuspoltoissa ei varsinaisesti polteta yhdyskuntajätettä, vaan jättepolttoaineita ja kuivattua lietettä. Kaasutuksessa syntyvä kaasu voidaan kuitenkin polttaa tavanomaisessa voimalaitoskattilassa. Kaasutus ja siitä syntyvän kaasun poltto on luokiteltu jätteen poltoksi. Tällä hetkellä Suomessa on vain yksi kaasutuslaitos, Lahti Energian Kymijärvi 2 voimalaitos, jossa tuotetaan kattilapolttoaineena käytettävää kaasua leijupetipoltossa tapahtuvan osittaisen hapetuksen avulla. (Jätelaitosyhdistys ry b.)

Leijupetipoltossa poltettava jäte poltetaan ilmvirran avulla leijutettavassa pedissä, joka muodostuu hehkuvasta hiekasta ja tuhkasta ja niiden seoksesta. Pedissä oleva poltettava polttoaine sekoittuu jatkuvasti ja kaasujen ja lämmön siirtyminen on erittäin tehokasta. Leijupetipolttotekniikkaan kuuluvassa kiertoleijutekniikassa savukaasujen virtausnopeus kasvaa niin suureksi, että petimateriaalia poistuu huomattava määrä savukaasun mukana. Petimateriaali erotellaan savukaasusta syklonilla ja se palautetaan tulipesään takaisin. Polttoaineen sekoittuminen on erittäin tehokasta, jonka takia palaminen on hyvin tehokasta ja tulipesän vaatimaa tilavuutta saadaan pienemmäksi kuin esimerkiksi kerrosleijutekniikassa. Perusmateriaalina pedissä käytetään hiekkaa tai luonnonkiviaineksesta valmistettua mursketta sekä polttoaineen tuhkaa. Tulipesän pohjalta poistetaan karkeaa tuhkaa ja jätteen mukana polttoprosessin läpi kulkeutunutta palamatonta materiaalia, kuten erilaisia metalleja ja lasinkappaleita. Hienojakoinen tuhka sen sijaan kulkeutuu jauhautuneen petimateriaalin kanssa savukaasun mukana pois tulipesästä, jonka jälkeen pohjatuhka erottuu savukaasusta kattilassa ja savukaasujen puhdistuksessa. (Jätelaitosyhdistys ry c.)

Kun leijupetitekniikkaa käytetään jätteen polttoon, on poltettava jäte murskattava sopivaan kokoon ja jätteestä tulisi myös poistaa metallit, jotta polttolaitos toimisi tasaisesti, sillä suuret kappaleet ja metalliesineet jumiuttavat polttolaitoksen syöttö- ja poistolaitteistot. Leijupetitekniikka soveltuu myös erinomaisesti lietteiden polttoon. (Jätelaitosyhdistys ry c.)

2.3 Pohjakuonan jalostusprosessit

Kuonalle soveltuvia jalostustekniikoita on kolmenlaisia. Päätekniikoita ovat kemialliset menetelmät, fysikaaliset menetelmät ja termiset menetelmät. Keskeisimpiä prosessointitekniikoita ovat ikäännyttäminen, joka on kemiallinen menetelmä sekä metallien fysikaalinen erottelu. Menetelmiä on kuvattu tarkemmin alempana. Yksinkertaisimmillaan kuonan laadunparantaminen kuitenkin tapahtuu poltto-olosuhteiden optimoinnilla sellaiseksi, että yhdyskuntajätteessä oleva orgaaninen aines palaa mahdollisimman täydellisesti. (Kaartinen ym. 2010, 27.)

Ikäännyttämisessä kuona varastoidaan joko taivasalle tai katettuun tilaan ja ikäännytetään, jolloin kuona reagoi ilmassa olevan hiilidioksidin sekä veden kanssa. Kuonassa oleva alumiini reagoi kalsiumhydroksidin ja veden kanssa, jolloin siitä muodostuu alumiinihydroksidia ja vetykaasua. Alumiinihydroksidin muodostuessa kuona ilmaantuu ja kuohkeutuu ja tämän takia onkin erittäin tärkeää antaa kuonan ikäänntyä, jotta kaasuuntuminen ei aiheuta ongelmia rakenteen tiiveydessä, kun sitä käytetään rakentamiseen. Ikääntymisen aikana kuonassa tapahtuva karbonatisoituminen stabiloi kuonaa muuttamalla sen mineralogisia ominaisuuksia. Karbonatisoitumisen aikana kuonan pH laskee ja kuonassa oleva kalsiitti saostuu, kunnes kuona on tasapainossa hiilidioksidin kanssa. Ikäännytyksen päätehtävänä on

laskea kuonan pH:n arvoa. pH:n laskun aiheuttamana useiden metallien liukoisuus kuonasta vähenee. Ikäännytyksen haittapuolena on menetelmän pitkäkestoisuus, noin 6–20 viikkoa. Menetelmää on mahdollista nopeuttaa esimerkiksi kastelemalla kuonaa tai vaihtoehtoisesti altistaa hiilidioksidipitoiselle kaasulle, kuten esimerkiksi polttolaitoksen palokasulle. Kiihdytetyllä ikäännytyksellä ikääntymisen tarvitsema aika lyhenee yhteen tai kahteen viikkoon. (Kaartinen ym. 2010, 27.)

Metallien fysikaalisessa erottelussa pyritään poistamaan sekä magneettiset, että ei-magneettiset metallit jatkojalostusta varten. Magneettiset metallit poistetaan levittämällä kuona liikkuvalla kuljetinhihnalle ja kuljettimen yllä oleva magneetti poistaa magneettiset metallit vetämällä ne itseensä. Jotta magneettierottelu olisi tehokasta, vaatii se monivaiheisen prosessin, jossa tulee jakaa kuona useampaan eri raekokoluokkaan ja tarvittaessa raekoon pienennykseen. Magneettierottelulla metallien talteenoton saanti on noin 55–60 % polttolaitokseen päätyvän jätteen magneettisten metallien määrästä. Ei-magneettiset metallit erotellaan pyörrevirtaerottimella, jossa nopeasti pyörivä käämi indusoi magneettikentän ei-magneettisiin partikkeleihin, joka saa ne erottumaan materiaalivirrasta. Tekniikka on tehokain 4–30 mm raekoolle ja sen toimintatehokkuuden edellytyksenä on materiaalin hyvä jakautuminen kuljettimen hihnalla. Ei-magneettisten metallien erottelu toteutetaan useimmiten vasta seulonnan, mahdollisen raekoon pienennyksen ja magneettisten metallien erotuksen jälkeen. Ei-magneettisten metallien talteenoton saanti on noin 50 % kyseisellä menetelmällä. (Kaartinen ym. 2010, 28.)

Kuonan jalostus voidaan myös jaotella kuiviin ja märkiin prosesseihin, joista Suomessa pääosin käytetään kuivaerotustekniikkaa. Toimintaperiaatteeltaan kuivat ja märät prosessit ovat hyvin samankaltaisia ja molemmissa prosesseissa seulotaan, erotellaan magneettiset ja ei-magneettiset metallit. Kuivassa käsittelyprosessissa keskeisimpiin prosesseihin kuuluu edellä mainittujen lisäksi magneettisten metallien poiston jälkeen murskaus ja seulonta, jonka jälkeen jakeet jaotellaan raekoon mukaisesti ja niistä poistetaan ei-magneettiset metallit pyörrevirtaerottimella. Metallien erotuksen jälkeen kuona ikäännytetään. Märissä prosesseissa sen sijaan murskaus toteutetaan ensimmäiseksi, jonka jälkeen seulotaan jakeet raekoon mukaan ja pestään jakeet. Pesemällä kuona saadaan siitä poistettua hienojakoisin 0–2 mm jae, joka yleensä sisältää suurimman osan kuonassa olevista liukoisista aineksista ja orgaanisista yhdisteistä. Pesemällä kuona, saadaan vähennettyä jäljelle jäävän kuona-aineksen liukoisten aineiden, kuten sulfaattien ja kloridien pitoisuuksia ja samalla parannetaan kuonan ympäristöominaisuuksia. Kuonan pesu voidaan toteuttaa joko välittömästi polttolaitoksella lisäämällä vettä kuonan sammutussäiliössä, erillisellä maan pesulaitteistolla tai suihkuttamalla vettä kuonan varastoinnin yhteydessä. (Kaartinen ym. 2010, 28–29.)

2.4 Pohjakuonan laatuvaatimukset

Pohjakuonan laatuvaatimukset määritellään sekä InfraRYLissä että Valtioneuvoston asetuksessa eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 843/2017. Valtioneuvoston asetuksessa (jäljempänä MARA-asetus) määritellään kuonassa olevat sallitut haitta-ainepitoisuudet ja kuonalle suurin sallittu raekoko, joka on 50 mm (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 843/2017, liite 3). MARA-asetusta käsitellään tarkemmin kohdassa 3.1.1. InfraRYL puolestaan määrittää rakenteelle sallitun kerrospaksuuden ja kuonan käyttöluokan mukaiset laadunvarmistustiheydet. Käyttöluokan mukaiset laadunvarmistustiheydet on myös mainittu kuonaohjekortissa RT 103552 ja ne ovat samat, kuin InfraRYLissä on määritetty luonnonkiviaineksille, betonimurskeille ja teräskuonille. Kuona jakautuu neljään eri luokkaan käyttöluokkansa puolesta ja näin ollen luo laatuvaatimukset jalostusprosessille. Kuonan käyttöluokkia ovat I–IV, joista käytössä on II–IV, sillä I-luokan kuonan käyttöluokan määrittäviä arvoja ei vielä toistaiseksi ole määritetty riittävän laajojen ja pitkäaikaisten tutkimustulosten puuttuessa. Oletuksena on myös kuonan jalostuksen kehittyminen siten, että kuonan tekniset ominaisuudet ovat luokkaa II paremmat, jolloin saadaan määritettyä luokalle I soveltuvat arvot. Taulukossa 2 on kuvattu alustavasti kuonan käyttöluokkia ja niitä määrittäviä ominaisuuksia, jotka pohjautuvat Rakennustietosäätiön kuonaohjekorttiin 103552. Rakennussuunnitelmassa voidaan kuonan vaatimukset esittää joko pelkän käyttöluokan mukaisesti tai tarkentaen rakeisuuden avulla, esimerkiksi JpKu II 5/32. Kuonan rakeisuuskäyrän tulee vastata suunnitellulle rakennusosalle InfraRYLissä esitettyjä vaatimuksia. Toistaiseksi kuonalle ei ole InfraRYLissä esitetty rakeisuusvaatimuksia, joten luonnonkiviaineksen rakeisuusvaatimuksia voidaan käyttää soveltaen, kunnes kuonan ominaisuuksista on saatu riittävästi tietoa ja kuonalle on valmisteltu omat rakeisuusvaatimuksensa. (RT 103552 2023, 6–7, 18.)

Kuonasta tulee testata raekokojakauma ja hienoaainespitoisuus joko kerran viikkoon tai kerran 5000 tonnin erää kohti, kumpi ensin täyttyy pois lukien kuonan käyttöluokassa IV, jossa testaustiheys on vain kerran 10 000 tonnien erää kohti. Kuonasta testataan myös kerran kuukaudessa kelluvien ja kellumattomien epäpuhtauksien pitoisuudet ja kuonan routivuus joko kerran 10 000 tonnien erää kohti tai yhden kerran valmistuserää kohti. Käyttöluokassa IV ei kuonan routivuuden testausta edellytetä. (RT 103552 2023, 31.)

Käyttöluokka Ominaisuus	JpKu I	JpKu II	JpKu III	JpKu IV
D [mm] ⁽¹⁾	**	32–50	8–50	2–50
d [mm] ⁽²⁾	**	0–5	0–8	-
Raekokosuhte (Cu) d60/d10	**	>10	>4	-
Hienoainespitoisuus [%], enintään	**	7	7	-
Kelluvat epäpuhtaudet [cm ³ /kg]	**	enintään 10 cm ³ /kg vettä kevyempiä materiaaleja kuonassa		
Kellumattomat epäpuhtaudet [%-p], enintään	**	10	-	
		teräviä metallikappaleita ei saa esiintyä haitallisessa määrin*		
Routivuus (käyttöluokituksen sovel-lusalueen mukaisessa rakenteessa)	**	routimaton/ lievästi rou- tiva	routimaton/ lievästi rou- tiva	lievästi routiva/ routiva

Taulukko 2. RT-kortissa esitetyt pohjakuonan käyttöluokat ja ne määrittävät ominaisuudet (mukailtu RT 103552 2023, 11)

* tarkastetaan silmämääräisesti

** määritetään myöhemmin, kun on saatu enemmän käyttökokemuksia

- ominaisuudelle ei ole määritetty vaatimusta kyseisessä käyttöluokassa

⁽¹⁾ Kiviaineksen raekoko ilmaistuna alemman (d) ja ylemmän (D) seulakoon mukaan. Esite-tään useimmiten d/D, esimerkiksi tässä tapauksessa 2/32

Käyttöluokka \ Ominaisuus	JpKu II	JpKu III	JpKu IV
E-moduuli [MPa]	100	70	50
Routaturpoama, t [%]	≤3	≤3	-
Materiaalin vastaavuus eristävyden kannalta, a_i	1,25–1,5	1,25–1,5	1,0
Kitkakulma [°]	35	35	35
Koheesio [kPa]	70	60	60
Vedenläpäisevyys tiivistettynä [m/s]	$1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^{-8}$		
Kuivairtitiheys [kg/m ³] rakenteeseen tiivistettynä	1400–1700	1300–1700	1200–1700
Märkäirtitiheys [kg/m ³]	1500–1850	1500–1850	1400–1850
E ₅₀ -moduuli [MPa]	250	150	100

Taulukko 3. Kuonien käyttöluokkien mukaisia mitoitusparametrejä hyvin kuivatetuissa olosuhteissa. Kitkakulma, E-moduuli, E50-moduuli ja koheesio ovat ominaisarvoja (mukailtu RT 103552 2023, 12)

Kuonien käyttöluokkien määrittäminen ja niiden soveltuvuutta eri käyttöluokkiin on arvioitu kuonaohjekortin RT 103552 mukaisesti sekä Käsitellyn yhdyskuntajätteenpolton pohjakuonan käyttö infrarakentamisessa -koekäyttöopasta mukailten. Taulukossa 2 on esitetty kuonan teknisiä ominaisuuksia käyttöluokkien mukaisesti toistaiseksi saatavilla olevan tiedon mukaisesti. Taulukossa 3 on esitetty kuonien käyttöluokkien mukaisia mitoitusparametrejä hyvin kuivatetuissa olosuhteissa ja taulukossa 4 on esitetty kuonan ominaisuuksia.

Käyttöluokka Ominaisuus	JpKu II	JpKu III	JpKu IV
pH	>9		
Sähkönjohtavuus [mS/m]	70–1230		
Tiivistysvesipitoisuusalue [%]	10–15	10–20	10–25
Vedenimeytymiskorkeus H [m]	0,5	1	1
Kapillaarinen nousukorkeus [m] ⁽¹⁾	0,05–0,5	0,25–1.1	
Sulfaatti (mg/kg, L/S 10)	210–6500		
Kloridi (mg/kg, L/S 10)	48–3200		

Taulukko 4. RT-kortissa esitetyjä kuonan ominaisuuksia (mukailtu RT 103552 2023, 12)

⁽¹⁾ Kokeesta saatava tulos on riippuvainen mm. testausajan pituudesta ja käytettävästä menetelmästä

3 Jätteenpolton pohjakuonan hyödyntäminen

3.1 Ympäristökelpoisuus

Maarakentamisessa hyödynnettävästä jalostetusta kuonakiviaineksesta tulee osoittaa ympäristökelpoisuus ottamalla näytteet joko tasavälein suoraan tuotannosta tai varastokasalta. Jos tarkoituksena on valmistaa eri lajitteista sekoittamalla koostettavaa koostekiviainesta, tulee tällöin ympäristökelpoisuusnäytteet ottaa koostekiviaineksen varastokasalta. On myös suositeltavaa ottaa koostekiviainekseen käytettävistä lajitteista lajitekohtaiset ympäristökelpoisuusnäytteet ennen koostekiviaineksen sekoittamista, jotta varmistetaan kuonan ympäristökelpoisuus suunniteltuun käyttökohteeseensa. Ympäristökelpoisuusnäytteet tulee ottaa siten, että tutkittava näyte-erä on ne edustettuna kokonaisuudessaan. MARA-asetuksen mukaisesti yhdellä näyte-erällä voidaan kattaa enintään 5 000 tonnin valmistuserä sekä tutkittavan näytteen on koostuttava vähintään 50 osanäytteen sarjasta. Tarvittaessa osanäytteiden raekokoa voidaan pienentää joko jauhamalla tai murskaamalla. (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 843/2017, liite 3.)

Näytteenotto toteutetaan soveltaen jätteiden karakterisointia koskevan standardin SFS-EN 14899 sekä Euroopan standardoimisjärjestelmän periaatteita teknisistä raporteista. Kuonan ympäristökelpoisuus tulee tutkia säännöllisesti ja siinä olevien haitta-aineiden pitoisuudet ja liukoisuudet on määritettävä vähintään yhden kerran kokoomanäytteen perusteella ennen, kuin kuonaa luovutetaan eteenpäin hyödynnettäväksi maarakentamisessa. Mikäli kuonan haitta-ainepitoisuudet eivät täytä MARA-asetuksen liitteen 2 mukaisia arvoja, voidaan kuonaa ikäännyttää tai muutoin käsitellä, jotta päästään vaadittuihin arvoihin. Käsitelyn jälkeen tulee ottaa uudet kokoomanäytteet, joiden perusteella kuonaa joko käsitellään uudelleen tai sen käyttö hyväksytään maarakentamisessa. (Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 843/2017, liite 3.)

3.1.1 MARA-asetus

Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa (myöhemmin MARA-asetus) tarkoituksena on jätteiden hyödyntämisen edistäminen luonnonkiviaineksen käytön sijasta ja näin ollen edistää kiertotaloutta. MARA-asetus tuli voimaan vuoden 2018 alusta alkaen. MARA-asetuksessa määritetään edellytykset, joiden täytyessä uusiomateriaalilta ei vaadita ympäristösuojelulain mukaista ympäristölupaa, vaan materiaalia voidaan käyttää ilmoitusmenettelyllä. Rekisteröinti-ilmoitus tulee tehdä jätteen hyödyntämispaikan haltijan toimesta tai hänen puolestaan. (Harju ym. 2022, 22.)

MARA-asetus sallii kuonan käytön enintään 1,5 metrin paksuisena rakennekerroksena väylien, kenttien, teollisuus- sekä varastorakennusten pohjarakenteissa. Kuonaa ei voida käyttää 1- tai 2-luokan pohjavesialueilla tai tulvavaara-alueilla MARA-asetuksen mukaisella rekisteröintimenettelyllä. MARA-asetus ei näin ollen salli kuonan käyttöä esimerkiksi meluvalleissa, vaan sille pitää hakea erikseen ympäristölupa, jotta kuonaa voidaan käyttää. (Harju ym. 2022, 22.)

3.1.2 Ympäristölupa

Ympäristölainsäädännössä ei määritetä uusiomateriaalin teknisiä ominaisuuksia. Lainsäädäntö kuitenkin velvoittaa arvioimaan tuoteominaisuuksia muun muassa ympäristökelpoisuuden sekä teknisten ominaisuuksien osalta. Keskeisimpinä säädöksinä uusiomateriaalien käytön edellytyksen kannalta ovat:

- REACH-asetus (EU:n asetus N:o 1907/2006)
- CLP-asetus (EU:n asetus N:o 1272/2008)
- rakennustuoteasetus, erityisesti CE-merkintöjen ja haitallisten aineiden osalta (EU:n asetus N:o 305/2011)
- jätelaki (646/2011)
- jäteasetus (179/2012)
- ympäristönsuojelulaki (527/2014)
- ympäristönsuojeluasetus (713/2014) (Ympäristöministeriö 2022).

Jos MARA-asetuksessa määritetyt ehdot uusiomateriaalin käytöstä eivät täyty, tulee tällöin tuotteen käyttöä varten hakea hankekohtainen ympäristölupa. Ympäristölupaa voi hakea joko aluehallintaviranomaiselta tai kunnan ympäristönsuojeluviranomaiselta riippuen hankkeesta. Valtioneuvoston asetuksesta ympäristönsuojelusta (713/2014) 1 § käy ilmi ne tapaukset, jolloin ympäristölupaa haetaan aluehallintaviranomaiselta ja 2 § käy ilmi ne tapaukset, jolloin ympäristölupaa haetaan kunnan ympäristöviranomaiselta. (Ympäristöministeriö 2022.)

3.1.3 Tuotteistus ja sivutuotestatus

Uusiomateriaalin tuotteistamisprosessi kuvastaa kokonaisuudessaan tuotteen kehittämistä ideasta aina tuotteen markkinoille saattamiseen saakka. Tuotteistaminen on aikaa ja rahaa vaativa prosessi, johon tulee sitoutua täydellä panoksella. Tuotteistamisprosessin

perustana on, että suunniteltu rakennusosa toimii, kuten luonnonkiviaineksella rakennettuna ja tuotteistettavan uusiomateriaalin teknisten vaatimusten tulee täytyä ja niiden tulee olla selvillä ennen tuotteen tuomista markkinoille. Vaatimukset pohjautuvat Suomen lainsäädäntöön, viranomaisten ohjeisiin, eurooppalaiseen standardisointiin sekä muihin suunnittelu- ja rakentamishojeisiin. (Uusiomaarakentaminen 4 2022a.)

Lähtökohtaisesti rakennusosakohtaisesti esitettyjen materiaalivaatimusten tulee täytyä. Kuitenkin joitakin uusiomateriaaleja on mahdollista käyttää rakennusosan tai rakenteen toimintaa vaarantamatta, vaikka ne eivät täytä luonnonkiviaineksille esitettyjä vaatimuksia. Tällaisessa tapauksessa käytetään materiaalin testauksesta saatuja todellisia parametreja suunnittelun apuna. Jotta parametrejä voidaan käyttää, tulee materiaalin tuotteistamisen olla niin pitkällä, että sille on esitetty materiaalikohtaiset vaatimukset esimerkiksi InfraRYL:n pohjalta. (Uusiomaarakentaminen 4 2022a.)

Aine tai esine ei ole jäte, vaan sivutuote, jos se syntyy sellaisessa tuotantoprosessissa, jonka ensisijaisena tarkoituksena ei ole tämän aineen tai esineen valmistaminen, ja:

- 1) aineen tai esineen jatkokäytöstä on varmuus;*
- 2) ainetta tai esinettä voidaan käyttää suoraan sellaisenaan tai sen jälkeen, kun sitä on muunnettu enintään tavanomaisen teollisen käytännön mukaisesti;*
- 3) aine tai esine esiintyy tuotantoprosessin olennaisena osana;*
- 4) sekä aine tai esine täyttää sen suunniteltuun käyttöön liittyvät tuotetta sekä ympäristön- ja terveydensuojelua koskevat vaatimukset eikä sen käyttö kokonaisuutena arvioiden aiheuta vaaraa tai haittaa terveydelle tai ympäristölle. (Laki jätelain muuttamisesta 714/2021, 5 a §.)*

Tuotannosta syntyvä jäännös, joka täyttää yllä mainitut jätelain mukaiset ehdot, voidaan nimittää sivutuotteeksi. Sivutuote ei ole jätelain mukaista jätettä eikä siihen täten sovelleta jätelakia tai jätelain nojalla annettuja säännöksiä. Tämän takia sivutuote on rinnastettavissa mihin tahansa vastaavaan tuotteeseen ja sen käyttöön sovelletaan rinnastettavan tuotteen käyttöä koskevaa tuotesääntelyä, kuten REACH-asetusta tai CLP-asetusta. Sivutuotteen on myös täytettävä rinnastettavalle materiaalille asetetut tekniset vaatimukset, joita käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.2.

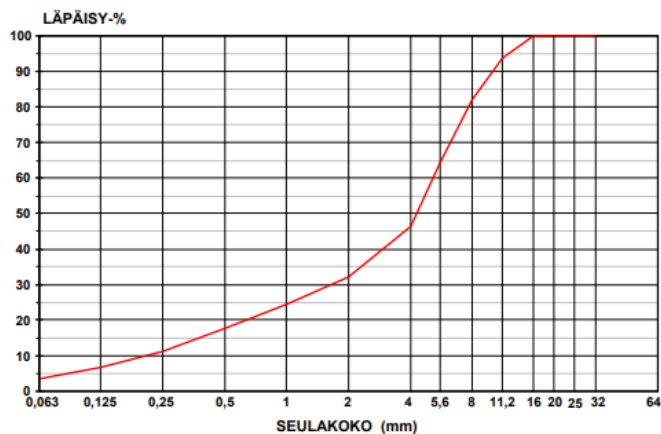
Kuonan ollessa suhteellisen uusi materiaali, ei sitä ole vielä tuotteistettu, kuin kahden jalostajan toimesta. Tuotteistuksen ovat saaneet Fortumin Gravo- sekä Suomen Erityisjätteen Scanwas-keinokiviainekset. Jotta kuonasta valmistetut keinokiviainekset on saatu

tuotteistettua, on niitä tullut tutkia tarkasti ja pitkäjänteisesti. Tuotteistamisen myötä ne ovat kumpikin saaneet CE-merkinnät sekä materiaaleista on luotu suoritusasoilmoitus (Declaration of Performance, DoP). Suoritusasoilmoituksesta käy ilmi tuotteen perusominaisuudet sekä luokat sovellettavaan tuotestandardiin tai tekniseen arviointiin. Suoritusasoilmoitus on välttämätön dokumentti tuotteen CE-merkintää haettaessa. Suoritusasoilmoitus tulee toimittaa tuotteen loppukäyttäjälle joko tuotteen mukana tai sähköisenä asiakirjana. CE-merkintä puolestaan osoittaa kuonan ominaisuuksien olevan sellaiset, että sitä on mahdollista myydä ja käyttää kaikissa Euroopan talousalueeseen kuuluvissa maissa. Jotta yksikään kuona on voitu CE-merkitä, on sille pitänyt julkaista yhdenmukainen tuotestandardi tai tuotteelle on myönnetty eurooppalainen tekninen arviointi. (Turvallisuus- ja kemikaalivirasto.)

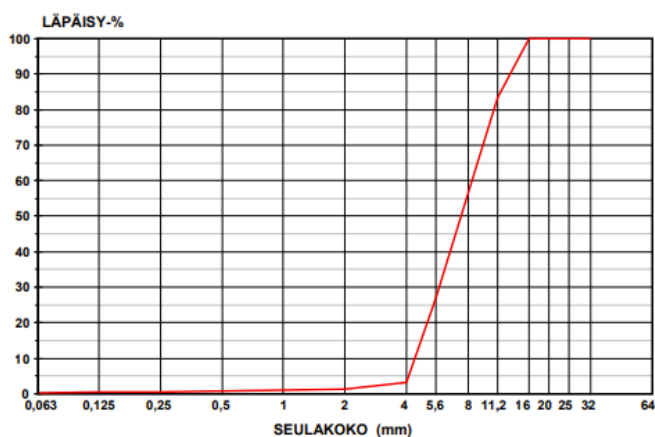
3.2 Tekniset vaatimukset

InfraRYL:n kohdassa 18111.1 Maapenkereen materiaalit kuvataan uusiomateriaaleista ja niiden käytöstä pengerrakenteessa mainitaan, että pengerrakenteena voidaan käyttää tiivistettävissä olevia neutseellisiä maa-aineksia sekä tilaajan hyväksymänä uusiomateriaaleja. Uusiomateriaalien käyttö hankkeissa tulee aina arvioida hankekohtaisesti, mitä materiaalia kulloinkin käytetään. Jos uusiomateriaalia käytetään pengerrakenteessa, tulee sen teknisten ominaisuuksien ja maarakennuskelpoisuuden osalta soveltua käyttökohteeseen sekä uusiomateriaalin tulee olla riittävän tasalaatuista, jotta sitä voidaan käyttää pengerrakenteessa. Uusiomateriaalien mahdolliset erityispiirteet ja niiden vaikutukset rakennekerroksen rakentamiseen tulee selvittää ja rakennettaessa tulee toimia materiaalitoimittajan laatimien ja tilaajan hyväksymien suunnittelu- ja työohjeiden mukaisesti. Lisäksi Väyläviraston ja ELY-keskuksen hankkeissa tulee noudattaa hankkeen tilaajan esittämiä vaatimuksia joita esitetään esimerkiksi Väyläviraston ohjeessa Uusiomateriaalien käyttö väylärakentamisessa 20/2022 tai uudempi. Uusiomateriaalilla rakennetun rakenteen tulee täyttää vastaavan luonnonmateriaalista rakennetun valmiin rakenteen vaatimukset. (InfraRYL 2022a.)

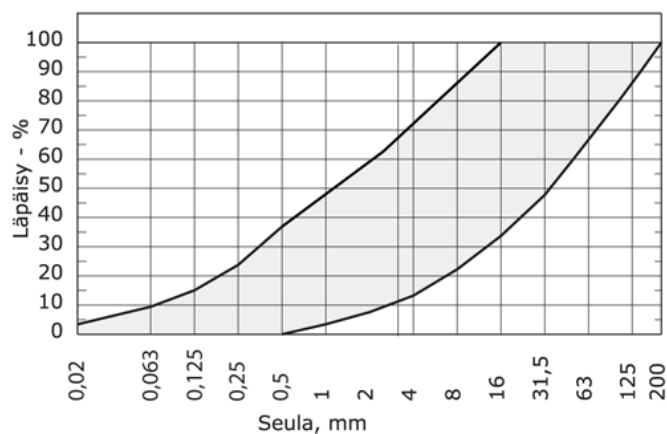
Kuviossa 3 kuvataan yhden kuonaerän rakeisuuskäyrää ennen Proctor-koetta, joka asettuu lähes koko matkaltaan kuviossa 5 esitettyihin InfraRYL:n vaatimuksiin luonnonmateriaaleille. Kuviossa 4 kuvataan saman kuonaerän rakeisuuskuvaajaa Proctor-kokeen jälkeen. Kuvioista 4 voidaan todeta Proctor-kokeella olleen huomattava vaikutus kuonan hienontumiseen ja Proctor-kokeen käyttöä pohjakuonan testausmenetelmänä tulee tarkastella tarkemmin, ennen kuin siitä tulee vakiintunut testausmenetelmä pohjakuonan osalta.



Kuvio 3. Erään kuonaerän rakeisuuskäyrä ennen Proctor-koetta (Kaartinen ym. 2010, B1)



Kuvio 4. Erään kuonaerän rakeisuuskäyrä Proctor-kokeen jälkeen. Kokeen jäliltä on havaittavissa partikkelien hienontumista (Kaartinen ym. 2010, B2)



Kuvio 5. InfraRYLissä esitetty jakavan kerroksen rakeisuuskäyrä luonnonmateriaaleille (InfraRYL 2022c)

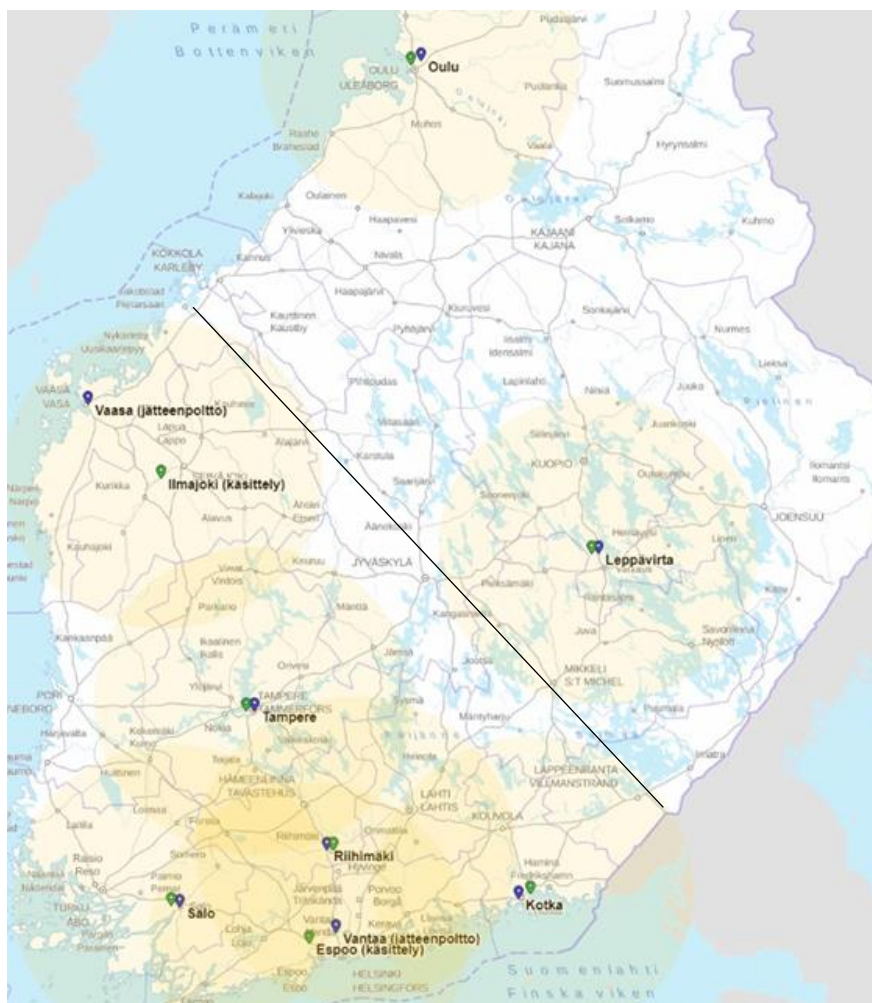
3.3 Pohjakuona maanrakentamisessa

Ensimmäiset Suomessa kuonasta toteutetut rakenteet ovat olleet kaatopaikkarakenteita, joita on rakennettu pääasiassa 2010-luvulla. Sittenkin kaatopaikkarakentamisen hiivuttua kaatopaikkojen sulkemisen ja kierrätyksen lisääntymisen myötä on tullut tarvetta löytää alati syntyvälle kuonalle uusia käyttökohteita. Kuonan käytöstä on saatu tutkimustuloksia pitkän ajan käytössä Suomen olosuhteissa, eikä rakennetuista koerakenteista ole raportoitu muodonmuutoksia tai muita havaintoja, joiden perusteella kuonakiviaineksella toteutetut rakenteet eivät selviäisi Suomen olosuhteissa. Koerakenteiden tarkkailuaika on toistaiseksi huomattavasti tavanomaisen rakenteen mitoitusikää lyhyempi, joten kuonalla rakennetuista koerakenteista saadaan enemmän tietoa ajan saatossa. (Harju ym. 2022, 11–12.)

Koerakenteista on havaittu muun muassa, että rakenteen kantavuus heti rakentamisen jälkeen on heikompi kuin suunnitteluvaiheessa on arvioitu senhetkisten tietojen ja kokemusten mukaan. Kuitenkin ajan saatossa on rakenteen kantavuus parantunut vaaditulle tasolle. Koerakenteiden raporteista on myös havaittu kuonan hienontumista tiivistämisen ja levykuormituskokeiden vaikutuksesta rakenteen yläpinnasta enintään 30 cm syvyydeltä. Vastaavia tuloksia hienontumisesta on myös saatu laboratoriotutkimuksissa Proctor-kokeella suoritettuna. Kuonan hienontumisella ei ole havaittu olevan rakennetta heikentäviä vaikutuksia, joskin tulee huomioida kuonan käytön lyhytaikaisuus ja se, että kuonan käytöstä saadaan koko ajan enemmän pitkän ajan tutkimustuloksia, jotka saattavat vaikuttaa aiemmin todettuihin tuloksiin ja havaintoihin. (Harju ym. 2022, 11–12.)

3.3.1 Pohjakuonan hankinta

Pohjakuonan saatavuus Suomessa kattaa lähes koko Etelä-Suomen sekä Oulun seudun johtuen polttolaitosten sijoittumisesta ja siitä, että useimmiten raakakuona jalostetaan maanrakentamisessa käytettäväksi uusiokiviainekseksi polttolaitoksen läheisyydessä. Poikkeuksiakin on, kuten Ilmajoella sekä Espoossa toimivat kuonanjalostuspaikat, jotka eivät sijaitse polttolaitoksen välittömässä läheisyydessä. Kuonanjalostuspaikkojen sijoittautumisen takia kuonan käytettävyydelle onkin eteläisessä Suomessa erinomaiset edellytykset. Kuviossa 6 on esitetty Suomessa sijaitsevat arinapolttotekniikkaa käyttävät jätteenpolttolaitokset sekä pohjakuonan jalostuspaikat. Kuvassa on myös esitetty Leppävirralla sijaitseva polttolaitos, jolla on käytössä kiertoleijupetiteknikka ja sieltä saatava kuona poikkeaa muista laitoksista. Kuviossa 6 on myös esitetty lävistäjä, jonka eteläpuolella pohjakuonan saatavuus on erinomainen, poikkeuksena Porin ja Jyväskylän seutu, jotka jäävät pienen katvealueeseen etäisyyden kuonan jalostuspaikalta ollessa n. 100 km (RT 103552 2023, 5).



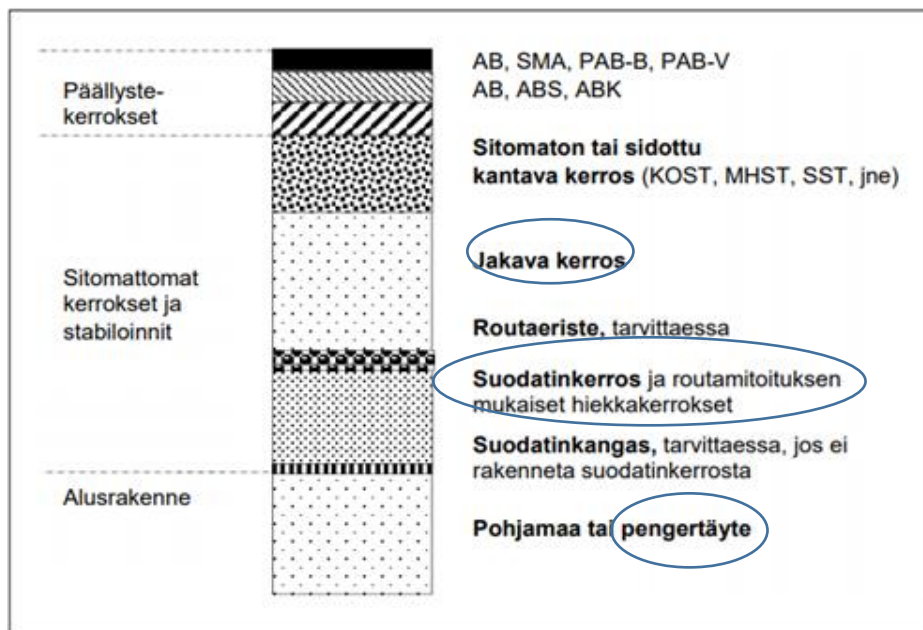
Kuvio 6. Jätteenpolttolaitosten sijainnit (sinisellä) ja kuonan käsitteilypaikkojen sijainnit (vihreällä) vuoden 2022 lopussa. Kuonan käsitteilypaikat saattavat vaihdella. Keltaisella kuvattu n. 100 km:n etäisyys kuonan käsitteilypaikasta. Lävistäjän eteläpuolella kuvattu alue, jolla kuonan saatavuus on erinomaista (mukailtu RT 103552 2023, 5)

Pohjakuonan käyttöä rakennuskohteessa suunniteltaessa tulee varmistua pohjakuonan saatavuudesta sopimusasiakirjoin, joilla mahdollistetaan rakenteeseen tarvittavan kuonan riittävä saatavuus rakenteen rakentamiseksi (Harju ym. 2022, 37).

3.3.2 Hyödyntämiskohteet maarakentamisessa

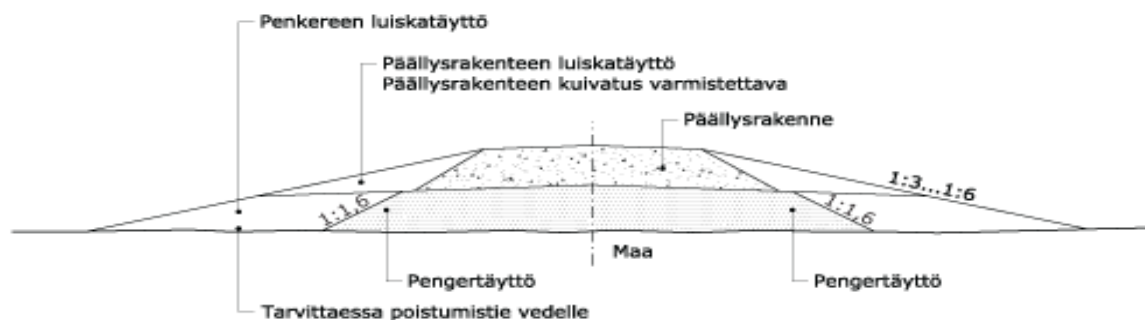
Pohjakuonaa voidaan käyttää soveltaen muun muassa teiden, katujen, pihojen, kevyenliikenteen väylien, kenttien sekä pysäköintialueiden penkereissä ja päällysrakenteissa jaksavassa ja suodatin kerroksessa. Kuonaa on myös mahdollista käyttää erilaisissa valleissa, kuten maisema- ja meluvallit, maisemointitäydyissä, maavallein toteutetuissa katsomoissa sekä ampumaradoilla melu- ja suojavalleina. Kuonaa hyödynnettäessä tulee huomioida kuonan tavanomaiseen kiviainekseen verrattuna hauraammat mineraalipartikkelit, jotka

omalta osaltaan määrittävät rajoitteita käytettävyyden osalta, kuten esimerkiksi kuonasta rakennettuun kerrokseen kohdistuva kuormitus sekä kuivatus tai kuonarakenteen ylä- ja alapuoliset kerrokset. (RT 103552 2023, 17.) Kuviossa 7 on esitetty eri rakenneosia, joihin kuonaa on mahdollista käyttää.



Kuvio 7. Tie-, katu- ja kenttärakenne. Päällysrakenteen ja penkereen rakennusosat. Kuvasta on ympyröity rakennusosat, joissa kuonaa voi RT-kortin ohjeen mukaisesti käyttää (mukailtu RT 103552 2023, 18)

Maarakentamisen lisäksi kuonaa on käytetty myös betonin runkoaineeksi betonisten tukimurielementtien, pihakivien sekä Luja-modulien valmistukseen, joista on saatu korvattua lähes puolet luonnonkiviaineksesta pohjakuonalla ilman, että on rakenteen puristuslujuus tai muut tekniset ominaisuudet kärsivät. Näiden lisäksi kuonaa on käytetty meluseinän koe-rakenteessa yhtenä sideaineista. Meluseinärakenne toteutettiin sullotun maan menetelmällä ja se valmistettiin 2021 (Uusiomaarakentaminen 4, 2022c). Kuviossa 8 on kuvattu tiepenkereen osat, joista kuonaa voidaan käyttää pengertäyttönä sekä kuvion 7 osoittamiin tien päällysrakenteen rakennekerroksiin.



Kuvio 8. Tiepenkereen osat, joista kuonaa voidaan käyttää pengertäyttössä sekä päällysrakenteessa kuvan 7 osoittamissa rakennekerroksissa (InfraRYL, 2022b)

3.4 Pohjakuonan käyttö Euroopan ja Yhdysvaltojen alueella

Vuonna 2018 Euroopassa poltettiin noin 96 miljoonaa tonnia yhdyskuntajätettä, josta syntyi pohjakuonaa noin 19 miljoonaa tonnia. Monissa Euroopan maissa kuonaa on käytetty vaihtoehtona soran ja hiekan sijasta. Esimerkiksi Tanskassa pohjakuonan käyttö on sallittu korkeasti kuormitetuilla teillä vuodesta 2012 alkaen. Muista Euroopan maista muun muassa Belgiassa, Ranskassa, Alankomaissa, Portugalissa, Iso-Britanniassa ja Espanjassa käytetään kuonaa tien- ja kadunrakentamisessa. Kuten Suomessa, on kuonaa käytetty Euroopassa muuhunkin kuin kadunrakentamiseen. Esimerkiksi Italiassa murskattua pohjakuonaa on käytetty betonin valmistuksessa ja Sveitsissä hienorakeisinta kuonajaetta on käytetty sementin korvikkeena lentotuhkan stabiloinnissa. Alankomaissa ja Saksassa pohjakuonaa on käytetty väylärakentamisen lisäksi ylikäytävien ja meluvallien rakentamiseen, josta yhtenä esimerkkinä yli kilometrin mittainen meluvalli valtatievarressa Alankomaissa. Iso-Britanniassa kuonaa on käytetty muun muassa vuoden 2012 Olympialaisia varten rakennetussa Stratfordin olympiakylässä, jossa 30 000 tonnia kuonaa käytettiin täyttömateriaalina, 2 000 tonnia päällysteissä sekä 5 000 tonnia alkutäyttönä paikoitusalueen laajennuksessa. Alankomaissa jokainen jätteenpolttolaitos on veloitettu tuottamaan ”Green Deal pohjakuonaa”, joka velvoittaa vähintään 75 % kierrätysasteeseen ei-magneettisille metalleille, joiden partikkelikoko on yli 6 mm, sekä vuoden 2020 alusta voimaan astuneen asetuksen mukaisesti tuottamaan niin puhdasta kuonaa, että se voidaan hyödyntää täysimääräisesti. (Confederation of European Waste-to-Energy Plants)

Yhdysvalloissa tuotetaan vuosittain noin 300 miljoonaa tonnia yhdyskuntajätettä, josta kaatopaikkasijoitukseen päätyy noin 48,7 %, kierrätykseen ja kompostointiin 31,3 % ja poltettavaksi vain noin 11,5 %. Yhdyskuntajätteenpoltoon soveltuvia laitoksia on Yhdysvalloissa vuonna 2018 ollut ainoastaan 75 kappaletta, jotka sijoittuvat pääosin Yhdysvaltojen itäiseen osaan 25 osavaltion alueelle. Pohjakuonaa Yhdysvalloissa tuotetaan noin 6,9 miljoonaa tonnia vuosittain. (Environmental Protection Agency, 2022) Yhdysvalloissa pohjakuonasta menee hyötykäyttöön vain noin 5 % ja loput sijoitetaan kaatopaikalle täytteeksi. Kuonan käytön vähäisyyttä Yhdysvalloissa selittää osaltaan huoli siitä, että kuona saattaisi saastuttaa pohjaveden kuonaan jäävien haitta-aineiden takia. Kuonasta ei myöskään ole tehty paljoa kenttä- tai laboratoriotutkimuksia Yhdysvalloissa, joilla olisi voitu todeta kuonan käytettävyyttä joko sellaisenaan tai sekoitettuna luonnonkiviainekseen, kuten kalkkikiveen (Schafer ym. 2019).

3.5 Pohjakuonan käytön vaikutus hiilijalanjälkeen

Pohjakuonan jalostuksen vaatima metallien poisto vähentää päästöjä arviolta noin 60 kg CO₂e jokaista poltettua tonnia kohti (Confederation of European Waste-to-Energy Plants, 2022). Italian ympäristö-, vesi- ja energiaviraston mukaan pohjakuonan sijoittaminen kaatopaikalle aiheuttaa 12 kg CO₂e päästöt jokaista kaatopaikkasijoitettua tonnia kohti. Jos taas kuonaa hyötykäytetään rakentamiseen, saadaan sen käytöllä arviolta 198 kg CO₂e säästö hiilijalanjäljessä jokaista hyödynnettyä kuonatonnia kohti. (Utilitalia). Johanssonin ja Lönnebo Stagnellin (2016) diplomityössä tutkitusta Sysav AB:n kuonanjalostuksesta käy ilmi, että 5,5 kuukauden ikäännyttäminen sitoo ilmassa olevaa hiilidioksidia kuonaan noin 37 kg jokaista kuonatonnia kohti.

2006 julkaistussa Tanskan teknillisen yliopiston tutkimuksessa, Tanskassa toteutettiin kilometrin mittainen koerakenne kuonalla ja sille referenssirakenne luonnonkiviaineksesta. Koerakenteesta suoritettiin elinkaarilaskenta 100 vuoden käyttöiälle sisältäen tierakenteen rakentamisen ja sen kunnossapidon. Kyseinen ajanjakso valikoitui tarkasteluun, jotta kuonan sisältämien haitta-ainesten pitkäaikainen liukeneminen voitiin ottaa huomioon täysimääräisesti. Toteutetun tiealueen leveys oli 17,2 m ja rakenteen rakennekerroksien paksuus oli 0,7 m. Kuonarakenteessa kuonaa käytettiin 4 400 tonnia ja sen todettiin käyttäytyvän työstettäessä samankaltaisesti, kuin luonnonkiviaineksen. Kyseisessä tutkimuksessa kävi ilmi, että luonnonkiviaineksella on noin 2,5 kertaa lyhyemmät kuljetusmatkat Tanskassa, joka osaltaan lisää pohjakuonan käytön hiilidioksidipäästöjä. Tutkimuksesta havaittiin myös ympäristövaikutusten olevan lähes identtiset sekä luonnonkiviaines-, että kuonarakenteella tuona kyseisenä 100 vuoden tarkastelujakson aikana. Tutkimuksessa todettiin pohjakuonan käytön sitovan hiilidioksidia 1250 tonnia kilometriä kohti 100 vuoden elinkaa- ren aikana. Tutkimuksesta tulee huomioida, että se on toteutettu 2006 senhetkisillä kuljetus- ja maansiirtokaluston päästösäännöksillä ja uusimman tiedon mukaisesti vastaava rakenne saattaa sitoa hiilidioksidia eri määrän. (Birgisdottir ym. 2006).

Suomen ympäristökeskuksen tuottamassa CO₂data -päästötietokannassa on joitakin yleisiä uusiomateriaaleja ja niiden päästöarvoja. Toistaiseksi kuitenkin pohjakuonaa ei löydy tästä listauksesta, joten pohjakuonan hiilijalanjäljen vaikutuksista Suomessa tulee suorittaa erillinen hiilijalanjälkilaskenta haluttaessa tarkempia tutkimustuloksia.

4 Selvitys kuonan teknisistä ominaisuuksista

Väyläviraston tavoitteena on sallia pohjakuonan käyttö omissa hankkeissaan aluksi pengerrakentamisessa ja käyttökokemusten myötä mahdollisesti muissakin rakennekerroksissa tie- ja väylärakentamisessa. Väylävirastolle tehdyssä selvitystyössä vertailtiin viiden eri materiaalintoimittajan tuottamaa aineistoa heidän omasta pohjakuonansa jalostuksesta, pohjakuonasta rakennetuista koerakenteista ja kuonasta tehdyistä laboratoriokokeista. Materiaalintoimittajilta pyydettiin tarvittavia lisätietoja myös sähköpostin välityksellä. Selvitys toteutettiin vertailututkimuksena olemassa olevan aineiston pohjalta. Muutamat materiaalintoimittajat ovat omatoimisesti toteuttaneet koerakenne- sekä laboratoriotutkimuksia, joista tuotettu aineisto oli saatavilla. Lisäksi kuonasta on tehty kaksi erillistä käyttöohjetta, Suomen Erityisjätteen (2018) sekä Käsitellyn yhdyskuntajätteenpolton pohjakuonan käyttö infrarakentamisessa koekäyttöohje (2022), joissa esitettiin tutkimustuloksiin verrattiin materiaalintoimittajien toimittamaa tutkimusaineistoa. Suurin osa tutkitusta aineistosta on määritetty salassa pidettäväksi.

Työssä tarkasteltiin lisäksi aiheesta tehtyjä opinnäyte- ja diplomitöitä sekä väitöskirjaa, joista kaikki tarkastellut aineistot olivat julkaistu viimeisen kymmenen vuoden aikana. Selvitystyötä ohjaamaan perustettiin ohjausryhmä. Väylävirastolle tehdyn selvitystyön lopputuloksena laadittiin materiaalintoimittajien aineistojen ja Rakennustietosäätiön kuonaohjekortin 103552 pohjalta raportti, jossa kuvataan selvitystyön keskeisimmät tulokset kuonaan ja sen käyttöön liittyen. Raportista on tuotu tähän opinnäytetyöhön keskeisimmät huomiot niiltä osin, kun ne ovat julkaistavissa.

Jätteenpolton pohjakuonan ominaisuuksiin on vaikutusta niin tuotantolaitoksilla, poltettavan jätteen laadulla kuin pohjakuonan käsittelyllä ja ikäännyttämisellä. Myös lajitekohtaisilla eroilla, kuten kiinteiden ja huokoisten rakeiden suhteellisilla osuuksilla on vaikutusta pohjakuonan ominaisuuksiin. Tyypillisesti karkearakeisissa kuonissa on silmämääräisesti tarkasteltuna enemmän mineraaliainesta, joka on peräisin rakennusjätteestä, esimerkiksi metalleja, tiiltä ja betonia, kuin muissa lajitteissa. Keskikarkeissa lajitteissa (esim. 5/16 mm) sisällys koostuu pääosin lasista ja hienojakoisissa jakeissa (esim. 0/5 mm) pääosin huokoisista mineraaliaineksista.

Selvityksessä tarkasteltiin erityisesti pohjakuonan E-moduulia, routivuutta ja hienontumista, sillä näistä ominaisuuksista ei ollut riittävästi tehtyjä tutkimuksia. Jotta kuonaa voitaisiin käyttää eri rakennekerroksissa, tulee siitä rakennetun rakennekerroksen täyttää kyseiselle kerrokselle asetetut lujuusvaatimukset. Selvityksessä tutkittiin pohjakuonan E-moduulia ja sen teknistä soveltuvuutta pengerrakentamiseen. Kuonan hienontumisesta tarkasteltiin

hienontumisen vaikutusta kuonan rakeisuuskuvaajaan sekä hienontumisen vaikutusta kuonan routivuuteen.

4.1 Selvityksen rajaus

Työssä tutkittiin pohjakuonan teknisiä ominaisuuksia ja niistä erityisesti E-moduulia, kuonan routivuutta ja kuonan hienontumista tiivistettäessä ja käytettäessä. Tutkitusta aineistosta havaittiin, että kuonalle on esitetty pienempiä E-moduuli-arvoja, kuin mitä laboratoriotutkimusten ja koerakenteiden tuloksista käy ilmi. Tämä selittynee osittain sillä, että on haluttu lisätä varmuuskerrointa todennettujen E-moduuli-arvojen suhteen sekä sillä, että kuonarakenteen on havaittu lujittuvan rakenteessa tiivistyksen jälkeen. Koerakenteista kävi ilmi, että välittömästi tiivistämisen jälkeen suoritettujen levykuormituskokeiden tulokset jäivät alle vaaditun tason, mutta esimerkiksi jo viikon päästä uudelleen suoritetuista levykuormituskokeista voitiin todeta lujuuden kehittyneen siten, että tavoiteltuihin arvoihin päästiin. Koerakenteiden tuloksia oli kahdeksasta eri rakenteesta vuosien 2017 ja 2020 väliltä ja niistä seitsemässä kuonaa oli käytetty jakavan kerroksen materiaalina ja yhdessä suodatinkerroksessa. Jakavan kerroksen kerrospaksuus vaihteli eri rakenteiden välillä 300–1500 mm välillä ja suodatinkerroksen kerrospaksuus oli 350 mm. Suodatinkuonakerroksen päälle rakennettiin myös jakava kerros kuonasta.

Materiaalintoimittajien aineistosta koottiin tietoa kuonan routivuudesta ja sen segregatiopotentiaalista. Routanousun osalta tutkimuksessa havaittiin aiemmin tehdyn Suomen Eri-tyisjätteen (c. 2018) kuonaohjeessa olevan tutkimustuloksen tuloksen olevan melko samankaltainen myöhemmin tehtyjen tutkimusten kanssa riippumatta siitä, että kummassakin tutkimuksessa käytettiin eri materiaalintoimittajan kuonaa. Routanousukokeen alkujaksolla (12–24 h) tutkitut kuonaerät saivat routivuusluokituksen mukaisesti tuloksen routiva, mutta roudan tunkeutumisen tasaannuttua (24–80 h) segregatiopotentiaalın arvo laski ja tutkimusten perusteella niin sanottu suodatinkuona sai kaikissa tutkituissa vaihtoehdoissa luokituksen lievästi routiva. Routanousukokeessa huomioitiin myös tiivistämisen yhteydessä tapahtuva hienontumisen vaikutus. Hienontumisella ei havaittu olevan huomattavaa vaikutusta kuonan routakäyttäytymiseen, vaikka se on routivuusherkkyttä lievästi kasvattava tekijä. Kuonalla on käytetty luonnonkiviainekselle määritettyjä routivuusluokitusrajoja, joskin tulee ottaa huomioon, etteivät ne ole kuonan osalta täysin sovellettavissa.

Kuonan hienontumista koerakenteissa ja laboratorioskokeissa oli havaittu jo pidemmältä ajalta, mutta tarkemmin hienontumista on tutkittu vasta lähivuosina muun muassa Söderholmin (2020) opinnäytetyössä sekä Sormusen (2017) väitöstutkimuksessa.

4.2 Pohjakuonan E-moduuli

Tutkitussa aineistossa oli eri kuonalajitteista toteutettuja levykuormituskokeita erittäin vaihtelevasti, joten tutkimustulosten hajonta ei kuvasta täysimääräisesti kaikkia pohjakuonia, vaan kyseisiä koe-eriä. Tutkimuksessa tarkastellun koerakenteen suodatinkerroksen kuonan mitattu E_1 -moduulin keskiarvo oli noin 50 MPa ja E_2 -moduulin keskiarvo noin 90 MPa. Jakavan kerroksen osalta keskiarvo takaisinlasketussa E_1 -moduulissa oli noin 130 MPa ja E_2 -moduulissa noin 270 MPa. Kummastakin rakenneosasta oli otettu 22 mittaustulosta.

Toisesta koerakenteesta, jossa ensimmäisessä kuonarakenteessa suodatinkerroksessa oli 0/2 raekoon ja toisessa rakenteessa 0/16 raekoon kuona sekä jakavassa kerroksessa oli kummassakin 0/32 raekoon kuona. Heavy-Loadmanilla suoritettujen kantavuusmittausten perusteella suodatinkerroksen E_1 -moduulin arvot olivat 57 MPa ja E_2 -moduulin arvot 71 MPa välittömästi rakenteen rakentamisen jälkeen syksyllä. Kun mittaukset suoritettiin uudelleen keväällä talven jälkeen, oli E-moduulien arvot hieman nousseet. Uusien mittausten tulokset olivat E_1 -moduulissa 81 MPa ja E_2 -moduulissa 82 MPa. Jakavassa vastaavat arvot olivat ensimmäisellä mittauskerralla E_1 -moduulissa 89 MPa ja E_2 -moduulissa 88 MPa. Toisella mittauskerralla tapahtui enemmän hajontaa ja arvot olivat E_1 -moduulissa 103 MPa sekä E_2 -moduulissa 121 MPa.

4.3 Pohjakuonan routivuus

Selvityksessä tarkastellusta aineistosta havaittiin pohjakuonan segregatiopotentialin olevan mittauksen alkujakson aikana (12–24 h) samaa suuruusluokkaa, kuin tutkimuksen verrokkina käytetyssä Suomen Erityisjätteen 2018 julkaisemassa kuonaohjeessa. Alkujakson aikana tutkittujen kuonaerien routimiskertoimet olivat taulukossa 5 kuvaillun mukaisesti routivia. Taulukossa esitetyt routivuusluokitusrajat ovat luonnonkiviaineksille ja esitettyjä rajoja on käytetty kuonalle soveltaen ja tapauskohtaisesti.

Segregaatiopotentiaali SP [mm ² /Kh]	Routivuusluokitus
< 0,18	Routimaton
0,18–0,72	Lievästi routiva
0,72–3,6	Routiva
3,6–7,2	Voimakkaasti routiva
7,2–18	Erittäin voimakkaasti routiva
> 18	Äärimmäisen voimakkaasti routiva

Taulukko 5. Routivuusluokitusrajat kiviaineksille (mukailtu Konrad 1980)

Roudan tunkeutumisen tasaannuttua (24–80 h) segregaatiopotentiaalın arvot olivat laske-
neet ja suodatinkerrokseen kaavailtu kuonajae oli tutkituissa vaihtoehdoissa saanut luoki-
tuksen lievästi routiva. Tiivistystyössä tapahtuva kuonan hienontuminen tulee ottaa huomi-
oon kuonan routimisherkkyyttä lisäävänä tekijänä.

4.4 Pohjakuonan hienontuminen

Pohjakuonan hienontumista on tutkittu muutamassa koerakennuskohteissa sekä laborato-
riokokeissa. Koerakenteiden osalta tutkimus on osittain vielä kesken, sillä niistä on haluttu
tutkia pitkän aikavälin hienontumista ja kyseisiä hienonemissäkkejä ei vielä ole poistettu
rakenteista. Yhdestä koerakenteesta tultaneen hienonemissäkit poistamaan kuluva ke-
vään aikana ja tutkitaan niissä aiheutuneita muutoksia. Toisen koerakenteen osalta on vielä
epäselvää, poistetaanko hienonemissäkit rakenteesta jossakin vaiheessa vai annetaanko
niiden olla rakenteessa rakenteen purkuun saakka, jonka jälkeen ne tutkitaan ja analysoi-
daan.

Selvitystyössä havaittiin, ettei normaalin rakentamisen aikana tapahtuneessa tiivistämi-
sessä hienontunut kuona merkittävästi muuttanut rakeisuuskvaajia suodatin- tai jakavan
kerroksen jakeissa, vaan kummankin jakeen rakeisuuskvaajat asettuvat InfraRYL:ssä esi-
tettyihin vaatimuksiin kyseisten rakennekerrosten osalta. Selvityksen mukaan sekä kuonan
hienontumisella että tiivistymisellä on merkittävää vaikutusta kuonan kapillaariseen nousu-
korkeuteen, joka jatkuu vielä rakentamisen jälkeen ainakin kahden kuukauden ajan, mah-
dollisesti jopa pidempään, riippumatta siitä onko kyseessä suodatin- vai jakavan kerroksen
kuonajae. Suodatin- ja jakavan kerroksen jakeita vertaillaessa on jakavan kerroksen

kapillaarinen nousukorkeus pienempi, kuin suodatinkerroksen kuonalla. Kapillaarinen nousukorkeus vaihtelee kuonan käyttöluokan mukaan 0,05–1,1 m välillä. Onkin ensiarvoisen tärkeää tarkastella kuonan rakennekerroksen korottamisen ja erillisen kapillaarikatkokerroksen välillä, kumpi kuonarakenteeseen toteutetaan.

4.5 Poltto- ja jalostusprosessin vaikutus pohjakuonan laatuun

Suomessa käytetään jätteenpoltossa lähes poikkeuksetta arinapolttotekniikkaa sen hyvän soveltuvuuden jätteenpolttoon ansiosta. Arinapolttotekniikka ei vaadi erillistä poltettavan jätteen esilajittelua ja näin ollen tutkimus keskittyi ainoastaan arinapollostä syntyvään pohjakuonaan.

Tutkimuksessa havaittiin pohjakuonan laadun olevan melko tasalaatuista riippumatta siitä, mikä jätteenpolttolaitos tai kuonanjalostaja sitä toimittaa. Tämä selittyy jätteenpolttolaitosten suurella varastobunkkerilla ja poltettavan materiaalin varastovälppäyksellä ennen polttoon menoa, joka sekoittaa toimitetut jätemateriaalit keskenään ja näin ollen polttoon menevä jäteaines on samalla hyvin sekoitunutta ja samalla verrattain tasalaatuista. Suomessa yleisimmin käytössä oleva kuivaerotustekniikka selittää myös osaltaan eri materiaalitoimittajien pohjakuonien tasalaatuisuutta keskenään.

4.6 Pohjakuonasta rakennettuja rakenteita

Pohjakuonaa on käytetty erilaisissa kenttärakenteissa sekä kevyenliikenteenväylien ja katujen rakennekerroksissa, pääosin jakavassa ja suodatinkerroksessa viimeisen kahdeksan vuoden aikana. Tuota aikaisempaa ajanjaksona kuonaa on käytetty kaatopaikkarakentamiseen. Pohjakuonaa on myös käytetty ruoppausmassojen stabilointiin koerakenteessa.

Lisäksi pohjakuonasta on rakennettu sulletun maan menetelmällä meluseinä. Meluseinärakenteessa kuonaa käytettiin runkomateriaalina yhdessä betonimurskeen kanssa. Suomessa pohjakuonasta on myös valmistettu Luja-moduleita, joissa on korvattu puolet luonnonkiviaineksesta pohjakuonalla. Kuonasta on lisäksi valmistettu betonisia tukimuurielementtejä sekä betonisia pihakiviä, joissa osa runkoaineksesta on korvattu pohjakuonalla.

4.7 Pohjakuonan käyttökohteet

Kuonakiviaineksella toteutetut rakenteet ovat alun perin olleet kaatopaikkarakenteita ja jätteenkäsittelyalueille toteutettuja kenttärakenteita. Koerakenteita on rakennettu 2010-luvulta lähtien ja osasta niistä on saatu kerättyä tutkimustuloksia pitkän aikavälin käyttöön liittyen. Pitkäaikaisseurannassa ei ole havaittu koerakenteissa sellaisia muodonmuutoksia tai havaintoja rakenteessa, jotka estäisivät kuonan käyttöä Suomen olosuhteissa. Tuloksia

tulkittaessa tulee kuitenkin huomioida, että kuonarakenteiden seurantajaksot ovat huomattavasti tavanomaisen maarakenteen mitoitusikää lyhyempiä, eikä liikennekuormitusten vaikutuksista ole tarkkaa tietoa, joten tarkempi tieto kuonan pitkäaikaispysyvyydestä kertyy vasta pidemmän ajan kuluessa. Pohjakuonasta rakennettuja kohteita ja rakenteita kuvattu taulukossa 6.

Kohde	Vuosi	Rakenneosa
Vt 19, Seinäjoen itäinen ohikulkutie, Ilmajoki	2015	Raitin jakava kerros
Ämmässuon jätteenkäsittelykeskus, Espoo	2021	Kenttien päällysrakenne sekä tulotien jakava kerros
Keltakankaan jätteenkäsittelykeskus, Kouvola	2018	Tonttiliittymän jakava kerros
Hiedanrannan kevyenliikenteenväylä, Tampere	2018	Raitin jakava- ja suodatinkerros
Kuulojantien koerakenteet, Riihimäki	2020	Kadun jakava- sekä suodatinkerros
Mt 2879, Riihimäki, Hausjärvi	2021	Kevyenliikenteenväylän jakava- ja suodatinkerros
Mt 354, Kouvola	2020	Kevyenliikenteenväylän suodatinkerros

Taulukko 6. Koontitaulukko olemassa olevista kohteista, joissa on käytetty kuonaa rakenerroksissa

4.8 Materiaalintoimittajien tunnistamat riskit ja mahdollisuudet

Materiaalintoimittajien tuottamasta aineistosta nousi esille heidän havaitsemiaan muutamia toistuvia riskejä, jotka tulee huomioida suunniteltaessa ja käytettäessä pohjakuonaa. Tunnistettuja riskejä listattuna taulukossa 7.

Ominaisuudet	Kuonalla on korkea pH, joka tulee huomioida kuonaa käsiteltäessä sekä kuonan pH:n vaikutus korroosion suhteen
Materiaali ja sen raaka-aine	Jalostusprosessista huolimatta kuonaan jääneet terävät partikkelit sekä kuonassa olevat haitta-ainespitoisuudet saattavat jäädä korkeiksi. Suunniteltaessa kuonan käyttöä tulee varmistua sen riittävästä saatavuudesta koko rakennushankkeen ajaksi.
Käyttöturvallisuus	Kuonaa käsiteltäessä tulee huolehtia työntekijöiden asianmukaisesta suojarustuksesta, sillä kuonan korkea pH, terävät partikkelit, haitta-aineet ja pölyt voivat aiheuttaa hengitystie- ja iho-oireita sekä haavaumia.
Varastointi	Varastoitaessa kuonaa tulee kastella riittävästi, jotta vältetään sen pölyämiseltä. Myös kuonassa tapahtuvat eksotermiset reaktiot tulee ottaa huomioon, sillä ne saattavat nostaa varastokasan lämpötilaa.
Kuljetus	Kuljetettaessa kuonaa se tulee peittää asianmukaisesti, jotta vältetään kuljetuksenaikaiselta pölyämiseltä ja liettymiseltä.
Rakentaminen	Kuonaa käsittelevissä työkoneissa tulee olla riittävä ilmanvaihto, jotta koneen kuljettaja välttyy pölyaltistukselta. Kun kuonan käsittelylaitteistoa siirretään työkohteesta toiseen, tulee ne puhdistaa huolellisesti, jotta vältetään kuonajäämien ja pölyn tahattomalta leviämiseltä ympäristöön. Kuonalla rakennettaessa tulee kuonarakenne peittää mahdollisimman pian rakentamisen jälkeen asfaltilla tai muulla kohteeseen suunnitellulla päällysteellä, jotta vältetään kuonan tahattomalta kulkeutumiselta ympäristöön.
Käyttökohde ja rakennusosa	Kuonan vedenimeytymisprosentin ollessa luonnonkiviainesta suurempi, tulee huomioida rakenteisiin päätyvä vesi ja siihen liittyvä riittävä kuivatus.
Olosuhteet	Kuivalla säällä ilmenevä kuonan pölyäminen sekä sateella ilmenevä kiinteän aineksen liettyminen veden mukana tulee ottaa huomioon.

Taulukko 7. Koontitaulukko materiaalintoimittajien tunnistamista riskeistä ja mahdollisuuksista

4.9 Selvitystyössä havaitut riskit ja mahdollisuudet

Selvitystyötä tehdessä ilmi nousi muutamia riskejä, joita tulee huomioida kuonaa käytettäessä. Selvityksessä todettiin, ettei kuonaa ole käytetty paljoa pengerkäytössä, joten siitä ei ole kertynyt riittävästi kokemusta. InfraRYLissä esitetyt vaatimukset pengermateriaalille täyttyvät pohjakuonan osalta, sillä pengerrakenteessa sallitaan lievästi routiva ja routiva luonnonkiviaines ja näin ollen kuona soveltuu pengerrakenteessa käytettäväksi. Kuonan käyttöä routivuuden osalta rajoittaa ainoastaan se, että suoalueilla tulee olla penkereessäkin routimaton materiaali.

Kuonasta rakennetun rakenteen lävitse saattaa virrata virtausvesiä, jotka voivat huuhtoa hienoaainesta. Tämä veden virtaaminen tulisi ehkäistä ja estää rakenteen riittävän kuivatuksen ja laskuojien huolellisen suunnittelun ja rakentamisen muodossa. Kuonan vaikutus muihin rakenneosiin, kuten putkiin, kaapeleihin ja johtoihin tulee ottaa huomioon kuonan korkean pH:n takia. Selvitystä tehdessä nousi myös esille se, säilyvätkö kuonarakenteen tiivistymis- ja lujittumisominaisuudet rakenteen auki kaivun ja uudelleentäytön myötä. Kuonan lujituksessa ajan saatossa ei ole varmuutta, miten se käyttäytyy tällaisessa tilanteessa. Yhtenä riskinä kuonan pengerkäytölle on se, ettei materiaalitoimittajilla ole ensisijaista halua käyttää kuonaa pengerrakenteessa.

Kuonalla rakennettaessa tulee kuonan vesipitoisuuden olla hyvin lähellä sen optimivesipitoisuutta, jotta kuonarakenteeseen saavutetaan vaadittu tiiveysaste.

4.10 Selvitystyön yhteenveto

Selvitystyön perusteella yhdyskuntajätteenpolton pohjakuonalle ei nähdä olevan esteitä tehdä Väyläviraston teknisen soveltuvuuden arviointia liikennekuormitettuihin ja ei-liikennekuormitettuihin penkereisiin, vaikka aikaisempaa kokemusta kuonan pengerkäytöstä ei ole. Tutkitussa aineistossa ilmenneet tekniset ominaisuudet eri kuonaseoksille täyttävät InfraRYLissä ja Väyläviraston Tierakenteen suunnitteluohjeessa asetetut vaatimukset pengermateriaaleille. Pohjakuonalle aikaisemmin laaditut ohjeet ja oppaat eivät korvaa materiaali-kohtaisia suunnittelu- ja käyttöoppaita, joita eri rakennekerrosten suunnittelussa ja rakentamisessa tarvitaan. Kun alan yhteistä kuonapengerohjetta (vrt. Infra ry:n betonimurskeohje tai Metsäteollisuuden tuhkavalliohje) ei toistaiseksi ole valmisteilla, tulee ohjeiden soveltuvuutta tarkastella materiaalitoimittajakohtaisesti.

Osalla materiaalitoimittajista on valmisteilla suunnittelu- ja käyttöohje kuonan pengerkäyttöön. Aikaisemmin julkaistut suunnittelu- ja käyttöohjeet eivät ole koskeneet pengerkäyttöä, vaan ne ovat keskittyneet kuonan käyttöön tien eri rakennekerroksissa. Kuonan

pengerkäytön edistämiseksi onkin tärkeää, että nämä ohjeet ovat tekeillä. Lähtökohtaisesti materiaalintoimittajilla on halu kuonan käyttöön korkean lisäarvon käyttökohteissa, joka saattaa omalta osaltaan rajoittaa kuonan käytön halukkuutta pengerrakenteessa.

Kuonan soveltuvuudesta suodatinkerrokseen ja jakavaan kerrokseen varmistamiseksi vaatisi se sekä laboratoriotutkimuksia että dokumentoitujen seurantatulosten saamista koerakentamiskohteista. Näistä tutkimuksista tulisi erityisesti saada lisätietoa kuonan routimisesta ja kuonarakenteen routakäyttäytymisestä sekä kuonan hienontumisesta ja hienontumisen vaikutuksesta kuonan routimisominaisuuksiin.

5 Yhteenveto ja pohdinta

Opinnäytetyön tarkoitus oli tutkia yhdyskuntajätteenpoltosta syntyvien pohjakuonien teknisiä ominaisuuksia pohjakuonan jalostajien ja materiaalintoimittajien tuottamasta tutkimusaineistosta, joka käsitti sekä laboratoriokokeiden että koerakenteiden tutkimustuloksia. Aihetta tutkittiin, sillä Väylävirastolla on halu sallia pohjakuonan käyttö heidän omissa hankkeissaan pengerrakenteeseen ja pohjakuonan käytöllä vähentää luonnonkiviainesten käyttöä. Opinnäytetyön ohessa valmisteltiin Väyläviraston käyttöön selvitys, jonka tietoja on sisällytetty tähän opinnäytetyöhön sikäli, kun ne ovat julkaistavissa. Selvitystä hyödyntäen Väylävirasto joko arvioi kuonan soveltuvaksi pengerkäyttöön tai pyytää lisätutkimuksia esille nousseista seikoista, kuten kuonan routivuudesta, hienonemisesta tai E-moduulista. Opinnäytetyössä vertailtiin erityisesti kuonan E-moduulia, routivuutta ja hienontumista aiemmin toteutettuihin tutkimuksiin, kuten myös InfraRYL:ssä esitettyihin teknisiin vaatimuksiin pengerrakenteessa sekä tulevaisuutta ajatellen myös suodatinkerroksessa ja jakavassa kerroksessa.

Opinnäytetyössä ja selvityksessä tarkasteltu aineisto oli laajuudeltaan vaihtelevaa eri materiaalintoimittajien välillä. Yhdeltä materiaalintoimittajalta saatu aineisto täydentyi vielä 2023 tammikuussa ja yhden materiaalintoimittajan edustajaa haastateltiin sähköpostin välityksellä. Etenkin haastattelusta saatu tieto oli arvokasta, sillä sitä ei ollut kirjallisuudesta saatavissa. Lisäksi se oli tuoreinta saatavilla olevaa tietoa kyseisen materiaalintoimittajan tuotannosta sekä se auttoi selvityksen teossa tulevien jatkotutkimusten esittelemisessä.

Isoin haaste opinnäytetyön teossa oli lähtötietoaineiston osittainen puutteellisuus, jonka takia tutkimustuloksissa ei ole hajontaa eikä se näin ollen ole kovin vertailukelpoinen. Esimerkiksi jakavaan kerrokseen esitetyn kuonan tutkimustuloksia oli yhteensä 27 kpl, joista E-moduulia oli mitattu yhteensä viidellä levykuormituskokeella ja yhdellä kolmiaksaalikokeella. Näistä suoritetuista mittauksista osalla oli määritetty E_1 - ja osalla E_2 -moduulin arvoja. Näin ollen olisi suotavaa toteuttaa lisää koerakennekohteita, joista saadaan lisää kenttäkoetuloksia. Myös laboratoriokokeita tulisi toteuttaa lisää kuonan tarkempien teknisten ominaisarvojen määrittämiseksi.

Opinnäytetyön tekeminen pohjakuonasta toi esiin uusia näkökulmia ja ajatuksia uusiomateriaalien käytöstä ja niiden soveltuvuudesta esimerkiksi kuljetusmatkojen osalta. Kun tavoitteena on vähentää luonnonkiviaineksen käyttöä uusiomateriaalilla, tulee uusiomateriaalin osalta huomioida sen kuljetusmatka sekä kuljetusmatkan aiheuttamat kulut ja päästöt. Kuten insinööriopintojen aikana on usein mainittu, on tässäkin kyseessä optimointi parhaan mahdollisen tuloksen saamiseksi eikä näin ollen voida todeta olevan yhtä absoluuttista oikeaa tapaa toteuttaa rakennetta joko kuonalla tai luonnonkiviaineksella. Suomessa

kuitenkin poltetaan jätettä vuositasolla paljon, joka tarkoittaa noin 300 000 tonnin kuonan tuottoa vuosittain valtakunnallisella tasolla ja sikäli, kun kuonaa ei haluta toimittaa kaatopaikoille penkan täytteeksi, olisi suositeltavaa kohdentaa sen käyttö johonkin sellaiseen, jossa siitä saadaan maksimaalinen hyöty.

Pohjakuonasta on aikaisemmin toteutettu tutkimuksia ja opinnäytetöitä materiaalintoimittajien toimesta, eikä sitä ole tarkasteltu riippumattoman tahon toimesta. Tutkimuksessa nousi esille pohjakuonan ominaisuuksia, joille suositellaan toteutettavan lisätutkimuksia. Jatkotutkimuksia kaipaavia seikkoja ovat jo aikaisemmin mainitut kuonan hienontuminen, routiminen sekä hienontumisen vaikutus kuonan routimisominaisuuksiin. Myös kuonan käyttäytymistä pengerrakenteessa olisi hyvä tutkia koerakentamiskohteiden kautta. Sikäli kun kuonan käyttö yleistyy, tulisi sille määrittää omat laatuvaatimuksensa InfraRYL:iin, kuten esimerkiksi masuuni- ja ferrokromikuonille tai betonimurskeelle on määritetty, tai vaihtoehtoisesti lisätä jo olemassa oleviin vaatimuksiin, jos niiden todetaan soveltuvan täysimääräisesti kuonalle.

Lähteet

Ahlqvist, E. 2021. Henkilökohtainen valokuva-albumi. Viitattu 3.2.2023.

Birgisdottir, H., Pihl, K.A., Bhandar, G., Hauschild, M.Z. & Christensen, T.H. 2006. Environmental assesment of roads constructed with and without bottom ash from municipal solid waste incineration. Viitattu 6.2.2023. Saatavissa DOI <https://doi.org/10.1016/j.trd.2006.07.001>

Bröckl, M., Kiuru, H., Heads, S., Kämäräinen, K., Patronen, J., Luoma-aho, K., Armila, N., Sipilä, E. & Semkin, N. 2021. Jätteenpolton kiertotalous- ja ilmastovaikutuksiin vaikuttaminen eri ohjaukeinoiin. Viitattu 18.1.2023. Saatavissa https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162690/VNTEAS_2021_08.pdf?sequence=4

Confederation of European Waste-to-Energy Plants. Bottom Ash Factsheet. Viitattu 1.2.2023. Saatavissa <https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2017/09/FINAL-Bottom-Ash-factsheet.pdf>

Confederation of European Waste-to-Energy Plants. 2022. Waste-to-Energy Climate Roadmap Technical Annex. Viitattu 1.2.2023. Saatavissa https://www.cewep.eu/wp-content/uploads/2022/06/TA-Technical-Annex_CEWEP-Climate-Roadmap_June22.pdf

Environmental Protection Agency. 2022. National Overview: Facts and Figures on Materials, Wastes and Recycling. Viitattu 24.1.2023. Saatavissa <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials>

Fortum Oy. 2023. Gravo keinokiviainestuote. Viitattu 18.1.2023. Saatavissa <https://www.fortum.fi/yriyksille-ja-taloyhtiaille/kierratys-ja-jatepalvelut/tuhkan-ja-kuonan-kierratys/fortum-gravo-keinokiviainestuote>

Harju, I., Forsman, J., Koivulahti, M., Lehtonen, K., Kolisoja, P., Kuula, P. & Leppänen, M. 2022. Käsitellyn yhdyskuntajätteenpolton pohjakuonan käyttö infrarakentamisessa, Koe-käyttöön 3/2022. Viitattu 5.12.2022. Saatavissa <https://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/K%C3%A4sitellyn%20yhdyskuntaj%C3%A4tteen%20pohjakuonan%20k%C3%A4ytt%C3%B6%20infrarakentamisessa%2C%20ohjeistuksen%20k%C3%A4sikirjoitusluonos%20koek%C3%A4ytt%C3%B6%2031.3.2022.pdf>

InfraRYL. 2022a. 18111.1.1 Maapenkereen materiaalit, yleistä. Viitattu 26.1.2023.

InfraRYL. 2022b. 18111:K3 Tiepenkereen osat. Viitattu 15.2.2023.

InfraRYL. 2022c. 21210.3.1 Jakavan kerroksen rakentaminen uusiomateriaalista. Viitattu 26.1.2023

Johansson, J. & Lönnebo Stagnell, K. 2016. Slagg – en koldioxidsänka? En studie av karbonisering i slagg från förbränning av hushålls- och industriavfall. Viitattu 8.2.2023. Saatavissa <https://lup.lub.lu.se/student-papers/search/publication/8890431>

Jätelaitosyhdistys ry. a. Arinapoltto. Viitattu 5.12.2022. Saatavissa <http://vanha.jly.fi/energia31.php?treeviewid=tree3&nodeid=31>

Jätelaitosyhdistys ry. b. Jätteiden kaasutus ja kaasun poltto. Viitattu 12.12.2022. Saatavissa <http://vanha.jly.fi/energia35.php?treeviewid=tree3&nodeid=35>

Jätelaitosyhdistys ry. c. Leijupetipoltto. Viitattu 12.12.2022. Saatavissa <http://vanha.jly.fi/energia32.php?treeviewid=tree3&nodeid=32>

Kaartinen, T., Laine-Ylijoki, J., Koivuhuhta, A., Korhonen, T., Luukkanen, S., Mörsky, P., Neitola, R., Punkkinen, H., & Wahlström, M. 2010. Pohjakuonan jalostus uusiomateriaaliksi. Viitattu 7.12.2022. Saatavissa <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2010/T2567.pdf>

Konrad, J-M. 1980. Frost heave mechanics. University of Alberta. Väitöskirja. Viitattu 6.3.2023. Saatavissa DOI <https://doi.org/10.7939/R3WP9TH3B>

Laki jätelain muuttamisesta. 714/2021.

Piepponen, T. 2023. VS: Yhdyskuntajätteenpolton pohjakuonat. Sähköpostiviesti. Vastaanottaja Härkisuo, J. Lähetetty 27.2.2023.

RT 103552. 2023

Schafer, M., Clavier, K., Townsend, T., Kari, R. & Worobel, R. 2019. Assessment of the total content and leachin behavior of blends of incinerator bottom ash and natural aggregates in view of their utilization as road base constuction material. Viitattu 30.1.2023. Saatavissa <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X19305215>

Sormunen, A. 2017. Recovered Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash: Aggregate-Like Products for Civil Engineering Structures. Tampereen teknillinen yliopisto. Väitöskirja. Viitattu 15.2.2023. Saatavissa <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-4019-6>

Suomen Erityisjäte Oy. 2018. Jätteenpolton pohjakuona. Viitattu 19.1.2023. Saatavissa <https://www.erityisjate.fi/client/erityisjate/userfiles/suomen-erityisjate-kuonaohje-a5-20180301-vs2.pdf>

Suomen Erityisjäte Oy. 2022a. Jätteenpolton pohjakuonat. Viitattu 5.12.2022. Saatavissa <https://www.erityisjate.fi/palvelut-tuotteet/jatteenpolton-pohjakuonat/>

Suomen Erityisjäte Oy. 2022b. Scanwas tuotteet. Viitattu 18.1.2023. Saatavissa <https://www.erityisjate.fi/palvelut-tuotteet/scanwas-tuotteet/>

Suomen virallinen tilasto (SVT). 2021. Yhdyskuntajätteen määrä jatkoi kasvuaan vuonna 2020 – suurin osa energiasta hyödynnettiin edelleen energiana. Viitattu 5.12.2022. Saatavissa https://www.stat.fi/til/jate/2020/13/jate_2020_13_2021-12-09_tie_001_fi.html

Suomen virallinen tilasto (SVT). 2022. Jätetilasto, Yhdyskuntajätteen määrä pysyi edellisvuoden tasolla vuonna 2021 – yhä suurempi osa jätteistä hyödynnettiin energiana. Viitattu 9.2.2023. Saatavissa <https://stat.fi/julkaisu/cktwkksr43wo20b61h94063h3>

Söderholm, A. 2020. Jätteenpolton pohjakuona tierakenteessa. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö. Viitattu 7.2.2023. Saatavissa <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2020120125308>

Turvallisuus- ja kemikaalivirasto. CE-merkittävät rakennustuotteet. Viitattu 18.1.2023. Saatavissa <https://tukes.fi/rakennustuotteet/ce-merkittavat-rakennustuotteet#97738e39>

Utilitalia. Esperienza di RMB nel trattamento e recupero delle ceneri pesanti da incenerimento e bilancio di sostenibilita' espresso come CO₂. Konferenssijulkaisu. Viitattu 1.2.2023. Saatavissa <https://www.utilitalia.it/pdf/d0033ab3-3839-4d72-a735-62c9d6662f27>

Uusiomaarakentaminen 4. 2022a. Tuotteistaminen. Viitattu 9.1.2023. Saatavissa <https://www.uusiomaarakentaminen.fi/tuotteistaminen#7.1%C2%A0%20Tuotteistamisprosessin%20eteneminen>

Uusiomaarakentaminen 4. 2022b. Ympäristö- ja lupaprosessi. Viitattu 9.1.2023. Saatavissa <https://www.uusiomaarakentaminen.fi/ymp%C3%A4rist%C3%B6-ja-lupaprosessi-0>

Uusiomaarakentaminen 4. 2022c. UUMA-kohdekortit. Viitattu 1.2.2023. Saatavissa <https://www.uusiomaarakentaminen.fi/uuma-kohdekortit>

Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 843/2017, liite 1.

Valtioneuvoston periaatepäätös kiertotalouden strategisesta ohjelmasta. 2021. Viitattu 9.1.2023. Saatavissa <https://ym.fi/documents/1410903/42733297/Valtioneuvoston+periaatep%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s+8.4.2021+kiertotalouden+strategisesta+ohjelmasta.pdf/aee1e0d0-802f-b272-e424->

50c9cd1c5f5e/Valtioneuvoston+periaatep%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s+8.4.2021+kierto-talouden+strategisesta+ohjelmasta.pdf?t=1617783970488

Valokoski, L., Knuuti, S., Wuori, M., Tirkkonen, T., Lehtonen, K., Petäjä, S., Sikiö, M-T., Valkeisenmäki, A., Torniainen, S., Forsman, J. & Ahlqvist, E. 2022. Uusiomateriaalien käyttö väylärakentamisessa. Viitattu 13.1.2023. Saatavissa https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2022-20_uusiomateriaalien_kaytto_web.pdf

Ympäristöministeriö, Jätelain eräiden säännösten tulkintalinjauksia. 2014. Viitattu 18.1.2023. Saatavissa <https://www.ym.fi/download/noname/%7BCD7F8935-DBAB-46D0-B606-4DF92D0F82DA%7D/106176>

Ympäristöministeriö, Ympäristölupa. 2022. Viitattu 9.1.2023. Saatavissa https://www.ymparisto.fi/fi-fi/asiointi_luvat_ja_ymparistovaikutusten_arviointi/luvat_ilmoitukset_ja_rekisterointi/Ymparistolupa