

Juho Lautala

JÄTTEENPOLTON POHJAKUONASTA VALMISTETTU KEVYTKIVIAINES- MURSKE

Rakennetun ympäristön tiedekunta
Diplomityö
Marraskuu 2023

TIIVISTELMÄ

Juho Lautala: Jätteenpolton pohjakuonasta valmistettu kevytkiviainesmurske

Diplomityö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan DI-ohjelma

Marraskuu 2023

Yhdyskuntajätteen poltto on yleistynyt jätteenkäsittelymenetelmä, jonka jäännöstuotteena syntyy yhdyskuntajätteen polton pohjakuonaa. Käsiteltyä yhdyskuntajätteen polton pohjakuonaa voidaan hyödyntää infrarakentamisessa, mutta hienorakeinen (0–1 mm) pohjakuonalajite on haastava rakennusmateriaali heikkojen teknis-mekaanisten ja kemiallisten ominaisuuksiensa vuoksi. Pohjakuonan käsittelyprosesseissa hienorakeista pohjakuonalajitetta syntyy usein enemmän kuin sitä pystytään hyödyntämään.

Hienorakeiselle pohjakuonalajitteelle kehitettiin uusi innovatiivinen hyötykäyttökohde keinotekoisen kevytkiviaineksen, vaahtokuonamurskeen, raaka-aineena. Vaahtokuonamursketta valmistetaan vaahtobetonireseptillä, jossa valmistettavan tuotteen raaka-aineista valtaosa on korvattu jätemateriaaleilla. Vaahtokuonamurskeen valmistusprosessin energiankulutus on pienempi kuin perinteisesti sintraamalla valmistettavien kevytkiviainesten.

Tässä työssä tutkittiin vaahtokuonamurskeen materiaaliominaisuuksia ja potentiaalisia infrarakentamisen käyttökohteita. Vaahtokuonamurskeelle tehtiin kattavat laboratoriokokeet, joiden perusteella määritettiin sen tärkeimmät teknis-mekaaniset ja kemialliset ominaisuudet. Tuloksia verrattiin yleisimpiin Suomessa käytettäviin kevytkiviaineisiin ja potentiaalisten infrarakentamisen käyttökohteiden vaatimuksiin.

Työssä saadut tulokset osoittautuivat erittäin lupaaviksi ja siksi materiaalille suositellaan jatkotutkimuksia. Teknis-mekaanisilta ominaisuuksiltaan vaahtokuonamurske vastaa yleisimpien Suomessa käytettävien kevytkiviainesten suoritustasoa. Vaahtokuonamurskeen liukoisuudet pienenevät raaka-aineisiin verrattuna, mutta joidenkin haitallisten aineiden liukoisuudet ylittävät edelleen osan MARA-asetuksen (843/2017) mukaisista käyttökohteiden raja-arvoista. Vaahtokuonamurske osoittautui ominaisuuksiensa perusteella soveltuvan kaikkiin tarkasteltuihin potentiaalisiin kevytkiviainesten käyttökohteisiin infrarakentamisessa, mutta vaahtokuonamurskerakenteiden toimivuus täytyy kuitenkin varmistaa jatkotutkimusten, kuten koerakenteiden, avulla.

Avainsanat: yhdyskuntajätteen polton pohjakuona, keinotekoinen, kevytkiviaines, murske, vaahtobetoni, uusiomateriaali, lämmöneristys, kevennys

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Juho Lautala: Crushed Lightweight Aggregate Produced From Waste Incineration Bottom Ash
Master's Thesis
Tampere University
Master's Programme in Civil Engineering
November 2023

Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) is a common waste treatment method producing bottom ash (BA) as a residue. Treated MSWI BA can be used in different civil engineering applications, but fine-grained (0-1 mm) MSWI BA is a challenging fraction due to its poor technical, mechanical and chemical properties. MSWI BA treatment processes often produce more fine-grained BA than it is possible to utilize.

A new innovative application was invented for the fine-grained MSWI BA fraction as a raw material in a lightweight aggregate called Crushed Foam Slag (CFS). CFS is a foam concrete product, which is manufactured by replacing most of the commonly used raw materials by waste materials. The energy consumption of CFS manufacturing process is low compared to the energy demand of producing other lightweight aggregates, which are traditionally made by sintering.

This thesis focuses on investigating the material properties and potential civil engineering applications of CFS. Several laboratory tests were conducted to define the most important technical, mechanical and chemical properties of CFS. The results were compared to other lightweight aggregates commonly used in Finland, and to the requirements of different civil engineering applications.

The results are promising, and further research is suggested. Technical and mechanical performance of CFS is equivalent to the performance of other artificial lightweight aggregates commonly used in Finland. Leaching properties of CFS mainly improve comparing to its raw materials, but the solubility of some of the harmful substances still exceed the limits of certain applications described in the decree of the government on the utilization of certain wastes in land construction (843/2017). CFS proved to be suitable for most of the considered potential civil engineering applications for lightweight aggregates, but the proper functionality of CFS structures must be ensured with further research e.g., experimental structures.

Keywords: MSWI, BA, waste incineration, bottom ash, artificial, lightweight, crushed, aggregate, foam concrete, recycled material, thermal insulation, load reduction

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

ALKUSANAT

Tämän diplomityön aiheen löytäminen oli onnekkaiden sattumusten summa. Työssä yhdistyvät henkilökohtaiset mielenkiinnon kohteet eli resurssiviisaus, kiertotalous, kehitystyö ja infraraken-taminen. Kokonaisuutena työ oli hyvin monipuolinen ja siinä yhdistyivät loistavasti teoria ja käy-täntö. Pääasiassa aika kului tiedonetsinnän parissa, mutta työn aikana pääsi paljon myös näke-mään ja tekemään erilaisia testejä käytännössä. Olihan se myös omanlaisensa kokemus val-mistaa käsityönä noin 300 litraa vaahtokuonamursketta.

Haluan kiittää erityisesti projektitiimin avainhenkilöitä Jania, Niinaa ja Valteria tämän mielenkiin-toisen projektin mahdollistamisesta ja edistämisestä. Kiitos myös Tampereen yliopiston tutki-muskeskus Terran ja raksahallin väelle sekä Fortumin maa- ja kemian laboratorion väelle. Hen-kilökohtainen työpanoksenne ja ammattitaitonne oli äärimmäisen arvokasta työn aikana.

Suuri kiitos myös ohjaajilleni Minnalle ja Paulille hyvästä ohjauksesta, vinkeistä ja näkökulmista. Kaikki apu oli korvaamatonta niin työn aloittamisen, edistämisen kuin viimeistelynkin kannalta. Myös opintojen aikana pitämänne kurssit olivat aina erinomaisesti järjestettyjä ja tarjosivat hy-vän teoreettisen pohjan.

Kaikki hyvä kuitenkin päättyy aikanaan ja niin päättyy myös ikimuistoinen ja opettavainen kor-keakoulutaipaleeni tämän työn valmistumisen myötä. Yksin tätä matkaa ei kuitenkaan onneksi tarvinnut taittaa ja isoin kiitos kuuluukin ystäville, perheelle sekä muille sidosryhmille ja yhteis-työtahoille, jotka olette kulkeneet mukana sekä tukeneet ja auttaneet. Tästä on hyvä jatkaa kohti uusia haasteita.

Tampereella, 28.11.2023

Juho Lautala

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta.....	1
1.2 Tavoitteet ja tutkimuskysymykset	2
1.3 Tutkimuksen toteutus ja rajaukset	2
2. YHDYSKUNTAJÄTTEEN POLTON POHJAKUONAN SYNTYPROSESSI.....	3
2.1 Jätteen muodostuminen ja jätteenkäsittelymenetelmät	3
2.2 Jätteiden terminen käsittely.....	5
2.3 Jätteenpolton menetelmät.....	6
2.4 Palamisprosessi.....	7
2.5 Yhdyskuntajätteen polton pohjakuona.....	9
2.6 Yhdyskuntajätteen polton pohjakuonan käyttö Suomessa.....	11
3. KEVYTKIVIAINEKSET	13
3.1 Valmistustekniikat	13
3.1.1 Rakeistus.....	13
3.1.2 Murskaus	15
3.2 Lujittamismenetelmät	16
3.2.1 Sintraus	16
3.2.2 Sementit ja sementinkaltaiset sideaineet	17
3.2.3 Karbonaatio	20
3.3 Käyttökohteet.....	21
4. HUOKOSBETONI	23
4.1 Valmistaminen	23
4.2 Ainesosat	24
4.2.1 Sideaine.....	24
4.2.2 Vaahdotusaine	25
4.2.3 Vesi.....	26
4.2.4 Täyteaine eli filleri	26
4.2.5 Lisäaineet	27
4.3 Materiaaliominaisuudet	28
4.3.1 Huokosrakenne.....	28
4.3.2 Lämmönjohtavuus.....	29
4.3.3 Kestävyys	30
5. VAAHTOKUONAMURSKEEN VALMISTUS	32
5.1 Resepti.....	32
5.2 Valmistusprosessi	34
6. MATERIAALITESTAUS JA TULOKSET	36
6.1 Teknis-mekaaniset ominaisuudet.....	36
6.1.1 Kuivairtotiheys	37
6.1.2 Rakeisuus	38
6.1.3 Huokosrakenne.....	40

6.1.4	Kiintotiheys ja vedenimeytyminen	42
6.1.5	Vedenimeytymiskorkeus	44
6.1.6	Vedenläpäisevyys	46
6.1.7	Lämmönjohtavuus.....	48
6.1.8	Jäätymis-sulamiskestävyys.....	49
6.1.9	Lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet.....	52
6.1.10	Kokoonpuristuvuus ja puristuslujuus.....	54
6.1.11	Hienoneminen	56
6.2	Kemialliset ominaisuudet	56
6.2.1	Kokonaispitoisuudet.....	57
6.2.2	Liukoisuudet.....	58
7.	TULOSTEN TARKASTELU.....	60
7.1	Tulosten arviointi ja vertailu.....	60
7.2	Tulosten luotettavuus	66
7.3	Vahtokuonamurskeen soveltuvuus eri käyttökohteisiin.....	67
7.4	Jatkotutkimustarpeet.....	68
8.	YHTEENVETO.....	72
	LÄHTEET	73
	STANDARDIT	80
	LIITE A: MARA-ASETUksen RAJA-ARVOT	82
	LIITE B: LABORATORIOTESTIEN MITTAUSRAPORTIT	84

KUVALUETTELO

Kuva 1.	Jätehuollon etusijajärjestystä kuvaavan jätehierarkian tasot. Muokattu lähteestä (Euroopan komissio, 2023b).....	3
Kuva 2.	Jätteiden termisen käsittelyn menetelmät, reaktiotuotteet, energian muunnosmenetelmät ja lopputuotteet. Muokattu lähteestä (Bridgwater, 2012)	5
Kuva 3.	Palamisprosessin vaiheet arinapoltossa: 1) kuivuminen, 2) devolatilisaatio ja 3) jäännöshiilen palaminen. Muokattu lähteestä (Vakkilainen, 2016, p. 209)	8
Kuva 4.	Käsitlemätön (vas.) ja käsitelty (oik.) yhdyskuntajätteen polton pohjakuona. (Österbacka, 2022a)	9
Kuva 5.	Sekoitusrakeistuksen osaprosessit: i) kostuminen ja ytimenmuodostus, ii) kasvu ja tiivistyminen sekä iii) kulumisen ja hajoaminen. Muokattu lähteestä (Thapa et al., 2019).....	14
Kuva 6.	Yleisimmät murskaimet: a) leukamurskain b) iskumurskain c) kartiomurskain. (Silva et al., 2017)	15
Kuva 7.	Sintraamalla valmistetut kevytkiviainekset, jollaisia ovat esimerkiksi Leca-kevytsora (vas.) ja Foamit-vahtolasimurske (oik.). (Forsman et al., 2012; Saint-Gobain, 2019)	16
Kuva 8.	Sementillä ja sementinkaltaisilla sideaineilla valmistetut kevytkiviainekset, jollaisia ovat esimerkiksi sementtipohjainen vaahdotuonamurske (vas.) (Kuva: Juho Lautala), pozzolaaninen Fill-R-tuhkaräe (kesk.) ja geopolymeeripohjainen kevytkiviainesmurske (oik.). (Räsänen, 2015; Xu et al., 2021).....	18
Kuva 9.	Sementtien ja sementinkaltaisten sideaineiden luokittelu alumiini-, kalsium- ja alkalipitoisuuden mukaan. Tummempi kuvaa suurempaa alkalipitoisuutta. Muokattu lähteestä (Provis & vanDeventer, 2014)	18
Kuva 10.	Esimerkkejä kevennysrakenteista: a) kevennetty penger b) siirtymärakenne c) kevennetty taustatäyttö. (Saint-Gobain, 2019).....	21
Kuva 11.	Periaatekuva vastaavuuskertoimen ai käytöstä routamitoituksessa. Muokattu lähteestä (Liikennevirasto, 2018, p. 27)	22
Kuva 12.	Huokosbetonin luokittelu ominaisuuksien, valmistusmenetelmien ja ainesosien perusteella. Tummansinisellä on korostettu tässä työssä käytetty huokosbetonin valmistusmenetelmä. Muokattu lähteestä (Chica & Alzate, 2019).....	23
Kuva 13.	Mineraalisen lisäaineen vaikutus vaahdon rakenteeseen heti vaahdon valmistamisen jälkeen: a) 0 % nanosilikaa b) 1 % nanosilikaa c) 3 % nanosilikaa d) 5 % nanosilikaa. Mittapalkin pituus on 200 µm. Muokattu lähteestä (She et al., 2018).....	27
Kuva 14.	Vaahdotuonamassan valmistuksessa käytetty sekoitin- (vas.), vaahdotus- (kesk.) ja mittalaitteisto (oik.). (Mäkinen, 2022).....	34
Kuva 15.	Suursäkkeihin annostellut vaahdotuonaerät: VK114 (vas.), VK124 (kesk.) ja VK134 (oik.). (Kuva: Juho Lautala)	35
Kuva 16.	Vaahdotuonamurskeen valmistuksessa käytetyt välineet: iskuporakone (vas.), leukamurskain (kesk.) ja jakolaatikko (oik.). (Kuva: Juho Lautala).....	35
Kuva 17.	Kuivavirtotiheyden määrittämisessä käytetyt välineet. (Kuva: Juho Lautala).....	37
Kuva 18.	Vaahdotuonamurske-erän VK114 yksittäistestinäytteiden rakeisuuskäyrät.....	39

Kuva 19.	Vaahtokuonamurske-erän VK124 yksittäistestinäytteiden rakeisuuskäyrät	39
Kuva 20.	Halkaistujen rakeiden huokosrakenteesta perinteisellä kameralla otetut kuvat vaahtokuonamurske-eristä VK114 (vas. ylä) ja VK124 (oik. ylä) sekä vertailumateriaaleista Foamit-vaahtolasimurskeesta (vas. ala) ja Leca-kevytsorasta (oik. ala). Kuvissa näkyvän mitan numeroiden väli on 1 cm. (Kuva: Juho Lautala).....	40
Kuva 21.	Huokosrakenteesta mikroskoopilla otetut kuvat vaahtokuonamurske-eristä VK114 (vas. ylä) ja VK124 (oik. ylä) sekä vertailumateriaaleista Foamit-vaahtolasimurskeesta (vas. ala) ja Leca-kevytsorasta (oik. ala). Yksittäisten mikroskooppikuvien alareunassa näkyvän mittapalkin pituus on 500 µm. (Kuva: Juho Lautala).....	41
Kuva 22.	Huokosrakenteesta rakeiden reunasta mikroskoopilla otetut kuvat vaahtokuonamurske-eristä VK114 (vas. ylä) ja VK124 (oik. ylä) sekä vertailumateriaaleista Foamit-vaahtolasimurskeesta (vas. ala) ja Leca-kevytsorasta (oik. ala). Yksittäisten mikroskooppikuvien alareunassa näkyvän mittapalkin pituus on 500 µm. Punaisella katkoviivalla on hahmoteltu tutkittavan rakeen reunaa. (Kuva: Juho Lautala).....	42
Kuva 23.	Kiintotiheyden ja vedenimeytymisen määrittäminen pyknometrillä. (Kuva: Juho Lautala)	43
Kuva 24.	Vedenimeytymiskorkeuden määrittäminen (vas.) ja siihen liittyvän hygroskooppisen vedenimukyvyn määrittäminen (oik.). (Kuva: Juho Lautala).....	45
Kuva 25.	Vedenläpäisevyysmittauksissa käytetty laitteisto. (Kuva: Juho Lautala).....	47
Kuva 26.	Lämmönjohtavuusmittausten testinäyte tasapainottumassa kosteuspiitoisuuteen (vas.) ja lämmönjohtavuuden mittauksessa käytetty FOX304-mittalaite (oik.). (Kuva: Juho Lautala).....	48
Kuva 27.	Jäädytys-sulatuskokeen aikainen testinäytteiden kyllästäminen ja sulatus (vas.) sekä ylimääräisen veden valuttaminen pois (oik.). (Kuva: Juho Lautala).....	50
Kuva 28.	Vaahtokuonamurske-erän VK124 testinäyte ensimmäisen jäädytys-sulatuskokeen jälkeen (vas.) ja vaahtokuonamurske-erän VK124 testinäyte toisen jäädytys-sulatuskokeen jälkeen (oik.). (Kuva: Juho Lautala).....	51
Kuva 29.	Kolmiaksiaalikoelaitteisto ja näyteselli (vas.), antureilla varustettu kolmiaksiaalikokeen koekappale näytesellissä (kesk.) ja kolmiaksiaalikokeen koekappaleen tiivistäminen (oik.). (Kuva: Juho Lautala).....	52
Kuva 30.	Kokoonpuristuvuuden ja puristuslujuuden määrittämisessä käytetty laitteisto. (Kuva: Juho Lautala)	55
Kuva 31.	Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 hienoneminen eli rakeisuuden muutos 2–32 mm lajitteessa.	56

TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1.	Jätteenkäsittelymenetelmien sijoittuminen jätehierarkian tasoille, soveltuvat jätteenkäsittelymenetelmät ja EU:n jätteenkäsittelytavoitteet puolivuosisikymmenittäin. (Euroopan komissio, 1999, 2008; Eurostat, 2023)	4
Taulukko 2.	Vaahtokuonareseptien suunniteltu ainesosajakauma. (Wigren, 2022)	32
Taulukko 3.	Vaahtokuonareseptien toteutuneet ainesosajakaumat. (Wigren, 2022)	33
Taulukko 4.	Vaahtokuonamurske-erille VK114 ja VK124 toteutetut laboratoriotestit, sovelletut testistandardit ja tutkittu lajite.	36
Taulukko 5.	Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 kuivavirtotiheydet p_d	38
Taulukko 6.	Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 kiintotiheydet ja vedenimeytymisen arvot, jossa p_a on näennäinen kiintotiheys, p_{rd} on uunikuivattu kiintotiheys, p_{ssd} on kyllästetty ja uunikuivattu kiintotiheys ja W_A on vedenimeytyminen massaprosentteina.....	44
Taulukko 7.	Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 hygroskooppinen vedenimukyky w_{hyg} ja sen avulla määritetty vedenimeytymiskorkeus h_{kap}	46
Taulukko 8.	Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 vedenläpäisevyys k ja kokoonpuristuvuus C erilaisilla tiheyden ρ ja lisäkuormituksen p arvoilla.	48
Taulukko 9.	FOX304-mittalaitteella määritetyt vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 lämmönjohtavuuden arvot. λ on lämmönjohtavuus, Φ on kosteusolosuhteet, T_A on alalevyn lämpötila, T_Y on ylälevyn lämpötila ja ΔT lämpötilaero.	49
Taulukko 10.	Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 jäädytys-sulatuskokeessa määritetyt massanmenetykset FL	51
Taulukko 11.	Syklisistä kolmiakσιαalikokeista määritetyt materiaaliparametrit eli moduuliluku k_1 ja jännitysekspONENTTI k_2 sekä jäykkyysmoduuli M_r pääjännitysten summilla 100 kPa ja 200 kPa.	53
Taulukko 12.	Staattisista kolmiakσιαalikokeista vaahtokuonamurske-erille VK114 ja VK124 määritetyt lujuusparametrit eli kitkakulma ϕ ja koheesio c sekä kasakitkakulma ϕ_k eri sellipaineiden σ_3 arvoilla.	54
Taulukko 13.	Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 kokoonpuristuvuus C tiivistettäessä sekä puristuslujuus CS muodonmuutostasoilla 2 % ja 10 %.....	55
Taulukko 14.	Vaahtokuonamurskeen raaka-aineista ja vaahtokuonamurske-eristä määritetyt kokonaispitoisuudet.	57
Taulukko 15.	Vaahtokuonamurskeen raaka-aineista ja vaahtokuonamurske-eristä eri ikäisinä määritetyt liukoisuudet. Tummanharmaa väri ilmaisee vähintään yhden MARA-asetuksen (843/2017) mukaisen käyttökohteen raja-arvon ylityksen.	59
Taulukko 16.	Yhteen veto vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 sekä vertailumateriaalien Foamit-vahtolasimurskeen (Forsman et al., 2012; Köylijärvi, 2013; Uusioaines Oy, 2023), Leca-kevytsoran (Pöysti, 2023a, 2023b; Saint-Gobain, 2019), Fill-R-tuhkarakeen (Rakennustietosäätiö, 2016) ja Gravo keinokiviaineksen (Österbacka, 2022b; Söderholm, 2020) materiaaliominaisuuksista.	60
Taulukko 17.	Tulosten luotettavuus ja niihin vaikuttaneet tekijät yksittäisissä testeissä.....	66
Taulukko 18.	Jatkotutkimusvaiheessa koerakenteesta määritettävät ominaisuudet ja niiden määrittäminen menetelmät.....	69

MERKINNÄT

A	pinta-ala [m^2]
a_i	lämmöneristeen vastaavuuskerroin hiekkaan verrattuna
C	kokoonpuristuvuus [%]
C_u	raekokosuhde
CS	puristuslujuus [MPa]
c	koheesio [kPa]
d	koekappaleen paksuus [m]
d_{10}	raekoko seulojen läpäisy-%:lla 10 [mm]
d_{50}	keskiraekoko [mm]
d_{60}	raekoko seulojen läpäisy-%:lla 60 [mm]
FL	massanmenetys jäädytys-sulatusrasituksessa [%]
H	hydraulinen painekorkeus [m]
h	korkeus [m]
h_{kap}	kapillaarinen vedenimeytymiskorkeus [mm]
k	vedenläpäisevyys [m/s]
k_1	moduuliluku
k_2	jännitysekspONENTTI
M_r	resilient-moduuli, jäykkyysmoduuli [MPa]
m	massa [g]
m_d	kuivairtomassa [g]
p	lisäkuormitus, paine [bar]
Q	tilavuusvirta, virtaama [m^3]
q	lämpövirran tiheys [W/m^2]
T	lämpötila [$^{\circ}C$]
t	aika [s]
V	tilavuus [m^3]
WA	vedenimeytyminen [$massa - \%$]
w_{hyg}	maksimaalinen hygroskooppinen vedenimukyky [%]
ΔT	lämpötilaero [K]
θ	pääjännitysten summa [kPa]
θ_0	jännitysten vertailuluku [$100 kPa$]
λ	lämmönjohtavuus [$W/m \cdot K$]
ρ	tiheys [Mg/m^3]
ρ_a	näennäinen kiintotiheys [Mg/m^3]
ρ_d	kuivairtotiheys [Mg/m^3]
ρ_{rd}	uunikuivattu kiintotiheys [Mg/m^3]
ρ_{ssd}	kyllästetty ja pintakuivattu kiintotiheys [Mg/m^3]
σ	normaalijännitys [kPa]
σ^1	suurin pääjännitys, pystysuora pääjännitys [kPa]
σ^3	pienin pääjännitys, sellipaine [kPa]
τ_f	leikkauslujuus [kPa]
ϕ	kosteusolosuhteet [% RH]
φ	kitkakulma, leikkauskestävyyskulma [$^{\circ}$]
φ_k	kasakitkakulma [$^{\circ}$]

LYHENTEET

ASR	Alkali-silikaattireaktio
CA	<i>engl. Calcium Aluminate</i> , (kalsium)aluminaatti
CE	<i>ransk. Conformité Européenne</i> , eurooppalainen suoritustasomerkintä
CEWEP	<i>engl. Confederation of European Waste-to-Energy Plants</i> , eurooppalaisia jätteestä energiaa tuottavia voimalaitoksia edustava kattojärjestö
CFA	<i>engl. Continuous Flow Analyzer</i> , jatkuvan virtauksen analysaattori
CSA	<i>engl. Calcium Sulfoaluminate</i> , kalsiumsulfoaluminaatti
CV-AAS	<i>engl. Cold Vapor Atomic Absorption Spectrometry</i> , kylmähöyryatomiabsorptiospektrometria
DOC	<i>engl. Dissolved Organic Carbon</i> , liuennut orgaaninen hiili
EU	Euroopan Unioni
Fe	<i>engl. Ferrous</i> , rautametalli
ICP-OES	<i>engl. Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy</i> , induktiivisesti kytketty plasman optinen emissiospektroskopia
L/S	<i>engl. Liquid-solid</i> , nesteen ja kiintoaineiden välinen suhde
MARA	Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa (843/2017)
MOC	<i>engl. Magnesium Oxychloride</i> , magnesiumoksikloridi
MOS	<i>engl. Magnesium Oxysulfate</i> , magnesiumoksisulfaatti
MP	<i>engl. Magnesium Phosphate</i> , magnesiumfosfaatti
NFe	<i>engl. Non-Ferrous</i> , ei-rautametalli
NPOC	<i>engl. Non-purgeable Organic Carbon</i> , haihtumaton orgaaninen hiili
pH	<i>engl. potential of Hydrogen</i> , happamuusaste
Redox	<i>engl. Oxidation Reduction</i> , hapettumis-pelkistymispotentiaali
RH	<i>engl. Relative Humidity</i> , suhteellinen ilmankosteus
TDS	<i>engl. Total Dissolved Solids</i> , liuenneiden kiintoaineiden kokonaismäärä
TOC	<i>engl. Total Organic Carbon</i> , orgaaninen kokonaishiili
WFD	<i>engl. Waste Framework Directive</i> , jätepuitedirektiivi

KÄSITTEET

Alkali-aktivoitu materiaali	Kiinteästä tai nestemäisestä alkalimetallien lähteestä ja kiinteästä silikaattipitoisesta aineesta valmistettu sementinkaltainen sideaine
Alkalimetalli	Jaksollisen järjestelmän ensimmäiseen pääryhmään kuuluva alkuaine
Devolatilisaatio	Haihtuvien aineiden poistuminen aineesta
Geopolymeeri	Alkaliaktivoitu materiaali, jossa sitoutuminen on tarkoin koordinoitu ja tapahtuu lähes yksinomaan aluminaattisilikaattipitoiselle aineelle
Huokosbetoni	Kevytbetonien alalaji, jolle ominainen rakenne tuotetaan keinotekoisien huokosten avulla
Hydrataatio	Sementin mineraalien ja veden välinen reaktio, jonka vaikutuksesta pastamainen seos kovettuu
Hygroskooppinen vedenimukyky	Materiaalin kosteuspitoisuus suljetussa säiliössä juuri alle 100 % suhteellisessa kosteudessa
Jäte	Mikä tahansa aine tai esine, jonka sen haltija on heittänyt pois, on aikeissa heittää tai määrätty heittämään pois
Kaasutus	Kiinteän aineen muuttuminen kaasumaiseksi osittaisen hapettumisen seurauksena
Karbonaatio	Kemiallinen reaktio, jossa hiilidioksidi reagoi alkalisten materiaalien kanssa muodostaen karbonaatteja
Kevytkiviaines	Mineraalista alkuperää oleva materiaali, jonka kiintotiheys on pienempi kuin 2000 kg/m ³ tai kuivairtitiheys pienempi kuin 1200 kg/m ³
Klinkkeri	Ennalta määritetystä raaka-aineseoksesta sintraamalla valmistettu mineraalipaakku
Laboratorionäyte	Laboratoriotestaukseen tarkoitettu näyte
Lentotuhka	Savukaasuista erotettava tuhka- ja
Pohjakuona	Palotilan pohjalle kerääntyvä tuhka- ja
Poltto	Palaminen hapettavissa olosuhteissa
Pozzolaani	Silikaateista tai aluminaattisilikaateista koostuvia aineita, jotka muodostavat hydraulissa olosuhteissa kalsiumhydroksidin kanssa lujuutta kehittäviä yhdisteitä
Pyrolyysi	Lämpöhajoaminen hapettomissa olosuhteissa
Sementti	Epäorgaaninen hydraulinen sideaine, joka veteen sekoitettuna sitoutuu ja kovettuu hydrataatioreaktioiden seurauksena
Sintraus	Valmistusmenetelmä, jossa materiaalipartikkelit liitetään toisiinsa korkeassa lämpötilassa
Suhteittaminen	Ainesosien keskinäisten suhteiden valitseminen
Testinäyte	Yhteen testiin käytettävä näyte
Vaahotbetoni	Huokosbetoni, jota valmistetaan vaahdotuvalla vaahdotusaineella
Yhdyskuntajäte	Kotitalouksissa syntyvä ja tuotannossa kertyvä kotitalousjätteisiin verrannollinen jäte
Yksittäistestinäyte	Yhteen määrittämiseen käytettävä näyte silloin, kun testimenetelmä edellyttää useamman kuin yhden määrittämisen

1. JOHDANTO

Tässä diplomityössä tutkitaan yhdyskuntajätteen polton pohjakuonasta valmistettua keinote-koista kevytkiviainesta ja sen käyttöpotentiaalia infrarakentamisessa. Tutkimus on osa Business Finlandin rahoittamaa MIMEPRO-hanketta, jonka tavoitteena on edistää epäorgaanisten jätteiden ja sivuvirtojen hyötykäyttöä ja kaupallistamista. Tässä luvussa esitellään tutkimuksen tausta, työn tavoitteet ja tutkimuskysymykset sekä tutkimuksen toteutus ja työssä käytetyt rajaukset.

1.1 Tutkimuksen tausta

Yhdyskunnan toiminnoissa syntyy paljon jätettä, jonka määrän odotetaan yhä kasvavan. Eräs modernin jätehuollon peruspilareista on yhdyskuntajätteen poltto, jonka jäännöstuotteena syntyy yhdyskuntajätteen polton pohjakuonaa. Pohjakuonaa voidaan käyttää toissijaisena raaka-aineena, mutta se vaatii aina käsittelyä. Käsittelyn yhteydessä pyritään palauttamaan mahdollisimman paljon sen sisältämiä arvokkaita raaka-aineita, kuten metalleja, takaisin kiertoon.

Tavanomaisilla käsittelyprosesseilla saadaan otettua talteen korkeintaan vain noin 80 % pohjakuonan sisältämistä arvokkaista ei-rautametalleista (NFe). Suurimpana haasteena on metallien pinnalle kiinnittyvä mineraalinen aines, joka häiritsee talteenottoprosesseja. Fortum Waste Solutions Oy on kehittänyt murskausmenetelmän, jonka avulla metallit saadaan erotettua mineraaleista ja kasvatettua NFe-metallien saanti jopa 99 %:iin. Menetelmän haittapuolena on, että sen seurauksena hienorakeisen pohjakuonalajitteen osuus käsitellyssä yhdyskuntajätteen polton pohjakuonassa kasvaa.

Käsittelystä yhdyskuntajätteen polton pohjakuonasta voidaan suhteittamalla valmistaa maarakentamiseen soveltuvia keinotekoisia kiviaineita. Fortum on hiljattain tuotteistanut CE-merkityn *Gravo*[®]-keinokiviainestuteperheen, johon kuuluvat 0–2 mm ja 0–16 mm suodatinkerroksen keinotekoiset kiviainekset sekä 0–32 mm jakavan kerroksen keinotekoinen kiviaines. Uuden murskausprosessin myötä hienorakeista pohjakuonalajitetta muodostuu kuitenkin niin paljon, että kaikkea sitä ei pystytä hyödyntämään *Gravo*[®]-keinokiviainestuotteiden raaka-aineena.

Hienorakeiselle yhdyskuntajätteen polton pohjakuonalle kehitettiinkin täysin uudenlainen hyötykäyttökohde keinotekoisena kevytkiviaineksen, vaahtokuonamurskeen, raaka-aineena. Vaahtokuonamursketta valmistetaan vaahtobetonireseptillä, jossa täyteaineena käytetään hiekan sijasta hienorakeista yhdyskuntajätteen polton pohjakuonaa. Haitallisia ympäristövaikutuksia on pienennetty korvaamalla puolet sideaineena käytettävästä sementistä energiatuotannon lento-

tuhkalla. Samalla saavutetaan merkittäviä säästöjä valmistuskustannuksissa. Vaahtokuonamurskeen valmistusprosessin energiankulutus on pienempi kuin perinteisesti sintraamalla valmistettavien keinotekoisien kevytkiviainesten.

1.2 Tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Työn tavoitteena on määrittää yhdyskuntajätteen polton pohjakuonasta valmistetun keinotekoisen kevytkiviainesmurskeen teknis-mekaaniset ja kemialliset ominaisuudet, joiden perusteella voidaan arvioida materiaalin suorituskykyä ja soveltuvuutta erilaisiin infrarakentamisen käyttökohteisiin. Lisäksi tavoitteena on selvittää mahdollisten jatkotutkimusten tarve.

Tutkimuskysymykset:

TK1: Millaiset teknis-mekaaniset perusominaisuudet jätteenpolton pohjakuonasta valmistetulla kevytkiviainesmurskeella on?

TK2: Miten ympäristökelpoisuus eli vaahtokuonamurskeen raaka-aineiden potentiaalisesti haitallisten aineiden liukoisuusominaisuudet (mg/kg, L/S 8+2) muuttuvat valmistusprosessissa?

TK3: Millaisiin infrarakentamisen käyttökohteisiin yhdyskuntajätteen polton pohjakuonasta valmistettu kevytkiviainesmurske soveltuu?

1.3 Tutkimuksen toteutus ja rajaukset

Tutkimus koostuu kirjallisuuskatsauksesta ja kokeellisesta osiosta. Kirjallisuuskatsauksessa aineistoa kerätään sähköisistä ja painetuista lähteistä, kuten tieteellisistä julkaisuista, suunniteluohjeista, standardeista, opinnäytetöistä, tutkimusraporteista ja muusta alan kirjallisuudesta. Aineiston perusteella selvitetään kevytkiviainesten tärkeimmät materiaaliominaisuudet ja potentiaaliset infrarakentamisen käyttökohteet.

Kokeellisessa osiossa vaahtokuonamurskeelle tehdään laboratoriokokeita, joilla tutkitaan materiaalin teknis-mekaanisia ja kemiallisia ominaisuuksia sekä niiden muuttumista. Laboratoriotestauksessa saatavia tuloksia verrataan yleisimpien Suomessa käytettävien kaupallisten kevytkiviainesten ominaisuuksiin sekä potentiaalisten infrarakentamisen käyttökohteiden vaatimuksiin.

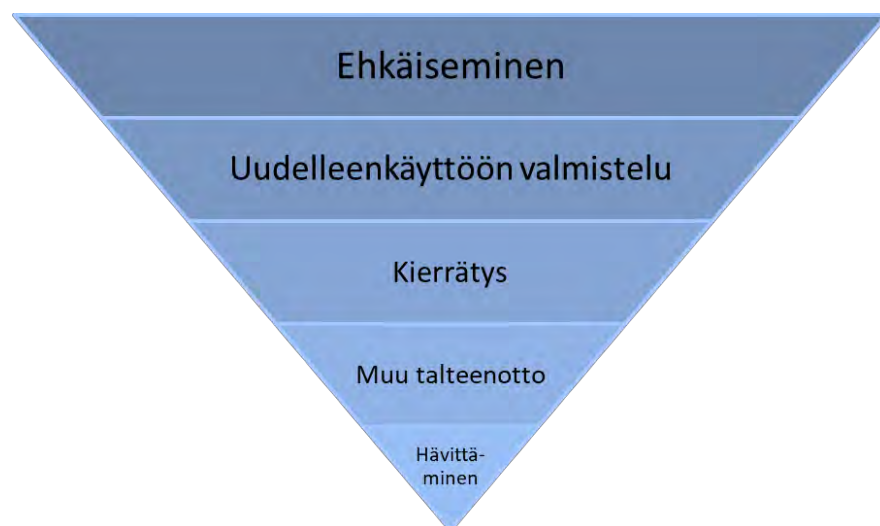
Työssä tutkitaan arinakäyttöisessä polttolaitoksessa muodostuvan yhdyskuntajätteen polton pohjakuonan käyttöä keinotekoisena kevytkiviaineksen raaka-aineena. Kevytkiviainesten osalta painopiste on keinotekoisissa kevytkiviaineksissa, joiden ulkopuolelle rajautuvat luonnolliset kevytkiviainekset. Huokosbetonin osalta tarkastellaan pääasiallisesti vaahtobetonina, jollaista myös työssä tutkittava vaahtokuonamurske edustaa. Tutkittaviksi materiaaliominaisuuksiksi valitaan kirjallisuuden perusteella tärkeimmät kevytkiviaineksen materiaaliominaisuudet, mutta valinnassa otetaan huomioon myös potentiaaliset käyttökohteet.

2. YHDYSKUNTAJÄTTEEN POLTON POHJAKUONAN SYNTYPROSESSI

Yhdyskuntajätteen polton jäännöstuotteena syntyy yhdyskuntajätteen polton pohjakuonaa. Tämä luku käsittelee yhdyskuntajätteen polton pohjakuonan syntyprosessia ja sen ominaisuuksia. Aluksi käsitellään jätteiden muodostumista ja jätteenkäsittelymenetelmiä. Tämän jälkeen esitellään jätteiden termisen käsittelyn menetelmät, joista keskitytään tarkemmin polttoon ja palamisprosessiin. Lopuksi käydään läpi yhdyskuntajätteen polton pohjakuonan ominaisuudet ja käsittelymenetelmät yleisesti sekä tarkemmin Suomen osalta.

2.1 Jätteen muodostuminen ja jätteenkäsittelymenetelmät

Euroopan unionin (EU) ympäristöpolitiikan keskeisiä osia ovat ympäristön huomioon ottava jätehuolto ja uusiomateriaalien hyödyntäminen. Ympäristöpolitiikkaan linkittyvän jättepolitiikan tavoitteena on suojella ihmisten terveyttä ja ympäristöä sekä edistää EU:n siirtymää kiertotalouteen. Jättepolitiikan oikeudellisen viitekehyksen muodostaa jättepuitedirektiivi (WFD), joka määrittää jättehuollon perusperiaatteet. (Euroopan komissio, 2023a) WFD:n päämäärä on kaksiosainen: jätteiden muodostumisen ja käsittelyn haitallisten vaikutusten pienentäminen sekä resurssitehokkuuden parantaminen. Jätteellä tarkoitetaan mitä tahansa ainetta tai esinettä, jonka tämän haltija on heittänyt pois, on aikeissa heittää tai määrätty heittämään pois (Euroopan komissio, 2008). Perustan WFD:lle muodostaa kuvassa 1 esitetty jättehierarkia, jonka päämääränä on tuottaa ympäristön kannalta paras mahdollinen lopputulos (Euroopan komissio, 2008, 2023b).



Kuva 1. Jätehuollon etusijajärjestystä kuvaavan jättehierarkian tasot. Muokattu lähteestä (Euroopan komissio, 2023b)

Ensisijaisesti tulisi pyrkiä ehkäisemään jätteen syntyä. Tällä tarkoitetaan kaikkia materiaaleille, aineille ja tuotteille ennen jätestatuksen saavuttamista tehtäviä toimenpiteitä, jotka ovat omiaan vähentämään muodostuvan jätteen määrää, haitallisten aineiden määrää tuotteissa ja materiaaleissa sekä muodostuvan jätteen haitallisia vaikutuksia ihmisille ja ympäristölle. Yleisin keino pienentää muodostuvan jätteen määrää on esimerkiksi tuotteiden eliniän pidentäminen tai tuotteiden käyttäminen uudelleen. (Euroopan komissio, 2008)

Jätteeksi muodostumisen jälkeen ensisijaisena tavoitteena on talteenotto, millä tarkoitetaan toimenpiteitä, joiden pääasiallisena tarkoituksena on jätteen hyötykäyttö muiden aineiden, materiaalien tai tuotteiden korvikkeena tai jätteen valmistelu tällaiseen tarkoitukseen. Talteenotto pitää sisällään uudelleenkäytön valmistelun, kierrätyksen ja muun talteenoton. Talteenotossa pyritään aluksi valmistelevaan jäte uudelleenkäyttöä varten, mikä kattaa kaikki tarkistamiseen, puhdistamiseen ja korjaamiseen liittyvät toimenpiteet, joiden seurauksena jätestatuksen saaneet tuotteet tai tuotteiden osat voidaan käyttää uudelleen ilman lisäkäsittelyä. Mikäli materiaalia, ainetta tai tuotetta ei pystytä valmistelevaan uudelleenkäyttöä varten, pyritään se kierrättämään mahdollisimman hyvin. Kierrättämisellä tarkoitetaan mitä tahansa toimenpidettä, jossa jäte jatkojalostetaan materiaaliksi, aineeksi tai tuotteeksi sen alkuperäistä tai muuta käyttötarkoitusta varten. Näiden jälkeen voidaan pyrkiä muuhun talteenottoon, mikä pitää sisällään kaiken muun edellä mainittuihin kuulumattoman jätteen hyötykäytön, kuten jätteiden energiahyödyntämisen. Huonoin vaihtoehto on jätteen hävittäminen, jolla tarkoitetaan kaikkia jätteenkäsittelyn toimenpiteitä, jotka eivät ole talteenottoa. Hävittämiseen päädytään yleensä silloin, kun talteenotto ei ole mahdollista, ja sen tavoitteena on ainoastaan päästä jätteestä eroon. (Euroopan komissio, 2008)

Jätteenkäsittely voidaan jakaa neljään menetelmään: kierrätys, kompostointi, polttaminen ja kaatopaikkasijoitus (Eurostat, 2023). Päämääriensä saavuttamisen tueksi EU on asettanut jäsenmailleen jätteenkäsittelyn tavoitteita. Uudelleenkäyttöön valmistelun ja kierrätyksen osuus muodostuvan jätteen kokonaismassasta tulisi olla vuoteen 2025 mennessä vähintään 55 %, vuoteen 2030 mennessä vähintään 60 % ja vuoteen 2035 mennessä vähintään 65 % (Euroopan komissio, 2008). Kaatopaikkasijoittamisen osuuden taas tulisi olla alle 10 % muodostuvan jätteen kokonaismassasta vuoteen 2035 mennessä (Euroopan komissio, 1999). Taulukossa 1 on esitetty jätteenkäsittelymenetelmien sijoittuminen jätehierarkian tasoille ja EU:n tavoitearvot kunkin menetelmän osalta (Eurostat, 2023).

Taulukko 1. Jätteenkäsittelymenetelmien sijoittuminen jätehierarkian tasoille, soveltuvat jätteenkäsittelymenetelmät ja EU:n jätteenkäsittelytavoitteet puolivuosisikymmenittäin. (Euroopan komissio, 1999, 2008; Eurostat, 2023)

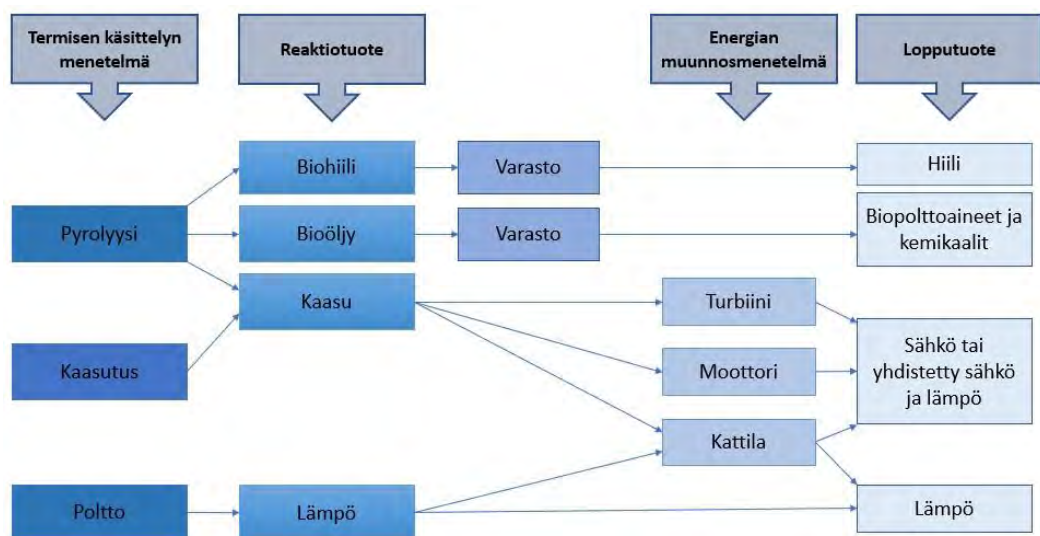
Status	Jätehierarkian taso	Jätteenkäsittelymenetelmä	EU-tavoite (m-%)		
			2025	2030	2035
Ei jätettä	Ehkäiseminen	-	-		
Jätettä	Uudelleenkäyttöön valmistelu	Kierrätys (Tuote tai tuotteen osa)	≥ 55	≥ 60	≥ 65
	Kierrätys	Kierrätys (Materiaali, aine, tuote)			
		Kompostointi (Biojäte)			
	Muu talteenotto	Jätteenpoltto (Energian talteenotto)	-		
	Hävittäminen	Jätteenpoltto (Ei energian talteenottoa)	-		
		Kaatopaikkasijoittaminen	-	-	< 10

Vuonna 2019 Euroopan jätevoimaloiden operaattoreiden kattojärjestö (CEWEP) kehitti laskentatyökalun, jolla pyrittiin arvioimaan jätemäärien jakautumista eri jätteenkäsittelymenetelmien välillä. Lähtötietoina käytettiin saatavilla olevaa tilastodataa ja taulukon 1 mukaisia kunnianhimoisia jätteenkäsittelytavoitteita. Vertaisarvioidut tulokset osoittivat, että vuonna 2035 EU:n jätteenpolton kapasiteetin tarve on noin 142 Mt vaikka kunnianhimoiset kierrätystavoitteet toteutuisivatkin. Vuonna 2017 EU:n vastaava jätteenpolton kapasiteetti oli vain noin 101 Mt (CEWEP, 2019). Tämä tarkoittaisi merkittävää kasvua jätteenpolton ja sen jäännöstuotteiden osalta.

2.2 Jätteiden terminen käsittely

Termisellä käsittelyllä tarkoitetaan korkeassa lämpötilassa tapahtuvia termokemiallisia muunnosprosesseja, jotka muuttavat käsiteltävän materiaalin fysikaalista ja kemiallista rakennetta (Al-Ghouti et al., 2021). Tehokkaamman käsittelykyvyn ja paremman energian muunnosnopeuden ansiosta terminen käsittely on saavuttanut suosiota jätehuollossa muihin käsittelymenetelmiin verrattuna. Terminen käsittely soveltuu monen tyyppiselle jätteelle, mutta erityisesti lajittelemattomalle sekajätteelle, jota ei taloudellisten ja ympäristöllisten näkökulmien vuoksi voida järkevästi kierrättää. (Arena, 2012)

Termisen käsittelyn etuihin kuuluu, että sen avulla voidaan vähentää kasvihuonekaasupäästöjä, tehdä vaarattomiksi tai tuhota haitta-aineita ja palauttaa kierrätyskelpoisia materiaaleja, kuten metalleja, hyötykäyttöön. Termisellä käsittelyllä voidaan pienentää jätteen massaa noin 70–80 % ja tilavuutta noin 80–90 % alkuperäiseen verrattuna. Jätteen tilavuuden pieneneminen säästää samalla tilaa muuhun maankäyttöön. Lisäksi termokemiallisissa prosesseissa jätteen sisältämä energia voidaan hyödyntää esimerkiksi sähkönä ja lämpönä. Pääasiallisia termokemiallisia prosesseja ovat pyrolyysi, kaasutus ja poltto. (Arena, 2012) Kuvassa 2 on esitetty pääasialliset termokemialliset muunnosprosessit ja niiden reaktiotuotteet.



Kuva 2. Jätteiden termisen käsittelyn menetelmät, reaktiotuotteet, energian muunnosmenetelmät ja lopputuotteet. Muokattu lähteestä (Bridgwater, 2012)

Pyrolyysi on lämpöhajoamista hapettomissa olosuhteissa, ja sen pääasiallisina reaktiotuotteina syntyy kaasuja, öljyä ja hiiltä, joiden suhteellisiin osuuksiin voidaan vaikuttaa prosessiparametrejä säätämällä (Bridgwater, 2012). Pyrolyysin tavoitteena on yleensä maksimoida kiinteän jätteen hajoaminen kaasuiksi ja nestemäisiksi faaseiksi (Arena, 2012). Päästöjen näkökulmasta pyrolyysia pidetään termisen käsittelyn menetelmistä ympäristöystävällisimpänä vaihtoehtona (Sipra et al., 2018). Jätteiden heterogeenisen luonteen vuoksi yhdyskuntajätteestä pyrolyysin avulla tuotettu hiili, kaasut ja öljyt eivät kuitenkaan useinkaan täytä tavanomaisten polttoaineiden ja tuotteiden standardeja. Tämän vuoksi pyrolyysin reaktiotuotteita voidaan yleensä hyödyntää vain suorassa energiantuotannossa. Kaupalliset pyrolyysilaitokset toimivat usein kaasutus- ja/tai polttolaitosten yhteydessä, ja pyrolyysia hyödyntävät teknologiat vaativat aina jätteiden esikäsittelyä, kuten erottelua, pienentämistä ja kuivaamista. (Chen et al., 2014)

Kaasutuksessa kiinteä polttoaine, joka voi olla esimerkiksi jätettä, muutetaan kaasumaiseksi polttoaineeksi osittaisen hapettumisen avulla (Lombardi et al., 2015). Kaasutuksen tavoitteena on muuttaa jäte korkean lämpöarvon omaaviksi kaasuiksi, kuten hiilimonoksidiksi, vedyksi ja metaaniksi. Polttoon verrattuna kaasutuksen etuihin lukeutuvat muun muassa pienemmät päästöt ja suurempi energian muuntotehokkuus. (Arena, 2012) Pyrolyysin tavoin kaasutuksen suurimpana haittapuolena jätteenpoltossa on kaasujen saastuminen ei-toivotuilla reaktiotuotteilla, kuten pienhiukkasilla, tervalla, alkalimetalleilla, klorideilla ja sulfaateilla. Kaasutus vaatii yleensä myös jätteiden esikäsittelyä. (Lombardi et al., 2015) Muita haittapuolia ovat kaasujen siirtokustannukset ja menetelmän edellyttämä monimutkaisempi kaasujen puhdistusprosessi (Sipra et al., 2018). Kaasutuslaitokset toimivat usein pyrolyysi- ja/tai polttolaitosten yhteydessä (Malkow, 2004).

Poltto tapahtuu hapettavissa olosuhteissa eli tilassa, jossa on usein ylimääräistä happea saatavilla, ja siinä pyritään polttoaineen sisältämien alkuaineiden täydelliseen hapettumiseen (Lombardi et al., 2015). Polton tavoitteena on yleensä maksimoida jätteen muuntaminen korkean lämpötilan savukaasuiksi, joita voidaan hyödyntää energiantuotannossa (Arena, 2012). Polton merkittävin etu on sen soveltuvuus monentyyppiselle jätteelle, kuten lajittelemattomalle, käsittelemättömälle ja vaaralliselle jätteelle (Lombardi et al., 2015). Muita etuja ovat muun muassa menetelmän skaalautuvuus suureen mittakaavaan sekä pitkälle kehittynyt teknologia. Jätteenpolton haittapuolena on sen seurauksena syntyvät haitalliset päästöt ja jäännöstuotteet. (Al-Ghouthi et al., 2021)

2.3 Jätteenpolton menetelmät

Jätteenpolto on yleisin terminen jätteenkäsittelymenetelmä (Lombardi et al., 2015). Yhdyskuntajätteen poltossa on yleisesti käytössä kolme menetelmää, joita ovat arina-, leijupeti- ja rumpu-uunipolto. Menetelmät soveltuvat hieman erityyppisille jätteille ja jätemäärille.

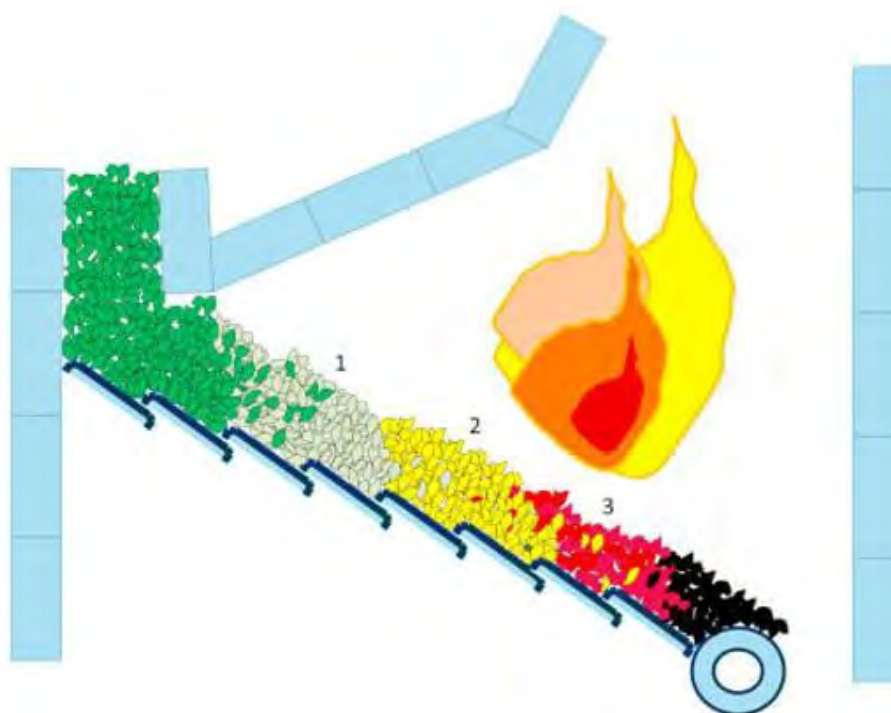
Arinapoltto on laajassa käytössä oleva teknologia lajittelemattoman yhdyskuntajätteen poltossa. Euroopassa jätteiden termisen käsittelyn laitoksista noin 90 % on arinatoimisia. (Neuwahl et al., 2019, p. 37) Menetelmän suosio johtuu sen yksinkertaisuudesta ja luotettavuudesta (Klinghoffer & Castaldi, 2013). Arinapoltossa jäte syötetään kahmarin ja hydraulisten työntimien avulla arinalle, jossa palaminen alkaa. Jätteestä vapautuvat kaasut sekoittuvat ja palavat korkeassa lämpötilassa arinan yläpuolella. Syötettävän ilman määrää säätämällä voidaan ohjata polttoa. Jäte sekoitetaan mekaanisilla sekoittimilla, tärytyksellä, pyörivillä rullilla tai kääntyvillä ja työntyvillä arinan pintakappaleilla. (Vesanto et al., 2006, pp. 30–31)

Rumpu-uuni on loivasti vinoon asennettu hitaasti oman akselinsa ympäri pyörivä pitkä sylinterin muotoinen rumpu, jonka yläpäähän jäte ja palamisilma syötetään. Pyörimisliikkeen ja rummun kallistuskulman ansiosta jäte etenee ja sekoittuu rummussa tehokkaasti. (Vesanto et al., 2006, pp. 34–35) Rumpu-uunit ovat todella kestäviä, joten niitä voidaan käyttää hyvin korkeissa, jopa 1450 celsiusasteen, lämpötiloissa. Rumpu-uunien merkittävin etu on, että ne soveltuvat melkein minkä tahansa jätteen käsittelyyn. Erityisen laajassa käytössä rumpu-uunit ovat vaarallisen jätteen käsittelyssä. (Neuwahl et al., 2019, pp. 47–50)

Leijupetiuunissa ylöspäin suuntautuva ilmavirta sekoittaa polttoaineen ja reagoimattoman materiaalin, kuten hiekan, palotilassa kerrokseksi, jossa palamisprosessin vaiheet tapahtuvat. Hyvä sekoittuminen takaa tasaisen lämpötilan ja happipitoisuuden, mikä varmistaa vakaan prosessin. Leijupeti soveltuu parhaiten homogeeniselle polttoaineelle, joten sitä käytetään laajemmin lähinnä hienojakoisen jätteen, kuten puhdistamolietteen, poltossa. Heterogeeninen jäte, kuten yhdyskuntajäte, vaatii lajittelua ja esikäsittelyä soveltuakseen tälle menetelmälle. Suhteellisen korkeiden esikäsittelykustannusten vuoksi leijupetiuunit eivät ole jätteenkäsittelyn osalta yleisiä suuren mittakaavan kaupallisessa käytössä. (Neuwahl et al., 2019, pp. 51–53)

2.4 Palamisprosessi

Kiinteän jätteen palamisprosessi voidaan jakaa kolmeen vaiheeseen, joita ovat kuivuminen, devolatilisaatio ja jäännöshiilen palaminen. Vaiheet voivat tapahtua joko peräkkäin tai samanaikaisesti. Suurilla polttoainehiukkasilla vaiheet tapahtuvat usein samanaikaisesti. Kiinteän polttoaineen palamisnopeuteen vaikuttavat polttoaineen fysikaaliset, kemialliset ja rakenteelliset ominaisuudet. Oleellisia rakenteellisia ominaisuuksia ovat hiukkaskoko, tiheys ja huokoisuus. Kemiallisia ominaisuuksia puolestaan ovat reaktiivisuus, lämpöarvo sekä pyrolysoitumislämpö ja fysikaalisia ominaisuuksia ominaislämpö ja lämmönjohtavuus. Palamisnopeuteen vaikuttavat olennaisesti myös kemiallinen kinematiikka sekä lämmön- ja aineensiirto. Palamisen edellytyksenä on riittävä määrä polttoainetta ja happea sekä riittävän korkea lämpötila. (Raiko, 1995, p. 139) Palamisprosessin vaiheet arinakattilassa on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. *Palamisprosessin vaiheet arinapoltossa: 1) kuivuminen, 2) devolatilisaatio ja 3) jännöshiilen palaminen. Muokattu lähteestä (Vakkilainen, 2016, p. 209)*

Palamisprosessi alkaa, kun polttoainetta syötetään prosessiin. Kuivumisvaiheessa polttoainehiukkanen alkaa vastaanottaa lämpöä ympäristöstään, minkä seurauksena sen lämpötila kasvaa. Lämpötilan kasvaessa hiukkasen sisältämä vesi höyrystyy ja poistuu huokosten kautta, jolloin kostean ytimen koko pienenee. Kuivumisvaihe etenee tyypillisesti sitä nopeammin, mitä nopeammin lämpöä siirtyy hiukkasiin. (Vakkilainen, 2016, pp. 32–33). Kuivumisvaiheelle tunnusomaista on veden purkautuminen vesihöyrynä polttoainehiukkasista, mikä osaltaan hidastaa lämpötilan kasvua (Ragland, 2011, p. 363; Vakkilainen, 2016, p. 33).

Matalan aktivaatioenergian reaktiot alkavat, kun lämpötila polttoainehiukkasessa kasvaa entisestään. Tätä vaihetta kutsutaan devolatilisaatioksi eli haihtuvien aineiden poistumiseksi, ja sen reaktiotuotteina syntyy tervaa ja kevyitä kaasuja, kuten hiilimonoksidia, hiilidioksidia, metaania ja vetyä. Happipitoisissa olosuhteissa devolatilisaation alkamiselle tunnusomaista on näkyvien liekkien ilmestyminen, kun haihtuvat kaasut syttyvät palamaan. Koska devolatilisaatio johtuu lämpötilan noususta, sitä tapahtuu myös hapettomissa olosuhteissa. Reaktionopeus on usein niin suuri, että purkautuvien kaasujen virtaus estää ulkoista happea pääsemästä polttoainehiukkasen pinnalle, jolloin olosuhteet hiukkasen sisällä muistuttavat pyrolyysia. Pyrolyysilla tarkoitetaan kemiallista reaktiota, jossa kiinteä aine hajoaa kuumennuksen seurauksena siten, että happi ei pääse vaikuttamaan prosessiin. Devolatilisaation aikana hiukkasen massa pienenee ja huokoisuus kasvaa. Devolatilisaation jälkeen jäljelle jäävää kiinteää ainetta kutsutaan jännöshiileksi. (Vakkilainen, 2016, pp. 33–36)

Viimeinen vaihe eli jäännöshiilen palaminen alkaa, kun haihtuvat aineet ovat poistuneet polttoaineesta. Reaktiot jäännöshiilessä jatkuvat ja polttoainehiukkasen lämpötila kasvaa. Tässä vaiheessa suurin osa polttoainehiukkasen sisältämästä vedystä on reagoinut ja pääasiallisena ainesosana jäljelle jää hiili. Hiili reagoi kahdella tavalla, kaasuuntumalla ja palamalla, joista palamisreaktioita tapahtuu yleensä määrällisesti vähemmän. (Vakkilainen, 2016, pp. 33–36) Palamisen aikana hiili reagoi hapen kanssa muodostaen hiilidioksidia ja -monoksidia. Kaasuuntumisessa hiili reagoi molekyylien, kuten hiilidioksidin, divetymonoksidin ja vedyn kanssa, muodostaen hiilimonoksidia, vetyä ja metaania. (Raiko, 1995, pp. 153–154) Jäännöshiilen palamisvaiheen alkamiselle tunnusomaista on näkyvän liekin sammuminen sekä polttoaineen kellertävänä ja/tai punertavana hehkuva kuuma pinta. Palamisprosessin lopussa jäljelle jäävät reagoimattomat epäorgaaniset jäännöstuotteet. (Vakkilainen, 2016, pp. 33–36)

Jäännöstuotteiden laatu riippuu polttoaineesta, polttoprosessista ja tuhkanerotustekniikasta. Jäännöstuotteiden keräyspaikan perusteella ne voidaan luokitella lento- ja pohjatuhkaksi. Pohjatuhkasta käytetään tässä työssä selkeyden vuoksi nimitystä pohjakuona. Lentotuhka on savu-kaasuista erotettava tuhka- ja, kun taas pohjakuona on palotilan pohjalle kerääntyvä tuhka- ja. (Kiviniemi et al., 2012, p. 8)

2.5 Yhdyskuntajätteen polton pohjakuona

Yhdyskuntajäte on kotitalouksissa syntyvää ja tuotannossa kertyvää kotitalousjätteisiin verrattavaa jätettä. Yhdyskuntajätteen poltossa syntyvä yhdyskuntajätteen polton pohjakuona on kuvan 4 mukaista harmaata huokoista materiaalia, joka koostuu palamattomasta ja reagoimattomasta materiaalista (Dou et al., 2017). Yhdyskuntajätteen polton pohjakuonan pääasiallisia yhdisteitä ovat pii-, kalsium-, rauta- ja alumiiniyhdisteet. Materiaalikoostumukseltaan se sisältää painoprosentteina yleensä 5–15 % rautametalleja (Fe), 1–5 % ei-rautametalleja (NFe), 10–30 % lasia ja keramiikkaa, 50–70 % muita mineraaleja ja 1–5 % palamatonta orgaanista ainesta. (Šyc et al., 2020) Pohjakuonasta liukenee ympäristölle haitallisia aineita, kuten raskasmetalleja sekä orgaanisia ja epäorgaanisia yhdisteitä. (Luo et al., 2019)



Kuva 4. Käsittelemätön (vas.) ja käsitelty (oik.) yhdyskuntajätteen polton pohjakuona. (Österbacka, 2022a)

Pohjakuona sisältää paljon arvokkaita metalleja, joiden talteenotto on energiahyödyntämisen ohella olennainen osa kiertotaloutta. Yhdyskuntajätteen polton pohjakuona onkin Fe- ja NFe-metallien toissijainen lähde. Viime vuosikymmenen aikana metallien talteenotto prosessit ovat kehittyneet valtavasti, minkä lisäksi myös lasin talteenotto on hiljalleen yleistymässä. Pohjakuonaa voidaan käsitellä polttolaitosten yhteydessä tai sen käsittelyyn erikoistuneissa laitoksissa. (Šyc et al., 2020) Pohjakuonan käsittely voidaan jakaa neljään kategoriaan: ikäännyttämiseen, erotteluprosesseihin, kiinteytykseen/stabilointiin ja lämpökäsittelyyn (Lam et al., 2010).

Ennen talteenotto prosesseja pohjakuonaa yleensä ikäännytetään eli säilytetään ilmakehän olosuhteissa noin 1–3 kuukautta. Säilytysaikaa voidaan tarvittaessa pidentää jopa 12 kuukauteen. Ikäänntyminen tapahtuu varastoinnin aikana luonnollisissa olosuhteissa, ja sen avulla pyritään vähentämään haitallisten aineiden liukoisuutta ja saamaan pohjakuonan vesipitoisuus sopivaksi käsittelyä varten. Pieni vesipitoisuus parantaa talteenotto prosessien tehokkuutta, mutta liian pieni vesipitoisuus aiheuttaa pölyämistä. Ikäännyttämisen aikana kemialliset reaktiot, kuten hapettuminen, muuttavat suuren osan metalleista toisiksi yhdisteiksi, joiden liukoisuus voi olla pienempi kuin alkuperäisen aineen. (Šyc et al., 2020)

Erotteluprosessit voidaan jakaa tarkemmin esikäsittely- ja käsittelymenetelmiin. Esikäsittelymenetelmiin kuuluvat seulonta, murskaus ja ballistinen erottelu. Seulonnassa pohjakuona jaetaan kapeamman raekoon laitteiksi, mikä parantaa käsittelymenetelmien talteenottotehokkuutta. Murskauksessa rikotaan poltossa muodostuneita paakkuja ja vapautetaan mineraalikaasumien sisälle jääneitä metalleja. Murskauksen aikana pohjakuonan rakeisuusjakauma muuttuu, mikä saattaa rajoittaa jäljelle jäävän jakeen hyötykäyttömahdollisuuksia. Murskausta käytetään yleensä lähinnä isoissa polttolaitoksissa parantamaan NFe-metallien talteenottoa. Ballistinen erotus on uniikki menetelmä, jossa pienet rakeet erotetaan karkeampien ja raskaampien rakeiden pinnalta mekaanisesti. Ballistisella erottimella voidaan parantaa merkittävästi NFe-metallien talteenottoa. (Šyc et al., 2020)

Mahdollisen esikäsittelyn jälkeen metallit otetaan talteen käsittelymenetelmillä, joita ovat magneettinen erottelu, pyörrevirtaerottelu ja anturiavusteinen erottelu (Šyc et al., 2020). Magneettinen erottelu on menetelmä, jossa Fe-metallit otetaan talteen voimakkaiden magneettien avulla. Menetelmässä voidaan käyttää erityyppisiä ja eri paikkoihin sijoitettuja magneetteja. Pyörrevirtaerottelussa ajan suhteen vaihteleva magneettikenttä indusoi sähköä johtavaan kappaleeseen sähkövirran, joka reagoi magneettikenttään poikkeuttamalla kappaleen muusta materiaalivirrasta. Pyörrevirtaerottelu soveltuu ei-magneettisten NFe-metallien talteenottoon, ja se tehdään magneettisen erottelun jälkeen. (Smith et al., 2019) Viimeisin kehitysaskel pohjakuonien käsittelyssä on anturipohjainen erottelu, joka soveltuu metallien lisäksi myös lasin talteenottoon. Menetelmässä talteen otettava materiaali tunnistetaan sensoreiden tai kameroiden avulla, minkä jälkeen se erotetaan muusta materiaalivirrasta kohdistetun paineilman avulla. (Šyc et al., 2020)

Erotteluolosuhteiden jälkeen jäljelle jäävää pääosin mineraalista lajitetta eli käsiteltyä yhdyskuntajätteen polton pohjakuonaa voidaan hyödyntää erilaisissa käyttökohteissa (Šyc et al., 2020). Pohjakuonaa voidaan käyttää esimerkiksi luonnollisen kiviaineksen korvaajana sitomattomissa ja sidotuissa rakennekerroksissa tai keraamisissa ja sementtipohjaisissa rakennusmateriaaleissa (Silva et al., 2019; Šyc et al., 2020). Usein pohjakuonasta joudutaan käsittelyolosuhteiden jälkeen poistamaan hienorakeinen aines, koska se saattaa haitata materiaalin hyötykäyttöä joko rakeisuuden tai sen sisältämien liukoisten haitta-aineiden takia. Tämä hienorakeinen lajite muodostaa uuden hallittavan jätevirran. (Šyc et al., 2020)

Useat tutkimukset ovat osoittaneet jätteenpolton pohjakuonan potentiaalisen soveltuvuuden vaihtoehtoisena raaka-aineena (Al-Ghouti et al., 2021; Sormunen, 2017). Tämän lisäksi sen kierrätyksestä ja hyötykäytöstä on tulossa yleinen käytäntö useissa maissa (Al-Ghouti et al., 2021). Laajempaa käyttöä on kuitenkin rajoittanut pohjakuonan tekniset ominaisuudet ja jätestatus sekä pohjakuonan sisältämien haitta-aineiden muodostaman ympäristöriskin hallinta. Uusia käyttökohteita tutkitaan jatkuvasti ja jokainen yksittäinen käyttökohde on osaltaan pienentämässä hyödyntämättömän pohjakuonan määrää. (Lam et al., 2010)

2.6 Yhdyskuntajätteen polton pohjakuonan käyttö Suomessa

Suomessa muodostuu vuosittain arviolta yli 300 000 tonnia yhdyskuntajätteen polton pohjakuonaa, jota käsitellään yleensä ikäännyttämällä ja mekaanisilla käsittelymenetelmillä. Raaka-kuona seulotaan kuvan 4 kaltaiseksi eri kokoluokan lajitteiksi, jotta metallit saadaan eroteltua mahdollisimman hyvin kuiva- tai märkäerottelulla. Lajitteiden määrä ja raekokojakauma vaihtelevat käsittelylaitteiston mukaan. Kuonalajitteista yksi on yleensä hienorakeista 0–2 mm lajitetta, minkä lisäksi on kolmesta viiteen katkaistua karkeampaa lajitetta. Käsitellyn pohjakuonan suurin raekoko on yleensä 50 mm ja sitä suuremmat yksittäiset rakeet yleensä murskataan pienempään kokoon. (Rakennustietosäätiö, 2023, pp. 5–6)

Käsiteltyä jätteenpolton pohjakuonaa voidaan käyttää sellaisenaan erilaisissa maarakenteiden rakennusosissa, joita ovat jakavat kerrokset, suodatinkerrokset, massanvaihtojen täytöt, kaivantojen lopputäytöt, vastapenkereet, maapenkereet ja kaatopaikkarakenteet. Käsitellyn jätteenpolton pohjakuonan potentiaalisia käyttökohteita teknisten ominaisuuksien perusteella ovat esimerkiksi pihojen, teiden, katujen, väylien, kenttien ja pysäköintialueiden päällysrakenteet ja penkereet. Näiden lisäksi kuonia voidaan myös hyödyntää erilaisissa valleissa, kuten melu- ja maimointivalleissa, sekä putki- ja rumpukaivantojen lopputäytöissä tietyin rajoituksin. Pohjakuonan käytössä tulee kuitenkin huomioida jätteiden hyötykäyttöä ohjaava lainsäädäntö. Pohjakuonan tulee täyttää kohteen vaatima tekninen kelpoisuus, ympäristökelpoisuus ja muut mahdolliset vaatimukset, kuten suurin sallittu kerrospaksuus. (Rakennustietosäätiö, 2023, p. 17)

Tärkeimmät yhdyskuntajätteen polton pohjakuonan käsittelyä ja käyttöä säätelevät lait ovat ympäristönsuojelulaki (527/2014) ja jätelaki (646/2011). Ympäristönsuojelulain tarkoitus on muun muassa ehkäistä ympäristön pilaantumista, tukea kestävästä kehitystä sekä minimoida jätteiden määrää ja haitallisuutta. Jätelaki täydentää ympäristönsuojelulakia, ja sen tarkoitus on ehkäistä jätteiden ja jätehuollon aiheuttamia haittoja ja vaaroja terveydelle ja ympäristölle. Tämän lisäksi jätelaki pyrkii edistämään resurssiviisautta ja kiertotaloutta. Yhdyskuntajätteen polton pohjakuonasta valmistetut keinokiviainekset ovat jätettä silloinkin, kun ne ovat CE-merkittyjä. Jätteiden hyödyntäminen rakentamisessa vaatii ympäristönsuojelulain (527/2014) §27 mukaisen ympäristöluvan. (Rakennustietosäätiö, 2023, pp. 3–4)

Ympäristönsuojelulain mukaisen ympäristöluvan saaminen on kuitenkin usein pitkäkestoinen ja kallis prosessi. Vuoden 2018 alussa voimaan astui päivitetty MARA-asetus eli valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa (843/2017). MARA-asetuksen tavoitteena on lisätä jätteiden käyttöä maarakentamisessa ja siten edistää luonnonvarojen kestävästä käytöstä ja kiertotaloutta. MARA-asetus määrittelee vaatimukset, joiden täytyessä jätteiden hyödyntämiseen ei tarvita ympäristölupaa vaan voidaan käyttää huomattavasti kevyempää rekisteröintimenettelyä. MARA-asetuksen (843/2017) §4 mukaiselle jätteen hyödyntämiselle ja välivarastoinnille on olemassa tarkat ehdot. Käytöstä tulee myös tehdä MARA-asetuksen (843/2017) §5 mukainen ilmoitus ympäristönsuojelun tietojärjestelmään rekisteröintiä varten. MARA-asetusta voidaan soveltaa ainoastaan hankkeisiin, jotka toteutettaisiin jätemateriaalin saatavuudesta huolimatta. Rakentamiskohteen ensisijainen tarkoitus ei siis voi olla jätteen sijoittaminen, vaan jätteellä korvataan toista materiaalia. (Ympäristöhallinto, 2019, pp. 1–24) Liitteessä A on esitetty MARA-asetuksen mukaisten käyttökohteiden vaatimukset ja raja-arvot.

MARA-asetuksen (843/2017) mukaan käsiteltyä jätteenpolton pohjakuonaa voidaan käyttää teollisuus- ja varastorakennusten sekä kenttä- ja väylärakenteiden pohjarakenteissa. Perustana on laadunvalvonta, jolla varmistetaan jätteen soveltuvuus asetuksen mukaiseen käyttöön. Laadunvalvonnan tavoitteena on selvittää jätteen ominaisuudet siten, että jätteen ympäristökelpoisuusvaatimusten täyttyminen voidaan varmistaa. Jätteenpolton pohjakuonan ympäristökelpoisuutta varten on tutkittava ainakin haitta-aineiden liukoisuudet As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, V, Zn, Cl⁻, F⁻, SO₄²⁻ ja DOC:n osalta. Liukoisuuksille on määritetty erilliset raja-arvot päällystettyjen ja päällystämättömien rakenteiden osalta. (Ympäristöhallinto, 2019, pp. 17–27)

Hyödynnettäville jätteille on asetettu myös muita laatuvaatimuksia. Sen tulee täyttää eri maarakentamiskohteille, rakennusosille ja niissä käytettäville materiaaleille asetetut tekniset ja toiminnalliset vaatimukset sekä vastata rakenteen toiminnallisuuteen vaikuttavilta teknisiltä ominaisuuksiltaan korvattavaa materiaalia. Maarakentamisen materiaalien ja niistä rakennettujen rakenteiden keskeisiä teknisiä ominaisuuksia ovat esimerkiksi kantavuus, raekoko, routivuus, tiivistettävyyden ja vedenläpäisevyys. Muita yleisiä vaatimuksia on esitetty muun muassa hyödynnettävän jätteen kerrospaksuudelle sekä peitto- ja päällystysrakenteille. (Ympäristöhallinto, 2019, pp. 5–25)

3. KEVYTKIVIAINEKSET

Kevytkiviainekset ovat mineraalista alkuperää olevia materiaaleja, joiden kiintotiheys on pienempi kuin 2000 kg/m^3 tai kuivairtitiheys pienempi kuin 1200 kg/m^3 . Ne voivat olla teollisten prosessien sivutuotteita, luonnollisia kevytkiviaineksia tai edellä mainituista valmistettuja kiviaineksia. (SFS-EN 13055, 2016) Tässä luvussa käsitellään keinotekoisia kevytkiviaineksia. Keinotekoisia kevytkiviaineksia voidaan valmistaa usealla eri tavalla, mutta yleensä niiden valmistamisessa yhdistyvät jokin valmistustekniikka ja lujittamismenetelmä.

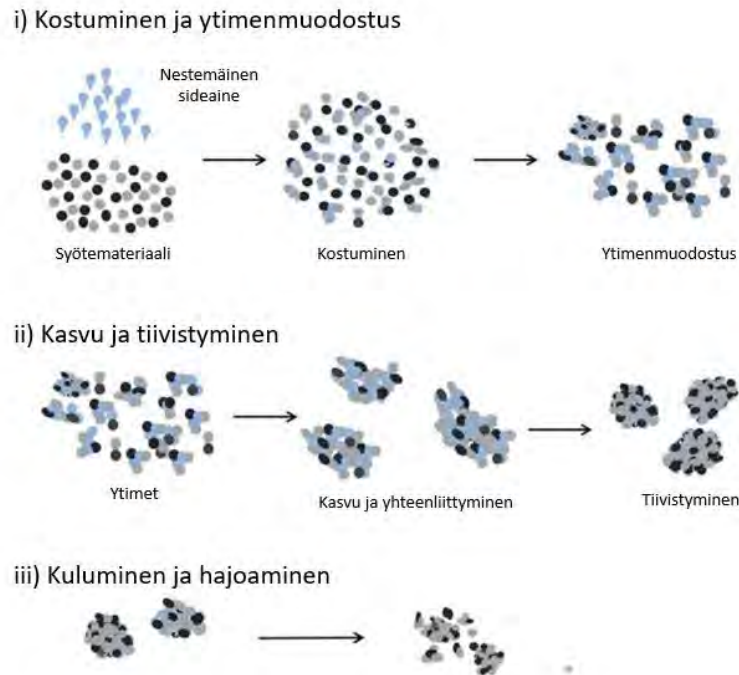
3.1 Valmistustekniikat

Perinteisesti kevytkiviaineksia on valmistettu rakeistamalla, mikä voidaan jakaa edelleen sekoitus- ja tiivistyrakeistukseen (Ren et al. 2021). Toinen yleinen tapa valmistaa keinotekoisia kevytkiviaineksia on murskaus (Xu et al., 2021). Joissain tapauksissa valmistustekniikoita saateen myös yhdistää, esimerkiksi valmistettaessa rakeistetusta materiaalista mursketta.

3.1.1 Rakeistus

Sekoitusrakeistuksella tarkoitetaan prosessia, jossa hienoaineksesta, lietteestä tai sulasta aineesta valmistetaan lähes pallomaisia tuotteita (Salman et al., 2007, p. 220). Sekoitusrakeistuksessa käytettävä laitteisto voidaan sekoitustavan perusteella jakaa rumpu-, lautas-, leijupeti- ja sekoitusrakeistimiin (Salman et al., 2007, p. 3), joista rumpu- ja lautasrakeistimet ovat yleisesti käytössä keinotekoisien kiviainesten valmistuksessa (Ren et al. 2021).

Sekoitusrakeistuksessa hienorakeista syötemateriaalia kostutetaan nestemäisellä sideaineella, jolloin alkaa muodostua rakeiden ytimiä. Sekoituksen aikana rakeet törmäävät toisiinsa, syötemateriaaliin ja sekoittimen seinämiin, minkä seurauksena ne kasvavat ja tiivistyvät. Törmäysten seurauksena rakeet saattavat myös kulua tai hajota pienempiin osiin. (Iveson et al., 2001) Kuvassa 5 on esitetty sekoitusrakeistuksen osaprosessit. Sekoitusrakeistuksessa tuoreiden rakeiden ominaisuuksiin vaikuttavat materiaaliominaisuudet ja mekaanisen prosessin tekijät. Materiaaliominaisuuksista tärkeimpiä ovat käytetty sideaine, kosteuspitoisuus ja raekoko. Mekaanisessa prosessissa vaikuttavia tekijöitä ovat pyörimisnopeus, kallistuskulma, laitteen halkaisija ja sekoituksen kesto. (Ren et al. 2021) Valmiiden rakeiden lujuus riippuu edellä mainituista prosessiparametreista sekä rakeisiin valmistuksen aikana kohdistuneesta paineesta. (Arslan & Baykal 2006)



Kuva 5. Sekoitusrakeistuksen osaprosessit: i) kostuminen ja ytimenmuodostus, ii) kasvu ja tiivistyminen sekä iii) kuluminen ja hajoaminen. Muokattu lähteestä (Thapa et al., 2019)

Tiivistysrakeistuksessa, jota kutsutaan myös puristus- ja pursotusrakeistukseksi, valmistetaan määrätyn kokoisia ja muotoisia, yleensä pallomaisia tai sylinterimäisiä rakeita mekaanisen voiman avulla (Ren et al., 2021; Salman et al., 2007, p. 190). Tiivistysrakeistuksessa rakeistettavasta materiaalista valmistetaan aluksi märkä massa nestemäisen sideaineen avulla. Märkä massa tiivistetään, minkä jälkeen se leikataan sopivan kokoisiksi kappaleiksi, jotka pyöristetään esimerkiksi kitkalevyn avulla. Pyöristäminen parantaa yksittäisten rakeiden ominaisuuksia, mutta sillä saattaa olla myös epäsuotuisia vaikutuksia, jolloin se voidaan jättää toteuttamatta tai toteuttaa vain osittain. (Peyne et al., 2018; Salman et al., 2007, p. 190; Tsai, 2012, pp. 111–117) Tiivistysrakeistuksessa merkittävimpiä tuotteen ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat materiaalin kosteuspitoisuus ja tiivistyspaine. Tehokkaamman tiivistystyön vuoksi tiivistysrakeistetut rakeet ovat yleensä tiheämpiä ja niiden huokoisuus on pienempi kuin sekoitusrakeistetuilla rakeilla. (Ren et al. 2021)

Rakeistuksessa voidaan käyttää kemiallisia lisäaineita tai muita sideaineita, kuten sementti- tai savipitoisia materiaaleja, rakeiden ominaisuuksien parantamiseksi sekä rakeistusprosessin tehostamiseksi ja lyhentämiseksi (Ren et al. 2021). Viime vuosikymmenen aikana on onnistuneesti sovellettu kaksivaiheista rakeistusmenetelmää, jossa rakeet valmistetaan rakeistettavasta materiaalista ja mahdollisesta sideaineesta, minkä jälkeen ne päällystetään pelkällä sideaineella. Tämä luo rakeelle tiiviin ja kestävä kuoren, mikä parantaa sen fysikaalis-mekaanisia ominaisuuksia sekä sidosmatriisien kemiallisesti stabiloivia ominaisuuksia. (Colangelo et al. 2015; Tajra et al. 2018)

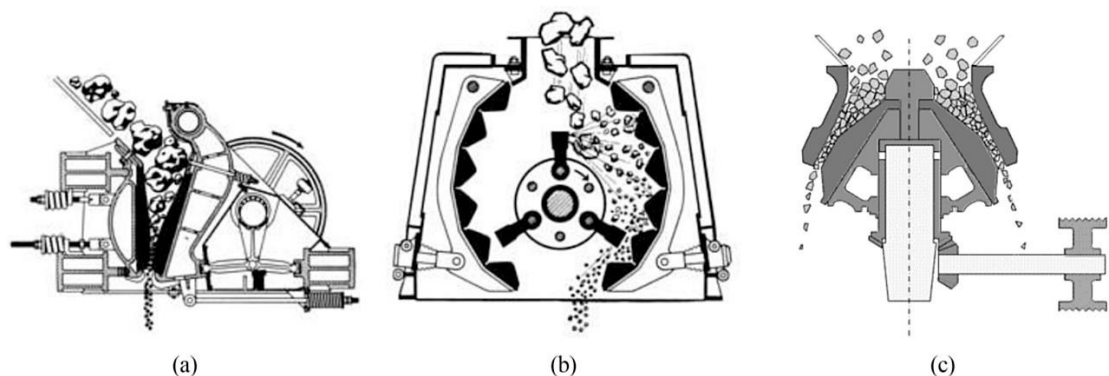
3.1.2 Murskaus

Materiaalin fysikaalis-kemialliset ominaisuudet, kuten tiheys, kovuus ja lujuus, ovat materiaalin syntytavasta ja -paikasta riippuvaisia, joten niihin ei yleisesti voida vaikuttaa käsittelyssä. Haluttuun raekokoon ja -muotoon voidaan kuitenkin vaikuttaa valmistuksen aikaisilla käsittelymenetelmillä, joista erityisen tärkeä on murskausmenetelmän valinta. (Gawenda 2021)

Murskeen laadun määrittävät raekokojakauma ja raemuoto. Rakeet voivat olla muodoltaan säännöllisiä tai epäsäännöllisiä. Kiviainestuotannossa säännöllisen muotoiset rakeet ovat usein haluttuja, koska ne ovat lujempia kuin epäsäännölliset rakeet. Säännölliset rakeet eivät myöskään ole yhtä herkkiä mekaaniselle kulutukselle kuin epäsäännölliset rakeet. (Gawenda, 2021)

Kiviainestuotannossa tärkeintä on valita oikeanlaiset ja tehtävään parhaiten soveltuvat murskaimet. Murskainten tulee olla myös oikein mitoitettuja esimerkiksi ulostuloaukon koon ja osien liikenopeuksien osalta. Muita tärkeitä asioita ovat esimerkiksi hienonnusvaiheiden määrä ja prosessia tukevat laitteet, kuten lajittelukoneet. (Gawenda, 2021)

Yleisimmin käytettäviä murskaimia ovat kuvassa 6 esitetyt leuka-, kartio ja iskumurskaimet. Leukamurskainten etuina on niiden soveltuvuus kooltaan vaihtelevalle syötemateriaalille. Tämän lisäksi ne ovat yksinkertaisia ja helppohuoltoisia. Leukamurskaimia käytetään usein erityisesti esimurskausvaiheessa. Kartio- ja iskumurskaimia käytetään murskauksen seuraavissa vaiheissa, ja niillä voidaan yleensä tuottaa raemuodoltaan parempaa lopputuotetta. Iskumurskain soveltuu erityisen hyvin kovalle materiaalille, mutta se tuottaa huomattavasti enemmän hienoaainesta kuin leuka- tai kartiomurskaimet. Eniten säännöllisen muotoisia rakeita tuottavat iskumurskaimet, toiseksi eniten kartiomurskaimet ja vähiten leukamurskaimet. (Gawenda, 2021)



Kuva 6. Yleisimmät murskaimet: a) leukamurskain b) iskumurskain c) kartiomurskain. (Silva et al., 2017)

Säännöllisen muotoisten rakeiden saantia voidaan parantaa myös esimerkiksi suljetuilla murskaussilmukoilla ja monivaiheisilla murskausjärjestelmillä. Suljetussa silmukassa murskattua materiaalia palautetaan murskattavan materiaalin sekaan uudelleenmurskattavaksi. Monivaiheiset järjestelmät koostuvat useista murskaimista ja seuloista. (Gawenda, 2021)

3.2 Lujittamismenetelmät

Keinotekoisien kiviainesten lujittamiseen on yleisesti käytössä kolme tapaa, joita ovat sintraus, karbonointi ja sideaineiden käyttö. Lujittamiseen on olemassa muitakin tapoja, mutta tässä työssä esitellään yleisimmät menetelmät, jotka soveltuvat erityisesti keinotekoisien kiviainesten valmistukseen.

3.2.1 Sintraus

Sintraus on valmistusmenetelmä, jossa materiaalipartikkelit liitetään toisiinsa korkeassa lämpötilassa (Ramamurthy & Harikrishnan, 2006). Sintraus on suhteellisen monimutkainen prosessi, jonka aikana tapahtuu sekä fysikaalisia että kemiallisia reaktioita. Sintratun keinotekoisien kiviaineksen ominaisuuksiin vaikuttavat erityisesti raaka-aineiden ominaisuudet ja sintrausparametrit, kuten lämpötila ja aika. (Ren et al., 2021) Kuvassa 7 on sintraamalla valmistetut kevytkiviainekset Leca-kevytsora ja Foamit-vaahtolasimurske.



Kuva 7. Sintraamalla valmistetut kevytkiviainekset, jollaisia ovat esimerkiksi Leca-kevytsora (vas.) ja Foamit-vaahtolasimurske (oik.). (Forsman et al., 2012; Saint-Gobain, 2019)

Sintrauksessa laajentumiskykyistä materiaalia kuumennetaan nopeasti korkeassa lämpötilassa. Sintrauksen edellytyksenä on, että valmistettava kevytkiviaines sisältää raaka-ainetta, joka vapauttaa kaasuja korkeassa lämpötilassa. Tämän lisäksi materiaalin täytyy saavuttaa plastinen faasi, joka kykenee vangitsemaan muodostuvat kaasut. (Ren et al., 2021)

Sintrauksessa lämpötilaa nostetaan yleensä vähitellen. Tämä tapahtuu yleensä kolmessa vaiheessa, joita ovat kuivatus, esikuumennus ja sintraus. Kuivatus tapahtuu yleensä noin 105 – 110 °C lämpötilassa, ja sen tarkoituksena on ehkäistä kostean raaka-aineen halkeilua ja murenemista lämpötilaerojen vuoksi. Esikuumennus ehkäisee liian nopeasta lämmityksestä johtuvaa materiaalin rapautumista ja materiaalin räjähtämistä sintrausvaiheessa. Esikuumennus tapahtuu yleensä noin 400–500 °C lämpötilassa. Sintrauslämpötila vaikuttaa merkittävästi keinotekoisien kevytkiviaineksen ominaisuuksiin ja sintraus tapahtuu yleensä 900–1250 °C lämpötilassa. (Ren et al., 2021) Lopuksi materiaalin annetaan jäähtyä hitaasti, koska nopean jäähtymisen on havaittu heikentävän lujuutta (Zhang et al., 2015).

Sintraatuilla keinotekoisilla kevytkiviaineiksilla on yleensä hyvät teknis-mekaaniset ominaisuudet ja sintraus vähentää tehokkaasti haitta-aineiden, kuten raskasmetallien, liukenemista. Lyhyen valmistusajan (~1 h) vuoksi se on myös tehokas tapa tuottaa keinotekoisia kevytkiviaineiksia. Sintrauksen haittapuolena on, että korkean lämpötilan vuoksi menetelmä on kallis ja energiaa kuluttava ja lisäksi se tuottaa myös paljon päästöjä. (Ren et al., 2021)

3.2.2 Sementit ja sementinkaltaiset sideaineet

Sementeissä ja sementin kaltaisissa sideaineissa lujittumista tapahtuu hydraulisten, pozzolaanisten tai alkaliaktivaatioon pohjautuvien reaktioiden seurauksena. Perinteisesti sementillä tarkoitetaan hydraulista sideainetta, joka muodostaa pastamaisen seoksen veteen sekoitettuna. Sementti koostuu epäorgaanisesta hienoksi jauhetusta materiaalista, joka sitoutuu ja kovettuu hydrataatioreaktioiden seurauksena. Hydrataatiolla tarkoitetaan sementin mineraalien ja veden välisiä reaktioita, joiden vaikutuksesta pastamainen seos kovettuu. Kovettumista voi tapahtua myös pozzolaanisten reaktioiden seurauksena. Pozzolaanit ovat silikaateista tai aluminaattisilikaateista koostuvia luonnon aineita. Hydraulisista sideaineista poiketen pozzolaaniset materiaalit eivät kovetu itsestään veteen sekoitettuna, mutta hydraulisissa olosuhteissa hienoksi jauhetuina ne muodostavat liuenneen kalsiumhydroksidin kanssa lujuutta kehittäviä kalsiumalumiinaatti- ja kalsiumsilikaattiyhdisteitä, jotka ovat samankaltaisia kuin hydraulisten materiaalien kovettumisessa muodostuvat yhdisteet. Pozzolaaneja käytetäänkin seosaineina sementeissä. Joillakin pozzolaaneilla, kuten kalkkipitoisilla lentotuhilla, on pozzolaanisten ominaisuuksien lisäksi myös hydraulisia ominaisuuksia, minkä ansiosta ne voivat lujittua myös itsestään. (SFS-EN 197-1, 2012) Alkaliaktivoituissa materiaaleissa sitoutuminen ja kovettuminen tapahtuu kiinteän tai nestemäisen alkaliaktivaattorin ja kiinteän silikaattilähteen välisissä kemiallisissa reaktioissa (Provis & vanDeventer, 2014).

Sementit ja sementinkaltaiset sideaineet voidaan jakaa seitsemään pääkategoriaan:

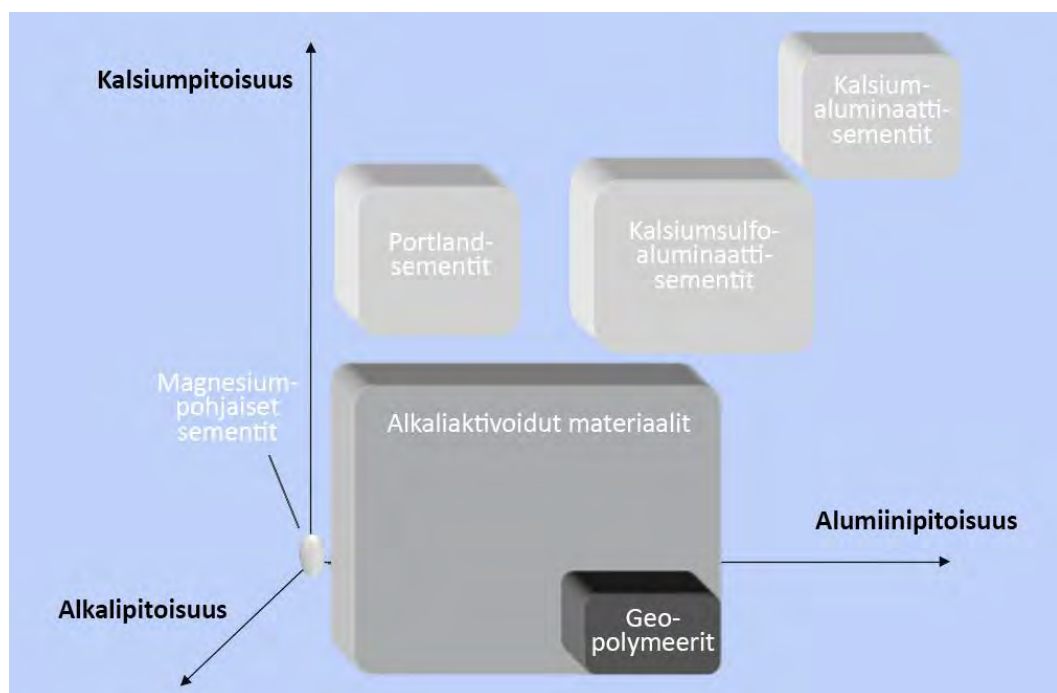
- Portlandsementit
- Kalsiumsulfoaluminaattisementit
- Kalsiumaluminaattisementit
- Magnesiumpohjaiset sementit
- Seossementit
- Alkaliaktivoitut materiaalit
- Geopolymeerit

Kuvassa 8 on sementillä ja sementinkaltaisilla sideaineilla valmistettuja kevytkiviaineiksia. Vasemmalla on portlandsementistä valmistettava kevytkiviainesmurske, keskellä on reaktiivisesta lentotuhkasta eli kalkkipitoisesta pozzolaanisesta sideaineesta valmistettava kevytkiviainesrae ja oikealla geopolymeeripohjainen kevytkiviainesmurske.



Kuva 8. Sementillä ja sementinkaltaisilla sideaineilla valmistetut kevytkiviainekset, jollaisia ovat esimerkiksi sementtipohjainen vaahtokuonamurske (vas.) (Kuva: Juho Lautala), pozzolaaninen Fill-R-tuhkarae (kesk.) ja geopolymeeripohjainen kevytkiviainesmurske (oik.). (Räisänen, 2015; Xu et al., 2021)

Kuvassa 9 on havainnollistettu sementtien ja sementinkaltaisten aineiden välisiä eroja niiden tärkeimpien aineiden pitoisuuksien perusteella. Sementit ovat monimutkaisia kemiallisia järjestelmiä, joten läheskään kaikkia tärkeitä ainepitoisuuksia ei ole mahdollista esittää tämänkaltaisessa yksinkertaisessa kolmiulotteisessa kuvaajassa. (Provis & vanDeventer, 2014)



Kuva 9. Sementtien ja sementinkaltaisten sideaineiden luokittelu alumiini-, kalsium- ja alkalipitoisuuden mukaan. Tummempi kuvaa suurempaa alkalipitoisuutta. Muokattu lähteestä (Provis & vanDeventer, 2014)

Yleisin sementti on portlandsementti, jonka suosion taustalla ovat erityisesti helppo saatavuus, työstettävyys ja monikäyttöisyys. Portlandsementtiä valmistetaan hienontamalla portlandklinkkeriä ja sekoittamalla sen joukkoon kipsiä. Klinkkerit ovat ennalta määritetystä raaka-aineseoksesta sintraamalla valmistettuja mineraalipaakkuja. Portlandklinkkeri sisältää kalsiumia, piitä, rautaa, alumiinia ja muita aineita. Portlandklinkkerin tärkeimpiä mineraalifaaseja ovat kalsiumsi-

likaatit, -aluminaatit ja -aluminaattiferriitit, ja sen massasta vähintään kaksi kolmasosaa on kalsiumsilikaatteja. Portlandsementin hydrataatiotuotteina muodostuu pääasiallisesti kalsiumsilikaattihydraattia, kalsiumhydroksidia ja ettringiittiä, jotka aiheuttavat lujittumisen. Portlandsementtiä käytetään kaikenlaisessa tavanomaisessa rakentamisessa eli yleensä silloin, kun sementiltä ei vaadita erityisominaisuuksia. Portlandsementit voivat olla myös esimerkiksi värjättyjä, sulfaatinkestäviä ja paisuvia. (Yuan, 2021, pp. 17–36)

Kalsiumsulfoaluminaatti-sementin eli CSA-sementin erikoisuutena portlandsementtiin verrattuna on nopea lujuudenkehitys ja pieni kutistuma. CSA-sementtiä valmistetaan jauhamalla CSA-klinkkeristä, joka sisältää pääasiallisesti kalsiumia, rikkiä ja piitä tai alumiinia. CSA-klinkkerin raaka-aineina voidaan käyttää myös erilaisia teollisuuden sivutuotteita ja jätteitä, kuten lentotuhkaa ja masuunikuonaa. CSA-sementin hydrataatioon vaikuttavat pääasiassa kalsiumsulfaatin määrä ja reaktiivisuus, ja sen tärkein hydrataatiotuote on ettringiitti. (Yuan, 2021, pp. 37–41)

(Kalsium)aluminaattisementtiä eli CA-sementtiä valmistetaan raaka-aineista, jotka sisältävät pääasiallisesti kalsiumia ja alumiinia. Jos tavoitellaan nopeaa lujittumista, raaka-aineissa ei saa olla merkittäviä määriä piidioksidia. CA-sementti kestää korkeita lämpötiloja sekä biologista ja kemiallista rasitusta, kuten sulfaattirasitusta. Tämän lisäksi CA-sementti tuottaa nopean lujuudenkehityksen ja sillä saavutetaan tavallista portlandsementtiä korkeampi lujuus. Aluminaattisementit ovat kuitenkin kalliita eivätkä nopean lämmönkehityksen vuoksi sovellu massavaluihin. (Yuan, 2021, pp. 41–47)

Magnesiumpohjaiset sementit ovat laaja tuoteperhe, johon kuuluvat muun muassa magnesiumoksidikloridisementti eli MOC-sementti, magnesiumoksisulfaattisementti eli MOS-sementti ja magnesiumfosfaattisementti eli MP-sementti. Magnesiumsementtien pääraaka-aine on magnesium, mutta ne sisältävät myös muita yhdisteitä ja aineita, kuten kloridia, rikkiä tai fosforia. Magnesiumpohjaisten sementtien ominaisuuksiin kuuluvat muun muassa nopea lujittuminen, suuri lujuus, hyvä kulutuksen kesto, pieni lämmön- ja sähkönjohtavuus sekä keveys. Magnesiumpohjaiset sementit olivat suosituimpia sementtejä ennen portlandsementin keksimistä. Magnesiumsementeille on edelleen tiettyjä käyttökohteita, kuten kiinteytys/stabilointi ja kevyet rakenteet. (Yuan, 2021, pp. 52–56)

Seossementtiä valmistetaan lisäämällä sementin joukkoon seosmateriaaleja. Seossementti koostuu sementistä ja yhdestä tai useammasta seosmateriaalista, kuten lentotuhkasta, masuunikuonasta tai kalkista. Seossementtien etuina ovat muun muassa suurempi lujuus, helpompi työstettävyys sekä pienempi halkeiluriski, vedenläpäisevyys ja veden tarve. (Yuan, 2021, pp. 36–37)

Alkaliaktivoidut materiaalit ovat laaja käsite, ja ne voivat koostua lähes mistä tahansa kiinteästä tai nestemäisestä alkalimetallien lähteestä ja kiinteästä silikaattipitoisesta aineesta. Kiinteä silikaattijauhe voi olla kalsiumsilikaattipitoista, kuten tavanomaiset sementit, tai aluminaattisilikaattipitoisempaa, kuten lentotuhkat ja pohjakuonat. Alkalimetallit ovat jaksollisen järjestelmän ensimmäiseen pääryhmään kuuluvia aineita. Laajan määritelmän mukaan alkalilähde voi olla käy-

tännössä mikä tahansa liukoinen ja emäksinen aine. (Provis & vanDeventer, 2014) Korkean kalsiumpitoisuuden raaka-aineissa lujittumistuotteita ovat pääasiassa kalsiumsilikaattihydraatin kaltaiset reaktiotuotteet ja vähän kalsiumia sisältävissä raaka-aineissa zeoliittimaiset lujittumistuotteet. Alkaliaktivoitujen materiaalit lujittuvat nopeasti, ja ne saavuttavat samankaltaisia ja jopa parempia lujuuksia kuin tavallinen portlandsementti. Alkaliaktivoitujen materiaalit kestävät erittäin hyvin lämpöä ja kemiallisia olosuhteita, kuten sulfaatti- ja happorasitusta. Alkaliaktivoitujen materiaalien ominaisuuksia ei kuitenkaan vielä täysin tunneta. (Yuan, 2021, pp. 47–51)

Geopolymeerejä pidetään alkaliaktivoitujen materiaalien osajoukkona, jossa sitoutuminen on tarkoin koordinoitu ja tapahtuu lähes yksinomaan aluminaattisilikaattipitoiselle materiaalille. Alkali-alkalien lähteenä on yleensä alkalimetallin hydroksidi tai silikaatti. Geopolymeerille ominaisen zeoliittirakenteen muodostavaa geeliä syntyy vain, kun kalsiumpitoisuus on riittävän alhainen. Geopolymeereistä saatetaan usein virheellisesti puhua määritelmiä laajempaa joukkona, erityisesti kaupallisissa tarkoituksissa. (Provis & vanDeventer, 2014)

3.2.3 Karbonaatio

Karbonaatio perustuu happo-emäsreaktioihin, missä emäksinen alkalinen mineraali neutraloi hiilihapon (Pan et al., 2012). Karbonaatiota tapahtuu pääasiallisesti kahdella tavalla; luonnollisesti tai kiihdytettynä. Luonnollisessa karbonaatiossa ilmakehän hiilidioksidi reagoi alkalisten materiaalien kanssa. Ilmakehän pienen hiilidioksidipitoisuuden vuoksi luonnollinen karbonaatio on yleensä hidas ja pitkäkestoinen prosessi. Kiihdytetyssä karbonaatiossa alkalisen materiaalin sekaan syötetään puhdasta hiilidioksidia, jolloin reaktioita saadaan nopeutettua merkittävästi. Kiihdytetyssä karbonaatiossa reaktiot tapahtuvat parhaimmillaan minuuteissa. (Lim et al., 2010) Kiihdytetyn karbonaation tavoitteena on jäljitellä luonnollista karbonaatiota, jossa hiilidioksidi reagoi metallin oksideja sisältävän materiaalin kanssa muodostaen vakaita ja liukenemattomia karbonaatteja (Pan et al., 2012).

Kiihdytetty karbonaatio voidaan jakaa mineraaliseen karbonaatioon ja alkalisen kiinteän jätteen karbonaatioon (Pan et al., 2012). Mineraalinen karbonisaatio voidaan määritellä luonnossa esiintyvien mineraalien ja hiilidioksidin välisenä reaktiona, jonka lopputuotteena muodostuu vähintään yhdenlaisia karbonaatteja (Haug et al., 2011). Alkalisen kiinteän jätteen karbonaatiossa alkalisia mineraaleja, kuten kalsiumia ja magnesiumia, sisältävät jätteet reagoivat hiilidioksidin kanssa samalla tavalla kuin mineraalisessa karbonaatiossa (Lim et al., 2010).

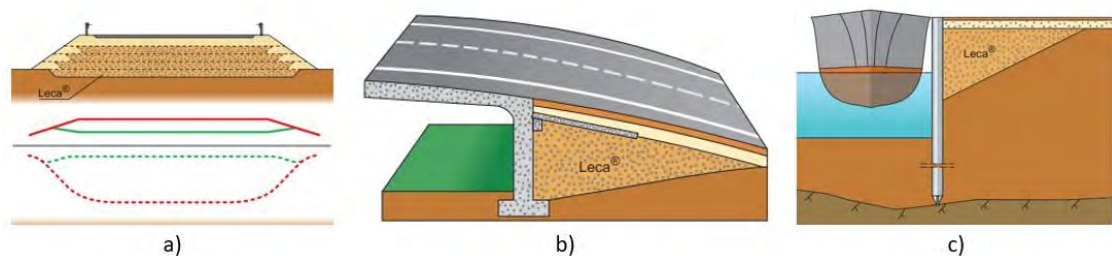
Kiihdytettyä karbonaatiota on kaavailtu merkittäväksi menetelmäksi sideaineettomien keinotekoisien kiviainesten valmistuksessa, ja sillä voidaan parantaa keinotekoisien kiviaineksen ominaisuuksia, kuten lujuutta. Jiang & Ling (2020) onnistuivat kasvattamaan sen avulla masuunikuonasta valmistetun keinotekoisien kiviaineksen lujuutta 220 % verrattuna karbonoimattomaan. Muita etuja ovat hiilidioksidin sitominen ja termodynaamisesti vakaiden yhdisteiden muodostuminen. Lisäksi se neutraloi karbonoitavan materiaalin pH:ta ja siten pienentää jätteiden sisältämien raskasmetallien liukoisuutta. (Pan et al., 2012)

3.3 Käyttökohteet

Kevyt kivimateriaaleille soveltuvia käyttökohteita ovat kevennys-, kuivatus- ja routasuojusrakenteet. Kevennysrakenteet voidaan jakaa kevennettyihin penkereisiin, siirtymärakenteisiin ja taustatäyttöihin. Kuivatusrakenteet voidaan jakaa kuivatuskerroksiin ja kapillaarikatkokerroksiin.

Kevennysrakenteiden toiminta perustuu kuormitusten pienentämiseen ja niissä kiviaines korvataan osittain tai kokonaan kevyemmällä materiaalilla. Kuormituksen pienentäminen parantaa maan stabiiliteettia sekä pienentää maan liikkeitä, maanpainetta ja painumia. (Liikennevirasto, 2011) Keventäminen on eräs yksinkertaisimmista pohjanvahvistusmenetelmistä ja sillä on sama vaikutus kuin pengerkorkeuden alentamisella. Keventämisen etuja ovat muun muassa menetelmän joustavuus, rakentamisen nopeus ja soveltuvuus erityyppisiin kohteisiin. (Tielaitos, 1997)

Kuvassa 10 on esitetty erityyppisiä kevennysrakenteita. Kevennettyjä penkereitä voidaan käyttää esimerkiksi silloin, kun maaperän painumat uhkaavat muodostua liian suuriksi tai maan stabiiliteetti eli varmuus murtotilaa kohtaan jää liian pieneksi. Siirtymärakenteita käytetään muun muassa silloin, kun pohjasuhteet tai kuormitukset muuttuvat nopeasti tai kun siirrytään painumattomalta pohjamaalta painuvalle. Kevennetyillä taustatäytöillä voidaan muun muassa suojella rakenteita liian suurilta kuormilta. (Tielaitos, 1997)

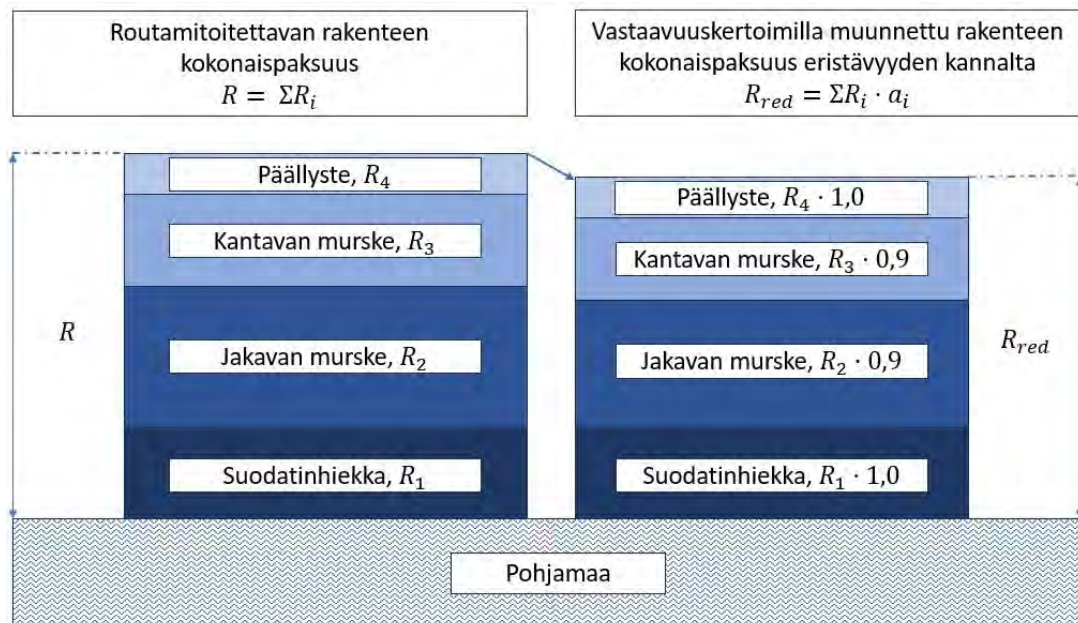


Kuva 10. Esimerkkejä kevennysrakenteista: a) kevennetty penger b) siirtymärakenne c) kevennetty taustatäyttö. (Saint-Gobain, 2019)

Kuivatuksen tavoitteena on estää veden kertyminen maarakenteeseen ja sen pinnalle sekä estää veden nousu viereisille kiinteistöille. Veden haitoilta voidaan välttyä käyttämällä rakennekerroksissa riittävän karkeita kiviaineita, jotka eivät kyllästy vedellä herkästi ja joihin ei muodostu routanousua tai sulamispehmenemistä aiheuttavia jäälinsejä. Lisäksi veden on päästävä kulkemaan rakennekerroksesta pois. (Väylävirasto, 2019)

Kuivatusrakenteisiin kuuluvan kapillaarikatkokerroksen tarkoituksena on katkaista veden kapillaarinen nousu ja pitää vesi riittävän kaukana rakenteen pinnasta. Kapillaarikatko muodostuu, kun kerroksen paksuus on suurempi kuin kiviaineen kapillaarinen nousukorkeus. (Mäkelä, 2020, p. 32) Kapillaarikatkokiviaineet ovat yleensä karkeita kiviaineita, joille tulee olla määrättyä ainakin kapillaarinen vedennousukorkeus ja niiden sisältämän hienoaineksen määrä. Tämän lisäksi niiden raaka-aineiden laatu tulee olla tutkittu. (Mäkelä, 2020, p. 91)

Routasuojauksen tavoitteena on varmistaa, että routanoususta johtuvan maarakenteen pinnan epätasaisuuden suuruus ja toistuvuus sekä maarakenteen ja sen päällä olevan rakenteen vaurioituminen ovat hallinnassa. Routasuojaus voidaan toteuttaa kahdella tavalla. Routimatonta maamateriaalia voidaan käyttää paksuna rakennekerroksena, jolloin usein materiaalinemikki ja kustannukset ovat suuria. Toinen vaihtoehto on korvata osa routimattomasta maamateriaalista pienen lämmönjohtavuuden omaavalla materiaalilla. (Nurmikolu & Kolisoja, 2002) Suomalaisessa tierakenteiden mitoituskäytännössä materiaalin vastaavuus lämmöneristävyyden kannalta ilmoitetaan vastaavuuskertoimella a_i . Vertailumateriaalina käytetään hiekkaa, jonka vastaavuuskerroin on 1. Muille materiaaleille tarvittava kerrospaksuus saadaan määritettyä jakamalla routasuojaukseen tarvittavan hiekkakerroksen paksuus materiaalille määritetyllä vastaavuuskertoimella. Esimerkiksi tunnettujen lämmöneristemateriaalien, kevytsoran ja vaahtolasimurskeen, vastaavuuskerroin on 4. (Liikennevirasto, 2018, pp. 27–28)



Kuva 11. Periaatekuva vastaavuuskertoimen a_i käytöstä routamitoituksessa. Muokattu lähteestä (Liikennevirasto, 2018, p. 27)

Kuvassa 11 on esimerkki vastaavuuskertoimen käytöstä routamitoituksessa ja siinä on käytetty kyseisille materiaaleille tyypillisiä vastaavuuskertoimen arvoja. Hyvillä eristemateriaaleilla routasuojauksen kannalta riittävä rakenteen kokonaispaksuus voidaan saavuttaa pienemmällä todellisen rakenteen paksuudella. Esimerkiksi kuvan 11 suodatinhiekkakerrosta vastaava eristävyys voidaan saavuttaa paksuudeltaan yhden neljäsosan olevalla kerroksella vaahtolasimursketta tai kevytsoraa, joiden vastaavuuskerroin on 4.

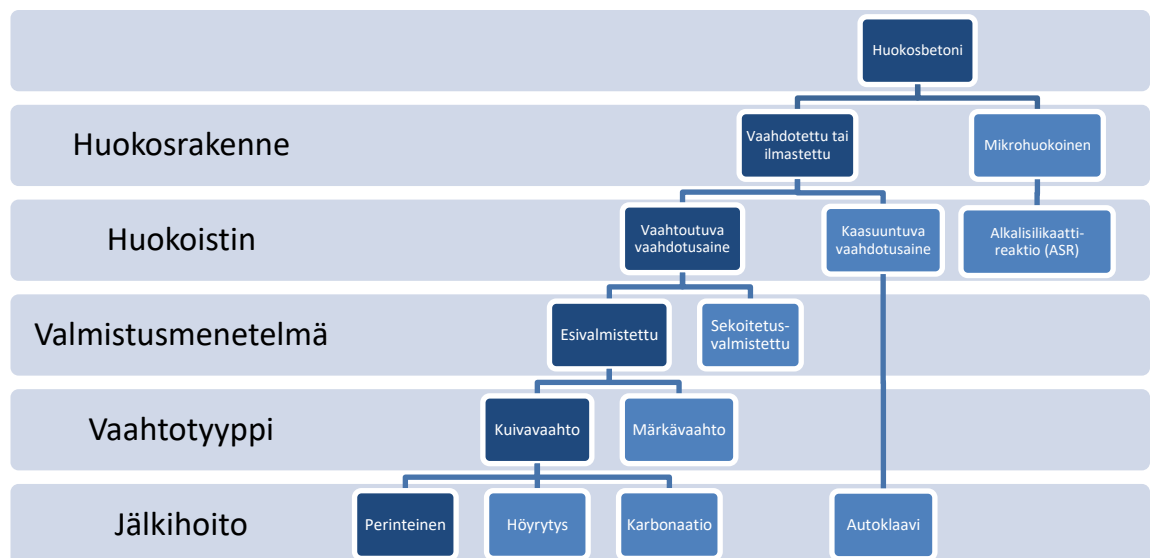
Hieman vastaavaan periaatteeseen perustuu myös kevytkiviainesten käyttö kevennysmateriaalina. Kevytkiviaineilla voidaan tehdä paksu rakenne, joka vastaa massaltaan ohuempaa tavanomaisista kiviaineista tehtyä rakennetta.

4. HUOKOSBETONI

Huokosbetoni on kevytbetonien alalaji, jolle ominainen kevyt rakenne tuotetaan keinotekoisien huokosten avulla (Chica & Alzate, 2019). Huokosbetonissa huokosten tilavuus voi olla 10–70 % kokonaistilavuudesta (Panesar 2013). Tässä luvussa esitellään erilaiset tavat valmistaa huokosbetonia, huokosbetonissa käytettävät ainesosat ja huokosbetonin tärkeimmät materiaaliominaisuudet.

4.1 Valmistaminen

Stabiilin huokosbetoniseoksen valmistamisen taustalla on useita vaikuttavia tekijöitä, kuten käytetty vaahdotusaine, seoksen koostumus ja sekoitusmenetelmä (Ramamurthy et al. 2009). Huokosbetonia voidaan valmistaa usealla eri tavalla. Kuvan 12 mukaisesti huokosbetonit voidaan luokitella esimerkiksi ainesosien, ominaisuuksien ja valmistusmenetelmien perusteella.



Kuva 12. Huokosbetonin luokittelu ominaisuuksien, valmistusmenetelmien ja ainesosien perusteella. Tummansinisellä on korostettu tässä työssä käytetty huokosbetonin valmistusmenetelmä. Muokattu lähteestä (Chica & Alzate, 2019)

Mikrohuokosissa tapahtuvassa alkalisilikaatti-reaktiossa (ASR) sementin, mineraalisten aineiden ja muiden lisäaineiden sisältämät alkalit vapautuvat huokosliukseen ja reagoivat perusseoksen sisältämän reaktiivisen piidioksidin kanssa. Reaktioiden vaikutuksesta seos laajenee voimakkaasti. ASR:n voimakkuus riippuu muun muassa reaktiivisen aineen raakoista, alkalipitoisuudesta, alkalipiidioksidigeelin ominaisuuksista sekä sementin mekaanisista ominaisuuksista. (Qian et al. 2016)

Huokosbetonin valmistuksessa käytetään vaahdotusaineita, jotka voivat olla joko vaahtoutuvia tai kaasuuntuvia. Kaasuuntuvat vaahdotusaineet reagoivat ASR:n tavoin perusseoksen sisältämien alkalien kanssa muodostaen kaasuja, jotka kasvattavat seoksen tilavuutta. (Narayanan & Ramamurthy 2000) Vaahtoutuvalla vaahdotusaineella valmistettavaa huokosbetonia voidaan valmistaa joko sekoitusmenetelmällä tai esivalmistettua vaahtoa käyttäen. Sekoitusmenetelmässä vaahdotusaine ja perusseos laitetaan sekoittimeen, jossa vaahtoutuminen eli kuplien muodostuminen tapahtuu kovan pyörimisnopeuden vaikutuksesta. Esivaahdotusmenetelmässä perusseos ja vaahto valmistetaan erikseen ja sekoitetaan myöhemmin keskenään. Sekoitusvaahdotukseen verrattuna esivaahdotus on laajemmin käytetty menetelmä matalamman vaahdotusainemenekin ja suuremman saavutetun huokoisuuden ansiosta. (Byun et al. 1998, Ramamurthy et al. 2009 mukaan) Esivaahdotusmenetelmän avulla voidaan valmistaa koossapysyvää vaahtoa (Chica & Alzate 2019).

Esivalmistettu vaahto voi olla kuiva- tai märkävaahtoa. Kuivavaahdotusmenetelmässä vaahto valmistetaan syöttämällä vaahdotusainetta ja paineilmaa samanaikaisesti sekoituskammioon. Märkävaahdotusmenetelmässä vaahto valmistetaan suihkuttamalla vaahdotusainetta pienen silmäkoon verkon läpi. Kuivavaahdon on havaittu olevan stabiilia, kun taas märkävaahto on usein suhteellisen epästabiilia. (Aldridge 2005, Ramamurthy et al. 2009 mukaan)

Jälkihoidolla tarkoitetaan toimenpiteitä, joiden avulla ylläpidetään tai parannetaan sementin hydrataatiolle edullisia olosuhteita, yleensä lämpötilaa ja kosteutta. Oikeanlaisella jälkihoidolla voidaan muun muassa parantaa materiaalin lujuutta ja kestävyyttä. Perinteisiä menetelmiä ovat veden lisääminen materiaaliin ja haihtumisen estäminen. (Taylor, 2014) Höyrytysmenetelmässä jälkihoito toteutetaan kuumalla vesihöyryllä, kun taas autoklaavimenetelmässä jälkihoito tehdään korkeassa lämpötilassa ja paineessa. Höyrytys- ja autoklaavimenetelmillä voidaan kiihdyttää hydrataatiota. (Zdeb, 2017) Uudenlainen lähestymistapa on kiihdytetyn karbonaation höyryntäminen jälkihoitomenetelmänä. Tällöin materiaalia pidetään olosuhteissa, joissa on korkea hiilidioksidipitoisuus. Menetelmä perustuu siihen, että hydrataation aikana kalsiumhydroksidin sijaan muodostuu nopeasti lujittuvia karbonaattiyhdisteitä. (Zhang et al., 2017)

4.2 Ainesosat

Huokosbetonin valmistuksessa käytettäviä ainesosia ovat vesi, sideaine, vaahdotusaine, täyteaine eli filleri ja lisäaineet (Fu et al. 2020). Välttämättömiä ainesosia ovat vesi, sideaine ja vaahdotusaine, minkä lisäksi voidaan käyttää täyte- ja lisäaineita esimerkiksi materiaaliominaisuuksien parantamiseksi tai kustannushyötyjen saavuttamiseksi.

4.2.1 Sideaine

Sideaine mahdollistaa huokosbetonin lujittumisen. Tärkein lujuuteen vaikuttava tekijä on sideaineen laatu. Laadukas sideaine parantaa seoksen lujuutta, mutta samalla se kasvattaa merkittävästi kustannuksia. Toinen lujuutta parantava tekijä on vesi-sideainesuhde, joka ei saa olla liian

suuri eikä liian pieni. (Fu et al., 2020) Sementti on eniten käytetty sideaine huokosbetonin valmistuksessa. Yleisimpiä huokosbetonin valmistuksessa käytettyjä sementtityyppejä ovat portland-, kalsiumsulfoaluminaatti- ja kalsiumaluminaattisementti, joita voidaan käyttää 25–100 % sideaineen kokonaismäärästä. (Amran et al. 2015)

Sideaineena voidaan hyödyntää erilaisia teollisuuden sivu- ja jättemateriaalivirtoja, kuten lentotuhkaa ja masuunikuonaa, sementin sijasta. Tällä tavoin voidaan vähentää arvokkaiden raaka-aineiden käyttöä ja toisaalta mahdollistaa jättemateriaalien hyötykäyttö. Sementtiä voidaan korvata sideaineilla parhaimmillaan jopa 75 %. (Shah et al., 2021).

Sementin tyyppi ja hienous voivat vaikuttaa vaahdon stabiloitumisasteeseen. Tavallisen portlandsementin sijasta on käytetty muita sideaineita lyhyen asettumisajan ja korkeamman varhaislujuuden saavuttamiseksi. Tällaisia ovat muun muassa CSA-sementti, CA-sementti, magnesiumpohjaiset sementit ja alkaliaktivoidut sideaineet. Riittävä varhaislujuus on tärkeä, sillä vaahdon tulisi pysyä kasassa lujittumiseen asti, jotta tavoiteltu huokosrakenne saavutetaan. (Tran et al., 2022)

4.2.2 Vaahdotusaine

Vaahdotusaineella on tärkeä rooli huokosbetonin valmistuksessa, koska sen avulla voidaan säädellä lopputuotteen tiheyttä kuplien määrän avulla. Kuplat ovat suljettuja huokosia, joita syntyy vaahdotusainetta käytettäessä. (Amran et al. 2015). Vaahdotusaine voi olla kaasuuntuvaa tai vaahtoutuvaa.

Kaasuuntuvan vaahdotusaineen toiminta perustuu vaahdotusaineen tuottamien kaasujen muodostamiin kupliin. Vaahdotusaineena voidaan käyttää esimerkiksi alumiinijauhetta, vetyperoksidia tai kalsiumkarbidia, joiden reaktiotuotteina syntyy vetyä, hapetta ja asetyleenia vastaavasti. Yleisimmin käytössä oleva kaasuuntuva vaahdotusaine on alumiinijauhe. (Narayanan & Ramamurthy 2000)

Vaahtoutuvan vaahdotusaineen toiminta perustuu liuoksen pintajännityksen pienentämiseen, mikä edistää stabiilien ilmakuplien muodostumista (Panesar 2013). Vaahtoutuvat vaahdotusaineet voidaan jakaa syntyperän perusteella synteettisiin eli keinotekoisiiin ja luonnollisiin, kuten proteiinipohjaisiin, vaahdotusaineisiin (Tran et al., 2022). Proteiinipohjaiset vaahdotusaineet tuottavat yleensä pieniä kuplia tasaisella huokoskokojakaumalla, minkä lisäksi ne ovat myös stabiilimpia ja lujempia kuin synteettiset vaahdotusaineet (Hashim & Tantray, 2021). Halutunlaisen huokoisuuden ja huokosrakenteen saavuttamiseksi tulee synteettisen vaahdotusaineen ja sementin yhteensopivuus aina selvittää, koska betonin kompleksinen kemiallinen ympäristö saattaa vaikuttaa vaahtoutumiseen. Luonnollisten vaahdotusaineiden tehokkuus riippuu muun muassa lämpötilasta ja happamuudesta. (Panesar 2013)

Vaahdotuvien vaahdotusaineiden osalta kiinnostusta ovat herättäneet uudet kolmifaasivaahdot, joiden avulla saadaan tuotettua stabiileja kuplia ja säädettyä huokoskokojakaumaa (Fu et al., 2020). Kolmifaasivaahdot valmistetaan lisäämällä nanopartikkeleita perinteisiin vaahtoihin. Tämän lopputuloksena syntyy kestävä vaahtoa, jossa kuplilla on kova kuori. Samalla saadaan lisättyä huokosbetoniin lujittumista edistäviä pozzolaaneja. Kolmifaasivaahdoilla on potentiaalia saavuttaa ultrakorkealujuushuokosbetonin suorituskyky eli suurempi lujuus ja parempi kestävyys. (Krämer et al., 2015)

4.2.3 Vesi

Veden tarve huokosbetonissa riippuu ainesosista ja lisäaineiden käytöstä (Amran et al., 2015). Liian vähäinen vesimäärä tekee seoksesta niin sitkeän, että kuplat hajoavat sekoitettaessa. Liian suuri vesimäärä taas tekee seoksesta niin notkeaa, että kuplat karkaavat seoksesta. Molemmissa tapauksissa materiaalin huokoisuus pienenee ja tiheys kasvaa. Tietyn tiheyden saavuttamiseen tarvittavan vesipitoisuuden on havaittu riippuvan myös muun muassa filleristä. (Nambiar & Ramamurthy, 2006)

Veden laatu vaikuttaa huokosbetonin valmistuksessa (Amran et al., 2015). Vaikutukset voivat olla joko suotuisia tai epäsuotuisia, mutta niitä on vaikea yleistää (Du & Folliard, 2005). Juomakelpoinen vesi ei yleensä epäpuhtauksien pienen määrän vuoksi vaikuta seokseen, mutta esimerkiksi orgaanisilla haitta-aineilla saattaa olla negatiivisia vaikutuksia proteiinipohjaiselle vaahdotusaineelle (Amran et al., 2015).

Muita tärkeitä veden ominaisuuksia ovat happamuus (pH) ja suolapitoisuus. Suuremmalla pH:lla on saatu tuotettua homogeenisempi huokosrakenne kuin matalalla pH:lla. Suolapitoisen ympäristön taas on havaittu tietyillä vaahdotusaineilla aiheuttavan kuplien hajoamista. (Tran et al., 2022)

4.2.4 Täyteaine eli filleri

Betonin ja huokosbetonin valmistuksessa on käytetty perinteisesti hiekkaa runkoaineena. Hiekkaa voidaan kuitenkin korvata fillerillä, joka on hienorakeista kiviaineksen korviketta (Nambiar & Ramamurthy, 2006). Huokosbetonissa fillerinä on kokeiltu kymmeniä erilaisia vaihtoehtoisia materiaaleja, joista useat ovat jätemateriaaleja (Tran et al., 2022). Fillerin avulla voidaan muun muassa parantaa lujuutta, saavuttaa kustannussäästöjä ja helpottaa sekoitussuhteen suunnittelua (Fu et al., 2020).

Fillerin ominaisuudet, kuten määrä, rakeisuus ja raemuoto vaikuttavat vaahtobetonin huokosrakenneeseen ja ominaisuuksiin. Fillerin hienorakeisuudella on havaittu olevan positiivisia vaikutuksia huokosrakenneeseen esimerkiksi lujuutta parantavan tasaisemman huokoskokojakauman luomisessa. Kulmikkaat ja karkeat täyteaineet aiheuttavat ilmakuplien kasautumista ja sitä kautta epäsäännöllisten yhdistyneiden huokosten muodostumista. (Tran et al., 2022)

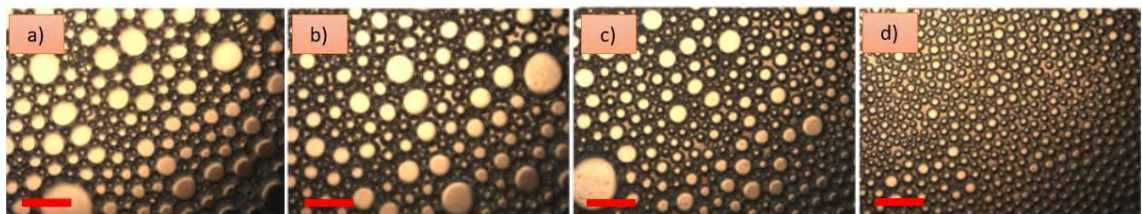
Huokosbetoni on lupaava tapa hyödyntää jättemateriaaleja, koska täyteaineissa tavanomaiset materiaalit voidaan korvata kokonaan teollisuuden sivutuotteilla tai jättemateriaaleilla. Tämä on mahdollista muun muassa siksi, että huokosbetonilla on huomattavasti pienemmät lujuus- ja kestävyysvaatimukset kuin esimerkiksi tavanomaisella betonilla. (Shah et al., 2021)

Fillerin kemiallisilla ominaisuuksilla on myös vaikutusta huokosbetoniin. Saikia et al. (2008) tutkivat hienorakeisen 0,1–2 mm yhdyskuntajätteen polton pohjakuonan käyttöä betonin täyteaineena. Tulosten perusteella yhdyskuntajätteen polton pohjakuonaa ei suositella käytettäväksi tavanomaisessa betonissa sen sisältämien epäsuotuisia vaikutuksia aiheuttavien aineiden, kuten alumiinin, sulfaattien ja orgaanisten aineiden, vuoksi. Korkeat alumiini- ja sulfaattipitoisuudet voivat aiheuttaa paisumista ja halkeilua. Metallinen alumiini muodostaa vetykaasua reagoidessaan sementin alkalien kanssa, kun taas merkittävät sulfaattipitoisuudet aiheuttavat ettringiitin muodostumista. (Aubert et al., 2004) Paisuminen ja halkeilu sekä orgaaninen aines pienentävät materiaalin puristuslujuutta (Saikia et al. 2008). Nämä vaikutukset eivät kuitenkaan ole yhtä merkittäviä huokosbetonin kaltaisessa matalan lujuuden materiaalissa. Lisäksi huokosbetonin valmistuksessa tavoitteena on saada aikaiseksi huokoinen rakenne, jolloin esimerkiksi metallisen alumiinin vedynmuodostuksella saattaa olla jopa toivottu huokosia lisäävä vaikutus.

4.2.5 Lisäaineet

Lisäaineilla pyritään parantamaan huokosbetonin ominaisuuksia. Lisäaineet voivat olla mineraalisia tai kemiallisia. Yleisesti käytettyjä lisäaineita ovat esimerkiksi kiihdyttimet, notkistimet ja vedenhylkivyyttä kasvattavat aineet (Fu et al., 2020). Lisäaineiden käytössä tulee aina varmistaa niiden yhteensopivuus muiden ainesosien kanssa, sillä lisäaineilla saattaa olla seokselle myös haitallisia vaikutuksia. Erityisesti vaahdotusaineen ja kemiallisten lisäaineiden yhteensopivuus on tarpeellista selvittää. (Amran et al., 2015)

Mineraalisten lisäaineiden toiminta perustuu yleensä vaahdon stabiiliuden parantamiseen. Mineraalisina lisäaineina voidaan käyttää esimerkiksi lentotuhkaa tai nanosilikaa, jotka kerääntyvät kuplien pinnalle muodostaen tiheän partikkelikerroksen. Pintakerros luo kuplille kuoren, joka estää niitä hajoamasta ja yhdistymästä. (Horozov, 2008) Kuvassa 13 on esitetty mineraalisen lisäaineen vaikutus vaahdon rakenteeseen heti vaahdon valmistamisen jälkeen: a) 0 % nanosilikaa b) 1 % nanosilikaa c) 3 % nanosilikaa d) 5 % nanosilikaa. Mittapalkin pituus on 200 μm . Muokattu lähteestä (She et al., 2018)



Kuva 13. Mineraalisen lisäaineen vaikutus vaahdon rakenteeseen heti vaahdon valmistamisen jälkeen: a) 0 % nanosilikaa b) 1 % nanosilikaa c) 3 % nanosilikaa d) 5 % nanosilikaa. Mittapalkin pituus on 200 μm . Muokattu lähteestä (She et al., 2018)

Notkistimia käytetään muun muassa parantamaan materiaalin työstettävyyttä (Amran et al., 2015). Notkistimilla saadaan pidettyä seoksen vesi-sementtisuhde matalana siten, että materiaalin notkeus säilyy. Riittävä notkeus tarvitaan, että vaahto saadaan tuotettua helposti ja levitettyä seokseen homogeenisesti. (Pan et al., 2014) Vesipitoisuuden pienemisellä on havaittu olevan huokosbetoniseoksen stabiiliutta parantavia vaikutuksia (Fu et al., 2020).

Kiihdyttimillä voidaan nopeuttaa seoksen kovettumista, mikä on tärkeä tekijä suorituskykyisen huokosbetoniseoksen valmistuksessa. Nopea kovettuminen ehkäisee pitkällä kovettumisajalla tapahtuvaa kuplien hajoamista. (Tran et al., 2022) Tian et al. (2016) havaitsivat tutkimuksessaan kiihdyttimen käytön lyhentävän huokosbetoniseoksen kovettumisaikaa merkittävästi. Kiihdyttimen käyttö lyhensi huokosbetoniseoksen kovettumisajan 598 minuutista 320–461 minuuttiin.

Vedenhylkivyyttä eli hydrofobisuutta kasvattavat lisäaineet pienentävät materiaalin vedenimeytymistä ja huokosten yhdistymistä, millä taas on suotuisia vaikutuksia muun muassa huokosbetonin lujuuteen ja kestävyys (Tran et al., 2022). Vesi on yksi tärkeimmistä kestävyysvaikutavista tekijöistä huokosbetonissa, joten vettä hylkivällä aineella käsittely on myös keskeinen tapa edistää huokosbetonin pitkäaikaista kestävyys (C. Liu et al., 2019).

4.3 Materiaaliominaisuudet

Huokosbetonilla on useita uniikkeja materiaaliominaisuuksia, jotka vaikuttavat muun muassa sen potentiaaliin käyttökohteisiin. Tässä kappaleessa esitellään huokosbetonin tärkeimmät ominaisuudet ja kestävyysvaikutavat tekijät.

4.3.1 Huokosrakenne

Huokosrakenteen hallitseminen on yksi tärkeimmistä asioista huokosbetonin valmistuksessa, koska se vaikuttaa muun muassa tiheyteen, lujuuteen, vedenläpäisevyyteen ja lämmönjohtavuuteen (Fu et al., 2020) Huokosbetonin huokosrakenne koostuu geelihuokosista, kapillaarihuokosista ja ilmahuokosista. Huokosrakenteessa huokosbetonin ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat huokosten koko, muoto, välimatka, kokojakauma ja yhteistilavuus. (Ramamurthy et al., 2009)

Huokosrakenteessa huokosten kokojakauma on yksi merkittävimmistä lujuuteen vaikuttavista ominaisuuksista. Kapea huokoskokojakauma tuottaa huokosbetonille korkeamman lujuuden. Huokosten yhdistyminen laajentaa kokojakaumaa, mikä heikentää lujuutta. Tämä voi tapahtua esimerkiksi liian suurella vaahdotusaineen määrällä. (Nambiar & Ramamurthy, 2007a)

Huokosten muodolla ei ole havaittu olevan suurta vaikutusta mekaanisiin ominaisuuksiin (Nambiar & Ramamurthy, 2007a). Pienet huokokset ovat yleensä muodoiltaan pyöreitä, mutta huokoskoon kasvaessa niiden muoto muuttuu epäsäännöllisemmäksi, mikä johtuu huokosten yhdistymisestä (Zhang & Wang, 2016).

Huokoskoolla on havaittu olevan suuri vaikutus huokosbetonin puristuslujuuteen. Pienten huokosten määrän muutoksilla ei ole suurta merkitystä lujuudelle, kun taas suurten huokosten määrän kasvaessa lujuus heikkenee huomattavasti. Tämän vuoksi on pyrittävä tuottamaan pieniä kuplia. Lisäksi pienet kuplat tulisi pystyä pitämään riittävän stabiileina sekoituksen aikana, etteivät ne yhdisty toisiinsa muodostaen suuria huokosia. (Zhang & Wang, 2016)

Tiheydellä ja lujuudella on useissa tutkimuksissa havaittu olevan selkeä yhteys. Huokosten yhteistilavuuden kasvaessa tiheys ja lujuus pienenevät. Huokosbetonin valmistuksessa tavoitteena on usein saavuttaa mahdollisimman pieni tiheys, jolloin huokosten yhteistilavuus on suuri, mutta samalla kuitenkin mahdollisimman suuri lujuus. (Fu et al., 2020)

Wee et al. (2006) tutkivat huokosbetonin huokosrakennetta ja sen vaikutusta huokosbetonin mekaanisiin ominaisuuksiin. Tuloksista havaittiin, että paras suhde lujuuden ja massan välillä saavutettiin, kun huokosväli oli noin 0,04 mm, huokosten koko noin 0,12 mm ja huokosten yhteistilavuus noin 42 %. Myöhemmin Wee et al. (2011) tutkivat vesi-sementtisuhteen vaikutusta huokosbetonin mekaanisiin ominaisuuksiin ja havaitsivat, että paras lujuus-painosuhte saavutettiin, kun huokosväli oli noin 0,05 mm, huokosten koko noin 0,15 mm ja huokosten yhteistilavuus noin 40 %. Hyvät mekaaniset ominaisuudet huokosbetonille tuottaa tasainen huokoskokojakauma, pyöreät ilmahuokokset ja optimaalinen huokosväli (Ramamurthy et al., 2009).

4.3.2 Lämmönjohtavuus

Huokosrakenne antaa huokosbetonille erinomaiset lämmöneristysominaisuudet, minkä ansiosta se on saavuttanut suosiota eristysmateriaalina. Lämmönjohtavuus on tärkeä suure lämmöneristysten suorituskyvyn arvioinnissa. (Fu et al., 2020) Huokosbetonin lämmönjohtavuuteen vaikuttavat muun muassa täyteaine, tiheys, huokosrakenne, lämpötila, kosteuspitoisuus ja seossuhteet.

Lämmönjohtavuuden on havaittu olevan suoraan verrannollinen huokosbetonin tiheyteen siten, että tiheyden pienentyessä lämmönjohtavuus pienenee (Fu et al., 2020). Tämä on seurausta seoksessa olevien huokosten määrästä ja koosta, jotka vaihtelevat tiheyden mukaan. Tiheys vaikuttaa myös huokosten sijoittumiseen eli muodostelmaan, johon huokokset asettuvat huokosbetonissa. (Awang et al., 2012)

Yksi tärkeimmistä lämmönjohtavuuteen vaikuttavista asioista on huokosrakenne. Huokosten sijainnilla ja suuntautuneisuudella on havaittu olevan vaikutusta lämmönjohtavuuteen. Lämmönjohtavuuden on havaittu laskevan, kun huokokset ovat kohtisuorassa lämpövirtaa vastaan ja lämpövirta kulkee mahdollisimman monen huokosen läpi. Lämpövirran suuntaisesti asettuneet huokokset taas päinvastaisesti kasvattavat lämmönjohtavuutta. (Fu et al., 2020)

Batool & Bindiganavile (2017) tutkivat vaahtobetonin huokoskokojakauman vaikutusta lämmönjohtavuuteen. Tutkimuksessa havaittiin, että lämmönjohtavuus pienenee ilmahuokosten mediaanikoon kasvaessa, mutta myös pienemmillä huokosilla on merkittävä vaikutus lämmönjohtavuuteen. Kapea huokoskokojakauma kasvattaa hieman lämmönjohtavuutta leveään huokoskokojakaumaan verrattuna. Matalan tiheyden seoksissa leveämpi huokoskokojakauma ja huokosten suurempi koko pienentävät lämmönjohtavuutta.

Lämmönjohtavuuden on havaittu pienenevän huokosten määrän kasvaessa, mutta mikäli niiden määrä kasvaa liian suureksi, kääntyy lämmönjohtavuus kasvuun. Tämä johtunee huokosten lisääntyneestä yhdistymisestä, mikä samalla kasvattaa materiaalin vedenimeytymistä. (Sang et al., 2015) Lämmönjohtavuus kasvaa vesipitoisuuden mukaan, mikä johtuu siitä, että vedellä on suurempi lämmönjohtavuus kuin ilmalla. (Hilal et al., 2015)

Lämpötilalla on myös havaittu olevan vaikutusta huokosbetonin lämmönjohtavuuteen (Fu et al., 2020). Richard et al. (1975) tutkivat huokosbetonin lämmönjohtavuutta eri lämpötiloissa. Tulokset osoittivat, että huokosbetonin lämmönjohtavuus pienenee lämpötilan laskiessa.

4.3.3 Kestävyys

Huokosbetonin kanssa on edelleen tiettyjä kestävyyyteen liittyviä haasteita. Erityisesti maanalaiset rakenneosat altistuvat herkästi epäsuotuisille olosuhteille, kuten lämpötilamuutoksille, jäätymis-sulamissykleille ja happo-emäs korroosiolle, jotka saattavat heikentää huokosbetonista valmistettuja rakenteita. (Fu et al., 2020)

Kestävyyteen vaikuttavat rapautumisprosessit ovat usein seurausta veden välillisestä vaikutuksesta. Hydraulisten ominaisuuksien, kuten vedenimeytymisen ja vedenläpäisevyyden, avulla voidaan osoittaa huokoisen rakennusmateriaalin taipumus imeä ja kuljettaa vettä. Nämä tekijät voivat myös edistää haitallisten aineiden, kuten kloridien ja sulfaattien, tunkeutumista materiaaliin, mikä heikentää materiaalia pitkällä aikavälillä. (Nambiar & Ramamurthy, 2007b)

Huokosbetonin sisäinen vedenläpäisevyys johtuu kapillaarihuokosissa ja yhdistyneissä huokosissa tapahtuvasta imeytymisestä (Fu et al., 2020). Kapillaarihuokosten määrä on suoraan verrannollinen sementtipastan määrään. Vaahdon määrän kasvaessa keinotekoisten ilmahuokosten osuus kokonaistilavuudesta kasvaa ja sementtipastan osuus vähenee. (Nambiar & Ramamurthy, 2007b) Suuri osa keinotekoisista huokosista on suljettuja huokosia, jotka eivät osallistu vedenimeytymiseen (Hilal et al., 2014; Nambiar & Ramamurthy, 2007b). Mahdollisimman pienen vedenimeytymisen kannalta tulisi keinotekoisten huokosten osuuden kokonaistilavuudesta olla suuri ja huokosten suljettuja.

Jäätymis-sulamiskestävyys on yksi merkittävimmistä huokosbetonin kestävyysvaikuttavista tekijöistä. Jäätymis-sulamissykleille altistuva huokosbetoni voi rapautua tavanomaisten laajenemisvoimien tai eri suuruisten voimien vaikutuksesta. (Tikalsky et al., 2004) Tavanomaisiin laajenemisvoimiin perustuvaa rapautumista tapahtuu, kun huokosissa olevan veden tilavuus kasvaa jäätyessä, jolloin sisäinen paine kasvaa. Jos paine ylittää materiaalin vetolujuuden, seurauksena on paikallista halkeilua. Seuraavan sulamissyklin aikana vesi pääsee kulkeutumaan myös muodostuneisiin halkeamiin, mikä aiheuttaa etenevää rapautumista toistuvien jäätymis-sulamissykliden aikana. Jäätymisen aiheuttama laajeneminen voi lohkaista myös materiaalin pinnalta palasia. (Shang & Song, 2006) Huokosbetonin suuren huokoisuuden vuoksi siihen imeytyneen veden määrä ja tunkeutumisvyvyys voivat olla huomattavasti suurempia kuin esimerkiksi tavallisella betonilla vastaavalla kyllästysajalla. Huokosbetoniin voi muodostua märkä ulkovoimien ja suhteellisesti kuivempi sisävyöhyke, joiden välillä vaikuttavat eri suuruiset voimat voivat aiheuttaa rapautumista jäätymisen aikana. (Tikalsky et al., 2004)

Tikalsky et al. (2004) tutkivat jäätymis-sulamiskestävyysvaikuttavia tekijöitä erilaisilla seossuhteilla valmistettujen huokosbetonikappaleiden avulla. Tuloksista havaittiin puristuslujuuden olevan merkittävä tekijä jäätymis-sulamiskestävyysvaikutuksen kannalta. Myös vedenimeytymisellä, vedenimeytymisnopeudella ja tunkeutumisvyvyydellä havaittiin olevan vaikutusta jäätymis-sulamiskestävyysvaikutukseen, mutta ne eivät yksinomaan riitä kuvaamaan jäätymis-sulamiskestävyysvaikutusta. Tiheydellä ja vedenläpäisevyydellä ei tässä tutkimuksessa havaittu olevan suoraa vaikutusta jäätymis-sulamiskestävyysvaikutukseen.

Sulfaattien haitallisuus johtuu kipsinmuodostuksen aiheuttamasta sementin määrän vähenemisestä, ettringiitin muodostumisen aiheuttamasta paisumisesta ja magnesiumsilikaatin muodostumisen aiheuttamasta kalsiumsilikaattihydraattigeelin vähenemisestä. Ranjani & Ramamurthy (2012) tutkivat vaahtobetonista ja betonista valmistettujen kappaleiden käyttäytymistä sulfaattipitoisessa ympäristössä keskittyen huokosbetonin tiheyden, sulfaattipitoisuuden ja eri sulfaattien kationien vaikutukseen sulfaattirasituksessa. Huokosbetonissa rapautumista tapahtui vähemmän kuin tavallisessa betonissa, mikä viittaa siihen, että huokoinen rakenne ei välttämättä altista huokosbetonia tavallista betonia enempää sulfaattirasitukselle. Korkeamman sulfaattipitoisuuden havaittiin kuitenkin johtavan nopeaan rapautumiseen.

5. VAAHTOKUONAMURSKEEN VALMISTUS

Vaahtokuonamurske-eriä valmistettiin pienen mittakaavan laitteistolla. Tässä luvussa esitellään kyseisellä laitteistolla valmistetun vaahtokuonamurskeen valmistuksessa käytetty resepti ja valmistusmenetelmä. Aluksi esitellään suunniteltu resepti ja sen ainesosat sekä toteutuneet vaahtokuonareseptit. Lopuksi käydään läpi vaahtokuonamurskeen valmistusprosessin vaiheet. Kuvas-
sassa 12 on korostettu tummansinisellä vaahtokuonan valmistusmenetelmä.

5.1 Resepti

Vaahtokuonamurske-erät valmistettiin kokemuseräisesti etukäteen suunnitellulla vaahtobetonireseptillä. Reseptissä sideaineena käytettiin plussementtiä ja lentotuhkaa. Täyteaineena käytettiin hienorakeista 0–1 mm käsiteltyä yhdyskuntajätteen polton pohjakuonaa. Näiden lisäksi käytettiin vaahdotusainetta ja tavallista vesijohtovettä sekä yhdessä erässä lisäaineena kalsiumstearaattia. Taulukossa 2 on esitetty vaahtokuonareseptissä käytetyt ainesosat ja niiden suunnitellut määrät.

Taulukko 2. *Vaahtokuonareseptien suunniteltu ainesosajakauma. (Wigren, 2022)*

Ainesosa	Käyttö- kohde	Massa (kg)	Tilavuus (l)	Osuus kokonais- massasta (%)	Osuus kokonais- tilavuudesta (%)
Plussementti	Sideaine	6,67	3,0	14,3	7,3
Lentotuhka	Sideaine	6,67	2,2	14,3	5,2
Pohjakuona	Täyteaine	23	10,5	49,3	25,1
Vesi	Vesi	9	9	19,3	21,6
Vahto	Vaahdotus- aine	1,36	18	2,9	40,8
Ca-stearaatti	Lisäaine	-	-	-	-

Plussementti on portland-seossementti, jossa käytetään masuunikuonaa ja kalkkikiveä seosaineina. Tavalliseen portlandsementtiin verrattuna plussementti on ympäristöystävällisempi ja taloudellisempi valinta. Kalkkikivi parantaa massan koossapysyvyyttä ja tiivistettävyyttä sekä tiivistää kovettuneen massan huokosrakennetta. Masuunikuona on raudan valmistuksen sivutuote, jolla on piileviä hydraulisia ominaisuuksia. Masuunikuona kehittää lähes yhtä paljon lujuutta kuin portlandklinkkeri, mutta sen lujuudenkehitys jatkuu pidempään ja se reagoi hitaammin. Plussementin standardin SFS-EN 197-1 mukainen merkintä on CEM II/B-M(S-LL). (Finnsementti, 2019) Standardin SFS-EN 197-1 mukaan plussementti voi sisältää seosaineita yhteensä 21–35 %, mutta käytännössä niiden osuus on yleensä noin 30 %. Plussementti kovettuu normaalisti ja saavuttaa 42,5 MPa lujuuden 28 vrk iässä. (Finnsementti, 2019; SFS-EN 197-1, 2012)

Pohjakuona on peräisin Fortum Waste Solutions Oy:n Riihimäen jätteenpolttolaitoksen voimaloista 1 ja 2. Voimaloissa on arinakattilat, ja niiden polttoaineena käytetään syntypaikkalajiteltua yhdyskuntajätettä sekä yhdyskuntajätteeseen verrannollisia teollisuusjätteitä. Tulipesään syötetään polttoprosessin aikana ammoniakkia typen oksidien pelkistämiseksi. (Fortum, 2023) Reseptissä käytetty pohjakuona on hienorakeista, rakeisuudeltaan 0–1 mm, käsiteltyä yhdyskuntajätteen polton pohjakuonaa. Pohjakuonaa on ikäännytetty ulkona varastokasoissa ja käsitelty metallien talteenottomenetelmillä ennen käyttöä. Reseptissä käytetty lentotuhka on energiatuotannon lentotuhkaa.

Vaaho valmistettiin kuivavaahdotusmenetelmällä, jossa konsentraattiliuos syötetään vaahto generaattoriin. Vaahdon tiheys pyrittiin pitämään välillä 70–90 g/l ja sitä tarkkailtiin säännöllisillä punnituksilla. (Wigren, 2022)

Kalsiumstearaatti on kemiallinen vettä hylkivä lisäaine, joka pienentää vedenimeytymistä. Vedenimeytymisen pienenemisellä on havaitut olevan positiivisia vaikutuksia teknis-mekaanisiin ominaisuuksiin, kuten jäätymis-sulamiskestävyyteen. (Ma & Chen, 2016) Vaahtokuonamurske-erässä VK134 kalsiumstearaattia kokeiltiin 0,3 massa-% annostuksena.

Taulukko 3. Vaahtokuonareseptien toteutuneet ainesosajakaumat. (Wigren, 2022)

Erä	Resepti	Pohjakuona (kg)	Lentotuhka (kg)	Sementti (kg)	Vesi (l)	Vaaho (l)	Tiheys (kg/m ³)
Testi	1	26,6	6,77	6,77	9	15	1 132/930
VK114	2	26,6	6,77	6,77	10	18	1 150
	3	26,6	6,77	6,77	10	18	1 130
	4	26,6	6,77	6,77	10,5	20	1 120
	5	26,6	6,77	6,77	10	20	1 200
VK124	1	26,6	6,77	6,77	9	20	1 126
	2	26,6	6,77	6,77	9	20	1 110
	3	26,6	6,77	6,77	9	20	1 018
	4	26,6	6,77	6,77	9	20	1 018
	5	26,6	6,77	6,77	9	20	1 058
	6	26,6	6,77	6,77	9	20	1 260
	7	26,6	6,77	6,77	9	20	1 100
VK134 ¹	1	26,6	6,77	6,77	9	20	1 100
	2	26,6	6,77	6,77	9	20	1 030
	3	26,6	6,77	6,77	9	40	1 150
	4	26,6	6,77	6,77	9	20	1 100
	5	26,6	6,77	6,77	9	20	1 000
	6	26,6	6,77	6,77	9	20	1 130
	7	26,6	6,77	6,77	9	20	1 008
VK134	8	32	4	4	8	20	1 030
	9	32	4	4	8	20	1 076
	10	32	4	4	8	20	1 000

1) Resepteihin lisättiin 0,3 massa-% annostus Ca-stearaattia suhteessa kokonaismassaan

Vaahtokuonaerät valmistettiin taulukon 3 mukaisilla resepteillä panostuotantona eli useampana pienenä annoksena, jotka yhdistettiin eriksi. Seossuhteet pyrittiin pitämään taulukon 2 mukaisina, mutta osa-aineiden määriä jouduttiin hieman muuttamaan sopivan koostumuksen saavuttamiseksi. Ongelmia aiheutti muun muassa ylimääräisen hienoaineksen kertyminen sekoittimen reunoille. Massan juoksevuutta säädettiin pääasiassa veden ja vaahdon avulla. (Wigren, 2022)

Vaahtokuonaerässä VK114 käytettiin alkuperäisen reseptin mukainen määrä vaahtoa, mutta veden määrää kasvatettiin hieman. Vaahtokuonaerässä VK124 vaahton määrää kasvatettiin alkuperäisestä ja samalla veden määrää vähennettiin hieman. Vaahtokuonaerän VK134 ensimmäiset erät toteutettiin samalla tavalla kuin vaahtokuonaerä VK124, mutta niihin lisättiin 0,3 massa-% annos kalsiumstearaattia. Vaahtokuonaerän VK134 viimeisissä erissä sideaineen ja veden määrää vähennettiin ja täyteaineen määrää kasvatettiin.

5.2 Valmistusprosessi

Vaahtokuonamassan valmistuksessa käytettiin kuvan 14 mukaista sekoitin-, vaahdotus- ja mittalaitteistoa. Sekoitinlaitteena käytettiin Putzmeister S5 laastipumppua, joka koostui 5-lapaisesta tilavuudeltaan 50 litraisesta tasosekoittimesta ja ruuvipumpusta. Vaahton valmistuksessa käytettiin Netzone Consult GS30 vaahdotuslaitetta. Mittalaitteisto koostui kannettavasta tietokoneesta, lämpötila-antureista, vaa'asta ja kaasumittarista, joilla seurattiin lämpötilan kehitystä, tiheyttä ja kaasunmuodostusta. (Mäkinen, 2022)



Kuva 14. Vaahtokuonamassan valmistuksessa käytetty sekoitin- (vas.), vaahdotus- (kesk.) ja mittalaitteisto (oik.). (Mäkinen, 2022)

Massan valmistus aloitettiin punnitsemalla ainesosat omiin ämpäreihin. Ensimmäiseksi kuiva-aineet kaadettiin sekoittimeen, jossa niitä sekoitettiin noin 2–3 minuuttia, kunnes seos oli homogenisoitunut. Tämän jälkeen lisättiin vesi ja sekoitusta jatkettiin noin 2–3 minuuttia. Lopuksi kostean massan sekaan lisättiin vaahto ja sekoitusta jatkettiin, kunnes vaahto oli kokonaan sekoittunut massaan. Valmis massa kaadettiin sekoittimen alla olevalle ruuvisyöttimelle, josta massa annosteltiin syöttöletkulla suursäkkeihin ja koekappalemuotteihin. (Wigren, 2022) Suursäkkejä säilytettiin lämpimässä varastohallissa.



Kuva 15. Suursäkkeihin annostellut vaahtokuonaerät: VK114 (vas.), VK124 (kesk.) ja VK134 (oik.). (Kuva: Juho Lautala)

Suursäkkeihin valmistetuille vaahtokuonaerille annettiin tunnuks, jossa kirjainosa on lyhenne sanasta 'Vaahtokuona' ja numero-osa on kyseisen vaahtokuonaerän valmistuspäivämäärä. Kuvassa 15 on esitetty suursäkkeihin valmistetut vaahtokuonaerät VK114, VK124 ja VK134. Kolmesta testierästä materiaalitestaukseen valittiin vaahtokuonaerät VK114 ja VK124. Vaahtokuonaerä VK134 hylättiin, koska materiaali ei ollut lujittunut kunnolla ja hajosi käsiteltäessä. Sioutumisen epäonnistumiseen on todennäköisesti vaikuttanut se, että VK134:ssa käytettiin vähemmän sideainetta ja enemmän täyteainetta kuin muissa erissä. Vaahtokuonaerässä VK134 käytettiin myös lisäaineena kalsiumstearaattia, jota ei käytetty muissa erissä.



Kuva 16. Vaahtokuonamurskeen valmistuksessa käytetyt välineet: iskuporakone (vas.), leukamurskain (kesk.) ja jakolaatikko (oik.). (Kuva: Juho Lautala)

Vaahtokuonamursketta valmistettiin valituista vaahtokuonaeristä kuvan 16 mukaisilla välineillä. Aluksi suursäkeissä olevasta vaahtokuonamassasta irrotettiin iskuporakoneella alle nyrkin kokoisia palasia. Palaset murskattiin Fortumin maalaboratorion leukamurskaimella, jonka leukojen väliksi asetettiin noin 20 millimetriä. Lopuksi vaahtokuonamurske jaettiin jakolaatikolla standardin SFS-EN 932-2 mukaisesti laboratorionäytteiksi eli laboratoriotestaukseen tarkoitetuiksi näytteiksi (SFS-EN 932-2, 1999).

6. MATERIAALITESTAUS JA TULOKSET

Vaahtokuonamurskeen ominaisuuksia tutkittiin taulukon 4 mukaisilla laboratoriotesteillä. Jäätymis-sulamiskestävyyttä, kiintotiheyttä, kuivairtitiheyttä, vedenimeytymistä ja vedenläpäisevyyttä tutkittiin Fortumin maalaboratoriossa Riihimäellä. Tampereen yliopiston geolaboratoriossa tutkittiin huokosrakennetta, kokoonpuristuvuutta, lämmönjohtavuutta, puristuslujuutta, rakeisuutta ja hienonemista, vedenimeytymiskorkeutta sekä lujuus- ja jäykkyysominaisuuksia. Kemiallisia ominaisuuksia eli kokonaispitoisuuksia, liukoisuuksia, happamuutta, hapettumis-pelkistymispotentiaalia ja sähkönjohtavuutta tutkittiin Fortumin maa- ja kemian laboratoriossa Riihimäellä.

Taulukko 4. Vaahtokuonamurske-erille VK114 ja VK124 toteutetut laboratoriotestit, sovelletut testistandardit ja tutkittu lajite.

Ominaisuus	Sovellettu testistandardi	Tutkittu lajite (mm)
Teknis-mekaaniset		
Huokosrakenne	-	-
Jäykkyysparametrit (syklinen kolmiaksaalikoe)	SFS-EN 13286-7	2–31,5
Jäätymis-sulamiskestävyys	SFS-EN 1367-7	4–31,5
Kiintotiheys ja vedenimeytyminen	SFS-EN 1097-6	4–31,5
Kokoonpuristuvuus ja puristuslujuus	SFS-EN 1097-11	2–31,5
Kuivairtitiheys	SFS-EN 1097-3	2–31,5
Lujuusparametrit (staattinen kolmiaksaalikoe)	SFS-EN ISO 17892-8	2–31,5
Lämmönjohtavuus	SFS-EN 12667	2–31,5
Rakeisuus ja hienoneminen	SFS-EN 933-1	2–31,5
Vedenimeytymiskorkeus	SFS-EN 1097-10	2–31,5
Vedenläpäisevyys	SFS-EN ISO 17892-11	2–31,5
Kemialliset		
Kokonaispitoisuudet (kuningasvesihajotus)	SFS-EN ISO 11885	-
Liukoisuudet (kaksivaiheinen ravistelutesti)	SFS-EN 12457-3	-
pH eli happamuus	SFS-EN 3021	-
Redox- eli hapettumis-pelkistymispotentiaali	ISO 11271	-
Sähkönjohtavuus eli johtokyky	SFS-EN 27888	-

Testit ja niissä sovelletut testistandardit valittiin pääosin kevytkiviainestandardin SFS-EN 13055 taulukosta ZA.1.5. Tämän lisäksi valittiin potentiaalisten käyttökohteiden mukaisia tarpeellisia testejä ja niihin soveltuvia testistandardeja. Tässä luvussa esitellään vaahtokuonamurskeelle toteutetut testit ja niiden tulokset. Liitteessä B on laboratoriotestien mittausraportit.

6.1 Teknis-mekaaniset ominaisuudet

Teknis-mekaaniset ominaisuudet jaetaan materiaalin koostumusta kuvaaviin luokitusominaisuuksiin ja materiaalin käyttäytymistä rakenteena kuvaaviin geoteknisiin ominaisuuksiin (Rantamäki, 2004, p. 71). Tutkittuja luokitusominaisuuksia olivat huokosrakenne, rakeisuus, kuivairtitiheys ja kiintotiheys. Tutkittuja geoteknisiä ominaisuuksia olivat hydraulista ominaisuuksista vedenimeytyminen, vedenimeytymiskorkeus ja vedenläpäisevyys, lämpöteknisistä ominaisuuksista lämmönjohtavuus ja jäätymis-sulamiskestävyys sekä lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksista hienoneminen, lujuus- ja jäykkyysparametrit, kokoonpuristuvuus ja puristuslujuus.

Teknis-mekaanisten ominaisuuksien laborioritotestaukseen valittiin vaahtokuonamurske-erät VK114 ja VK124. Testimenetelmän edellyttämiksi lajitteiksi (taulukko 4) käsin seulotut laboratorinäytteet jaettiin standardin SFS-EN 932-2 mukaisesti testinäytteiksi tai yksittäistestinäytteiksi. Testinäyte on yhteen testiin kokonaan käytettävä näyte. Yksittäistestinäyte on yhteen määrittämiseen käytettävä näyte silloin, kun testimenetelmä edellyttää useamman kuin yhden määrittämisen. (SFS-EN 932-2, 1999) Tutkittava lajite oli raekooltaan pääsääntöisesti 2–31,5 mm, mutta joissain laborioritotesteissa jouduttiin käyttämään kyseiselle menetelmälle soveltuvaa poikkeavaa 4–31,5 mm raekokoa. Huokosrakenteen tutkimista varten valmistettiin lisäksi testinäytteitä yksittäisistä vaahtokuonarakeista. Kaikki testinäytteet ja yksittäistestinäytteet uunikuivattiin aluksi 105 ± 5 °C lämpötilassa vakiomassaan ennen testausta. Esikäsittelyssä ja laborioritotestien toteutuksessa käytettiin standardin SFS-EN 932-5 mukaisia laitteita ja välineitä.

6.1.1 Kuivairtoteihey

Kuivairtoteihey on tärkeä materiaalin luokitusominaisuus, joka esiintyy useissa geoteknisissä laskelmissa ja kaavoissa (Rantamäki, 2004, pp. 71–96). Kuivairtoteihey ρ_d määritetään tiivistämättömän kuivan materiaalin massan ja astian tilavuuden osamääränä. Kuivairtoteihey määritettiin standardin SFS-EN 1097-3 mukaan kuvan 17 mukaisilla välineillä.



Kuva 17. Kuivairtoteiheyden määrittäksessä käytetyt välineet. (Kuva: Juho Lautala)

Aluksi valmistettiin kolme yksittäistestinäytettä, jotka olivat tilavuudeltaan 12–15 litraa. Uunikuivatut näytteet vietiin neljäksi tunniksi jäähtymään huoneeseen, jonka lämpötila oli 23 ± 2 °C ja suhteellinen ilmankosteus 60 ± 10 %. Kuivairtoteihey määritettiin lieriön muotoisessa 10 litran metalliastiassa. Astia täytettiin kauhalla kukkuralleen, minkä jälkeen astian yläreunan ylittävä materiaali poistettiin ja pinta tasoitettiin teräslastalla kevyesti pyyhkäisemällä.

Kuivairtoteiheyys laskettiin kaavalla

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} \quad (1)$$

jossa ρ_d on kuivairtoteiheyys [Mg/m^3], m_d on kuivan testinäytteen massa [g] ja V on näytteen tilavuus [m^3].

Taulukko 5. Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 kuivairtoteiheydet ρ_d .

Näyte	$\rho_d [Mg/m^3]$
VK114	0,57
VK124	0,51

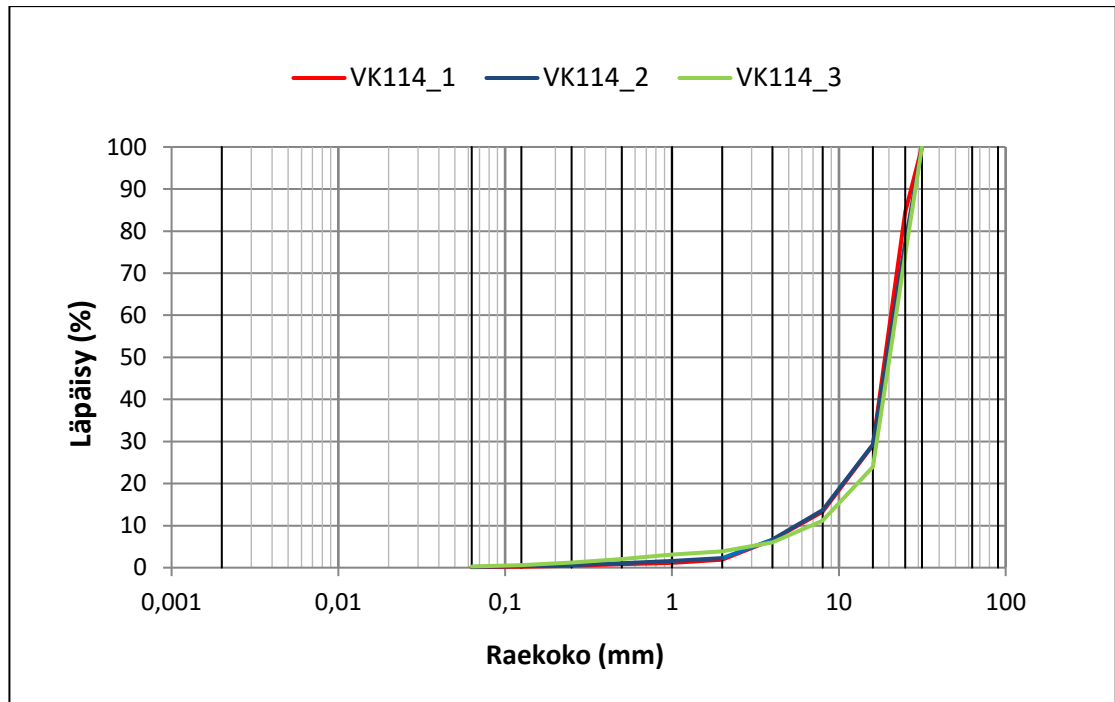
Taulukossa 5 on esitetty vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 kolmen yksittäistestinäytteen keskiarvona määritetyt kuivairtoteiheydet. Vaahtokuonamurske-erän VK114 kuivairtoteiheyys on hieman suurempi kuin vaahtokuonamurske-erän VK124.

6.1.2 Rakeisuus

Rakeisuudella eli lajitepitoisuudella on suuri vaikutus mineraalisen materiaalin rakenneominaisuuksiin ja geoteknisiin ominaisuuksiin. Rakeisuusmääritys tehtiin kevytkiviainesstandardin SFS-EN 13055 mukaisesti kuivaseulontana, ja määrittämisessä käytettiin standardia SFS-EN 933-1. Rakeisuus esitetään yleisimmin rakeisuuskäyrällä, mutta sitä voidaan kuvata myös esimerkiksi keskiraekoilla d_{50} , raekokosuhteella $C_u = d_{60}/d_{10}$ ja hienoainespitoisuudella, joissa d_{50} on arvioitu raekoko seulojen läpäisy-%:lla 50, d_{60} on arvioitu raekoko seulojen läpäisy-%:lla 60, d_{10} on arvioitu raekoko seulojen läpäisy-%:lla 10 ja hienoainespitoisuus on $< 0,063$ mm rakeiden läpäisy-%. (Rantamäki, 2004, pp. 72–73).

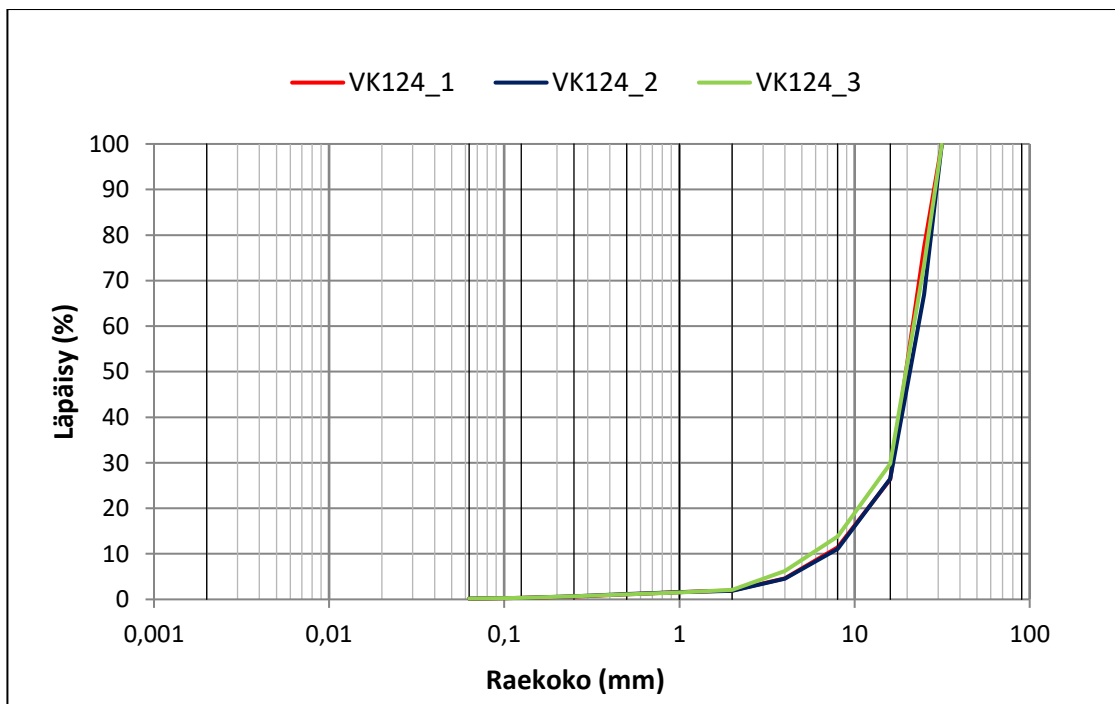
Rakeisuus määritettiin kolmesta noin 3,1 litran yksittäistestinäytteestä. Rakeisuusmäärittämisessä käytettiin standardin SFS-EN 932-5 mukaista seulasarjaa, joka koostui kannesta, pohja-astiasta ja seuloista. Seulasarjan seulakokoja olivat 31,5 mm, 16 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm ja 0,063 mm. Lisäksi käytettiin 25 mm seulaa, jolla tarkennettiin rakeisuuskäyrää ja ehkäistiin seulojen täyttymistä.

Uunikuivattu näyte kaadettiin seulasarjalle, jossa sitä tärytettiin koneellisesti kaksi minuuttia. Rakeisuusmäärittämisessä käytetyn tärypöydän taajuus oli 50 Hz ja amplitudi 0,5 mm. Seulonta-ajan valinnassa huomioitiin materiaalin hauraus: lyhyellä tärytysajalla pyrittiin ehkäisemään näytteiden liiallista hienonemista. Lopuksi seuloille ja pohja-astiaan jääneen materiaalin massat punnittiin ja laskettiin kunkin seulan läpäisy-%. Kuvassa 18 on vaahtokuonamurske-erän VK114 kolmen yksittäistestinäytteen rakeisuuskäyrät. Kuvassa 19 on vastaavat rakeisuuskäyrät vaahtokuonamurske-erälle VK124.



Kuva 18. Vaahtokuonamurske-erän VK114 yksittäistestinäytteiden rakeisuuskäyrät.

Vaahtokuonamurske-erän VK114 yksittäisnäytteiden rakeisuuskäyrät ovat jyrkät ja keskenään lähes identtiset. Vaahtokuonamurske-erä VK114 luokitellaan rakeisuuden perusteella geoteknisessä maalajiluokituksessa soraksi. Vaahtokuonamurske-erän VK114 keskiraekoko $d_{50} \approx 19 \text{ mm}$, hienoainespitoisuus 0,2 % ja raekokosuhde $C_u \approx 21/6 \approx 3,5$ eli se on tasarakeista.



Kuva 19. Vaahtokuonamurske-erän VK124 yksittäistestinäytteiden rakeisuuskäyrät.

Vahtokuonamurske-erän VK124 rakeisuuskäyrät ovat jyrkät, keskenään lähes identtiset ja samankaltaiset kuin vahtokuonamurske-erällä VK114. Geoteknisessä maalajiluokituksessa vahtokuonamurske-erä VK124 luokitellaan soraksi. Vahtokuonamurske-erän VK124 keskiraekoko $d_{50} \approx 21$, hienoainespitoisuus 0,2 % ja raekokosuhte $C_u \approx 22/6 \approx 3,7$ eli se on tasarakeista.

6.1.3 Huokosrakenne

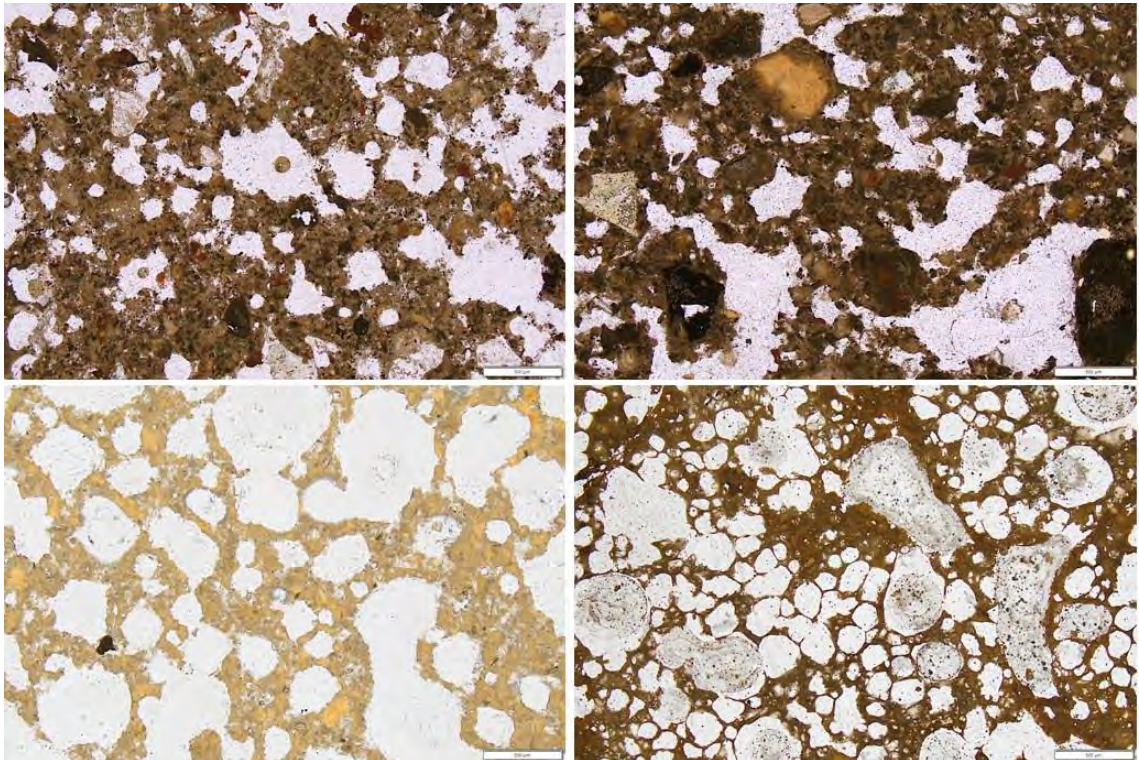
Vahtokuonamurskeen huokosrakennetta tutkittiin ottamalla vahtokuonamurske-eristä VK114 ja VK124 yksittäisiä rakeita, jotka edustavat mahdollisimman hyvin kyseistä erää. Huokosrakennetta tutkittiin aluksi silmämääräisesti ja tämän jälkeen tarkemmin mikroskoopilla. Huokosrakenne on eräs tärkeimmistä huokosbetonin ominaisuuksiin vaikuttavista tekijöistä, koska se määrittelee suuren osan sen ominaisuuksista. Kuvassa 20 on kameralla otetut kuvat vahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 sekä Leca-kevytsoran ja Foamit-vahtolasimurskeen huokosrakenteesta halkaistuissa rakeissa.



Kuva 20. Halkaistujen rakeiden huokosrakenteesta perinteisellä kameralla otetut kuvat vahtokuonamurske-eristä VK114 (vas. ylä) ja VK124 (oik. ylä) sekä vertailumateriaaleista Foamit-vahtolasimurskeesta (vas. ala) ja Leca-kevytsorasta (oik. ala). Kuvissa näkyvän mitan numeroiden väli on 1 cm. (Kuva: Juho Lautala)

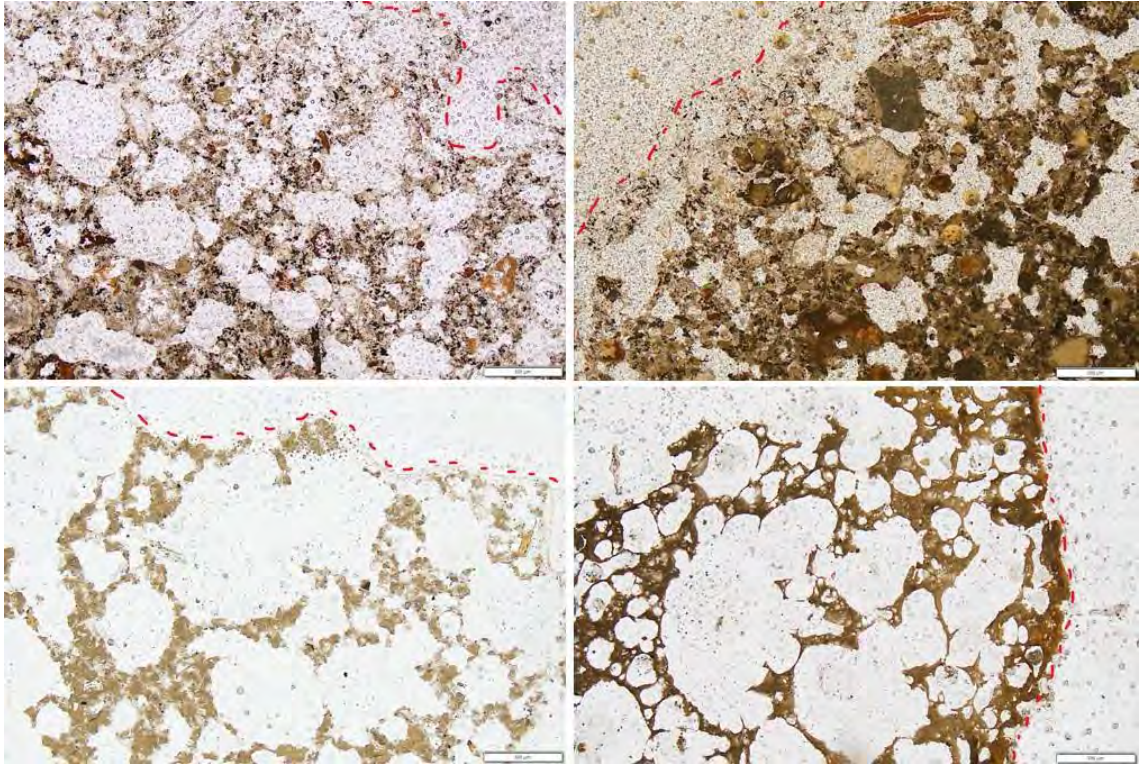
Kuvassa 20 vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 näytteistä vasemman puoleinen edustaa huokoisempaa ja hauraampaa raetta, kun taas oikean puoleinen edustaa tiheämpää ja keskeämpää raetta. Foamitin ja Leca-soran kuvat on otettu yhden sahatun rakeen pinnoista.

Mikroskooppikuvantamista varten rakeista valmistettiin ohuthieet lasilevyille. Ensin ohueksi sahatut näytteet hiottiin tasapintaisiksi, minkä jälkeen ne kastettiin hartsiin. Materiaalin huokosiin tunkeutuva hartsi pitää materiaalin rakenteen kasassa ja estää ohueksi hiottuja näytteitä murenemasta käsittelyn aikana. Tämän jälkeen hartsilla kyllästetyt näytteet liimattiin lasilevyille ja niitä hiottiin, kunnes lasin pinnalle jäi vain ohut, lähes läpikuultava, kerros näytteestä. Mikroskooppikuvat on otettu kohdista, jotka edustavat mahdollisimman hyvin kyseistä materiaalia.



Kuva 21. Huokosrakenteesta mikroskoopilla otetut kuvat vaahtokuonamurske-eristä VK114 (vas. ylä) ja VK124 (oik. ylä) sekä vertailumateriaaleista Foamit-vaahtolasimurskeesta (vas. ala) ja Leca-kevytsorasta (oik. ala). Yksittäisten mikroskooppikuvien alareunassa näkyvän mittapalkin pituus on 500 μm . (Kuva: Juho Lautala)

Kuvassa 21 on mikroskooppikuvat vaahtokuonamurske-eristä VK114 ja VK124 sekä vertailumateriaaleista Foamit-vaahtolasimurskeesta ja Leca-kevytsorasta. Vaahtokuonamurskenäytteissä on vertailumateriaaleihin verrattuna enemmän kiintoainesta suhteessa ilmahuokosiin. Vaahtokuonamurske-erissä huokosten muoto on melko epäsäännöllinen, kun taas Foamitin ja erityisesti Leca-soran huokosissa erottuu enemmän säännöllisyyttä. Leca-sorassa pieniä huokosia on huomattavasti enemmän vaahtokuonamurske-erijn ja Foamitiin verrattuna. Vaahtokuonamurske-erien ja Foamitin ilmahuokokset näyttävät olevan yhdistyneitä ja muodostavat yhtenäisiä huokoskäytäviä.



Kuva 22. Huokosrakenteesta rakeiden reunasta mikroskoopilla otetut kuvat vaahtokuonamurske-eristä VK114 (vas. ylä) ja VK124 (oik. ylä) sekä vertailumateriaaleista Foamt-vaahtolasimurskeesta (vas. ala) ja Leca-kevytsorasta (oik. ala). Yksittäisten mikroskooppikuvien alareunassa näkyvän mittapalkin pituus on 500 µm. Punaisella katkoviivalla on hahmoteltu tutkittavan rakeen reunaa. (Kuva: Juho Lautala)

Kuvassa 22 on mikroskooppikuvat vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 sekä vertailumateriaalien, Foamt-vaahtolasimurskeen ja Leca-kevytsoran, testinäytteiden reunasta. Punainen katkoviiva osoittaa tutkitun rakeen arvioidun reunan. Todellisuudessa reuna saattaa hieman poiketa piirretystä katkoviivasta. Leca-soralla on selkeästi havaittava kova sintraantunut kuori, kun taas vaahtokuonamurske-erillä ja Foamtilla reuna sisältää avoimia huokosia eikä selkeää reunaa ole helposti havaittavissa.

6.1.4 Kiintotiheys ja vedenimeytyminen

Kiintotiheydellä ilmaistaan materiaalin tiheyttä silloin, kun jätetään huomioimatta rakeiden väliset ja rakeiden sisäiset huokoset (Rantamäki, 2004, pp. 78–79). Vedenimeytyminen kuvaa materiaaliin tietyssä aikayksikössä imeytyneen veden määrää (SFS-EN 1097-6). Kiintotiheys ja vedenimeytyminen määritettiin standardin SFS-EN 1097-6 liitteen C mukaan kuvassa 23 nähtävällä pyknometrimenetelmällä.



Kuva 23. Kiintotiheyden ja vedenimeytymisen määrittäminen pyknometrillä. (Kuva: Juho Lautala)

Testiä varten valmistettiin kaksi irtotilavuudeltaan noin 500–600 ml yksittäistestinäytettä. Testinäytteet valmistettiin samasta laboratorionäytteestä, josta valmistettiin testinäytteet kuivairtotiheyden määrittämistä varten. Aluksi uunikuivatun testinäytteen massa m_d punnittiin, minkä jälkeen testinäyte laitettiin pyknometriin ja pyknometri täytettiin 22 °C ionivaihdetulla vedellä. Pyknometrin massa testin aikana m_{pt} punnittiin testin aloittamisen jälkeen ajanhetkillä +5 min, +1 h ja +24 h. Aina ennen punnitusta rakeiden väliin jäänyt ilma poistettiin pyörittelemällä ja koputtelemalla pyknometriä, minkä jälkeen pyknometri täytettiin kaulan merkkiin asti ionivaihdetulla vedellä ja pyknometrin ulkopinnoille jäänyt vesi pyyhittiin pois. Pyknometriä pidettiin vesihauteessa, jonka lämpötila oli 22 °C. Viimeisen punnituksen jälkeen pyknometri tyhjennettiin, testinäytteen pinta kuivattiin kuitukankaalla ja 24 tuntia vedessä kyllästetyn ja pintakuivatun näytteen massa m_{ssd} punnittiin. Vedellä kalibroidun pyknometrin massa m_{pc} määritettiin punnitsemalla pyknometri, joka oli täytetty 22 asteisella ionivaihdetulla vedellä pyknometrin kaulan merkkiin asti.

Standardin SFS-EN 1097-6 liitteen C mukaan pyknometrillä määritetty kiintotiheys voidaan ilmaista kolmella eri tavalla ja vedenimeytyminen yhdellä tavalla eri ajan hetkillä:

1. näennäinen kiintotiheys ρ_a

Uunikuivatun näytteen massan suhde sen syrjäyttämän vesimäärän massaan sisältäen partikkelien suljetut huokokset, mutta ei partikkeleissa olevia avoimia huokosia

$$\rho_a = \rho_w \cdot \frac{m_d}{m_d - [m_{pt,24h} - m_{pc}]} \quad (2)$$

2. uunikuivattu kiintotiheys ρ_{rd}

Uunikuivatun näytteen massan suhde sen syrjäyttämän vesimäärän massaan sisältäen partikkeleissa olevat avoimet ja suljetut huokokset

$$\rho_{rd} = \rho_w \cdot \frac{m_d}{m_{ssd,24h} - [m_{pt,24h} - m_{pc}]} \quad (3)$$

3. kyllästetty ja pintakuivattu kiintotiheys ρ_{ssd}

Uunikuivatusnäytteessä ja näytteen partikkelien avoimissa huokosissa esiintyvän veden massan suhde sen syrjäyttämän vesimäärän massaan sisältäen partikkeleissa olevat avoimet ja suljetut huokokset

$$\rho_{ssd} = \rho_w \cdot \frac{m_{ssd,24h}}{m_{ssd,24h} - [m_{pt,24h} - m_{pc}]} \quad (4)$$

4. vedenimeytyminen WA_{24h}

Uunikuivattuun näytteeseen imeytyneen veden massan suhde uunikuivatun näytteen massa 24 h aikana

$$WA_{24h} = \frac{m_{ssd,24h} - m_d}{m_d} \quad (5)$$

5. vedenimeytyminen ajan hetkellä t WA_t

Uunikuivattuun näytteeseen imeytyneen veden massan suhde uunikuivatun näytteen massa ajanhetkellä t

$$WA_t = WA_{24h} - \frac{m_{pt,24h} - m_{pt,t}}{m_d} \quad (6)$$

jossa ρ_w on veden tiheys [Mg/m^3], m_d on kuivan näytteen massa [g], m_{ssd} on kyllästetyn ja pintakuivatun näytteen massa [g], m_{pt} on pyknometrin massa testin aikana [g] ja m_{pc} on vedellä kalibroidun pyknometrin massa [g].

Taulukko 6. Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 kiintotiheydet ja vedenimeytymisen arvot, jossa ρ_a on näennäinen kiintotiheys, ρ_{rd} on uunikuivattu kiintotiheys, ρ_{ssd} on kyllästetty ja uunikuivattu kiintotiheys ja WA on vedenimeytyminen massaprosentteina.

Näyte	ρ_a [Mg/m^3]	ρ_{rd} [Mg/m^3]	ρ_{ssd} [Mg/m^3]	WA_{5min} [$m - \%$]	WA_{1h} [$m - \%$]	WA_{24h} [$m - \%$]
VK114	1,90	1,12	1,53	31	35	37
VK124	1,75	1,00	1,42	40	42	43

Taulukossa 6 on esitetty vaahtokuonamurske-erille VK114 ja VK124 määritetyt kiintotiheyden ja vedenimeytymisen arvot. Kiintotiheydet määritettiin kaavoilla 2–4 ja vedenimeytyminen kaavoilla 5–6. Kiintotiheyden arvot eivät välttämättä ole tarkkoja, koska kevytkiviaineiksilla kaikki huokokset eivät ehdi täyttyä 24 h testin aikana. Kevytkiviaineiksilla saadaan tyypillisesti suuria vedenimeytymisen arvoja massaprosentteina ilmaistuna, koska tavanomaiseen kiviainekseen verrattuna kevytkiviaineuksen kiintotiheys on pienempi ja materiaali on huokoista.

6.1.5 Vedenimeytymiskorkeus

Vedenimeytymiskorkeuden avulla tutkitaan kapillaarisuutta eli nesteen taipumusta tunkeutua materiaalissa oleviin huokosiin ja ohuisiin putkistoihin. Ilmiö johtuu nesteen ja sitä ympäröivän seinämän välisestä vetovoimasta sekä pintajännityksestä. Kapillaarisuuden vuoksi veden nousu maakerroksessa jatkuu korkeustasoon, jossa kapillaarivoimat ja painovoima ovat tasapainossa. (Rantamäki, 2004, pp. 112–113)

Vedenimeytymiskorkeus määritettiin standardin SFS-EN 1097-10 mukaan saattamalla pysty-suorassa putkessa oleva testinäyte suoraan kosketukseen veden kanssa. Testin tuloksena saadaan vedenimeytymiskorkeus h_{kap} . Kuvassa 24 on esitetty vedenimeytymiskorkeuden määrittämisen koejärjestely.



Kuva 24. Vedenimeytymiskorkeuden määrittäminen (vas.) ja siihen liittyvän hygroskooppisen vedenimukykyyn määrittäminen (oik.). (Kuva: Juho Lautala)

Aluksi valmistettiin kaksi testinäytettä, joista toinen oli hygroskooppisen vedenimukykyyn määrittäystä varten ja toinen vedenimeytymiskorkeuden määrittäystä varten. Hygroskooppisella vedenimukyvyllä tarkoitetaan kosteuspitoisuutta, joka on suljetussa säiliössä juuri alle 100 % suhteellisessa kosteudessa. Testinäytteen hygroskooppinen vedenimukyky määritettiin, koska ilman suhteellinen kosteus saattaa vaikuttaa vedenimeytymiskorkeuteen. (SFS-EN 1097-10) Hygroskooppisen vedenimukykyyn testinäyte oli tilavuudeltaan noin litra ja vedenimeytymiskorkeuden testinäyte tilavuudeltaan noin 15 litraa.

Hygroskooppisen vedenimukykyyn määrittämistä varten testinäytteet levitettiin tasaisesti lasiastiaan. Astian keskelle laitettiin lasiallas, joka sisälsi kalsiumsulfaattiliuosta. Kalsiumsulfaattiliuos valmistettiin liuottamalla 12 ± 1 grammaa analysipuhdasta kalsiumsulfaattia 100 ± 1 grammaan ionivaihdettua 40 ± 1 °C vettä. Kalsiumsulfaattiliuoksen tarkoitus on ehkäistä kondensoitumista testin aikana, sillä kondensoituneet vesipisarot voivat imeytyä testinäytteeseen ja vääristää tuloksia. Kun vedenimeytymiskorkeuden määrittäminen oli valmis, hygroskooppisen vedenimukykyyn testinäyte poistettiin lasiastiasta ja punnittiin massa m_{hyg} . Testinäyte uunikuivattiin 105 ± 5 °C lämpötilassa vakiomassaan, minkä jälkeen määritettiin massa m_{hygd} . Maksimaalinen hygroskooppinen vedenimukyky laskettiin kaavalla

$$w_{hyg} = \frac{m_{hyg} - m_{hygd}}{m_{hygd}} * 100 \quad (7)$$

jossa w_{hyg} on hygroskooppinen vedenimukyky [%], m_{hyg} on kostean testinäytteen massa [g] ja m_{hygd} on kuivan testinäytteen massa [g].

Vedenimeytymiskorkeuden määrittämisessä kuiva testinäyte laitettiin putkeen neljässä yhtä pakussa kerroksessa. Jokaista kerrosta tiivistettiin kevyesti antamalla puusauvan pudota vapaasti 10 kertaa koko tiivistettävän pinnan alalle noin 50 mm korkeudelta. Tämän jälkeen näytteen yläpään kiinnitettiin kumirenkaan avulla muovipussi ja alusastian pohja täytettiin ionivaihdetulla vedellä. Testistandardista poikettiin siten, että näytteen massaa ei punnittu testin aikana. Lopuksi näyte poistettiin kerroksittain ja määritettiin kunkin kerroksen vesipitoisuus kuivaamalla näyte uunissa. Taulukossa 7 on esitetty vaahtokuonamurske-erille määritetty hygroskooppinen vedenimukyky ja vedenimeytymiskorkeus.

Taulukko 7. Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 hygroskooppinen vedenimukyky w_{hyg} ja sen avulla määritetty vedenimeytymiskorkeus h_{kap} .

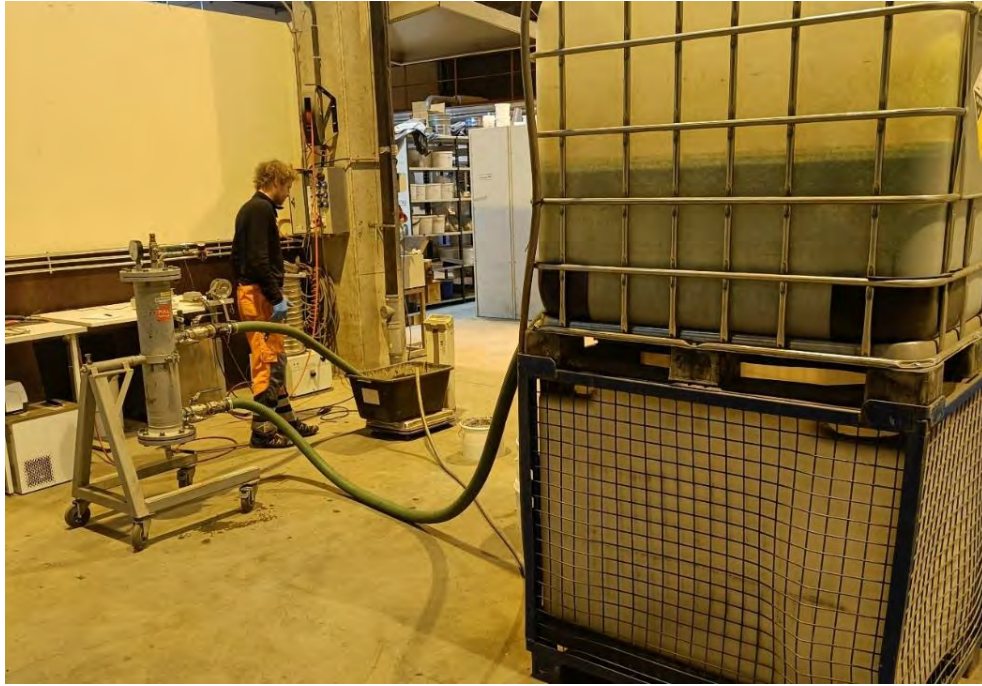
Näyte	w_{hyg} [%]	h_{kap} [mm]
VK114	7,07	130
VK124	7,75	140

Vedenimeytymiskorkeus määritettiin piirtämällä liitteessä B.4 esitetyt kuvaajat, joissa vaahtokuonamurskeen vesipitoisuus on esitetty näytteen korkeuden funktiona. Kuvaajiin piirrettiin pysyvuora viiva vaahtokuonan hygroskooppinen vedenimukyvyn kohdalle ja vedenimeytymiskorkeus määritettiin kohdasta, jossa hygroskooppisen vedenimukyvyn suora leikkaa vesipitoisuuden käyrän.

6.1.6 Vedenläpäisevyys

Vedenläpäisevyyssmittauksissa tarkastellaan näytteen läpi tietyssä aikayksikössä virranneen veden määrää. Laboratorio-olosuhteissa vedenläpäisevyys voidaan määrittää vakiopainemenetelmällä tai muuttuvan paineen menetelmillä. Tässä työssä vedenläpäisevyys määritettiin vakiopainemenetelmällä, jonka on todettu soveltuvan parhaiten tutkittavan materiaalin kaltaiselle karkearakeiselle materiaalille. (Rantamäki, 2004, pp. 100–103) Vedenläpäisevyyden määrittämisessä mukailtiin standardia SFS-EN ISO 17892-11 ja sen tuloksena saatiin vedenläpäisevyyskerroin k .

Käytetty laitteisto ja menetelmä on Fortumin sisäisen kehitystyön tulos, ja sen toteutuksessa on sovellettu aiheesta kirjoitettuja julkaisuja ja standardeja. Menetelmässä käytettävä laitteisto koostuu vesisäiliöstä, letkuista, mittasellistä, vaa'asta, poistoastiasta, paineilmalaitteistosta ja ajanottovälineestä. Mittasellin halkaisija oli 150 mm ja korkeus 300 mm. Hydraulinen painekorkeus oli 0,79 m. Koejärjestely on esitetty kuvassa 25. Vedenläpäisevyys määritettiin mittaamalla koekappaleen läpi virranneen veden määrä aikayksikössä.



Kuva 25. Vedenläpäisevyyksmittauksissa käytetty laitteisto. (Kuva: Juho Lautala)

Aluksi harmaa sylinterin muotoinen näyteselli täytettiin testinäytteellä, minkä jälkeen koekappale kyllästettiin vedellä. Kyllästämisen tapahtui siten, että veden annettiin virrata koekappaleen läpi hetken aikaa. Näytesellissä vesi virtasi alaosaan sisään ja poistui yläosaan. Mittaus aloitettiin, kun rakeiden välinen huokostila oli kokonaan kyllästynyt vedellä. Mittaus aloitettiin käynnistämällä ajanotto, minkä jälkeen veden annettiin virrata vaa'an päällä olevaan poistoastiaan ennalta määritetyn ajan. Kulunut aika ja virranneen veden massa kirjattiin ylös. Veden massasta määritettiin veden tiheyden avulla koekappaleen läpi virranneen veden tilavuus eli virtaama Q . Vedenläpäisevyys laskettiin kaavalla

$$k = \frac{Q \cdot h}{A \cdot t \cdot H} \quad (8)$$

jossa k on vedenläpäisevyys [m/s], Q on virtaama [m^3], h on koekappaleen korkeus [m], A on koekappaleen pohjan pinta-ala [m^2], t on mittausaika [s] ja H on hydraulinen painekorkeus [m].

Vedenläpäisevyys määritettiin 0, 1, 2 ja 3 barin lisäkuormituksessa. Paine kuormitus simuloi todellista tilannetta, jossa maarakenteeseen kohdistuu yläpuolisten rakennekerrosten aiheuttama jännitys. Paine kuormituksen aikana näytesellin sisällä oleva terässylinteri puristi koekappaletta kasaan. Koekappaleen korkeus mitattiin jokaisen painetaso noston jälkeen. Vedenläpäisevyys laskettiin kolmen rinnakkaisen mittauksen keskiarvona kullakin painetasolla, kun virtaus oli vakiintunut. Koekappaleen kokoonpuristuma laskettiin kaavalla

$$C = 100 \cdot \frac{h_1 - h_2}{h_1} \quad (9)$$

jossa C on kokoonpuristuvuus [%], h_1 koekappaleen korkeus alussa [m] ja h_2 kokoonpuristuneen koekappaleen korkeus [m].

Taulukko 8. Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 vedenläpäisevyys k ja kokoonpuristuvuus C erilaisilla tiheyden ρ ja lisäkuormituksen p arvoilla.

Näyte	ρ [Mg/m ³]	p [bar]	C [%]	k [m/s]
VK114	0,533	0	0	$3,0 \cdot 10^{-2}$
	0,567	1	6	$3,0 \cdot 10^{-2}$
	0,599	2	11	$2,6 \cdot 10^{-2}$
	0,645	3	17	$1,6 \cdot 10^{-2}$
VK124	0,501	0	0	$3,4 \cdot 10^{-2}$
	0,542	1	8	$3,0 \cdot 10^{-2}$
	0,594	2	16	$2,1 \cdot 10^{-2}$
	0,626	3	20	$1,2 \cdot 10^{-2}$

Taulukossa 8 on esitetty vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 vedenläpäisevyys k ja kokoonpuristuvuus C tiheyden ρ ja lisäkuormituksen p arvoilla. Vedenläpäisevyyden mittauksissa näytteet kaadettiin löyhästi näyteselliin eikä näytteitä tiivistetty ennen testin aloitusta. Kokoonpuristuvuus laskettiin näytekorkeuden muutoksena alkutilanteeseen verrattuna. Tiheys ρ on kuivan vaahtokuonamurskeen massan suhde tilavuuteen eikä se ota huomioon testin aikaista vedellä kyllästymistä.

6.1.7 Lämmönjohtavuus

Lämmönjohtavuutta tutkittiin kuvan 26 mukaisella Tampereen yliopiston rakennusfysiikan tutkimusryhmän FOX304-lämpövirtalevyllä. Lämmönjohtavuuden määrittämisessä sovellettiin standardia SFS-EN 12667, ja sen tuloksena saatiin lämmönjohtavuus λ .



Kuva 26. Lämmönjohtavuusmittausten testinäyte tasapainottumassa kosteuspitoisuuteen (vas.) ja lämmönjohtavuuden mittauksessa käytetty FOX304-mittalaite (oik.). (Kuva: Juho Lautala)

Lämmönjohtavuuden mittausta varten valmistettiin kolme yksittäistestinäytettä $240 \cdot 240 \cdot 100 \text{ mm}^3$ laatikoihin, jotka pyrittiin saamaan mahdollisimman täyteen kehystä ravistelemalla. Tämän jälkeen testinäytteet vietiin tasapainottumaan erilliseen huoneeseen.

Aluksi näytteet saavuttivat tasapainotilan 50 % suhteellisessa ilmankosteudessa (RH), minkä jälkeen tehtiin ensimmäiset mittaukset. Tämän jälkeen samojen näytteiden annettiin saavuttaa tasapainotila 93 % RH:ssa ja tehtiin toiset mittaukset. Suhteellinen ilmankosteus ilmaisee, kuinka paljon vesihöyryä ilma sisältää suhteessa siihen, kuinka paljon vesihöyryä ilma voi korkeintaan sisältää tietyssä lämpötilassa.

Testinäytteet asetettiin kuvassa 26 esitettyyn lämpövirtalevyllä, jonka pääosien, ylä- ja alalevyn, lämpötilat säädettiin eri suuruisiksi. Lämpötilaero valittiin riittävän suureksi, jotta tulokset olisivat luotettavia. Levyjen välille muodostui lämpötilagradientti, josta aiheutuvan lämpövirran suuruutta mitattiin lämpövirtalevyillä. Lämmönjohtavuus laskettiin kaavalla

$$\lambda = \frac{q \cdot d}{\Delta T} \quad (10)$$

jossa λ on lämmönjohtavuus [$W/m \cdot K$], q on lämpövirran tiheys [W/m^2], d on näytteen paksuus [m] ja ΔT koekappaleen ylä- ja alapinnan välinen lämpötilaero [K].

Taulukko 9. FOX304-mittalaitteella määritetyt vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 lämmönjohtavuuden arvot. λ on lämmönjohtavuus, Φ on kosteusolosuhteet, T_A on alalevyn lämpötila, T_Y on ylälevyn lämpötila ja ΔT lämpötilaero.

Näyte	Φ (% RH)	T_A (°C)	T_Y (°C)	ΔT (K)	λ (W/m · K)
VK114	50	5	15	10	0,119
	50	10	30	20	0,127
	93	0	10	10	0,132
	93	10	20	10	0,146
	93	10	30	20	0,156
VK124	50	5	15	10	0,116
	50	10	30	20	0,122
	93	0	10	10	0,128
	93	10	20	10	0,141
	93	10	30	20	0,152

Taulukossa 9 on esitetty vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 yksittäistestinäytteiden lämmönjohtavuuksien keskiarvot eri kosteus- ja lämpötilaolosuhteissa. Lämmönjohtavuus määritettiin 50 % ja 93 % RH olosuhteissa tasapainokosteuden saavuttaneille näytteille. Mittaukset toteutettiin 50 % RH:ssa kahdella lämpötilaerolla ja 93 % RH:ssa kolmella lämpötilaerolla. Lämpötilaerona korkeammassa RH:ssa ja matalammassa lämpötilassa käytettiin 10 °C, jotta kosteuden tiivistymisestä aiheutuva virhe saataisiin minimoitua.

6.1.8 Jäätymis-sulamiskestävyys

Jäätymis-sulamiskestävyys kuvaa materiaalin ominaisuuksia olosuhteissa, joissa se altistuu toistuvasti jäätymiselle ja sulamiselle. Testillä voidaan simuloida materiaalin pitkäaikaikäkäyttämistä vuodenaikojen ja olosuhteiden vaihdellessa. Jäätymis-sulamiskestävyys määritettiin standardin SFS-EN 1367-7 mukaan altistamalla testinäytteet 20 peräkkäiselle jäädytykselle ja sulatukselle, ja sen tuloksena saadaan pakkasrapautumista kuvaava massanmenetys FL .



Kuva 27. Jäädytys-sulatuskokeen aikainen testinäytteiden kyllästämisen ja sulatus (vas.) sekä ylimääräisen veden valuttaminen pois (oik.). (Kuva: Juho Lautala)

Aluksi laboratorionäyte jaettiin kolmeksi yksittäistestinäytteeksi, jotka kyllästettiin upottamalla ne 20 ± 3 °C ionivaihdettuun veteen $4 \pm 0,25$ tunniksi. Kuvassa 27 vasemmalla nähtävän kyllästämisen jälkeen testinäytteistä poistettiin ylimääräinen vesi valuttamalla niitä kuvassa 27 oikealla nähtävällä menetelmällä noin minuutin ajan. Standardista SFS-EN 1367-7 poikettiin siten, että testinäytteitä ei pesuseulottu testin aluksi, vaan ainoastaan kuivaseulottiin. Standardista poikettiin myös siten, että testin aikana näytteitä ei valutettu erillisellä seulalla, vaan näyteastioiden päälle laitettiin pienen silmäkoon verkot, jotka estivät kiintoainesta poistumasta näytteistä valutuksen aikana. Standardin SFS-EN 1367-7 mukaisesti verkon silmäkoko oli pienempi kuin 2 mm. Poikkeavilla järjestelyillä pyrittiin vähentämään menetelmän työläyttä ja ehkäisemään mekaanisesta rasituksesta aiheutuvaa hienonemista testinäytteissä.

Jäädytys-sulatussykli koostui jäädytys- ja sulatusvaiheesta. Jäädytysvaiheessa näyteastiaan tasanaisesti levitetyt vedellä kyllästyneet testinäytteet vietiin vähintään neljäksi tunniksi pakastimeen, jonka lämpötila oli $-17,5 \pm 2,5$ °C. Sulatusvaiheessa näyteastiat otettiin pakastimesta ja astiat täytettiin 20 ± 3 °C ionivaihdetulla vedellä. Testinäytteiden annettiin olla astiassa vähintään tunnin ajan, minkä jälkeen niitä valutettiin noin minuutin ajan. Jäädytys- ja sulatusvaiheesta koostuvia syklejä toistettiin 20 kappaletta. Viimeisen sulatusvaiheen päätteeksi verkot poistettiin ja näytteet märkaseulottiin 2 mm seulalla standardin SFS-EN 1367-7 mukaisesti. Lopuksi näytteet uunikuivattiin 105 ± 5 °C lämpötilassa vakiomassaan ja punnittiin.

Standardin SFS-EN 1367-7 mukaisesti testinäytteiden annettiin olla tarvittaessa pakastimessa pidemmän aikaa, kuten viikonlopun yli, mutta sulatusaika vedessä pyrittiin pitämään mahdollisimman lyhyenä eikä näytteitä pidetty vedessä tarpeettoman pitkiä aikoja. Testinäytteiden massanmenetys laskettiin kaavalla

$$FL = \frac{m_{d1}}{m_{d2}} \cdot 100 \quad (11)$$

jossa FL on massanmenetys jäätymis-sulamisasituksesta [%], m_{d1} on testinäytteen kuivamassa ennen testiä [g] ja m_{d2} testinäytteen kuivamassa testin lopussa [g].

Jäädytys-sulatuskokeita tehtiin yksi vaahtokuonamurske-erälle VK114 ja kaksi vaahtokuonamurske-erälle VK124. Vaahtokuonamurske-erän VK114 testissä ei havaittu mitään poikkeavaa, mutta vaahtokuonamurske-erän VK124 ensimmäisen jäädytys-sulatuskokeen lopussa havaittiin, että testinäytteiden pohjalle oli muodostunut sulamaton jääkerros. Sulamattoman jääkerroksen aiheuttaman mittausepävarmuuden vuoksi vaahtokuonamurske-erän VK124 jäädytys-sulatuskoe päätettiin uusida. Vastaava käyttäytyminen toistui kuitenkin myös vaahtokuonamurske-erän VK124 toisessa jäädytys-sulatuskokeessa. Tähän reagoitiin kasvattamalla seuraavien syklien sulatusaikoja reilusti, jotta testinäytteet saatiin sulamaan kokonaan jokaisessa sulatusvaiheessa.



Kuva 28. Vaahtokuonamurske-erän VK124 testinäyte ensimmäisen jäädytys-sulatuskokeen jälkeen (vas.) ja vaahtokuonamurske-erän VK124 testinäyte toisen jäädytys-sulatuskokeen jälkeen (oik.). (Kuva: Juho Lautala)

Kuvassa 28 vasemmalla on vaahtokuonamurske-erän VK124 yksittäistestinäyte ensimmäisen jäädytys-sulatuskokeen jälkeen, missä havaitaan muutaman sentin paksuinen jäinen kappale. Kuvassa 28 oikealla on vaahtokuonamurske-erän VK124 testinäyte toisen jäädytys-sulatuskokeen jälkeen, missä nähdään testinäytteen koostumuksen muuttuneen täysin.

Taulukko 10. Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 jäädytys-sulatuskokeessa määritetyt massanmenetykset FL.

Näyte	FL [%]
VK114	8,6
VK124 (Ensimmäinen testi)	16,4
VK124 (Toinen testi)	45,9

Taulukossa 10 on esitetty vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 keskimääräiset prosentuaaliset massanmenetykset jäädytys-sulatuskokeissa. Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 ensimmäinen jäädytys-sulatuskoe toteutettiin keskenään samalla tavalla. Vaahtokuonamurske-erän VK124 toisessa testissä sulatusaikoja kasvatettiin merkittävästi. Testien erot on kirjattu liitteen B.7 mittauspöytäkirjoihin.

6.1.9 Lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet

Kolmiakσιαalikokeissa sylinterin muotoiseen koekappaleeseen kohdistetaan aksiaalisymmetrinen jännitystila, millä pyritään simuloimaan luonnossa vallitsevia olosuhteita (Rantamäki, 2004, p. 134). Syklisessä kolmiakσιαalikokeessa koekappaleeseen kohdistetaan pystysuuntaisia syklisiä jännityspulsseja, mikä simuloi liikennekuormitusta tai muuta toistuvaa kuormitusta (Ehrola, 1996, p. 194). Staattisessa kolmiakσιαalikokeessa koekappaletta puristetaan kokoon tasaisella nopeudella yleensä murtoon asti, ja sen avulla saadaan tietoa materiaalin lujuudesta (Rantamäki, 2004, pp. 122–135). Tässä työssä syklinen ja staattinen kolmiakσιαalikoe tehtiin peräkkäin samoille koekappaleille kuvassa 29 nähtävällä Tampereen yliopiston kuormituslaitteistolla.



Kuva 29. Kolmiakσιαalikoelaitteisto ja näyteselli (vas.), antureilla varustettu kolmiakσιαalikokeen koekappale näytesellissä (kesk.) ja kolmiakσιαalikokeen koekappaleen tiivistäminen (oik.). (Kuva: Juho Lautala)

Syklisessä kolmiakσιαalikokeessa mukailtiin standardia SFS-EN 13286-7:en 2004, ja sen tuloksena saatiin jäykkyysmoduuli M_r , joka kuvaa materiaalin kykyä vastustaa siihen kohdistuvien ulkoisten voimien aiheuttamia muodonmuutoksia (SFS-EN 13286-7:en 2004). Staattisessa kolmiakσιαalikokeessa mukailtiin standardia SFS-EN ISO 17892-8, ja sen tuloksena saatiin lujuusparametrit, joita ovat pääasiallisesti karkearakeisissa maalajeissa lujuuden muodostava kitkulma ϕ sekä pääasiallisesti hienorakeisissa maalajeissa lujuuden muodostava koheesio c .

Kolmiaksiaalikokeet aloitettiin koekappaleiden valmistamisella. Aluksi uunikuivattu testinäyte kostutettiin ionivaihdetulla vedellä, ja kosteuden annettiin tasoittua vuorokauden ajan suljetussa tilassa. Koekappale rakennettiin lisäämällä testinäytettä kumikalvon sisälle kauhalla, jonka vetoisuus oli noin litra. Kauhallisten välissä koekappaletta sullottiin hyvin kevyesti naputtelemalla $50 \cdot 100 \text{ mm}^2$ puupalikalla. Lopuksi tiivistämättömän koekappaleen pinnalle laitettiin suodatinkangas, jonka päälle levitettiin noin 90 mm kerros tasaussoraa. Tällä pyrittiin ehkäisemään koekappaleen liiallista vaurioitumista tiivistyksen aikana. Koekappaleet tiivistettiin täryttämällä niitä 1–5 sekunnin jaksoissa kuvassa 29 nähtävällä täryttimellä. Vaahtokuonamurske-erästä VK114 tehtyä koekappaletta tiivistettiin yhteensä 15 sekuntia ja vaahtokuonamurske-erästä VK124 tehtyä koekappaletta yhteensä 8 sekuntia. Lopuksi tasaushiekka ja suodatinkangas poistettiin ja koekappaleen pinta tasoitettiin vielä yhdellä 1–2 sekunnin mittaisella tärytyspurskeella. Valmiiden koekappaleiden korkeus oli noin 400 mm ja halkaisija noin 200 mm.

Koekappaleille tehtiin syklinen kolmiaksiaalikoe standardin SFS-EN 13286-7:en 2004 mukaan, josta menetelmäksi valittiin Method B. Kyseisessä menetelmässä aksiaalinen deviatorinen jännitys vaihtelee syklisesti, mutta sellipaine pysyy vakiona. Deviatorinen jännitys on suurimman pääjännityksen eli pystysuoran pääjännityksen σ^1 ja pienimmän pääjännityksen eli sellipaineen σ^3 erotus. Aluksi koekappaleisiin kohdistettiin noin 1 000 esikuormituspulssia, joiden aikana palautumattomat muodonmuutokset olivat melko pieniä ja stabiloituivat nopeasti. Varsinaisessa kuormitusvaiheessa käytettiin *Low stress level* -kuormitussarjaa, josta toteutettiin liitteen B.8 mukaisesti vain osa kuormitusyhdistelmistä koekappaleen partikkeleiden liiallisen murskautumisen välttämiseksi. (SFS-EN 13286-7:en 2004) Mittaustuloksiin tehdyn matemaattisen sovituksen jälkeen tiettyä jännitystasoa vastaava jäykkyysmoduuli saatiin laskettua kaavasta

$$M_r = k_1 \theta_0 \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)^{k_2} \quad (12)$$

jossa M_r on resilient-moduuli eli jäykkyysmoduuli [MPa], k_1 on moduuliluku, k_2 on jännityseksponentti, θ_0 on vertailuluku [100 kPa] ja θ pääjännitysten summa [kPa].

Taulukossa 11 on esitetty syklisistä kolmiaksiaalikokeista saadut tulokset. Materiaaliparametrien k_1 ja k_2 avulla laskettiin jäykkyysmoduulien arvot pääjännitysten summille 100 kPa ja 200 kPa. Pääjännitysten summien arvot valittiin sen perusteella, minkä arvioidaan vastaavan olosuhteita vaahtokuonamurskeen tulevilla käyttökohteilla.

Taulukko 11. Syklisistä kolmiaksiaalikokeista määritetyt materiaaliparametrit eli moduuliluku k_1 ja jännityseksponentti k_2 sekä jäykkyysmoduuli M_r pääjännitysten summilla 100 kPa ja 200 kPa.

Näyte	k_1	k_2	$M_{r,\theta = 100 \text{ kPa}} [\text{MPa}]$	$M_{r,\theta = 200 \text{ kPa}} [\text{MPa}]$
VK114	781	0,322	78	98
VK124	826	0,370	83	107

Syklisen kuormituksen jälkeen koekappaleille tehtiin kyllästämättömänä moniportainen avoin staattinen kolmiaksiaalikoe 20, 40 ja 80 kPa sellipaineilla. Avoimessa kolmiaksiaalikokeessa huokosvesi poistuu näytteestä vapaasti. Koekappaletta kuormitettiin pystysuoralla tasaisesti

kasvavalla voimalla eli deviatorisella jännityksellä ja kuormitus keskeytettiin hieman ennen murtoa 20 ja 40 kPa sellipaineilla. Murtotilan läheneminen arvioitiin pystysuoran jännityksen vakiintumisen perusteella. Viimeisellä 80 kPa sellipaineella koekappaletta kuormitettiin joko murtoon saakka tai kunnes koekappaleeseen kiinnitettyjen siirtymäantureiden maksimiraja-arvo saavutettiin. Pystysuoran pääjännityksen ja sellipaineen perusteella piirrettiin Mohrin ympyrät, joihin sovitettiin suora. Lujuusparametrit määritettiin kaavalla

$$\tau_f = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (13)$$

jossa τ_f on leikkauslujuus [kPa], c on koheesio [kPa], σ on normaalijännitys [kPa] ja φ kitkakulma [°].

Koheesio c saatiin kohdasta, jossa eri pääjännitysten tasoilla määritettyjä Mohrin ympyröitä sivuava suora leikkaa leikkausjännityksen akselin. Kitkakulma määritettiin trigonometrian avulla suoran kulmakertoimesta.

Rakeisella materiaalilla kasakitkakulma kuvastaa materiaalin todellista käyttäytymistä ja sillä tarkoitetaan materiaalin luonnollista kaatumiskulmaa kasalle läjitettäessä. Kasakitkakulma määritettiin siten, että jokaista Mohrin ympyrää sivuamaan piirrettiin suora, jonka lähtöpiste asetettiin origoon. Tämän jälkeen kasakitkakulman arvot laskettiin kaavalla 13.

Taulukko 12. Staattisista kolmiaksaalikokeista vaahtokuonamurske-erille VK114 ja VK124 määritetyt lujuusparametrit eli kitkakulma φ ja koheesio c sekä kasakitkakulma φ_k eri sellipaineiden σ^3 arvoilla.

Näyte	Lujuusparametrit		Kasakitkakulma	
	c [kPa]	φ [°]	σ^3 [kPa]	φ_k [°]
VK114	20,8	34,9	20	50
			39	41
			79	33
VK124	13,2	40,6	20	50
			40	40
			80	31

Taulukossa 12 on esitetty staattisilla kolmiaksaalikokeilla vaahtokuonamurske-erille määritetyt lujuusparametrit. Lujuusparametrien määrittäminen on esitetty liitteessä B.8 ja kasakitkakulmien määrittäminen liitteessä B.8.1. Kasakitkakulman huippuarvot ovat todennäköisesti hieman optimistiset ylimääräisen tiivistymisen vuoksi.

6.1.10 Kokoonpuristuvuus ja puristuslujuus

Kokoonpuristuvuuden ja puristuslujuuden määrittämisessä näyte tiivistetään teräsastiaan täryttämällä, minkä jälkeen näytettä kuormitetaan aksiaalisesti tasaisella tahdilla jäykässä astiassa. Kokeessa saadaan tietoa näytteen tiivistymisestä ja näytteen jännitys-muodonmuutoskäyttäytymisestä. Kokoonpuristuvuus ja puristuslujuus määritettiin standardia SFS-EN 1097-11 mukaillen ja sen tuloksena saatiin kokoonpuristuvuus C ja puristuslujuus CS eri muodonmuutostasoilla. Kuvassa 30 on kokoonpuristuvuuden ja puristuslujuuden määrittämisessä käytetty laitteisto.



Kuva 30. Kokoonpuristuvuuden ja puristuslujuuden määrittämisessä käytetty laitteisto. (Kuva: Juho Lautala)

Aluksi valmistettiin kolme yksittäistestinäytettä, jotka olivat tilavuudeltaan noin 3,1 litraa. Teräsastia täytettiin näytteellä ja pinta tasattiin varovasti siten, että näyte ei tiivistynyt. Näytteen massa ja korkeus mitattiin. Tämän jälkeen teräsastia näytteineen siirrettiin tärypöydälle ja testinäytteen päälle asetettiin massaltaan 6353,5 g alumiininen painolevy. Testinäytettä tärytettiin 180 ± 5 sekuntia, minkä jälkeen mitattiin näytteen korkeus tiivistymisen jälkeen. Teräsastia laitettiin hydrauliseen prssiin ja sitä kuormitettiin tasaisesti kasvavalla voimalla. Kuormitusta kasvatettiin, kunnes näyte oli kokoonpuristunut 10 % tiivistyksen jälkeisestä tilanteesta. Kokoonpuristumaa ja kuormittavaa voimaa mitattiin jatkuvatoimisesti.

Taulukko 13. Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 kokoonpuristuvuus C tiivistettäessä sekä puristuslujuus CS muodonmuutostasoilla 2 % ja 10 %.

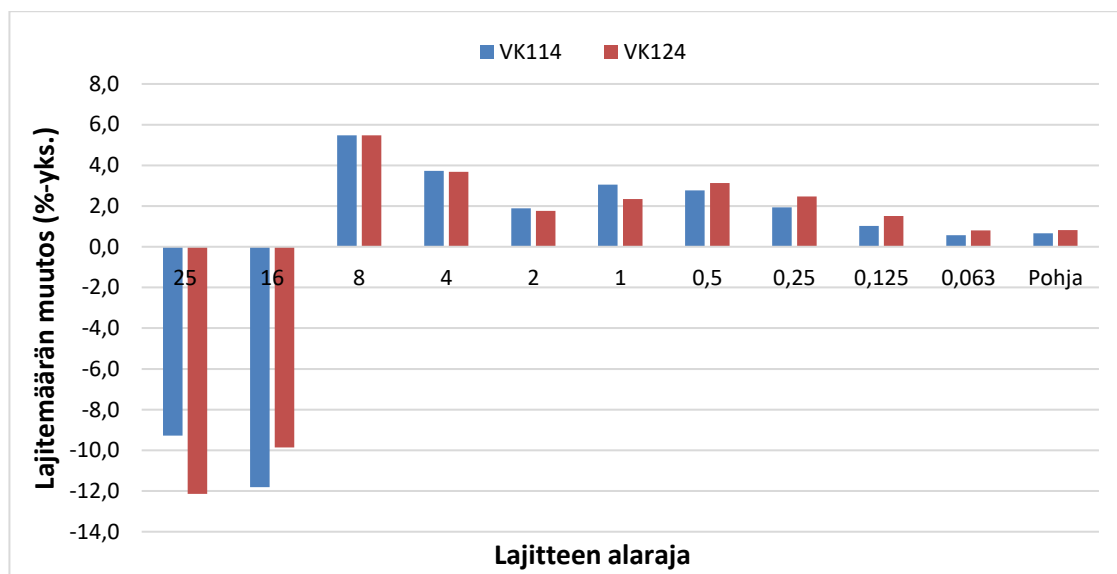
Näyte	C [%]	CS_2 [MPa]	CS_{10} [MPa]
VK114	18,7	0,267	0,632
VK124	20,4	0,233	0,548

Taulukossa 13 on esitetty vaahtokuonamurske-erien kokoonpuristuvuuden ja puristuslujuuden arvot. Kokoonpuristuvuus C laskettiin kaavalla 9, ja se kuvaa vaahtokuonamurskeen tiivistymistä, kun testinäytteen päälle asetettiin paino ja sitä tiivistettiin täryttämällä. Puristuslujuus CS_2 ilmaisee pystysuuntaisen jännityksen, joka tarvittiin 2 % muodonmuutokseen tiivistetyssä näytteessä. CS_{10} ilmaisee pystysuuntaisen jännityksen, joka tarvittiin 10 % muodonmuutokseen tiivistetyssä näytteessä. Vaahtokuonamurske-erän VK124 kolmannella yksittäistestinäytteellä kuormitusnopeus kasvoi yllättäen ja 10 % muodonmuutostaso ylittyi, mikä voidaan nähdä liitteestä B.8.

6.1.11 Hienoneminen

Hienoneminen muuttaa materiaalin rakeisuutta, mikä vaikuttaa materiaalin teknisiin ominaisuuksiin ja rakenteen toimivuuteen. Hienonemista tutkittiin vertailemalla lajitepitoisuuden muutoksia rakeisuusmäärittämisestä ennen kuormitusta ja kuormituksen jälkeen. Vaahtokuonamurskeen hienonemista kuormitettuna tutkittiin puristuslujuuden ja kokoonpuristuvuuden määrittämisajan aikana.

Aluksi määritettiin tutkittavien yksittäistestinäytteiden rakeisuus. Tämän jälkeen poistettiin seulonnan aikana muodostuneet alle 2 mm rakeet ja tehtiin puristuslujuuden ja kokoonpuristuvuuden määrittäminen kappaleen 6.1.10 mukaisesti. Lopuksi yksittäistestinäytteiden rakeisuus määritettiin uudestaan. Rakeisuusmäärittämis tuloksista laskettiin kuormituksesta aiheutunut prosentuaalinen massan muutos kullakin seulalla. Hienoneminen on esitetty kuvassa 31.



Kuva 31. Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 hienoneminen eli rakeisuuden muutos 2–32 mm lajitteessa.

Kuvassa 31 palkit osoittavat vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 lajitteiden muutoksen massaprosenttiyksiköinä. Hienoneminen laskettiin molemmilla vaahtokuonamurske-erillä kolmen yksittäistestin tulosten keskiarvona. Kuvasta havaitaan, että karkeat 16–31,5 mm lajitteet hienonivat eniten, sillä niiden massassa tapahtui merkittävää negatiivista muutosta eli niiden osuus pieneni. Hienonemisen seurauksena syntyi eniten 4–16 mm lajitteita ja toiseksi eniten 0,25–4 mm lajitteita, mutta vain vähän hienorakeisia 0–0,25 mm lajitteita.

6.2 Kemialliset ominaisuudet

Vaahtokuonasta määritettiin kokonaispitoisuudet ja liukoisuudet. Kokonaispitoisuudet määritettiin haitallisia aineita sisältävistä raaka-aineista sekä vaahtokuonanäytteistä, jotka edustivat kaikkia vaahtokuonaeriä. Liukoisuudet määritettiin haitallisia aineita sisältävistä raaka-aineista sekä jokaisesta vaahtokuonaerästä erikseen. Liukoisuuksien yhteydessä määritettiin myös pH, Redox ja sähkönjohtavuus.

6.2.1 Kokonaispitoisuudet

Tässä työssä kokonaispitoisuuksilla tarkoitetaan testinäytteistä määritettävien potentiaalisesti haitallisten alkuaineiden pitoisuuksia (SFS-EN 11885, 2007). Kokonaispitoisuudet kuvaavat materiaalin sisältämää alkuaineiden määrää, mitä enempää materiaalista ei pysty liukenemaan missään aikayksikössä.

Testinäytteiden valmistuksessa sovellettiin standardia SFS-EN 15002. Aluksi testinäytteet hienonnettiin standardin SFS-ISO 11464 mukaan leikkaavalla myllyllä, leukamurskaimella ja kuula-myllyllä sopivaan raekokoon. Standardista poiketen testinäytteet hienonnettiin 1–2 μm partikkelikokoon. Tämän jälkeen näyte hajotettiin standardin SFS-EN 13657 mukaan kuningasvedellä mikroaaltouunissa. Esikäsitellyistä testinäytteistä määritettiin taulukon 14 mukaiset kokonaispitoisuudet.

Taulukko 14. Vaahtokuonamurskeen raaka-aineista ja vaahtokuonamurske-eristä määritetyt kokonaispitoisuudet.

Aine	Yksikkö	Näytteen pitoisuus			
		Lentotuhka	Pohjakuona	Vaahtokuona	Vaahtokuona
		12.4.2019	7.6.2022	19.4.2022	13.5.2022
Kuiva-aine	%	99,6	89,1	95,5	95,2
Al	mg/kg ka	N/A	39 000	41 000	36 000
As	mg/kg ka	4,9	140	61	57
Ba	mg/kg ka	N/A	4 000	4 600	3 500
Cd	mg/kg ka	0,82	<13	3,9	3
Co	mg/kg ka	N/A	640	400	350
Cr	mg/kg ka	17	800	510	640
Cu	mg/kg ka	21	4 500	5 000	3 900
Hg	mg/kg ka	N/A	0,31	0,3	0,2
Mo	mg/kg ka	6	52	52	42
Ni	mg/kg ka	210	2 800	1 300	730
Pb	mg/kg ka	<21	1 400	830	550
Sb	mg/kg ka	1,5	85	55	57
Se	mg/kg ka	N/A	4,4	4,1	<7,0
Sn	mg/kg ka	N/A	100	80	80
V	mg/kg ka	N/A	49	75	83
Zn	mg/kg ka	110	5 800	5 000	4 100
TOC	mg/kg ka	61 000	18 000	41 000	63 000
CN ⁻	mg/kg ka	N/A	1	<0,017	<0,2

N/A = Ei määritetty tai ei tiedossa (Not Assessed)

Kuiva-ainepitoisuus määritettiin uunikuivatuksella standardin SFS 3008 mukaan. Alkuaineet määritettiin kuningasvesiuuton jälkeen ICP-OES menetelmällä (induktiivisesti kytketty plasman optinen emissiospektroskopia) standardin SFS-EN ISO 11885 mukaan, paitsi elohopea (Hg), joka määritettiin kylmähöyryatomiabsorptiospektrometrialla (CV-AAS) Fortumin sisäisen LAB-0310 ohjeen mukaan. Orgaaninen kokonaishiili (TOC) määritettiin infrapunadetektorilla standardin SFS-EN 13137 mukaan. Syanidi (CN⁻) määritettiin jatkuvan virtauksen analysaattorilla (CFA) standardin SFS-EN ISO 14403-2 mukaan.

Taulukossa 14 on esitetty vaahtokuonalle ja sen raaka-aineille määritetyt kokonaispitoisuudet. Tutkitun materiaalin nimen alla on päivämäärä, jolloin kokonaispitoisuudet on määritetty. Vaahtokuonan kokonaispitoisuudet määritettiin kahdesta eri aikaan otetusta näytteestä. Kokonaispitoisuuksia ei määritetty jokaiselle erälle erikseen, koska erien valmistuksessa käytettiin samoja raaka-aineita ja haitallisia aineita sisältävien raaka-aineiden määrät olivat resepteissä samat. Poikkeuksena tähän olivat vaahtokuonamurske-erän VK134 kolmea viimeistä reseptiä, joissa sideaineiden määrää vähennettiin ja fillerin määrää kasvatettiin.

6.2.2 Liukoisuudet

Liukoisuustestien tarkoituksena on selvittää jätemateriaalien liukoisuusominaisuudet, koska kiinteistä materiaaleista vesikontaktin vaikutuksesta liukenevien aineiden on havaittu olevan päämekanismi potentiaalisen ympäristöriskin muodostumisessa. Liukoisuustestissä materiaali saatetaan kontaktiin uuttoliuoksen kanssa, jolloin osa materiaalin sisältämistä aineista uuttuvat. Vaahtokuonamurske-erien raaka-aineiden ja vaahtokuonamurske-erien liukoisuudet määritettiin standardin SFS-EN 12457-3 mukaan kaksivaiheisena ravistelutestinä, jossa testiannokselle tehdään kaksi erillistä uuttovaihetta. Kaksivaiheisessa liukoisuustestissä uuttoliuosten suhteet kiinteään ainekseen (L/S) ovat 2 l/kg ja 8 l/kg. (SFS-EN 12457-3, 2002)

Testinäytteiden valmistuksessa sovellettiin standardia SFS-EN 15002. Esikäsittelyvaiheessa testinäyte murskattiin alle 4 mm raekokokoan ja kuivattiin 40 celsiusasteessa. Tämän jälkeen näyte punnittiin suodatusastiaan ja siihen lisättiin ionivaihdettua vettä, kunnes L/S 2 suhde toteutui. Näytettä sekoitettiin 6 tuntia, minkä jälkeen näyteliuos suodatettiin 0,45 μm suodattimen läpi imusuodatuslaitteistolla. Vesi otettiin talteen ja laitettiin kylmäsäilytykseen. Suodatuksen jälkeen suodatinpaperi sakkoineen laitettiin takaisin suodatusastiaan ja vettä lisättiin, kunnes L/S 8 suhde toteutui. Tämän jälkeen näytettä sekoitettiin vielä 18 tuntia, minkä jälkeen näyteliuos suodatettiin uudestaan edellä mainitulla menetelmällä. Standardista SFS-EN 12457-3 poiketen L/S 2 ja L/S 8 näyteliuoksia ei mitattu erikseen, vaan liukokset yhdistettiin, minkä jälkeen siitä mitattiin liukoisuudet. Tällä vähennettiin laboratorioanalyysien määrää ja saatiin suuntaa antavat tulokset materiaalien liukoisuuksista.

Näytteistä määritettiin taulukon 15 mukaiset liukoisuusominaisuudet. Alkuaineet määritettiin ICP-OES:lla standardin SFS-EN ISO 11885 mukaan. Fluoridin (F^-), kloridin (Cl^-) ja sulfaattien liukoisuudet (SO_4^{2-}) määritettiin ionokromatografilla standardin SFS-EN ISO 10304-1 mukaan. Liuenneiden kiintoaineiden kokonaismäärä (TDS) määritettiin standardin SFS-EN 15216 mukaan suodattamalla, kuivaamalla ja punnitsemalla. Liennut orgaaninen hiili (DOC) määritettiin haihtumattoman orgaanisen hiilen (NPOC) menetelmällä standardin SFS-EN 1484 mukaan. Sähkönjohtavuus eli johtokyky, pH eli happamuus ja redox- eli hapettumis-pelkistymispotentiaali määritettiin elektrodeilla. Johtokyky määritettiin standardin SFS-EN 27888 mukaan, pH standardin SFS-EN 3021 mukaan ja redox standardin ISO 11271 mukaan. Ammoniumtyyppi ($\text{NH}_4\text{-N}$) määritettiin CFA:lla standardin SFS-EN 11732 mukaan.

Taulukko 15. Vaahtokuonamurskeen raaka-aineista ja vaahtokuonamurske-eristä eri ikäisinä määritetyt liukoisuudet. Tummanharmaa väri ilmaisee vähintään yhden MARA-asetuksen (843/2017) mukaisen käyttökohteen raja-arvon ylityksen.

Aine/ Omi- nai- suus	Yksikkö	Liukoisuus (L/S 2+8)							
		Pohja- kuona	Lento- tuhka	VK114	VK124	VK134	VK114	VK124	VK134
		90 vrk	N/A	28 vrk	28 vrk	28 vrk	90 vrk	90 vrk	90 vrk
Al	mg/kg ka	48	N/A	310	240	370	340	260	270
As	mg/kg ka	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Ba	mg/kg ka	0,53	2,9	0,57	0,9	0,43	0,53	0,54	0,5
Cd	mg/kg ka	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Co	mg/kg ka	<0,01	N/A	<0,01	<0,01	<0,01	<0,05	<0,05	<0,05
Cr	mg/kg ka	1,6	0,55	0,98	1	1,4	0,98	1	1,3
Cu	mg/kg ka	1,1	<0,050	0,56	0,55	0,86	0,5	0,56	0,73
Hg	mg/kg ka	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001
Mo	mg/kg ka	2,8	0,78	4,9	5	5	3,4	4,4	4
Ni	mg/kg ka	0,061	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050	<0,050
Pb	mg/kg ka	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Sb	mg/kg ka	0,4	<0,10	0,2	0,15	0,18	0,22	<0,10	0,19
Se	mg/kg ka	<0,50	0,12	0,12	<0,1	<0,1	<0,10	<0,10	<0,10
Sn	mg/kg ka	<0,1	N/A	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
V	mg/kg ka	<0,1	<0,1	0,57	0,34	0,47	0,68	0,64	0,58
Zn	mg/kg ka	0,063	<0,05	0,15	0,22	0,14	<0,05	<0,05	<0,05
F ⁻	mg/kg ka	<10	<100	25	21	17	21	25	11
Cl ⁻	mg/kg ka	3 050	1 350	1 620	1 500	2 690	1 350	1 490	2 230
SO ₄ ²⁻	mg/kg ka	8 720	16 000	2 900	2 270	3 030	2 550	762	2 900
TDS	mg/kg ka	26 000	N/A	13 000	12 000	13 000	11 000	12 000	12 000
DOC	mg/kg ka	544	<100	341	452	462	314	458	413
Johto- kyky	µS/cm	2 770	11 060	3 020	3 570	2 670	2 310	2 550	2 130
pH	-	10,7	12,6	11,9	12	11,7	11,6	11,7	11,4
redox	mV	12	-81	12	23	59	-14	-34	32
NH ₄ -N	mg/kg ka	<5,0	N/A	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0	<5,0

N/A = Ei määritetty tai ei tiedossa (Not Assessed)

ka = kuiva-aine

Taulukossa 15 on esitetty vaahtokuonamurske-erien raaka-aineista ja vaahtokuonamurske-eristä mitattujen haitallisten aineiden liukoisuudet raaka-aineiden ja vaahtokuonamurske-erien mukaan. Taulukossa on esitetty tutkitun näytteen ikä eli aika, joka on kulunut materiaalin muodostumisesta testaushetkeen. Pohjakuonan liukoisuusominaisuudet määritettiin 90 vuorokautta sen muodostumisen jälkeen, kun taas vaahtokuonamurske-erien liukoisuudet määritettiin sekä 28 että 90 vuorokautta erien valmistumisen jälkeen. Liukoisuudet määritettiin myös vaahtokuonamurske-erästä VK134, jonka teknis-mekaanisia ominaisuuksia ei tässä työssä tutkittu. Liukoisuuksia on verrattu liitteessä A esitettyihin MARA-asetuksen (843/2017) mukaisiin raja-arvoihin ja tummanharmaalla värillä on korostettu arvot, jotka ylittävät yhden tai useamman MARA-asetuksen mukaisen käyttökohteen raja-arvon.

7. TULOSTEN TARKASTELU

Tässä luvussa arvioidaan laboratoriotestauksessa saatuja tuloksia ja niiden luotettavuutta. Tuloksia verrataan vaahtokuonamursketta vastaavien Suomessa käytettävien kevytkiviainesten ominaisuuksiin, minkä lisäksi arvioidaan sen soveltuvuutta erilaisiin maarakentamisen käyttökohteisiin. Lopuksi esitellään suositeltavat jatkotutkimustarpeet.

7.1 Tulosten arviointi ja vertailu

Tässä kappaleessa arvioidaan ja vertaillaan vaahtokuonamurske-eristä tutkittuja ominaisuuksia keskenään sekä yleisimpiin Suomessa käytettäviin kevytkiviaineisiin ja yhdyskuntajätteen polton pohjakuonasta valmistettuun keinokiviainestuotteeseen. Kyseiset materiaalit ja niiden materiaaliominaisuudet on esitetty taulukossa 16. Tulosten vertailussa on huomioitava, että kaikkia testejä ei ole tehty samojen standardien mukaisesti.

Taulukko 16. Yhteenvedo vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 sekä vertailumateriaalien Foamit-vaahtolasimurskeen (Forsman et al., 2012; Köylijärvi, 2013; Uusioaines Oy, 2023), Leca-kevysoran (Pöysti, 2023a, 2023b; Saint-Gobain, 2019), Fill-R-tuhkarakeen (Rakennustietosäätiö, 2016) ja Gravo keinokiviaineksen (Österbacka, 2022b; Söderholm, 2020) materiaaliominaisuuksista.

Ominaisuus	Materiaali					
	VK114	VK124	Foamit	Leca-sora	Fill-R	Gravo
Rakeisuus [mm]	2–32	2–32	10–60	4–20/32	0–40	0–32
Kuivairtoteisyys [Mg/m^3]	0,56	0,51	0,21	0,26	1,0–1,1	N/A
Kiintoteisyys [Mg/m^3]						
- ρ_a	1,9	1,75	N/A	0,55	N/A	2,74
- ρ_{rd}	1,12	1,0	N/A	0,5	N/A	2,35
- ρ_{ssd}	1,53	1,42	N/A	0,6	N/A	2,49
Vedenimeytyminen [massa – %]						
- 24 h	36,8	43,0	N/A	< 20	N/A	6,1
- 28 vrk	N/A	N/A	~ 60	< 30	N/A	N/A
- 1 vuosi	N/A	N/A	~ 100	< 60	N/A	N/A
Vedenläpäisevyys ¹ k [m/s]	10^{-2}	10^{-2}	10^{-1}	$10^{-1} - 10^{-3}$	10^{-4}	10^{-6}
Vedenimeytymiskorkeus h_{kap} [m]	0,13	0,14	0,375	< 0,1	0,35	0,565
Puristuslujuus CS [kPa]						
- 2 % muodonmuutostaso	270	230	N/A	400	N/A	N/A
- 10 % muodonmuutostaso	630	550	300–400	750	N/A	N/A
Lujuusominaisuudet						
- Koheesio c [kPa]	34,9	46,0	29	10^2	N/A	89,0
- Kitkakulma ϕ [°]	20,8	13,2	12	31^2	N/A	42,3
- Kasakitkakulma ϕ_k (°)	33–45 ³	31–45 ³	36–40	33–40	40–45	42–43
Jäykkyyshmoduuli M_r [kPa]						
- Pääjännitysten summa 100	78	83	71 ⁴	135	N/A	N/A
- Pääjännitysten summa 200	98	107	114 ⁴	225	N/A	195
Jäätymis-sulamiskestävyys						
- Massanmenetys FL [massa – %]	8,6	16,4 / 45,9 ⁵	N/A	0,2	N/A	4,9–7,2
Lämmönjohtavuus λ [$W/m \cdot K$]	0,11–0,16	0,11–0,16	0,1–0,23	0,1–0,17	0,5–0,6	0,8–0,9
Happamuus pH	11,6–11,9	11,7–12	10,5	9–11	N/A	10,2

N/A = Ei määritetty tai ei tiedossa (Not Assessed)

ϕ_k = kasakitkakulma eli materiaalin todellista käyttäytymistä kuvaava kitkakulma. Läjitetäessä rakeinen materiaali asettuu sen mukaiseen kaatumiskulmaan.

ρ_a = näennäinen kiintoteisyys eli kuivan näytteen massan suhde sen syrjäyttämän vesimäärän massaansa sisältäen suljetut huokokset mutta ei avoimia huokosia.

ρ_{rd} = Uunikuivattu kiintoteisyys eli kuivan näytteen massan suhde sen syrjäyttämän vesimäärän massaansa sisältäen sekä avoimet että suljetut huokokset.

ρ_{ssd} = kylätetty ja pintakuivattu kiintoteisyys eli kuivassa näytteessä ja sen avoimissa huokosissa esiintyvän veden massan suhde sen syrjäyttämän vesimäärän massaansa sisältäen sekä avoimet että suljetut huokokset.

1) Ilmoitettu tarkkojen arvojen sijasta suuruusluokkana kymmenpotenssimuodossa.

2) Tulos edustaa materiaalin mobilisointua lujuutta 2 % aksiaalilla muodonmuutostasolla staattisessa kolmiaksisiaalikokeessa.

3) Vaahtokuonamurske-erien kasakitkakulman huippuarvoista on varmuuden vuoksi vähennetty 5° ylimääräisen tiivistymisen vuoksi.

4) Määritetty Foamitin tuotekortissa ilmoitettujen mitoitusarvojen perusteella takaisinlaskettuna eri pääjännitysten summille. (Uusioaines Oy, 2023)

5) Kaksi erillistä jäädäytys-sulatuskoetta, joiden tuloksissa on paljon epävarmuutta.

Vaahtokuonamurske-erät VK114 ja VK124 ovat sidosaineilla lujitettavia ja murskaamalla valmistettavia kevytkiviaineita. Vertailumateriaaleina ovat kierrätyslasista sintraamalla lujitettava ja murskaamalla valmistettava Foamit-vaahtolasimurske, savesta sintraamalla lujitettava ja sekoitusrakeistamalla valmistettava Leca-kevytsora, lentotuhkasta sidosaineilla lujitettava ja sekoitusrakeistamalla valmistettava Fill-R-tuhkaräe sekä käsittelystä yhdyskuntajätteen polton pohjakuonasta suhteittamalla eli eri pohjakuonalajitteiden keskinäisiä suhteita muuttamalla valmistettava keinokiviaines Gravo. Muista taulukon 16 materiaaleista poiketen Gravo ei ole kevytkiviaines.

Luokitusominaisuudet

Rakeisuudeltaan vertailtavat keinokiviainestuotteet vastaavat paljon toisiaan. Foamit on keskimäärin hieman karkearakeisempaa kuin vaahtokuonamurske. Leca-soran raekoko taas on keskimäärin hieman pienempi kuin vaahtokuonamurskeella, sillä nykyisin tuotannossa syntyy lähinnä 4–20 mm lajitetta (Pöysti, 2023a). Fill-R kevytkiviaineksen rakeisuus on lähimpänä vaahtokuonamurskeen rakeisuutta, mutta muista poiketen se sisältää myös hienorakeisen fraktion. Valmistusprosessi määrittelee kevytkiviainesten rakeisuuden, mutta niistä voidaan usein murskata tai seuloa haluttuja lajitteita.

Kuivairtoteiheydeltään vaahtokuonamurske-erä VK114 on hieman painavampaa kuin vaahtokuonamurske-erä VK124. Tiheyteen vaikuttavat reseptissä käytettyjen ainesosien määrät, joista vaahtolla on suurin vaikutus. Vaahtokuonamurske-erän VK124 valmistuksessa käytettiin enemmän vaahtoa kuin vaahtokuonamurske-erän VK114 valmistuksessa. Vaahtokuonamurskeen kuivairtoteiheyys on yli kaksinkertainen Foamitiin ja Leca-soraan verrattuna, joten vaahtokuonamurske ei ole yhtä tehokas materiaali kevennysrakenteissa. Mikroskooppikuvien perusteella vaahtokuonamurske-erät vaikuttavat sisältävän vähemmän huokosia kuin Leca-sora ja Foamit. Fill-R:iin verrattuna vaahtokuonamurske-erien kuivairtoteiheydet ovat kuitenkin huomattavasti pienemmät. Kuivairtoteiheyteen vaikuttavat myös esimerkiksi raemuoto ja raekokojakauma. Tavannaisten luonnonkiviainesten kuivairtoteiheydet ovat yleensä vähintään kolminkertaiset vaahtokuonamurskeeseen verrattuna.

Kiintoteiheyksissä on suurta vaihtelua eri materiaalien välillä. Vaahtokuonamurske-erä VK114 on hieman tiheämpää kuin vaahtokuonamurske-erä VK124. Leca-soran kiintoteiheyden arvot ovat huomattavasti vaahtokuonamurske-eriä pienemmät. Kiintoteiheksien osalta kevytkiviaineita ei voida kuitenkaan luotettavasti verrata toisiinsa, koska mittaustulokseen vaikuttaa testimenetelmässä kyllästämiseen käytettävä aika: kaikki kevytkiviainesten sisäiset huokokset eivät ehdi täyttyä 24 tunnin aikana ja eri materiaaleilla ne täyttyvät eri nopeudella.

Huokosrakenteessa ei havaittu merkittäviä eroja vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 välillä. Huokosten epäsäännöllinen muoto ja huokosten kokojakauma viittaavat siihen, että vaahtokuonassa tapahtuu huokosten yhdistymistä. Tämä saattaa johtua esimerkiksi liian karkeasta täyteaineesta, liian suuresta määrästä täyteainetta, lujittumisajasta tai vaahtotusaineen stabiiliudesta. Vaahtokuonamurskeen huokosrakenne on hyvin samankaltainen kuin Foamitilla, mutta Leca-soralla huokokset ovat säännöllisempiä, huokosten kokojakauma on tasaisempi ja pieniä huokosia on enemmän.

Hydrauliset ominaisuudet

Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 vedenläpäisevyydet ovat keskenään samaa suuruusluokkaa. Vedenläpäisevyyden havaitaan odotetusti pienenevän paineen kasvaessa, kun näyte tiivistyy ja rakeiden välinen huokostila pienenee. Muutokset vedenläpäisevyydessä ovat kuitenkin melko pieniä, mikä viittaa siihen, että vedenläpäisevyys pysyy hyvänä myös materiaalin tiivistyessä. Suuruusluokaltaan Foamitin ja Leca-soran vedenläpäisevyydet vastaavat vaahtokuonamurskeen vedenläpäisevyyttä. Gravoon ja Fill-R:iin verrattuna vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 vedenläpäisevyys on selvästi parempi.

Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 vedenimeytymiskorkeuksissa ei havaita suurta eroa. Vaahtokuonamurske-erän VK124 vedenimeytymiskorkeus on hieman suurempi kuin vaahtokuonamurske-erän VK114, mikä todennäköisesti johtuu hieman korkeammasta hienorakeisen aineksen määrästä. Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 vedenimeytymiskorkeudet ovat lähellä Leca-soran vedenimeytymiskorkeutta ja selvästi pienemmät kuin Foamitilla ja Fill-R:illä. Leca-soran vedenimeytymiskorkeus on pieni, koska ehjien rakeiden pinta on sintraantunut tiiviiksi eivätkä rakeet hienone helposti. Leca-sorassa hienorakeisen aineksen määrä on pieni, kun taas muissa materiaaleissa hienorakeista ainesta on enemmän tai niissä tapahtuu hienonemista.

Hydraulisista ominaisuuksista suurimmat erot vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 välillä havaitaan vedenimeytymisessä. Vaahtokuonamurske-erän VK124 vedenimeytyminen 24 tunnin jälkeen on keskimäärin noin 6 prosenttiyksikköä suurempi kuin vaahtokuonamurske-erällä VK114. Tämä johtuu todennäköisesti vaahtokuonamurske-erän VK124 pienemmästä kiintotihedystä ja yhdistyneiden huokosten suuremmasta määrästä. Leca-soran vedenimeytyminen on huomattavasti pienempi kuin vaahtokuonamurske-erillä ja Foamitilla. Vaahtokuonamurske-erien ja Foamitin korkean vedenimeytymisen syynä on todennäköisesti avoin ulkokuori ja yhdistyneet huokokset. Leca-soran kova sintraantunut ulkokuori ja suuri suljettujen huokosten määrä pienentävät sen vedenimeytymistä.

Lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet

Puristuslujuuden tuloksissa havaitaan selkeä ero vaahtokuonamurske-erien välillä. Vaahtokuonamurske-erän VK114 puristuslujuudet ovat suuremmat kuin vaahtokuonamurske-erällä VK124. Tulos on odotettu, sillä huokosbetonissa tiheyden on havaittu olevan suoraan verrannollinen lujuuteen. Vaahtokuonamurske-erien puristuslujuudet ovat paremmat kuin Foamitilla, mutta heikkommat kuin Leca-soralla. Mikroskooppitarkastelussa havaittiin, että vaahtokuonamurske-erien ja Foamitin huokokset ovat suurempia ja epäsäännöllisempiä kuin Leca-soralla, mikä osaltaan selittää heikomman puristuslujuuden. Leca-soran kova sintraantunut kuori ja rakeiden kestokyky murskautumista vastaan parantavat sen puristuslujuutta. Puristuslujuuteen vaikuttavat rakeen ominaisuuksien lisäksi myös rakeiden väliset voimat, jolloin rakeiden murskaantuminen pienentää puristuslujuutta.

Staattisessa kolmiaksiaalikokeessa määritetyistä lujuusominaisuuksista havaitaan, että vaahtokuonamurske-erällä VK114 on suurempi kitkakulma kuin vaahtokuonamurske-erällä VK124. Foamitin lujuusominaisuudet ovat vertailtavista kevytkiviaineksista heikoimmat, mutta ne ovat lähellä vaahtokuonamurske-erää VK124. Leca-soralla taas on suurempi kitkakulma kuin vaahtokuonamurske-erillä ja Foamitilla. Staattisten kolmiaksiaalikokeiden tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia keskenään, koska testejä ei ole tehty samalla tavalla.

Staattisista kolmiaksiaalikokeista saadut tulokset vaahtokuonamurske-erille, Leca-soralle ja Foamitille eivät myöskään täysin vastaa niiden todellista käyttäytymistä, koska karkearakeisen materiaalin rakeiden välillä vaikuttavia voimia ei voida kutsua koheesioksi. Erikoinen tulos johtuu siitä, että Mohrin ympyröiden avulla määritetyt lujuusarvot eivät ota huomioon partikkelita-son murtumista testinäytteissä. Materiaalien todellista käyttäytymistä voidaan kuvata kasakitkakulmalla, joka saadaan määritettyä Mohrin ympyröiden avulla, kun koheesio asetetaan nollassi. Vaahtokuonamurske-erillä on kevytkiviaineksista korkeimmat kasakitkakulman arvot, mutta vertailussa tulee ottaa huomioon, että samoille näytteille oli tehty syklinen kolmiaksiaalikoe ennen lujuusominaisuuksien määrittämistä. Vaahtokuonamurskeen hyviin kasakitkakulman arvoihin vaikuttavat siis kulmikkaan raemuodon lisäksi myös jonkin verran sen kuormitushistoria.

Aiemmasta lujuuskäyttäytymisestä poiketen syklisessä kolmiaksiaalikokeessa määritettyjen jäykkyyshuomion (M_r) arvojen osalta vaahtokuonamurske-erällä VK124 on hieman paremmat tulokset kuin vaahtokuonamurske-erällä VK114. Vaahtokuonamurskeen kaltaisessa pienen lujuuden materiaalissa testinäytteiden väliset erot saattavat kuitenkin helposti vaikuttaa tuloksiin. Vaahtokuonamurske-erien jäykkyyshuomion arvot ovat samaa suuruusluokkaa kuin Foamitilla. Leca-soran jäykkyyshuomion arvot ovat selvästi paremmat kuin muilla, mikä johtuu todennäköisesti sen kovien rakeiden kyvystä vastustaa murskaantumista. Syklisen kolmiaksiaalikokeiden tulokset eivät myöskään ole täysin vertailukelpoisia keskenään, koska testejä ei ole tehty samalla tavalla.

Vaahtokuonamurske-erien tiivistymistä ei testattu erikseen, mutta siitä saatiin tietoa kokoonpuristuvuuden ja vedenläpäisevyyden määrittämisen yhteydessä. Vedenläpäisevyyshuomion testissä löyhästi asetettua näytettä puristettiin paineilman avulla kasaan. Puristuslujuuden ja kokoonpuristuvuuden määrittämisessä näytteiden päälle asetettiin painolevy ja näytteitä tiivistettiin täryttämällä. Vedenläpäisevyyshuomion testissä vaahtokuonamurskenäytteet tiivistyivät noin 17–20 %, kun taas puristuslujuuden ja kokoonpuristuvuuden määrittämisen yhteydessä vaahtokuonamurskenäytteet tiivistyivät noin 18–22 %. Vaahtokuonamurskeen tiivistyminen vaikuttaisi olevan samaa suuruusluokkaa kuin Foamitilla, jolle on ilmoitettu tiivistyskerroimeksi 1,15–1,25 (Uusioaines Oy, 2023). Vaahtokuonamurskeen ja Foamitin tiivistymistä ei kuitenkaan suoraan voida verrata keskenään, koska vaahtokuonamurskeen tiivistymistä ei ole tutkittu oikealla tiivistyskalustolla.

Lämpötekniset ominaisuudet

Lämmönjohtavuudessa ei havaittu suurta eroa vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 välillä, mutta vaahtokuonamurske-erän VK124 lämmönjohtavuus on kaikissa testeissä järjestelmällisesti hieman pienempi kuin vaahtokuonamurske-erällä VK114. Tämän voidaan todeta johtuvan pääasiallisesti vaahtokuonamurske-erän VK124 suuremmasta ilmahuokosten määrästä. Kosteuspitoisuuden ja lämpötilan kasvun havaittiin kasvattavan lämmönjohtavuutta molemmissa vaahtokuonamurske-erissä. Tulokset vastasivat ennakko-odotuksia ja ne noudattavat kappaleessa 4.3.2 esille tuotuja havaintoja huokosbetonin lämmönjohtavuudesta.

Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 lämmönjohtavuuden arvot ovat samalla vaihteluvälillä Leca-soran ja Foamitin kanssa, joiden lämmöneristävyysominaisuudet ovat tunnetusti hyvät. Tulosten perusteella vaahtokuonamurske-erien vastaavuus lämmönjohtavuuden osalta voidaan olettaa suuruusluokaltaan samaksi kuin Foamitilla ja Leca-soralla. Tällöin lämmönjohtavuuden vastaavuuskerroin olisi $\alpha_i = 4$. Vaahtokuonamurske-erien lämmönjohtavuudet ovat huomattavasti pienemmät kuin Fill-R:llä. Lämmönjohtavuuskokeiden pienen mittakaavan vuoksi vaahtokuonamurskeelle saatuja tuloksia ei kuitenkaan voida käyttää suoraan mitoituksessa. Lämmönjohtavuuskokeissa materiaali tiivistettiin ainoastaan kevyesti täryttämällä, joten tilavuuspaino ei myöskään vastaa materiaalin tilavuuspainoa maarakenteessa.

Suurimmat vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 väliset erot havaittiin jäätymis-sulamiskestävyydessä. Vaahtokuonamurske-erän VK114 jäädytys-sulatuskokeen testinäytteet säilyttivät hyvin alkuperäisen rakenteensa. Vaahtokuonamurske-erän VK124 ensimmäisessä jäädytys-sulatuskokeessa massanmenetys oli suurempi, mutta melko lähellä vaahtokuonamurske-erän VK114 massanmenetystä. Vaahtokuonamurske-erän VK124 toisessa jäädytys-sulatuskokeessa testinäytteet menettivät lähes puolet massastaan, jolloin materiaalin koostumus ja rakeisuus muuttuivat täysin. Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 jäädytys-sulatuskokeiden tulokset eivät ole täysin verrannollisia keskenään, koska vaahtokuonamurske-erän VK124 ensimmäisen jäädytys-sulatuskokeen testinäytteissä oli sulamaton jääkerros ja toisessa jäädytys-sulatuskokeessa sulatusajat olivat huomattavasti pidemmät kuin muissa jäädytys-sulatuskokeissa. Leca-soraan verrattuna vaahtokuonamurske-erien jäätymis-sulamiskestävyys on heikompi.

Kappaleessa 4.3.3 käsiteltiin huokosbetonin kestävyysvaikutteita tekijöitä, joista lujuuden on arvioitu olevan merkittävin yksittäinen jäätymis-sulamiskestävyysvaikutteita vaikuttava tekijä. Toinen merkittävä kestävyysvaikutteita vaikuttava tekijä ovat veden välilliset ja välittömät vaikutukset. Vaahtokuonamurske-erän VK124 lujuus on heikompi kuin vaahtokuonamurske-erällä VK114, mikä osaltaan selittää vaahtokuonamurske-erien välisiä eroja jäätymis-sulamiskestävyydessä. Tämän lisäksi vaahtokuonamurske-erän VK124 hydrauliset ominaisuudet ovat heikommat kuin vaahtokuonamurske-erällä VK114. Vaahtokuonamurske-erän VK124 pahoin rapautuneet testinäytteet olivat toisessa jäädytys-sulatuskokeessa huomattavasti pidemmän aikaa veden kanssa tekemisissä kuin vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 ensimmäisten jäädytys-sulatuskokeiden näytteet, mikä havaitaan liitteen B.7 mittauspöytäkirjoista.

Routivuus

Materiaalin routivuutta voidaan arvioida sen ominaisuuksien avulla. Maalajin otaksutaan olevan routiva, kun sen kapillaarinen nousukorkeus ≥ 1 m. Tämän lisäksi materiaalin rakeisuuskäyrän perusteella voidaan arvioida materiaalin routivuutta. Vedenläpäisevyydellä ja luonnollisella vesipitoisuudella on myös vaikutusta materiaalin routivuuteen, mutta näille ei ole esitetty routivuuden arviointikriteereitä kirjallisuudessa. (Rantamäki, 2004, pp. 116–119)

Vaahtokuonamurske-erien vedenimeytymiskorkeus on selvästi alle routivuuden rajan ja vaahtokuonamurske-erien vedenläpäisevyys on hyvä. Vaahtokuonamurske-erien hienoainespitoisuus on pieni ja Rantamäen (2004, p. 118) esittämiin routivan maalajin rakeisuuskäyriin verrattuna kummarkaan vaahtokuonamurske-erän rakeisuuskäyrä ei sijoitu routivan maalajin rakeisuusalueelle. Vaahtokuonamurskeesta tehtyjen rakennekerrosten vesipitoisuutta todellisessa maarakenteessa ei ole vielä tutkittu, mutta laboratoriotestien perusteella vaahtokuonamurskeen vedenimeytyminen on suhteellisen korkea. Vaikka lyhytaikaisessa kokeessa vedenimeytymiskorkeus jää alle routivuuden rajan, saattavat materiaalin huokokset toimia kapillaarisena matriisina pitkäaikaisessa tilanteessa.

Vaahtokuonamurske-erien ominaisuuksiin perustuvan arvion mukaan materiaali ei ole routiva. Jäädytys-sulatuskokeissa kuitenkin havaittiin, että vaahtokuonamurske-erän VK124 testinäytteet alkoivat muodostaa sulamatonta jääkerrosta pian testien aloittamisen jälkeen ja vaahtokuonamurske-erän VK124 toisessa jäädytys-sulatuskokeessa testinäytteissä tapahtui suuri massanmenetys. Vastaavaa käyttäytymistä ei havaittu vaahtokuonamurske-erällä VK114, mutta on mahdollista, että vaahtokuonamurske-erät muuttuvat routiviksi ajan myötä. Myös materiaalin tiivistämisestä aiheutuvalla hienonemisella saattaa olla vaikutusta routivuuteen.

Kemialliset ominaisuudet

Kokonaispitoisuuksista havaitaan, että vaahtokuonareseptissä käytetty pohjakuona sisältää käsitteilyprosesseista huolimatta korkeita metallipitoisuuksia ja palamatonta orgaanista hiiltä.

Vaahtokuonareseptissä käytetty lentotuhka taas sisältää paljon palamatonta orgaanista hiiltä. Lentotuhkan ja pohjakuonan sekä vaahtokuonamurskenäytteiden kokonaispitoisuuksissa havaitaan vaihtelua, mikä todennäköisesti johtuu näytteenottopaikasta riippuvasta pitoisuusvaihtelusta sekä laboratoriotestien virhemarginaaleista. Kokonaispitoisuudet saattavat myös muuttua hieman ajan myötä esimerkiksi liukenemisen seurauksena.

Liukoisuusominaisuuksien osalta havaitaan, että kaikkien vaahtokuonamurske-erien haitta-aineiden liukoisuudet pääsääntöisesti laskevat raaka-aineiden liukoisuuksiin verrattuna. Tiettyjen haitta-aineiden, kuten molybdeenin, liukoisuudet kuitenkin hieman kasvavat. Molybdeenin liukoisuuden kasvu johtuu todennäköisesti pH:n kasvusta (Wahlström et al., 1999, p. 32). Liukoisuuk-sien kannalta haitallisimpien aineiden, kuten sulfaattien ja kloridien, liukoisten pitoisuuksien havaitaan kuitenkin pienenevän merkittävästi. Taulukosta 15 havaitaan, että vaahtokuonan raaka-aineissa useamman haitta-aineen liukoisuus ylittää merkittävästi liitteessä A esitettyjen MARA-asetuksen (843/2017) mukaisten käyttökohteiden raja-arvot ja raaka-aineet itsessään soveltuvat

vain muutamaaan käyttökohteeseen. Vaahtokuonamurske-erissä VK114 ja VK124 liukoisuudet ovat laskeneet niin paljon, että ne soveltuvat lähes kaikkiin MARA-asetuksen mukaisiin käyttökohteisiin. Ainoastaan vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 molybdeenin liukoisuuden kasvu raaka-aineisiin verrattuna rajoittaa tutkituilla vaahtokuonamurske-erillä käytön päälystettyihin kohteisiin.

7.2 Tulosten luotettavuus

Vaahtokuonamurskeen testauksessa usein tavanomaiselle kiviainekselle tarkoitettuja testistandardeja jouduttiin soveltamaan ja niihin tehtiin poikkeuksia. Välillä testauksessa jouduttiin myös käyttämään testimenetelmän edellyttämää poikkeavaa raekokoa. Poikkeuksia tehtiin pääasiassa siksi, että vaahtokuonamurske ei kestänyt kaikkia tavanomaisille materiaalille suunniteltuja testejä riittävän hyvin tai materiaali käyttäytyi testeissä odottamattomalla tavalla. Poikkeuksia tehtiin myös menetelmän työläyden helpottamiseksi ja tulosten saannin nopeuttamiseksi. Taulukossa 17 on esitetty erilaisia yksittäisten testien tulosten luotettavuuteen vaikuttavia tekijöitä.

Taulukko 17. Tulosten luotettavuus ja niihin vaikuttaneet tekijät yksittäisissä testeissä.

Testi	Tulosten luotettavuuteen vaikuttaneet tekijät
Jäädytys-sulatuskoe	Vaahtokuonamurske-erän VK124 näytteiden pohjalle alkoi muodostua sulamatonta jääkerros ja VK124 toisessa testissä näytteitä jouduttiin sulamattamaan huomattavan kauan.
Kiintotiheys ja vedenimeytyminen	Kaikki huokoset eivät ehtineet täyttyä vedellä 24 h aikana.
Syklinen kolmiaksauskoelake	Kuormitussarjasta jätettiin kuormitusportaita välistä, jotta näyte kestäisi myös staattisen kolmiaksauskoelakeen.
Staattinen kolmiaksauskoelake	Staattinen kolmiaksauskoelake tehtiin näytteille, jotka olivat kuormittuneet syklisen kolmiaksauskoelakeen aikana.
Kokoonpuristuvuus ja puristuslujuus	Siirtymää mitattiin vain yhdellä anturilla. Vaahtokuonamurske-erän VK124 kolmannella yksittäistestinäytteellä kuormitusnopeus kasvoi yllättäen, mikä johti 10 % muodonmuutostason ylitykseen.
Vedenläpäisevyys	Testinäytteisiin jäävät ilmakuplat pienentävät vedenläpäisevyyttä. Kiinteässä sellissä seinämän ja rakeiden välissä vesi pääsee virtaamaan paremmin kuin keskellä näytettä.
Vedenimeytymiskorkeus	Testinäytteitä ei punnittu kokeen suorituksen aikana, mikä saattaa aiheuttaa virhettä vedenimeytymisen päättymisen arvioinnissa. Näytteiden tiivistyminen vaihtelee.
Rakeisuus ja hienoneminen	Rakeisuusmäärityksessä tapahtui seulontahäviöitä ja pieniä virheitä punnituksissa.
Lämmönjohtavuus	Kontaktipintojen epätasaisuus, näytteen välille jääneet suuremmat ilmaraot, sisäisen konvektion vähäisyys pienellä kerrospaksuudella sekä korkeassa kosteuspitoisuudessa suuresta lämpötila-erosta aiheutuva kondensaatio olivat potentiaalisia virhelähteitä. Mittaukset tehtiin perätysten eli kosteuspitoisuus saattoi hieman muuttua kokeen aikana.
Kokonaispitoisuudet ja liukoisuudet	Näytteenoton edustavuus ja laboratoriotestien virhemarginaalit aiheuttivat epävarmuutta. Liitteessä B.9 on esitetty kemiallisten testien epävarmuudet.
Kuivairtitiheys	Näytteet jäähtyivät uunikuivauksen jälkeen 4 h ajan, jolloin ilman kosteuspitoisuus saattoi vaikuttaa hieman näytteiden massa.
Huokosrakenne	Valittujen näytteiden edustavuus.

Vaahtokuonaerissä havaittiin laadunvaihtelua, mikä ilmeni muun muassa siten, että suursäkkeihin valettujen vaahtokuonamassojen pintaosista lohkesi kovia ja kestäviä palasia, kun taas sisäosista lohkesi kevyempiä ja vähemmän kestäviä palasia. Vaahdon stabiiliuden hallinnassa ja tasaisessa levittymisessä oli haasteita pienellä koelaitteistolla. Tämän seurauksena myös huokosrakenteessa esiintyi vaihtelua. Testinäytteet pyrittiin kuitenkin valmistamaan mahdollisimman edustaviksi ottamalla näytteet tasaisesti eri puolilta suursäkkiä. Laboratorion pienen leukamurskaimen leuat olivat kuluneet eikä pienikokoisella leukamurskaimella valmistettava murske täysin vastaa ominaisuuksiltaan paremmalla murskauskalustolla valmistettavaa mursketta.

Materiaalina vaahtokuonamurske on hauras, joten siinä tapahtuu hienonemista. Ylimääräistä käsittelyä pyrittiin välttämään muun muassa pitämällä seulonta-ajat lyhyinä. Ennaltaehkäisevistä toimenpiteistä huolimatta materiaalissa esiintyi hienonemista, mikä aiheutti muun muassa pieniä muutoksia testinäytteiden rakeisuudessa ja kasvatti hienorakeisen aineksen määrää.

Testejä toteuttaneiden henkilöiden lukumäärällä on myös vaikutusta tulosten luotettavuuteen. Osaa testeistä oli toteuttamassa useampi henkilö, jolloin erot testistandardien tulkinnassa ja käytännön toteutuksessa ovat potentiaalinen virhelähde.

7.3 Vaahtokuonamurskeen soveltuvuus eri käyttökohteisiin

Tulosten perusteella arvioidaan vaahtokuonamurskeen soveltuvuutta kappaleessa 3.3 esitettyihin kevytkiviainesten potentiaalsiin käyttökohteisiin. Pääasiallisia käyttökohteita ovat kevennys-, kuivatus- ja routasuojausrakenteet. Liukoisuuksien osalta arvioidaan materiaalin soveltuvuutta liitteessä A esitettyihin MARA-asetuksen (843/2017) mukaisiin käyttökohteisiin.

Tavanomaisia kiviaineksia huomattavasti pienemmän kuivairtoteiheyden vuoksi vaahtokuonamurskeen voidaan todeta soveltuvan erilaisten kevennysrakenteiden, kuten siirtymärakenteiden, kevennettyjen penkereiden, täyttöjen ja taustatäyttöjen materiaaliksi. Suuren kasakitkuluman ansioista vaahtokuonamursketta voidaan käyttää myös jyrkissä luiskissa.

Suuntaa-antavien lämmönjohtavuuskokeiden perusteella vaahtokuonamurske-erien voidaan todeta soveltuvan routasuojausrakenteisiin. Vaahtokuonamurske-erien lämmönjohtavuudet ovat pienet ja vaahtokuonamurske-erät vastaavat eristävyydeltään Foamitia ja Leca-soraa. Tulokset on kuitenkin varmennettava suuremman mittakaavan lämmönjohtavuuskokeilla, jotka ottavat huomioon täysimittaisen rakenteen olosuhteet.

Hyvän vedenläpäisevyyden vuoksi vaahtokuonamurske soveltuu käytettäväksi kuivatusrakenteissa ja kapillaarisen nousukorkeuden puolesta vaahtokuonamurske soveltuu myös käytettäväksi kapillaarikatkona. Vaahtokuonamurskeen vedenimeytyminen saattaa kuitenkin rajoittaa materiaalin käyttöä kuivatusrakenteissa. Vaahtokuonamurske-erän VK124 jäädytys-sulatuskokeissa havaittiin mahdollista routimiseen viittaavaa käyttäytymistä ja testinäytteiden voimakasta rapautumista, jollaista ei kuitenkaan havaittu vaahtokuonamurske-erällä VK114. Routivuus ja hienoneminen saattavat myös rajoittaa materiaalin käyttöä kuivatusrakenteissa.

Vaahtokuonamurskeen liukoisuusominaisuuksista havaittiin, että yhden tai useamman MARA-asetuksen (843/2017) mukaisen käyttökohteen liukoisuuden raja-arvon ylittäviä yhdisteitä ovat sulfaatit, kloridit, fluoridit, kromi ja molybdeeni. Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 liukoisuudet laskevat valmistusprosessissa niin paljon raaka-aineisiin verrattuna, että materiaalit soveltuvat kaikkiin MARA-asetuksen mukaisiin käyttökohteisiin paitsi päällystämättömiin kenttärakenteisiin. Molybdeenin osalta vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 liukoisuudet kuitenkin kasvavat hieman raaka-aineisiin verrattuna, mikä rajaa käyttökohteet lopulta päällystettyihin kenttä- ja väylärakenteisiin sekä teollisuus- ja varastorakennusten pohjarakenteisiin. MARA-asetuksen mukaiset liukoisuuden raja-arvot on esitetty liitteessä A.

Tutkittujen teknis-mekaanisten ominaisuuksien osalta vaahtokuonamurske soveltuu työssä tarkasteltuihin käyttökohteisiin. Käyttökohteille on kuitenkin olemassa myös toimivuusvaatimuksia, joiden täyttymistä tässä työssä ei selvitetty. Vaahtokuonamurskerakenteiden toimivuus täytyy varmistaa oikeaa rakennetta vastaavilla täyden mittakaavan koerakenteilla. Vaahtokuonamurskeen osalta on edelleen epäselvää muun muassa materiaalin mahdollinen routivuus ja rapautuminen. Nämä tekijät saattavat rajoittaa vaahtokuonamurskeen käyttöä edellä mainituissa käyttökohteissa. Tässä kohtaa tutkimuksia ei voida varmuudella todeta vaahtokuonamurskeen soveltuvuutta edellä mainittuihin käyttökohteisiin, mutta tutkimustulosten perusteella vaahtokuonamurskeen ominaisuudet vaikuttavat lupaavilta muihin kevytkiviaineisiin verrattuna.

7.4 Jatkotutkimustarpeet

Tulosten perusteella vaahtokuonamurske vastaa materiaaliominaisuuksiltaan ja käyttäytymiseltään hyvin paljon vaahtolasimursketta. Tämän vuoksi erityisesti jatkotutkimusten alkuvaiheissa on suositeltavaa hyödyntää vaahtolasin suunnitteluohjeita ja työtekniikkaa. Lisätietoa löytyy esimerkiksi Emilia Köylijärven diplomityöstä (Köylijärvi, 2013) sekä Uusioaines Oy:n suunnitteluohjeista (Forsman et al., 2012; Uusioaines Oy, 2023).

Tärkeimpänä jatkotutkimuskohteena ovat koerakenteet, joilla voidaan tutkia vaahtokuonamurskeen teknis-mekaanisia ominaisuuksia ja pitkäaikaiskestävyyttä vaahtokuonamurskeen suunnitelluissa käyttökohteissa sekä kehittää materiaalille soveltuvia työtekniikoita. Lisäksi saadaan tärkeää tietoa materiaalin liukoisuuskäyttäytymisestä. Koerakenteesta saatavaa tietoa tarvitaan mahdollisesti myöhemmin haettavaa Väyläviraston materiaalihyväksyntää varten.

Tässä työssä ei tutkittu materiaalin tiivistämistä. Ennen koerakentamista tulisi materiaalille toteuttaa koetiivistys, josta saadaan tietoa muun muassa oikeanlaisen tiivistyskaluston valinnasta, kerralla tiivistettävien kerrosten paksuudesta, tarvittavien tiivistyskertojen määrästä ja materiaalin hienonemisesta tiivistettäessä. Koetiivistys voidaan toteuttaa joko erillisenä rakenteena tai koerakenteen yhteyteen rakennettavalla koetiivistyskentällä, mutta suositeltavaa olisi toteuttaa koetiivistys erillisenä rakenteena ennen koerakentamista.

Koerakenteeseen rakennetaan vertailurakenteet, jotka ovat hyvin tunnetusta rakennusmateriaalista valmistettuja rakenteita, joihin tutkittavan materiaalin ominaisuuksia voidaan verrata. Hyviä materiaaleja vaahtokuonamurskeen vertailurakenteisiin ovat vastaavanlaiset keinotekoiset kevytkiviainekset, kuten vaahtolasimurske ja Leca-sora, sekä luonnon kiviainekset, kuten suodatinhiekkä.

Koerakenteeseen asennetaan lämpötila-anturit, hienonemissäkit ja pohjavesiputki tai lysimetri. Lämpötila-antureilla voidaan määrittää lämpötilaprofiili ja ne tulee asentaa vähintään jokaiseen erilaiseen koerakenteen osaan. Hienonemissäkeillä voidaan tutkia koerakenteen aikana käytöstä johtuvaa hienonemistä ja ne sijoitetaan vaahtokuonamurskerakenteissa sellaiselle syvyydelle, jossa vaahtokuonamursketta on suunniteltu käytettävän. Pohjavesiputkella tai lysimetrillä voidaan tutkia rakenteen läpi suotautuvien vesien laatua ja ne sijoitetaan vaahtokuonarakenteeseen. Koerakenteista pyritään saamaan tietoa ainakin seuraavista rakenneominaisuuksista:

- kantavuus
- tiivistyvyys
- routiminen
- hienoneminen
- lämpötekniset ominaisuudet
- liukoisuudet
- rakenteen vauriot

Taulukossa 18 on esitetty tarkemmin ominaisuudet ja menetelmät, joilla koerakennetta tutkitaan. Taulukossa on eriteltynä ennen rakentamista, rakentamisen aikana ja rakentamisen jälkeen tutkittavat ominaisuudet.

Taulukko 18. *Jatkotutkimusvaiheessa koerakenteesta määritettävät ominaisuudet ja niiden määrittämenetelmät.*

Vaihe	Ominaisuus	Menetelmä
Ennen koerakenteen rakentamista	Rakeisuus	Kuivaseulonta
	Vesipitoisuus	Uunikuivaus
	Sullontaominaisuudet	Proctor-koe / ICT-kiertotiivistys
	Liukoisuudet	Liukoisuusmääritys
Koerakenteen rakentamisen aikana	Rakeisuus	Kuivaseulonta
	Vesipitoisuus	Uunikuivaus
	Kantavuus	Levykuormituskoe / Pudotuspainolaite
	Tiivistyminen	Vesi- tai hiekkavolymetri / Troxler
Rakentamisen jälkeen eli koerakenteen käytön aikana tai sen purkuvaiheessa	Rakeisuus	Kuivaseulonta
	Vesipitoisuus	Uunikuivaus
	Kantavuus	Levykuormituskoe / Pudotuspainolaite
	Routivuus	Vaaitus
	Suotovesien laatu	Pohjavesiputki / Lysimetri
	Lämmöneristävyys	Lämpötilasensorit
	Roudan syvyys	
	Vauriot	Valokuvaus ja visuaalinen arviointi

Ennen rakentamista tutkittavia ominaisuuksia ovat rakeisuus, vesipitoisuus, sullontaominaisuudet ja liukoisuudet. Sullontaominaisuuksia, kuten maksimikuivairtoteihs, hyödynnetään muun muassa rakentamisvaiheen aikaisessa laaduntarkkailussa. Vaahtokuonamurskeen liukoisuus tutkitaan ennen rakentamista tehtävillä liukoisuusmäärityksillä.

Koerakenteen rakentamisvaiheessa tutkittavia ominaisuuksia ovat rakeisuus, vesipitoisuus, kantavuus ja tiivistyminen. Rakentamisen aikaisesta hienonemisesta saadaan tietoa vertaamalla keskenään rakeisuutta ennen rakentamista ja tiivistystyön jälkeen. Kantavuus määritetään levykuormituskokeilla tai pudotuspainolaitteella kunkin rakennekerroksen päältä. Mittausten perusteella voidaan takaisinlaskentamenetelmällä määrittää materiaalin E-moduuliarvot, joita käytetään Suomessa yleisimmin rakenteiden kuormituskestävyysmitoituksessa. Mittauspisteiden tarkat koordinaatit kirjataan ylös myöhempiä mittauksia varten. Tiiviyssaste saadaan selville mittaamalla materiaalin rakentamisen aikainen kuivairtoteihs ja vertaamalla sitä ennen rakentamista selvitettyyn maksimikuivairtoteihsyteen.

Koerakenteen seurantavaiheen aikana tutkitaan erityisesti kantavuutta, routivuutta, lämpötekniisiä ominaisuuksia ja suotovesien laatua. Kantavuus mitataan koerakenteen päältä samoista kohdista ja samoilla menetelmillä kuin koerakenteen rakentamisen aikana. Lämpötekniisiä ominaisuuksia, kuten lämmöneristävyyttä ja roudan tunkeutumissyvyyttä, tutkitaan lämpötilasensorien mittaustiedoista. Lisäksi käytetään meteorologisilta asemilta saatavaa tietoa toteutuneista sääolosuhteista. Suotovesien laatua voidaan tarkkailla laboratoriossa vesinäytteistä tai jatkuva-toimisilla mittauksilla, kuten pH- ja sähkönjohtavuusmittauksilla, suoraan kohteessa. Routivuutta tutkitaan rakenteen eri osista tehtävillä vaaituksilla ja se perustuu rakenteessa tapahtuvien routanousujen havainnointiin. Käytönaikaista hienonemista tutkitaan vertaamalla tiivistyksen jälkeistä rakeisuutta ja koerakenteen purkuvaiheen aikaista rakeisuutta keskenään. Purkuvaiheessa rakenteen vauriot tutkitaan silmämääräisesti ja ne dokumentoidaan valokuvaamalla.

Koerakentamisvaiheessa voisi olla myös mielenkiintoista toteuttaa kokonaan tai lähes kokonaan pohjakuonatuotteista valmistettu koerakenne. Kevennys- ja routasuojausmateriaalina voidaan käyttää vaahtokuonamursketta, suodatinkerroksessa pohjakuonasta valmistettua 0–2 mm tai 0–16 mm Gravo keinokiviainestuetta ja jakavassa kerroksessa pohjakuonasta valmistettua 0–32 mm Gravo keinokiviainestuetta.

Tässä tutkimuksessa määritetyt lämmönjohtavuuden arvot todettiin suuntaa antaviksi, koska ne eivät ota huomioon kaikkia todelliseen lämmönjohtavuuteen vaikuttavia tekijöitä. Luotettavat ja vertailukelpoiset lämmönjohtavuuden arvot eri olosuhteissa saadaan määritettyä suuren mittakaavan lämmönjohtavuuskokeilla. Tämän vuoksi vaahtokuonamurskeelle suositellaan suuren mittakaavan lämmönjohtavuuskokeita laboratorio-olosuhteissa.

Tutkittujen vaahtokuonamurske-erien riittävän suuren kiintoteihsyden vuoksi ne eivät kellu vedessä eikä nostemitoitus ole määräävä. Pienillä kiintoteihsyden arvoilla noster saattaa kuitenkin aiheuttaa ongelmia muun muassa rakenteiden stabiiliuden kannalta. Mikäli vaahtokuonareseptiä muutetaan siten, että vaahtokuonamurskeen kiintoteihs laskee nykyisestä, saattaa nostemitoitus tulla tarpeelliseksi.

Vaahtokuonareseptin kehittämiseen tulisi kiinnittää huomiota materiaalin jatkotutkimusten aikana. Tuloksista havaittiin, että materiaalin suorituskyvyn ja kestävyyskannalta tärkeintä on varmistaa riittävä lujuus, vaikka sen vuoksi jouduttaisiin tinkimään keveydestä. Lisäksi vaahtokuonamurskeen vedenimeytyvyyttä tulisi pyrkiä pienentämään. Hyvän huokosrakenteen kannalta on tärkeä varmistaa vaahtoon tasainen levittyminen ja estää huokosten yhdistyminen.

Sulfaatit ja kloridit ovat kirjallisuuden perusteella erittäin merkittävimpiä sementtipohjaisten rakennusmateriaalien kestävyysvaikuttavia ympäristötekijöitä. Taulukosta 15 nähdään, että vaahtokuonamurskeesta liukenee paljon sulfaatteja ja klorideja. Vaahtokuonamurskeen hydraulisten ominaisuuksien perusteella veteen liuenneet haitta-aineet pääsevät helposti kulkeutumaan vaahtokuonamurskeeseen. Kloridien haitallinen vaikutus perustuu lähinnä niiden aiheuttamaan korroosioriskin teräsrakenteissa. Suuret kloridipitoisuudet saattavat rajoittaa vaahtokuonamurskeen käyttöä esimerkiksi putkikaivantojen täytöissä. Sulfaateilla taas on havaittu olevan vaahtobetonin kaltaisille materiaaleille useita haitallisia vaikutuksia ja ne saattavat vaikuttaa vaahtokuonamurskeen kestävyysvaikutukseen. Vaahtokuonamurskeen sulfaattirasituksen kestävyysvaikutusta voisi olla aiheellista tutkia jatkotutkimusten aikana.

Vaahtokuonareseptissä voisi olla kannattavaa myös kokeilla erilaisia sementtilaatuja tai alkaliaktivaatiota lujittamismenetelmänä. Niiden avulla voidaan esimerkiksi parantaa lujuutta ja huokosrakennetta. Viime aikoina myös kiihdytetty karbonaatio on herättänyt tiedeyhteisössä paljon kiinnostusta. Teknisten-mekaanisten ominaisuuksien parantamisen lisäksi kiihdytettyä karbonaatiolla voidaan pienentää haitallisten aineiden liukoisuuksia ja sitoa merkittäviä määriä hiilidioksidia. Kiihdytettyä karbonointia voidaan käyttää myös sementillä lujitetun vaahtokuonan jälkihoitomenetelmänä.

Vaahtokuonamurskeen potentiaalisia käyttökohteita rajoittaviksi tekijöiksi tunnistettiin teknis-mekaanisista ominaisuuksista vedenimeytyminen, lujuus, hienonemisaaltius ja jäätymis-sulamiskestävyys sekä kemiallisista ominaisuuksista molybdeenin liukoisuuden kasvu. Lujuuden ja hydraulisten ominaisuuksien epäillään vaikuttavan näistä eniten vaahtokuonamurskeen kestävyysvaikutukseen. Jälkihoitomenetelmänä kiihdytettyä karbonaatiolla on potentiaalia parantaa näitä vaahtokuonamurskeesta tunnistettuja mahdollisesti käyttöä rajoittavia ominaisuuksia.

Kiihdytetty karbonisaatio pienentää kapillaaristen huokosten tilavuutta, minkä seurauksena vedenimeytymisen ja jäätymis-sulamiskestävyys on havaittu paranevan. (Zhang & Shao, 2018) Mikrorakenteen muuttumisen seurauksena teknis-mekaanisten ominaisuuksien, kuten lujuuden, on havaittu paranevan. Kiihdytettyä karbonaatiolla on saatu kasvatettua keinotekoisien kiviainesten lujuutta yli kaksinkertaiseksi karbonoimattomaan verrattuna (Jiang & Ling, 2020) Molybdeenin ja muiden raskasmetallien liukoisuus riippuu osittain pH:sta, jota kiihdytetyn karbonaation on havaittu pienentävän. Karbonoidun pohjakuonan molybdeenin liukoisuuksissa on havaittu huomattavaa laskua karbonoimattomaan verrattuna. (Costa et al., 2007)

8. YHTEENVETO

Vaahtokuonamurske on vaahtobetonireseptillä valmistettava kevytkiviaines, jonka raaka-aineista yli puolet on korvattu jätemateriaaleilla. Vaahtokuonamurskeen koostumusta voidaan säätää joustavasti reseptin ainesosien suhteellisia osuuksia muuttamalla. Tässä työssä tutkittiin vaahtokuonamurskeen materiaaliominaisuuksia ja verrattiin niitä yleisimpiin Suomessa käytettyihin kevytkiviaineisiin sekä potentiaalisten käyttökohteiden vaatimuksiin.

TK1: *Millaiset teknis-mekaaniset perusominaisuudet jätteenpolton pohjakuonasta valmistetulla kevytkiviainemurskeella on?*

Vaahtokuonamurskeelle tehtiin laajat laboratoriotestit, joiden perusteella määritetyt teknis-mekaaniset perusominaisuudet on esitetty taulukossa 16. Vaahtokuonamurskeen teknis-mekaanisten ominaisuuksien havaittiin vastaavan yleisimpien Suomessa käytettävien keinotekoisien kevytkiviainesten ominaisuuksia. Osin vaahtokuonamurske suoriutuu jopa niitä paremmin.

TK2: *Miten ympäristökelpoisuus eli vaahtokuonamurskeen raaka-aineiden potentiaalisesti haitallisten aineiden liukoisuusominaisuudet (mg/kg, L/S 8+2) muuttuvat valmistusprosessissa?*

Vaahtokuonamurskeen raaka-aineiden ja vaahtokuonamurske-erien liukoisuudet on esitetty taulukossa 15. Vaahtokuonamurskeen raaka-aineiden liukoisuudet ovat korkeat kromin, molybdeenin, antimonin, fluoridin, kloridin, sulfaattien ja liunneen orgaanisen hiilen osalta, ja ne ylittävät yhden tai useamman MARA-asetuksen (843/2017) mukaisen käyttökohteen raja-arvon. Raaka-aineet itsessään soveltuvat liukoisuusominaisuuksiltaan vain muutamaan MARA-asetuksen mukaiseen käyttökohteeseen. Valmistusprosessin aikana liukoisuudet pienenevät niin merkittävästi, että vaahtokuonamurske-erät soveltuvat lähes kaikkiin MARA-asetuksen mukaisiin käyttökohteisiin. Molybdeenin liukoisuuden kasvu kuitenkin rajoittaa lopulta vaahtokuonamurskeen käytön MARA-asetuksen mukaisiin päällystettyihin käyttökohteisiin.

TK3: *Millaisiin infrarakentamisen käyttökohteisiin yhdyskuntajätteen polton pohjakuonasta valmistettu kevytkiviainemurske soveltuu?*

Kappaleessa 7.3 arvioidaan vaahtokuonamurskeen soveltuvuutta erilaisiin käyttökohteisiin. Pienen kuivairtoihyeyden ansiosta vaahtokuonamurske soveltuu kevennysrakenteisiin ja pieni lämmönjohtavuus mahdollistaa käytön routasuojauksessa. Kuivatusrakenteisiin vaahtokuonamurske soveltuu hyvän vedenläpäisevyyden ja pienen vedenimeytymiskorkeuden ansiosta. Suuri kitkakulma mahdollistaa vaahtokuonamurskeen käytön jyrkissä luiskissa. Käyttökohteilla on kuitenkin myös toimivuusvaatimuksia, joiden täyttymistä ei voida todeta. Erityisesti hienonemisalittius ja jäätymis-sulamiskestävyys saattavat rajoittaa vaahtokuonamurskeen käyttöä.

Työssä saatiin lupaavia tuloksia uuden innovatiivisen kevytkiviaineksen ominaisuuksista ja soveltuvuudesta erilaisiin infrarakentamisen käyttökohteisiin. Tulosten perusteella suositellaan jatkamaan kehitystyötä kappaleen 7.4 mukaisesti.

LÄHTEET

- 527/2014. (2014). *Ympäristönsuojelulaki*. Finlex. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2014/20140527>
- 646/2011. (2011). *Jätelaki*. Finlex. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110646>
- 843/2017. (2017). *Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa*. Finlex. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170843>
- Aldridge, D. (2005). Introduction to foamed concrete: What, why, how? [Proceeding]. *Proceedings of the International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction*, 1–14.
- Al-Ghouti, M. A., Khan, M., Nasser, M. S., Al-Saad, K., & Heng, O. E. (2021). Recent advances and applications of municipal solid wastes bottom and fly ashes: Insights into sustainable management and conservation of resources. *Environmental Technology & Innovation*, 21, 101267. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2020.101267>
- Amran, Y. H. M., Farzadnia, N., & Ali, A. A. A. (2015). Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials*, 101, 990–1005. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.10.112>
- Arena, U. (2012). Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. *Waste Management*, 32(4), 625–639. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2011.09.025>
- Arslan, H., & Baykal, G. (2006). Utilization of fly ash as engineering pellet aggregates [Article]. *Environmental Geology (Berlin)*, 50(5), 761–770. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0248-7>
- Aubert, J. E., Husson, B., & Vaquier, A. (2004). Metallic aluminum in MSWI fly ash: quantification and influence on the properties of cement-based products [Article]. *Waste Management (Elmsford)*, 24(6), 589–596. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.01.005>
- Awang, H., Mydin, M. A. O., & Roslan, A. F. (2012). Effect of additives on mechanical and thermal properties of lightweight foamed concrete. *Advances in Applied Science Research*, 3(5), 3326–3338.
- Batool, F., & Bindiganavile, V. (2017). Air-void size distribution of cement based foam and its effect on thermal conductivity [Article]. *Construction & Building Materials*, 149, 17–28. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.114>
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading [Article]. *Biomass & Bioenergy*, 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Byun, K. J., Song, H. W., & Park, S. S. (1998). Development of structural lightweight foamed concrete using polymer foam agent. *ICPIC-98*.
- CEWEP. (2019). *Calculation Tool for potential impacts on waste amounts for thermal treatment*. <https://www.cewep.eu/cewep-capacity-calculations/>
- Chen, D., Yin, L., Wang, H., & He, P. (2014). Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review [Article]. *Waste Management (Elmsford)*, 34(12), 2466–2486. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.004>
- Chica, L., & Alzate, A. (2019). Cellular concrete review: New trends for application in construction. *Construction and Building Materials*, 200, 637–647. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.12.136>
- Colangelo, F., Messina, F., & Cioffi, R. (2015). Recycling of MSWI fly ash by means of cementitious double step cold bonding pelletization: Technological assessment for the production of lightweight artificial aggregates [Article]. *Journal of Hazardous Materials*, 299, 181–191. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.06.018>

- Costa, G., Baciocchi, R., Poletini, A., Pomi, R., Hills, C. D., & Carey, P. J. (2007). Current status and perspectives of accelerated carbonation processes on municipal waste combustion residues [Article]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 135(1–3), 55–75. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9704-4>
- Dou, X., Ren, F., Nguyen, M. Q., Ahamed, A., Yin, K., Chan, W. P., & Chang, V. W.-C. (2017). Review of MSWI bottom ash utilization from perspectives of collective characterization, treatment and existing application [Article]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 79, 24–38. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.044>
- Du, L., & Folliard, K. J. (2005). Mechanisms of air entrainment in concrete [Article]. *Cement and Concrete Research*, 35(8), 1463–1471. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.07.026>
- Ehrola, Esko. (1996). *Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet* [Book]. Rakennustieto.
- Euroopan komissio. (1999). *Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste*. <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/1999/31>
- Euroopan komissio. (2008). *Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the council of 19th November 2008 on waste and repealing certain Directives*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32008L0098>
- Euroopan komissio. (2023a, April 20). *Waste and Recycling*. https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling_fi
- Euroopan komissio. (2023b, April 20). *Waste Framework Directive*. https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/waste-framework-directive_en
- Eurostat. (2023). *Municipal Waste Statistics*. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics#Municipal_waste_treatment
- Finnsementti. (2019). *Plussementti*. https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/2018/09/plus_esite_flash.indd_.pdf
- Forsman, J., Sikiö, J., Ronkainen, M., & Hakari, M. (2012). *Suunnittelu- & rakennusohje (Foamit)*. http://www.foamit.fi/wp-content/uploads/2016/10/Suunnittelu-ja_Rakennusohje.pdf
- Fortum. (2023, April 20). *Riihimäen laitosalue*. <https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisöille/kieratys-ja-jatepalvelut/recycling-waste-yhteystiedot-ja-toimipaikat/riihimaen-laitosalue>
- Fu, Y., Wang, X., Wang, L., & Li, Y. (2020). Foam Concrete: A State-of-the-Art and State-of-the-Practice Review [Article]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 1–25. <https://doi.org/10.1155/2020/6153602>
- Gawenda, T. (2021). Production methods for regular aggregates and innovative developments in Poland [Article]. *Minerals (Basel)*, 11(12), 1429. <https://doi.org/10.3390/min11121429>
- Hashim, M., & Tantray, M. (2021). Comparative study on the performance of protein and synthetic-based foaming agents used in foamed concrete [Article]. *Case Studies in Construction Materials*, 14, e00524. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00524>
- Haug, T. A., Munz, I. A., & Kleiv, R. A. (2011). Importance of dissolution and precipitation kinetics for mineral carbonation [Article]. *Energy Procedia*, 4, 5029–5036. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.475>
- Hilal, A. A., Thom, N. H., & Dawson, A. R. (2014). Pore structure and permeation characteristics of foamed concrete [Article]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 12(12), 535–544. <https://doi.org/10.3151/jact.12.535>
- Hilal, A. A., Thom, N. H., & Dawson, A. R. (2015). The Use of Additives to Enhance Properties of Pre- Formed Foamed Concrete [Article]. *International Journal of Engineering and Technology*, 7(4), 286–293. <https://doi.org/10.7763/IJET.2015.V7.806>
- Horozov, T. S. (2008). Foams and foam films stabilised by solid particles [Article]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 13(3), 134–140. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2007.11.009>
- Indu Siva Ranjani, G., & Ramamurthy, K. (2012). Behaviour of foam concrete under sulphate environments [Article]. *Cement & Concrete Composites*, 34(7), 825–834. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.03.007>

- Iveson, S. M., Litster, J. D., Hapgood, K., & Ennis, B. J. (2001). Nucleation, growth and breakage phenomena in agitated wet granulation processes: a review [Article]. *Powder Technology*, 117(1), 3–39. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(01\)00313-8](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(01)00313-8)
- Jiang, Y., & Ling, T.-C. (2020). Production of artificial aggregates from steel-making slag: Influences of accelerated carbonation during granulation and/or post-curing [Article]. *Journal of CO2 Utilization*, 36, 135–144. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.11.009>
- Kiviniemi, O., Sikiö, J., Jyrävä, H., Ollila, S., Autiola, M., Ronkainen, M., Lindroos, N., Lahtinen, P., & Forsman, J. (2012). *Tuhkarakentamisen käsikirja*. https://energia.fi/files/1137/tuhkarakentamisen_kasikirja.pdf
- Klinghoffer, N. B., & Castaldi, M. J. (2013). *Waste to energy conversion technology* (N. B. Klinghoffer & M. J. Castaldi, Eds.) [Book]. Woodhead Publishing.
- Köylijärvi, E. (2013). *Vahtolasimurskeen käyttö maa- ja pohjarakentamisessa* [Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tti-201312201528>
- Krämer, C., Schauerte, M., Kowald, T. L., & Trettin, R. H. F. (2015). Three-phase-foams for foam concrete application [Article]. *Materials Characterization*, 102, 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.03.004>
- Lam, C. H. K., Ip, A. W. M., Barford, J. P., & McKay, G. (2010). Use of incineration MSW ash: A review [Article]. *Sustainability*, 2(7), 1943–1968. <https://doi.org/10.3390/su2071943>
- Liikennevirasto. (2011). Kevennysrakenteiden suunnittelu. In *Liikenneviraston ohjeita 5/2011*. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo_2011-05_kevennysrakenteiden_suunnittelu_web.pdf
- Liikennevirasto. (2018). Tierakenteen suunnittelu. In *Liikenneviraston ohjeita 38/2018*. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/lo_2018-38_tierakenteen_suunnittelu_web.pdf
- Lim, M., Han, G.-C., Ahn, J.-W., & You, K.-S. (2010). Environmental remediation and conversion of carbon dioxide (CO₂) into useful green products by accelerated carbonation technology [Article]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 7(1), 203–228. <https://doi.org/10.3390/ijerph7010203>
- Liu, C., Luo, J., Li, Q., Gao, S., Jin, Z., Li, S., Zhang, P., & Chen, S. (2019). Water-resistance properties of high-belite sulphoaluminate cement-based ultra-light foamed concrete treated with different water repellents [Article]. *Construction & Building Materials*, 228, 116798. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116798>
- Lombardi, L., Carnevale, E., & Corti, A. (2015). A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste [Article]. *Waste Management (Elmsford)*, 37, 26–44. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.010>
- Luo, H., Cheng, Y., He, D., & Yang, E.-H. (2019). Review of leaching behavior of municipal solid waste incineration (MSWI) ash [Article]. *The Science of the Total Environment*, 668, 90–103. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.004>
- Ma, C., & Chen, B. (2016). Properties of foamed concrete containing water repellents [Article]. *Construction & Building Materials*, 123, 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.148>
- Mäkelä, H. (2020). *Rakennuspohjan ja tonttialueen kuivatus* / (H. Mäkelä, Ed.) [Book]. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.
- Mäkinen, N. (2022). *Kevytkuonatoran koe-erän valmistus 11.-13.4.2022* [Powerpoint].
- Malkow, T. (2004). Novel and innovative pyrolysis and gasification technologies for energy efficient and environmentally sound MSW disposal [Article]. *Waste Management (Elmsford)*, 24(1), 53–79. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(03\)00038-2](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(03)00038-2)
- Nambiar, E. K. K., & Ramamurthy, K. (2006). Influence of filler type on the properties of foam concrete [Article]. *Cement & Concrete Composites*, 28(5), 475–480. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.12.001>

- Nambiar, E. K. K., & Ramamurthy, K. (2007a). Air-void characterisation of foam concrete [Article]. *Cement and Concrete Research*, 37(2), 221–230. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.009>
- Nambiar, E. K. K., & Ramamurthy, K. (2007b). Sorption characteristics of foam concrete [Article]. *Cement and Concrete Research*, 37(9), 1341–1347. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.05.010>
- Narayanan, N., & Ramamurthy, K. (2000). Structure and properties of aerated concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 22(5), 321–329. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00016-0](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00016-0)
- Neuwahl, F., Cusano, G., Gómez Benavides, J., Holbrook, S., & Roudier, S. (2019). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration*. <https://doi.org/10.2760/761437>
- Nurmikolu, A., & Kolisoja, P. (2002). Ratarakenteen routasuojaus. In *Ratahallintokeskuksen julkaisu A 1/2002*. <https://www.doria.fi/handle/10024/146360>
- Österbacka, J. (2022a). *Ash & Slag [Powerpoint]*.
- Österbacka, J. (2022b, May 4). *Gravo keinokiviaines tuotekortit [Sähköpostiviesti]*.
- Pan, S.-Y., Chang, E. E., & Chiang, P.-C. (2012). CO₂ Capture by Accelerated Carbonation of Alkaline Wastes: A Review on Its Principles and Applications [Article]. *Aerosol and Air Quality Research*, 12(5), 770–791. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.06.0149>
- Pan, Z., Li, H., & Liu, W. (2014). Preparation and characterization of super low density foamed concrete from Portland cement and admixtures [Article]. *Construction & Building Materials*, 72, 256–261. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.078>
- Panesar, D. K. (2013). Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents. *Construction and Building Materials*, 44, 575–584. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.03.024>
- Peyne, J., Gautron, J., Doudeau, J., & Rossignol, S. (2018). Development of low temperature lightweight geopolymer aggregate, from industrial Waste, in comparison with high temperature processed aggregates [Article]. *Journal of Cleaner Production*, 189, 47–58. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.038>
- Pöysti, M. (2023a, February 1). *Infra Leca-soran (4-32 mm) materiaaliominaisuudet [sähköpostiviesti]*.
- Pöysti, M. (2023b, October 5). *Leca-soran kolmiakσιαalikokeiden tulokset [Sähköpostiviesti]*.
- Provis, J. L., & vanDeventer, J. S. J. (2014). *Alkali Activated Materials State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM* (J. L. Provis & J. S. J. van Deventer, Eds.; 1st ed. 2014.) [Book]. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2>
- Qian, C., Zhuang, Y., & Huang, H. (2016). Numerical calculation of expansion induced by alkali silica reaction [Article]. *Construction & Building Materials*, 103, 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.041>
- Ragland, K. W. (2011). *Combustion engineering* (K. M. Bryden, Ed.; 2nd ed.) [Book]. CRC Press, an imprint of Taylor and Francis. <https://doi.org/10.1201/b11548>
- Raiko, Risto. (1995). *Poltto ja palaminen* (Risto. Raiko, Ed.) [Book]. Teknillisten tieteiden akatemia.
- Räisänen, M. (2015). *Tuhkasta kevytkiviaines maarakentamiseen*. <https://ygoforum.fi/wp-content/uploads/2019/11/Tuhkarae-uusi-kevytkiviaines-infrarakentamiseen.pdf>
- Rakennustietosäätiö. (2016). Fill-R kevytkiviaines. In *RT 38739*.
- Rakennustietosäätiö. (2023). Käsitellyn yhdyskuntajätteenpolton pohjakuonan käyttö infrarakentamisessa. In *RT 103552*.
- Ramamurthy, K., & Harikrishnan, K. I. (2006). Influence of binders on properties of sintered fly ash aggregate [Article]. *Cement & Concrete Composites*, 28(1), 33–38. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.06.005>

- Ramamurthy, K., Kunhanandan Nambiar, E. K., & Indu Siva Ranjani, G. (2009). A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31(6), 388–396. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2009.04.006>
- Rantamäki, Martti. (2004). *Geotekniikka* (Raimo. Jääskeläinen & Markku. Tammirinne, Eds.; 20. p.) [Book]. Otatieto.
- Ren, P., Ling, T.-C., & Mo, K. H. (2021). Recent advances in artificial aggregate production [Article]. *Journal of Cleaner Production*, 291, 125215. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125215>
- Richard, T., Dobogai, J., Gerhardt, T., & Young, W. (1975). Cellular concrete - A potential load-bearing insulation for cryogenic applications? [Article]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 11(2), 500–503. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1975.1058746>
- Saikia, N., Cornelis, G., Mertens, G., Elsen, J., van Balen, K., van Gerven, T., & Vandecasteele, C. (2008). Assessment of Pb-slag, MSWI bottom ash and boiler and fly ash for using as a fine aggregate in cement mortar [Article]. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1), 766–777. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.093>
- Saint-Gobain. (2019). *Leca-kevytsora infrarakentamisessa*. <https://leca.emmi.fi//FFLK-nMX9SwBG>
- Salman, A. D., Hounslow, M. J., & Seville, J. . P. K. (2007). *Granulation* (A. D. Salman, M. J. Hounslow, & J. . P. K. Seville, Eds.) [Book]. Elsevier.
- Sang, G., Zhu, Y., Yang, G., & Zhang, H. (2015). Preparation and characterization of high porosity cement-based foam material [Article]. *Construction & Building Materials*, 91, 133–137. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.032>
- Shah, S. N., Mo, K. H., Yap, S. P., Yang, J., & Ling, T.-C. (2021). Lightweight foamed concrete as a promising avenue for incorporating waste materials: A review [Article]. *Resources, Conservation and Recycling*, 164, 105103. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105103>
- Shang, H. S., & Song, Y. P. (2006). Experimental study of strength and deformation of plain concrete under biaxial compression after freezing and thawing cycles [Article]. *Cement and Concrete Research*, 36(10), 1857–1864. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.018>
- She, W., Du, Y., Miao, C., Liu, J., Zhao, G., Jiang, J., & Zhang, Y. (2018). Application of organic- and nanoparticle-modified foams in foamed concrete: Reinforcement and stabilization mechanisms [Article]. *Cement and Concrete Research*, 106, 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.01.020>
- Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2017). Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review [Article]. *Journal of Cleaner Production*, 143, 598–614. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.070>
- Silva, R. V., de Brito, J., Lynn, C. J., & Dhir, R. K. (2019). Environmental impacts of the use of bottom ashes from municipal solid waste incineration: A review [Article]. *Resources, Conservation and Recycling*, 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.011>
- Sipra, A. T., Gao, N., & Sarwar, H. (2018). Municipal solid waste (MSW) pyrolysis for bio-fuel production: A review of effects of MSW components and catalysts. *Fuel Processing Technology*, 175, 131–147. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2018.02.012>
- Smith, Y. R., Nagel, J. R., & Rajamani, R. K. (2019). Eddy current separation for recovery of non-ferrous metallic particles: A comprehensive review [Article]. *Minerals Engineering*, 133(C), 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.12.025>
- Söderholm, A. (2020). *Jätteenpolton pohjakuona tierakenteessa : koerakenteen rakentaminen ja tutkimus pohjakuonan teknisistä ominaisuuksista* [Tampereen ammattikorkeakoulu]. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2020120125308>
- Sormunen, L. A. (2017). *Recovered municipal solid waste incineration bottom ash : aggregate-like products for civil engineering structures*. Tampereen teknillinen yliopisto.

- Šyc, M., Simon, F. G., Hykš, J., Braga, R., Biganzoli, L., Costa, G., Funari, V., & Grosso, M. (2020). Metal recovery from incineration bottom ash: State-of-the-art and recent developments [Article]. *Journal of Hazardous Materials*, 393, 122433–122433. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122433>
- Tajra, F., Elrahman, M. A., Chung, S.-Y., & Stephan, D. (2018). Performance assessment of core-shell structured lightweight aggregate produced by cold bonding pelletization process [Article]. *Construction & Building Materials*, 179, 220–231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.237>
- Taylor, P. C. (Peter C. (2014). *Curing concrete* (1st ed.) [Book]. Taylor & Francis.
- Thapa, P., Tripathi, J., & Jeong, S. H. (2019). Recent trends and future perspective of pharmaceutical wet granulation for better process understanding and product development [Article]. *Powder Technology*, 344, 864–882. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.12.080>
- Tian, T., Yan, Y., Hu, Z., Xu, Y., Chen, Y., & Shi, J. (2016). Utilization of original phosphogypsum for the preparation of foam concrete [Article]. *Construction & Building Materials*, 115, 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.028>
- Tielaitos. (1997). Tien kevennysrakenteet. In *Tielaitoksen selvityksiä 28/1997*. <https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Tiehallinto/pdf2/tienkevennysrakenteet3200475.pdf>
- Tikalsky, P. J., Pospisil, J., & MacDonald, W. (2004). A method for assessment of the freeze–thaw resistance of preformed foam cellular concrete [Article]. *Cement and Concrete Research*, 34(5), 889–893. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.005>
- Tran, N. P., Nguyen, T. N., Ngo, T. D., Le, P. K., & Le, T. A. (2022). Strategic progress in foam stabilisation towards high-performance foam concrete for building sustainability: A state-of-the-art review [Article]. *Journal of Cleaner Production*, 375, 133939. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133939>
- Tsai, C.-T. (2012). *Cold-Bonding Technique – A New Approach to Recycle Innocuous Construction Residual Soil, Sludge, and Sediment as Coarse Aggregates* [Bookitem]. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/34710>
- Uusioaines Oy. (2023). *Vaahtolasimurske maanrakentamiseen*. https://foamit.fi/wp-content/uploads/2023/02/foamit_tuotekortti_infra_210x297_web_15022023.pdf
- Vakkilainen, E. K. (2016). *Steam Generation from Biomass* [Book]. Elsevier Science & Technology.
- Väylävirasto. (2019). Maanteiden kuivatuksen kunnossapidon hallinta. In *Väyläviraston ohjeita 6/2019*. https://ava.vaylapilvi.fi/ava/Julkaisut/Vaylavirasto/vo_2019-06_maanteiden_kuivatuksen_web.pdf
- Vesanto, P., Ruonala, S., & Nuutila, M. (2006). Jätteenpolton parhaan käytettävissä olevan tekniikan (BAT) vertailuasiakirjan käyttö suomalaisessa toimintaympäristössä. In *Suomen ympäristö* (Vol. 27). https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/38712/SY_27_2006.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Wahlström, M., Eskola, P., Laine-Ylijoki, J., Leino-Forsman, H., Mäkelä, E., & Olin, M. (1999). *Maarakentamisessa käytettävien teollisuuden sivutuotteiden riskinarviointi*. <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/1999/T1995.pdf>
- Wee, T.-H., Babu, D. S., Tamilselvan, T., & Lim, H.-S. (2006). Air-void system of foamed concrete and its effect on mechanical properties [Article]. *ACI Materials Journal*, 103(1), 45–52. <https://doi.org/10.14359/15126>
- Wee, T.-H., Daneti, S. B., & Tamilselvan, T. (2011). Effect of w/c ratio on air-void system of foamed concrete and their influence on mechanical properties [Article]. *Magazine of Concrete Research*, 63(8), 583–595. <https://doi.org/10.1680/macr.2011.63.8.583>
- Wigren, V. (2022). *Keinokiven esivalmistus huhtikuu 2022 [valmistusraportti]*.
- Xu, L.-Y., Qian, L.-P., Huang, B.-T., & Dai, J.-G. (2021). Development of artificial one-part geopolymer lightweight aggregates by crushing technique [Article]. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128200. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128200>

- Ympäristöhallinto. (2019). *Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa - Soveltamisohje*. <https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Soveltamisohje%20Valtioneuvoston%20asetus%20er%C3%A4iden%20j%C3%A4tteiden%20hy%C3%B6dynt%C3%A4misest%C3%A4%20maarakentamisessa%2002072019.pdf>
- Yuan, Q. (2021). *Civil engineering materials : from theory to practice* (Z. Liu, K. Zheng, & C. Ma, Eds.) [Book]. Elsevier.
- Zdeb, T. (2017). An analysis of the steam curing and autoclaving process parameters for reactive powder concretes [Article]. *Construction & Building Materials*, 131, 758–766. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.026>
- Zhang, D., Ghoulleh, Z., & Shao, Y. (2017). Review on carbonation curing of cement-based materials [Article]. *Journal of CO2 Utilization*, 21, 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.07.003>
- Zhang, D., & Shao, Y. (2018). Surface scaling of CO₂-cured concrete exposed to freeze-thaw cycles [Article]. *Journal of CO2 Utilization*, 27, 137–144. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2018.07.012>
- Zhang, S., Liu, L., Tan, K., Zhang, L., & Tang, K. (2015). Influence of burning temperature and cooling methods on strength of high carbon ferrochrome slag lightweight aggregate [Article]. *Construction & Building Materials*, 93, 1180–1187. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.045>
- Zhang, Z., & Wang, H. (2016). The pore characteristics of geopolymer foam concrete and their impact on the compressive strength and modulus [Article]. *Frontiers in Materials*, 3. <https://doi.org/10.3389/fmats.2016.00038>

STANDARDIT

- ISO 11271. (2002). Soil quality — Determination of redox potential — Field method
- SFS 3008. (1990). Veden, lietteen ja sedimentin kuiva-aineen ja hehkutusjäännöksen määrittäminen
- SFS 3021. (1979). Veden pH-arvon määrittäminen
- SFS-EN 1097-10. (2014). Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 10: Vedenimeytymiskorkeus
- SFS-EN 1097-11. (2014). Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 11: Determination of compressibility and confined compressive strength of lightweight aggregates
- SFS-EN 1097-3. (1998). Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 3: Irtotiheyden ja tyhjätilan määrittäminen
- SFS-EN 1097-6. (2022). Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 6: Determination of particle density and water absorption
- SFS-EN 12457-3. (2002). Jätteiden karakterisointi. Liukoisuus. Rakeisten jätemateriaalien ja lietteiden liukoisuuden laadunvalvontatesti. Osa 3: Kaksivaiheinen ravistelutesti uuttoliuoksen ja kiinteän jätteen suhteessa 2 l/kg ja 8 l/kg materiaaleille, joiden kiintoaineksen osuus on suuri ja raekoko alle 4 mm
- SFS-EN 12667. (2001). Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance
- SFS-EN 13055. (2016). Lightweight aggregates
- SFS-EN 13137. (2001). Characterization of waste. Determination of total organic carbon (TOC) in waste, sludges and sediments. Kumottu 29.10.2012.
- SFS-EN 13286-7. (2004). Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures
- SFS-EN 13657. (2003). Jätteiden karakterisointi. Hajotusmenetelmä kuningasveteen liukenevien yhdisteiden määrittämistä varten
- SFS-EN 1367-7. (2014). Tests for thermal and weathering properties of aggregates. Part 7: Determination of resistance to freezing and thawing of Lightweight aggregates
- SFS-EN 1367-8. (2014). Tests for thermal and weathering properties of aggregates. Part 7: Determination of resistance to freezing and thawing of Lightweight aggregates
- SFS-EN 1484. (1997). Vesianalyysi. Ohjeita orgaanisen hiilen kokonaismäärän (TOC) ja liuenneen orgaanisen hiilen (DOC) määrittämiseen
- SFS-EN 15002. (2015). Characterization of waste. Preparation of test portions from the laboratory sample
- SFS-EN 15216. (2021). Environmental solid matrices. Determination of total dissolved solids (TDS) in water and eluates
- SFS-EN 197-1. (2012). Sementti. Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimustenmukaisuus
- SFS-EN 27888. (1994). Veden laatu. Sähkönjohtavuuden määrittäminen
- SFS-EN 932-2. (1999). Kiviainesten yleisten ominaisuuksien testaus. Osa 2: Laboratorionäytteiden jakaminen

- SFS-EN 932-5. (2012). Kiviainesten yleisten ominaisuuksien testaus. Osa 5: Yleiset laitteet ja kalibrointi
- SFS-EN 933-1. (2012). Kiviainesten geometrysten ominaisuuksien testaus. Osa 1: Rakeisuuden määrittäminen. Seulontamenetelmä
- SFS-EN ISO 10304-1. (2009). Water quality. Determination of dissolved anions by liquid chromatography of ions. Part 1: Determination of bromide, chloride, fluoride, nitrate, nitrite, phosphate and sulfate
- SFS-EN ISO 11732. (2005). Water quality. Determination of ammonium nitrogen. Method by flow analysis (CFA and FIA) and spectrometric detection
- SFS-EN ISO 11885. (2009). Water quality. Determination of selected elements by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP-OES)
- SFS-EN ISO 14403-2. (2012). Water quality. Determination of total cyanide and free cyanide using flow analysis (FIA and CFA). Part 2: Method using continuous flow analysis (CFA)
- SFS-EN ISO 17892-11. (2019). Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 11: Permeability tests
- SFS-EN ISO 17892-8. (2018). Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil. Part 8: Unconsolidated undrained triaxial test
- SFS-ISO 11464. (2007). Soil quality — Pretreatment of samples for physico-chemical analysis

LIITE A: MARA-ASETUKSEN RAJA-ARVOT

Liite 2

HAITALLISTEN AINEIDEN RAJA-ARVOT JA MUUT LAATUVAATIMUKSET SEKÄ JÄTTEEN ENIMMÄISKERROSPAKSUUS MAARAKENTAMISKOHTEESSA

Taulukko 1. Hyödynnettävän jätteen suurin sallittu haitallisten aineiden liukoisuus (mg/kg L/S-suhteessa 10 l/kg) ja pitoisuus (mg/kg kuiva-ainetta) sekä kerrospaksuus maarakentamiskohteessa. Jättemateriaalikohtaiset määritysvaatimukset on annettu liitteessä 3 (jätteen laadunhallinta).

Haitallinen aine	Maarakentamiskohde						
	Väylä ¹⁾ jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5 m		Kenttä ¹⁾ jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5 m		Valli jätteen kerrospak- suus ≤ 5,0 m	Teollisuus- ja varastorakennuk- sen pohjarakenne jätteen kerrospak- suus ≤ 1,5 m	Tuhkamursketie ²⁾ jätteen kerrospak- suus ≤ 0,2 m
	Peitetty	Päällystetty	Peitetty	Päällystetty	Peitetty		
Liukoisuus (mg/kg LS = 10 l/kg)							
Antimoni (Sb)	0,7	0,7	0,3	0,7	0,7	0,7	0,7
Arseeni (As)	1	2	0,5	1,5	0,5	2	2
Barium (Ba)	40	100	20	60	20	100	80
Kadmium (Cd)	0,04	0,06	0,04	0,06	0,04	0,06	0,06
Kromi (Cr)	2	10	0,5	5	1	10	5
Kupari (Cu)	10	10	2	10	10	10	10
Lyijy (Pb)	0,5	2	0,5	2	0,5	2	1
Molybdeen (Mo)	1,5	6	0,5	6	1	6	2
Nikkeli (Ni)	2	2	0,4	1,2	1,2	2	2
Seleen (Se)	1	1	0,4	1	1	1	1
Sinkki (Zn)	15	15	4	12	15	15	15
Vanadiini (V)	2	3	2	3	2	3	3
Elohopea (Hg)	0,03	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03
Kloridi (Cl ⁻) ³⁾	3 200	11 000	800	2 400	1 800	11 000	4 700
Sulfaatti (SO ₄ ²⁻) ³⁾	5 900	18 000	1200	10 000	3 400	18 000	6 500
Fluoridi (F ⁻) ³⁾	50	150	10	50	30	150	100
Liennut orgaaninen hiili (DOC)	500	500	500	500	500	500	500

Haital- linen aine	Maarakentamiskohde						
	Väylä ¹⁾ jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5 m		Kenttä ¹⁾ jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5 m		Valli jätteen ker- rospaksuus ≤ 5,0 m	Teollisuus- ja varastoraken- nuksen pohja- rakenne jätteen kerros- paksuus ≤ 1,5 m	Tuh- kamursketie ²⁾ jätteen ker- rospaksuus ≤ 0,2 m
	Peitet- ty	Päällystetty	Peitet- ty	Päällystetty	Peitetty		
Pitoisuus (mg/kg kuiva-ainetta)							
Bentseeni	0,2	0,2	0,02	0,2	0,06	0,02	0,2
TEX ⁴⁾	25	25	25	25	25	10	25
Nafta- leeni	5	5	5	5	5	5	5
PAH- yhdisteet ⁵⁾	30	30	30	30	30	30	30
Fenoliset yhdisteet ⁶⁾	10	10	5	10	10	10	10
PCB- yhdisteet ⁷⁾	1	1	1	1	1	1	1
Öljyhiili- vedyt C10-C40	500	500	500	500	500	300	500

- 1) Hyödynnettävän asfalttimurskeen ja -rouheen enimmäismäärä maarakentamiskohteessa on 1 000 tonnia
- 2) Tuhkamursketien kerrospaksuus on asetettu täyterokoksen laskennalliselle paksuudelle
- 3) Taulukossa 1 kloridille, sulfaatile ja fluoridille asetettuja raja-arvoja ei sovelleta rakenteeseen, joka täyttää kaikki seuraavat edellytykset: sijaitsee enintään 500 m etäisyydellä merestä, rakenteen läpi suotautuvan veden purkautumissuunta on mereen sekä rakenteen ja meren välillä ei ole talousvedenottoon käytettäviä kaivoja
- 4) Tolueneeni, etylibentseeni ja ksyleeni (summapitoisuus)
- 5) Polyaromaattiset hiilivedyt: antraseeni, asenafteneeni, asenaftyleeni, bentso(a)antraseeni, benzo(a)pyreeni, bentso(b)fluoranteeni, bentso(g,h,i)peryleneeni, bentso(k)fluoranteeni, dibentso(a,h)antraseeni, fenantreeni, fluoranteeni, fluoreeni, indeno(1,2,3-cd)pyreeni, kryseeni, naftaleeni ja pyreeni (summapitoisuus)
- 6) Fenoli, o-kresoli, m-kresoli, p-kresoli ja bisfenoli-A (summapitoisuus)
- 7) Polyklooratut bifenyyliä kongeneerit 28, 52, 101, 118, 138, 153 ja 180 (summapitoisuus)

Poikkeukset taulukon 1 raja-arvoista, jos toteutettavan rakenteen enimmäispaksuus on 0,5 m (mg/kg L/S-suhteessa 10 l/kg)

- peitetty väylä: barium (Ba) 80; vanadiini (V) 3; kloridi (Cl⁻) 3 600; sulfaatti (SO₄²⁻) 6 000;
- päällystetty väylä: kloridi (Cl⁻) 14 000; sulfaatti (SO₄²⁻) 20 000;
- peitetty kenttä: antimoni (Sb) 0,4.

Lähteet:

Ympäristöhallinto. (2019). Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa - Soveltamisohje. <https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/Soveltamisohje%20Valtioneuvoston%20asetus%20er%C3%A4iden%20j%C3%A4tteiden%20hy%C3%B6dynt%C3%A4misest%C3%A4%20maarakentamisessa%2020202019.pdf>

LIITE B: LABORATORIOTESTIEN MITTAUSRAPORTIT

1. Kuivairtitiheys (1 sivu)
2. Rakeisuus ja hienoneminen (4 sivua)
3. Kiintotiheys ja vedenimeytyminen (1 sivu)
4. Vedenimeytymiskorkeus (3 sivua)
5. Vedenläpäisevyys (2 sivua)
6. Lämmönjohtavuus (10 sivua)
7. Jäätymis-sulamiskestävyys (4 sivua)
8. Lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet sekä kokoonpuristuvuus ja puristuslujuus (12 sivua)
 - 8.1. Kasakitkakulman määrittäminen staattisesta kolmiakselialikokeesta (2 sivua)
9. Kemiallisten ominaisuuksien analyysitiedot (2 sivua)

KUIVAIRTOTIHEYS, testiraportti

Näytteen tiedot

Tuote:	Vaahtokuonamurske
Näyte:	VK114 ja VK124
Nimellisraekoko:	2–32 mm
Näytteet vastaanotettu:	19.7.2022
Testi suoritettu:	21.7.2022

Testin kuvaus

Kuivairtoteihs määritettiin standardin SFS-EN 1097-3:1998 mukaisesti. Määrittelyssä käytetty teräsastia oli tilavuudeltaan 10,004 l. Uunikuivatuksen jälkeen näytteet jäähtyivät neljän tunnin ajan huoneessa, jonka lämpötila oli 23 ± 2 °C ja suhteellinen ilmankosteus 60 ± 10 %.

Tulokset

Kuivairtoteihs määritettiin 21.7.2022, ja niiden tulokset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Vaahtokuonamurske-erille VK114 ja VK124 määritetyt yksittäistestinäytteiden massat m ja kuivairtoteihs ρ_d .

Näyte	Massa m [g]	Kuivairtoteihs ρ_d [Mg/m ³]
VK114_1	5649,0	0,56
VK114_2	5766,5	0,58
VK114_3	5513,2	0,55
VK114_KA	-	0,56
VK124_1	5061,9	0,51
VK124_2	5103,5	0,51
VK124_3	5112,6	0,51
VK124_KA	-	0,51

Rakeisuus ja hienoneminen, testiraportti

Näytteen tiedot

Tuote:	Vahtokuonamurske
Näyte:	VK114 ja VK124
Nimellisraekoko:	2–32 mm
Näytteet vastaanotettu:	01.09.2022
Testi suoritettu:	19.09.-20.9.2022
Laboratorio:	Tampereen yliopisto, Tutkimuskeskus Terra

Testin kuvaus

Rakeisuus määritettiin standardin SFS-EN 933-1 mukaisesti kuivaseulontana tärypöydällä. Seulonta-aika oli kaksi minuuttia materiaalin liiallisen hienonemisen välttämiseksi. Määrittämisessä käytetty seulasarja ja välineet olivat standardin SFS-EN 932-5 mukaiset. Käytetty seulasarja koostui 31,5 mm, 25 mm, 16 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm ja 0,063 mm seuloista sekä kannesta ja pohja-astiasta.

Tulokset

Rakeisuus määritettiin 19.09.-20.09.2022 ja tulokset on esitetty taulukoissa 1–6. Rakeisuusmääritykset tehtiin kolmelle yksittäistestinäytteelle kummallakin vahtokuonamurske-erällä. 'Alkuseulonta' on vahtokuonamurskeen varsinainen rakeisuusmääritys. 'Alle 2 mm poistettu' on 'alkuseulonnan' jälkeinen tilanne, jossa alle 2 mm rakeet on poistettu näytteestä. 'Puristamisen jälkeen' on toinen rakeisuusmääritys, joka tehtiin 'Alle 2 mm poistettu' näytteille materiaalin kuormituksen jälkeen. Kuormittavana tapahtumana oli standardin SFS-EN 1097-11 mukainen kokoonpuristuvuuden ja puristuslujuuden määrittäminen. Tuloksissa esiintyy hieman virhettä muun muassa seulontahäviöiden ja mittausvirheiden vuoksi. Hienoneminen määritetään laskemalla eri seulojen massan muutoksesta 'Alle 2 mm poistettu' ja 'puristamisen jälkeen' tuloksista.

Taulukko 1. Vaahtokuonamurskenäytteen VK114_1 rakeisuusmäärityksen tulokset.

Seula (mm)	Alkuseulonta		Alle 2 mm poistettu		Kuormituksen jälkeen	
	Seulalle jäi (g)	Läpäisy (%)	Seulalle jäi (g)	Läpäisy (%)	Seulalle jäi (g)	Läpäisy (%)
31,5	0	100	0	100	0	100
25	288,3	85	288,3	84	180,0	90
16	1033,8	29	1033,8	28	806,9	46
8	294,7	13	294,7	12	366,1	26
4	125,1	7	125,1	5	189,0	16
2	87,8	2	87,8	0	115,4	9
1	13,5	1	0	0	51,4	6
0,5	7,0	1	0	0	47,1	4
0,25	6,2	1	0	0	32,2	2
0,125	4,0	0	0	0	17,3	1
0,063	2,3	0,1	0	0	9,1	0,6
Pohja	2,3	0	0	0	11,1	0
Yhteensä	1865,0		1829,7		1825,6	
Alkumassa (g)	1866,6		1828,7		1828,7	
Seulontahäviö (g)	1,6		-1,00		3,1	
Seulontahäviö (%)	-0,09		0,05		-0,17	

Taulukko 2. Vaahtokuonamurskenäytteen VK114_2 rakeisuusmäärityksen tulokset.

Seula (mm)	Alkuseulonta		Alle 2 mm poistettu		Kuormituksen jälkeen	
	Seulalle jäi (g)	Läpäisy (%)	Seulalle jäi (g)	Läpäisy (%)	Seulalle jäi (g)	Läpäisy (%)
31,5	0	100	0	100	0	100
25	433,2	77	433,2	77	213,6	89
16	909,7	29	909,7	28	726,6	49
8	296,3	14	296,3	12	382,1	29
4	134,2	7	134,2	5	203,9	18
2	83,5	2	83,5	0	120,5	11
1	13,5	2	0	0	65,8	7
0,5	9,3	1	0	0	55,3	4
0,25	8,5	1	0	0	38,4	2
0,125	5,4	1	0	0	19,9	1
0,063	3,1	0,2	0	0	11,0	0,7
Pohja	3,3	0	0	0	12,5	0
Yhteensä	1900,0		1856,9		1849,6	
Alkumassa (g)	1901,9		1853,2		1828,7	
Seulontahäviö (g)	1,9		-3,7		-20,9	
Seulontahäviö (%)	-0,1		0,2		1,14	

Taulukko 3. Vaahtokuonamurskenäytteen VK114_3 rakeisuusmäärityksen tulokset.

Seula (mm)	Alkuseulonta		Alle 2 mm poistettu		Kuormituksen jälkeen	
	Seulalle jäi (g)	Läpäisy (%)	Seulalle jäi (g)	Läpäisy (%)	Seulalle jäi (g)	Läpäisy (%)
31,5	0	100	0	100	0	100
25	494,5	74	494,5	73	305,5	84
16	975,3	24	975,3	21	724,7	45
8	247,7	11	247,7	8	391,3	23
4	99,5	6	99,5	2	171,1	14
2	40,9	4	40,9	0	80,0	10
1	15,5	3	0	0	51,3	7
0,5	19,8	2	0	0	51,0	4
0,25	17,4	1	0	0	36,3	2
0,125	11,2	1	0	0	19,8	1
0,063	6,3	0,3	0	0	10,9	0,7
Pohja	5,3	0	0	0	13,0	0
Yhteensä	1933,4		1857,9		1854,9	
Alkumassa (g)	1936,8		1857,4		1857,4	
Seulontahäviö (g)	3,4		-0,5		2,5	
Seulontahäviö (%)	-0,18		0,03		-0,13	

Taulukko 4. Vaahtokuonamurskenäytteen VK124_1 rakeisuusmäärityksen tulokset.

Seula (mm)	Alkuseulonta		Alle 2 mm poistettu		Kuormituksen jälkeen	
	Seulalle jäi (g)	Läpäisy (%)	Seulalle jäi (g)	Läpäisy (%)	Seulalle jäi (g)	Läpäisy (%)
31,5	0	100	0	100	0	100
25	386,6	77	386,6	77	187,3	89
16	872,6	26	872,6	25	723,0	46
8	255,7	11	255,7	10	326,8	26
4	115,6	5	115,6	3	180,2	15
2	46,5	2	46,5	0	74,8	11
1	6,1	2	0	0	37,6	8
0,5	7,8	1	0	0	49,3	6
0,25	8,1	1	0	0	40,0	3
0,125	5,4	1	0	0	24,8	2
0,063	2,8	0,2	0	0	13,3	0,8
Pohja	2,7	0	0	0	13,6	0
Yhteensä	1709,9		1677,0		1670,7	
Alkumassa (g)	1710,4		1674,1		1674,1	
Seulontahäviö (g)	0,5		-2,9		3,4	
Seulontahäviö (%)	-0,03		0,17		-0,2	

Taulukko 5. Vaahtokuonamurskenäytteen VK124_2 rakeisuusmäärittelyn tulokset.

Seula (mm)	Alkuseulonta		Alle 2 mm poistettu		Kuormituksen jälkeen	
	Seulalle jäi (g)	Läpäisy (%)	Seulalle jäi (g)	Läpäisy (%)	Seulalle jäi (g)	Läpäisy (%)
31,5	0	100	0	100	0	100
25	556,9	67	556,9	66	343,3	79
16	682,2	27	682,2	25	543,6	46
8	258,3	11	258,3	9	355,0	25
4	110,5	5	110,5	3	166,6	15
2	44,6	2	44,6	0	71,5	10
1	4,9	2	0	0	34,0	8
0,5	7,6	1	0	0	47,5	5
0,25	8,1	1	0	0	38,0	3
0,125	5,6	1	0	0	23,5	2
0,063	3,0	0,2	0	0	12,4	0,8
Pohja	3,0	0	0	0	12,8	0
Yhteensä	1684,7		1652,3	0	1648,2	
Alkumassa (g)	1686,8		1652,1		1652,1	
Seulontahäviö (g)	2,1		-0,2		3,9	
Seulontahäviö (%)	-0,12		0,01		-0,24	

Taulukko 6. Vaahtokuonamurskenäytteen VK124_3 rakeisuusmäärittelyn tulokset.

Seula (mm)	Alkuseulonta		Alle 2 mm poistettu		Kuormituksen jälkeen	
	Seulalle jäi (g)	Läpäisy (%)	Seulalle jäi (g)	Läpäisy (%)	Seulalle jäi (g)	Läpäisy (%)
31,5	0	100	0	100	0	100
25	450,3	74	450,3	73	255,2	85
16	743,1	30	743,1	28	533,8	53
8	270,8	14	270,8	12	373,8	30
4	129,0	6	129,0	4	190,5	19
2	71,0	2	71,0	0	103,3	12
1	8,8	2	0	0	44,9	10
0,5	7,3	1	0	0	58,9	6
0,25	7,6	1	0	0	45,0	3
0,125	5,3	1	0	0	27,1	2
0,063	3,0	0,2	0	0	14,3	0,9
Pohja	3,0	0	0	0	14,4	0
Yhteensä	1699,2		1664,2		1661,2	
Alkumassa (g)	1700,6		1664,0		1664,0	
Seulontahäviö (g)	1,4		-0,2		2,8	
Seulontahäviö (%)	-0,08		0,01		-0,17	

KIINTOTIHEYS JA VEDENIMEYTYMINEN, testiraportti

Näytteen tiedot

Tuote:	Vahtokuonamurske
Näyte:	VK114 ja VK124
Nimellisraekoko:	4–32 mm
Näytteistäminen:	26.7.2022
Testi suoritettu:	29.7.2022
Laboratorio:	Fortum Waste Solutions Oy, Riihimäen maalaboratorio

Testin kuvaus

Kiintotiheys ja vedenimeytyminen määritettiin standardin SFS-EN 1097-6:2022 liitteen C mukaisesti. Vahtokuonamurske-erän VK114 määrittämisessä käytettiin 1 l pyknometriä, ja vahtokuonamurske-erän VK124 määrittämisessä 2 l pyknometriä. Näytteitä pidettiin koko testin ajan lämpöhauteessa, jonka lämpötila oli 22 °C. Laskuissa käytetty veden tiheys oli standardin SFS-EN 1097-6:2022 liitteen G mukaisesti 0,9978.

Tulokset

Määrittäminen tehtiin 27.7.2022-29.7.2022 välisenä aikana. Testin aikana mitatut arvot on esitetty taulukossa 1 ja niiden perusteella lasketut tulokset taulukossa 2.

Taulukko 1. Tulosten määrittästä varten vahtokuonamurske-erille VK114 ja VK124 mitatut yksittäistestinäytteiden arvot, jossa m_{ssd} on kyllästetyn ja pintakuiva näytteen massa, m_{pt} on pyknometrin massa testin aikana tietyllä ajan hetkellä testin aloituksesta, m_{pc} on vedellä kalibroidun pyknometrin massa ja m_d on kuivan näytteen massa.

Näyte	$m_{ssd,24h}$ [g]	$m_{pt,5 min}$ [g]	$m_{pt,1 h}$ [g]	$m_{pt,24 h}$ [g]	m_{pc} [g]	m_d [g]
VK114_1	490,5	2254,5	2271,5	2277,6	2104,7	363,2
VK114_2	519,6	2259,5	2275,5	2281,8	2104,7	375,2
VK124_1	423,6	3624,0	3626,7	3630,5	3503,4	301,6
VK124_2	459,3	3621,4	3636,6	3640,9	3503,4	315,4

Taulukko 2. Vahtokuonamurske-erille VK114 ja VK124 määritetyt kiintotiheyden ja vedenimeytyvyyden arvot, jossa ρ_a on näennäinen kiintotiheys, ρ_{rd} on uunikuivattu kiintotiheys, ρ_{ssd} on kyllästetty ja pintakuivattu kiintotiheys sekä WA on vedenimeytyminen tietyllä ajan hetkellä testin aloituksesta.

Näyte	ρ_a [Mg/m ³]	ρ_{rd} [Mg/m ³]	ρ_{ssd} [Mg/m ³]	$WA_{5 min}$ [%]	$WA_{1 h}$ [%]	$WA_{24 h}$ [%]
VK114_1	1,904	1,141	1,541	28,7	33,4	35,0
VK114_2	1,890	1,093	1,514	32,5	36,8	38,5
VK114_KA	1,90	1,12	1,53	31	35	37
VK124_1	1,725	1,015	1,426	38,3	39,2	40,5
VK124_2	1,769	0,978	1,424	42,6	44,3	45,6
VK124_KA	1,75	1,00	1,42	40	42	43

Fortum Waste Solutions Oy
Niina Mäkinen

VEDENIMEYTYMISKORKEUS

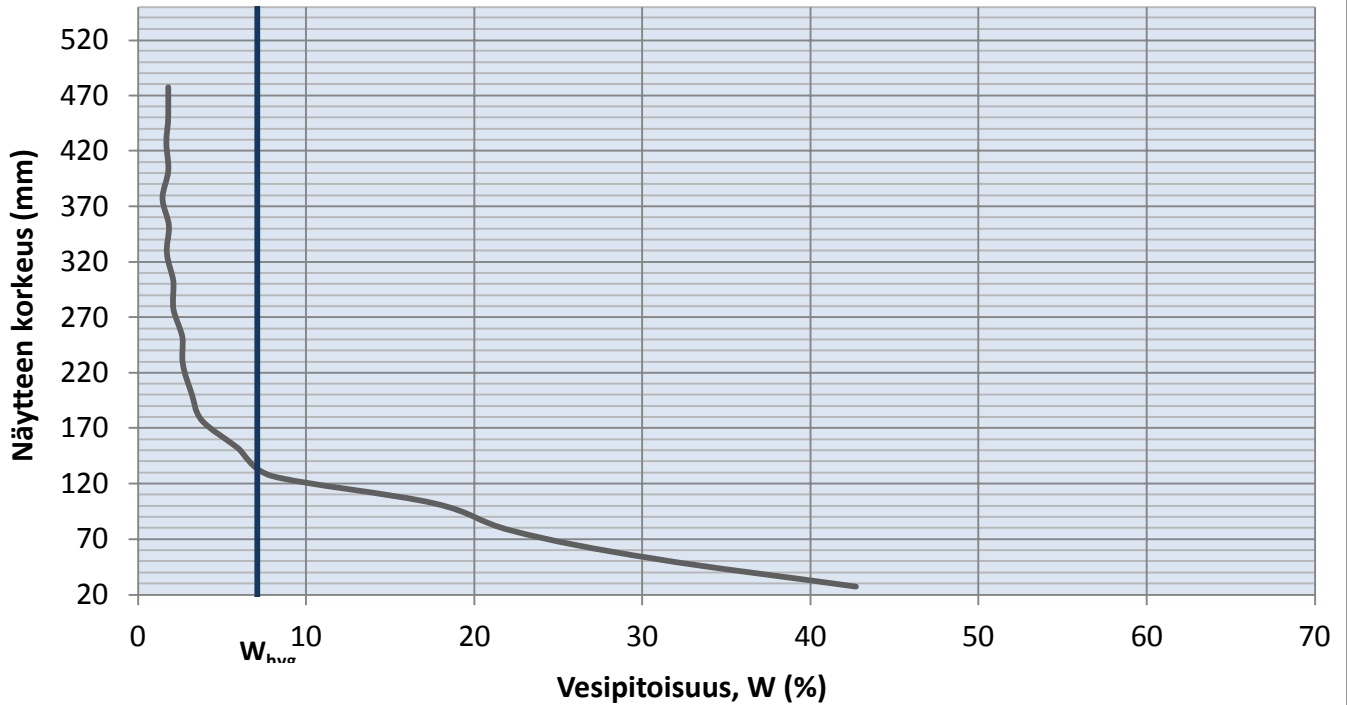
Näytteet	Vaahtokuonat tunnuksilla VK114 ja VK124 2/32 mm, (Tampereen yliopiston työnumero MPR/138/2022). Näytteet on toimitettu Tampereen yliopistolle 01.09.2022. Näytteenotto ja näytteen edustavuus ovat tilaajan vastuulla.
Näytteiden esikäsittely	Laboratorionäytteistä jaettiin testinäyte vedenimeytymiskorkeuden määrittystä varten.
Testausmenetelmät	Vedenimeytymiskorkeus määritettiin standardin SFS-EN 1097-10:2014 mukaisesti. Standardista poikettiin siten, että testinäytettä ei punnittu kokeen aikana, ainoastaan kokeen alussa.
Tulokset	Määrittäminen on tehty 6.9.2022 – 14.10.2022 välisenä aikana. Tulokset on esitetty alla.

Taulukko 1. Vedenimeytymiskorkeus SFS-EN 1097-10, Vaahtokuonat VK114 ja VK124, 2/32 mm.

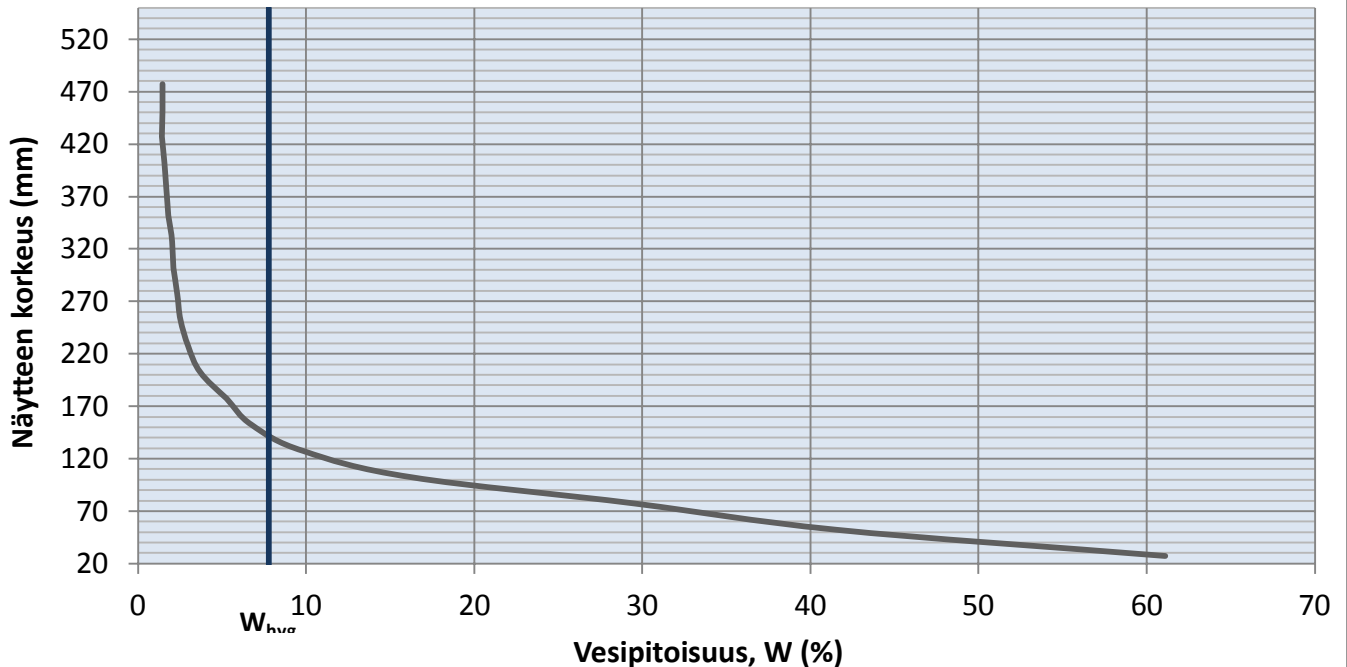
	VK114	VK124
Hygroσκοoppinen vedenabsorptio W_{hyg} (%)	7,07	7,75
Näytteen kuivairtitiheys ρ_{kuiva} (kg/m ³)	543	508
Vedenimeytymiskorkeus H_{kap} (mm)	130	140

TP

Vesipitoisuus eri kerroksissa, VK114



Vesipitoisuus eri kerroksissa, VK124



Kuva 1. Vedenimeytymiskorkeus SFS-EN 1097-10, Vaahtokuonat VK114 ja VK124, 2/32 mm.

TP

Tulokset pätevät ainoastaan testatulle näytteelle. Testausselostuksen saa kopioida ainoastaan kokonaisuudessaan.

Tero Porkka

Asiantuntija

Tero Porkka

JAKELU:

Tilaaaja
Tampereen yliopisto

TP

Vedenläpäisevyys, testiraportti

Näytteen tiedot

Tuote:	Vaahtokuonamurske
Näyte:	VK114 ja VK124
Nimellisraekoko:	2–32 mm
Näytteet vastaanotettu:	13.10.2022
Testi suoritettu:	14.10.2022

Testin kuvaus

Vedenläpäisevyyden määrittämisessä mukailtiin standardia SFS-EN ISO 17892-11:2019. Vedenläpäisevyys määritettiin vakio painamenetelmällä kiinteäseinämaisessä sylinterin muotoisessa näytesellissä, jonka halkaisija d oli 0,15 m. Hydraulinen painekorkeus H oli 0,79 m. Testinäytteisiin kohdistettiin testin aikana portaittainen lisäkuormitus paineilman avulla, mikä simuloi näytteeseen kohdistuvaa painetta maanalaisessa rakenteessa. Testinäytteitä valmistettiin yksi kummastakin erästä. Testinäytteen VK114 massa oli 2826,5 g ja testinäytteen VK124 massa oli 2654,8 g.

Tulokset

Vaahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 vedenläpäisevyydet määritettiin 14.10.2022, ja niiden tulokset on esitetty taulukoissa 1 ja 2. Virtaamaa mitattiin kumulatiivisena summana kilogrammoissa ajan suhteen. Tilavuuden ja massan välisessä muunnoksessa $1 \text{ l} = 1 \text{ kg}$.

Taulukko 1. Vaahtokuonamurske-erän VK114 vedenläpäisevyyden tulokset ajan suhteen, missä p on tiheys, p on näytteeseen paineilmalla kohdistettu lisäkuormitus, h on testinäytteen korkeus, Q on virtaama, t on aika ja k on vedenläpäisevyys.

Näyte	$\rho [\text{Mg/m}^3]$	$p [\text{bar}]$	$h [\text{mm}]$	$Q [\text{kg}]$	$t [\text{s}]$	$k [\text{m/s}]$
VK114_1	0,533	0	300	6,7	5	$2,88 \cdot 10^{-2}$
VK114_2				14,4	10	$3,09 \cdot 10^{-2}$
VK114_3				21,8	15	$3,12 \cdot 10^{-2}$
VK114_KA	-	-	-	-	-	$3,0 \cdot 10^{-2}$
VK114_1	0,567	1	282	7,8	5	$3,15 \cdot 10^{-2}$
VK114_2				14,8	10	$2,99 \cdot 10^{-2}$
VK114_3				22,0	15	$2,96 \cdot 10^{-2}$
VK114_KA	-	-	-	-	-	$3,0 \cdot 10^{-2}$
VK114_1	0,599	2	267	6,5	5	$2,49 \cdot 10^{-2}$
VK114_2				13,4	10	$2,56 \cdot 10^{-2}$
VK114_3				20,6	15	$2,63 \cdot 10^{-2}$
VK114_KA	-	-	-	-	-	$2,6 \cdot 10^{-2}$
VK114_1	0,645	3	248	4,3	5	$1,53 \cdot 10^{-2}$
VK114_2				9,3	10	$1,65 \cdot 10^{-2}$
VK114_3				13,1	15	$1,55 \cdot 10^{-2}$
VK114_KA	-	-	-	-	-	$1,6 \cdot 10^{-2}$

Taulukko 2. Vaahtokuonamurske-erän VK124 vedenläpäisevyyden tulokset ajan suhteen, missä p on tiheys, p on näytteeseen paineilmalla kohdistettu lisäkuormitus, h on testinäytteen korkeus, Q on virtaama, t on aika ja k on vedenläpäisevyys.

Näyte	ρ [Mg/m^3]	p [bar]	h [mm]	Q [kg]	t [s]	k [m/s]
VK124_1	0,501	0	300	8,0	5	$3,44 \cdot 10^{-2}$
VK124_2				15,6	10	$3,35 \cdot 10^{-2}$
VK124_3				23,0	15	$3,30 \cdot 10^{-2}$
VK124_KA	-	-	-	-	-	$3,4 \cdot 10^{-2}$
VK124_1	0,542	1	277	7,5	5	$2,98 \cdot 10^{-2}$
VK124_2				14,8	10	$2,94 \cdot 10^{-2}$
VK124_3				22,4	15	$2,96 \cdot 10^{-2}$
VK124_KA	-	-	-	-	-	$3,0 \cdot 10^{-2}$
VK124_1	0,594	2	253	5,9	5	$2,14 \cdot 10^{-2}$
VK124_2				11,6	10	$2,10 \cdot 10^{-2}$
VK124_3				16,9	15	$2,04 \cdot 10^{-2}$
VK124_KA	-	-	-	-	-	$2,1 \cdot 10^{-2}$
VK124_1	0,626	3	240	3,5	5	$1,20 \cdot 10^{-2}$
VK124_2				6,8	10	$1,17 \cdot 10^{-2}$
VK124_3				9,8	15	$1,12 \cdot 10^{-2}$
VK124_KA	-	-	-	-	-	$1,2 \cdot 10^{-2}$

Rakennustekniikka

Tutkimusselostus nro RAK/2695/2023

Fortum keinokiviaineksen lämmönjohtavuuden määrittäminen irtomateriaalille



30.10.2023

Tampere 2023

Tutkimusselostus

8 sivua

Tilaaaja	Fortum Waste Solutions Oy Mäkinen Niina	
Tehtävä	Lämmönjohtavuuden määrittäminen keinokiviaineksen irtomateriaalille	
Tutkimusaika	01.12.2022 - 30.08.2023	
Tutkijat	Ilkka Tuurala, DI Pauli Karjala, TkK Tampereen yliopisto Rakennustekniikka PL 600, 33014 Tampereen yliopisto Korkeakoulunkatu 5, 33720 Tampere Puh. 0294 5211 (vaihde)	
Jakelu	Tilaaaja Tampereen yliopisto, Rakennustekniikka Tutkijat	1 kpl + pdf 1 kpl 1 kpl

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille materiaaleille
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	3
1.1	Tutkimushankkeen lyhyt kuvaus	3
2	KOE	3
2.1	Koemenetelmän kuvaus	3
2.2	Materiaali ja esivalmistelut	3
2.3	Kalibrointi	4
2.4	Kokeet	4
3	TULOKSET	7

1 JOHDANTO

1.1 Tutkimushankkeen lyhyt kuvaus

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää keinokiviaineksen lämmönjohtavuus rakeiselle irtomateriaalille. Tutkittava tuote on Fortum keinokiviaines, josta tutkittiin kaksi koostumukseltaan erilaista koe-erää. Koe tehtiin standardin EN 12667 mukaisesti.

2 KOE

2.1 Koemenetelmän kuvaus

Lämmönjohtavuuskokeet suoritetaan lämpövirtalevylaitteen avulla. Laitteen pääosat ovat ylä- ja alalevy, kaksi lämpövirtalevyä sekä suojakuori. Koekappale asetetaan ylä- ja alalevyjen väliin. Lämpövirtalevyt on integroitu ylä- ja alaosan keskiosaan siten, että ne tulevat kokeessa koekappaleen pintoja vasten. Pintojen lämpötilat säädetään erisuuruuksiksi, jolloin niiden välille muodostuu lämpötilagradientti. Tämä aiheuttaa pintojen välille lämpövirran, jonka suuruutta mitataan lämpövirtalevyillä. Mittaukset suoritetaan standardin *SFS EN 12667 "Rakennusmateriaalien ja -tuotteiden lämpötekniset ominaisuudet. Lämmönvastuksen määrittäminen kuumalevy- ja lämpövirtalevylaitteella. Kuivat ja kosteat tuotteet, joilla on suhteellisen matala tai matala lämmönvastus."* mukaisesti. Mittauksessa koekappale on vaakasuorassa ja lämpövirran suunta lämpimämmältä ylälevyltä kylmempää alalevyä kohti, ylhäältä alaspäin. Tämä vähentää kondenssin aiheuttamaa kosteuden tiivistymistä ylälevyn ja kappaleen kostumisen aiheuttamaa virhettä kokeen aikana.

2.2 Materiaali ja esivalmistelut

Tutkittava materiaali on Fortum keinokiviaines, joka on irtomateriaalia. Materiaali on irtomateriaalia. FOX304 koekappaleet valmistettiin XPS-kehyksiin täyttämällä 240 x 240 x 100 mm³ kehys kiviaineksella. Kehystä ravistelemalla pyrittiin saamaan se mahdollisimman täyteen. Materiaalia on kahta eri koostumusta, erät VK114 ja VK124. VK124 erästä valmistettiin kolme koekappaletta, jotka on numeroitu 1.1–1.3 ja myös VK114 erästä valmistettiin kolme koekappaletta, jotka on numeroitu 2.1–2.3.

Valmistuksen jälkeen koekappaleet tasapainotettiin olosuhdehuoneessa 23±2 °C lämpötilassa ja 50±10 % RH suhteellisessa kosteudessa.

Taulukko 2.1 Koekappaleiden massa tiheys ja koekappaleiden tiheyksien keskiarvo per erä.

Koekappale	massa [g]	tiheys [kg/m ³]	tiheyden keskiarvo per erä [kg/m ³]
1.1 (VK124)	3109,34	661,6	
1.2 (VK124)	3061,4	651,4	
1.3 (VK124)	3033,54	645,4	652,8
2.1 (VK114)	3351,84	713,1	
2.2 (VK114)	3354,31	713,7	
2.3 (VK114)	3215,29	684,1	703,6

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille materiaaleille
Tutkimuslaskelma saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

2.3 Kalibrointi

FOX304 laite on kalibroitu kivivillalevy-kalibrointikappaleella, jonka lämmönjohtavuus on tunnettu ja sertifioitu.

2.4 Kokeet

Kokeet suoritettiin 28.1.2023-9.1.2023. 50 % RH olosuhteessa. Kokeiden jälkeen koekappaleet tasapainotettiin ja kokeet suoritettiin uudestaan 23.5.2023-29.5.2023 93 % RH olosuhteessa.

Koekappalekohtaiset tulokset on esitetty taulukoissa 2.2–2.6. Yksittäisen kokeen mittaustarkkuus on 1 %, mutta kalibrointiepävarmuus huomioiden absoluuttinen tarkkuus on 3 %. 50 % RH olosuhteeseen tasapainotetulle koekappaleelle tehtiin kaksi mittausta perätysten, ensin 10 °C keskilämpötilassa ja sitten 20 °C keskilämpötilassa. 93 % RH olosuhteeseen tasapainotetulle koekappaleelle tehtiin kolme mittausta peräkkäin, ensin 5 °C keskilämpötilassa, 10 °C keskilämpötilassa ja lopuksi 20 °C keskilämpötilassa. Koska mittaukset tehtiin eri lämpötiloissa peräkkäin, koekappaleen kosteus on hieman muuttunut alkutasapainotuskosteudesta kokeen aikana. Tämän vaikutuksen ei kuitenkaan pitäisi olla merkittävä ja mittaukset tehtiin aloittaen pienemmästä lämpötilasta, jotta vaikutus olisi pienempi.

Taulukko 2.2 Keinokiviaineksen lämmönjohtavuus 50% RH tasapainotettuna 10 °C keskilämpötilassa

Koekappale	Olo- suhde	Paksuus	Ylälevyn lämpö- tila	Alalevyn lämpö- tila	Lämpö- tilaero	Keski- lämpö- tila	Lämmönjohtavuus
	ϕ [% RH]	d [mm]	T [°C]	T [°C]	ΔT [°C]	T [°C]	λ [W/(mK)]
1.1	50	100	15	5	10	10	0,113
1.2	50	100	15	5	10	10	0,114
1.3	50	100	15	5	10	10	0,120
2.1	50	100	15	5	10	10	0,120
2.2	50	100	15	5	10	10	0,119
2.3	50	100	15	5	10	10	0,119

Taulukko 2.3 Keinokiviaineksen lämmönjohtavuus 50% RH tasapainotettuna 20 °C keskilämpötilassa

Koekappale	Olo- suhde	Paksuus	Ylälevyn lämpö- tila	Alalevyn lämpö- tila	Lämpö- tilaero	Keski- lämpö- tila	Lämmönjohtavuus
	ϕ [% RH]	d [mm]	T [°C]	T [°C]	ΔT [°C]	T [°C]	λ [W/(mK)]
1.1	50	100	30	10	20	20	0,120
1.2	50	100	30	10	20	20	0,120
1.3	50	100	30	10	20	20	0,127
2.1	50	100	30	10	20	20	0,128
2.2	50	100	30	10	20	20	0,126
2.3	50	100	30	10	20	20	0,126

Taulukko 2.4 Keinokiviaineksen lämmönjohtavuus 93 % RH tasapainotettuna 20 °C keskilämpötilassa

Koekappale	Olo- suhde	Paksuus	Ylälevyn lämpö- tila	Alalevyn lämpö- tila	Lämpö- tilaero	Keski- lämpö- tila	Lämmönjohtavuus
	ϕ [% RH]	d [mm]	T [°C]	T [°C]	ΔT [°C]	T [°C]	λ [W/(mK)]
1.1	93	100	30	10	20	20	0,152
1.2	93	100	30	10	20	20	0,150
1.3	93	100	30	10	20	20	0,153
2.1	93	100	30	10	20	20	0,160
2.2	93	100	30	10	20	20	0,155
2.3	93	100	30	10	20	20	0,154

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille materiaaleille
Tutkimuslaskelma saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

Taulukko 2.5 Keinokiviaineksen lämmönjohtavuus 93 % RH tasapainotettuna 15 °C keskilämpötilassa

Koekappale	Olo- suhde	Paksuus	Ylälevyn lämpö- tila	Alalevyn lämpö- tila	Lämpö- tilaero	Keski- lämpö- tila	Lämmönjohtavuus
	ϕ [% RH]	d [mm]	T [°C]	T [°C]	ΔT [°C]	T [°C]	λ [W/(mK)]
1.1	93	100	20	10	10	15	0,141
1.2	93	100	20	10	10	15	0,139
1.3	93	100	20	10	10	15	0,143
2.1	93	100	20	10	10	15	0,149
2.2	93	100	20	10	10	15	0,145
2.3	93	100	20	10	10	15	0,144

Taulukko 2.6 Keinokiviaineksen lämmönjohtavuus 93 % RH tasapainotettuna 5 °C keskilämpötilassa

Koekappale	Olo- suhde	Paksuus	Ylälevyn lämpö- tila	Alalevyn lämpö- tila	Lämpö- tilaero	Keski- lämpö- tila	Lämmönjohtavuus
	ϕ [% RH]	d [mm]	T [°C]	T [°C]	ΔT [°C]	T [°C]	λ [W/(mK)]
1.1	93	100	10	0	10	5	0,128
1.2	93	100	10	0	10	5	0,126
1.3	93	100	10	0	10	5	0,129
2.1	93	100	10	0	10	5	0,134
2.2	93	100	10	0	10	5	0,132
2.3	93	100	10	0	10	5	0,130

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille materiaaleille
Tutkimuslaskelma saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

3 TULOKSET

Tuloksena taulukoissa 3.1–3.5 on esitetty materiaalin mitattu lämmönjohtavuus ja keskihajonta käyttäen Studentin jakaumaa ja 90 % luottamusväli eri keskilämpötiloissa ja suhteellisissa kosteuksissa.

Taulukko 3.1 Keinokiviaineksen lämmönjohtavuus 50 % RH tasapainotettuna 10 °C keskilämpötilassa

Koesarja	Keskiarvo	Keskihajonta	90 % luottamusväli	alaraja [W/(mK)]	yläraja [W/(mK)]
1.x (VK124)	0,116	3,808E-03	6,42E-03	0,109	0,122
2.x (VK114)	0,119	1,002E-03	1,69E-03	0,118	0,121

Taulukko 3.2 Keinokiviaineksen lämmönjohtavuus 50 % RH tasapainotettuna 20 °C keskilämpötilassa

	Keskiarvo	Keskihajonta	90 % luottamusväli	alaraja [W/(mK)]	yläraja [W/(mK)]
1.x (VK124)	0,122	4,251E-03	7,17E-03	0,115	0,129
2.x (VK114)	0,127	1,361E-03	2,30E-03	0,124	0,129

Taulukko 3.3 Keinokiviaineksen lämmönjohtavuus 93 % RH tasapainotettuna 5 °C keskilämpötilassa

	Keskiarvo	Keskihajonta	90 % luottamusväli	alaraja [W/(mK)]	yläraja [W/(mK)]
1.x (VK124)	0,128	1,510E-03	2,55E-03	0,125	0,130
2.x (VK114)	0,132	2,021E-03	3,41E-03	0,129	0,135

Taulukko 3.4 Keinokiviaineksen lämmönjohtavuus 93 % RH tasapainotettuna 15 °C keskilämpötilassa

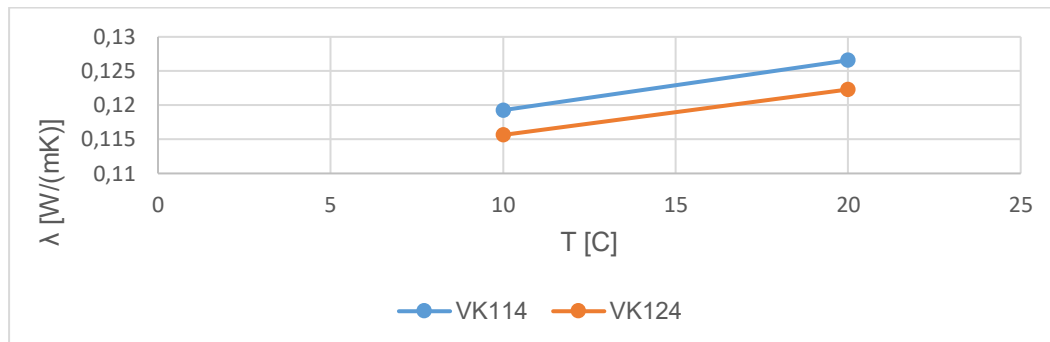
	Keskiarvo	Keskihajonta	90 % luottamusväli	alaraja [W/(mK)]	yläraja [W/(mK)]
1.x (VK124)	0,141	1,908E-03	3,22E-03	0,138	0,144
2.x (VK114)	0,146	2,740E-03	4,62E-03	0,141	0,150

Taulukko 3.5 Keinokiviaineksen lämmönjohtavuus 93 % RH tasapainotettuna 20 °C keskilämpötilassa

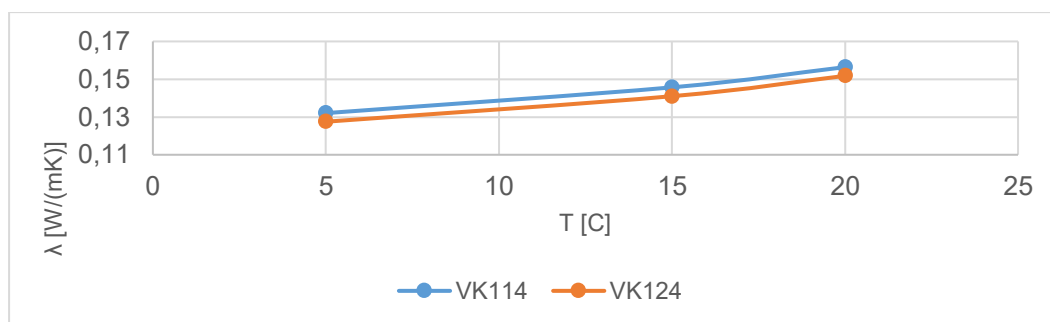
	Keskiarvo	Keskihajonta	90 % luottamusväli	alaraja [W/(mK)]	yläraja [W/(mK)]
1.x (VK124)	0,152	1,724E-03	2,91E-03	0,149	0,155
2.x (VK114)	0,156	3,132E-03	5,28E-03	0,151	0,162

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tarkastelluille materiaaleille
Tutkimusselostuksen saa kopioida vain kokonaisuudessaan.

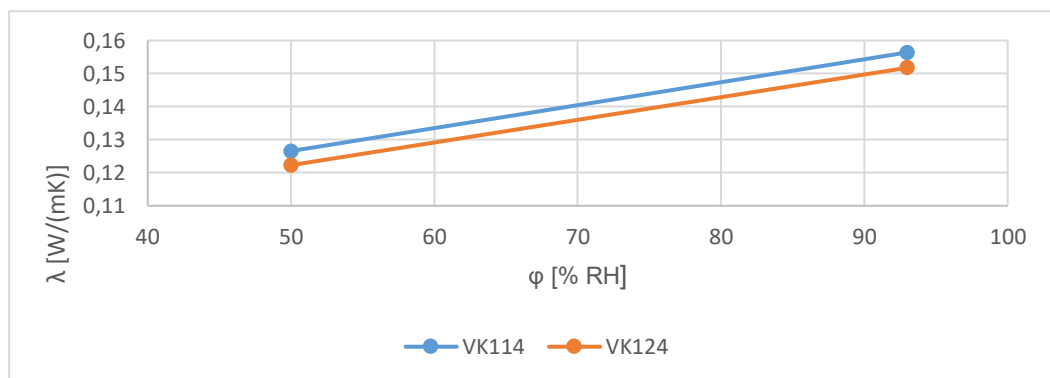
Kuva 3.1 Lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona 50 % RH olosuhteeseen tasapainotettuna



Kuva 3.1 Lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona 93 % RH olosuhteeseen tasapainotettuna



Kuva 3.3 Lämmönjohtavuus suhteellisen kosteuden funktiona 20 °C keskilämpötilassa



Edellä esitetyistä tuloksista voidaan todeta, että erän VK114 lämmönjohtavuus on jonkin verran VK124 erää suurempi. Tulos on odotettu erän VK114 ollessa erää VK124 painavampaa (sisältäen vähemmän ilmahuokosia). Lämmönjohtavuus nousee odotetusti sekä keskilämpötilan noustessa että suhteellisen kosteuden noustessa.

Tampereella 30.10.2023

TAMPEREEN YLIOPISTO
Rakennustekniikka



Eero Tuominen
Projektipäällikkö, dipl. ins.



Juha Vinha
Professori, tekn. toht.



Ilkka Tuurala
Tutkija, dipl. ins.

Jäätymis-sulamiskestävyys, testiraportti

Näytteen tiedot

Tuote:	Vahtokuonamurske
Näyte:	VK114 ja VK124
Nimellisraekoko:	4–32 mm
Laboratorio:	Fortum Waste Solutions Oy, Riihimäen maalaboratorio
Näytteistäminen:	2.8.2022 VK114, 26.9.2022 VK124 (1.), 17.10.2022 VK124 (2.)

Testin kuvaus

Jäätymis-sulamiskestävyys määritettiin standardin SFS-EN 1367-7:2014 mukaisesti. Standardista poikettiin siten, että testinäytteet ainoastaan kuivaseulottiin ennen testin aloitusta. Testin aikana näytteitä ei kuivatettu erillisellä seulalla vaan astioiden päälle asetettiin verkot, jotka estivät > 2 mm partikkeleiden poistumisen testinäytteistä.

Tulokset

Jäätymis-sulamiskestävyys määritettiin 3.8.2022-19.8.2022 välisenä aikana vahtokuonamurske-erälle VK114, 27.9.2022-14.10.2022 välisenä aikana vahtokuonamurske-erälle VK124 ensimmäisen kerran ja 18.10.2022-10.11.2022 välisenä aikana toisen kerran vahtokuonamurske-erälle VK124. Jäädytys-sulatuskokeiden tulokset on esitetty taulukossa 1 ja mittauspäiväkirjat on esitetty kuvissa 1–3.

Taulukko 1. Vahtokuonamurske-erien VK114 ja VK124 jäätymis-sulamiskestävyyden tulokset, missä $m_{d,1}$ on testinäytteen kuivamassa testin alussa, $m_{d,2}$ on testinäytteen kuivamassa testin lopussa ja FL on massan menetys jäätymis-sulamiskokeen aikana.

Näyte	$m_{d,1}$ (g)	$m_{d,2}$ (g)	FL (%)
VK114_1	874,1	801,8	8,27
VK114_2	839,1	750,7	10,54
VK114_3	992,5	924,3	6,87
VK114_KA	-	-	8,6
VK124_1 (1.)	904,5	923,2	16,42
VK124_2 (1.)	756,0	766,7	16,95
VK124_3 (1.)	890,8	748,5	15,97
VK124_KA (1.)	-	-	16,4
VK124_1 (2.)	709,8	376,8	46,91
VK124_2 (2.)	691,9	373,3	46,05
VK124_3 (2.)	746,8	411,9	44,84
VK124_KA (2.)	-	-	45,9

JÄÄDYTYKSEN-SULATUSKOE MITTAUSPÄIVÄKIRJA - VK114								
Sykli	Pvm (pakastus)	Klo (pakastus)	Suorittaja	Pvm (sulatus)	Klo (sulatus)	Lämpötila °C (sulatusvesi)	Suorittaja	Huomio
1	3.8.2022	16.00	PMO	4.8.2022	7.00	21,9	PMO	Kyllästys aloitettu klo 12.00
2	4.8.2022	8.10	PMO	4.8.2022	12.10	22,4	PMO	
3	4.8.2022	13.25	PMO	5.8.2022	7.45	21,9	PMO	
4	5.8.2022	8.50	PMO	5.8.2022	12.50	22,5	PMO	
5	5.8.2022	14.00	PMO	8.8.2022	7.15	21,2	PMO	
6	8.8.2022	8.15	PMO	8.8.2022	12.15	20,7	PMO	
7	8.8.2022	13.17	PMO	9.8.2022	7.25	20,9	PMO	
8	9.8.2022	9.25	PMO	9.8.2022	13.30	21,3	PMO	
9	9.8.2022	14.30	PMO	10.8.2022	7.30	20,9	PMO	
10	10.8.2022	8.30	PMO	10.8.2022	12.30	20,8	PMO	
11	10.8.2022	13.30	PMO	11.8.2022	7.00	21,2	PMO	
12	11.8.2022	8.00	PMO	11.8.2022	12.00	21,8	PMO	
13	11.8.2022	13.05	PK	12.8.2022	6.55	21,4	PK	
14	12.8.2022	8.00	PK	16.8.2022	07.10	22,9	PK	
15	16.8.2022	8.19	PK	16.8.2022	12.22	21,7	PK	
16	16.8.2022	13.32	PK	17.8.2022	7.17	21,3	PK	
17	17.8.2022	8.26	PK	17.8.2022	12.31	22,7	PK	
18	17.8.2022	13.41	PK	18.8.2022	07.11	21,7	PK	
19	18.8.2022	8.19	PK	18.8.2022	12.25	21,2	PK	
20	18.8.2022	13.30	PK	19.8.2022	09.30	21,8	JL	

Kuva 1. Vaahtokuonamurske-erän VK114 jäädytys-sulatuskokeen mittauspäiväkirja

JÄÄDYTYKSEN-SULATUSKOE MITTAUSPÄIVÄKIRJA - VK124 (1.)								
Sykli	Pvm (pakastus)	Klo (pakastus)	Suorittaja	Pvm (sulatus)	Klo (sulatus)	Lämpötila °C (sulatusvesi)	Suorittaja	Huomio
1	27.9.2022	14.05	JL	28.9.2022	7.15	20,6	PK	Kyllästys aloitettu klo 10.00
2	28.9.2022	8.32	PK	28.9.2022	12.35	21,7	PK	Klo 12.35 pakastin näytti -15 °C, näyte siirretty toiseen pakastimeen
3	28.9.2022	13.45	PK	29.9.2022	07.11	21,1	PK	
4	29.9.2022	8.19	PK	29.9.2022	12.23	21,9	PK	
5	29.9.2022	13.33	PK	30.9.2022	12.21	21,3	PK	
6	30.9.2022	8.19	PK	30.9.2022	12.21	22,0	PK	
7	30.9.2022	13.33	PK	3.10.2022	7.19	20,9	PK	
8	3.10.2022	8.27	PK	3.10.2022	12.29	21,4	PK	
9	3.10.2022	13.37	PK	4.10.2022	7.28	21,4	PK	
10	4.10.2022	8.38	PK	4.10.2022	12.43	21,7	PK	
11	4.10.2022	13.53	PK	5.10.2022	7.20	21,0	PK	
12	5.10.2022	8.27	PK	5.10.2022	12.29	21,7	PK	
13	5.10.2022	13.38	PK	6.10.2022	7.26	21,5	PK	
14	6.10.2022	8.34	PK	6.10.2022	12.38	22,0	PK	
15	6.10.2022	13.45	PK	7.10.2022	7.41	21,8	PK	
16	7.10.2022	8.47	PK	7.10.2022	12.54	21,9	PK	
17	7.10.2022	14.02	PK	10.10.2022	7.23	21,8	PK	
18	10.10.2022	8.30	PK	10.10.2022	12.35	21,6	PK	
19	10.10.2022	13.42	PK	11.10.2022	7.27	22,1	PK	
20	11.10.2022	8.33	PK	14.10.2022	10.20	22,1	JL	

Kuva 2. Vaahtokuonamurske-erän VK124 ensimmäisen jäädytys-sulatuskokeen mittauspäiväkirja

JÄÄDYTYKSEN-SULATUSKOE MITTAUSPÄIVÄKIRJA - VK124 (2.)									
Sykli	Pvm (pakastus)	Klo (pakastus)	Suorittaja	Pvm (sulatus)	Klo (sulatus)	Lämpötila °C (sulatusvesi)	Suorittaja	Huomio	
1	18.10.2022	14.10	JL	19.10.2022	7.18	22,0	PK	Kyllästys aloitettu klo 10.00	
2	19.10.2022	8.26	PK	19.10.2022	12.29	22,1	PK		
3	19.10.2022	13.36	PK	20.10.2022	7.15	21,5	PK		
4	20.10.2022	8.23	PK	20.10.2022	13.01	21,5	PK		
5	20.10.2022	14.09	PK	21.10.2022	7.22	21,2	PK	Alkaa paakkuuntua pohjalle	
6	21.10.2022	8.37	PK	21.10.2022	12.44	21,8	PK	Sulatusaikaa nostettu, sulatus vedessä n. 2 h	
7	21.10.2022	14.45	PK	24.10.2022	8.45	20,2	PMO	Sulatus vedessä 2 h	
8	24.10.2022	11.45	PMO	25.10.2022	10.05	20,3	SSa	Sulatus vedessä 2,5 h, valutus 5 min	
9	25.10.2022	13.00	SSa	26.10.2022	10.45	21,3	PMO	Sulatus vedessä 2,5 h, valutus 5 min	
10	26.10.2022	12.50	PMO	27.10.2022	10.20	21,2	SSa	Sulatus vedessä 2h, jäinen kakkare, valutus 1h	
11	27.10.2022	13.38	SSa	28.10.2022	12.30	22,8	SSa	Sulatus vedessä 2h, valutus 0,5 h	
12	28.10.2022	15.00	PMO/SSa	31.10.2022	9.36	19,8	PK	Sulatus vedessä 2h, jäinen kakkare, valutus 1h	
13	31.10.2022	12.44	PK	1.11.2022	9.15	20,4	SSa	Sulatus vedessä 2h, valutus 1,5 h	
14	1.11.2022	13.50	PMO	2.11.2022	11.03	20,8	SSa	Sulatus vedessä 2h, valutus 1h	
15	2.11.2022	14.15	PMO	3.11.2022	8.14	20,5	PK	Sulatus vedessä 2h, valutus 1,5 h, pohjalla jäinen kakkare	
16	3.11.2022	11.53	PK	4.11.2022	7.37	21,2	PK	Sulatus vedessä 2h, valutus 1,5h	
17	4.11.2022	11.14	PK	7.11.2022	8.10	21,9	SSa	Sulatus vedessä 2h, valutus 1,5h	
18	7.11.2022	11.40	SSa	8.11.2022	8.40	22,5	SSa	Sulatus vedessä 2h, valutus 1,5h	
19	8.11.2022	12.20	SSa	9.11.2022	11.00	21,2	PK	Sulatus vedessä 2h, valutus 3h	
20	9.11.2022	15.40	SSa	10.11.2022	8.50	21,2	JL	Sulatus vedessä 2h	

Kuva 3. Vaahtokuonamurske-erän VK124 toisen jäädätyksen-sulatuskokeen mittauspöytäkirja

Fortum Waste Solutions Oy
Niina Mäkinen

Vahtokuonanäytteet, laboratorikokeet

Näytteet Tutkittavat näytteet olivat vahtokuonaa tunnuksilla VK114 ja VK124. Näytteiden raekoko oli 2-32 mm. Näytteet on tutkittu Tampereen yliopiston työnumerolla MPR/138/2022. Näytteet on toimitettu Tampereen yliopistolle 01.09.2022. Näytteenotto ja näytteen edustavuus ovat tilaajan vastuulla.

Testausmenetelmät Sykliset kolmiaksiaalikokeet tehtiin Tampereen yliopiston tutkimuskeskus Terran kehittämällä kuormituslaitteistolla. Kolmiaksiaalikokeissa resilient-moduulien määrittäminen toteutettiin SFS-EN 13286-7:en 2004 Method B:n mukaisesti käyttämällä Low stress level -menettelyn mukaisia jännitystasoja resilient-moduuliarvojen määrittämiseksi. Testattavan materiaalin hauraudesta johtuen kaikkia kuormitusyhdistelmiä ei kuitenkaan toteutettu näytepartikkelien liiallisen murskautumisen välttämiseksi (Liite 1).

Syklisen kuormituksen jälkeen koekappaleelle tehtiin kyllästämättömänä moniportainen staattinen avoin kolmiaksiaalikoe 20, 40 ja 80 kPa:n sellipaineilla. Staattisen kuormituksen aikana 20 ja 40 kPa sellipaineella arvioitiin murren läheneminen ja kuormitus keskeytettiin ennen murtoa. Viimeisellä, 80 kPa, sellipaineella koekappaletta kuormitettiin joko murtoon tai siihen saakka, kunnes koekappaleisiin kiinnitettyjen siirtymäantureiden maksimiraja-arvo saavutettiin.

Aksiaalinen kokoonpuristuvuuskoe tehtiin standardia EN 1097-11:2013 mukaillen ja siitä poikettiin seuraavasti:

- Koe tehtiin halkaisijaltaan 152 mm Proctor-muottiin ja koekappaleiden korkeus oli noin 150 mm.
- Siirtymä mitattiin yhdellä anturilla, joka oli kuormitustunkissa
- Kuorma jaettiin 6,35 kg teräs- ja alumiinilevyillä, joiden 3,5 kPa pintakuorma oli hieman pienempi kuin standardissa olleista dimensioista tuleva 3,8 kPa:n pintakuorma.
- kuormitusvoiman kasvu oli 0,034 kN/s standardin 0,06 kN/s sijasta.
- Materiaali lisättiin Proctor-muottiin pienissä erissä kauhalla.
- Kuormitus lopetettiin, kun näyte oli kokoonpuristunut 10 %

9.12.2022

Rakeisuudet määritettiin ennen ja jälkeen aksiaalisten kokoonpuristuvuuskokeiden sekä kolmiaksaalikokeiden jälkeen. Seulonta-aika oli poikkeuksellisesti vain 2 minuutin kestoinen materiaalin hienonemisen välttämiseksi.

Kolmiaksaalikokeiden tulokset

Kokeet tehtiin molemmille materiaaleille VK114 ja VK124. Näytteet kostutettiin ionivaihdetulla vedellä ja jätettiin tasaantumaan suljettuun astiaan vähintään vuorokaudeksi ennen kolmiaksaalikokeakappaleen tekoa. Koekappaleiden halkaisijat olivat 200 mm ja korkeudet noin 400 mm kokeen alussa. Koekappaleet tehtiin kumikalvon sisälle lisäämällä materiaalia kauhalla (vetoisuus noin litra). Kauhallisten välissä sitä sulloittiin hyvin kevyesti 50*100 mm² puupalikalla naputellen. Tämän jälkeen koekappaleiden yläpinnan päälle levitettiin suodatinkangas ja sen päälle noin 90 mm tasaussoraa.

Koekappaleita tiivistettiin täryttämällä 1-5 sekunnin jaksoissa. Näytteestä VK114 tehdyn koekappaleen tiivistysaika oli kokonaisuudessaan 15 sekuntia ja VK124:n 8 sekuntia. Lopuksi tasaussora ja suodatinkangas poistettiin ja koekappaleiden yläpinnan tasaisuuden varmistamiseksi sitä tiivistettiin suoraan koekappaleen yläpinnasta vielä kertaalleen noin sekunnin ajan. Taulukossa 1 on esitetty koekappaleiden valmistus- ja kuormituspäivät, kokeen jälkeen määritetyt vesipitoisuudet, irtotiheydet sekä kuivairtitiheydet. Kokeiden jälkeen koekappaleet jaettiin näytteen keskivaiheilta kahteen osaan ja osista tehtiin rakeisuusmääritykset. Kolmiaksaalikokeiden jälkeen määritetyt rakeisuudet on esitetty liitteessä 1.

Taulukko 1. Koekappaleiden valmistuspäivät, kuormituspäivät, irtotiheydet, ρ , kokeen jälkeen määritetyt vesipitoisuudet, w , ja näitä vastaava kuivairtitiheydet, ρ_d .

Materiaali	Näyte valmistettu / kuormitettu	ρ , Mg/m ³	w , %	ρ_d , Mg/m ³
VK114	17.10.22 / 17.10.22	0,883	33,4	0,662
VK124	23.11.22/ 23.11.22	0,797	33,5	0,597

Resilient-moduulimääritysten tulokset on esitetty liitteessä 1. Esikuormituspulsseja ajettiin noin 1000 kpl. Koekappaleen esikuormituksessa palautumattomat muodonmuutokset olivat melko pieniä ja ne stabiloituivat nopeasti.

Taulukossa 2 on esitetty koekappaleen laskennalliset kuivairtitiheydet kuormituksen alkaessa ja kokeesta määritettyjen resilient-moduulien perusteella sovitettut k_1 ja k_2 arvot yhtälöön (1), jossa M_r on resilient-moduuli (kPa), θ on pääjännitysten summa (kPa), θ_0 on vertailuluku (100 kPa), k_1 on materiaali parametri (moduuliluku) ja k_2 on materiaali parametri (jännitysekspONENTTI).

$$M_r = k_1 \theta_0 (\theta / \theta_0)^{k_2} \quad (1)$$

Taulukko 2. Koekappaleen laskennallinen kuivairtitiheys kuormituksen alkaessa, ρ_d , ja koekappaleesta määritetyt k_1 ja k_2 parametrit ja näitä vastaavat resilient-moduulin arvot pääjännitysten summan (θ) arvoilla 100 kPa ja 200 kPa.

Materiaali	ρ_d , Mg/m ³	k_1	k_2	Mr, MPa ($\theta = 100$ kPa)	Mr, MPa ($\theta = 200$ kPa)
VK114	0,66	781	0,322	78	98
VK124	0,60	826	0,370	83	107

Koekappaleelle tehdyn moniportaisen staattisen kolmiaksiaalikokeen kuvaajat on esitetty myös liitteessä 1. Kuormitusten perusteella koekappaleesta määritetty kitkakulma ja koheesio on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Kyllästämättömästä koekappaleesta moniportaisella staattisella kolmiaksiaalikokeella määritetty kitkakulma, ϕ , ja koheesio, c .

Materiaali	ϕ	c , kPa
VK114	20,8°	34,9
VK124	13,2°	46,0

Kokoonpuristuvuuskokeiden tulokset

Taulukossa 4 on esitetty aksiaalisista kokoonpuristuvuuskokeista määritetyt kokoonpuristuvuudet, CS(10), näytteiden irtotiheydet ennen, ρ_0 , ja jälkeen, ρ_1 , tärytyksen sekä irtotiheyksien materiaalikohtaiset keskiarvot. Liitteessä 2 on esitetty aksiaalista kokoonpuristuvuuskokeista määritetyt kokoonpuristuma-jännityskuvaajat. Rakeisuusmääritykset tehtiin jokaisesta kuormitetusta koekappaleesta ja tulokset on esitetty liitteessä 2.

9.12.2022

Taulukko 4. Kokoonpuristuvuuskokeiden yksittäisistä kokeista määritetyt kokoonpuristuvuudet, C, 10% muodonmuutostasoa vastaavat puristusjännitykset, CS(10), irtotiheydet ennen, ρ_0 , ja jälkeen, ρ_1 , tärytyksen sekä irtotiheyksien materiaaliikohtaiset keskiarvot (KA).

Koekappale	C [%]	CS(10) [MPa]	ρ_0 [Mg/m ³]	ρ_1 [Mg/m ³]
VK114_1	18,2	0,623	0,584	0,714
VK114_2	18,8	0,644	0,610	0,752
VK114_3	19,0	0,628	0,577	0,712
VK114_KA	18,7	0,632	0,590	0,726
VK124_1	19,0	0,544	0,536	0,662
VK124_2	21,8	0,539	0,527	0,673
VK124_3	20,4	0,562	0,530	0,666
VK124_KA	20,4	0,548	0,531	0,667

Laboratoriokokeet tehtiin 19.09.2022 – 24.11.2022 välisenä aikana. Tulokset pätevät ainoastaan testatuille näytteille. Testausselostuksen saa kopioida ainoastaan kokonaisuudessaan. Mahdollisesti jäljelle jääneitä näytteitä säilytetään kolme kuukautta testausselostuksen päiväyksestä.

Projektipäällikkö

Nuutti Vuorimies

Projektitutkija

Ville Liiv

Liitteet:

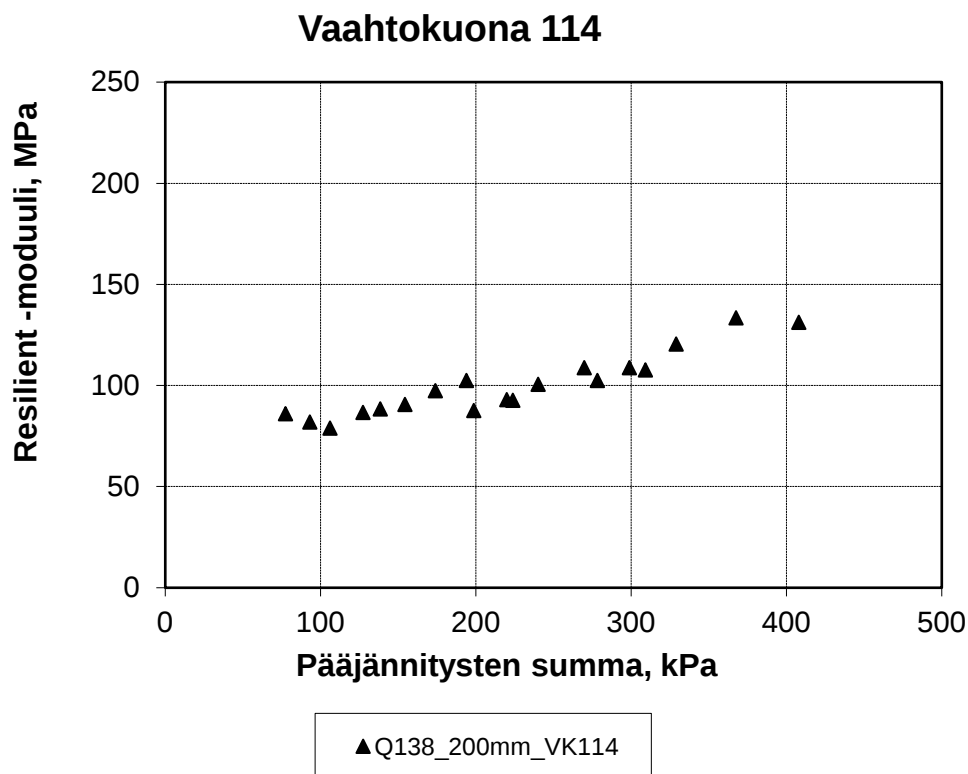
Liite 1. Sykliset kolmiakσιαalikoetulokset ja rakeisuudet kolmiakσιαaliko-
keiden jälkeen. (5 sivua)
Liite 2. Aksiaalisten kokoonpuristuvuuskokeiden tulokset. Kokoonpuris-
tuma-jännityskuvaajat sekä rakeisuudet ennen ja jälkeen puristusko-
keen. (2 sivua)

JAKELU:

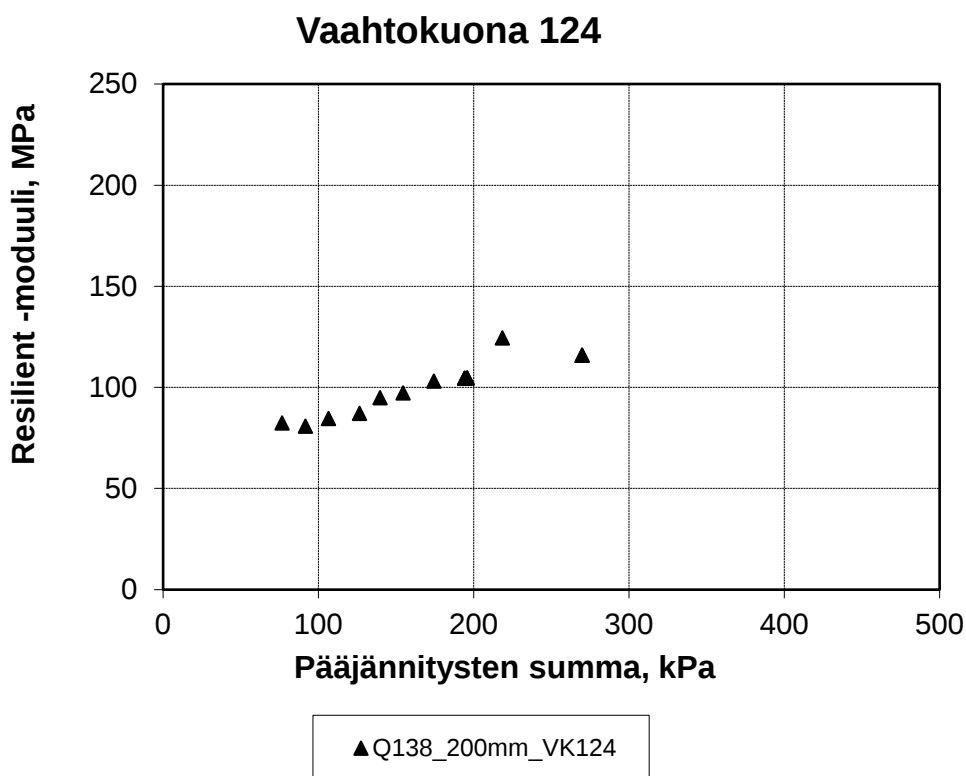
Tilaaja
Tampereen yliopisto

Taulukko 1. SFS-EN 13286-7 Cyclic load triaxial test for unbound mixtures, Method B, Low stress level -kuormitusarja. Rastilla merkityt koesarjat toteutettiin moduuliarvojen määrittämisessä.

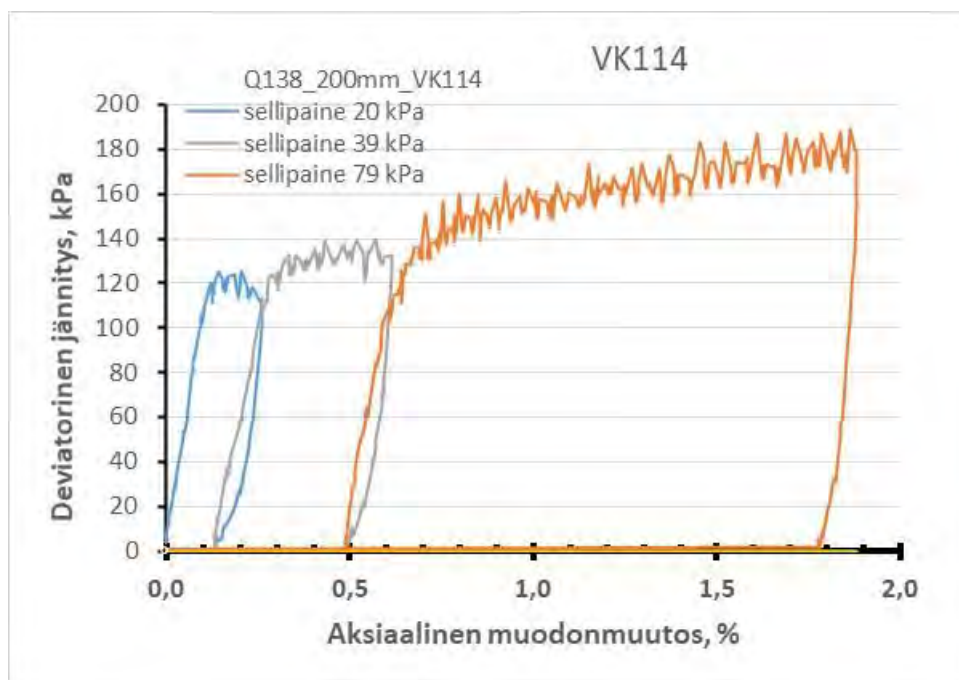
Sellipaine (kPa)	Deviatorinen jännitys		VK114	VK124
	Min (kPa)	Max (kPa)		
20	0	20	x	x
20	0	35	x	x
20	0	50	x	x
20	0	70	x	x
35	0	35	x	x
35	0	50	x	x
35	0	70	x	x
35	0	90	x	x
35	0	120	x	
50	0	50	x	x
50	0	70	x	x
50	0	90	x	x
50	0	120	x	x
50	0	160	x	
70	0	70	x	
70	0	90	x	
70	0	120	x	
70	0	160	x	
70	0	200	x	
100	0	90		
100	0	120		
100	0	160		
100	0	200		
100	0	240		
150	0	120		
150	0	160		
150	0	200		
150	0	240		
150	0	300		



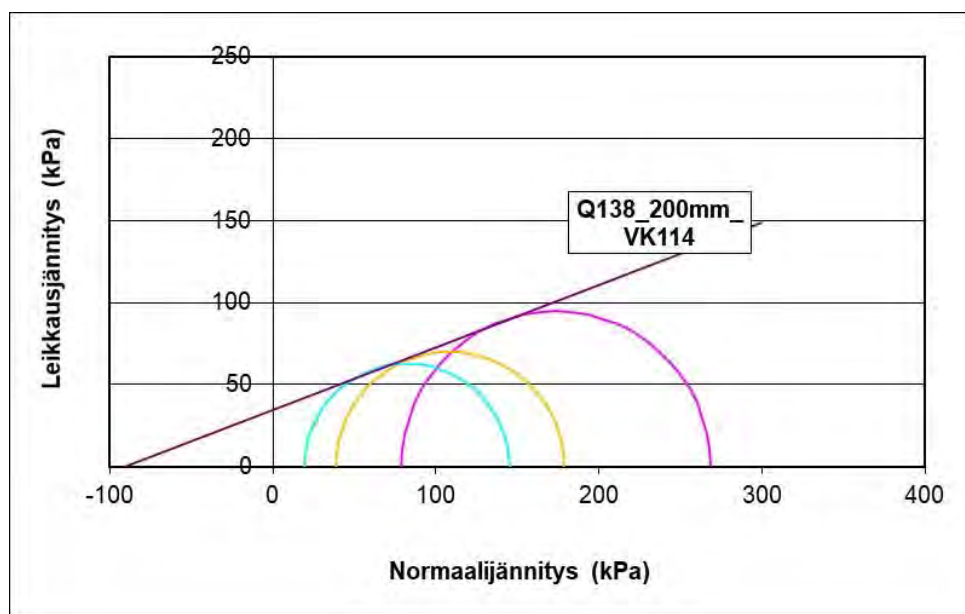
Kuva 1. Vaahtokuonalle VK114 (näyte Q138_200mm_VK114) määritetyt resilient-moduulit.



Kuva 2. Vaahtokuonalle VK124 (näyte Q138_200mm_VK124) määritetyt resilient-moduulit.

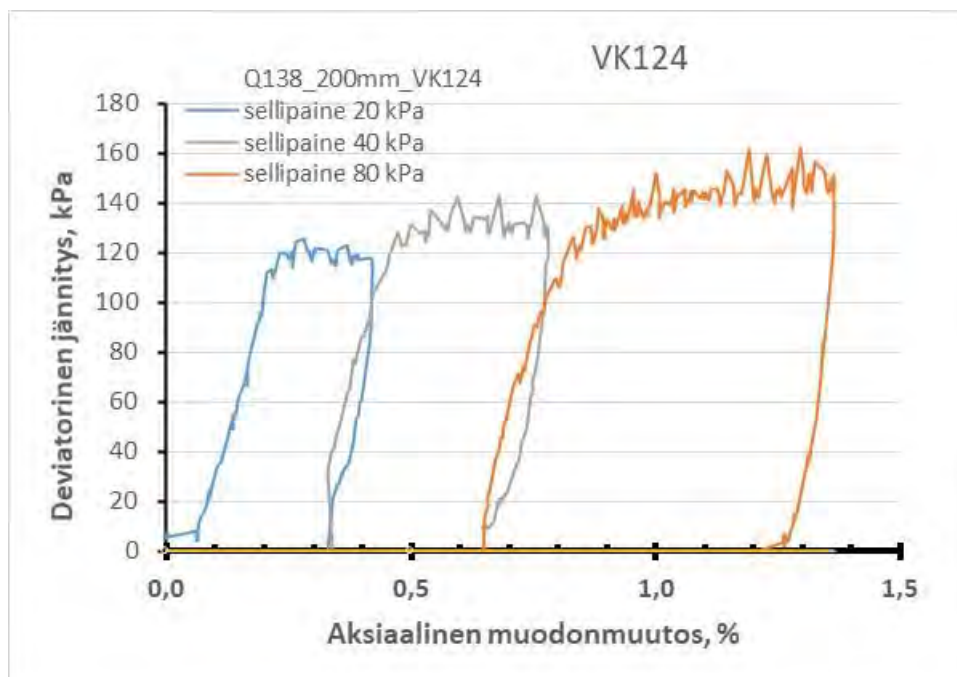


Kuva 3. Moniportaisen staattisen kolmiakselikokeen muodonmuutos-jännityskuvaaja vaahtokuonalle VK114 (näyte Q138_200mm_VK114). Aksiaalinen muodonmuutos määritetty sisäpuoleisista antureista

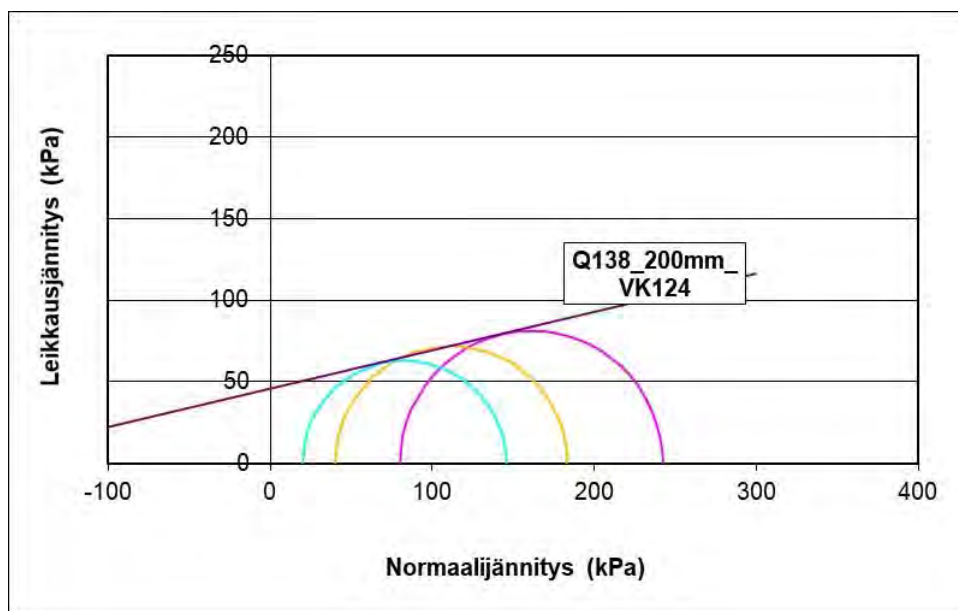


Fii =	20,8°
c =	34,9 kPa

Kuva 4. Vaahtokuonalle VK114 (näyte Q138_200mm_VK114) moniportaisesta staattisesta kolmiakselikokeesta määritetyt Mohrin ympyrät ja lujuusparametrit, kitkakulma ja koheesio.

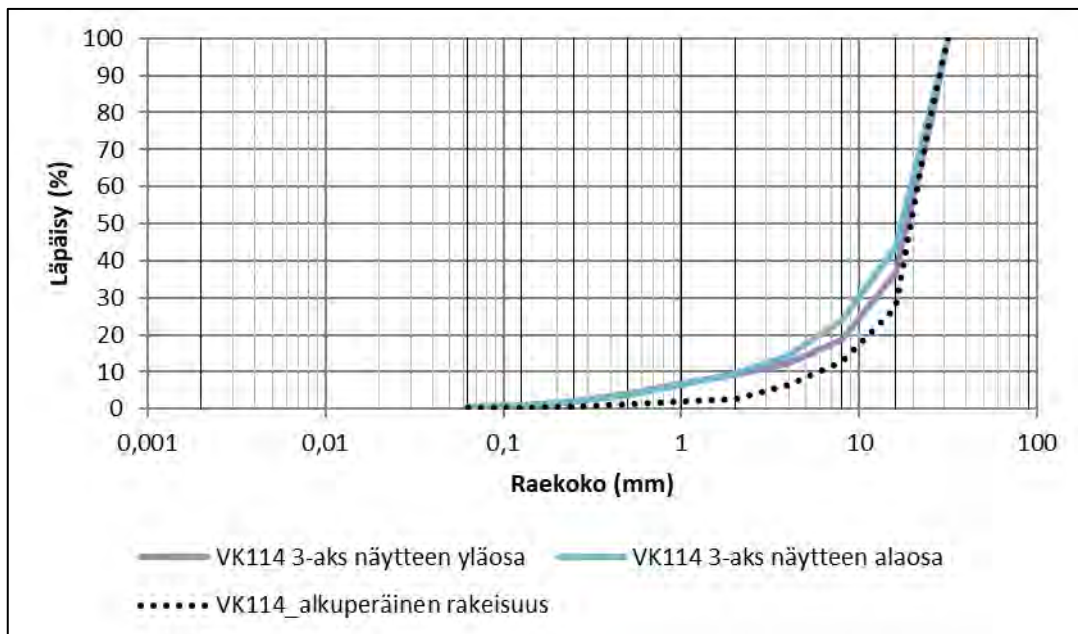


Kuva 5. Moniportaisen staattisen kolmiakselikokeen muodonmuutos-jännityskuvaaja vaahtokuonalle VK124 (näyte Q138_200mm_VK124). Aksiaalinen muodonmuutos määritetty sisäpuoleisista antureista

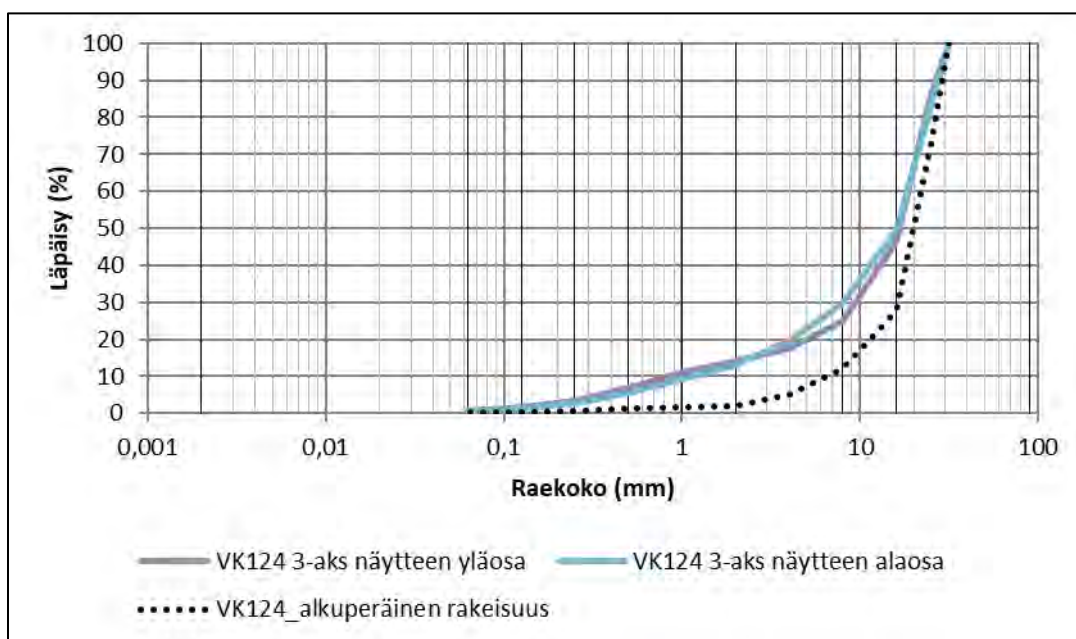


Fii =	13,2°
c =	46,0 kPa

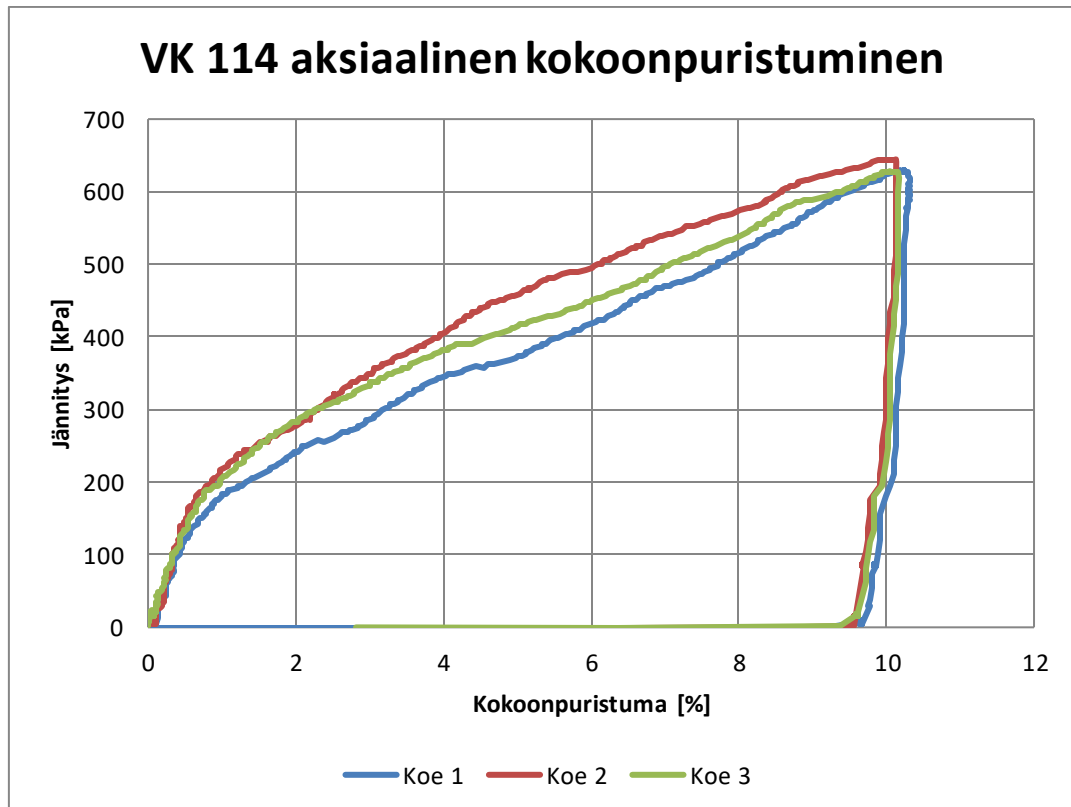
Kuva 6. Vaahtokuonalle VK124 (näyte Q138_200mm_VK124) moniportaisesta staattisesta kolmiakselikokeesta määritetyt Mohrin ympyrät ja lujuusparametrit, kitkakulma ja koheesio.



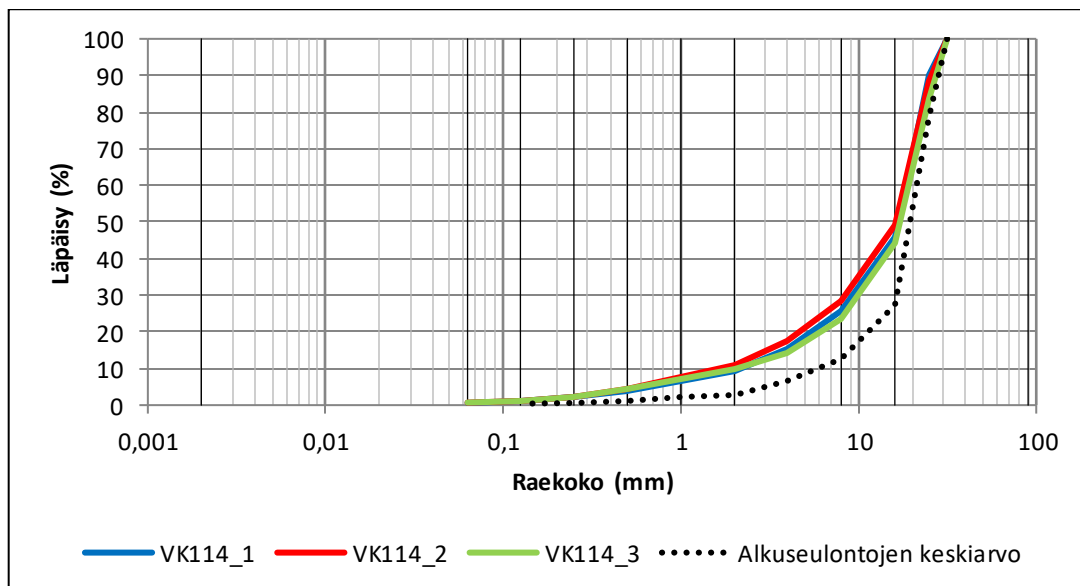
Kuva 7. Vaahtokuonan VK114 ylä- ja alaosan (näyte Q138_200mm_VK114) rakeisuus kolmiak-siaalikokeen jälkeen.



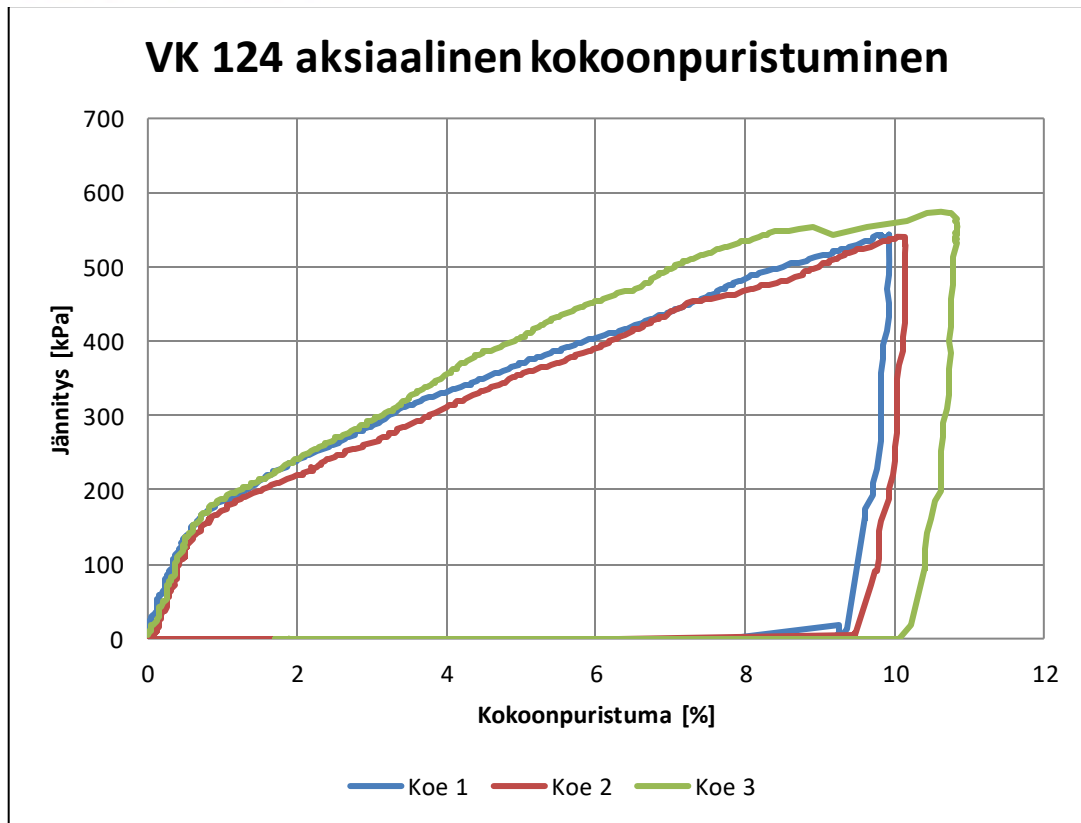
Kuva 8. Vaahtokuonan VK124 ylä- ja alaosan (näyte Q138_200mm_VK124) rakeisuus kolmiak-siaalikokeen jälkeen.



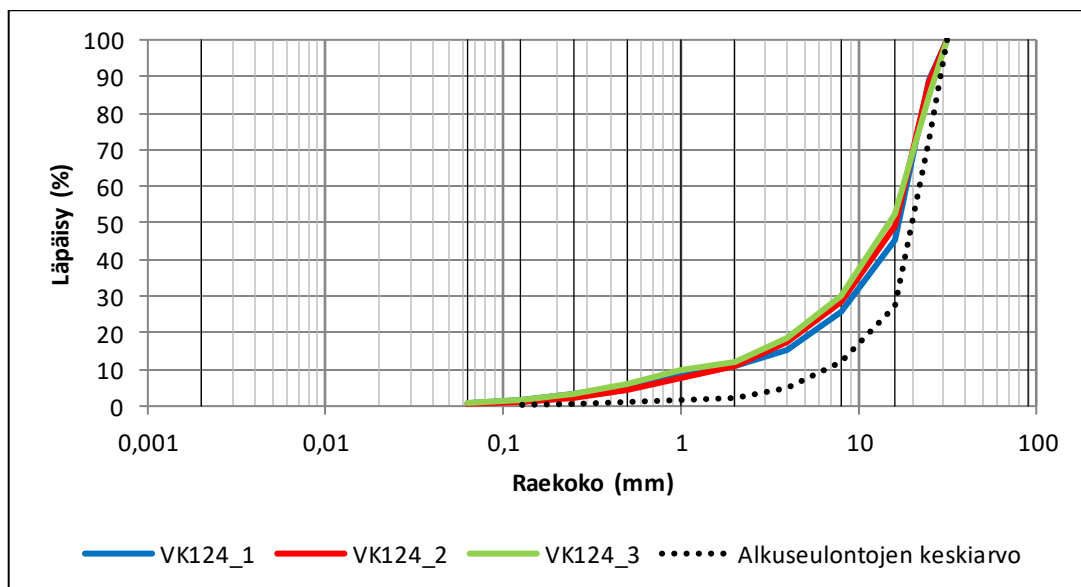
Kuva 1. Vaahtokuonasta VK114 tehtyjen aksiaalisten kokoonpuristumakokeiden kuvaajat



Kuva 2. Vaahtokuonasta VK114 aksiaalisen kokoonpuristumakokeiden jälkeen tehdyt rakeisuusmääritykset



Kuva 3. Vaahtokuonasta VK124 tehtyjen aksiaalisten kokoonpuristumakokeiden kuvaajat



Kuva 4. Vaahtokuonasta VK124 aksiaalisen kokoonpuristumakokeiden jälkeen tehtyt rakeisuusmääritykset

Tämä dokumentti on allekirjoitettu sähköisesti TUNI Sign-järjestelmällä

This document has been electronically signed using TUNI Sign

Päiväys / Date: 10.12.2022 12:02:38 (UTC +0200)

Nuutti Vuorimies

projektipäällikkö

Organisaation varmentama (TUNI käyttäjätunnus)
Certified by organization (TUNI user account)

SAML2 SSO token (AD)

Päiväys / Date: 12.12.2022 10:09:01 (UTC +0200)

Ville Liiv

Kaksiosainen henkilötunnistus (Sähköposti- ja puhelintunnistus)
Two-factor person identification (E-mail and SMS identification)

SMS PIN [+358****12]

Kasakitkakulman määrittäminen (staattinen kolmiakselialikoe)

Näytteen tiedot

Tuote:	Vaahdotuonamurske
Näyte:	VK114 ja VK124
Nimellisraekoko:	2–32 mm
Laboratorio:	Tampereen yliopisto, Tutkimuskeskus Terra

Testin kuvaus

Staattinen kolmiakselialikoe tehtiin kyllästämättömänä moniportaisena avoimena kolmiakselialikokeena. Sellipaineilla 20 kPa ja 40 kPa murren läheneminen arvioitiin ja kuormitus keskeytettiin ennen murtoa. Sellipaineella 80 kPa näytettä kuormitettiin murtoon asti tai kunnes koekappaleeseen kiinnitettyjen siirtymäantureiden maksimiraja-arvo saavutettiin. Ennen staattista kolmiakselialikoea samoille koekappaleille oli tehty standardia SFS-EN 13286-7:en 2004 mukaileva syklinen kolmiakselialikoe, jossa käytettiin Method B:n mukaista *Low stress level* jännityssarjaa. Testin toteutus on esitetty tarkemmin Tampereen yliopiston testausselesteessä MPR/138/2022 (Juho Lautala diplomityö Liite B.8).

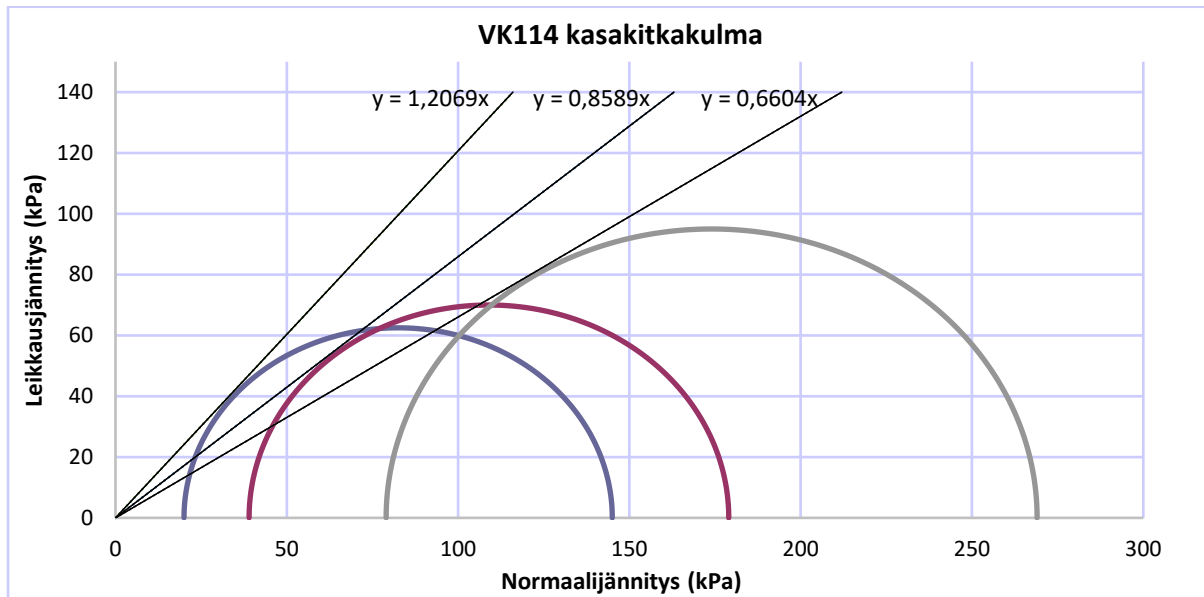
Tulokset

Staattisen kolmiakselialikokeen tulosten perusteella piirrettiin kuvien 1 ja 2 Mohrin ympyrät. Kasakitkakulmat määritettiin piirtämällä Mohrin ympyröitä sivuamaan suorat, jotka kulkevat origon kautta. Kasakitkakulma on materiaalin todellista käyttäytymistä kuvaava leikkauskestävyyskulma eli kitkakulma. Taulukossa 1 on esitetty vaahdotuonamurske-erille VK114 ja VK124 määritetyt kasakitkakulman arvot.

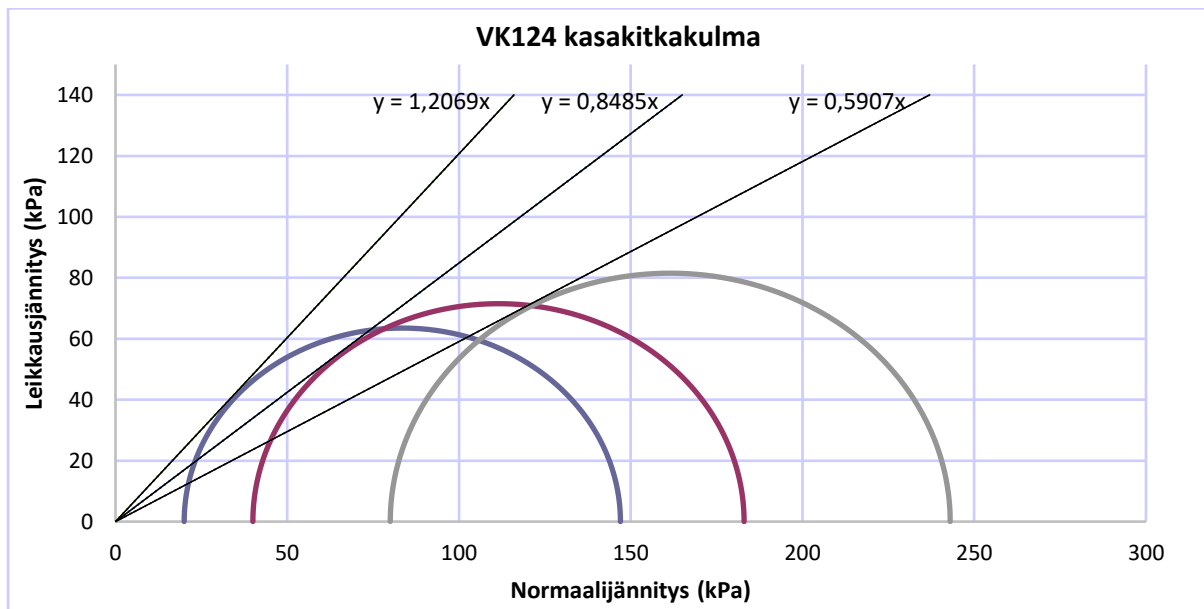
Tulosten tarkastelussa tulee ottaa huomioon, että ennen staattisen kolmiakselialikokeen suoritusta koekappaleille oli tehty syklinen kolmiakselialikoe, minkä vuoksi näyte oli tiivistynyt. Kuvien 1 ja 2 lähtötietoina käytetyt pääjännitysten arvot (σ_1 ja σ_3) on määritetty graafisesti testausselesteessä MPR/138/2022 (Juho Lautala diplomityö Liite B.8) tiedoista. Tulokset ovat suuntaa antavia ja saattavat hieman poiketa todellisista arvoista.

Taulukko 1. Vaahdotuonamurske-erien VK114 ja VK124 kasakitkakulmien φ_k arvot erilaisilla pystysuoran pääjännityksen σ_1 ja sellipaineen σ_3 arvoilla.

Näyte	σ_1 [kPa]	σ_3 [kPa]	φ_k [°]
VK114	145	20	50
	179	39	41
	269	79	33
VK124	147	20	50
	183	40	40
	243	80	31



Kuva 1. Vaahtokuonamurske-erän VK114 kasakitkakulman määrittäminen moniportaisen staattisen kolmiakselikokeen tulosten perusteella piirrettyjen Mohrin ympyröiden avulla.



Kuva 2. Vaahtokuonamurske-erän VK124 kasakitkakulman määrittäminen moniportaisen staattisen kolmiakselikokeen tulosten perusteella piirrettyjen Mohrin ympyröiden avulla.

Kemiallisten testien analyysitiedot

Esikäsittely	Standardi	Tekniikka	Mittausepävarmuus-%	Akkreditointi
Kosteusprosentti	SFS 3008	Lämpökaappi/halogeenikuivain	8	k
Mikroaaltouunihajotus	SFS 15587-2 vesille SFS-EN 13657 kiinteille	Vesille hajotus typpihapolla mikroaaltouunissa, Kiinteille hajotus kuningasvedellä mikroaaltouunissa	Ei määritetty erikseen esikäsittelylle	k
Hienonnus	ISO 11464	Leikkaava mylly / leukamurskain / kuulamyly	Ei määritetty erikseen esikäsittelylle	e
Ravistelutesti	SFS-EN 12457-2	Kaksivaiheinen ravistelu, ympäripyörittävä ravistelija	Ei määritetty erikseen esikäsittelylle	e

e = ei akkreditoitu, k = akkreditoitu

Kokonaispitoisuudet	Standardi	Tekniikka	Määr. raja 0,5 g näytemäärä	Mittausepävarmuus-%	Akkreditointi
Al, Alumiini	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	10 mg/kg	30	k
As, Arseeni	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	1,0 mg/kg	30	k
Ba, Barium	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	5,0 mg/kg	25	e
Cd, Kadmium	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	0,1 mg/kg	25	e
Co, Koboltti	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	0,1 mg/kg	25	e
Cr, Kromi	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	5,0 mg/kg	25	k
Cu, Kupari	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	5,0 mg/kg	25	k
Mo, Molybdeeni	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	1,0 mg/kg	30	k
Ni, Nikkeli	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	1,0 mg/kg	35	k
Pb, Lyijy	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	5,0 mg/kg	35	k
Sb, Antimoni	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	1,0 mg/kg	30	k
Se, Seleni	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	1,0 mg/kg	30	k
Sn, Tina	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	5,0 mg/kg	35	k
V, Vanadiini	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	1,0 mg/kg	25	k
Zn, Sinkki	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	5,0 mg/kg	25	k
Hg, Elohopea	Sis menetelmä LAB-0310	Kylmähöyry-AAS	0,1 mg/kg	25	k
TOC, kokonaishiili	SFS-EN 13137	Poltto-IR	0,5 %	40	k
CN ⁻ , Syanidi	SFS-EN ISO 14403	Tislaus + CFA, continuous flow analyser	0,2 mg/kg	40	k

e = ei akkreditoitu, k = akkreditoitu

Liukoisuudet	Standardi	Tekniikka	Määr.raja Vesiliukoinen / HNO ₃ -hajotus	Mittausepävarmuus- % Vesiliuk / happohaj.	Akkreditointi
Al, Alumiini	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	0,1 / 0,13 mg/l	20 / 25	k
As, Arseeni	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	0,01 / 0,013 mg/l	25 / 27	k
Ba, Barium	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	0,01 / 0,013 mg/l	15 / 20	k
Cd, Kadmium	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	0,001 / 0,0013 mg/l	20 / 28	k
Co, Koboltti	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	0,001 / 0,0013 mg/l	20 / 30	k
Cr, Kromi	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	0,005 / 0,0063 mg/l	20 / 30	k
Cu, Kupari	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	0,05/ 0,063 mg/l	20 / 25	k
Mo, Molybdeeni	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	0,01 / 0,013 mg/l	25 / 35	k
Ni, Nikkeli	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	0,005 / 0,0063 mg/l	20 / 27	k
Pb, Lyijy	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	0,01 / 0,013 mg/l	20 / 30	k
Sb, Antimoni	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	0,01 / 0,013 mg/l	20 / 27	k
Se, Seleen	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	0,01 / 0,013 mg/l	30 / 30	k
Sn, Tina	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	0,01 / 0,013 mg/l	15 / 20	k
V, Vanadiini	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	0,01 / 0,013 mg/l	15 / 25	k
Zn, Sinkki	SFS-EN ISO 11885	ICP-OES	0,005 / 0,0063 mg/l	25 / 30	k
Hg, Elohopea	Sis.menetelmä LAB-0310 ja likaisille näytteille sis.menet LAB- 0309, EPA 7473:2007	kylmähöyry-AAS ja likaisille näytteille suora poltto	0,1 µg/l	30	k
F ⁻ , Fluoridi	SFS-EN ISO 10304-1	Ionikromatografi	0,1 mg/l	Jätevesi 30	k
Cl ⁻ , Kloridi	SFS-EN ISO 10304-1	Ionikromatografi	0,1 mg/l	Jätevesi 25	k
SO ₄ ²⁻ , Sulfaatti	SFS-EN ISO 10304-1	Ionikromatografi	0,5 mg/l	Jätevesi 35	k
DOC, liuennut orgaaninen hiili	SFS-EN 1484:1997	NPOC	1,0 mg/l	18	k
pH, happamuus	SFS 3021:1979	pH-elektrodi	0	5	k
Johtokyky	SFS-EN 27888:1994	johtokykyelektrodi	n. 8	8	k
TDS, liuenneiden kiintoaineiden kokonaismäärä	SFS-EN 15216	suodatus, kuivatus, punnitus	200 mg/l (100 ml nm)	20	e
NH ₄ -N, Ammoniumtyppi	SFS-EN ISO 11732	CFA, continuous flow analyser	0,5 mg/l	15	e

e = ei akkreditoitu, k = akkreditoitu