



**Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu**

Eero Juuti

Valimohiekan soveltuminen osaksi kerrosstabiloinnin runkoai- netta ja käytön edistäminen

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 17.2.2020

Valvoja: Professori Leena Korkiala-Tanttu

Ohjaajat: TkT Yinning Zhang ja DI Tommi Sappinen

Tekijä Eero Juuti

Työn nimi Valimohiekan soveltuminen osaksi kerrosstabiloinnin runkoainetta ja käytön edistäminen

Maisteriohjelma Master's Programme in Geoengineering**Koodi** ENG 23

Työn valvoja Professori Leena Korkiala-Tanttu

Työn ohjaaja(t) TkT Yinning Zhang ja DI Tommi Sappinen

Päivämäärä 17.2.2020**Sivumäärä** 74+11**Kieli** Suomi

Tiivistelmä

Valimoteollisuuden ongelmana on kertamuottimenetelmällä syntyvän jätteen luokiteltavan valimohiekan loppusijoittaminen. Kiristynvä jätelainsäädäntö ohjaa valimoita kehittämään uusia käyttökohteita valimohiekalle, koska loppusijoitus kaatopaikoille on jäämässä historiaan. Vuonna 2018 voimaan tullut asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa 843/2017 sallii valimohiekan käytön väylä- ja kenttärakenteissa sekä teollisuus- ja varastorakennusten pohjarakenteissa ilmoitusmenettelyllä asetuksessa esitettyjen ehtojen täytyessä.

Valimohiekan kierrätystä ja uudelleenkäyttöä edistämään on perustettu Kiertovalu-tutkimushanke, jonka osana tämä diplomityö tehtiin. Tämän työn tavoitteena oli selvittää valimohiekan ja kalliomurskeen tai betonimurskeen seosten geoteknistä soveltuvuutta kerrosstabiloinnin runkoaineeksi. Soveltuvuutta tutkittiin laboratoriokokein, joilla pyrittiin selvittämään stabiloidun seoksen pitkäaikaiskestävyyssominaisuuksia, kuten kapillaarisuutta, vedenläpäisevyyttä, routanousua, jäädytys-sulatuskestävyyttä, puristuslujuutta ja syklistä kuormitusta. Lisäksi työssä oli tavoitteena edistää valimohiekan uusiokäyttöä tierakenteissa. Uusiokäytön edistämistä varten kuvattiin valimohiekan tuotteistamisprosessi, sillä tuotteistaminen helpottaisi valimohiekan uudelleenkäyttöä merkittävästi. Lisäksi tehtiin myös päästö- ja kustannuslaskenta sekä tuotteistamiseen tarvittava ja pitkäaikaiskestävyydestä kertovan koerakenteen yleispätevä suunnitelma.

Tämän diplomityön laboratoriotutkimustulosten perusteella valimohiekasta ja kalliomurskeesta saadaan tehtyä kerrosstabilointiin teknisesti soveltuva seos. Myös betonimurskeen ja valimohiekan sekoitus vaikutti mahdolliselta vaihtoehdolta pelkän puristuslujuuden perusteella. Valimohiekan tuotteistamisprosessi kuvattiin suodatinkerroksessa käytettävälle sitomattomalle valimohiekalle, sillä sen tuotteistaminen havaittiin työn aikana seoksen tuotteistamista mielekkäämmäksi vaihtoehdoksi. Seoksen tuotteistaminen kantavaan kerrokseen osoittautui erittäin urakoitsijariippuvaiseksi, kun taas suodatinkerroksessa käytettävän valimohiekan voisi tuotteistaa myös valimot. Päästö- ja kustannuslaskennoissa huomattiin, että valimohiekkaa käyttämällä voidaan pienentää suodatinkerroksen ja jakavan kerroksen rakentamisen päästöjä jopa 46 % ja kustannuksia 50 % perinteisiin luonnonmateriaaleihin nähden. Havaittiin myös, että laskentojen rajaukset saattavat muuttaa laskennan tulosta huomattavastikin.

Avainsanat valimohiekka, uusiomateriaali, tien päällysrakenne, stabiloitu kantava kerros, tuotteistaminen, kustannuslaskenta, päästölaskenta

Author Eero Juuti

Title of thesis Applicability of waste foundry sand as a component of layer stabilized aggregate and facilitation of reuse

Master programme Master's Programme in Geoengineering**Code** ENG23

Thesis supervisor Professor Leena Korkiala-Tanttu

Thesis advisor(s) Ph.D. (Tech.) Yinning Zhang and M.Sc. (Tech.) Tommi Sappinen

Date 17.2.2020**Number of pages** 74+11**Language** Finnish

Abstract

Finnish foundry industry has been struggling with the amount of waste foundry sand and how to dispose of it. Current legislation encourages foundries to invent new ways to handle waste foundry sands because they cannot be disposed of in industrial landfills anymore. In 2018 new decree 843/2017 took effect, allowing waste foundry sand to be used in road and earth construction work without environmental permit if all requirements are fulfilled.

This thesis is part of “Kiertovalu” research project that promotes reuse and recycling of waste foundry sand. The aim of this thesis was to investigate the geotechnical performance of mixtures of waste foundry sand and crushed rock or crushed concrete and to find out whether they are applicable for use in stabilized base layer. Geotechnical performance was studied using laboratory tests, including capillary suction, water permeability, frost heave, freezing-thawing resistance, uniaxial compression strength and cyclic triaxial loading. The aim of this thesis was also to facilitate reuse of waste foundry sand. Productization would make it much easier to use waste foundry sand as a road construction material and that is why productization process of waste foundry sand is described. This thesis presents also emission and cost calculations as well as a general-purpose trial structure for productization, planned for testing long-term durability.

Based on the results of the laboratory experiments, waste foundry sand mixed with crushed rock is technically applicable to be used in layer stabilized base layer. Also, mixture with crushed concrete showed some potential based on only uniaxial compression strength. Productization process was described for foundry sand used in unbound filter layer because it was found to be more meaningful than productization of a mixture. Productization of mixture turned out to be very much dependent on contractor, instead of foundries. Based on cost and emission calculations, the use of waste foundry sand can reduce costs as much as 46 % and emissions 50 % compared to traditional structure. In calculations only construction of filter layer and subbase was considered. It was also noticed that the assumptions that were made can influence the calculation results a lot.

Keywords waste foundry sand, recycled materials, pavement structure, stabilized base layer, productization, cost calculation, emission calculation

Alkusanat

Hain opiskelemaan maisterivaiheeseen alun perin, koska halusin syventää osaamistani maamekaniikan osalta. Opintojen aikana minua alkoi kiinnostaa myös tierakenteen tekninen toiminta ja kiertotalous. Siksi olikin hienoa päästä tekemään diplomityötä aiheesta, jossa sain tutkia valimohiekan soveltumista tien rakennusmateriaaliksi ja siten syventyä molempiin uusiin mielenkiinnon kohteisiini paremmin.

Tämä diplomityö tehtiin osana Aalto-yliopistossa käynnissä olevaa Kiertovalu-tutkimushanketta, jonka yhtenä tavoitteena on edistää valimohiekan uudelleenkäyttöä maarakentamisessa. Hankkeeseen osallistuu ja sitä rahoittaa Business Finland ja joitakin valimoalan yrityksiä. Tämän työn laboratoriotutkimukset toteutettiin Aalto-yliopiston Rakennustekniikan laitoksen laboratorioissa.

Haluan kiittää työn valvojaa professori Leena Korkiala-Tanttua aiheen löytymisestä, työn tekemisen mahdollistamisesta ja kaikista kommentteista ja neuvoista, joita sain työn tekemisen aikana. Lisäksi haluan kiittää ohjaajiani Yinning Zhangia ja Tommi Sappista saamastani ohjauksesta, neuvoista ja kommentteista. Kiitos myös yliopiston laboratoriohenkilökunnalle, joita ilman laboratoriotutkimusten tekeminen olisi ollut paljon vaikeampaa, ellei jopa mahdotonta.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni työn tekemisen aikaisesta tuesta ja kannustuksesta. Suurimmat kiitokset menevät vaimolleni Rosalle, jonka kanssa sain jakaa kaikki työn tekemisen aikaiset ilot sekä murheet, ja joka mahdollisti tällaisen projektin tekemisen pikkulapsiarjen keskellä. Lisäksi kiitos tyttärelleni Metelle, joka piti lumoavalla luonteellaan huolen siitä, että työ tehtiin työajalla eikä iltaisin kotona.

Espoossa 17.2.2020



Eero Juuti

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	4
Merkinnät.....	6
Lyhenteet	6
1 Johdanto	7
2 Tien päällysrakenne	9
2.1 Tien päällysrakenteen osat ja niiden tehtävät	9
2.2 Päällysrakenteeseen kohdistuvat rasitukset	10
2.3 Päällysrakenteen stabilointi	13
2.4 Päällysrakenteen mitoitus	14
3 Uusiomateriaalit stabiloinnissa	16
3.1 Stabiloinnin runkoaineena	16
3.1.1 Valimohiekka.....	16
3.1.2 Kivituhka	17
3.1.3 Betonimurske	17
3.2 Stabiloinnin sideaineena	18
3.2.1 Lentotuhka	18
3.2.2 Sideaineseokset	18
4 Tutkimuksessa käytetyt materiaalit	19
4.1 Kalliomurske.....	19
4.2 Betonimurske	20
4.3 Valimohiekka.....	20
4.4 Sementti.....	21
4.5 Kivihiilenpolton lentotuhka.....	22
4.6 Biopolton lentotuhka	22
4.7 Ecolan-sideaineseos	22
5 Laboratoriotutkimukset.....	23
5.1 Koekappaleiden valmistus	23
5.2 Puristuslujuus.....	24
5.3 Kapillaarisuus	25
5.4 Vedenläpäisevyys.....	26
5.5 Routanousu	27
5.6 Jäädytys-sulatuskestävyys	29
5.7 Syklinen kolmiakselikoe	31
6 Tutkimustulokset ja tulosten tarkastelu	33
6.1 Puristuslujuus.....	33
6.1.1 Stabiloidulle valimohiekan ja kalliomurskeen sekoitukselle.....	33
6.1.2 Betonimurskeen ja valimohiekan sekoitus	36
6.2 Kapillaarisuus	37
6.3 Vedenläpäisevyys.....	40
6.4 Routanousu	42
6.5 Jäädytys-sulatuskestävyys	43
6.6 Syklinen kolmiakselialikoe.....	47
7 Tuotteistaminen.....	51

7.1	Uusiomateriaalin tuotteistaminen väylärakenteisiin	51
7.2	Valimohiekan tuotteistaminen	53
8	Koerakenne	57
9	Päästö- ja kustannuslaskenta	61
10	Johtopäätökset	66
	Lähdeluettelo.....	68
	Liiteluettelo	74
	Liitteet	

Merkinnät

A	[mm ²]	koekappaleen poikkipinta-ala
E	[MPa]	mitoitettavan kerroksen E-moduuli (Odemark)
E _A	[MPa]	mitoitettavan kerroksen yläpinnan kantavuus (Odemark)
E _Y	[MPa]	mitoitettavan kerroksen alapinnan kantavuus (Odemark)
F	[N]	puristusvoima
H	[mm]	koekappaleen alkukorkeus
M _r	[MPa]	Jäännösmoduuli (resilient moduuli)
R	[%]	jäätymissulamiskestävyys
R _A	[MPa]	jäädytyskulatussykleille altistettujen koekappaleiden (set A) puristuslujuuksien keskiarvo
R _B	[MPa]	jäädytyskulatuskokeen vertailukoekappaleiden (set B) puristuslujuuksien keskiarvo
R _n	[mm]	rakennekerroksen paksuus routamitoituksessa
RN _{lask}	[mm]	laskennallinen routanousu
S	[mm]	mitoitusroutansyvyys
SP	[mm ² /Kh]	routimiskerroin (segregaatiopotentiaali)
T _{Kansi}	[°C]	routasellin kannen lämpötila
Z _j	[mm]	jäätyneen näytteenosan korkeus
Z _s	[mm]	sulan näytteenosan korkeus
a = 0,15	[m]	kuormittavan pyörän kosketuspinnan säde (Odemark)
a _n		materiaalin vastaavuuskerroineristävyuden kannalta routamitoituksessa
gradT	[°C/mm]	lämpötilagradientti jäätyneessä näytteenosassa
h	[m]	mitoitettavan kerroksen paksuus (Odemark)
h	[mm]	routanousu
Δh	[mm]	routanousun muutos mittausvälin aikana
t	[%]	alusrakenteen routaturpoama routamitoituksessa
Δt	[h]	mittausväli
ε _p	[10 ⁻³]	pysyvä aksiaalinen muodonmuutos
ε ₁ ^r = ε _r	[10 ⁻³]	palautuva aksiaalinen muodonmuutos
σ	[MPa]	puristuslujuus
σ _d	[MPa]	deviatorinen jännitys
σ ₁ ^r	[kPa]	akksiaalinen jännityslisäys

Lyhenteet

A	Sementtiaktivaattori
BeM	Betonimurske
CEM	Pikasementti
ECO	Ecolan Infra Binder, kaupallinen sideaine
KaM	Kalliomurske (suluissa raekoko)
KPLT	Kivihiilenpolton lentotuhka
WFS	Valimohiekka, Waste Foundry Sand

1 Johdanto

Valimoteollisuudessa kertakäyttöisistä hiekkamuoteista syntyvän ylijäämähiekan jatkokäyttö ja loppusijoitus ovat olleet kasvava ongelma. Aikaisemmin valimohiekat on sijoitettu kaatopaikoille, mutta valtioneuvoston asetus 331/2013 kieltää niiden sijoittamisen orgaanisen jätteen kaatopaikoille (Valtioneuvosto 2013). Valimohiekkaa on käytetty myös kaatopaikkarakenteissa, mutta kun uusia kaatopaikkoja ei enää avata, loppuu valimohiekan käyttö sielläkin kokonaan. On siis selvää, että valimohiekan kierrättämistä ja uudelleenkäyttöä tulee lisätä voimakkaasti ja tähän tarpeeseen on perustettu Kiertovalu-tutkimushanke, jonka osa tämä diplomityö on. Tutkimushankkeen tarkoituksena on parantaa valimoiden kilpailukykyä ympäristötietoisuuden, kiertotalouden ja teollisen symbioosin avulla. Silloin käytettävien raaka-aineiden jatko- tai uudelleenkäyttö on suunniteltua ja samalla valimon jäte voi olla toisen toimijan raaka-ainetta (Sappinen 2018b). Hankkeessa selvitetään valimohiekan puhdistamista termistä elvytystä käyttämällä, jolloin valimohiekkaa voitaisiin käyttää valimoissa uudelleen ja siten vähentää jätteen määrää. Lisäksi hankkeessa selvitetään valimohiekan soveltumista tierakennuksen materiaaliksi, johon tämä diplomityö keskittyy.

Vuonna 2018 voimaan astuneessa päivittyneessä MARA-asetuksessa (843/2017) valimohiekan käyttö mahdollistetaan ilmoitusmenettelyllä ympäristöluvan sijasta tietyin ehdoin väylä- ja kenttärakenteissa sekä teollisuus- ja varastorakennusten pohjarakenteissa (Valtioneuvosto 2017). Tällöin valimohiekkaa on huomattavasti helpompi käyttää maarakennuksessa ilmoitusmenettelyn nopeuden ansiosta. Valimohiekan soveltumista tierakenteeseen on aikaisemmin tutkinut diplomityössään Vilenius, joka totesi valimohiekan soveltuvan teknisiltä ominaisuuksiltaan sellaisenaan suodatinkerrokseen. Hän myös havaitsi valimohiekan soveltuvan osaksi kerrosstabiloinnin runkoainetta puristuslujuuden perusteella, jolloin sitä voitaisiin hyödyntää myös tien kantavassa kerroksessa (Vilenius 2019). Orkas et al. (2001) havaitsi hartsisideaineisten valimohiekkojen soveltuvan asfaltin runkoaineeksi luonnonhiekan korvaajana. Yhdysvaltalaisissa tutkimuksissa on myös huomattu hartsisideaineisten valimohiekkojen soveltuvan sellaisenaan tien alusrakenteeseen ja jakavaan kerrokseen ja sidottuna kantavaan kerrokseen (American Foundry Society 2019; Kleven et al. 2000).

Valimohiekka on hiekkaa, josta valmistetaan kertakäyttöisiä muotteja valimoteollisuuden tarpeisiin. Jotta hiekka voidaan muotoilla haluttuun muotoon, lisätään siihen sideainetta, joka kovettaa muotin oikeanlaiseksi. Valimohiekkatyyppejä on useita erilaisia, mutta Suomessa käytetään yleisimmin kvartsihiekkaa, jonka sideaineena käytetään joko bentoniittia (tuorehiekkä), furaanihartsia tai esterikovetteista fenolihartsia (kauppanimi Alphaset). Kvartsihiekkaa tuodaan Suomeen Belgiasta, jonka lisäksi sitä löytyy Viasvedeltä Porista. (Sappinen 2018b). Vuonna 2013 erilaisia valimohiekkoja syntyi Suomessa noin 59 000 tonnia, josta tuorehiekkaa oli 16 000 tonnia, furaanihiekkaa 15 000 tonnia ja Alphaset-hiekkaa 28 000 tonnia (Sappinen 2018a). Tässä työssä tutkittava valimohiekka on Alphaset-hiekkaa, jota siis syntyy Suomessa eniten.

MARA-asetus ja Kiertovalu-projekti kumpikin edistävät kiertotaloutta, jolla voidaan tehostaa materiaalien tehokasta käyttöä ja siten vähentää neitseellisten luonnonvarojen käyttöä rakentamisessa sekä vähentää rakentamisen ilmastopäästöjä. Vuonna 2015 solmitussa Pariisin ilmastopöytäkirjassa asetettiin tavoitteeksi rajoittaa ilmaston lämpeneminen selvästi alle 2 asteeseen esiteolliseen aikaan verrattuna ja pyrkiä rajaamaan lämpeneminen 1,5 asteeseen. Tavoitteen saavuttaminen vaatii valtioilta kunnianhimoisia päästövähennystoimia, jotka

koskevat kaikkia sektoreita maarakentaminen mukaanluettuna (Honkonen & Kulovesi 2019).

Tässä diplomityössä tutkitaan valimohiekan soveltumista osaksi kerrosstabiloidun kantavan kerroksen runkoainetta. Vilenius (2019) totesi valimohiekan soveltuvan sellaisenaan suodatinkerrokseen, mutta koska valimohiekkaa syntyy vuosittain maarakentamisen näkökulmasta hyvin vähän, on kerrosstabilointi houkutteleva vaihtoehto pienemmän materiaalitarpeen takia. Työssä tutkitaan stabiloitujen materiaalien pitkäaikaiskestävyyttä testaamalla laboratorioissa veden- ja pakkasenkestävyyssominaisuuksia ja vertaamalla saatuja tuloksia muihin hienoainesta sisältäviin stabilointitutkimuksiin. Lisäksi tutkitaan, sitoutuuko betonimurskeen ja valimohiekan sekoitus ilman lisättyä sideainetta. Teknisten ominaisuuksien tutkimisen lisäksi tässä työssä kuvataan valimohiekan tuotteistamisprosessi ja esitetään yleispätevä koerakenne. Päästö- ja kustannuslaskennoilla tutkitaan valimohiekan käyttämisen vaikutuksia tierakentamisen ilmastopäästöihin ja kustannuksiin perinteisiin tierakennusmateriaaleihin verrattuna.

Tässä diplomityössä tutkitaan rakennusteknisiä ominaisuuksia ja ympäristökelpoisuus on rajattu tutkimuksen ulkopuolelle. Tässä työssä käsitellään vain esterikovetteisen fenolihartsiehiekan eli Alphaset-hiekan käyttöä. Pitkäaikaiskestävyyttä tutkittaessa käytetään vain puhdasta hanavettä, eikä siksi voida ottaa kantaa tiesuolan vaikutuksista kestävyysominaisuuksiin. Tutkittavat kalliomurskeen ja valimohiekan sekoitukset sekä käytettävät sideaineet määrineen oli päätetty jo ennen tämän työn alkua Vileniuksen (2019) diplomityössä.

Työn kirjallisuusosiossa kuvataan luvussa 2 tien päällysrakenne ja tämän työn kannalta olennaiset rasitukset sekä päällysrakenteen stabilointi ja mitoitus. Luvussa 3 kerrotaan uusiomateriaalien käytöstä kerrosstabiloinnissa aikaisempien tutkimusten perusteella. Työn teoriaosuudessa kuvataan luvussa 4 laboratoriotutkimuksissa käytetyt materiaalit ja luvussa 5 käytetyt tutkimusmenetelmät. Luvussa 6 kerrotaan laboratoriotutkimusten tulokset ja tarkastellaan tulosten luotettavuutta ja merkitystä. Luvussa 7 kuvataan tuotteistamisprosessi maarakennuksessa käytettäville uusiomateriaaleille yleensä ja valimohiekan tuotteistaminen suodatinkerrokseen. Valimohiekkaa suodatinkerroksessa sisältävä yleispätevä koerakenne kuvataan luvussa 8. Koerakennetta vastaavan rakenteen päästö- ja kustannuslaskenta on esitetty luvussa 9, jonka jälkeen luvussa 10 esitetään tämän työn johtopäätökset ja jatkotutkimustarpeet.

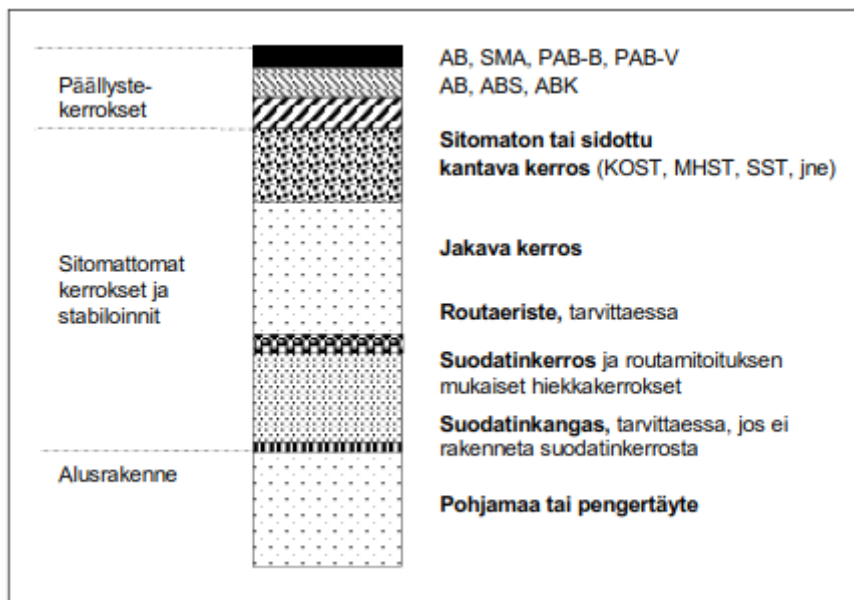
2 Tien päällysrakenne

Tässä luvussa kuvataan tierakenteen osat ja kerrotaan pääpiirteissään päällysrakenteen osien rakenteelliset tehtävät tierakenteessa. Lisäksi kuvataan Suomessa käytettävä tierakenteen mitoitusmenettely ja kerrotaan tierakenteeseen kohdistuvista rasituksista, jotka vaikuttavat rakenteen mitoitukseen. Lisäksi kuvataan tien päällysrakenteen stabilointi ja sen edut sitomattomiin kerroksiin verrattuna sekä erilaiset stabilointimenetelmät.

2.1 Tien päällysrakenteen osat ja niiden tehtävät

Tierakenne koostuu alusrakenteesta ja päällysrakenteesta. Alusrakenteen tulee olla riittävän tasalaatuinen, kantava ja painumaton alusta tien päällysrakenteelle. Alusrakenteen päällä on päällysrakenne, jonka tehtävä on jakaa liikenteestä aiheutuvat rasitukset tasaisesti ja laaja-alaisesti alusrakenteelle. (Belt et al. 2002). Toisaalta päällysrakenne myös vaimentaa alusrakenteen ominaisuuksista johtuvien ongelmien, kuten routimisen, vaikutusta tien pintaan (Doré & Zubeck 2009).

Tien päällysrakenne koostuu useista eri kerroksista, joiden paksuus mitoitetaan tapauskohtaisesti. Mitoitukseen vaikuttavat käytettävien materiaalien lisäksi liikenteen aiheuttamat kuormat, pohjamaaolosuhteet ja ilmastorasitukset. Materiaalien valintaan vaikuttaa myös sen vedenläpäisevyys, sillä päällysrakenne kestää liikenteestä aiheutuvia rasituksia paremmin, kun vedenläpäisevyys paranee rakenteessa alaspäin mentäessä. Tien päällysrakennekerrokset on esitetty kuvassa 1. (Liikennevirasto 2018).



Kuva 1. Tien päällysrakennekerrokset. Kaikkia kuvassa esitettyjä rakenteita ei yleensä käytetä samassa rakenteessa. (Liikennevirasto 2018).

Päällystekerrosten rakenteellisena tehtävänä on muodostaa vettä läpäisemätön pinta tierakenteelle, jotta veden pääsy rakenteeseen olisi mahdollisimman vähäistä. Lisäksi päällystekerrokset lisäävät tierakenteen jäykkyyttä, sillä sidottuina kerroksina niillä on suurempi jäykköys sitomattomiin kerroksiin verrattuna. (Belt et al. 2002).

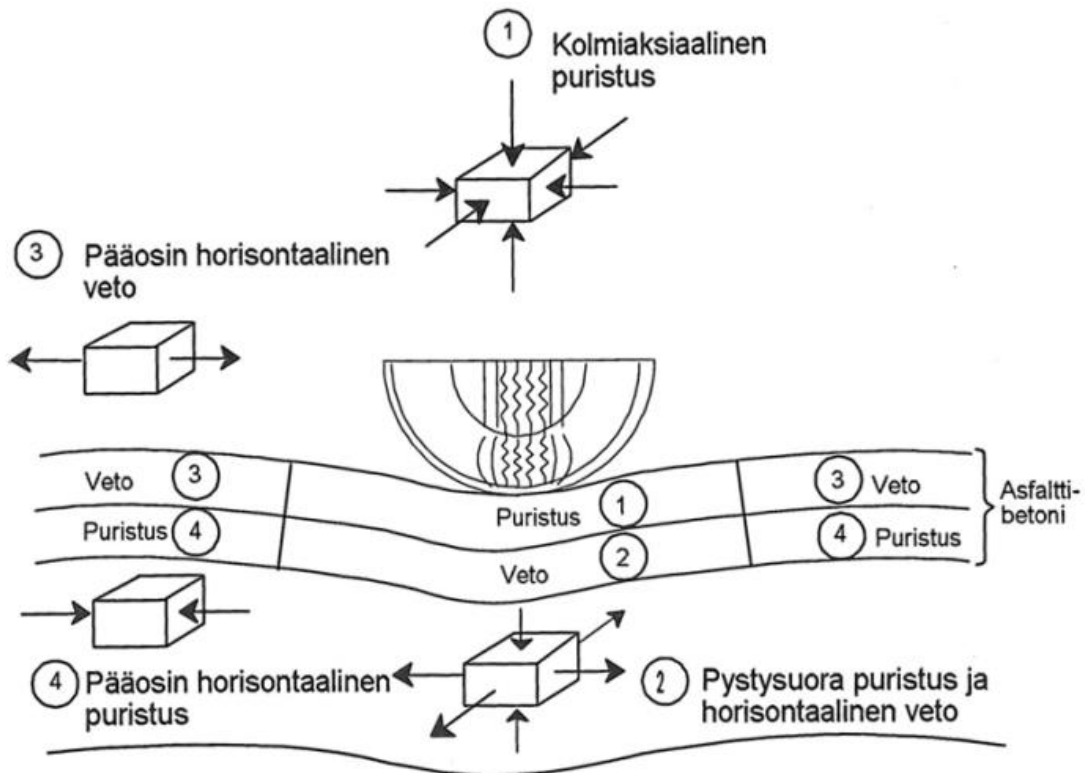
Päällystekerrosten alapuolella olevien kantavan ja jakavan kerroksen rakenteellisena tehtävänä on muodostaa päällysteelle niin kantava alusta, että se kestää liikenteen aiheuttamat kuormitukset. Jakavan kerroksen tehtävänä on myös kuivattaa kantavaa kerrosta, mikäli päällysteen läpi suotautuu vettä kantavaan kerrokseen. (Belt et al. 2002). Kantava kerros voi olla joko sitomaton tai sidottu eli stabiloitu. (Doré & Zubeck 2009).

Alimpana kerroksena alusrakenteen päällä on suodatinkerros, jonka tarkoitus on estää alusrakenteen ja päällysrakenteen materiaalien sekoittuminen sekä estää veden kapillaarinen nousu alusrakenteesta kantaviin kerrokseen (Belt et al. 2002). Perinteisesti suodatinkerros on tehty hiekasta, mutta se voidaan korvata suodatinkankaalla ja paksuntamalla jakavaa kerrosta siten, että kantavuus- ja routimiskriteerit täyttyvät. (Liikennevirasto 2018). Nykyään käytetään paljon niin kutsuttua louherakennetta, jossa suodatin- ja jakava kerros on korvattu paksulla louhepatjalla.

2.2 Päällysrakenteeseen kohdistuvat rasitukset

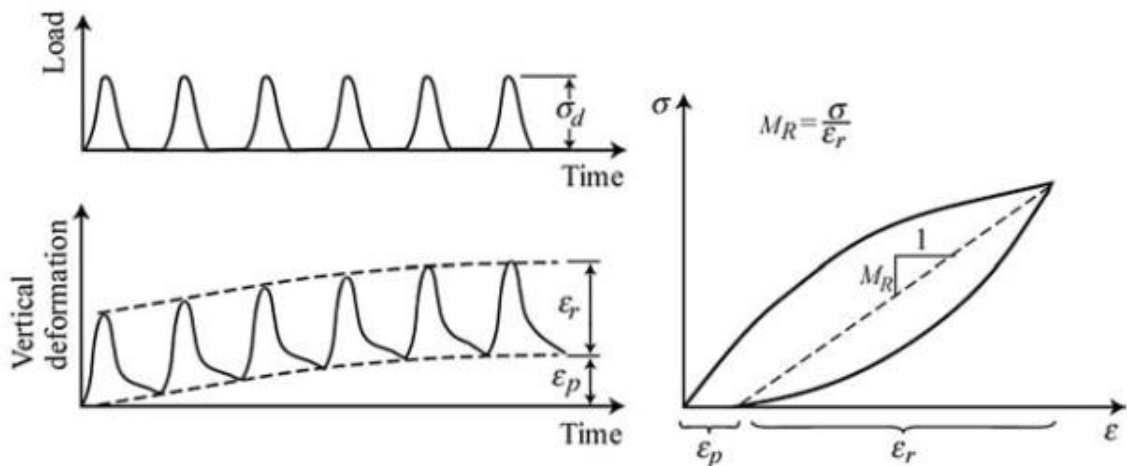
Päällysrakenteeseen kohdistuvat rasitukset voidaan jakaa staattisiin ja syklisiin. Staattisia kuormituksia aiheuttavat esimerkiksi pysähtyneet ajoneuvot, rakenteen oma paino, alusrakenteen painuminen tai muut maan liikkeet. Sykliset kuormitukset taas aiheutuvat liikkuvista liikennekuormituksista tai ilmastosta johtuvista rasituksista kuten routanousu. (Doré & Zubeck 2009). Toisaalta rasitukset voidaan jakaa karkeammin vain erittäin lyhytkestoisiin liikenteestä aiheutuviin syklisiin kuormituksiin ja pitkäkestoisiin ilmastosta ja ympäristöstä aiheutuviin staattisiin kuormituksiin (Belt et al. 2002).

Liikenteestä johtuvat rasitukset ovat erilaiset riippuen kulkuvälineestä ja sen akselikuormasta. Henkilöautot ovat niin kevyitä, että niiden merkittävin rasitus tierakenteelle on nastarengaskulumisen akselikuorman sijaan. Raskaalla liikenteellä sen sijaan suuret akselikuormat aiheuttavat merkittäviä puristus- ja vetorasituksia tierakenteeseen. Kuormituskestävyyden kannalta kriittisimmät rasitukset ovat liikenteestä johtuvat vetorasitukset sidottujen kerrosten alareunassa sekä niiden alapuolella olevaan ylimpään sitomattomaan kerrokseen sekä pohjamaahan kohdistuvat puristusjännitykset, kuten kuvassa 2 esitetään. (Belt et al. 2002). Sidotun kerroksen alareunan vetojännitykset johtuvat sidotun kerroksen taipumisesta kuorman alla, jota voidaan pienentää parantamalla ylimmän sitomattoman kerroksen jäykkyyttä eli pienentämällä kerrosten välistä jäykkyyseroa (Lätti 2016; Doré & Zubeck 2009).



Kuva 2. Tierakenteen jännitykset (Ehrola 1996).

Syklisellä kuormituksella tarkoitetaan useimmiten liikenteestä aiheutuvaa nopeasti tapahtuvaa toistuvaa kuormitusta. Syklinen kuormitus aiheuttaa rakenteeseen aina pysyvää ja palautuvaa muodonmuutosta. Ensimmäisen kuormitusyklin aikana pysyvän muodonmuutoksen osuus on suurempi kuin seuraavassa ja lopulta kuormitusykli vakiintuu siten, että lähes kaikki muodonmuutos on palautuvaa. Laboratoriossa ilmiötä voidaan tutkia syklisellä kolmiakselikokeella, jolla vakiintuneesta tilasta voidaan määrittää materiaalin jäykkyyttä kyseisessä kuormitusstilassa kuvaava jäännösmoduuli (M_R), jota kutsutaan myös resilient-moduuliksi. (Lätti 2016). Kuormituksen periaate ja kuormitus-muodonmuutuskäyttäytyminen sekä jäännösmoduulin määrittäminen on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Syklisen kuormituksen kuormitusperiaate ja kuormitus-muodonmuutuskäyttäytyminen (Doré & Zubeck 2009).

Ilmastosta johtuvat rasitukset liittyvät pääasiassa lämpötilaan ja rakenteessa olevaan kosteuteen. Kesällä ilman ollessa lämmin bitumilla sidotut materiaalit ovat joustavampia, joten suurempi osa puristusjännityksistä välittyy alemmille rakennekerroksille lisäämällä niiden rasitusta. Joustava bitumilla sidottu kerros ei halkeile yhtä helposti, mutta plastisen deformaation riski on suurempi. Talvella bitumilla sidotut materiaalit ovat jäykkiä ja kestävät hyvin puristusrasituksia, mutta toisaalta riski kutistumishalkeiluun kasvaa. (Laaksonen et al. 2004).

Toinen lämpötilasta johtuva rasitus on routiminen, jolla tarkoitetaan maan tilavuuden kasvua jäätyamisen seurauksena. Routiminen ilmenee rakenteen pinnalla routanousuna eli rakenteen pinnan kohoamisena. Routiminen tarvitsee tapahtuakseen seuraavat kolme edellytystä: materiaalin (tierakenteessa tarkoitetaan alusrakennetta) tulee olla routivaa, lämpötilan tulee laskea alle 0 °C ja vettä tulee olla saatavissa kapillaarisesti. Jos jokin edellä mainituista edellytyksistä puuttuu routimista ei tapahdu tai se on lievää. Routa ulottuu syvimmälle tien keskilinjalla, joten routanousu on siellä suurinta, mikä aiheuttaa tien keskilinjalle rakenteen yläosaan vetojännityksen, joka voi johtaa halkeamaan. Myös tien pituussuunnassa tapahtuva epätasainen routiminen aiheuttaa tierakenteen yläosaan vetojännityksiä, jotka voivat aiheuttaa tien poikkisuuntaisia halkeamia. (Ehrola 1996).

Päällysrakenteessa olevalla vedellä on suuri merkitys koko rakenteen kestävyuden kannalta. Vedellä kyllästynyt kerros johtaa paremmin lämpöä, jolloin routa pääsee syvemmälle rakenteessa ja siten kasvattaa riskiä routanousuun liittyvään rakenteen vaurioitumiseen (Doré & Zubeck 2009). Keväällä routa sulaa enimmäkseen ylhäältä alaspäin, jolloin sulanut vesi jää tierakenteeseen seisomaan nostaa rakenteen kyllästysastetta. Silloin liikenteestä aiheutuvan kuormitusimpulssin aikana huokosvedenpaine kasvaa nopeasti pienentäen rakenteen tehokasta jännitystä sekä leikkauslujuutta ja siten myös kuormituskestävyyttä. Tällöin suurempi osa kuormituksesta siirtyy alusrakenteen kannettavaksi, jolloin aiheutuu painumia ja ennenaikaisia urautumista. (Ehrola 1996). Kuormitusimpulssi aiheuttaa myös rakenteessa olevan veden pumppautumista ylöspäin, jos alla olevat kerrokset ovat vielä jäässä ja se taas saattaa johtaa päällysteen ennenaikaiseen hajoamiseen.

Roudan sulamisesta aiheutuvan rakenteen kyllästymisen lisäksi myös tierakenteen puutteellinen kuivatus voi nostaa rakenteen kyllästysastetta vuodenajasta riippumatta. Siksi rakenteen kuivatus tulee aina ottaa huomioon rakenteen suunnittelussa. Yleisesti tierakenteessa vedenläpäisevyyden tulisi parantua alaspäin mentäessä, jolloin päällysteen läpi suotautuva vesi pääsee poistumaan rakenteesta. (Thom 2008).

Sidotut ja sitomattomat kerrokset kestävät rasituksia eri tavalla, koska sidotut kerrokset kestävät vetorasituksia toisin kuin sitomattomat. Kuten aikaisemmin todettiin liikenteestä johtuvat vetorasitukset ovat suurimmillaan rakenteen yläosissa, joten siellä sidotut kerrokset ovat eniten hyödyksi. (Belt et al. 2002; Doré & Zubeck 2009). Sidotut kerrokset omaavat suuremman jäykkyyden sitomattomiin kerroksiin verrattuna ja se voi aiheuttaa ongelmia ilmastorasitusten, etenkin routanousun ja lämpötilanvaihteluiden aiheuttaman deformaation takia. (Doré & Zubeck 2009).

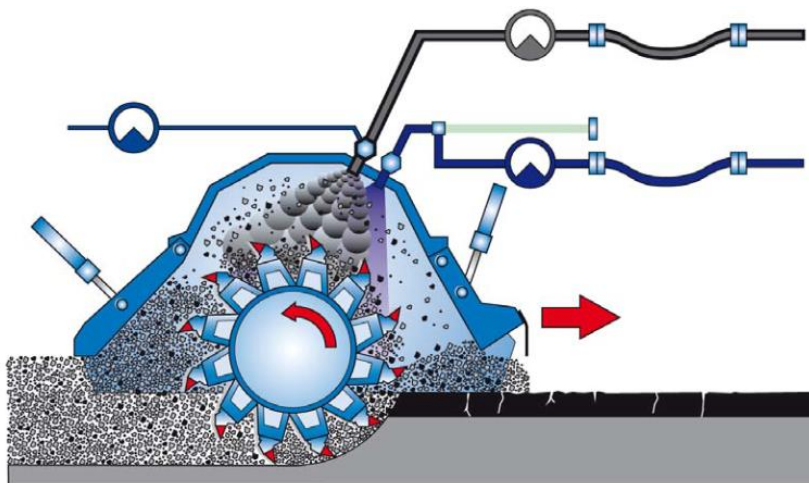
2.3 Päällysrakenteen stabilointi

Kerrosstabiloinniksi kutsutaan menetelmää, jossa kiviaines sidotaan yleensä bitumilla tai hydraulisella sideaineella, kuten sementillä tai masuunihiekalla. Sillä voidaan parantaa kerroksen kuormituskestävyyttä, korjata rakenteen vaurioita tai vähentää hienoaineksen routimisherkkyyttä. Sitä käytetään yleensä kantavassa kerroksessa, joko vanhan rakenteen korjaamiseen tai uuteen rakenteeseen. (Tiehallinto 2007). Tässä työssä keskitytään hydraulisella sideaineella tehtävään stabilointiin.

Merkittävimmät erot sidotun ja sitomattoman materiaalin kuormituskestävyydessä liittyvät materiaalin jäykkyyteen ja kykyyn kestää vetoa. Stabiloinnissa sideaine muodostaa kivirakkeiden väliin sidoksia, joiden rikkoutumisen voi aiheuttaa vetorasitukset, kemialliset tekijät tai lämpötilaerot, joista tässä työssä keskitytään vain vetorasituksiin. Stabiloitu kerros kestää hyvin kuormitusta, kunnes vetorasitus kasvaa liian suureksi ja sidokset alkavat hajota, jolloin pysyviä muodonmuutoksia alkaa tapahtua. Kyseessä voi olla yksittäinen liian suuri kuormitus tai pitkän ajan kuluessa useat toistuvat pienemmät kuormitukset, jotka rikkovat sidoksia. Yksi merkittävä tekijä, joka aiheuttaa vetorasituksia on aikaisemmin kuvattu liikenteestä johtuva nopea huokosvedenpaineen kasvu vedellä kyllästyneessä kerroksessa. Pitkän ajan kuluessa tapahtuvaa vaurioitumista kutsutaan myös väsymiseksi. (Thom 2008).

Kerrosstabiloinnit voidaan jakaa massan sekoitustavan mukaan paikallasekoitus- ja asemasekoitusmenetelmiin. Paikallasekoitus on Suomessa yleisemmin käytetty menetelmä. Sekoitusten menetelmästä riippumatta kerrosstabiloinnin etuja ovat muun muassa mahdollisuus käyttää huonolaatuisempaa kiviainesta, sillä sideaineen sitoessa kivirakeet yhteen, pienenee rakkeiden ominaisuuksien, kuten raekoon merkitys. (Tiehallinto 2007).

Paikallasekoitusmenetelmässä nykyiset rakenteet ja sideaine sekä mahdollinen lisäkiviaines sekoitetaan paikan päällä. Kuvassa 4 on esitetty sekoitusrummun periaatekuva. Menetelmän etuja ovat muun muassa vanhojen rakennekerrosmateriaalien tehokas uusiokäyttö, vähäinen kiviainesten kuljetustarve ja nopea työsuoritus. Menetelmän heikkoutena on se, että sekoituksen sideaine- ja vesipitoisuus ei ole yhtä tasalaatuinen kuin asemasekoitusmenetelmässä. Etenkin oikean vesipitoisuuden merkitys on suuri, sillä se mahdollistaa hyvän tiivistettävyyden ja toisaalta taas sideaine tarvitsee hydrataatioreaktioon riittävästi vettä. Oikea vesipitoisuus on valittava molemmat aspektit huomioon ottaen. (Tiehallinto 2007; Thom 2008).



Kuva 4. Stabilointijyrsimen sekoitusrumpu (Tiehallinto 2007).

Asemasekoitusmenetelmässä kiviainekset ja sideaine sekoitetaan erillisellä sekoitusasemalla ja kuljetetaan sieltä kohteeseen. Menetelmän suurimmat edut ovat monipuoliset mahdollisuudet vaikuttaa tarkasti massan koostumukseen ja sekoitustyön tasalaatuisuuteen. Haittapuolina ovat kuljetus asemalta kohteeseen ja mikäli halutaan hyödyntää vanhoja rakennekerrosmateriaaleja, tulee ne ensin kuljettaa kohteesta sekoitusasemalle. Edestakaiset kuljetukset nostavat menetelmän hintaa. (Tiehallinto 2007).

Perinteisesti kerrosstabiloinnin sideaineena on käytetty paljon bitumia, sementtiä, masuunihiekkää tai bitumin ja sementin sekoitusta. Bituminen sideaine mahdollistaa joustavan ja hyvin epätasaisia painumia tai routanousuja kestävän kerroksen rakentamisen, mutta toisaalta liikennesuorituksen aiheuttamat plastiset muodonmuutokset voivat kasvaa suuriksi. Sementillä saadaan tehtyä hyvin jäykkiä ja suuren kuormituskestävyyden omaavia kerroksia, mutta jäykkyytensä takia kerrokset ovat alttiita halkeilulle. Masuunihiekkä on terästeollisuuden sivutuotteena syntyvä materiaali, joka sitoutuu sementin kaltaisesti. Sitoutuminen on tosin sementtiä paljon hitaampaa. (Tiehallinto 2007). Edellä kuvattujen sideaineiden lisäksi on mahdollista käyttää myös uusiomateriaaleja, kuten lentotuhkia sideaineena (Thom 2008).

2.4 Päälysrakenteen mitoitus

Suomessa päälysrakenteen mitoitus perustuu Väyläviraston ohjeistuksen mukaan kantavuus- ja routamitoitukseen. Muita huomioitavia tekijöitä ovat muun muassa pohjamaan geotekniset ominaisuudet ja rakenteiden kuivatus, mutta niitä ei tässä työssä sen enempää käsitellä. Kantavuusmitoitus tehdään Odemarkin kantavuuskaavalla 1. Sillä voidaan määrittää tarvittavat kerrospaksuudet, joilla saavutetaan liikennemäärään perustuva tavoitekantavuus (Liikennevirasto 2018). Kantavuusmitoitus perustuu materiaalikohtaisiin E-moduuleihin, jotka on määritetty kokemusperäisesti (Kolisjoja 1997).

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

jossa

E_Y = mitoitettavan kerroksen yläpinnan kantavuus (MPa)

E_A = mitoitettavan kerroksen alapinnan kantavuus (MPa)

E = mitoitettavan kerroksen materiaalin E – moduuli (MPa)

h = mitoitettavan kerroksen paksuus (m)

$a = 0,15$ = kuormittavan pyörän kosketuspinnan säde (m)

Päälysrakenteen kokonaispaksuus määräytyy usein routamitoituksen perusteella. Routamitoituksessa verrataan rakenteen laskennallista routanousua sallittuun routanousuun. Laskennallinen routanousu lasketaan kaavalla 2. Rakennekerrosmateriaalien tulisi pääsääntöisesti olla routimattomia, jolloin ainoastaan alusrakenteen routiminen aiheuttaa routanousua. Päälysrakennetta paksuntamalla voidaan pienentää alusrakenteeseen ulottuvaa pakkasmäärää ja siten pienentää routanousua. Menetelmä perustuu rakennekerrosmateriaalien lämmöneristävyyksiin ja alusrakenteen suhteelliseen routaturpomaan, jotka on määritetty kokemusperäisesti. (Liikennevirasto 2018).

$$RN_{lask} = (S - a_1 \cdot R_1 - a_2 \cdot R_2 \text{ jne.}) \cdot \frac{t}{100} \quad (2)$$

jossa

RN_{lask} = laskennallinen routanousu (mm)

S = mitoitusroutansyvyys (mm)

a = materiaalin vastaavuuskerroin eristävyiden kannalta

R = rakennekerroksen paksuus (mm)

t = alusrakenteen routaturpoama (%)

Käytössä olevan kantavuus- ja routamitoituksen rajoittavana tekijänä voidaan pitää sen kokemuseräisyyttä. Sillä ei voida ottaa huomioon rakenteen eri kohdissa vaikuttavia jännityksiä ja niistä aiheutuvia pysyviä muodonmuutoksia. Myöskään erilaisten materiaalien väsymiskestävyysominaisuuksia tai olosuhteista ja vuodenaikasta johtuvia vaihteluita ei voida huomioida. (Tiehallinto 2002). Kokemuseräiset mitoitusparametrit on määritetty pääasiassa luonnonmateriaaleille, mutta monista uusiomateriaaleista on vielä toistaiseksi niin vähän kokemuksia, ettei niille ole voitu määrittää mitoitusparametreja.

3 Uusiomateriaalit stabiloinnissa

Tässä luvussa kerrotaan uusiomateriaalien käytöstä kerrostabiloinnissa aikaisempien tutkimusten ja kirjallisuuden avulla. Luvussa käsitellään uusiomateriaalien käyttöä stabiloinnin runkoaineena ja sideaineena. Betonimurske on sisällytetty stabiloinnin runkoaineeksi, vaikka usein sitä ei sellaiseksi mielletäkään, koska siinä on sekä sideaine että runkoaine samassa. Sideaineista on kuvattu vain tässä tutkimuksessa käytetyt ja Suomessa yleisimmin käytetyt hydrauliset sideaineet.

3.1 Stabiloinnin runkoaineena

Stabiloidun kerroksen pitkäaikaiskestävyys ei riipu niinkään kiviaineksen rakeiden välisestä kitkasta vaan sidosten kestävydestä. Tällöin kiviaineksen rakeisuus ja raemuoto ei ole yhtä merkittävässä roolissa kuin sitomattomissa kerroksissa. (Thom 2008). Tämä mahdollistaa heikompileatuksen kiviaineksen käytön ja suuremman hienoainespitoisuuden, jolloin myös monia sivutuotteita tai uusiomateriaaleja kuten valimohiekkaa ja kivituhkaa voidaan käyttää stabiloinnin runkoaineena. Rakentamisen aikana rakeisuudella on kuitenkin väliä, sillä ennen sidosten syntymistä rakenteen työnaikainen kantavuus riippuu rakeiden välisestä vuorovaikutuksesta. Lisäksi rakeisuuden tulee olla sellainen, että materiaali voidaan tiivistää hyvin, sillä mitä tiiviimpi rakenne on, sitä jäykempi siitä lujittuessaan tulee. (Thom 2008).

3.1.1 Valimohiekka

Valimohiekka on yleensä kvartsihiekkaa, johon on lisätty side- ja kovetusainetta. Hiekka voi olla myös oliviini-, kromiitti- tai zirkonihiekkaa, mutta kvartsihiekkaa on Suomessa eniten käytetty (Meskanen & Höök 2016). Suomessa valimoteollisuudessa yleisimmin käytetyt hiekka-sideainetyypit ovat esterikovetteinen fenolihartsihiekka (kauppanimeltään Alpha-set), tuorehiekkaja furaanihartsihiekka. Hiekasta valmistetaan valimoissa kertakäyttöisiä valumuotteja, jotka käytön jälkeen rikotaan takaisin hiekaksi. Hiekkaa voidaan kierrättää valimon sisällä, siten että 70 % hiekasta käytetään uudelleen ja 30 % lisätään puhdasta kvartsihiekkaa (Sappinen 2018b). Tällöin kierrosta jää aina noin 30 % valimohiekkaa yli. Yli jäävä hiekka on aikaisemmin sijoitettu kaatopaikoille, mutta se voidaan myös termisesti elvyttää vastaamaan puhdasta kvartsihiekkaa tai sitä voidaan käyttää erilaisiin maarakennustarkoituksiin, kuten kaatopaikkarakenteisiin, väylän pengermateriaaliksi tai suodatinkerrokseksi (Vilenius 2019).

Uutena käyttökohteena valimohiekan uusiokäytölle on Aalto-yliopistossa tutkittu mahdollisuutta käyttää esterikovetteista fenolihartsihiekkaa kerrostabiloinnin runkoaineena. Tutkimuksessa selvitettiin puristuslujuuskokeilla valimohiekan soveltuvuutta tierakenteen kantavan kerroksen stabiloinnin runkoaineeksi. Puristuslujuuksia verrattiin voimassa olevaan päällysrakenteen stabilointiohjeeseen, jossa on esitetty puristuslujuusvaatimukset (Tiehallinto 2007). Sideaineina käytettiin pikasementtiä, kivihiilenpolton ja biopolton lentotuhkia sekä Ecolan sideaineseosta. Tutkimuksessa havaittiin, että käyttämällä pelkästään valimohiekkaa stabiloinnin runkoaineena ei saavuteta kantavaan kerrokseen vaadittavaa lujuutta millään käytetyllä sideaineella. Siitä syystä päätettiin lisätä kivituhkaa (KaM 0/4) run-

koaineeseen seossuhteilla WFS 25% + KaM 0/4 75% ja WFS 50% + KaM 0/4 50%. Kum-mankaan seossuhteen lujuudet eivät saavuttaneet vaadittavaa lujuutta. Lopulta testattiin va-limohiekan ja karkeamman kalliomurskeen (KaM 0/20) sekoitusta runkoaineeksi suhteella WFS 25% + KaM 0/20 75%. Tällöin saavutettiin kaikkien sideaineiden kanssa kantavan kerroksen vaaditut lujuudet sekä 7 että 28 vuorokauden ikäisillä näytteillä. (Vilenius 2019). Näihin tutkimustuloksiin palataan vielä myöhemmin tarkemmin tässä työssä.

3.1.2 Kivituhka

Kivituhka on kiviainestuotannon sivutuote, jota syntyy louhinnan, murskauksen ja kuljetuk-sen aikana sekä katkaistuja lajikkeita kuten KaM 8/16 valmistettaessa. Kivituhkan käyttöä sellaisenaan maarakentamisessa rajoittaa sen routimisalttius. (Melander 2018). Kivituhkan soveltuvuutta stabiloituna kantavaan kerrokseen ovat aikaisemmin tutkineet ainakin Melan-der (2018) ja Zhang et al. (2019). He käyttivät tutkimuksissaan sideaineina muun muassa sementtiä, kivihiilenpolton lentotuhkaa ja Ecolan sideaineseosta. Molemmissa tutkimuksissa huomattiin kivituhkan soveltuvan stabiloidun kantavan kerroksen runkoaineeksi, kunhan saavutetaan riittävä tiiviysaste ja käytettävä sideainemäärä on oikea. Tutkittavia ominaisuuksia olivat yksiaksiaalinen puristuslujuus, jäätymis-sulamiskestävyys ja kapillaarisuus.

3.1.3 Betonimurske

Betonimurske on murskattua betonia, joka on valmistettu rakennus- ja purkutyömaiden tai betoniteollisuuden betonijätteestä (Rudus 2017). Betonimursketta on käytetty maarakenta-misessa jo pitkään. Sitä on tutkittu paljon ja koerakenteita on ollut pitkäaikaisseurannassa. Betonimurskeen tekniset ominaisuudet vaihtelevat betonin alkuperän mukaan, joten beto-nimurskeet on jaettu laatuluokkiin BeM I – BeM IV taulukon I mukaisesti. Yksi betonimurs-keen hyvistä ominaisuuksista on luokkien BeM I ja II betonimurskeiden kyky lujittua uudel-leen rakenteessa. Lujittuminen kasvattaa kerroksen jäykkyyttä, jolloin voidaan käyttää ohuempia rakennekerroksia tai rakentaa tavanomaista kantavampi rakenne. Suurempi kan-tavuus vähentää tierakenteen urautumista ja vaurioitumista (Lätti 2016; Rudus 2017).

Taulukko 1. Betonimurskeen luokittelu ja ominaisuuksia. Muokattu (Rudus 2017).

Luokka	Puristus-lujuus 28 d (MPa)	Routivuus	Optimivesi-pitoisuus (%)	Maksimi-kuivatila-vuus-paino (Mg/m ³)	Tiilen max. osuus (paino-%)	Muiden materiaa-lien osuus (paino-%)	Pääasiallinen käyttökohde tie-rakenteessa
BeM I	> 1,2	Routimaton	10 ± 2	1,95 ± 0,05	0	0,5	Kantava
BeM II	> 0,8	Routimaton	10 ± 2	1,90 ± 0,1	10	1	Kantava tai jakava
BeM III	-	Routimaton	11 ± 3	1,90 ± 0,15	10	1	Jakava
BeM IV	-	Vaihtelee	11 ± 4	1,90 ± 0,15	30	1	Jakava

Betonimurske on MARA-asetuksen piirissä oleva materiaali, joten sitä voidaan käyttää VNa 843/2017 mukaisesti ilmoitusmenettelyllä asetuksen mukaisissa käyttökohteissa. Käyttökohteita ovat yleiset tiet, kadut, pyörätiet, jalkakäytävät, pysäköintialueet, urheilukentät, virkistys- ja urheilualueiden reitit, ratapihat sekä teollisuus-, jätteenkäsittely- ja lentoliikenteen alueiden varastointikentät ja tiet. (Valtioneuvosto 2017).

3.2 Stabiloinnin sideaineena

Kerrosstabiloinnin sideaineena on perinteisesti käytetty bitumisia sideaineita, sementtiä tai niiden seoksia. Osa sitoutuvista uusiomateriaaleistakin soveltuu sideaineeksi joko yksinään tai sekoitettuna sementin kanssa. Toiset ovat olleet jo pidempään käytössä ja toisten käyttöä vasta selvitetään.

3.2.1 Lentotuhka

Energiantuotannon polttoprosessin sivutuotteena syntyvää lentotuhkaa voidaan käyttää sementin tapaan kerrosstabiloinnin sideaineena. Tuhkat luokitellaan Suomessa niiden keräyspaikan mukaan lento- ja pohjatuhkiin sekä polttoaineen perusteella kivihiilenpolton-, seospolton- ja rinnakkaispolton tuhkiin. Lentotuhka erotetaan savukaasusta, kun taas pohjatuhka kertyy polttokattilan pohjalle. Seospoltossa voidaan polttaa muun muassa biomassaa ja rinnakkaispoltossa yhdyskuntajätettä. Yhdyskuntajätteenpolton tuhkat jätetään tässä työssä huomioimatta. Lentotuhkien erityispiirteenä on niiden kyky sitoutua sementin tavoin ja siksi niitä voidaankin käyttää kerrosstabiloinnin sideaineena. Lentotuhka sitoutuu sementtiä hitaammin ja sen on havaittu parantavan stabiloitujen rakenteiden pitkän ajan lujuuskehitystä ja pakkasrasituksen kestävyyttä. (Ramboll 2012). Lentotuhkan lujittumisominaisuuksiin vaikuttavat muun muassa käytetty polttoaine, tuhkapartikkeleiden muoto ja koko sekä vesipitoisuus ja tiiveys (Harju 2017).

3.2.2 Sideaineseokset

Edellä kuvattua lentotuhkaa voidaan käyttää myös osana uusiosideaineseosta. Sideaineita sekoittamalla pyritään hyödyntämään eri materiaalien vahvuuksia, pienentämään materiaalikustannuksia ja edistämään materiaalikiertoa. Usein uusiomateriaalin sitoutumista nopeutetaan sekoittamalla joukkoon sementtiä. Esimerkiksi tässäkin tutkimuksessa käytettävä kaupallinen sideaineseos Ecolan koostuu kivihiilen- ja biopolton lentotuhkista sekä sementistä (Vilenius 2019). Myös kivihiilenpolton yhteydessä muodostuvaa rikinpoiston lopputuotetta voidaan käyttää stabiloinnin sideaineena yhdessä lentotuhkan kanssa (Harju 2017). Teollisuuden sivutuotteena syntyvällä kipsillä voidaan vaikuttaa sideaineseosten lujittumisnopeuteen ja –lämpötilaan sekä parantaa seoksen pitkän ajan lujuudenkehitystä (TVL 1979). Terästeollisuudessa sivutuotteena syntyvää masuunihiekkää voidaan käyttää sellaisenaan stabiloinnin sideaineena tai siihen voidaan sekoittaa pieni määrä sementtiä, jolloin masuunihiekan muuten hidasta sitoutumista voidaan nopeuttaa (Tiehallinto 2007).

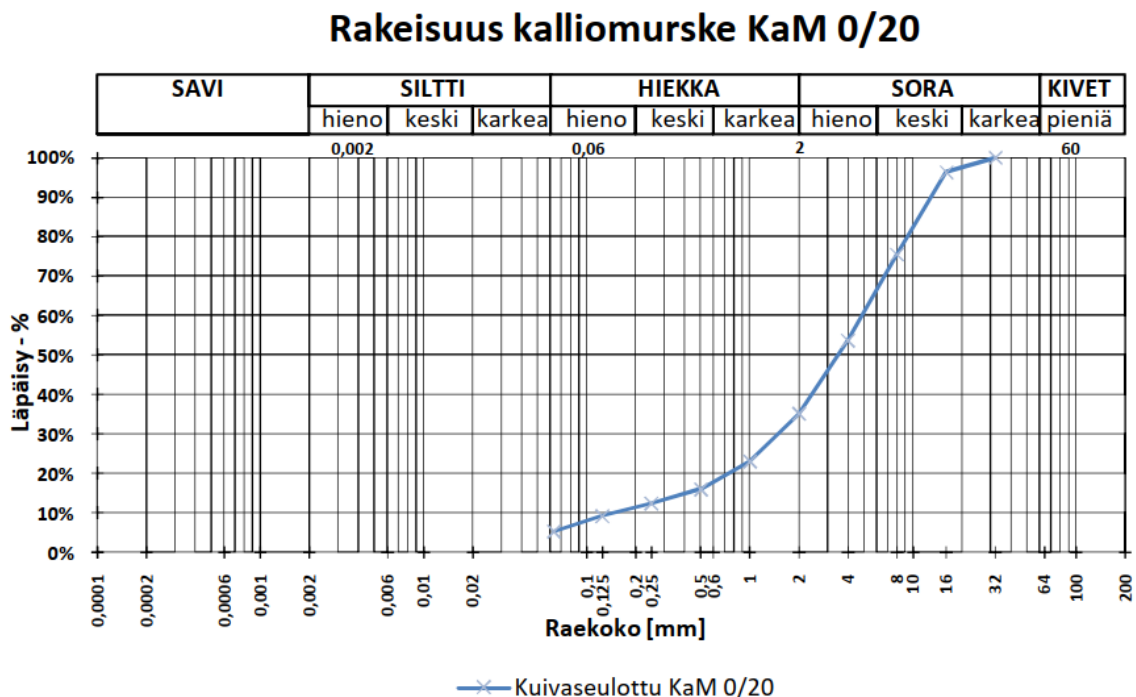
4 Tutkimuksessa käytetyt materiaalit

Tässä luvussa kuvataan tutkimuksessa käytetyt materiaalit. Valtaosaa materiaaleista käsiteltiin yleisellä tasolla jo edellisessä luvussa, mutta tässä luvussa yksilöidään käytetyt materiaalit mahdollisimman tarkasti ja kuvataan ne materiaalit, joita ei käsitelty edellisessä luvussa. Betonimursketta lukuun ottamatta, käytetyt materiaalit oli valittu jo aiemmassa tutkimuksessa (Vilenius 2019).

4.1 Kalliomurske

Kalliomurskeella (KaM) tarkoitetaan kalliosta louhittua murskattua kiviainesta. Kalliomurskeen nimessä on usein myös minimi ja maksimiraekoko (esim. 0/20), johon kalliomurske on seulottu. Kalliomurskeessa kappaleiden jokainen sivu on karkea ja siten ne lukkiutuvat rakenteessa hyvin toisiinsa. Murskerakenteen lujuuden kannalta murskeen olennaisimmat ominaisuudet ovat rakeiden muoto, karkeus ja rakeisuus. (Melander 2018).

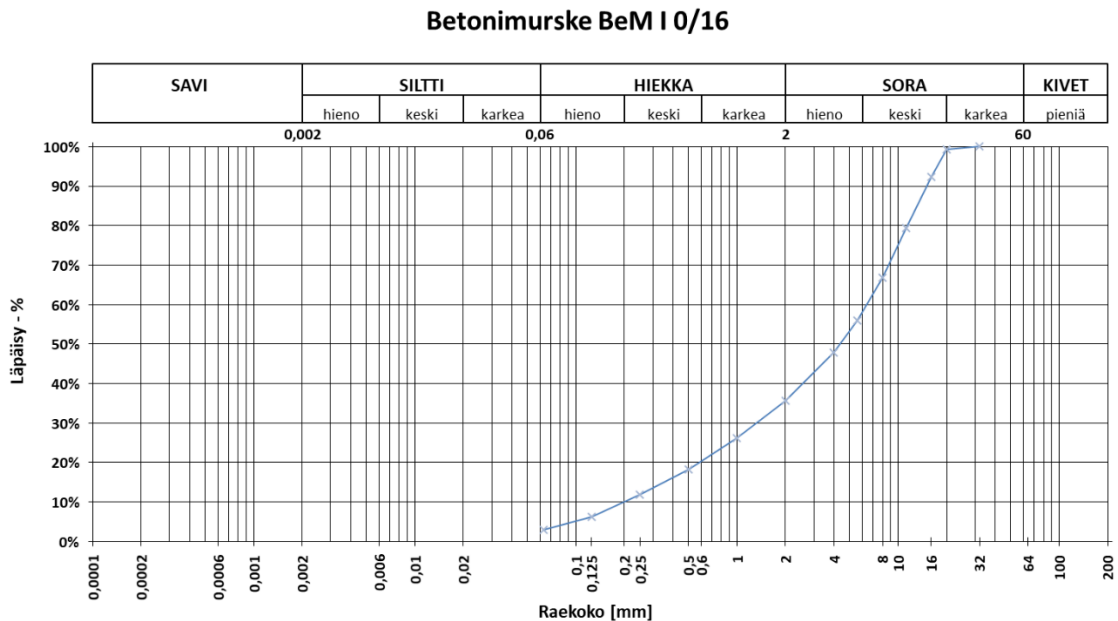
Tutkimuksessa käytetty kalliomurske oli Destian Koskenkylän kiviainesalueelta. Murske oli alun perin rakeisuudeltaan 0/32, mutta tutkimusta varten se seulottiin rakeisuuteen 0/20 kappaleiden maksimiraekoon takia. Vilenius (2019) tutki käytetyn kiviaineksen rakeisuuden Aalto-yliopistossa standardien SFS-EN-933-1 (2012) ja SFS-EN 993-2 (1996) mukaisesti. Rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 5. Kiviaineksen CE-merkintä ja suoritustasoilmoitus ovat liitteessä 1.



Kuva 5. Kalliomurskeen rakeisuuskäyrä (Vilenius 2019).

4.2 Betonimurske

Betonimurskeen yleiset ominaisuudet ja valmistaminen on kuvattu luvussa 3.1.3. Tässä työssä käytetty betonimurske oli BeM I luokan (katso taulukko 1) mursketta, jonka raekoko oli 0/16. Betonimurske oli peräisin Parman elementtitehtaalta, jossa se oli valmistettu tehtaasta betonijätteestä. Betonimurskeen rakeisuus tutkittiin kuivaseulonnalla standardien SFS-EN-933-1 (2012) ja SFS-EN 993-2 (1996) mukaisesti. Seulottava murske jaettiin jakolaatilla, jonka jälkeen jaettu materiaali seulottiin kahdessa erässä. Saatu rakeisuuskäyrä on kuvassa 6. Betonimurskeesta käytetään tässä työssä myös lyhennettä BeM.



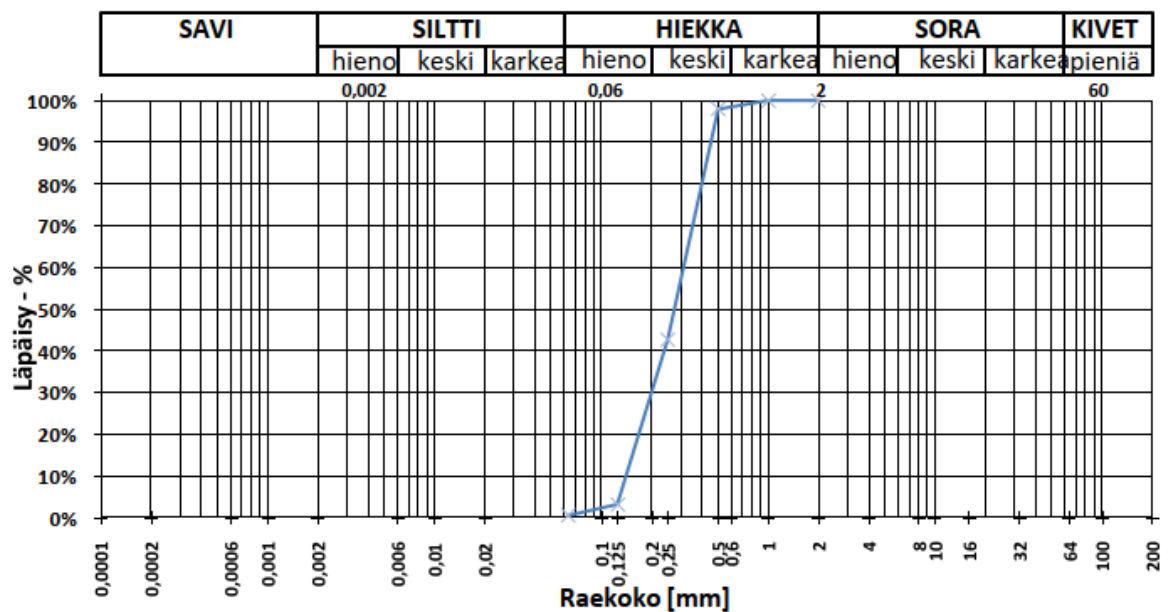
Kuva 6. Betonimurskeen rakeisuuskäyrä.

4.3 Valimohiekka

Valimohiekasta materiaalina ja sen käytöstä kerrosstabiloinnin runkoaineena on kerrottu enemmän luvussa 3.1.1. Tässä tutkimuksessa käytetty valimohiekka oli peräisin Karhulan valimolta ja se on esitetty kuvassa 7. Se oli valimokierrosta poistettua alphaset valimohiekkaa, minkä tarkempi kuvaus löytyy Vileniuksen (2019) diplomityöstä. Valimohiekka on ISO-luokituksen mukaisesti tasarakeista hiekkaa, jonka rakeisuuskäyrä on esitetty kuvassa 8. Sen optimivesipitoisuus on 15,5 % ja maksimikuivairtoisuus 1,69 g/cm³ parannetulla Proctor-kokeella tutkittuna. (Vilenius 2019). Valimohiekasta käytetään tässä työssä myös lyhennettä WFS (Waste Foundry Sand).



Kuva 7. Valimohiekkaa (Vilenius 2019).



Kuva 8. Valimohiekan rakeisuuskäyrä (Vilenius 2019).

4.4 Sementti

Sementti on kemiallisesti aktiivinen aine, joka reagoi vedessä muodostaen kovan sementtikiven, jolla voidaan sitoa esimerkiksi betonin kiviaines yhtenäiseksi kappaleeksi. Eniten sementtiä käytetäänkin betonin valmistuksessa. Yleisimmin käytetty ja perinteisin sementti on Portlandin sementti, joka koostuu pääasiassa kalsiumista, piistä, alumiinista ja raudasta. Sementti valmistetaan sekoittamalla jauhetut raaka-aineet, jonka jälkeen ne poltetaan uunissa 1450 °C lämpötilassa, jolloin niistä muodostuu klinkkeriä. Lopuksi klinkkeri jauhetaan lopulliseen muotoonsa sementiksi. (Jackson & Dhir 1996).

Tässä tutkimuksessa käytettiin pikasementtiä CEM I (Portlandin sementti), jonka lujuusluokka on 52,5 R eli se on varhaislujuuttavaa, sillä sen puristuslujuus 2 vrk jälkeen on yli 30 MPa ja 28 vrk jälkeen yli 52,5 MPa (SFS-EN 197-1 2012). Sementistä käytetään tässä työssä myöhemmin vain lyhennettä CEM. Käytetyn pikasementin tuote-esite on liitteenä 2 (Finnsementti Oy 2019).

4.5 Kivihiilenpolton lentotuhka

Energiantuotannon lentotuhkien käytöstä stabiloinnin sideaineena on kerrottu enemmän luvussa 3.2.1. Tässä työssä käytettiin kivihiilen polton lentotuhkaa, jonka kanssa käytettiin 2% pikasementtiä aktivaattorina vauhdittamassa sitoutumista. Käytetty tuhka oli peräisin Helen Oy:n Hanasaaren voimalaitokselta. Lentotuhkan valmistumispäivä oli 10.7.2018. (Vilenius 2019). Kivihiilenpolton lentotuhkasta käytetään myöhemmin tässä työssä myös lyhennettä KPLT.

4.6 Biopolton lentotuhka

Energiantuotannon lentotuhkien käytöstä stabiloinnin sideaineena on kerrottu enemmän luvussa 3.2.1. Tässä työssä käytettiin biopolton lentotuhka (BPLT), jonka kanssa käytettiin 2% pikasementtiä aktivaattorina vauhdittamassa sitoutumista. Käytetty tuhka oli peräisin Fortum Oy:n Järvenpään voimalaitokselta. Polttoaineena laitoksella käytetään biomassan ja hevosenlannan seosta, joka ei sisällä kierrätyspuuta. Tuhkan valmistumispäivä oli 11.4.2019. (Vilenius 2019).

4.7 Ecolan-sideaineseos

Tutkimuksessa käytettiin Ecolan Oy:n kaupallista uusiosideainetta Ecolan Infra Binder, Stabi 80. Käytetty erä saapui tutkimusta varten 26.3.2019. Sideaineseoksessa on kivihiilenpolton, biopolton ja kalkkipitoisen lietteen lentotuhkia noin 80 % ja 20 % sementtiä (CEM I 42,5 N). (Vilenius 2019). Sideaineseoksesta käytetään myöhemmin tässä työssä myös lyhennettä ECO.

5 Laboriotutkimukset

Tässä luvussa kuvataan koekappaleiden valmistus ja eri seosten suhteutukset. Lisäksi kuvataan laboriotutkimuksissa käytetyt menetelmät kapillaarisuudelle, vedenläpäisevyydelle, jäädytys-sulatuskestävyydelle, routanousulle, sykliselle kolmiakselikokeelle ja puristuslujuudelle. Edellä mainitut tutkimukset tehtiin kaikki valimohiekan ja kalliomurskeen sekoituksille, mutta valimohiekan ja betonimurskeen sekoituksille tehtiin vain puristuslujuuskokeet.

5.1 Koekappaleiden valmistus

Tässä työssä käytettiin Vileniuksen (2019) määrittämiä reseptejä sideaineseoksille ja koekappaleiden valmistuskin pyrittiin tekemään samalla tavalla. Vilenius määrittäi stabiloinnin runkoaineena toimivien kalliomurskeen ja valimohiekan toimivaksi suhteeksi WFS 25 % ja KaM 75 %. Lisäksi Vilenius määrittäi maksimi kuivairtohiyden ja optimivesipitoisuuden seoksille, joiden perusteella koekappaleet suhteutettiin.

Valimohiekan ja kalliomurskeen seosten lisäksi tässä työssä tutkittiin betonimurskeen ja valimohiekan sekoittamista ilman lisättävää sideainetta. Tutkittavat seokset olivat 25 % WFS ja 75 % BEM I sekä 50 % WFS ja 50 % BEM I. Seosten optimivesipitoisuudet ja maksimikuivairtohiydet määritettiin käyttämällä ICT-kiertotiivistintä. Kaikki tutkimuksessa testatut seokset ja niille tehdyt kokeet on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Testatut seokset ja niille tehdyt tutkimukset.

Sideaine-seos ja testausikä	Laboriotutkimukset ja koekappaleiden lukumäärä					
	Puristuslujuus (UCS)	Kapillaarisuus	Jäädytys-sulatuskestävyys	Vedenläpäisevyys	Routanousukoe	Syklinen kolmiakselikoe
WFS 25% + KaM 75% + CEM I 4% + vesi 6%						
7 vrk	3*					
28 vrk	3*	4	2+2	3	1	3
91 vrk	3					
WFS 25% + KaM 75% + KPLT 10% + A 2% + vesi 6%						
7 vrk	3*					
28 vrk	3*	4	2+2	3	1	3
91 vrk	3					
WFS 25% + KaM 75% + ECO 8% + vesi 6%						
7 vrk	3*					
28 vrk	3*	4	2+2	3	1	3
91 vrk	3					
WFS 25% + KaM 75% + BPLT 8% + A 2% + vesi 6%						
7 vrk	3*					
28 vrk	3*					
91 vrk	3					
WFS 25% + BeM I 75% + vesi 9%						
28 vrk	3					
WFS 50% + BeM I 50% + vesi 10%						
28 vrk	3					

* Vilenius (2019) teki kokeet, mutta tuloksia hyödynnettiin myös tässä tutkimuksessa.

Koekappaleiden valmistus eteni siten, että runkoainekset ja sideaine sekoitettiin kuivina asiassa, jonka jälkeen seokseen lisättiin vesi. Tasalaatuiseksi sekoitettu seos tiivistettiin ICT-kiertotiivistimellä 96 % tiiveysasteeseen. Käytetty tiiveysaste on Päälysrakenteen stabilointi-ohjeen (2007) mukainen tiiveys muille kuin sementtistabiloinneille kiertotiivistintä käytettäessä. Myös sementtiä sisältävät seokset tiivistettiin 96 % tiiveysasteeseen (ohjeessa 97%), jotta tulokset olisivat paremmin vertailukelpoisia sideaineseosten välillä. ICT-kiertotiivistin (Intensive Compaction Tester) on kuvattu Tiehallinnon selvityksessä 63/2001. Tässä työssä käytettiin kiertotiivistimen liikekulmana 22 mrad, aksiaalipaineena 600 kPa ja pyörintänopeutena 26,0 rpm. Koekappaleet säilytettiin muovilla peitetyinä jälkihoituhuoneessa tasaisessa +20 °C lämpötilassa ja 95 % suhteellisessa kosteudessa, kunnes ne olivat testausiässä. Kaikkien koekappaleiden suunnitellut ja toteutuneet valmistustiedot on koottu liitteeseen 3.

5.2 Puristuslujuus

Stabiloidun kantavan kerroksen vetolujuus on kestävyuden kannalta kriittisin ominaisuus. Sen mittaus luotettavasti on kuitenkin vaikeaa, joten sen sijaan usein mitataan puristuslujuus. Se on nopea ja helppo mitata, vaikkakin todellisuudessa veto- ja puristuslujuuden välinen yhteys ei ole täysin aukoton. Sidotun materiaalin muodonmuutokset ovat yleensä hyvin pienet murtumiseen asti, jonka jälkeen sen käyttäytyminen puristuksen alla alkaa muistuttaa sitomatonta materiaalia. (Thom 2008).

Koekappaleiden puristuslujuus tutkittiin standardin SFS-EN 13286-41 (2003) mukaisella kokeella. Koekappaleet puristettiin murtumiseen asti, jonka jälkeen seurattiin vielä jäännöslujuuden kehitystä, siten että koe lopetettiin vasta kun huippulujuudesta oli enää 15 % jäljellä. Puristuslujuuden määrittäminen tehtiin 91 vuorokauden ikäisille valimohiekkaa ja kalliomursketta sisältäville koekappaleille, joissa sideaineina oli käytetty sementtiä, kivihiilenpolton lentotuhkaa, biopolton lentotuhkaa tai Ecolania. Lisäksi tutkittiin betonimurskeen ja valimohiekan sekoitusten lujuuksia ja koe tehtiin myös osana jäädytys-sulatuskestävyyden tutkimista. Puristuslujuus laskettiin kaavalla 3.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

jossa

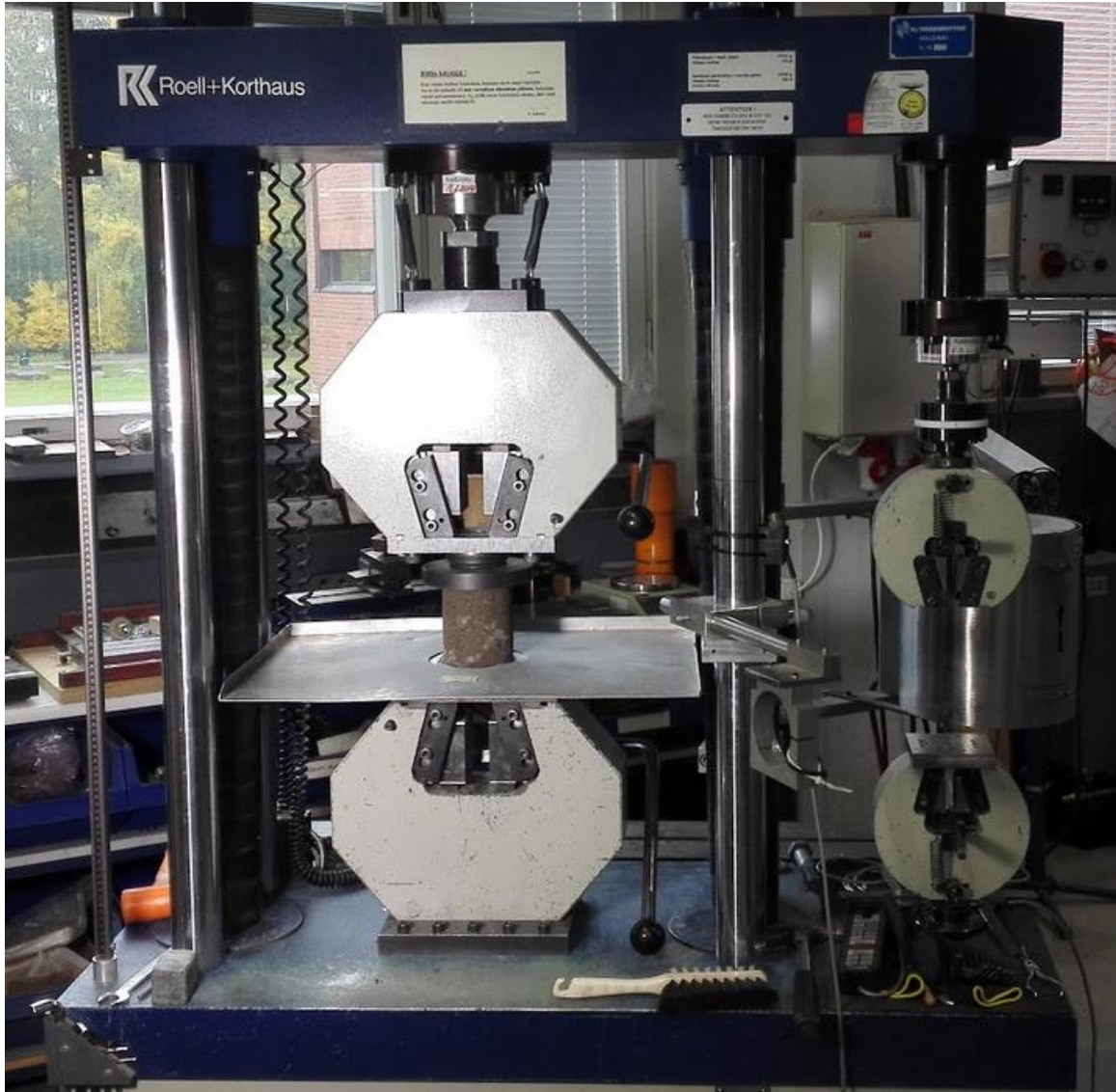
σ = puristuslujuus (MPa)

F = puristusvoima (N)

A = koekappaleen poikkipinta – ala (mm²)

Puristuslujuuden tutkimista varten valmistettiin kullakin sideaine- ja/tai runkoaineseoksella 3 rinnakkaista lieriön muotoista koekappaletta. Koekappaleiden halkaisija oli 100 mm ja korkeus 120 mm. Poikkeuksena oli jäädytys-sulatuskokeen koekappaleet, joita oli 2+2 kpl (set A + set B) kullakin sideaineseoksella ja joiden korkeus oli 100 mm.

Ennen kokeen aloitusta tehtiin 0,2 kN esikuormitus, jonka jälkeen kuormitus tehtiin siirtymäohjattuna 1,2 mm/min koko kokeen ajan paitsi jäädytys-sulatuskokeen koekappaleet, joiden kanssa käytettiin nopeutta 1 mm/min niiden erilaisen korkeuden takia. Betonimurskeen ja valimohiekan seoksilla esikuormituksena käytettiin 0,1 kN, koska seosten odotettiin olevan muita seoksia huomattavasti huonommin puristusta kestäviä. Kokeessa käytettiin Zwick ja Roell:n puristuslaitetta, joka on kuvassa 9.



Kuva 9. Zwick ja Roell:n puristuslaite.

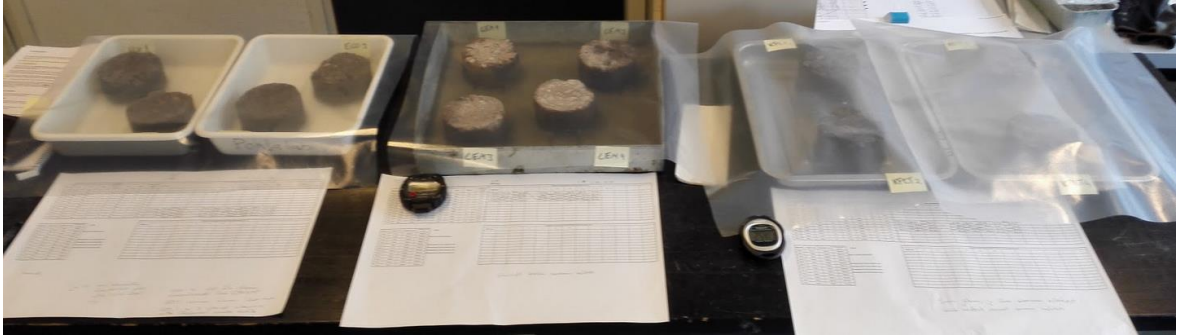
5.3 Kapillaarisuus

Stabiloitujen materiaalien kapillaarisuus selvitettiin standardin SFS-EN 13057 (2002) mukaisella kokeella. Tutkimukset tehtiin sementillä, kivihiilenpolton lentotuhkalla ja Ecolanilla stabiloiduille seoksille. Kokeessa seurattiin veden kapillaarista imeytymistä tutkittavaan koekappaleeseen seuraamalla koekappaleen painon kehitystä tietyin aikavälein.

Koetta varten valmistettiin sementtiä sisältävästä sideaineseoksesta yksi 200 mm korkea näyte. Lentotuhkaa ja Ecolania sideaineina sisältäviä näytteitä valmistettiin kumpaakin kaksi 100 mm korkeaa näytettä. Kaikki näytteet olivat lieriöitä, joiden halkaisija oli 100 mm. Näytteet olivat lujittumassa jälkihoituhuoneessa 28 vuorokautta ennen testausta. Tutkittavat koekappaleet valmistettiin sahaamalla näytteistä noin 50 mm paksut koekappaleet siten, että jokaista sideaineseosta kohden oli 4 tutkittavaa koekappaleita.

Koekappaleiden valmistelu ennen koetta poikkesi standardista siten, että näytteet otettiin uuniin kuivumaan koetta edeltävänä päivänä sahausksen jälkeen, eikä standardin mukaisesti 7 vrk ennen koetta. Koekappaleet ehtivät lyhyemmästä ajasta huolimatta kuivua riittävästi, sillä kappaleiden painon muutos oli standardin mukaisesti alle 0,2 % kahden tunnin kuivatamisen aikana.

Osasta koekappaleista irtosi osia jo ennen kokeen aloitusta, joten kaikki irralliset tai helposti irtoavat partikkelit harjattiin pois näytteistä ennen alkutilanteen punnituksia. Kokeen aikana näytteet olivat suojamuovin alla kuvan 10 mukaisesti, jotta olosuhteet olisivat mahdollisimman tasaiset koko kokeen ajan.



Kuva 10. Koejärjestelyt kapillaarisuutta tutkittaessa.

5.4 Vedenläpäisevyys

Stabiloidun materiaalin pystysuuntainen vedenläpäisevyys selvitettiin standardin SFS-EN 12697-19 (2012) mukaisella kokeella. Standardin mukainen koe on tarkoitettu asfalttinäytteiden tutkimiseen, mutta sen ajateltiin soveltuvan stabiloitujen näytteidenkin tutkimiseen niiden samanlaisuuden ansiosta. Kokeessa seurattiin veden suotautumista koekappaleen läpi punnitsemalla suotautunut vesimäärä tietyin aikavälein. Koekappaleen yläpinnassa pidettiin vakiovedenpainetta koko kokeen ajan.

Koetta varten valmistettiin kolme 50 mm paksua ja 100 mm halkaisijaltaan olevaa lieriön muotoisia koekappaleita kustakin tutkittavasta sideaineseoksesta (CEM, KPLT ja ECO). Näytteet olivat lujittumassa jälkihoitohuoneessa 28 vuorokautta ennen kokeen aloitusta. Standardin mukaistan tarkoitukseen suunniteltua koelaitteistoa ei ollut käytettävissä, joten koetta varten kehitettiin oma laitteisto. Perusajatuksena oli kiinnittää liimalla koekappaleen yläpintaan putki, jotta saadaan luotua standardin mukainen veden paine. Koekappaleen liittäminen vesitiiviisti osoittautui kuitenkin haastavaksi ja aikaa vieväksi prosessiksi, joten ennalta suunnitellussa koeaikataulussa ei pysytty ja osa koekappaleista odotti testausta muutamia päiviä suunniteltua pidempään. Toimivaksi osoittautunut koejärjestely on kuvattu seuraavassa kappaleessa.

Koekappaleiden sivuille laitettiin ilmastointiteippi estämään veden vaakasuuntaista virtaamista ulos näytteestä. Tämän jälkeen koekappaleen päälle liimattiin epoksiliimalla sisähalkaisijaltaan 98,5 mm oleva teräsputki, jolloin koekappaleen yläpintaan saatiin lähes standardin mukainen veden paine. Liimalla myös tukittiin ilmastointiteipin ja koekappaleen yläreunan väliset aukot. Tällä toimenpiteellä pyrittiin estämään veden virtaus suoraan putkesta tei-

pin ja koekappaleen väliin. Putken ja koekappaleen liitosta vahvistettiin lopuksi vielä ilmastointiteipillä. Ennen kokeen aloitusta ja kokeen jälkeen liitoksen vesitiiveys varmistettiin altaassa. Näin saatiin varmuus, että liitos on pysynyt tiiviinä koko kokeen ajan eivätkä vuodot vääristä tuloksia. Kuvassa 11 on esitetty näytteeseen liitetty putki ja kuvassa 12 on käytetty koejärjestely kokonaisuudessaan. Kuvasta 12 puuttuu vielä liitosta vahvistava teippikerros.



Kuva 11. Näytteeseen kiinnitetty teräsputki.



Kuva 12. Koejärjestely.

Varsinainen koe aloitettiin 10 min kyllästyksellä, jossa koekappale oli upotettuna veteen ja sen yläpinnassa pidettiin 300 mm korkea vesipatsas. Kokeet aloitettiin sementillä sidotuilla koekappaleilla, joiden vedenläpäisevyyttä mitattiin toistamalla 5 min mittaus kaksi kertaa. Lentotuhkalla ja Ecolanilla sidotut näytteet osoittautuivat varsin huonosti vettä läpäiseviksi, joten mittausaikaa pidennettiin 10 minuuttiin ja koe toistettiin 3 kertaa. Tällä pyrittiin varmistamaan, että suotautuminen oli tasaista ja että näyte oli varmasti kyllästynyt.

5.5 Routanousu

Routanousu on maassa olevan veden jääytymisestä johtuvan tilavuuden muutoksen seurauksena tapahtuvaa maanpinnan kohoamista. Maan routimista voidaan arvioida eri ominaisuuksien kuten rakeisuuden ja kapillaarisuuden perusteella tai routanousukokeiden avulla. (Pesu 2010). Routanousukokeiden perusteella voidaan määrittää materiaalille routimiskerroin

(SP), joka kuvaa materiaalin routivuuden voimakkuutta. Routimiskerroin määritetään kaavojen 4, 5 ja 6 mukaisesti (Onninen 2001).

$$Z_j = H + h - Z_s \quad (4)$$

$$\text{grad}T = \frac{0 - T_{\text{kansi}}}{Z_j} \quad (5)$$

$$SP = \frac{\Delta h}{\Delta t \cdot \text{grad}T} \quad (6)$$

joissa

Z_j = jäätyneen näytteenosan korkeus (mm)

H = näytteen alkukorkeus (mm)

h = routanousu (mm)

Z_s = sulan näytteenosan korkeus (mm)

$\text{grad}T$ = lämpötilagradientti jäätyneessä osassa $\left(\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{mm}}\right)$

T_{kansi} = kannen lämpötila $^{\circ}\text{C}$

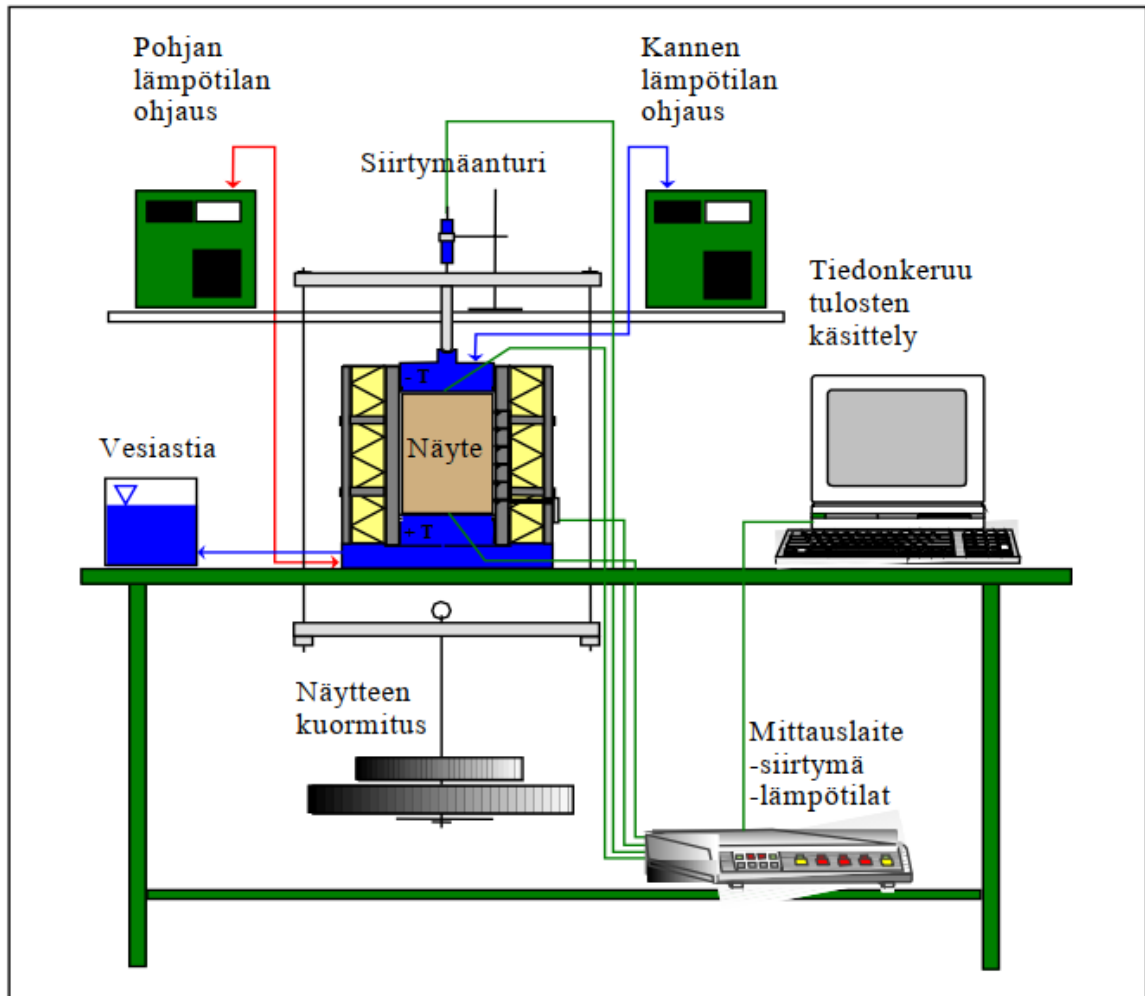
Δh = routanousun muutos mittausvälin aikana (mm)

Δt = routanousun muutosta vastaava aikaväli eli mittausväli (h)

SP = routimiskerroin $\left(\frac{\text{mm}^2}{\text{Kh}}\right)$

Routanousukoe tehtiin Tien pohja- ja päällysrakenteet tutkimusohjelman menetelmäkuvauksen TPPT 6 (Onninen 2001) mukaisella kokeella. Koejärjestelyjen periaate on esitetty kuvassa 13. Kokeessa käytettiin Aalto-yliopistossa rakennettua halkaistavaa routaselliä. Koelaitteiston yksityiskohtainen kuvaus löytyy Pesun (2010) diplomityöstä. Koetta varten valmistettiin kustakin sideaineseoksesta (CEM, KPLT ja ECO) yksi koekappale routanousukoe varten. Koekappaleet olivat halkaisijaltaan ja korkeudeltaan 100 mm kokoisia lieeriä, joiden annettiin lujittua 28 vuorokautta jälkihoitohuoneessa.

Koelaitteiden tulisi olla kokeiden aikana $+2^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa, jotta vaakasuuntainen lämpötilaero pysyy pienenä koekappaleen ja huoneilman välillä. Yliopistolla normaalisti käytettävän kylmähuoneen kylmälaitteiden rikkoutumisen vuoksi laitteet jouduttiin siirtämään maanäytteiden varastoimista varten tarkoitettuun kylmähuoneeseen. Kyseisessä huoneessa lämpötilaa ei kuitenkaan saatu riittävän tasaiseksi, joten laitteet siirrettiin takaisin alkuperäiseen kylmähuoneeseen heti, kun se oli saatu kunnostettua. Sementillä stabiloidun näytteen routanousukoe ehdittiin kuitenkin tehdä väliaikaisessa tilassa, mutta kivihiilenpolton lentotuhkalla sekä Ecolanilla stabiloidut näytteet tehtiin normaalistikin käytettävässä kylmähuoneessa.



Kuva 13. Routanousukokeen kojärjestelyt (Onninen 2001).

Kokeen suoritus eteni siten, että 28 vuorokauden ikäinen koekappale laitettiin sulana routaselliin, jonka jälkeen aloitettiin kyllästysvaihe. Kyllästysvaihe kesti noin 3 vuorokautta (viikonlopun yli). Silloin veden annettiin virrata näytteeseen ylipaineella ja kappaleeseen kohdistettiin 15,2 kPa kuormitus. Kyllästysvaiheen jälkeen aloitettiin jäädytys, jolloin veden ylipaine poistettiin ja kuormitus pienennettiin 2,4 kPa:iin. Kyllästysvaiheessa routasellin kannessa ja pohjassa kierrätettiin +2 °C lämpöistä nestettä. Jäädytysvaiheessa kannen lämpötilaksi säädettiin -3,5 °C ja pohjan lämpötilaksi +1 °C. Kokeen aikana lämpötilojen ja siirtymien kehitystä seurattiin 5 minuutin välein.

5.6 Jäädytys-sulatuskestävyys

Jäädytys-sulatuskoe suoritettiin teknisen spesifikaation CEN/TS 13286-54 (2014) mukaisesti. Koetta varten valmisteltiin 100 mm korkeita ja 100 mm halkaisijaltaan olevia lieriön muotoisia koekappaleita. Niitä valmistettiin kullakin sideaineseoksella (CEM, KPLT ja ECO) yhteensä 4 kpl, joista 2 kpl altistettiin 20 jäädytys-sulatussyklille (set A) ja 2 kpl käytettiin referenssikappaleina (set B). Teknisestä spesifikaatiosta poikettiin siten, että näytesarjassa oli vain 4 näytettä 6 sijaan ja syklien lukumäärää kasvatettiin 10:stä syklistä 20:en. Syklien määrää kasvatettiin, koska haluttiin saada paremmin selville stabiloidun kantavan

kerroksen pitkäaikaiskestävyyttä. Kantavaan kerrokseen ulottuvia syklejä on Etelä-Suomessa noin 3-5 kpl talvessa, joten 20 sykliä vastaa noin 4-6 talvea. Syklien määrä perustuu Aalto-yliopistolla olleen roudansyvyyden mittauspisteen lämpötiladataan vuosien 2013 ja 2016 väliltä. Syklien määrä riippuu paljon tarkastelusyvyvyydestä ja tässä on käytetty 21 cm syvyydeltä kerättyä dataa. Mittauspisteestä löytyy lisää tietoa Tieahon (2013) diplomityöstä. Jäädytys-sulatussyklit toteutettiin käyttämällä kuvan 14 kaappia, jonka lämpötilaa voitiin kontrolloida teknisen spesifikaation mukaisesti. Koekappaleissa toteutunutta lämpötilaa seurattiin betonikuution sisällä olevalla lämpötila-anturilla, joka on kuvan 14 oikeassa alareunassa.

Jäädytys-sulatussykleille altistetut koekappaleet käärittiin ilmatiiviisti muovikelmuun, jonka jälkeen ne aseteltiin kaappiin kuvan 14 mukaisesti siten, että kunkin koekappaleen ympärillä oli vähintään 5 cm vapaata tilaa.



Kuva 14. Koekappaleet jäädytys-sulatuskaapissa ennen kokeen aloitusta. Alahyllyllä on oikeassa reunassa betonikappale, johon on istutettu sisälle lämpötila-anturi.

Kun 20 jäädytys-sulatussykliä oli kulunut, koekappaleet otettiin pois kaapista, kelmu poistettiin ja ne palautettiin vuorokaudeksi jälkihoituhuoneeseen, jossa vertailukoekappaleet (set B) olivat olleet koko ajan.

Lopulta kaikille koekappaleille (set A ja set B) tehtiin puristuskokeet teknisen spesifikaation CEN/TS 13286-54 (2014) ja standardin SFS-EN 13286-41 (2003) mukaisesti. Puristuslujuuskokeessa esikuormituksena käytettiin 0,2 kN kuormaa, jonka saavuttamisen jälkeen koe suoritettiin puristusnopeudella 1 mm/min. Tehty puristuslujuuskoe on kuvattu tarkemmin luvussa 5.2. Puristuslujuustuloksia verrattiin kaavan 7 mukaisesti, jotta saatiin selville koekappaleiden jäädytys-sulatuskestävyys.

$$R = \frac{R_A}{R_B} \cdot 100\% \quad (7)$$

jossa

R = jäätymissulamiskestävyys (%)

R_A = jäädytys – sulatussykleille altistettujen koekappaleiden (set A) puristuslujuuksien keskiarvo (MPa)

R_B = vertailukoekappaleiden (set B) puristuslujuuksien keskiarvo (MPa)

5.7 Syklinen kolmiakselikoe

Syklinen kolmiakselikoe tehtiin standardin SFS-EN 13286-7 (2004) mukaisesti. Kokeessa tutkittiin jäännösmoduulia (resilient moduuli) standardin kohdan 7.3 mukaisella kokeella, jossa käytettiin vakiosellipainetta eli vain deviatorista jännitystä muutettiin sellipaineen ollessa vakio. Käytetyt jännitystilat olivat standardin taulukon 5 matalan jännitystilan mukaisia. Koe tehtiin käyttämällä IPC UTM-25 laitetta ja UTS-datanhallintaohjelmaa.

Koetta varten valmistettiin kustakin sideaineseoksesta (CEM, KPLT ja ECO) kolme lieriön muotoista koekappaletta, joiden halkaisija oli 100 mm ja korkeus 200 mm. Kokeet oli tarkoitus tehdä 28 vuorokauden ikäisille koekappaleille, mutta sellipainetta mittaava anturi oli rikki. Vian korjaamisen takia koekappaleet olivat 41 päivän ikäisiä testattaessa.

Standardin mukaisesti ennen kokeen aloitusta tulisi suorittaa 20 000 syklin esikuormitus, jota ei tässä tutkimuksessa kuitenkaan tehty, koska tutkittavat koekappaleet olivat sidottuja kappaleita eivätkä siten tarvinneet erillistä esikuormitusta. Standardin mukaisesti kussakin jännitystilassa tulisi tallentaa vähintään viimeisten 10 syklin (syklit 90-100) jännitys- ja muodonmuutosarvot laskentaa varten. Käytetty ohjelmisto kuitenkin tallensi vain viiden viimeisen syklin jännitys- muodonmuutosarvojen keskiarvot ja keskihajonnat. On mahdollista, että ohjelma tallensi kaikkien syklien arvot, mutta tutkimuksen aikana ei keksitty kuinka ne saataisiin uloskirjoitettua ohjelmasta. Keskiarvoista laskettiin jäännösmoduulit kaavalla 8.

$$M_r = \frac{\sigma_1^r}{\varepsilon_1^r} \quad (8)$$

jossa

M_r = jäännösmoduuli (MPa)

$\sigma_1^r = \sigma_{1max} - \sigma_{1min} =$ aksiaalinen jännityslisäys (kPa)

$\varepsilon_1^r =$ palautuva aksiaalinen muodonmuutos (10^{-3})

Kuvassa 15 on kokeessa käytetty kolmiakselisella, jossa nähdään myös ylimääräinen analoginen painemittari, jolla varmistettiin sellipaineen oikeellisuus kokeen aikana. Kuvassa 16 on koetta varten valmisteltu koekappale ennen selliin laittamista. Kuvassa näkyvät siniset putket ovat osa alipainejärjestelmää, jolla voitaisiin luoda alipaine näytteeseen, mutta ominaisuutta ei tässä työssä tarvittu. Koekappaleiden ympärille laitettiin kaksi membraania, jotta saatiin parempi varmuus ilmatiiveydestä. Kokeessa mitattiin pystysuuntaisia siirtymiä sellin ulkopuolelta kahdella siirtymäanturilla, jotka näkyvät kuvassa 15 sekä kuormituslaitteen omalla sisäisellä siirtymäanturilla.



Kuva 15. Kolmiakselisellä kokeen aikana.



Kuva 16. Koetta varten valmistettu koekappale ennen sellin sulkemista.

6 Tutkimustulokset ja tulosten tarkastelu

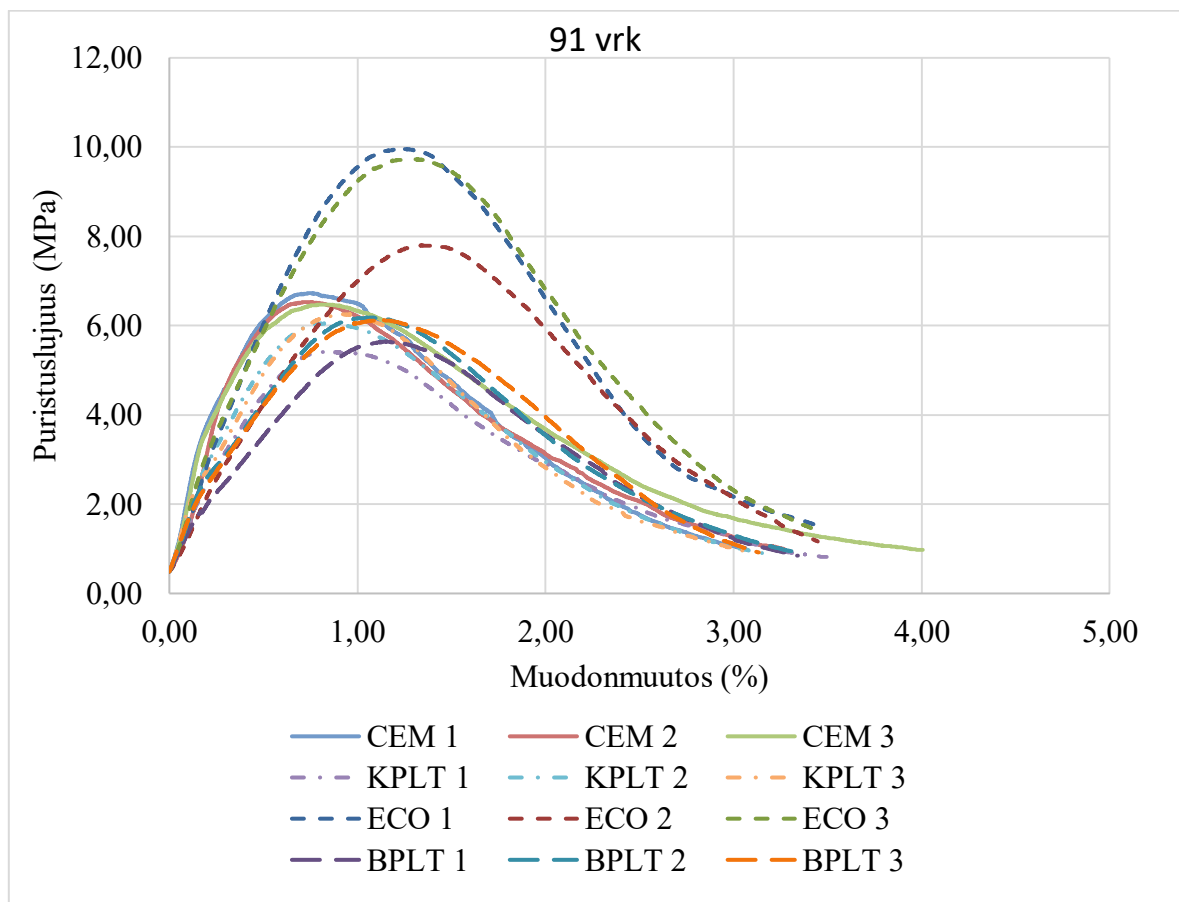
Tässä luvussa kerrotaan laboratoriotutkimusten tulokset sekä arvioidaan niiden onnistumista ja luotettavuutta. Arvioinnissa käytetään apuna vertailua aikaisemmin tehtyihin vastaaviin tutkimuksiin. Koska kyseessä on kuitenkin vähäinen tutkimusmäärä, ei tuloksiksi saatuja arvoja tule pitää absoluuttisina totuuksina vaan enemmän suuntaa-antavina.

6.1 Puristuslujuus

Tässä työssä tutkittiin eri sideaineilla sidottujen kalliomurskeen ja valimohiekan sekoituksen puristuslujuutta 91 vrk ikäisinä. Lujuuden kehitystä verrattiin 7 ja 28 vuorokauden ikäisiin näytteisiin, jotka Vilenius (2019) tutki työssään. Lisäksi tässä työssä tutkittiin betonimurskeen ja valimohiekan sekoitusten puristuslujuuksia 28 vuorokauden iässä.

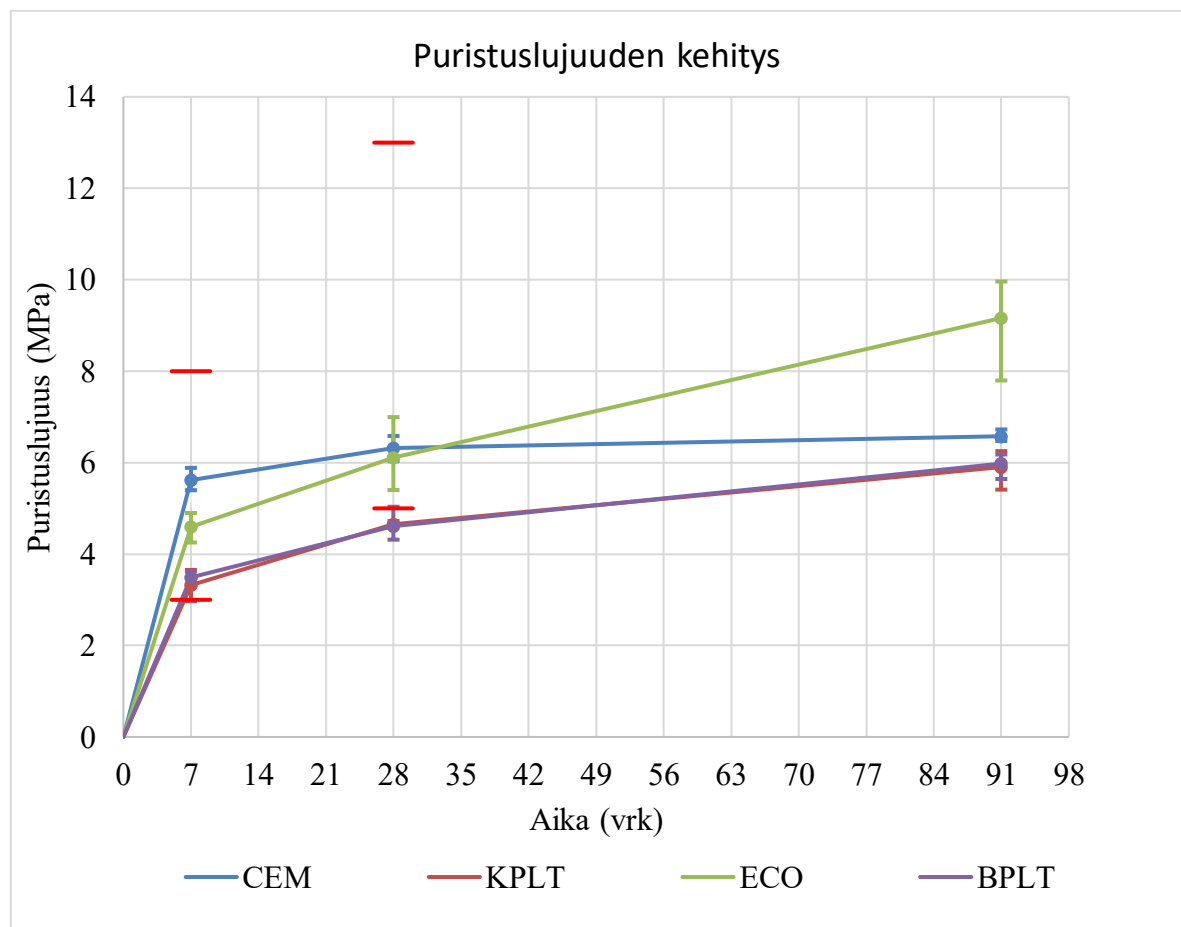
6.1.1 Stabiloidulle valimohiekan ja kalliomurskeen sekoitukselle

Koekappaleiden puristuslujuus selvitettiin standardin SFS-EN 13286-41 (2003) mukaisella kokeella. Tässä työssä tutkittiin 91 vuorokauden ikäisten kappaleiden puristuslujuutta ja lujuuden kehitystä ajan suhteen. Saadut puristuslujuudet 91 vrk ikäisille koekappaleille on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Puristuslujuudet 91 vrk ikäisillä koekappaleilla (WFS+KaM).

Kuvasta 17 huomataan puristuslujuuden olevan selvästi suurin Ecolanilla stabiloiduilla koekappaleilla ja pienin lentotuhkilla. Koekappaleiden välinen hajontakin on Ecolanilla suurinta, kun taas sementillä hajonta on varsin pieni. Kun tuloksia verrataan myös 7 ja 28 vuorokauden puristuslujuuksiin kuvassa 18, huomataan Ecolanilla stabiloitujen koekappaleiden lujuuden kehityksen olevan edelleen lähes yhtä nopeaa, kuin mitä se oli 7 ja 28 vuorokauden välillä. Myös kivihiilen- ja biopolton lentotuhkilla stabiloitujen koekappaleiden lujuuden kehitys on ollut merkittävää. Sementillä stabiloitujen koekappaleiden lujuus taas ei ole enää juurikaan kehittynyt 28 vuorokauden lujuuden jälkeen. Kuvassa 18 on myös vertailun vuoksi Päälysrakenteen stabilointiohjeen mukaiset puristuslujuusvaatimukset sementtistabiloinnille punaisella (Tiehallinto 2007). Huomataan, että ainoastaan tuhkillä stabiloidut seokset eivät täytä vaatimusta 28 vrk iässä, mutta pidempään jatkuvan sitoutumisen ansiosta 91 vrk iässä nekin ovat jo saavuttaneet vaatimuksen.

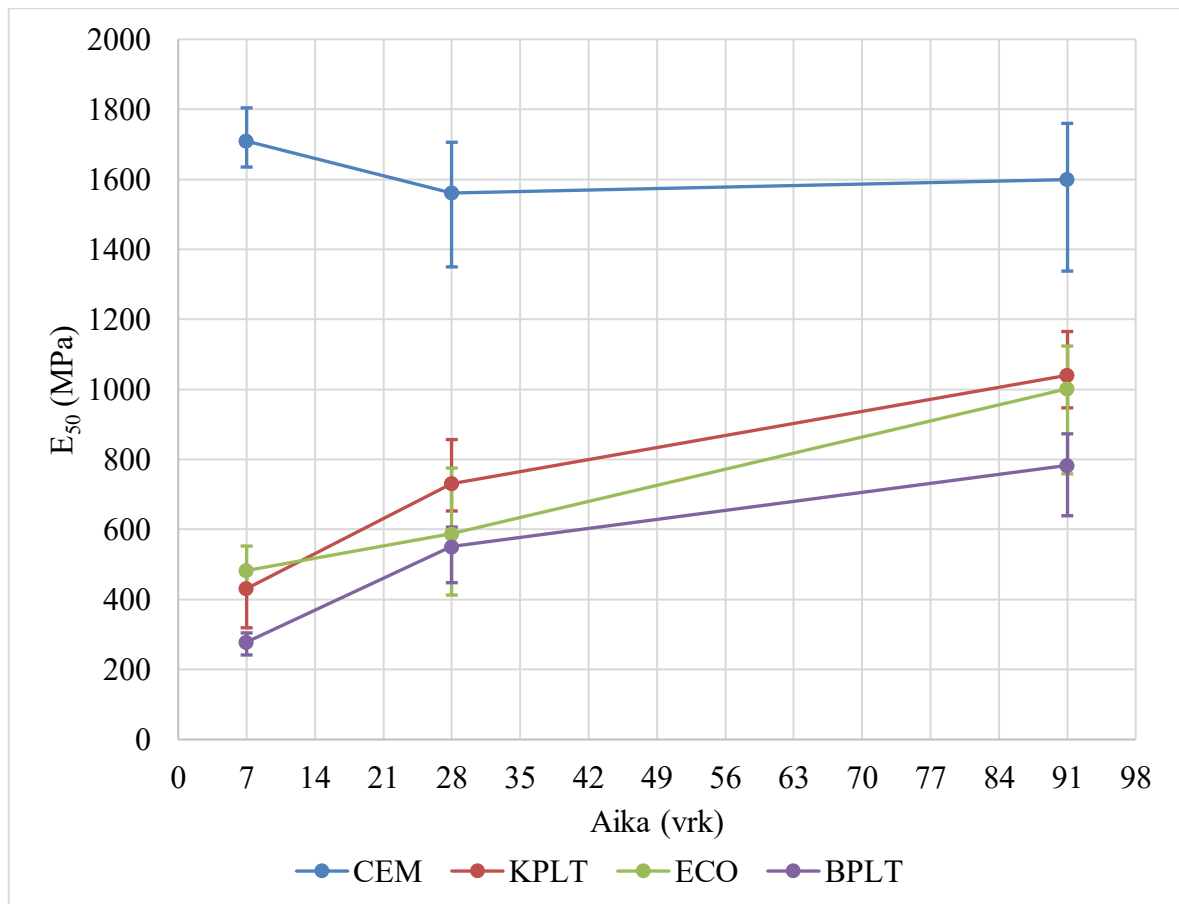


Kuva 18. Puristuslujuuden kehitys ajan suhteen. Punaisella sementtistabiloinnin puristuslujuusvaatimukset.

Kirjallisuuskatsauksen mukaan lentotuhkan on havaittu parantavan stabiloidun kerroksen lujuuden kehitystä pitkällä aikavälillä, joten nyt saadut tulokset ovat oikean suuntaisia, sillä lujuuden kehitys jatkuu jo tämänkin tutkimuksen perusteella pidempään kuin sementillä stabiloidulla. Sementin lujuuden kehityksen merkittävä hidastuminen tai pysähtyminen oli odotettavissa, koska sideaineena oleva pikasementti (CEM I, 52,5 R) saavuttaa suurimman osan lujuudestaan jo ensimmäisten päivien aikana (katso luku 4.4).

Zhang et al. (2019) vertasi 7 ja 28 vuorokauden ikäisten koekappaleiden lujuuksien kehitystä samoilla sideaineilla, kuin tässä tutkimuksessa. Tuloksista on huomattavissa pikasementillä samanlainen lujuudenkehityksen pysähtyminen, kun taas kivihiilenpolton lentotuhkalla ja Ecolanilla stabiloitujen seosten lujuudet selvästi vielä kehittyvät 7 ja 28 vuorokauden välillä.

Lujuuden kehitys havaitaan myös muodonmuutosmoduulia E_{50} tarkastelemalla, jolloin huomataan moduulin kasvavan lujuuden kehittyessä. Pitkän ajan kuluessa kehitys hidastuu ja lopulta pysähtyy, kuten sementin tapauksessa jo on huomattavissa. Muodonmuutosmoduulin E_{50} kehitys on esitetty kuvassa 19.



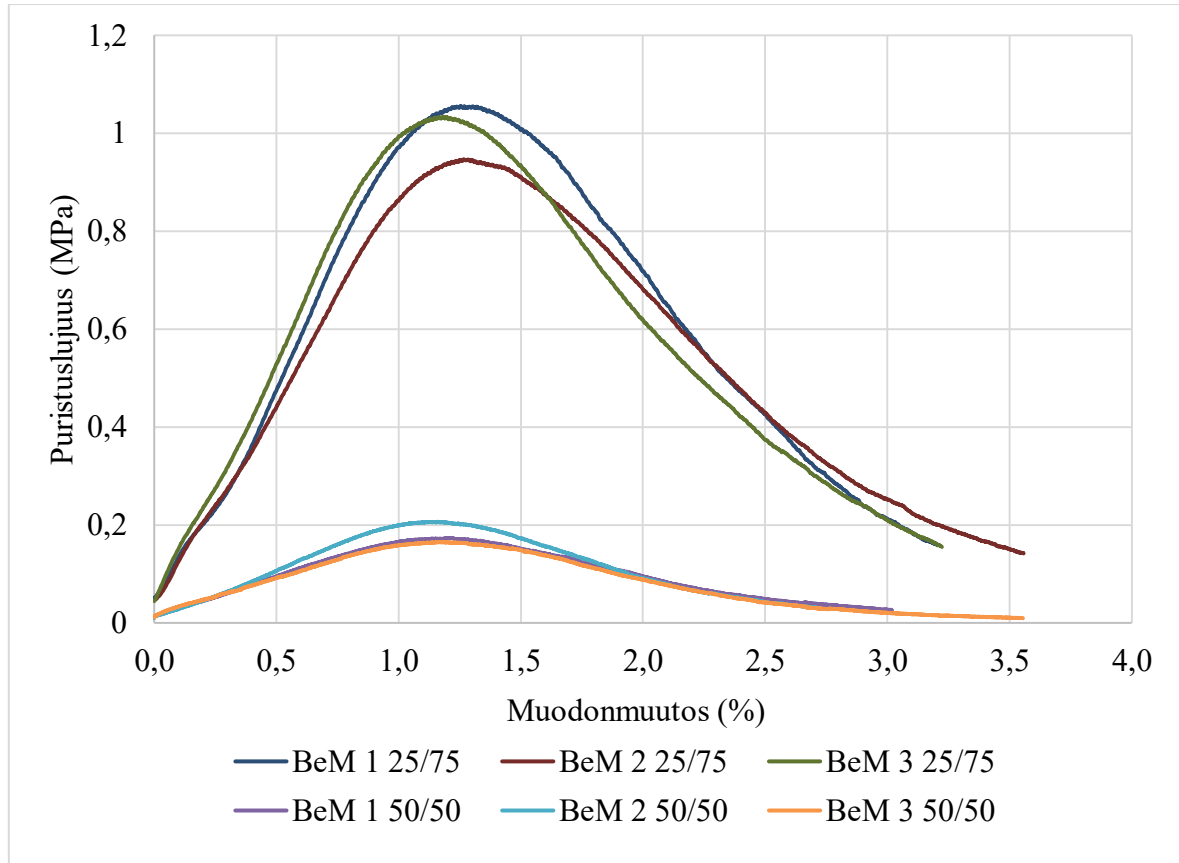
Kuva 19. Muodonmuutosmoduulin E_{50} kehitys ajan suhteen.

Puristuslujuuskoetuloksista huomataan, että Ecolanilla stabiloidulla seoksella saavutetaan suurin puristuslujuus 91 vuorokauden iässä ja samalla sen E_{50} on yhdessä tuhkilla stabiloitujen seosten kanssa selvästi sementtistabilointia alhaisempi. Tämä tarkoittaa sitä, että Ecolanilla stabiloitu seos kestää enemmän kuormitusta ja sietää suuremman muodonmuutoksen ennen murtumista. Eli teoriassa seos ei ole yhtä vaurioherkkä kuin sementtistabiloitu seos.

Kokeet onnistuivat hyvin, eikä kokeiden suorittamisen aikana havaittu tulosten luotettavuutta merkittävästi heikentäviä seikkoja. Vielä tarkempaan tulokseen olisi ehkä päästy, jos koekappaleiden päät olisi tasattu esimerkiksi kipsaamalla ennen puristuslujuuskoetta. Tällöin kokeen alussa ilmenneitä pieniä muodonmuutoksessa tapahtuneita nykäyksiä ei ehkä olisi tapahtunut. Pienestä epätasaisuudesta johtuneet erot jäivät kuitenkin varsin pieniksi eivätkä vaikuttaneet tulosten luotettavuuteen merkittävästi. Kokeessa käytetyn puristuslaitteen voima-anturin tarkkuus oli $\pm 0,1$ kN.

6.1.2 Betonimurskeen ja valimohiekan sekoitus

Valimohiekan ja betonimurskeen sekoitusten puristuslujuudet tutkittiin kahdesta eri sekoituksesta. Toisessa oli 25 % valimohiekkää ja toisessa 50 %. Molempien seosten puristuslujuudet on esitetty kuvassa 20.



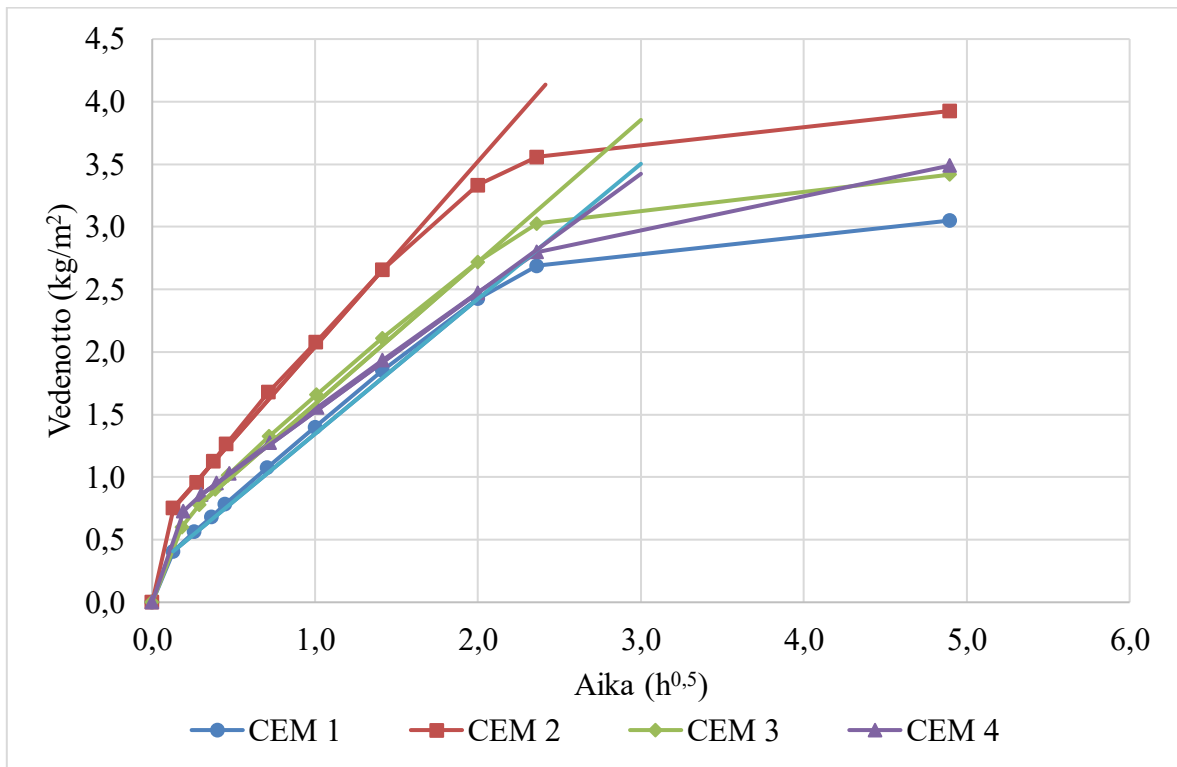
Kuva 20. Valimohiekan ja betonimurskeen sekoitusten puristuslujuudet.

Kuvasta huomataan lujuuksien jäävän molemmilla sekoituksilla varsin alhaisiksi. Jos lujuuksia verrataan betonimurskeelle annettaviin kantavan kerroksen lujuusvaatimukseen, huomataan 25/75 sekoituksen vastaavan BeM II luokan betonimursketta yli 0,8 MPa puristuslujuudellaan. Sekoituksella 50/50 taas lujuuden kehitys jää todella heikoksi eikä siis täytä mitään puristuslujuudelle esitettyjä vaatimuksia ja on siis verrattavissa sitomattomaan kiivaimeeseen.

Kokeet onnistuivat hyvin ja koekappaleet kestivät testaukseen saakka vaikka 50/50 sekoituksesta oli jo ennen kokeen aloitusta huomattavissa sen heikkous, sillä koekappaleiden reunoista irtosi pieniä rakeita. Aikaisemmin kuvattu koekappaleiden päihin tehtävä kipsaus liittäisi kokeen alun tarkkuutta myös tällä seoksella. Kokeessa käytetyn puristuslaitteen voimanturin tarkkuus oli $\pm 0,1$ kN.

6.2 Kapillaarisuus

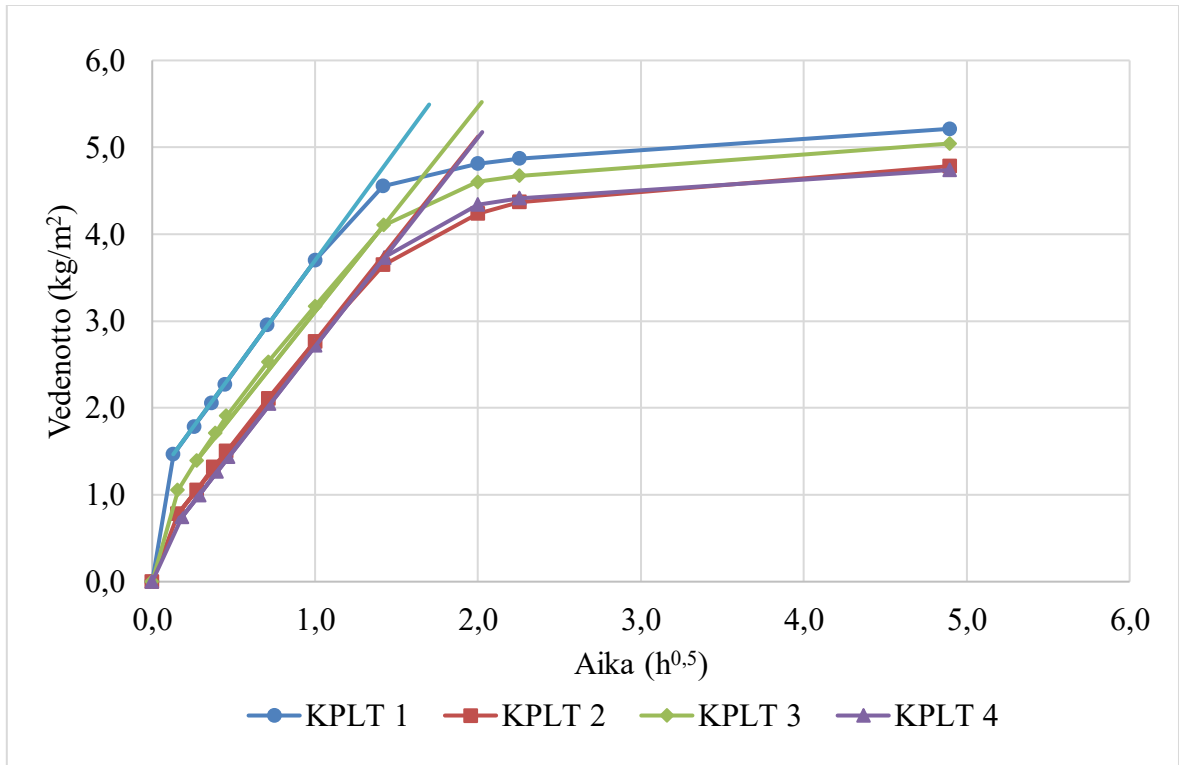
Kapillaarisuutta tutkittiin tarkastelemalla koekappaleiden absorptiokertoimia, jotka kuvaavat nopeutta, jolla koekappale imee itseensä vettä kapillaarisesti. Absorptio- eli kulmakeroin määritettiin standardin SFS-EN 13057 (2002) mukaisesti kuvaajien alussa olevan lineaarisen osan perusteella. Kuvaajien loppuissa käyrät tasaantuivat, kun koekappaleet lähestyivät kyllästymistä. Kuvissa 21, 22 ja 23 on esitetty kunkin tutkittavan sideaineseoksen mitaustulokset ja absorptiokertoimien määrittäminen.



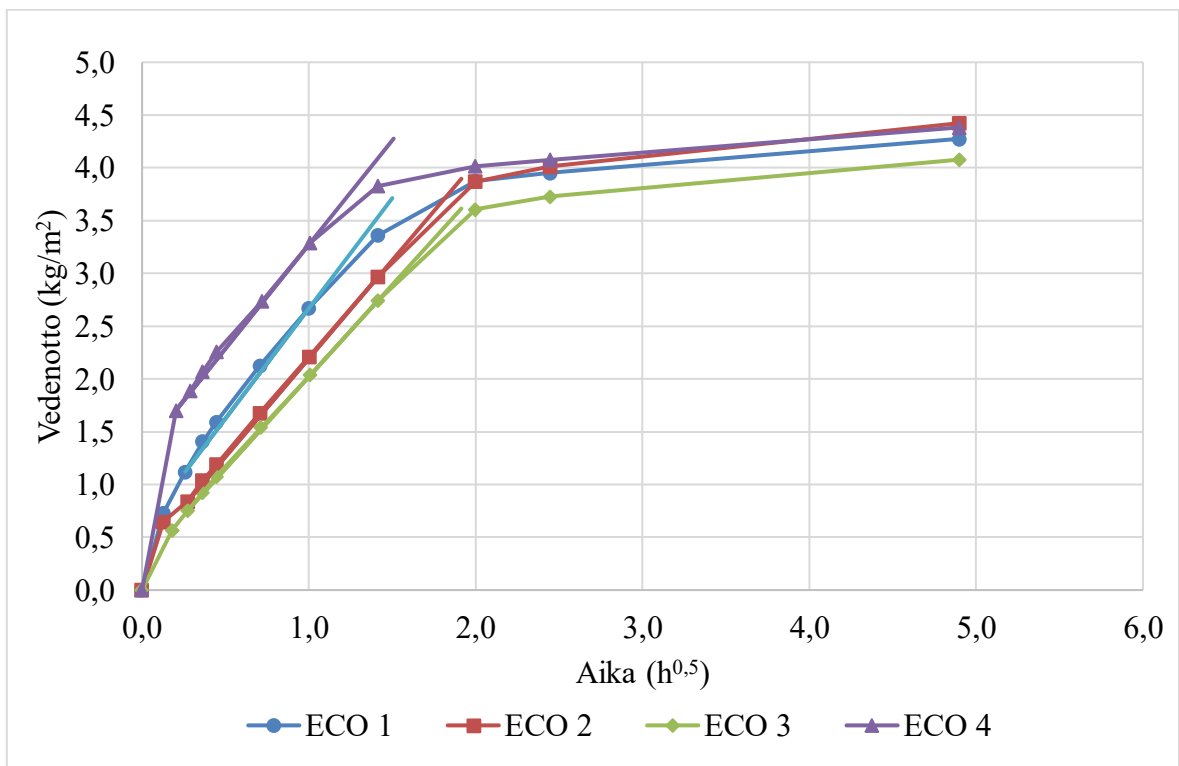
Kuva 21. Absorptiokertoimen määrittäminen sementillä stabiloiduille koekappaleille.

Kuvasta 21 nähdään, että koekappale CEM 2 absorboi nopeammin vettä muiden koekappaleiden edessä kutakuinkin samaan tahtiin. Selkeää syytä CEM 2 koekappaleen erilaiseen käyttökseen ei koekappaleesta visuaalisen tarkastelun perusteella löytynyt. Syy voi olla yksittäisen koekappaleen raakoostumuksessa tai tiiveystilassa.

Kuvan 22 kuvaajista nähdään, että lentotuhkalla stabiloidut koekappaleet absorboivat vettä hyvin samalla nopeudella. Tämä huomattiin myös kokeen aikana visuaalisella tarkastelulla.

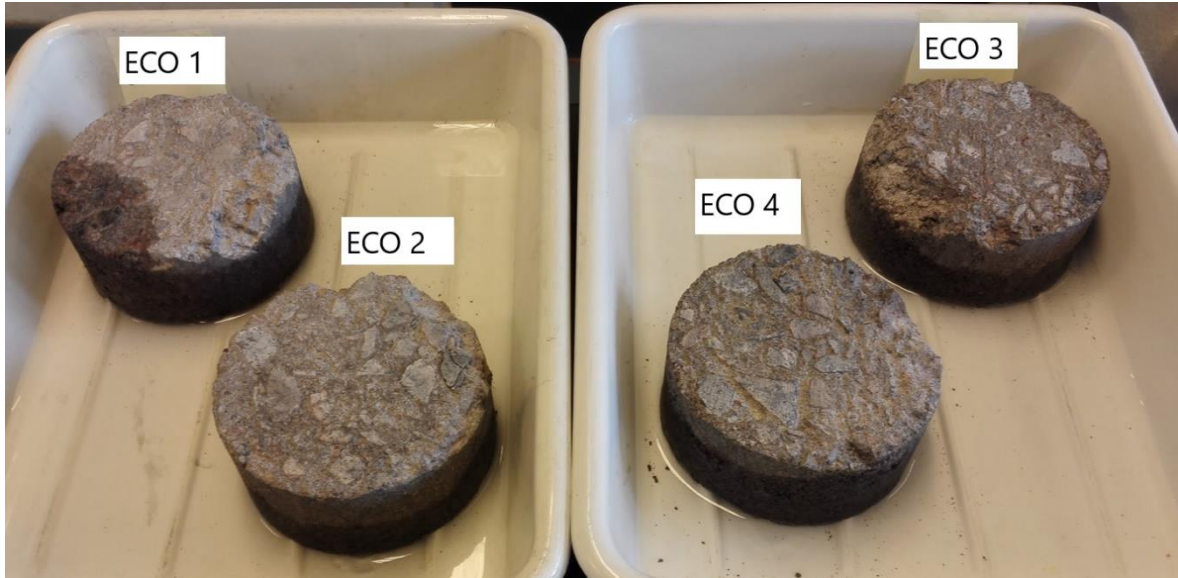


Kuva 22. Absorptiokertoimen määrittäminen kivihiilenpolton lentotuhkalla stabiloiduille koekappaleille.



Kuva 23. Absorptiokertoimen määrittäminen Ecolanilla stabiloiduille koekappaleille.

Kuvasta 23 nähdään, että kaikilla Ecolanilla stabiloiduilla koekappaleilla absorptiokerroin on samaa suuruusluokkaa, vaikka ECO 4 onkin absorboinut vettä selvästi eniten ennen ensimmäisen mittauksen tekoa. Kokeen aikana oli selvästi nähtävissä, että ECO 1 ja 4 etenivät selvästi nopeammin kuin 2 ja 3. Tämä on nähtävissä kuvassa 24. Selkeää syytä epätasaiseen etenemiseen ei koekappaleiden visuaalisessa tarkastelussa ollut nähtävissä.



Kuva 24. Ecolan sideaineseoksen koekappaleet kokeen aikana. Silmämääräisesti ECO 1 ja ECO 4 etenivät muita nopeammin.

Testattavia koekappaleita oli neljä kullakin sideaineseoksella ja niiden absorptiokertoimien vaihteluvälit ja keskiarvot sekä veden imeytyminen suhteessa alkuperäiseen painoon sideaineseoksittain on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Absorbtiokertoimet ja imeytynyt vesimäärä suhteessa alkuperäiseen painoon.

Seos		CEM n=4	KPLT n=4	ECO n=4
Absorbtiokerroin (kg/(m ² ·h ^{0,5}))	min	0,95	2,36	1,74
	max	1,48	2,56	2,09
	KA	1,16	2,42	1,92
Imeytynyt vesimäärä al- kuperäiseen painoon verrattuna (%)	min	3,16	4,75	3,99
	max	4,01	5,10	4,31
	KA	3,47	4,93	4,17

Tuloksista voidaan tarkastella kapillaarisen vedenimeytymisen nopeutta ja imeytyneen veden määrää koekappaleiden alkuperäiseen painoon verrattuna. Taulukosta 3 huomataan, että veden kapillaarinen nousu on nopeinta kivihienpolton lentotuhkalla ja toiseksi nopeinta Ecolanilla stabiloidulla seoksella. Sementillä stabiloidussa seoksessa kapillaarinen nousu on hitainta ja myös imeytynyt vesimäärä jäi pienimmäksi. Suurin imeytynyt vesimäärä on lentotuhkalla stabiloidussa seoksessa.

Saman suuntaisia tuloksia on saatu myös aikaisemmin tehdyissä tutkimuksissa. Zhang et al. (2019) havaitsi tutkimuksessaan kivituhkan mahdollisista sovelluksista maarakentamisessa

vastaavanlaista käyttäytymistä. Tutkimuksessa käytettiin samoja sideaineita kuin tässä tutkimuksessa, joskin sideaineiden määrät olivat erilaiset, mikä osaltaan selittää eroa suuruusluokissa tutkimusten välillä. Stabiloitujen kivituhkakoekappaleiden absorptiokertoimet olivat sementillä 0,74 ja 2,14 välillä, lentotuhkalla 5,56 ja 8,65 välillä sekä Ecolanilla 3,51 ja 6,82 välillä. (Zhang et al. 2019).

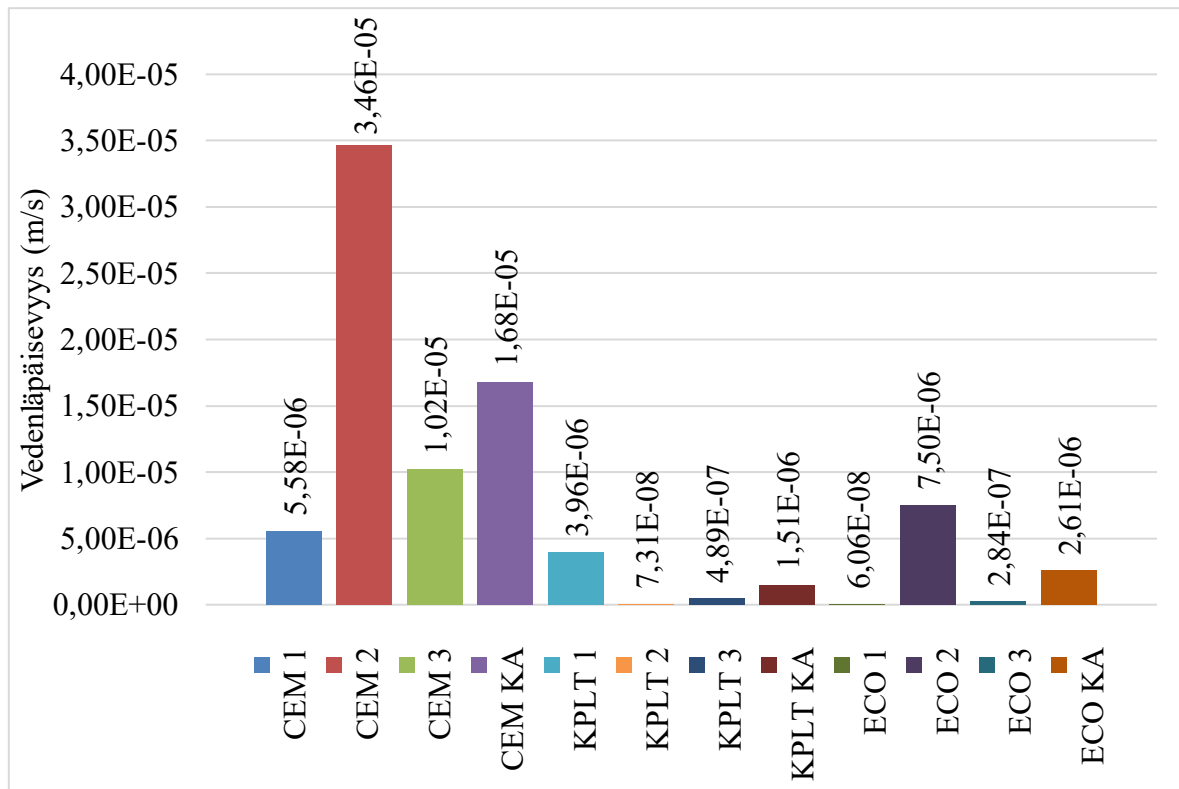
Kapillaarisuus riippuu maassa olevien huokoskäytävien halkaisijasta. Kapillaarisuus on kääntäen verrannollinen huokoskäytävien halkaisijaan, eli mitä pienemmät huokoskäytävät, sitä suurempi kapillaarinen nousu on. Huokoskäytävien halkaisijaan maassa vaikuttaa rakeisuus ja tiiviys. (Jääskeläinen 2011). Hienoaines täyttää isompien partikkeleiden välisiä aukkoja, jolloin huokoskäytävät pienenevät mahdollistaen suuremman kapillaarisen nousun (Lee et al. 2004). Kivihiilenpolton lentotuhkalla stabiloiduissa koekappaleissa oli eniten sideainetta, joka pienentää huokoskäytäviä, kun taas sementillä stabiloiduissa koekappaleissa sideainepitoisuus oli pienin. Zhang et al. in (2019) tutkimuksen absorptiokertoimet olivat tämän tutkimuksen kertoimia suuremmat, koska heidän tutkimuksessaan runkoaines oli pelkästään kivituhkaa, jolloin huokoskäytävät olivat jo lähtökohtaisestikin pienemmät tähän tutkimukseen verrattuna.

Tuloksista huomataan, että stabiloituidut materiaalit imevät vettä kapillaarisesti ja siitä saattaa seurata ongelmia pakkas- ja kuormituskestävyyden kanssa. Ongelmilta voidaan kuitenkin välttyä hyvällä tierakenteen suunnittelulla, jolloin kantavan kerroksen alla on pienen kapillaarisen nousukorkeuden omaavaa materiaalia, joka ei johda vettä kantavan kerroksen alapintaan.

Tuloksiin saattoi hieman vaikuttaa se, että koekappaleet sahattiin isommista näytteistä ja sahauksen aikana koekappaleiden päistä lohkesi joitain palasia ja toisiin jäi kielekkeitä. Nämä johtivat siihen, että koekappaleiden massat olivat hieman erilaisia keskenään ja vedessä oleva pinta-alassa ja pinnan tasaisuudessa oli eroja, jotka saattoivat vaikuttaa hieman vedenimeytymisnopeuteen.

6.3 Vedenläpäisevyys

Vedenläpäisevyys selvitettiin tarkastelemalla koekappaleen läpi suotautunutta vesimäärää tietyin aikaväleihin. Koe tehtiin kolmelle koekappaleelle kullakin sideaineseoksella ja kullakin koekappaleella koe toistettiin useamman kerran. Kokeen tulokset on esitetty kuvassa 25, missä tulokset ovat keskiarvoja kaikki toistot huomioiden.



Kuva 25. Vedenläpäisevyyden arvot kullakin sideaineseoksella.

Tuloksista nähdään, että vedenläpäisevyys oli suurinta sementillä stabiloiduissa koekappaleissa ja pienintä kivihiilenpolton lentotuhkalla stabiloiduissa koekappaleissa. Ecolanilla ja lentotuhkalla stabiloitujen koekappaleiden vedenläpäisevyyksien keskiarvot olivat hyvin lähellä toisiaan. Toisaalta tuloksista on nähtävissä merkittävää vaihtelua pienimmän ja suurimman arvon välillä. Tämä saattaa johtua koekappaleiden välisistä eroista, sillä vaikka koekappaleet oli tehty samasta massasta samalla menetelmällä, saattaa koekappaleiden välillä silti olla eroavaisuuksia rakeisuudessa ja tiiveydessä. Toisaalta koekappaleiden reunoja oli vaikea saada täysin tiiviiksi, joten vesi saattoi virrata myös näytteen reunaa pitkin vääristäen tuloksia.

Lee et al. tutki myös vedenläpäisevyyttä kapillaarisuutta koskevassa tutkimuksessa. Sementillä stabiloitujen 28 vuorokauden ikäisten koekappaleiden vedenläpäisevyyden arvot olivat $2 \cdot 10^{-8}$ ja $8 \cdot 10^{-9}$ m/s. Tutkimuksessa käytettiin pumppua ja virtausmittareita koekappaleeseen menevälle ja koekappaleesta tulevalle vedelle, jotta voitiin varmistua näytteen olevan kokonaan kyllästynyt. Tutkimuksessa huomattiin myös, että vedenläpäisevyyteen vaikuttivat mahdollisesti koekappaleeseen syntyneet tukokset, jotka kuitenkin poistuivat koetta jatkettaessa. (Lee et al. 2004).

Tässä työssä saadut vedenläpäisevyydet sementille ovat selvästi suurempia kuin Lee et al.in tutkimuksessa. Edelliseen kappaleeseen viitaten herää kuitenkin epäily, että oliko tässä työssä tehty koe liian lyhyt ja ehtivätkö kaikki näytteet varmasti kyllästyä vedellä kunnolla. Tässä työssä koekappaleet olivat upotettuna veteen pääsääntöisesti alle 40 minuuttia, kun taas Lee et al.in kokeet kestivät useita päiviä ennen kuin vedenläpäisevyyden arvojen katsottiin olevan tasaantuneet. (Lee et al. 2004).

Vedenläpäisevyys on kapillaarisuuden tavoin riippuvainen maan rakeisuudesta ja tiiviystä. Mitä pienempiä ovat maan rakeiden väliset käytävät, joissa vesi pääsee liikkumaan, sitä huonompi vedenläpäisevyys on. (Jääskeläinen 2011). Tämän työn tutkimustulokset ovat linjassa teorian kanssa, sillä lentotuhkalla stabiloitujen koekappaleiden vedenläpäisevyys osoittautui pienimmäksi ja sementillä suurimmaksi. Sidotulla materiaaleilla esiintyy myös tilanteita, joissa huokokset eivät ole yhteydessä toisiinsa lainkaan, jolloin vesi ei pääse liikkumaan huokosesta toiseen.

Tierakenteen toimivuuden kannalta kaikki tutkitut stabilointiseokset muodostavat rakenteeseen vettä läpäisemättömän kerroksen, joka tulee huomioida rakennetta suunniteltaessa. Ongelmilta voidaan välttyä rakentamalla stabiloidun kantavan kerroksen päälle vesitiivis päällyste, jolloin vesi ei pääse päällysteen ja kantavan kerroksen väliin, missä se voisi rikkoa rakennetta syklisen kuormituksen tai jäätyksen seurauksena. Kunnossapidolta vaaditaan nopeaa reagointia, jotta vesitiiviiseen päällysteeseen tulevat reiät ja halkeamat paikataan nopeasti ja laadukkaasti.

Kokeet saatiin alun vaikeuksien jälkeen tehtyä hyvin. Merkittävin koetulosten luotettavuuteen vaikuttava seikka on veden mahdollinen virtaaminen koekappaleen reunoja pitkin, mitä ei pystytty täysin estämään.

6.4 Routanousu

Routanousukokeet tehtiin TPPT 6 menetelmäohjeen mukaan. Segregaatiopotentiaaliteorian mukaiset routivuusluokat on esitetty taulukossa 4 ja tehtyjen routanousukokeiden tulokset taulukossa 5. Taulukoista huomataan, että millään testatuista seoksista ei tapahtunut merkittävää routanousua ja segregaatiopotentiaali oli kaikilla selvästi alle $0,5 \text{ mm}^2/\text{Kh}$ eli seokset olivat routimattomia. Kaikkien kokeiden graafiset tulokset on esitetty liitteessä 4.

Taulukko 4. Routivuusluokat segregaatiopotentiaaliteorian mukaan (Rathmayer 1989).

Routivuusluokka	Segregaatiopotentiaali (mm^2/Kh)
Routimaton	< 0,5
Lievästi routiva	0,5 - 1,5
Routiva	1,5 - 3,0
Voimakkaasti routiva	> 3,0

Taulukko 5. Routanousukokeiden tulokset.

Koekappale	Routaturpoama (mm)	Vesipitoisuus ennen koetta (%)	Vesipitoisuus kokeen jälkeen (%)	Routan syvyys laskettu* (mm)	Segregaatiopotentiaali (mm^2/Kh)
CEM	0,0	6,1	7,0	76,0	0,04
KPLT	0,1	7,0	8,0	70,0	0,01
ECO	0,9	6,8	7,3	62,0	0,1

* Laskettu 10 viimeisen havainnon keskiarvona.

Sementillä sidotussa kappaleessa ei routanousua tapahtunut lainkaan, vaikka jäädytys jatkui yhteensä 6 vuorokautta. Tuossa ajassa roudan syvyys koekappaleessa vaihteli 50 ja 80 mm välillä. Kokeen aikana routarajan ei tulisi muuttua lainkaan, mutta koska koe tehtiin väistötilassa, jossa huoneen lämpötila ei pysynyt vakiona, myös roudan syvyys vaihteli.

Kivihiihenpolton lentotuhkalla sidotussakaan koekappaleessa routanousua ei tapahtunut käytännössä lainkaan. Roudan syvyys oli vakiintuneessa tilanteessa 70 mm eikä siinä tapahtunut merkittävää vaihtelua. Ecolanilla sidotussa koekappaleessa routanousua tapahtui noin 0,9 mm eli eniten tässä työssä tutkituista näytteistä. Roudan syvyys oli noin 60 mm eikä siinä tapahtunut merkittävää vaihtelua.

Tulokset ovat odotetun kaltaisia, koska sidotut kappaleet kestävät vetoa ja siten jäätyvän veden laajeneminen ei pääse rikkomaan rakeiden välisiä sidoksia. Thom (2008) esittää, että routimista ei pääse tapahtumaan stabiloidussa materiaalissa, mikäli sen puristuslujuus on vähintään 5 MPa, jolloin stabiloidun materiaalin vetolujuus on myös riittävää. Tällöin stabiloidun materiaalin sidokset kestävät veden jäätymisestä aiheutuvasta laajentumisesta aiheutuvan paineen. Tässä työssä tutkittu kivihiihenpolton lentotuhkalla sidottu seos jäin alle 5 MPa puristuslujuuteen 28 vrk iässä, mutta siitä huolimatta routanousua ei tapahtunut.

Toisaalta taas vesipitoisuus kokeen jälkeen on melko pieni, kun huomioidaan, että koekappaleita kyllästettiin vedellä viikonlopun yli ennen jäädytyksen aloitusta. Tätä selittää osaltaan stabiloitujen materiaalien huono vedenläpäisevyys, joka havaittiin luvussa 6.3. Jos koekappaleet olisivat imeneet enemmän vettä itseensä olisi veden jäätyminen ja turpoaminen voinut olla suurempi ongelma, koska silloin huokosissa olisi ollut vähemmän ilmaa vaimentamassa turpoamista. Silloinkin huono vedenläpäisevyys saattaisi estää jäälinssin muodostumiseen tarvittavan lisäveden virtaamisen jäätymisrintamaan ja siten estää sidotun materiaalin routimisen.

Pääsääntöisesti kokeet onnistuivat hyvin ja tuloksia voidaan pitää luotettavina. Kuten aikaisemmin jo kuvattiin, niin sementillä sidottu koekappale koestettiin väistötiloissa, jossa lämpötilaa ei pystytty pitämään vakiona. Koska seos osoittautui routimattomaksi, ei siitä kuitenkaan ollut haittaa. Koesellin seinissä ja pohjassa olevien lämpötila-antureiden kalibroinnissa havaittiin kokeiden aikana pieniä heittoja, joten todellinen roudan syvyys (taulukko 5) saattoi hieman erota antureista havaitusta syvyydestä. Sellin kannessa oleva lämpötila-anturi oli rikki, joten lämpötilagradientin laskemiseen käytettiin kannessa kierrätettävän kylmäaineen lämpötilaa, joka saattoi lämmitä joitain asteen kymmenyksiä matkalla kylmälaitteesta sellin kanteen. Lämpenemistä ei kuitenkaan pystytty todentamaan tarkasti. Lämpötila-antureiden tarkkuus oli $\pm 0,15$ °C ja siirtymäanturin tarkkuus $\pm 0,5$ %.

6.5 Jäädytys-sulatuskestävyys

Koekappaleiden jäätymis-sulamiskestävyys selvitettiin altistamalla puolet koekappaleista 20 jäädytys-sulatussyklille ja vertaamalla sen jälkeen puristuslujuuksia saman ikäisten koekappaleiden kanssa. Kokeessa noudatettiin teknistä spesifikaatiota (jäädytys-sulatuskoe) CEN/TS 13286-54 (2014) ja standardia (puristuslujuus) SFS-EN 13286-41 (2003). Kokeessa toteutunut lämpötiladata on esitetty liitteessä 5.

Eri sideaineseoksien puristuslujuudet ja keskiarvot on lueteltu taulukossa 6. Set A koekappaleet altistuiivat jäätymsulatussykleille ja Set B koekappaleet olivat koko ajan jälkihoitohuoneessa eli kaikki koekappaleet olivat saman ikäisiä puristuslujuuskokeita tehtäessä. Tuloksista huomataan, että sementillä sidottujen koekappaleiden lujuudet laskivat hieman pakkasrasituksen seurauksena, kun taas lentotuhkalla sidotut kappaleet menettivät selvästi enemmän lujuuttaan. Ecolanilla sidottujen koekappaleiden lujuuksiin pakkasrasitus ei vaikuttanut mitenkään. Taulukon 6 mukaista lujuuden kasvua Ecolanilla stabiloiduilla koekappaleilla tuskin tapahtui, vaan kyse on ennemmin koekappaleiden välisistä eroista.

Taulukko 6. Puristuslujuudet ja lujuuksien keskiarvojen suhde. Set A oli altistunut jäädytys-sulatussykleille ja Set B oli koko ajan jälkihoitohuoneessa.

Koekappale		Puristuslujuus (MPa)	Lujuuksien keskimääräinen suhde R_A/R_B (%)
Set A	CEM 1	6,72	94
	CEM 2	6,69	
	KA	6,71	
Set B	CEM 3	7,47	
	CEM 4	6,73	
	KA	7,10	

Set A	KPLT 1	6,23	76
	KPLT 2	5,21	
	KA	5,72	
Set B	KPLT 3	7,26	
	KPLT 4	7,76	
	KA	7,51	

Set A	ECO 1	8,31	101
	ECO 2	7,69	
	KA	8,00	
Set B	ECO 3	7,53	
	ECO 4	8,28	
	KA	7,91	

Päällysrakenteen stabilointi (2007) ohjeen mukaan sementtistabiloidun materiaalin lujuuden tulee olla vähintään 67 % ilman pakkasrasitusta saatavasta lujuudesta, joten kaikki testatut seokset täyttävät vaatimuksen. Ohjeen vaatimus perustuu Päällystealan Neuvottelukunnan menetelmän PANK-4305 (2008) mukaisesti tehtävälle kokeelle. Siinä sulatusjakson aikana koekappaleet tulisi upottaa veteen ja vuorokaudessa tulisi olla kaksi jäädytys-sulatussykliä (yhteensä 20 sykliä 10 vuorokaudessa). Kun taas nyt tehty koe oli teknisen spesifikaation CEN/TS 13286-54 (2014) mukainen, eikä koekappaleita poistettu jäädytys-sulatuskaapista lainkaan ja jäädytys-sulatussyklejä tuli yksi vuorokaudessa.

Tulos sementillä stabiloiduille koekappaleille on hyvin linjassa aikaisempien tutkimusten kanssa. Melander (2018) käytti omassa diplomityössään sementillä stabiloitua murskettua referenssimateriaalina ja sai lujuudeksi 97 % alkuperäisestä (10 jäädytys-sulatussykliä). Hän

testasi myös sementillä stabiloitua kivituhkaa, jolle sai 91 % alkuperäisestä lujuudesta. Zhang et al. (2019) testasi sementillä stabiloitua kivituhkaa saaden 10 syklin jälkeen 95 % alkuperäisestä lujuudesta. Myös Kortelaisen (2019) diplomityössä sementillä stabiloitu murske säilytti hyvin lujuutensa 12 jäädytys-sulatussyklin jälkeen ollen 93-95 % alkuperäisestä lujuudesta.

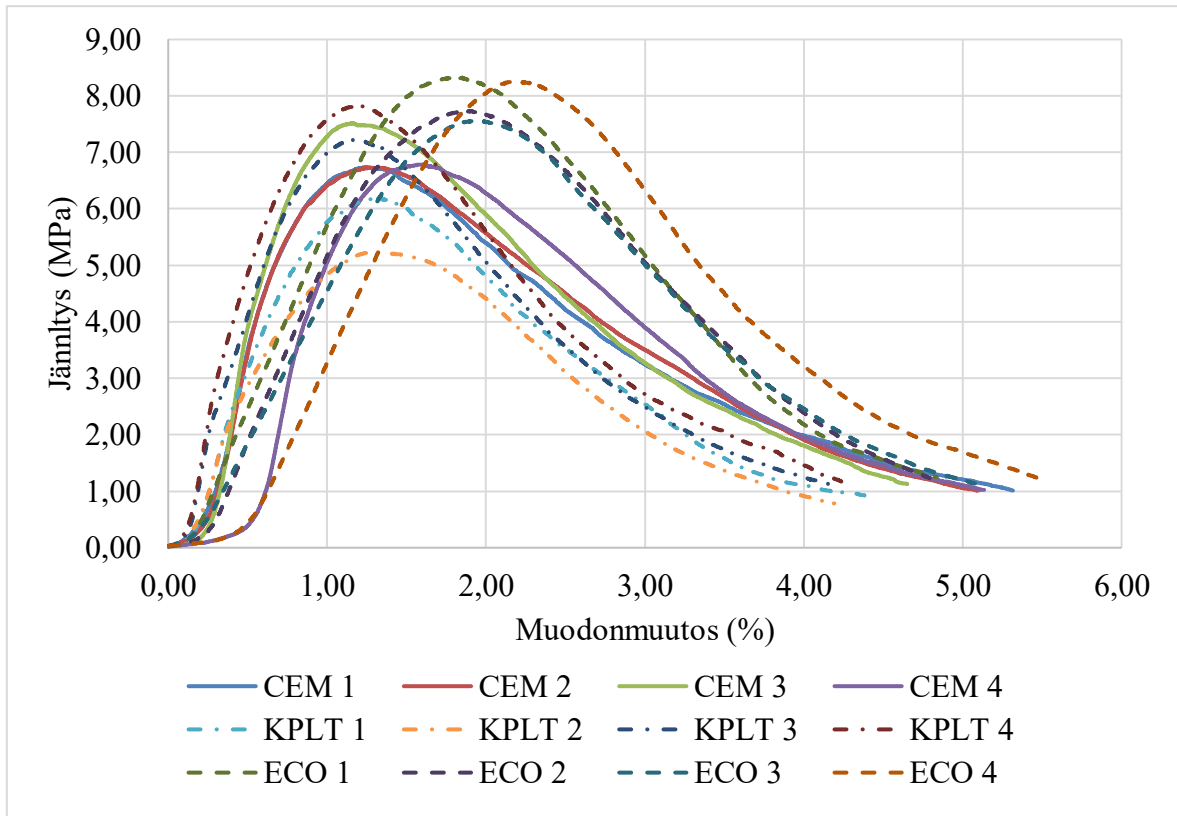
Kivituhka stabiloituna lentotuhkalla menetti myös Zhang et al.:in (2019) tutkimuksessa eniten lujuuttaan ollen 10 syklin jälkeen 66 % alkuperäisestä. Mahdollisena syynä tätä tutkimusta suurempaan lujuuden menetykseen voidaan pitää erilaista runkoainetta ja sideainemäärää.

Kivihiilenpolton lentotuhkan heikompi jäädytys-sulatuskestävyys saattaa liittyä sen hitaampaan puristuslujuuden kehitykseen (kuva 18). Jäädytys-sulatussykleille altistettujen koekappaleiden lujuuden kehitys häiriintyy pahasti, ellei jopa pysähdy kokeen aikana, kun taas vertailukappaleiden lujuus kehittyy jälkihoituhuoneessa tasaisesti. Hitaammasta sitoutumisesta johtuen tuhkien jäädytys-sulatuskestävyys voisi olla parempi tutkia 91 vuorokauden ikäisillä koekappaleilla tai sitten kun lujuudenkehityksen on havaittu pysähtyneen.

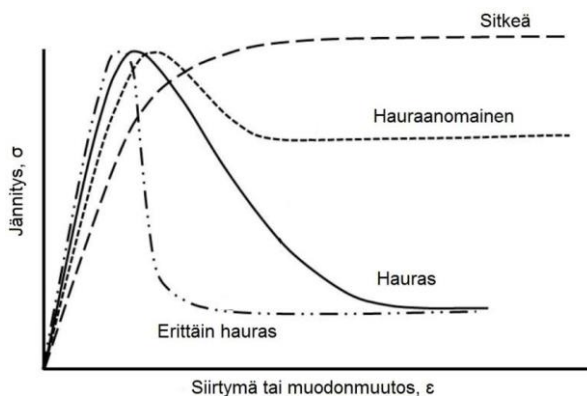
Ecolanin lujuuden säilyminen pakkasrasituksesta huolimatta on linjassa Melanderin (2018) tutkimuksen kanssa, jossa Ecolanilla stabiloitu kivituhka säilytti 98 % lujuudestaan. Toisaalta taas Zhang et al.:in (2019) tutkimuksessa vain 81 % lujuudesta säilyi. Eroa saattaa selittää eri Ecolan erä, mutta varmuutta siitä ei ole.

Kaikki koekappaleet murtuivat samalla tavalla, joten puristuskokeita voidaan pitää onnistuneina standardin SFS-EN 13286-41 (2003) kuvan 3 perusteella. Kuvassa 28 on esimerkkinä ECO 1 puristuskokeen aikana.

Kaikkien koekappaleiden jännitys-muodonmuutoskuvaajat ovat kuvassa 26. Kuvasta huomataan, että jännitys-muodonmuutuskäyttäytyminen on hyvinkin samanlaista kaikkien sideaineseosten kanssa. Kuvassa 27 on kuvattu sitkeän ja hauraan materiaalin jännitys-muodonmuutuskäyttäytyminen. Kuvasta huomataan tämän tutkimuksen seosten olevan hauraita, sillä jännitys-muodonmuutuskäyttäytyminen on ennen murtoa lähes lineaarista ja murto tapahtuu pienellä muodonmuutoksella sekä murron jälkeen jännitys pienenee nopeasti (Lätti 2016).



Kuva 26. Muodonmuutos-jännityskuvaajat.



Kuva 27. Jännitys-muodonmuutoskäyttäytyminen (Harju 2017)



Kuva 28. ECO 1 puristuskokeen aikana.

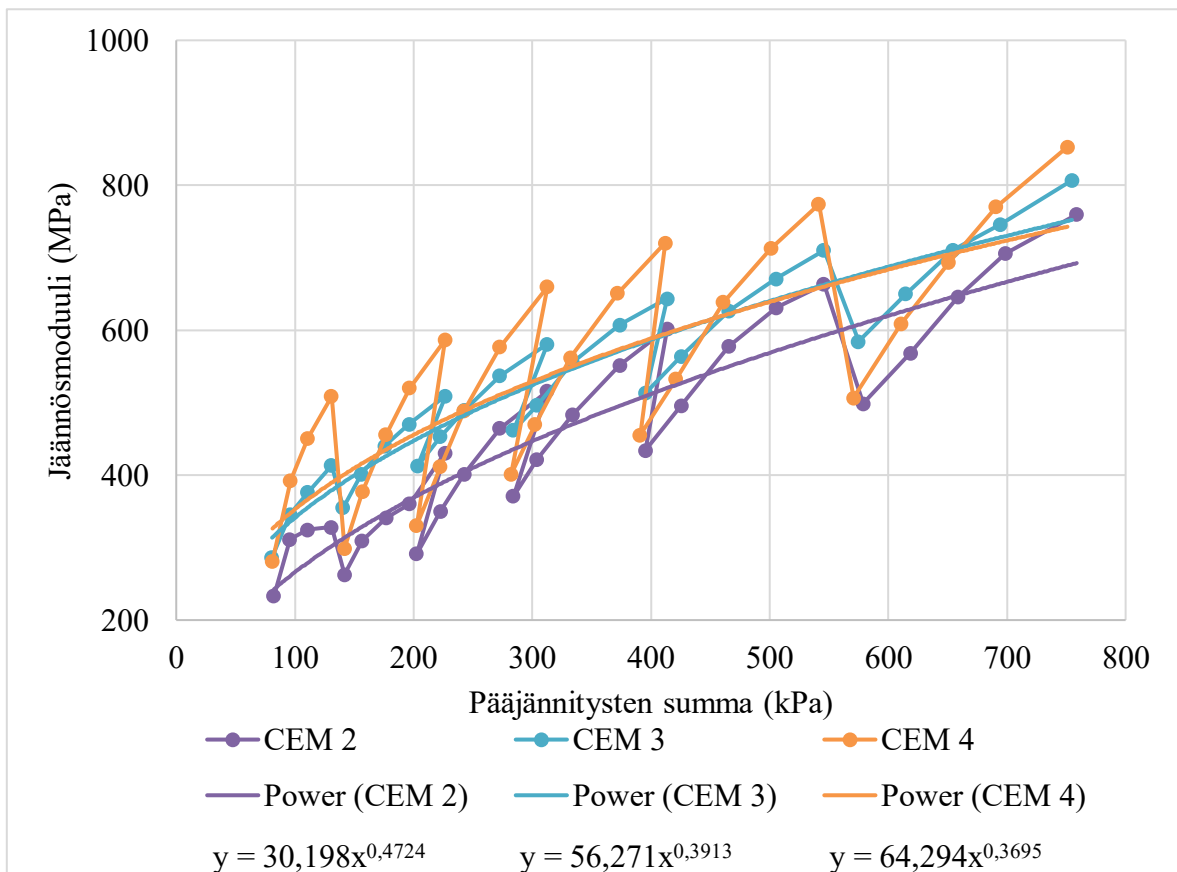
Nyt tehdyt kokeet tehtiin ilman suolavettä, joten tiesuolan puristuslujuutta heikentävään vaikutukseen ei voida ottaa kantaa. Aikaisemmista tutkimuksista kuitenkin tiedetään suolan heikentävän ainakin sementillä stabiloidun materiaalin lujuutta. Koe suoritettiin standardin mukaisesti eli jäädytys-sulatussykliä aikana koekappaleiden vesipitoisuus oli vakio toisin kuin todellisissa olosuhteissa tierakenteessa. Jatkotutkimuksina tulisi suorittaa koe suolavettä käyttämällä ja mahdollistamalla veden virtaus näytteeseen ja näytteestä kokeen aikana.

Kokeet onnistuivat hyvin, eikä kokeiden suorittamisen aikana havaittu tulosten luotettavuutta merkittävästi heikentäviä seikkoja. Vielä tarkempaan tulokseen olisi ehkä päästy, jos koekappaleiden päät olisi tasattu esimerkiksi kipsaamalla ennen puristuskokeita kuten luvussa 6.1 kerrottiin.

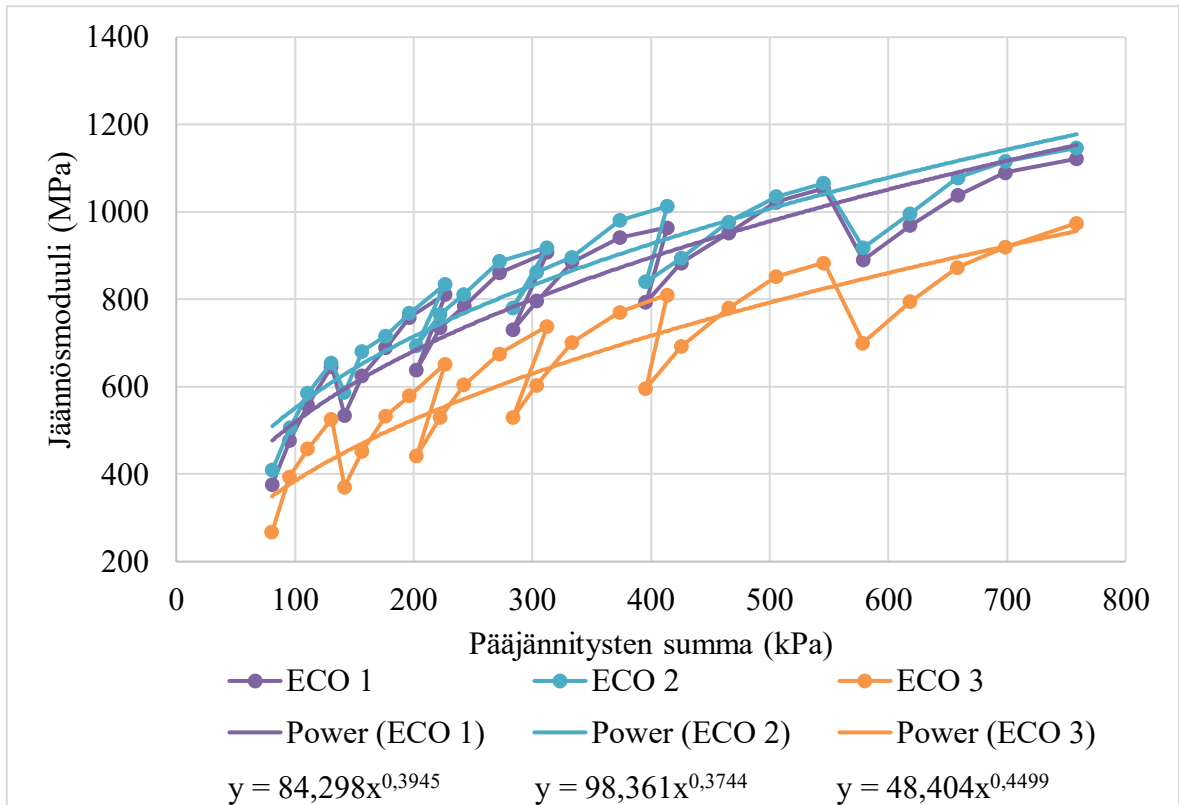
6.6 Syklinen kolmiakselikoe

Syklisellä kolmiakselikokeella selvitettiin stabiloidun materiaalin kyky kestää toistuvaa liikenteestä johtuvaa kuormitusta tierakenteessa. Kokeessa tutkittiin vain jäännösmoduulia, joka kuvaa jännityksen ja palautuvan muodonmuutoksen suhdetta yhden kuormitusimpulsin aikana. Jäännösmoduulista voidaan määrittää materiaalin kimmomoduuli eri jännitystiloiissa tai parametrit epälineaarisiin malleihin, joita voidaan käyttää väsymismitoituksessa tierakenteen suunnittelussa. (SFS-EN 13286-7 2004).

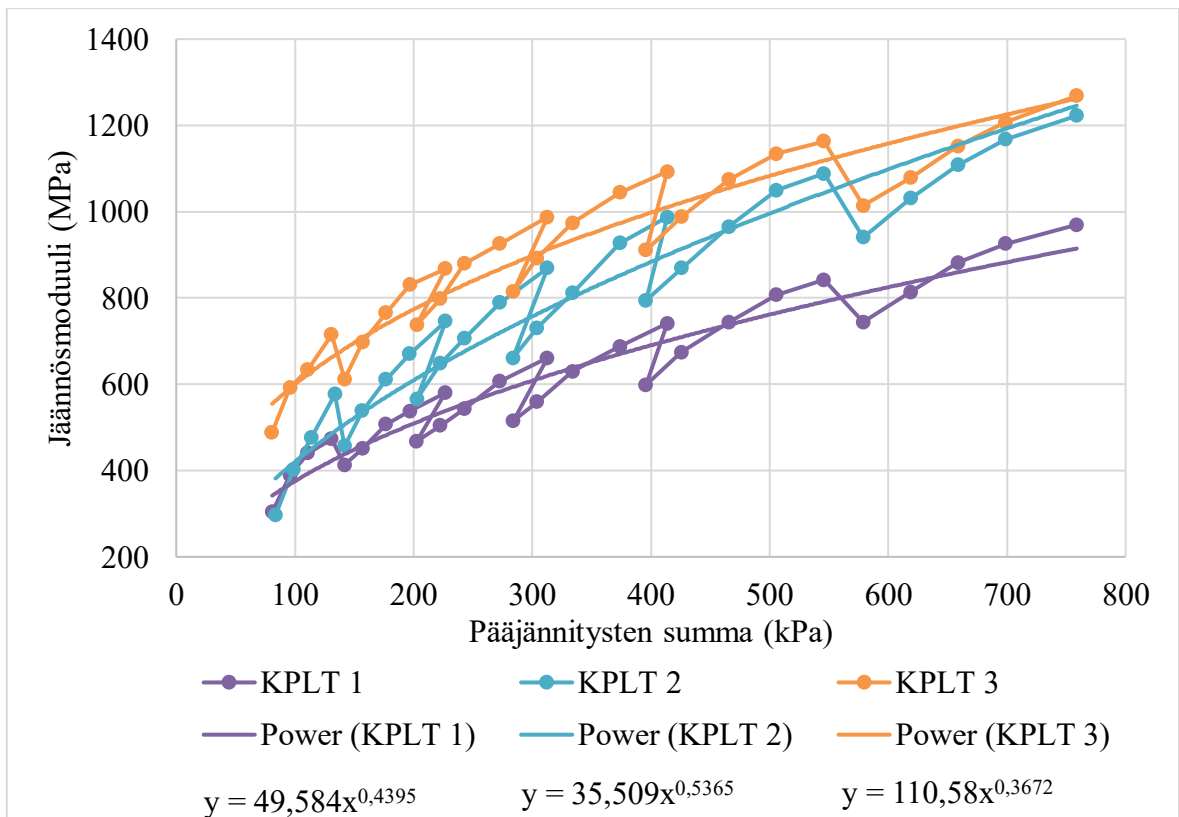
Jäännösmoduulit esitetään usein suhteessa pääjännitysten summaan eli deviatorisen ja kolmiakselisellissä vallitsevan sellipaineen eli hydrostaattisen jännityksen summaan (Ehrola 1996; Kolisoja 1997). Seuraavissa kuvissa esitetään kaikkien testattujen seosten jäännösmoduulit pääjännitysten summan suhteen. Kuvassa 29 on sementillä (CEM), kuvassa 30 Ecolanilla (ECO) ja kuvassa 31 kivihiihenpolton lentotuhkalla (KPLT) stabiloitujen koekappaleiden tulokset.



Kuva 29. Sementillä sidottujen koekappaleiden jäännösmoduulit eri jännitystiloiissa.



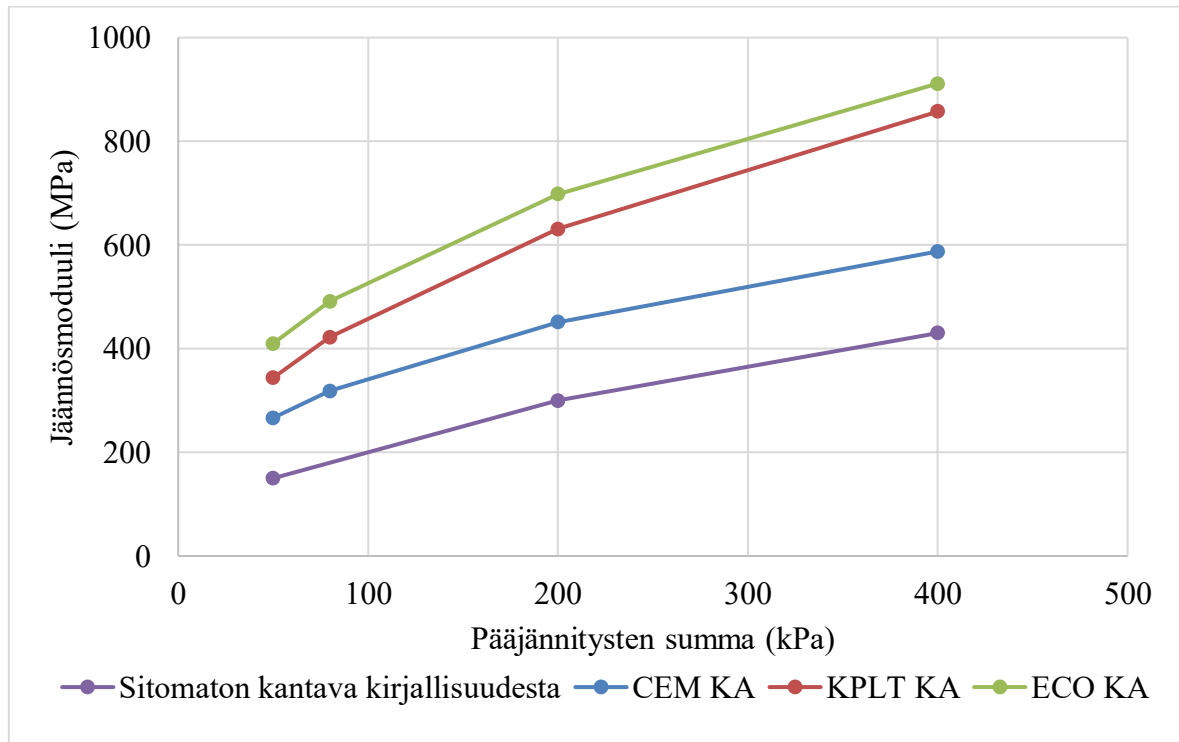
Kuva 30. Ecolanilla sidottujen koekappaleiden jännösmoduulit eri jännitystiloiissa.



Kuva 31. Kivihiilenpolton lentotuhkalla sidottujen koekappaleiden jännösmoduulit eri jännitystiloiissa.

Kuvista huomataan, että kaikilla tutkituilla seoksilla esiintyy hajontaa tuloksissa. Sementtistabiloidulla koekappaleella CEM 2 jäännösmoduulit jäävät selvästi rinnakkaiskoekappaleita pienemmäksi. Vastaavasti Ecolanilla stabiloidulla koekappaleella ECO 3 käy samalla lailla. Kivihiilen polton lentotuhkalla stabiloiduilla koekappaleilla taas on hajontaa selvästi enemmän, sillä kaikki testatut koekappaleet antavat selvästi erilaisia jäännösmoduulin arvoja.

Tierakenteen kantavassa kerroksessa pääjännitysten summa vaihtelee normaalisti 50 ja 400 kPa välillä päällysteen ja kantavan kerroksen paksuuksista riippuen. Keskimäärin pääjännitysten summa on noin 200 kPa. Ehrola on koonnut eri kirjallisuuslähteistä sitomattoman kantavan kerroksen materiaalien jäännösmoduulien arvoja pääjännitysten summien ollessa 50, 200 ja 400 kPa. (Ehrola 1996). Kuvassa 32 on kyseisten arvojen keskiarvot edellä mainituilla pääjännitysten summilla. Lisäksi kuvassa on tämän työn kokeiden keskiarvotulokset kullakin sideaineella. Arvojen määrittämisessä on käytetty kuvissa 29, 30 ja 31 esitettyjä trendiviivojen yhtälöitä ja tuloksista tulee huomioida, että kokeessa käytetty matalin pääjännitysten summa oli 80 kPa, joten 50 kPa arvo perustuu trendiviivan ekstrapolointiin. Keskiarvoista on jätetty pois koekappaleet CEM 2 ja ECO 3, koska ne erosivat selvästi rinnakkaiskoekappaleista.



Kuva 32. Eri sideaineseosten ja kirjallisuudesta saatujen jäännösmoduulien keskiarvot pääjännitysten summan suhteen.

Kuvasta 32 huomataan, että Ecolanilla stabiloidut koekappaleet saavuttavat suurimmat jäännösmoduulin arvot eli kestävät parhaiten toistuvaa kuormitusta. Huomataan myös, että stabiloiduilla materiaaleilla jäännösmoduulit ovat suurempia, kuin sitomattomilla. Ehrola esittää, että pääjännitysten summan ollessa 200 kPa, saadut jäännösmoduulit vastaavat likimäärin Odemarkin mitoitusmenetelmässä kantavan kerroksen materiaalien E-moduuleja. Tämä väittäjä ei näiden tulosten perusteella kuitenkaan sidotulla materiaalilla toimi, sillä Väyläviraston suunnitteluohjeen mukaan hydraulisesti sidotun materiaalin E-moduuleina tulisi

käyttää sementtistabiloinnilla 1500 MPa, kun 7 vrk puristuslujuus on yli 3 MPa ja 3500 MPa, kun lujuus on yli 5 MPa. Puristuslujuuksia käsiteltiin luvussa 6.1.1. Kaikista tässä luvussa esitetyistä kuvaajista huomataan jäännösmoduulin olevan voimakkaasti jännitystilariippuvainen, jolloin sama materiaali käyttäytyy eri tavalla erilaisen jännitystilan omaavissa rakenteissa (Ehrola 1996).

Tässä luvussa kuvatut jäännösmoduulit on laskettu käyttämällä kuormitussellin ulkopuolelle kiinnitettyjen (kuva 15) siirtymäantureiden mittaustulosten keskiarvoja. Lisäksi laskettiin kuormituslaitteen sylinterin sisäisen siirtymäanturin antamilla arvoilla, mutta niiden huomattiin johtavan noin puolet pienempiin jäännösmoduuleihin. Ulkoisia siirtymäantureita päätettiin käyttää niiden paremman mittaustarkkuuden ($\pm 0,1$ %) takia. Suuri ero laitteen oman siirtymäanturin antamiin tuloksiin herättää kuitenkin pienen epäilyksen tuloksen luotettavuudesta, sillä jo pienikin mittausrvirhe vaikuttaa merkittävästi jäännösmoduulin arvoon. Laitteen voima-anturin tarkkuus oli $\pm 0,2$ %. Tulosten käsittelyn aikana konsultoitiin kokenutta asiantuntijaa, joka ehdotti kokeiden toistamista käyttämällä koekappaleeseen suoraan kiinnitettäviä siirtymäantureita, sillä niillä saadaan paras mittaustarkkuus. Se jätettiin nyt kuitenkin yhdeksi jatkotutkimusaiheeksi. Mittaustarkkuuden lisäksi tuloksiin vaikuttaa koekappaleiden tiiviysaste. Sementillä stabiloidut koekappaleet olivat ainoat, jotka onnistuttiin tiivistämään tavoitettavuuden muiden jäädessä hieman tavoitteen alle, kuten liitteestä 3 huomataan.

7 Tuotteistaminen

Tässä luvussa kuvataan, kuinka valimohiekasta voidaan tehdä rakennustuote ja siten helpottaa sen käyttöä maarakentamisessa. Tässä työssä pääpaino on ollut valimohiekan tutkimisessa osana kerrosstabilointiseosta. Työn aikana kuitenkin havaittiin seoksen tuotteistamiseen liittyvän haasteita, jotka liittyvät seoksen valmistukseen ja ympäristönäkökulmiin. Haasteita avataan lisää tämän luvun lopussa, mutta niistä johtuen tässä työssä päätettiin kuvata valimohiekan tuotteistaminen tierakenteen suodatinkerrokseen. Luvussa kerrotaan ympäristölainsäädännön, rakennustuoteasetuksen ja Väyläviraston materiaalihyväksynnän vaikutuksista tuotteistamiseen. Ensin kuvataan väylärakentamisessa käytettävän uusiomateriaalin tuotteistamisprosessi yleisesti ja sen jälkeen kerrotaan, kuinka sitä sovellettaisiin suodatinkerrokseen käytettävälle valimohiekalle. Tässä luvussa kuvattu Väyläviraston materiaalihyväksyntä perustuu Väyläviraston ohjeluonnokseen 24.1.2020 (Väylävirasto 2020) eli jokin asia saattaa vielä muuttua lopullisen version valmistuessa.

7.1 Uusiomateriaalin tuotteistaminen väylärakenteisiin

Tuotteistamisella tarkoitetaan materiaalin valmistuksen ja ominaisuuksien vakioimista. Tällöin materiaalin valmistus on aina toistettavissa ja sen ominaisuudet ovat aina samanlaiset. Tuotteistamisella pyritään luomaan uusi kilpailukykyinen tuote ja tuomaan se markkinoille. Sen tekeminen on yleensä materiaalin valmistajan tai toimittajan tehtävä. (Koivisto et al. 2016). Uusiomateriaalin tuotteistamisella voidaan helpottaa ja lisätä sen käyttöä maarakentamisessa.

EU:n ja Suomen lainsäädännön mukaan on olemassa tuotteita ja jätteitä. Suuri osa uusiomateriaaleista luokitellaan jätteeksi, jolloin niiden käyttöön maarakentamisessa tarvitaan ympäristönsuojelulain (527/2014) mukaisesti ympäristölupa tai materiaalin ollessa MARA-asetuksen piirissä tulee tehdä ympäristönsuojelulain mukainen ilmoitus. Jätelainsäädäntö sisältää myös sivutuotemääritelmän ja End of Waste -kriteerit, jotka mahdollistavat materiaalin siirron pois jätestatuksen alta tuotteeksi. (Koivisto et al. 2016).

Mikäli uusiomateriaali luokitellaan sivutuotteeksi tai se läpikäy End of Waste-menettelyn ja lakkaa siten olemasta jätettä, sovelletaan EU:n REACH-asetusta (EY 1907/2006). Se tarkoittaa sitä, että markkinoille tuotavat tuotteet tulee rekisteröidä REACH-tietokantaan. Asetuksella pyritään varmistamaan terveyden- ja ympäristönsuojelun korkea taso ja takaamaan tuotteiden vapaa liikkuvuus EU:n sisämarkkinoilla. (Koivisto et al. 2016).

Tierakenteessa käytettävät materiaalit ovat EU:n rakennustuoteasetuksen (305/2011) piirissä niiden jätestatuksesta riippumatta. Asetuksen tarkoituksena on varmistaa, että materiaaleista saatava tieto on luotettavaa ja vertailukelpoista. Tällöin eri materiaalien soveltuvuuden arviointi kulloiseenkin käyttökohteeseen on helpompaa ja luotettavampaa. Rakennustuotteen kelpoisuus rakennusmateriaaliksi osoitetaan soveltuvan harmonisoidun tuotestandardin mukaisella CE-merkinnällä ja tuotteen ominaisuuksista kertovalla suoritusasoilmoituksella. Niillä valmistaja myös vakuuttaa, että sillä on laadunhallintajärjestelmä ja tuote on testattu vaatimusten mukaisesti. (Koivisto et al. 2016; Väylävirasto 2020).

CE-merkintä ei kuitenkaan yksinään riitä osoittamaan tuotteen soveltuvuutta tiettyyn hankkeeseen tai tiettyyn rakennusosaan, vaan lisäksi voidaan asettaa lisävaatimuksia (Koivisto et al. 2016). Tällaisia lisävaatimuksia ovat muun muassa tässä työssä tarkasteltava Väyläviraston uusiomateriaalihyväksyntä, jota kutsutaan tässä työssä jatkossa vain materiaalihyväksynnäksi. Sen tarkoituksena on varmistaa uusiomateriaalin tekninen toimivuus ja nopeuttaa väylähankkeiden uusiomateriaaleja koskevaa päätöksentekoa. Materiaalihyväksyntä voidaan hakea joko hankekohtaisena tai yleisenä. Siinä ei oteta kantaa materiaalin ympäristökelpoisuuteen, joten lisäksi tarvitaan joko ympäristölupa tai materiaalin ollessa MARA-asetuksen piirissä ympäristönsuojelulain mukainen ilmoitus. (Väylävirasto 2020).

Yleisen materiaalihyväksynnän saatuaan uusiomateriaalia voidaan käyttää Väyläviraston ja ELY-keskusten väylähankkeilla ilman hankekohtaista hyväksymismenettelyä. Materiaalihyväksynnän ulkopuolelle on rajattu kaikki rautatierakenteeseen kuuluvat osat, joten kyseeseen tulevat vain tierakenteet. Hyväksynnän jälkeenkin uusiomateriaalin toimittajan tulee pystyä osoittamaan, että kukin tuote-erä täyttää materiaalihyväksynnän ehdot ja ympäristökelpoisuusvaatimukset. Yleisen materiaalihyväksynnän sijaan on mahdollista hakea uusiomateriaalille hankekohtaista materiaalihyväksyntää, jolloin materiaali hyväksytään vain tiettyyn väylähankkeeseen ja tiettyyn rakentamis- ja kuormitusolosuhteeseen. Hankekohtainen menettely saattaa olla kannattavampaa muun muassa materiaaleille, joita syntyy vain vähän tai paikallisesti. Hankekohtaista materiaalihyväksyntää ja sen aineistoa voidaan myöhemmin käyttää myös yleisen materiaalihyväksynnän hakemisessa. Hakuprosessi on samanlainen sekä hankekohtaisessa että yleisessä materiaalihyväksynnässä. (Väylävirasto 2020).

Materiaalihyväksyntää voidaan hakea myös seokselle. Eli tässä työssä tutkittu valimohiekan käyttö stabiloidun kerroksen runkoaineena on myös mahdollista hyväksyttävä. Tällöin hakemuksessa tulee esittää ainakin seoksen tarkka resepti, tiedot seoksen valmistamisesta ja laadunvalvonnasta. Yleensä urakoitsijat hakevat seoksen materiaalihyväksyntää. (Väylävirasto 2020).

Väyläviraston yleistä ja hankekohtaista materiaalihyväksyntää haetaan samanlaisella viisiportaisella menettelyllä, jossa pyritään etenemään neuvotellen. Menettelyn aikana on mahdollista saada väliaikainen materiaalihyväksyntä esimerkiksi rajoitettuun käyttöön. Menettely etenee seuraavasti:

1. **Uusiomateriaalin materiaalihyväksynnän käynnistäminen.** Käynnistysvaiheessa uusiomateriaalitoimittajan suositellaan aloittavan keskustelun Väyläviraston kanssa. Keskusteluissa selvitetään uusiomateriaalin soveltuvuutta väylärakentamiseen materiaalista aikaisemmin tehtyjen tutkimusten perusteella, arvioidaan käytön laajuutta ja suunnitellaan mahdollisesti tarvittavia lisätutkimuksia. Tavoitteena on selvittää, mitä lisätietoja materiaalista tarvitaan, jotta materiaalihyväksyntä on mahdollista saada.
2. **Testaus ja koerakentaminen.** Tällöin tutkitaan tarvittavien teknisten ominaisuuksien arvot ja vaihteluvälit. Koerakentamisella selvitetään myös rakennettavuusominaisuuksia ja selvitetään materiaalin käyttäytymistä rakenteessa. Tarvittavat tutkimukset riippuvat materiaalista ja sen aiotusta käyttökohteesta väylärakenteessa. Vaiheessa 1 käydään läpi tarvittavat tutkimukset.
3. **Materiaalihyväksyntähakemus.** Hakemus on vapaamuotoinen, mutta siinä tulee esittää seuraavat tiedot:
 - a. Tiedot uusiomateriaalitoimittajasta
 - b. Uusiomateriaalin ja sen tuotannon yleiskuvaus
 - c. Uusiomateriaalin vaatimukset väylähankkeilla

- d. Uusiomateriaalin ohjeet
- e. Hakemuksen perustelumuistio ja tutkimusraportit

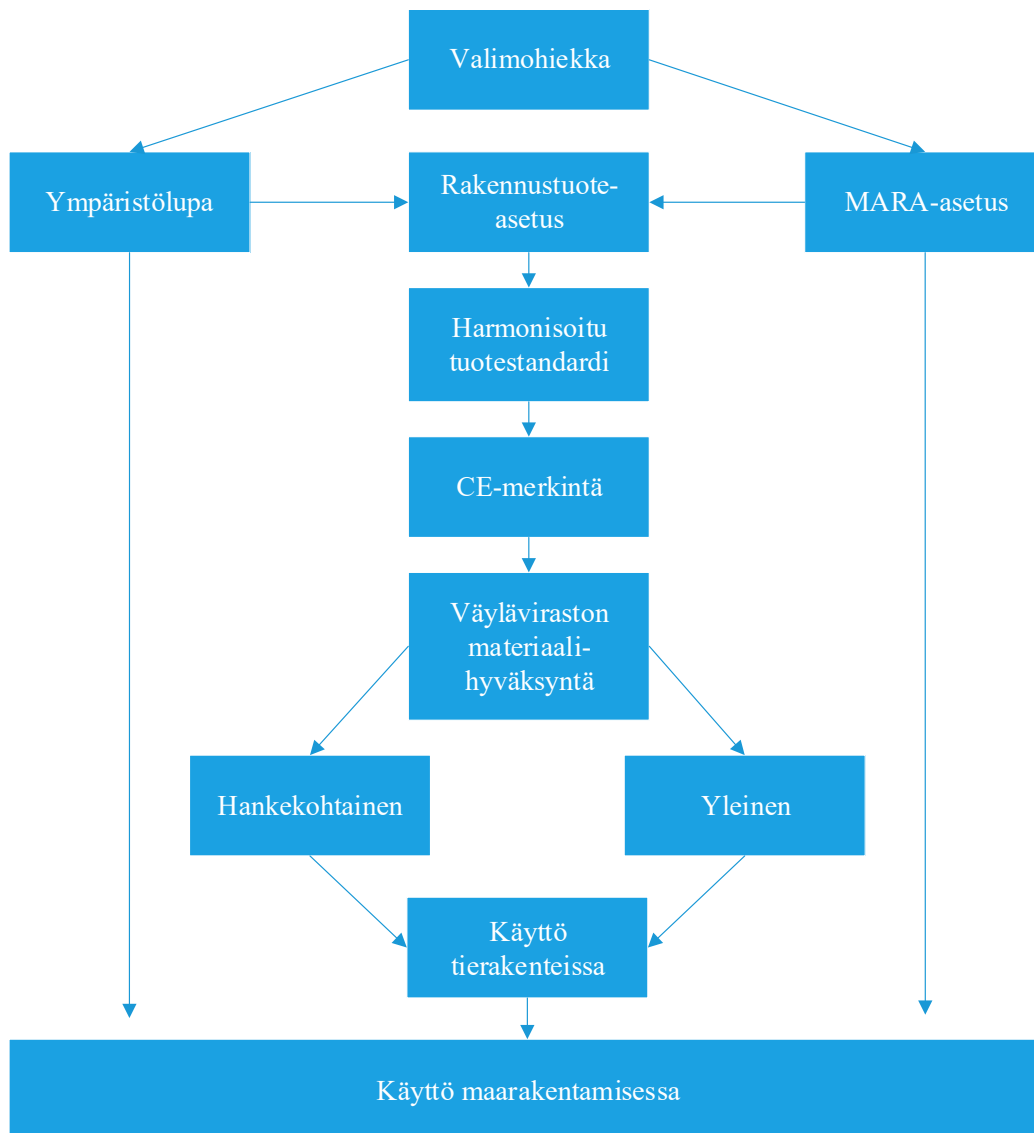
Mikäli materiaalitoimittajia on useampia, voivat hakemuksen osat c, d ja e olla yhdessä laadittuja.

4. **Arvio materiaalihyväksyntähakemuksesta.** Väylävirasto arvioi täyttääkö uusiomateriaali materiaalihyväksynnän kriteerit.
5. **Päätös materiaalihyväksynnästä.** Hakemuksen perusteella Väylävirasto päättää antaa materiaalille materiaalihyväksynnän tai palauttaa sen valmisteluun. Hyväksyntä osoitetaan julkisella hyväksymiskirjeellä. (Väylävirasto 2020).

7.2 Valimohiekan tuotteistaminen

Tässä työssä tutkittiin enimmäkseen valimohiekan soveltumista stabiloidun kantavan kerroksen runkoaineeksi. Tuotteistaminen päätettiin kuitenkin kuvata sitomattomaan suodatinkerrokseen käytettävälle valimohiekalle, koska seoksen tuotteistamisessa havaittiin työn aikana tiettyjä haasteita, joista kerrotaan luvun lopussa. Valimohiekan käyttö sitomattomaan suodatinkerrokseen olisi tehtävissä pienemmällä tutkimusmäärällä, koska vaatimukset suodatinkerrokselle eivät ole niin tiukat kuin stabiloidulle kantavalle kerrokselle. Valimohiekan käytöstä väylärakenteessa voisi ensin kerätä kokemusta suodatinkerroksessa ja laajentaa käyttöä myöhemmin stabiloinnin runkoaineeksi. Niinpä tässä luvussa keskitytään valimohiekan käyttöön suodatinkerroksessa. Valimohiekan tuotteistamisprosessin pääkohdat on esitetty kuvan 33 kaaviossa.

Tuotteistamisen aloituksen on oltava harkittu päätös, koska tuotteistaminen on aikaa ja rahaa vievä prosessi. Kun päätös on tehty, voidaan prosessi aloittaa tekemällä laboratoriokokeita ja niiden jälkeen toteuttaa koerakenne. Laboratoriotutkimuksilla ja koerakenteella on tarkoitus selvittää tuotteen kelpoisuus suunniteltuun rakennusosaan sekä selvittää miten tuotanto, kuljetus ja rakentaminen tehdään käytännössä. (Koivisto et al. 2016).



Kuva 33. Valimohiekan tuotteistamisprosessin päävaiheet.

Suodatinkerros on kiinteä osa väylärakennetta ja siten siinä käytettävä materiaali on rakennustuoteasetuksen piirissä. Tierakenteissa käytettäviin sitomattomiin kiviaineksiin sovelletaan harmonisoitua tuotestandardia SFS-EN 13242 (2008). Sitä täydentämään on laadittu kansallinen soveltamisstandardi SFS 7005 (2016). Soveltamisstandardissa on kerrottu käyttökohteittain tutkittavat ominaisuudet ja niille asetetut kansalliset vaatimustasot.

Edellä mainittu harmonisoitu tuotestandardi, johtaa CE-merkintään, joka on myös osoitus valmistajan laadunhallintajärjestelmästä. Käytännössä tämä johtaa siihen, että kukin valimo CE-merkitsee oman valimohiekkansa, vaikka lopputuotteen ominaisuudet olisivatkin samanlaiset eri valimojen kesken. Väyläviraston materiaalihyväksyntää haettaessa sen sijaan voivat valimot tehdä yhteistyötä materiaalin ominaisuuksiin ja ohjeistukseen liittyen eli edellä kuvatun menettelyn vaiheen 3 kohdat c, d ja e.

Väyläviraston materiaalihyväksynnän saaminen edellyttää, että valimohiekka on CE-merkitty. CE-merkintää ja materiaalihyväksyntää varten voidaan käyttää samoja tutkimuksia so-

veltuvien osien. Esimerkiksi rakeisuus on molempiin tarvittava materiaaliominaisuus. Taulukossa 7 on kerättyä kirjoittajan käsitys CE-merkintään tarvittavista tutkimuksista ja soveltuvista tutkimusmenetelmistä. Lisäksi taulukkoon on kirjattu Vileniuksen (2019) tutkimat ominaisuudet. Vastaavat tutkimukset ja menetelmät Väyläviraston materiaalihyväksyntää varten löytyvät liitteestä 6.

Taulukko 7. CE-merkintään suodatinkerroksen materiaalille tarvittavat tutkimukset ja tutkimusmenetelmät sekä tähän mennessä tehdyt tutkimukset.

Harmonisoidun tuotestandardin mukaiset vaatimukset materiaaliominaisuuksille				
Tutkittava ominaisuus	Tutkimusmenetelmä standardin mukaan	Vaatimustaso Suomessa	Saavutettu taso, jos tutkittu	Käytetty tutkimusmenetelmä
Raekoko	SFS-EN 933-1	InfraRYL 21110, kuva K1	0/1 mm	SFS-EN 933-1
Yleiset rakeisuusvaatimukset	SFS-EN 933-1	G _F 80*	G _F 85*	SFS-EN 933-1
Kiintotiheys	SFS-EN 1097	-	ρ _s =2,655 g/cm ³	GLO-85
Hienoainespitoisuus	SFS-EN 933-1	f ₁₆ **	f ₃ **	SFS-EN 933-1
Kokonaisriikki	SFS-EN 1744-1	S ₁	-	-

* Hienon kiviaineksen ylemmän seulakoon D läpäisyprosentti on vähintään 80 tai 85 %, kun d=0 ja D≤6,3.

** Seulan 0,063 mm läpäisevän massan osuus 16 ja 3 %.

Osaan Väyläviraston materiaalihyväksyntää varten tarvittaviin mitoitusparametrien määrittäisiin liittyvä olennaisesti koerakenteista saatavat tiedot. Kantavuusmitoituksessa tarvittava E-moduuli voidaan määrittää takaisinlaskennalla koerakenteesta, joskin silloin mittaushetken olosuhteista aiheutuu epävarmuuksia, jotka täytyy huomioida. Tällöin tulee Väyläviraston ohjeen mukaan käyttää vertailuparitekniikkaa eli käyttää laboratoriokokeista saatavaa kerrointa koerakenteesta saatavan E-moduulin korjaamiseen. Materiaalin ja rakenteen pitkäaikaiskestävyydestä tarvittavat liikenteestä, ilmastosta ja kemiallisista tekijöistä johtuvien rasitusten vaikutukset rakenteeseen saadaan selville koerakenteesta. Koerakenteesta selvittävistä ominaisuuksista ja selvitystavoista lisää koerakenteesta kertovassa omassa luvussa.

Mikäli valimohiekkää päätetään käyttää kerrosstabiloinnin runkoaineena, tulee tuotteista seos. Silloin tulee kaikki seoksen raaka-aineiden ja seossuhteen olla tiedossa. Seoksen tuottaminen on järkevää tehdä urakoitsijan toimesta, sillä CE-merkintää varten tulee tuotteen teknisten ominaisuuksien lisäksi osoittaa valmistusprosessi ja laadunvarmistusjärjestelmä. Valmistusprosessissa sekoitus on suuressa roolissa, sillä se vaikuttaa lopputuotteen laatuun merkittävästi, jolloin urakoitsijan käyttämä sekoitusmenetelmä on avainasemassa. Ainakin

teoriassa asemasekoitus on paras vaihtoehto, mutta tuotteistamisprosessin aikana voi kuitenkin koerakentamisella selvittää myös paikallasekoitusmenetelmien soveltuvuutta.

Kerrosstabiloinnin kiviaineksiin sovelletaan samaa harmonisoitua tuotestandardia SFS-EN 13242, kuin suodatinkerroksellekin. Kerrosstabilointia varten selvittävät materiaaliominaisuudet ja raja-arvot ovat osin samat kuin suodatinhiekkalle, mutta niiden lisäksi tulee vielä muitakin selvittettäviä ominaisuuksia. Suodatinkerroksesta poiketen valimohiekan ja kalliomurskeen seos vaatii ympäristöluvan ja siten käyttö ei ole aivan yhtä helppoa. Valimohiekan ja betonimurskeen seos taas on MARA-asetuksen piirissä, joten sen käyttö on teoriassa yhtä helppoa kuin suodatinkerrokseen käytettävällä valimohiekkalla. Seosta tuotteistettaessa on huomioitava myös käytettävän sideaineen ominaisuudet ja ympäristökelpoisuus uusiosideainetta käytettäessä.

Yllä kuvattiin valimohiekan tuotteistaminen suodatinkerrokseen ja avattiin seoksen tuotteistamiseen liittyviä haasteita, joiden perusteella tultiin siihen tulokseen, että ainakin alkuvaiheessa kannattaa tuotteistaa valimohiekkaa suodatinkerroksessa käytettäväksi. Seuraavaksi otetaan tarkasteluun mukaan vuosittain syntyvän valimohiekan määrä. Vuonna 2013 syntyi 28100 tn valimohiekkaa (Alphaset), joka on lähes puolet kaikesta Suomessa vuosittain syntyvästä valimohiekkasta (Sappinen 2018a). Jos 10 metriä leveän tien 0,5 metriä paksu suodatinkerros tehtäisiin valimohiekkasta, saataisiin vuodessa tehtyä noin 3,6 kilometriä valmista suodatinkerroksesta. Jos valimohiekkaa käytettäisiin osana stabiloidun kantavan kerroksen runkoainetta (WFS 25 % + KaM 75%), riittäisi materiaalia 12 senttimetriä paksun kantavan kerroksen tekemiseen noin 43 kilometrin matkalle. Tässä esimerkissä kaikkien valimoiden (Alphaset) valimohiekat on laskettu yhteen, vaikka todellisuudessa sitä kannattaa pyrkiä käyttämään mahdollisimman lähellä kutakin valimoa, jolloin valmiit valimohiekkarakenteet voivat jäädä paikallisesti hyvinkin pieniksi.

Esimerkistä huomataan, että suodatinkerrokseen käytettäväksi valimohiekkaa syntyy kovin vähän, jolloin sen tuotteistamisen kannattavuus on kyseenalaista. Kerrosstabiloinnissa sen sijaan määrä riittää paremmin ja materiaalitarve rakennettavaa tiekilometriä kohden on paljon pienempi. Etenkin suodatinkerrokseen käytettäessä valimohiekan varastoinnilla on suuri merkitys, koska valimon koko vuoden ylijäämähiekkaa saatetaan käyttää kuukaudessa.

Kaiken kaikkiaan valimoiden kannattaa markkinoida valimohiekkaa kaikkiin MARA-asetuksen sallimiin käyttökohteisiin, jotta materiaalia kuluisi mahdollisimman tasaisesti ympäri vuoden. Syntyvien materiaalmäärien vähyden vuoksi valimopaikkakunnat voisivat olla Väylävirastoa ja ELY-keskuksia kiinnostavampia asiakkaita, koska siellä rakennushankkeet ovat pienempiä ja kuljetusmatkat lähtökohtaisesti lyhyempiä.

8 Koerakenne

Tässä luvussa kuvataan koerakentamisessa huomioitavia asioita sekä kuvataan yksi vaihtoehto koerakenteesta. Lisäksi tässä luvussa kuvataan, kuinka koerakenteesta voidaan selvittää tuotteistamisessa tarvittavia ominaisuuksia ja mitoitusparametreja.

Uusiomateriaaleiden pitkäaikaiskestävyydestä, teknisistä ominaisuuksista ja rakennettavuudesta tarvittavaa tietoa saadaan laboratoriotutkimusten lisäksi koerakentamisesta. Koerakentamista kannattaa tehdä vaiheittain siten, että ensimmäiset kokeilut ovat pienimuotoisia ja niistä saatujen kokemusten perusteella voidaan myöhemmin tehdä laajamittaisempaa koerakentamista. Ensimmäiset koerakenteet voivat olla kenttiä esimerkiksi tehdasalueilla tai ajoteitä pihoihin tai väliaikaisia kiertoteitä, joilla nopeampi vaurioituminen on hyväksyttävää. Myöhemmin voidaan koerakentamista tehdä myös yleisillä teillä, jolloin kuormitusolosuhteet vastaavat täysin normaalia rakennetta. Koerakenteita seurataan yleensä kolme vuotta. (Väylävirasto 2020).

Koerakenteita voidaan tehdä yksi tai useampia ja niiden lisäksi tarvitaan aina perinteisillä materiaaleilla ja menetelmillä tehty vertailurakenne. Jotta koerakenteita ja vertailurakennetta voidaan luotettavasti vertailla, tulee koerakennuskohde valita siten, että alueella olevat pohja- ja kuormitusolosuhteet ovat mahdollisimman samanlaiset. (Koivisto et al. 2016). Kuormitusolosuhteista etenkin liikenne-, ilmasto- ja kemiallisten rasitusten tulee olla vertailukelpoisia (Väylävirasto 2020).

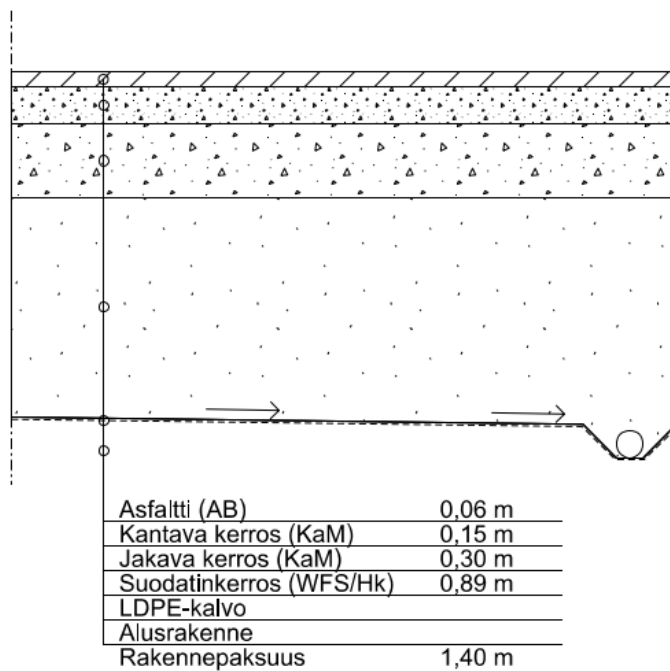
Ympäristönsuojelulain (527/2014) luvun 4 pykälän 31 mukaan koerakentamista varten ei tarvita ympäristölupaa vaan voidaan tehdä luvun 12 pykälän 119 mukainen ilmoitus lupaviranomaiselle. Mikäli koerakentamisesta saattaa aiheutua luvun 3 pykälän 27 kohdan 2 mukaista jätevesien johtamisesta aiheutuvaa vesien pilaantumista, tarvitaan ympäristölupa. Nyt tarkasteltavasta koerakenteesta ei lähtökohtaisesti aiheudu ympäristölle haittaa, kunhan materiaali ja rakennuskohde on MARA-asetuksen vaatimusten mukainen. Rakenteen läpi suodattuvan veden laatua kuitenkin tarkkaillaan.

Seuraavaksi esitetään yksi mahdollinen vaihtoehto koerakenteesta, joka perustuu voimassa olevaan Tierakenteen suunnitteluohjeeseen (Liikennevirasto 2018). Mitoitus perustuu puunkuormausalueen mitoitukseen, jolloin kantavan kerroksen päältä vaaditaan 160 MPa kantavuutta ja sekalaatuisella pohjamaalla sallittu routanousu on 30 mm. Päällysteeksi suositellaan vähintään 60 mm paksua asfalttibetonilaattaa.

Mitoitus on tehty Tierakenteen suunnitteluohjeen mukaisesti käyttämällä Odemarkin kantavuusmitoitus-menetelmää sekä suhteelliseen routanousuun perustuvaa routamitoitusmenetelmää. Lähtötietona pohjamaan oletettiin olevan alusrakenneluokan H mukaista, jolloin sen kantavuus on 50 MPa ja suhteellinen routaturpoama 12 %. Valimohiekan E-moduulin oletettiin konservatiivisesti olevan 50 MPa, kun suodatinhiekan kantavuus vaihtelee normaalisti 50 ja 70 MPa välillä. Valimohiekan vastaavuuden eristävyys kannalta oletettiin vastaavan normaalia suodatinkerroksen hiekkää, jolloin kerroin on 1. Jakavan ja kantavan kerroksen oletettiin olevan kalliomurskettä, jolloin niiden E-moduulina käytettiin 280 MPa ja vastaavuuskertoimena 0,9. Päällysteen oletettiin olevan asfalttibetonia, jolloin sen E-moduulina käytettiin 2500 MPa ja vastaavuuskertoimena 1. Tehdyillä oletuksilla routamitoitus muodostui mitoittavaksi tekijäksi, jolloin suodatinkerroksen paksuutta kasvattamalla päästiin

esitettyyn lopputulokseen. Mitoituksessa käytetyt osakerrokset parametreineen on esitetty liitteessä 7. (Liikennevirasto 2018).

Koerakenteen läpi suotautuvat vedet kerätään salaojilla, joten koerakenteen pohja tulee kallistaa salaojia kohti. Koerakenteen pohjalle asennetaan vettä läpäisemätön muovikalvo, esimerkiksi LDPE-kalvo, jolla estetään vesien vapaa valuminen pohjamaahan. Salaojat johdetaan näytteenottokaivoon, josta vesi johdetaan edelleen joko hulevesijärjestelmään tai maastoon. Suotautuvista vesistä tutkitaan kerran vuodessa MARA-asetuksen mukaiset haitta-aineet. Tutkimustulosten perusteella laaditaan arvio rakenteen ympäristö- ja terveysvaikutuksista. (Gradientti 2017). Koerakenteen poikkileikkaus on esitetty kuvassa 34. Vertailua varten rakennetaan kuvaa 34 vastaava vertailurakenne, jossa käytetään suodatinkerroksessa luonnonhiekkaa, jonka ominaisuudet tunnetaan.



Kuva 34. Koe- ja vertailurakenteen poikkileikkauskuva.

Koerakenteesta selvitetään valimohiekan E-moduuli kantavuusmitoitusta varten. Se määritetään valmiin rakenteen päältä tehtävillä pudotuspainolaitemittauksista. Mittauksia tehdään koerakenteen ja vertailurakenteen päältä käyttämällä raskasta pudotuspainolaitetta. Mittauksia tulee tehdä ainakin kesällä kuivaan aikaan sekä syksyllä ja keväällä, jolloin rakenteessa on paljon kosteutta. Tällöin saadaan selville vuodenaikojen vaihtelusta johtuva moduulin vaihtelu. Pudotuspainolaitemittauksista lasketaan E-moduuli sekä koerakenteelle että vertailurakenteelle. Väyläviraston mitoitus perustuu keväällä mitattuihin kantavuusarvoihin, joten lopulliset mitoitusparametrit tulee määrittää niistä. Laskettujen moduulien mittausolosuhteista johtuvaa virhettä korjataan käyttämällä vertailuparitekniikkaa, jossa koerakenteista saatuja arvoja korjataan laboratoriossa saatujen arvojen avulla. Vertailuparitekniikka on kuvattu Uusiomateriaalien käyttö väylärakentamisessa ohjeessa (Väylävirasto 2020). Kokeita jatketaan sopivan seurantajakson (yleensä kolme vuotta) ajan.

Rakenteesta tulee myös selvittää routamitoitusta varten materiaalin vastaavuus eristävyiden kannalta. Yleensä vastaavuuskerroin on määritetty seuraamalla rakenteiden toteutuneita routanousuja pitkällä aikavälillä. Tutkimusmenetelmää ei ole sen tarkemmin ohjeistettu, joten sitä tulee tiedustella Väylävirastosta koerakenteen suunnittelun aikana.

Koerakenteesta vastaavuuskerrointa voisi tutkia esimerkiksi seuraamalla rakenteen ja pohjamaan lämpötilaa eri syvyyksiltä, jolloin saataisiin roudan syvyys selville. Samalla mitattaisiin ilman lämpötilaa ja seurattaisiin pakkassumman kehittymistä. Lisäksi voisi mitata routanousun suuruutta rakenteen pinnasta. Viime vuosina talvet ovat olleet eteläisessä Suomessa leutoja, joten alimitoitettu rakenne voisi tässä toimia paremmin routanousun varmistamiseksi. Seurannat tulisi tehdä sekä koe- että vertailurakenteille ja tuloksia tulisi verrata toisiinsa.

Liikennesuorituksen selvittämiseksi tulee koerakenteen sijaita siten, että sen yli liikkuu raskasta liikennettä. Se voi olla esimerkiksi tontin sisäänajotiellä, vaa'alle johtavalla ajouralla tai kentällä mielellään siten, että renkaat menisivät aina samasta kohdasta. Rakenteen yli menevien akseleiden määrä tulee laskea ja sitä varten rakenteeseen tulee laittaa laskuri. Seurantajakson aikana rakenteen urautumista seurataan mittaamalla urasyvyyttä suunnitelmassa määrättyin väliajoin, esimerkiksi kerran vuodessa. Seurantajakson päätyttyä rakenne avataan kaivamalla pystysuora ura, jotta nähdään kuinka, syvälle rakenteeseen mahdollinen urautuminen ulottuu, ja arvioidaan sen perusteella rakenteen toimivuutta liikennesuorituksen alla.

Valimohiekan rakennettavuusominaisuuksia seurataan koerakentamisen aikana. Olennaisimmat kysymykset liittyvät materiaalin rakennettavuuteen ja tiivistettävyyteen. Myös rakentamisen aikaista pölyämistä tulee seurata. Rakentaminen voidaan tehdä oletettavasti perinteisellä maarakennuskalustolla ja menetelmillä. Tiivistystyö tehdään mahdollisimman lähellä valimohiekan optimivesipitoisuutta, joka on parannetulla Proctor kokeella määritettynä 15 %, jolloin maksimikuivairtiheys on $1,7 \text{ g/cm}^3$ (Vilenius 2019). Koska valimohiekan rakeisuus vastaa hyvin suodatinkerroksen rakeisuutta, voidaan tiivistystyössä käytettävä kalusto ja ylityskerrat valita alustavasti InfraRYL (2019) liitteen 2 taulukon 1 mukaan. Vaihtoehtoisesti parhaiten soveltuva tiivistysmenetelmä voidaan selvittää käyttämällä InfraRYL liitteen 2 mukaista koetiivistystä, jolloin voidaan selvittää optimaaliset kerrospaksuudet ja ylityskertamäärät käytettävissä olevalla kalustolla. Tiivistystyön onnistumista seurataan tiivistyksen aikana esimerkiksi säteilymittauslaitetta (Troxler tai vastaava) käyttämällä. Mittauksesta saatua kuivairtiheyttä verrataan laboratoriossa saatuun arvoon ja niiden suhteen eli tiiviysasteen tulee olla vähintään 95 %.

Koerakenteesta laaditaan koerakennusraportti, jossa kuvataan vähintään seuraavat asiat:

- hankkeen osapuolet ja yhteystiedot
- koerakenteiden tarkat sijainnit
- kuvaus toteutuneista rakenteista
- käytetyt työtavat, koneet ja tiivistystyön ylityskertamäärät
- rakentamisen työnaikaiset havainnot ja arvio olosuhteiden vaikutuksesta rakentamiseen ja lopputuloksen laatuun
- arvio rakenteen teknisestä kelpoisuudesta ja taloudellisuudesta. Lisäksi arvioidaan mahdollisia kehittämis- ja jatkotutkimustarpeita. (Koivisto et al. 2016; Gradientti 2017).

Väyläviraston (2020) ohjeen mukaan koerakenteen toimivuutta seurataan rakentamisen jälkeen lähtökohtaisesti kolme vuotta. Rakennetta tarkastellaan kaksi kertaa vuodessa, jolloin tarkastetaan rakenteen painumat ja halkeilut, jotka dokumentoidaan valokuvoin. Tarkastuksista laaditaan raportit, joissa arvioidaan rakenteen kuntoa. Mitoitusparametrien määrittäminen ja niiden vaatima instrumentointi tulee suunnitella tarkemmin yhdessä Väyläviraston kanssa.

9 Päästö- ja kustannuslaskenta

Infrarakentamisen ympäristövaikutukset ovat nousemassa koko ajan suurempaan rooliin päätöksenteossa, sillä luonnonvarojen kestävä käyttö ja päästöjen vähentäminen ovat välttämättömiä toimia kestävästä yhteiskunnan luomisesta. Ympäristövaikutuksia voidaan arvioida elinkaariarvioinnilla (Life Cycle Assessment, LCA), jolloin rakenteen koko elinkaaren aikaiset ympäristövaikutukset huomioidaan. Ympäristövaikutuksia voidaan tarkastella muun muassa ilmastonmuutoksen ja luonnonvarojen ehtymisen avulla. Rakenteen ilmastovaikutuksia arvioidaan usein päästölaskentaan perustuen, joka voidaan myös rajata koskemaan vain tiettyä osaa rakenteen elinkaaresta, esimerkiksi vain rakentamista. Usein päästölaskennassa tarkastellaan pelkkiä CO₂ -päästöjä tai lasketaan CO₂ -ekvivalentti, joka kuvaa kaikkia ilmastonmuutosta aiheuttavia ilmastopäästöjä hiilidioksidiksi muutettuna. (Teittinen 2019).

Infrahankkeissa on yleistymässä päästölaskentaan perustuva elinkaariarviointi eli hiilijalanjälkilaskenta, mutta toistaiseksi ei ole olemassa ohjeistusta siitä, miten päästöt infrahankkeelle tulisi laskea. Jotta päästölaskenta olisi luotettavaa ja vertailukelpoista, tulisi etenkin uusiomateriaaleja käytettäessä laskentaa varten olla materiaaleille yleisesti hyväksytyt päästökertoimet ja selkeät rajat mitkä uusiomateriaalin elinkaaren aikaiset vaiheet huomioidaan päästölaskennassa. Eurooppalaisen standardisointijärjestö CEN:n tekninen komitea TC 350 on kehittämässä laskentaa ohjaava standardia Sustainability on construction works – Sustainability assesment of civil engineering works – Calculation methods. (Pasanen & Miilumäki 2017; Teittinen 2019).

Talonrakennuksen elinkaariarvioinnin ja -kustannuslaskennan suorittamiseen on laadittu ohje, joka monilta osin on sovellettavissa myös infrarakentamiseen. Ohje perustuu standardeihin EN 15978 ja EN 15804 ja sen tarkoituksena on yhtenäistää kiinteistö- ja rakennusalan käytäntöjä rakennusten ympäristötehokkuuden ja kestävästä kehityksen mukaisen toimintatavan arvioinnissa. Ohjeessa kerrotaan, kuinka laskenta tulee rajata ja mitä tekijöitä tulee ottaa huomioon. Taulukossa 8 on ohjeen mukainen uusiomateriaalien päästöjen huomioiminen. (Pasanen & Miilumäki 2017; Green Building Council Finland 2019). Ohjeessa rakentamisen päästöt rajataan alkamaan jätteen End of Waste tilan saavuttamisesta. Toisaalta taas taulukon 8 mukaan jätteen jalostamisen päästöt tulisi laskea mukaan rakentamisen päästöihin, vaikka materiaalin jalostaminen usein tapahtuu jo ennen End of Waste statuksen saavuttamista. Lisäksi vain harvalla maarakentamiseen soveltuvista uusiomateriaaleista on virallinen End of Waste status, mutta materiaalin arvoketjusta sellainen voidaan yleensä määrittää laskentaa varten. Ohjeessa jää siis laskijan tulkittavaksi mikä lasketaan materiaalin jalostamiseksi ja mikä ei (Teittinen 2019). Teittinen haastatteli työssään asiantuntijoita, jotka olivat tehneet päästölaskentaa ja he olivat olettaneet uusiomateriaalit nollapäästöisinä eli kaikki materiaalin jalostuksesta syntyvät päästöt oli rajattu ulos. Ilmaston kannalta ei toki ole merkitystä missä vaiheessa materiaalin elinkaarta päästöt syntyvät, sillä kokonaismäärä pysyy rajauksista huolimatta aina samana.

Taulukko 8. Uusiomateriaalien päästöjen huomiointi päästölaskennassa (Green Building Council Finland 2019).

Materiaalin lähtötila	Vaatimukset / määritelmä	Huomioitavat päästöt
Ylijäämämateriaali	Materiaali on hankittu ylijäämänä alun perin muuhun kohteeseen	Kuljetus ja asennus
Jättemateriaali	Materiaali on jalostettu jätteestä	Jalostaminen, kuljetus ja asennus
Uusiokäyttö purkukohteesta	Materiaali tulee purkukohteesta käyttövalmiina osina tai aineksina	Kuljetus, kunnostaminen ja asennus

Tässä työssä vertaillaan seuraavaksi erilaisten valimohiekkaa sisältävien rakenteiden rakentamisen CO₂-päästöjä perinteisiin luonnonkiviaineksista tehtävien rakenteiden päästöihin. Laskenta rajataan alkamaan materiaalien jalostuksesta rakenteen valmiiksi saamiseen, jolloin ainoastaan materiaalin valmistuksen, kuljetuksen, levityksen ja tiivistyksen päästöt huomioidaan. Laskennat ovat yksinkertaistettuja ja niistä on jätetty pois kaikki rakenteille yhteiset rakennusosat kuten asfaltti, kantava kerros, maaleikkaukset, yms. Rakenteen oletetaan olevan 10 m leveä ja kaikkien materiaalien kuljetusmatkan oletetaan olevan 20 km. Laskennassa käytetyt päästökertoimet ovat peräisin Aulakoski et al. (2014) selvityksestä, jossa pilotoitiin panospohjaista CO₂-laskentaa väyläkohteessa. Rajauksista johtuen laskelma on vain suuntaa antava eikä sitä tule ajatella rakenteen todellisina päästöinä.

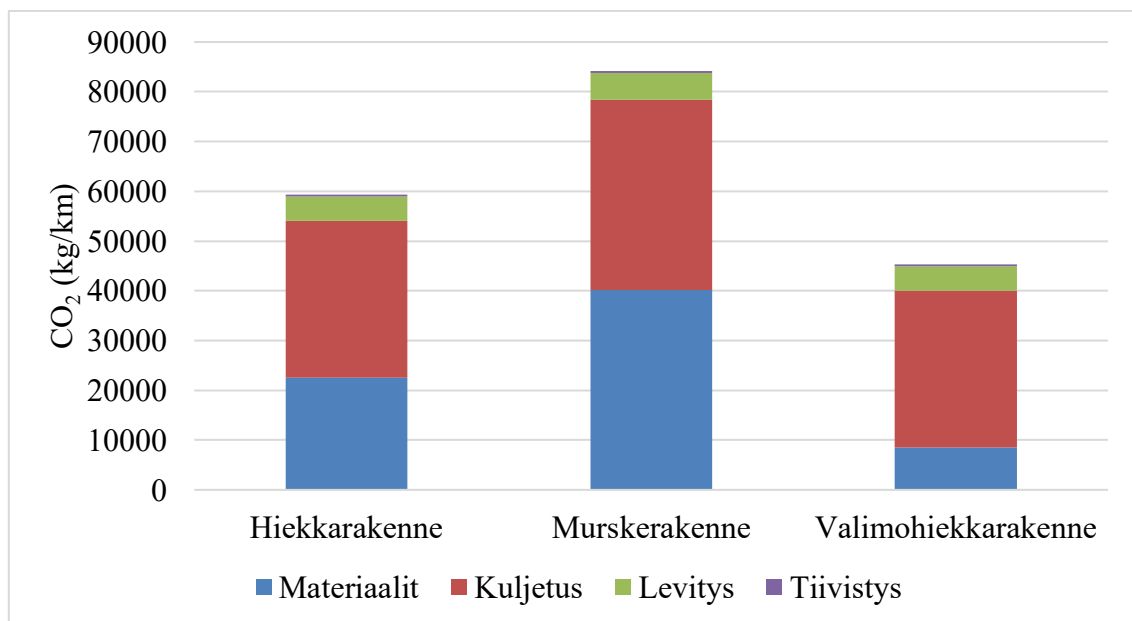
Vertailtavissa rakenteissa valimohiekalla tehdyn suodatinkerroksen päästöjä verrataan kahden perinteisistä maarakennusmateriaaleista tehtyyn rakenteeseen, joista toisessa suodatinkerros on tehty luonnonhiekasta ja toisessa suodatinkerros on korvattu suodatinkankaalla ja jakavaa kerrosta paksuntamalla. Laskennassa käytetyt vertailurakenteet on esitetty taulukossa 9. Päästökertoimet sekä laskennan tulokset on esitetty taulukossa 10 ja kuvassa 35.

Taulukko 9. Päästö- ja kustannuslaskennassa käytetyt vertailurakenteet.

Rakennusosa	Kerrospaksuus (m)		
	Hiekkarakenne	Murskerakenne	Valimohiekkarakenne
Jakavan kerroksen murske 0/63	0,3	1,29	0,3
Suodatinkerros, luonnonhiekk	0,89	0	0
Suodatinkerros, valimohiekk	0	0	0,89
Yhteensä	1,19	1,29	1,19

Taulukko 10. Päästölaskennassa käytetyt päästökertoimet ja laskennan tulos (Aulakoski et al. 2014).

Rakennusosa	Päästö- lähde	Panoksen päästökerroin (CO ₂)		Hiekkara- kenne	Murskera- kenne	Valimohiek- karakenne
				Hiilidioksidi CO ₂ (kg/km)	Hiilidioksidi CO ₂ (kg/km)	Hiilidioksidi CO ₂ (kg/km)
Jakava kerros	Materiaali	2,8	kg/m ³	8550	36765	8550
	Kuljetus	35,1	kg/h	8892	38236	8892
	Levitys	26,9	kg/h	1243	5347	1243
	Tiivistys	11,0	kg/h	92	368	92
Suodatinkerros (luonnonhiekk)	Materiaali	1,5	kg/m ³	13973		
	Kuljetus	35,1	kg/h	22611		
	Levitys	26,9	kg/h	3689		
	Tiivistys	11,0	kg/h	294		
Suodatinkerros (valimohiekk)	Materiaali	0	kg/m ³			0
	Kuljetus	35,1	kg/h			22611
	Levitys	26,9	kg/h			3689
	Tiivistys	11,0	kg/h			294
Suodatinkangas N3	Materiaali	0,3	kg/m ²		3400	
Kaikki yhteensä				59344	84115	45371



Kuva 35. Vertailurakenteiden CO₂-päästöt rakennettavaa kilometriä kohti.

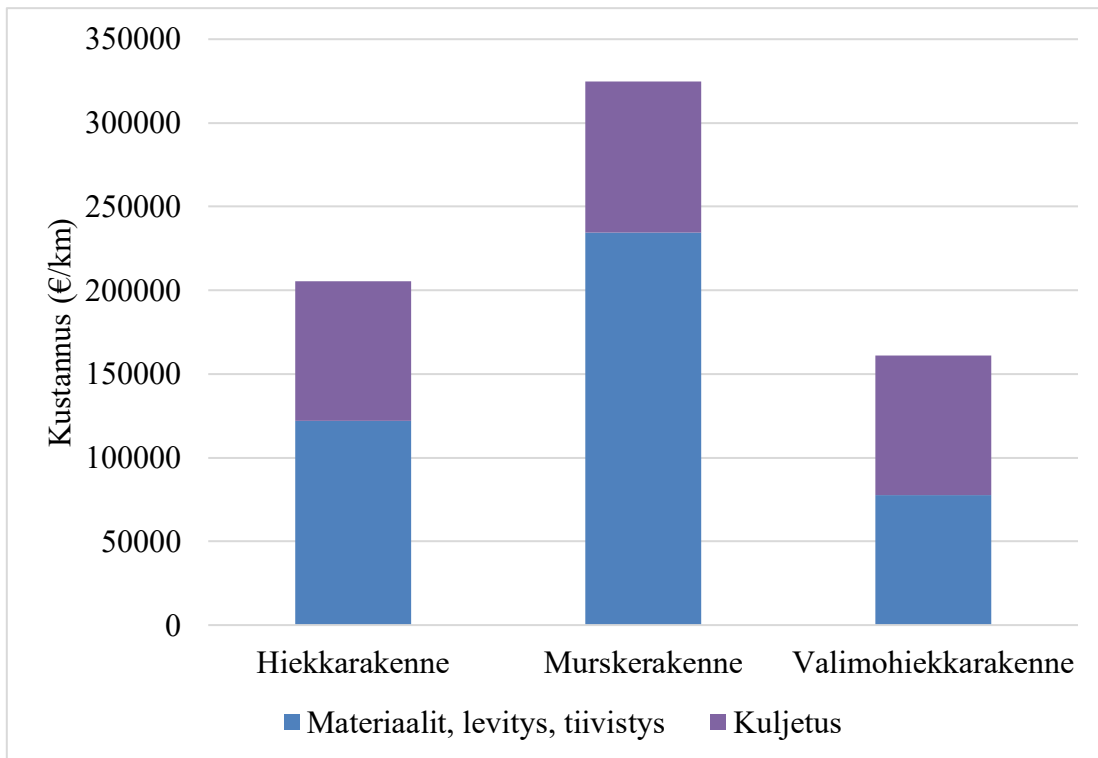
Tuloksista huomataan, että käyttämällä valimohiekkää suodatinkerroksessa voidaan vähentää hiilidioksidipäästöjä 24 % perinteiseen hiekkarakenteeseen verrattuna ja jopa 46 % murskerakenteeseen verrattuna. Perinteiseen hiekkarakenteeseen verrattuna valimohiekan käyttö pienentää huomattavasti rakenteessa käytettävien materiaalien jalostuksesta aiheutuvia päästöjä, koska valimohiekkä ei tarvitse jalostaa lainkaan alkuperäisen käytön jälkeen ja se on laskennassa oletettu nollapäästöiseksi. Laskennassa on oletettu materiaalien kuljetusmatkat samanlaisiksi, vaikka luonnonhiekan huono saatavuus kasvattaa kuljetusmatkoja etenkin

Etelä-Suomessa. Luonnonhiekan vähyys on johtanut monissa hankkeissa perinteisen hiekkarakenteen korvaamiseen murskerakenteella, joka taas johtaa hiekkaa paremmin lämpöä, jolloin routamitoitus johtaa paksumpaan rakennepaksuuteen. Murskeen valmistuksesta aiheutuu myös luonnonhiekkään verrattuna enemmän päästöjä ja nämä tekijät yhdessä aiheuttavat murskerakenteen materiaalien selvästi suuremmat päästöt. Suurempi materiaalitarve kasvattaa luonnollisesti myös kuljetuksesta aiheutuvia päästöjä.

Rakentamisen kustannukset ohjaavat päätöksentekoa päästölaskennan ollessa vasta tulossa mukaan päätöksentekoon. Siksi taulukossa 9 kuvattujen rakenteiden kustannukset on laskettu vastaavilla rajauksilla, kuin päästöt. Hinnat on hankittu Rapalin Fore-järjestelmästä, joka on infrarakentamisessa paljon käytetty kustannuslaskentaohjelmisto (Rapal Oy 2020). Laskennassa valimohiekan on oletettu olevan ilmaista. Foressa materiaalikustannukset sisältävät levityksen ja tiivistyksenkin, joten yhtä yksityiskohtaista vertailua kuin kuvassa 35 ei ole mielekästä tehdä. Laskennassa käytetyt yksikköhinnat ja tulokset on esitetty taulukossa 11 ja kuvassa 36.

Taulukko 11. Kustannuslaskennassa käytetyt yksikköhinnat ja laskennan tulos (Rapal Oy 2020).

Rakennusosa	Kustannus	Yksikköhinta	Hiekkara-	Murskera-	Valimohiek-	
			kenne	kenne	karakenne	
			€/km	€/km	€/km	
Jakava kerros	Materiaali	17	€/m ³	51000	219300	51000
	Levitys					
	Tiivistys					
	Kuljetus	7	€/m ³			
Suodatinkerros (luonnonhiekkä)	Materiaali	8	€/m ³	71200		
	Levitys					
	Tiivistys					
	Kuljetus	7	€/m ³			
Suodatinkerros (valimohiekkä)	Materiaali	0	€/m ³			0
	Levitys	3	€/m ³			26700
	Tiivistys					
	Kuljetus					
Suodatinkangas N3	Materiaali	1,5	€/m ²			
Kaikki yhteensä				205500	324600	161000



Kuva 36. Vertailurakenteiden kustannukset.

Huomataan, että materiaalikustannukset yhdessä levityksen ja tiivistyksen kanssa aiheuttavat merkittävän osan kustannuksista ja siksi murskerakenne on tarkastelluista vaihtoehdoista kallein. Valimohiekkaa käyttämällä voidaan pienentää kustannuksia 22 % perinteiseen hiekkarakenteeseen verrattuna ja jopa 50 % murskerakenteeseen verrattuna. Hiekkarakenteen ja valimohiekkarakenteen ainoa ero johtuu materiaalikustannuksesta, mutta pelkästään silläkin saavutetaan jo selvää säästöä. Luonnonhiekan huonosta saatavuudesta johtuen sen kuljetuskustannukset saattavat todellisuudessa olla huomattavasti suuremmat kuin tässä vertailussa.

Valimohiekan käytön lisääminen voisi nopeutua erilaisia kannustimia käyttämällä. Tällainen voisi olla esimerkiksi luonnonkiviaineksiin sovellettava materiaalivero. Paikallisesti myös valimot voivat lisätä materiaalin houkuttelevuutta sen hinnoittelulla. Tämän työn kustannuslaskennassa valimohiekan materiaalikustannus oli 0 €, mutta materiaalin houkuttelevuutta voisi lisätä, jos urakoitsijalle maksaisi valimohiekan käytöstä. Hinta voisi olla esimerkiksi neljäsosa valimoiden nykyisistä kaatopaikkamaksuista, jolloin valimoiden kannalta kustannukset alenisivat merkittävästi. Toinen vaihtoehto voisi olla tarjota valimohiekkaa urakoitsijoille ilmaiseksi rakennuskohteeseen toimitettuna.

10 Johtopäätökset

Kirjallisuuskatsauksen mukaan kerrosstabiloituun kantavaan kerrokseen kohdistuvat rasitukset johtuvat paljolti ilmastosta ja liikenteestä tai molemmista yhtä aikaa. Ilmastosta johtuvat rasitukset ovat veteen, lämpötilaan tai molempiin liittyviä. Kun taas liikenteestä johtuvat rasitukset ovat useimmiten nopeita ja usein toistuvia syklisiä kuormituksia. Tässä työssä selvitettiin valimohiekkaa sisältävän kerrosstabiloidun materiaalin kestävyyttä edellä mainittuja rasituksia vastaan laboratoriotutkimuksin. Lisäksi tarkasteltiin valimohiekan käytön edistämistä kuvaamalla valimohiekan tuotteistamisprosessi, suunnittelemalla koerakenne sekä tekemällä päästö- ja kustannuslaskenta.

Puristuslujuuskokeiden perusteella huomattiin kaikkien valimohiekkaa 25 % ja kalliomursketta 75 % sisältävien seosten omaavan potentiaalia stabiloiduksi kantavaksi kerrokseksi, sillä ne täyttivät Päälysrakenteen stabilointiohjeessa (2007) esitetyt puristuslujuusvaatimukset. Pakkasrasituksen vaikutuksia valimohiekkaa ja kalliomursketta sisältäviin sideaineseoksiin tutkittiin routanousukokeilla ja jäädytys-sulatuskokeilla. Kaikki testatut seokset osoittautuivat routimattomiksi ja täyttivät stabilointiohjeen jäädytys-sulatuskestävyydelle asetetun vaatimuksen. Kapillaarisuus- ja vedenläpäisevyysominaisuudetkaan eivät muodostuneet tulosten perusteella ongelmaksi. Liikenteestä aiheutuvia rasituksia ja stabiloitujen materiaalien käyttäytymistä tutkittiin tekemällä syklisiä kolmiakselikokeita. Kokeista saatiin jäännösmoduulit erilaisiin jännitystiloihin kuvaamaan materiaalin kimmoista muodonmuutoskäyttäytymistä.

Ecolanilla stabiloidut seokset vaikuttaisivat suoriutuvan parhaiten puristuslujuus- ja pakkasrasitustulosten perusteella. Vaikka kyseisen seoksen kapillaarisuus- ja vedenläpäisevyysominaisuudet eivät olleet tämän tutkimuksen parhaita niillä ei kuitenkaan havaittu heikentävää vaikutusta seoksen toimivuuteen.

Betonimursketta ja valimohiekkaa sisältävistä seoksista WFS 25 % + BeM I 75 % täytti BeM II luokan betonimurskeelle asetetun puristuslujuusvaatimuksen ja soveltuisi siten käytettäväksi kantavassa tai jakavassa kerroksessa. Seokselle ei tehty muita kokeita, joten veden- ja pakkasenkestävyyteen ei voida ottaa kantaa. Ennen jatkotutkimusten aloittamista tulisi kuitenkin selvittää betonimurskeen tuottajien kanssa sekoittamisen mielekkäisyys betonimurskeen kannalta.

Tuotteistamisella on tarkoitus helpottaa ja lisätä valimohiekan käyttöä maarakentamisessa. Tämän työn perusteella valimohiekka kannattaa tuotteistaa ensin suodatinkerroksessa käytettäväksi ja miettiä myöhemmin mahdollista seoksen tuotteistamista. Materiaalimäärän vähyydestä johtuen Väyläviraston ja ELY-keskusten sijasta valimopaikkakunnat voisivat olla mielenkiintoisempia asiakkaita, koska hankkeet olisivat pienempiä ja kuljetusmatkat lyhyempiä.

Tässä työssä tehdyn päästö- ja kustannuslaskennan perusteella valimohiekkaa käyttämällä voidaan pienentää suodatin- ja jakavan kerroksen rakentamisen päästöjä jopa 46 % ja kustannuksia jopa 50 %. Työssä huomattiin, että laskennan rajauksilla on suuri vaikutus laskennan lopputulokseen. Laskentaa ohjaava standardi ja ohjeistus on kuitenkin jo tekeillä.

Yhteenvedon voidaan todeta, että tämän työn perusteella valimohiekka soveltuu teknisiltä ominaisuuksiltaan käytettäväksi stabiloidun kantavan kerroksen runkoaineena. Teknitaloudellisesti parhaan seossuhteen ja sideaineen löytyminen vaatii yhä lisää laboratoriotutkimuksia, koerakentamista, kustannus- ja päästölaskentaa sekä markkinatutkimusta.

Tämän diplomityön aikana ilmenneet jatkotutkimustarpeet ovat:

- Ecolanilla stabiloiduilla seoksilla saatavat puristuslujuudet ovat niin suuria, että sideaineen määrää olisi varaa pienentää. Tai vaihtoehtoisesti valimohiekan osuutta voisi lisätä. Näistä on Aalto-yliopistossa jatkotutkimus meneillään, jonka tulokset julkaistaan myöhemmin.
- Tuhkilla stabiloitujen seosten jäädytys-sulatuskokeen tekeminen sitten, kun lujuuden kehitys on jo pysähtynyt tai hidastunut merkittävästi.
- Vesiupotuksen käyttö jälkihoituhuoneen sijasta koekappaleiden ikäännytyksessä. Riskinä vesiupotuksessa on koekappaleiden hajoaminen sitoutumisen alkuvaiheessa, mikäli hienoaines lähtee veden mukaan. Vesiupotuksen jälkeen koekappaleet olisivat vedellä kyllästettyjä ja siten alttiimpia pakkasen aiheuttamille vaurioille. Voisi tehdä routanousukokeen, jäädytys-sulatuskokeen ja puristuslujuuskokeen. Puristuslujuuskokeet voisi tehdä sekä vesiupotuksessa, että jälkihoituhuoneessa olleille koekappaleille, jolloin voisi laskea lujuuden suhteen jäädytys-sulatuskokeen tapaan. Vedellä kyllästyneestä puristuslujuudesta lisää Thom:in (2008) kirjan luvussa 2.2.3.1.
- Syklisen kolmiakselikokeen siirtymät tulisi mitata suoraan koekappaleen kyljestä. Tällöin tulos olisi teoriassa tarkempi, mutta ongelmaksi saattaisi muodostua siirtymäantureiden kiinnittäminen koekappaleeseen siten, että koekappale pysyisi ilmatii-
viinä.
- Sykliset kolmiakselikokeet murtoon asti. Tällöin saataisiin parempi käsitys pitkäaikaiskestävyydestä liikennekuormituksen alla.
- Staattiset kolmiakselikokeet E-moduulin määrittämiseen.
- Koerakenteen tarkempi suunnittelu ja toteutus oikeaan kohteeseen.
- Päästölaskennan päivittäminen, kun laskentaa ohjaava standardi valmistuu.

Lähdeluettelo

Lait:

Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto 2006. *EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EY) N:o 1907/2006*. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2006:396:FULL&from=FI>.

Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto 2011. *EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON ASETUS (EU) N:o 305/2011*. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011R0305&from=FI>.

Valtioneuvosto 2014. *FINLEX*® - *Ajantasainen lainsäädäntö: Ympäristönsuojelulaki 527/2014*. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140527>.

Valtioneuvosto 2013. *FINLEX*® - *Säädökset alkuperäisinä: Valtioneuvoston asetus kaatopaikoista*. 331/2013. Käyty: 17.12.2019. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130331>.

Valtioneuvosto 2017. *FINLEX*® - *Säädökset alkuperäisinä: Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa*. 843/2017. Käyty: 17.12.2019. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170843>.

Standardit:

Suomen standardisoimisliitto SFS 1996. *SFS-EN 933-2. KIVIAINESTEN GEOMETRISTEN OMINAISUUKSIEN TESTAUS. OSA 2: RAKEISUUDEN MÄÄRITTÄMINEN. SEULASARJAT, AUKKOJEN NIMELLISKOKO*. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://online.sfs.fi>.

Suomen standardisoimisliitto SFS 2002. *SFS-EN 13057. BETONIRAKENTEIDEN SUOJAUS- JA KORJAUSAINEET JA NIIDEN YHDISTELMÄT. MENETELMÄT. KAPILLAARISEN VEDENIMEYTYMISEN MÄÄRITTÄMINEN*. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/>.

Suomen standardisoimisliitto SFS 2003. *SFS-EN 13286-41. SITOMATTOMAT JA HYDRAULISESTI SIDOTUT SEOKSET. OSA 41: HYDRAULISESTI SIDOTTUJEN SEOSTEN PURISTUSLUJUUDEN MÄÄRITYSMENETELMÄ*. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/>.

Suomen standardisoimisliitto SFS 2004. *SFS-EN 13286-7. SITOMATTOMAT JA HYDRAULISESTI SIDOTUT SEOKSET. OSA 7: SYKLINEN KOLMIAKSIAALIKOE SITOMATTOMIA KIVIAINESOSIA VARTEN*. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/>.

Suomen standardisoimisliitto SFS 2008. *SFS-EN 13242 + A1. MAA- JA VESIRAKENTAMISESSA JA TIERAKENTEISSA KÄYTETTÄVÄT SITOMATTOMAT JA HYDRAULISESTI SIDOTUT KIVIAINEKSET*. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/>.

Suomen standardisoimisliitto SFS 2012a. *SFS-EN 12697-19. BITUMINOUS MIXTURES. TEST METHODS FOR HOT MIX ASPHALT. PART 19: PERMEABILITY OF SPECIMEN*. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/>.

Suomen standardisoimisliitto SFS 2012b. *SFS-EN 15804. Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products*. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/>.

Suomen standardisoimisliitto SFS 2012c. *SFS-EN 15978 SUSTAINABILITY OF CONSTRUCTION WORKS. ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL PERFORMANCE OF BUILDINGS. CALCULATION METHOD*. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/>.

Suomen standardisoimisliitto SFS 2012d. *SFS-EN 197-1. SEMENTTI. OSA 1: TAVALLISTEN SEMENTTIEN KOOSTUMUS, LAATUVAATIMUKSET JA VAATIMUSTENMUKAISUUS*. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/>.

Suomen standardisoimisliitto SFS 2012e. *SFS-EN 933-1. KIVIAINESTEN OMINAISUUKSIEN TESTAUS. OSA 1: RAKEISUUDEN MÄÄRITTÄMINEN. SEULONTAMENETELMÄ*. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/>.

Suomen standardisoimisliitto SFS 2014. *CEN/TS 13286-54. UNBOUND AND HYDRAULICALLY BOUND MIXTURES. PART 54: TEST METHOD FOR THE DETERMINATION OF FROST SUSCEPTIBILITY. RESISTANCE TO FREEZING AND THAWING OF HYDRAULICALLY BOUND MIXTURES*. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/>.

Suomen standardisoimisliitto SFS 2016. *SFS 7005. Sitomattomiin ja hydraulisesti sidottuihin materiaaleihin käytettäviltä kiviaineksilta talonrakentamisessa, maa- ja vesirakenteissa sekä tierakenteissa vaadittavat ominaisuudet ja niille asetetut vaatimustasot*. Suomen standardisoimisliitto SFS. Helsinki. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/>.

Muut:

American Foundry Society 2019. *Bases and subbases*. American Foundry Society AFS. Käyty 30.1.2020. Saatavissa: <https://www.afsinc.org/bases-and-subbases>

- Aulakoski, A., Montin, P., Lydman, P. & Häyrinen, K. 2014. *Panospohjaisen CO₂-laskennan pilotointi väylähankkeessa. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 18/2014*. Helsinki. ISBN 978-952-255-443-7.
- Belt, J., Lämsä, V., Savolainen, M & Ehrola, E. 2002. *Tierakenteen vaurioituminen ja tiestön kunto. Tiehallinnon selvityksiä 15/2002*. Helsinki. ISBN 951-726-881-5.
- Doré, G. & Zubeck, H.K. 2009. *Cold Regions Pavement Engineering*. 1. painos. ASCE Press. Reston, Yhdysvallat. 401 s. ISBN 978-0-07-160088-0.
- Ehrola, E. 1996. *Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet*. Oulu: Rakennustieto Oy. ISBN 951-682-338-6.
- Finnsementti Oy 2019. *Pikasementti*. Käyty 19.12.2019. Saatavissa: https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Pikasementti_fi.pdf.
- Gradientti 2017. *Valimoteollisuuden sivutuotteet-esiselvitys*. Lahti. Käyty 27.11.2019. Saatavissa: https://issuu.com/prizztech/docs/valimoteollisuuden_sivutuotteet-esi.
- Green Building Council Finland 2019. *Elinkaaren hiilijalanjälki*. Käyty 3.12.2019. Saatavissa: <https://figbc.fi/elinkaarimittarit/>.
- Harju, I. 2017. *UUSIOMATERIAALIT PÄÄLLYSTETTYJEN TEIDEN KANTAVAN KERROKSEN STABILOINNISSA*. Diplomityö. Oulun yliopisto. Oulu. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: [http://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/Harju Ilari. 2017. Uusiomateriaalit päällystettyjen teiden kantavan kerroksen stabiloinnissa. Oulun yliopisto Diplomityö. 128 s.pdf](http://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/Harju_Ilari_2017_Uusiomateriaalit_päällystettyjen_teiden_kantavan_kerroksen_stabiloinnissa.pdf).
- Honkonen, T. & Kulovesi, K. 2019. *PARIISIN SOPIMUS JA KANSAINVÄLISET ILMASTOTOIMET. Raportti 5/2019*. Käyty: 12.12.2019. Saatavissa: https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2019/10/Pariisin-sopimus-ja-kansainvaliset-ilmastotoimet_final.pdf.
- Jääskeläinen, R. 2011. *Geotekniikan perusteet*. Jyväskylä: Tammertekniikka. ISBN 978-952-5491-50-0.
- Kleven, J.R., Edil, T.B. & Benson, C.H. 2000. *Evaluation of Excess Foundry System Sands for Use as Subbase Material*. Transport Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1714. doi: <https://journals.sagepub.com/doi/10.3141/1714-06>
- Koivisto, K., Forsman J. & Vaajasaari K. 2016. *UUSIOMATERIAALIEN TUOTTEISTAMISOHJE MAARAKENTAMISEEN. UUMA 2*. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: http://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/images/Tuotteistamisohje_2016_05_20_liite_1_yhdistetty.pdf.
- Kolisaja, P. 1997. *Resilient Deformation Characteristics of Granular Materials. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Julkaisuja 223*. Tampere: Tampereen teknillinen korkeakoulu.

- Kortelainen, L. 2019. *Stabiloidun kantavan kerroksen pakkaskestävyys*. Diplomityö. Aalto-yliopisto Espoo. Käyty 5.8.2019. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201906234153>.
- Laaksonen, R., Kivikoski, H., Pienimäki, M., Korkiala-Tanttu, L. & Törnqvist, J. 2004. *Deformaation hallinta tien rakennekerroksissa. Tiehallinnon selvityksiä 57/2004*. Helsinki: Tiehallinto. ISBN 951-803-392-7.
- Lee, K., Kodikara, J. & Bouazza, A. 2004. *Modeling and laboratory assessment of capillary rise in stabilized pavement materials*. Transportation Research Record (1868). DOI: 10.3141/1868-01.
- Liikennevirasto 2018. *Tierakenteen suunnittelu. Liikenneviraston ohjeita 38/2018*. Helsinki. ISBN 978-952-317-632-4.
- Lätti, E. 2016. *Vaihtoehtoisten maarakennusmateriaalien mekaaniset ominaisuudet. Opinnäytetyö 2/2016*. Helsinki: Liikennevirasto. ISBN 978-952-317-207-4.
- Melander, M. 2018. *Kivituhan soveltuminen sidotun kantavan kerroksen runkoaineeksi*. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo. Käyty: 18.10.2019. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201806293833>.
- Meskanen, S. & Höök, T. 2016. *Hiekkamuottimenetelmät. ValuAtlas - Valimotekniikan perusteet*. Käyty: 4.11.2019. Saatavissa: <https://docplayer.fi/16607683-Hiekkamuottimenetelmat.html>.
- Onninen, H. 2001. *Menetelmäkuvaus TPPT 6. ROUTANOUSUKOE. Routimiskertoimen (SP) määrittäminen laboratorioissa*. Espoo. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://docplayer.fi/24895107-Menetelmakuvaus-tppt-6-routanousukoe-routimiskertoimen-sp-maaritys-laboratorioissa-tien-pohja-ja-paallysrakenteet-tutkimusohjelma.html>
- Orkas J., Vehmas, M., Wahlström, M. & Laine-Ylijoki, J. 2001. *Valimoiden ylijäämähiekan hyötykäyttö- ja sijoituskelpoisuus, osa 2*. TKK-VAL-1. Teknillinen korkeakoulu, Valimotekniikan laboratorio. Espoo. ISBN 951-22-5522-7.
- PANK 2008. *KERROSSTABILOINTIMASSAN JÄÄDYTYKSEN SUKOSTUSTEHTÄVÄT. PANK 4305*. Käyty 20.12.2019. Saatavissa: http://pank.fi/file/400/387_pank_4305_2008.pdf.
- Pasanen, P. & Miilumäki, N. 2017. *Infrahankkeiden EN-standarddeja noudattava hiilijalanjälki- ja elinkaariarviointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 20/2017*. Helsinki. ISBN 978-952-317-386-6.
- Pesu, J. 2010. *ROUTANOUSUKOKEEN KEHITTÄMINEN*. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://docplayer.fi/105849391-Jarmo-pesu-routanousukokeen-kehittaminen.html>.
- Rakennustieto 2019. *InfraRYL 2019/1*. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://ryl.rakennustieto.fi/teknisetvaatimukset>.

Ramboll 2012. *TUHKARAKENTAMISEN KÄSIKIRJA. Energiantuotannon tuhkat väylä-, kenttä- ja maarakenteissa.* Luopioinen.

Rapal Oy 2020. Fore. Käyty 17.1.2020. Saatavissa: <https://portal.fore.fi/>

Rathmayer, H. 1989. *Frost in geotechnical engineering. Volume 1.* Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT. ISBN 951-38-3313-5.

Rudus 2017. *Betoroc®-murskeohje. 1/2017. Käyttöohje rakentamiseen ja suunnitteluun.*
 Käyty: 25.9.2019. Saatavissa:
https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwi4gbC0_YHIAhXGepoKHdxFDIAQFjAAegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fwww.rudus.fi%2FDownload%2F24032%2FBetoroc-murske%2520ohje.pdf&usg=AOvVaw0NT5pSDF-SxsDdSg0TEaXF.

Sappinen, T. 2018a. *Valimohiekat.* UKI2 kurssin luentokalvot. Aalto-yliopisto. Espoo.

Sappinen, T. 2018b. *Valimohiekkojen terminen elvytys osana teollista symbioosia.* Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/30093>.

Teittinen, T. 2019. *Uusiomaarakentamisen ympäristövaikutusindikaattorit ja päästölaskenta tie- ja katurakentamisessa.* Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/37164/master_Teittinen_Tuuli_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Thom, N. 2008. *Principles of pavement engineering.* Nottingham: Thomas Telford Publishing. ISBN 978-0-7277-3480-8.

Tieaho, I. 2013. *Roudan syvyyden ja routanousun mallintaminen Luoman koekohteessa.* Diplomityö. Aalto-yliopisto. Käyty: 13.12.2019. Saatavissa: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/30148/master_tieaho_ilkka_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Tiehallinto 2002. *Stabilointiohje.* Helsinki. ISBN 951-726-843-2.

Tiehallinto 2007. *Päällysrakenteen stabilointi.* Helsinki: Edita Prima Oy. ISBN 978-951-803-970-2.

Törnqvist, J. & Kummala, J. 2001. *ICT-koe tien rakennekerrosmateriaalinen deformaatioherkkyyden määrittämisessä. Tiehallinnon selvityksiä 63/2001.* Helsinki. ISBN 951-726-815-7.

TVL 1979. *Kipsin ja turvetuhkan käyttö stabiloinnissa.* Kuopio. Käyty: 21.10.2019. Saatavissa: <https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/131793/tie198.pdf?sequence=1>.

Väylävirasto 2020. *UUSIOMATERIAALIEN KÄYTTÖ VÄYLÄRAKENTAMISESSA. Väyläviraston ohjeita 6/2020. Luonnos 24.1.2020.* Helsinki: Väylävirasto. Verkkojulkaisu. Saatavissa: www.vayla.fi.

Vilenius, M. 2019. *Valimohiekan tekniset ominaisuudet ja uusiokäyttö maarakentamisessa.* Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo. Käyty: 20.12.2019. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/40951>.

Zhang, Y. et al. 2019. *Assessment for sustainable use of quarry fines as pavement construction materials: Part II-stabilization and characterization of quarry fine materials.* Materials. Saatavissa: www.mdpi.com/journal/materials.

Liiteluettelo

Liite 1. KaM 0/32 CE-merkintä ja suoritustasoilmoitus. 3 sivua.

Liite 2. Pikasementin tuote-esitys. 1 sivu.

Liite 3. Koekappaleiden valmistustiedot. 1 sivua.

Liite 4. Routanousukoetulokset. 3 sivua.

Liite 5. Jäädytys-sulatuskokeen lämpötiladata. 1 sivu.

Liite 6. Väyläviraston materiaalihyväksyntään tarvittavat tutkimukset ja tutkimusmenetelmät. 1 sivu.

Liite 7. Koerakenteen mitoitus. 1 sivu.

Liite 1. KaM 0/32 CE-merkintä ja suoritustasoilmoitus

Ly 2163026-3
 DESTIA Oy
 Heidehofintie 2
 PL 206
 01301 VANTAA

11865/3762/4/2014
 14

SFS-EN 13242

Tie- ja vesirakentamisessa ja tierakenteissa käytettävät sitomattomat ja hydraulisesti sidotut kiviainekset
 Koskenkylä, Loviisa KaM 0/32 mm
 Sitomattomat kantavan kerroksen kiviainekset, Kalliokiviainekset

Raekoko	Nimike	0/32 mm
Rakeisuus	Luokka	G _A 85
Väliseulan raja-arvot ja sallitut poikkeamat tyyppikäyrästä	Luokka	G _{Tc} 20
Raemuoto	Luokka	FI ₃₅
Kiintotiheys	Ilmoitettu arvo	NPD
Puhtaus		
Hienoaineksen määrä	Luokka	f ₅
Murtopintaisen rakeiden osuus	Luokka	NPD
Iskunkestävyys	Luokka	LA ₂₀
Vedenimeytyminen	Ilmoitettu arvo	WA ₂₄ 1
Jäädytys-sulatuskestävyys		hyväksytty, WA ₂₄ 1
Koostumus/määrä		hyväksytty, kalimaasälpä 35 %, kvartsi 27 %, plagioklaasi 20 %, biotiitti 12 %, saussuriitti 4 %, opaakki 2 %
Happoliukoiset sulfaatit	Luokka	AS _{NR}
Kokonaisrikki	Luokka	S _{NR}
Vaaralliset aineet		
Radioaktiivinen säteily	ilmoitettu arvo	I ₁ =0,67 I ₂ =0,27 I ₃ =0,10

Lisätiedot CE-merkintään:**Koskenkylä, Loviisa KaM 0/32 mm****Sitomattomat kantavan kerroksen kiviainekset, kalliokiviainekset****Keskiarvokäyrä:**

Seula, mm	Läpäisy %
45	100
31,5	96
22,4	83
16	70
11,2	58
8	49
5,6	40
4	33
2	22
1	15
0,5	11
0,25	8
0,125	6
0,063	4,5

Suoritustasoilmoitus (DoP)

No. 11865/3762/7/2014

1. Tuotteen tunnistus

Kantavan kerroksen kiviaines KaM 0/32, Koskenkylä, Loviisa

2. Tyypinnumero

Loviisa, Koskenkylä KaM 0/32 KK, 4/2014

3. Käyttökohde

Tie- ja katurakenteen kantavassa kerroksessa käytettävä kiviaines

4. Valmistajan nimi ja osoite

Destia Oy, Heidehofintie 2, 01301 Vantaa

y-tunnus: 2163026-3

6. Rakennustuotteen suoritustason pysyvyyden arviointi- ja varmennusmenettely

AVCP 4

9. Laatutiedot

Olellaiset ominaisuudet	Vaatimuksia koskevat kohdat tässä ja muissa eurooppalaisissa standardeissa	Luokka	Standardi
Raemuoto, raekoko, kiintotiheys	Raekoko	0/32 mm	SFS-EN 13242:2013
	Rakeisuusluokka	G _A 85	
	Raemuoto	FI ₃₅	
	Kiintotiheys	NPD	
Puhtaus	Hienoaineksen määrä	f ₅	
	Hienoaineksen laatu	MB _F NT	
Murtopintaisten	Murtopintaisten rakeiden osuus	NPD	
Iskunkestävyys	Iskunkestävyys	LA ₂₀	
Tilavuuden pysyvyys	Tilavuuden pysyvyys	NPD	
Vedenimeytyminen	Vedenimeytyminen	WA ₂₄ 1	
Koostumus / Määrä	Petrografinen koostumus	hyväksytty, kalimaasälpä 35 %, kvartsi 27 %, plagioklaasi 20 %, biotiitti 12 %, saussuriitti 4 %, opaakki 2 %	
	Happoliukoiset sulfaatit	NPD	
	Kokonaisrikki	NPD	
Kulutuskestävyys	Kulutuskestävyys	NPD	
Vaaralliset aineet	Radioaktiivinen säteily	I ₁ =0,67 I ₂ =0,27 I ₃ =0,10	
Rapautumiskestävyys	Magnesium sulfaattitesti	NPD	
	Sonnenbrand	NPD	
Jäädätyssulatuskestävyys	Veden absorptio	NPD	
	Jäädätyssulatuskestävyys	hyväksytty, WA ₂₄ 1	

10. Edellä 1. ja 2. kohdalla yksilöidyn tuotteen suoritustasot ovat kohdassa 9. ilmoitettujen suoritustasojen mukaiset. Tämä suoritustasoilmoitus on annettu 4. kohdassa ilmoitetun valmistajan yksinomaisella vastuulla: Allekirjoitettu valmistajan puolesta:

Tuusula 30.4.2014

Paikka ja Aika



Ilkka Rantala

Pikasementti

Sementit
Kesäkuu 2019

Erittäin nopeasti kovettuva portlandsementti

CEM I 52,5 R

Sementin ominaisuuksia	Tulokset	Vaatimukset
Lujuus 1d	28...32 MPa	ei vaatimusta
Lujuus 2d	41...46 MPa	≥ 30,0 MPa
Lujuus 7d	48...60 MPa	ei vaatimusta
Lujuus 28d	57...68 MPa	≥ 52,5 MPa
Sitoutumisajan alku	120...180 min	≥ 45 min
Tilavuuden pysyvyys	0...2,0 mm	≤ 10 mm
Hienous (Blaine)	490...570 m ² /kg	ei vaatimusta
Hekkutushäviö	1,8...3,0 %	≤ 5,0 %
Liukenematon jäännös	0,3...0,9 %	≤ 5,0 %
SO ₃	3,5...3,9 %	≤ 4,0 %
Kloridipitoisuus	≤ 0,08 %	≤ 0,10 %
Cr6+	0...2 mg/kg	≤ 2 mg/kg

Sementtien sisältämät seosaineet	%	Vaatus
Yhteensä	0...5 %	≤ 5,0 %
Kalkkikivi	0...5 %	
Masuunikuona		


Klinkkerin tyypillinen kemiallinen koostumus	%
CaO	63...65 %
SiO ₂	20...22 %
Al ₂ O ₃	4,0...5,4 %
Fe ₂ O ₃	2,8...3,3 %
MgO	2,5...3,2 %

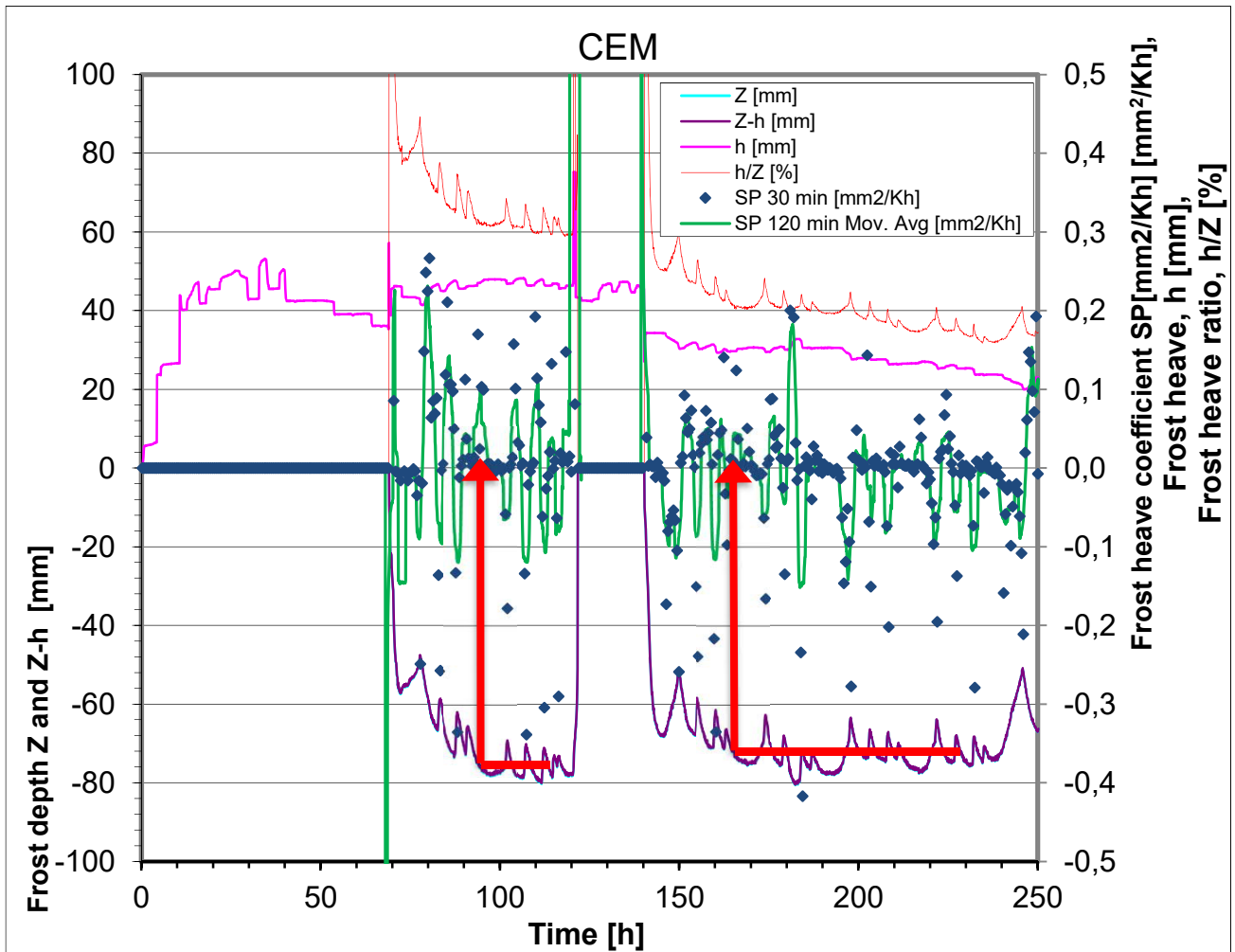
FINNSEMENTTI
A CRH COMPANY

Finnsementti Oy
21600 Parainen | Puh. 0201 206 200
www.finnsementti.fi | www.semnet.fi
info@finnsementti.fi
etunimi.sukunimi@finnsementti.fi



ISO 9001
ISO 14001
Inspecta Sertifiointi Oy

	Customer:
	Tester: Eero Juuti
	Project name: Kiertovalu
	Project number:
	Point No:
	Sampling depth:
	Specimen id:
Sampling date:	



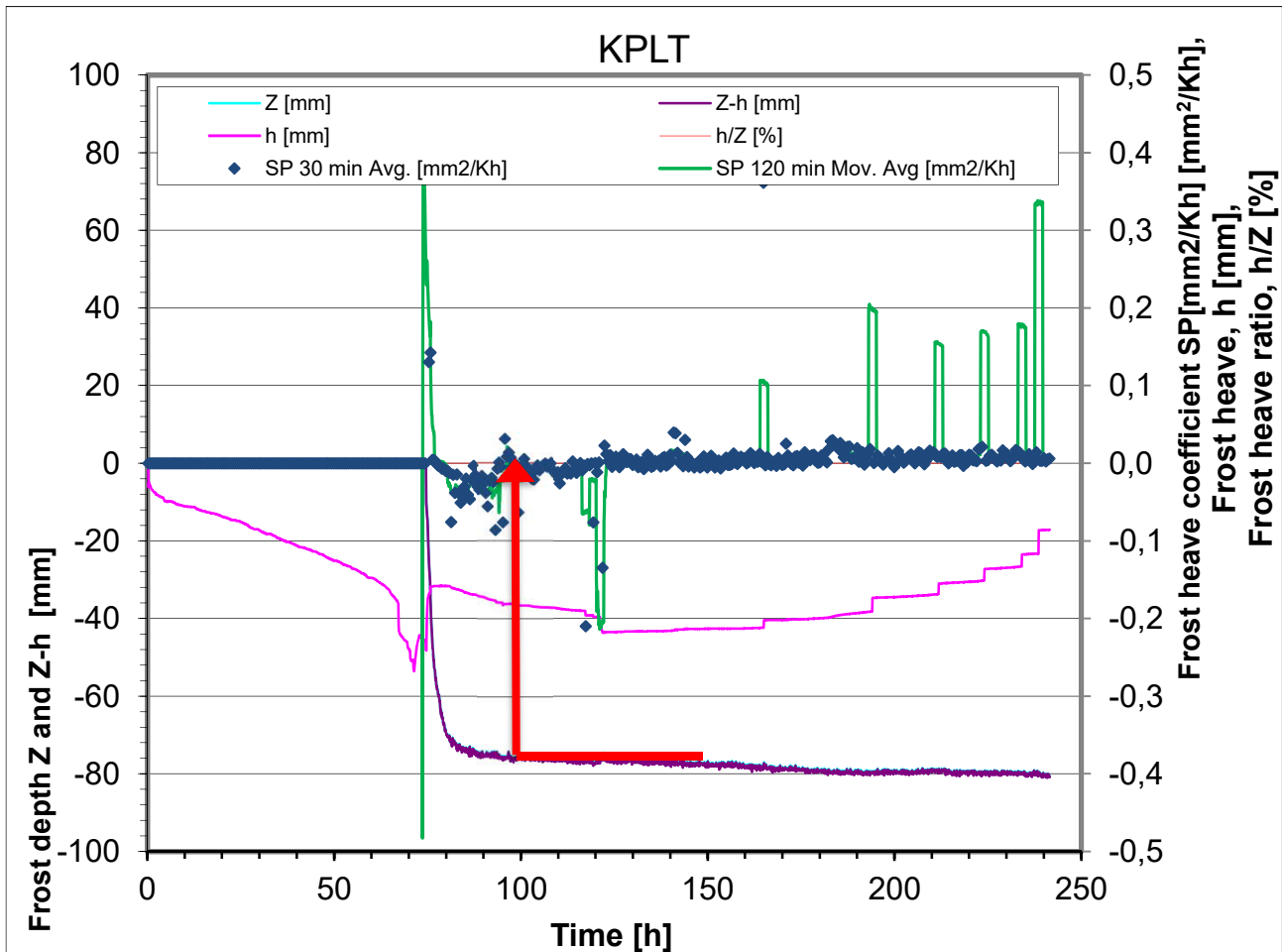
Results			
SP	0,04	mm ² /Kh	
Load	2,4	kPa	
Water content	before test	6	%
	after test	7	%

Notes:

Koe tehtiin väistötilassa, jossa lämpötila ei pysynyt tasaisena. Siitä seurasi merkittävä vaihtelu roudansyvytydessä.




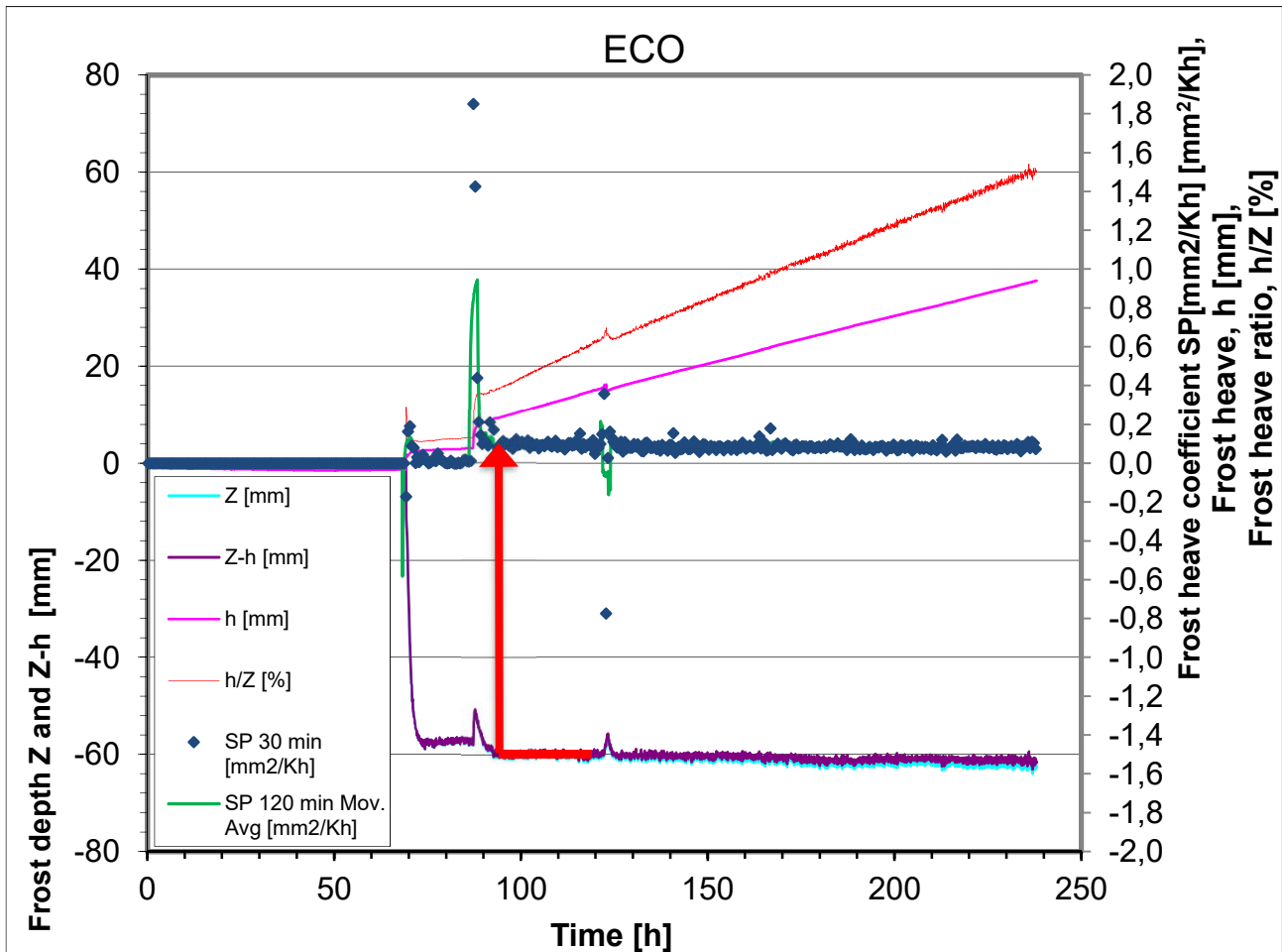
Customer:	
Tester:	Eero Juuti
Project name:	Kiertovalu
Project number:	
Point No:	
Sampling depth:	
Specimen id:	
Sampling date:	



Results			
SP	0,01	mm ² /Kh	
Load	2,4	kPa	
Water content	before test	7,0	%
	after test	8,0	%

Notes:

	Customer:
	Tester: Eero Juuti
	Project name: Kiertovalu
	Project number:
	Point No:
	Sampling depth:
	Specimen id:
Sampling date:	

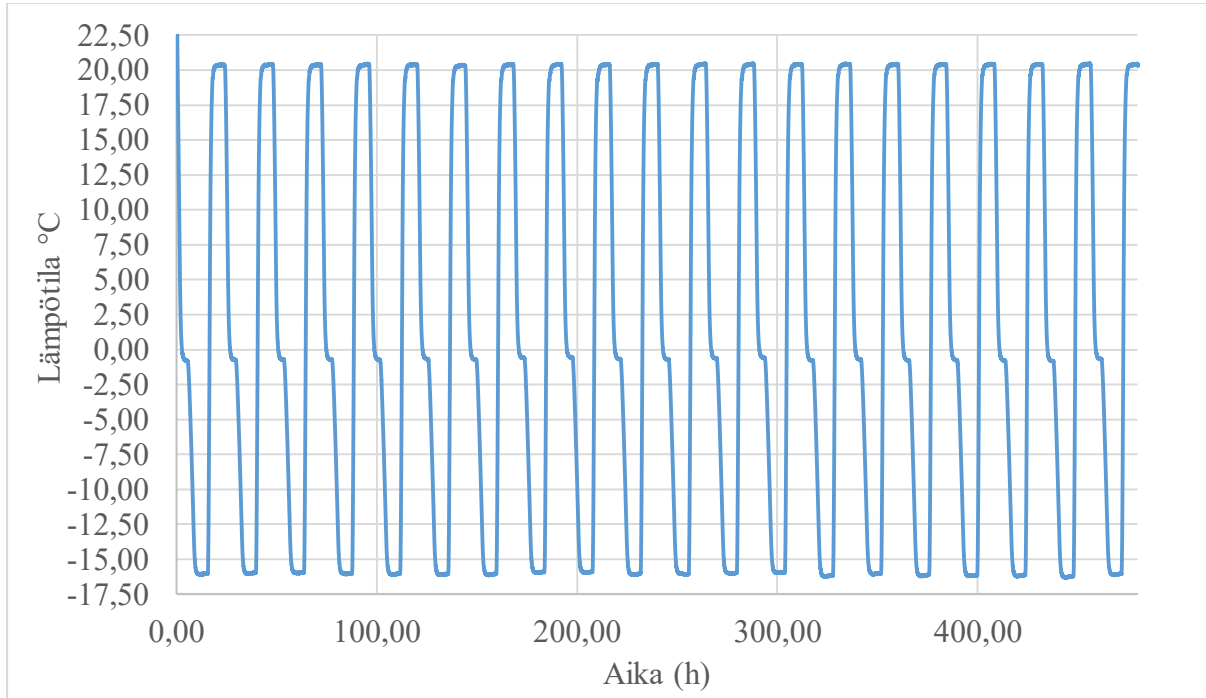


Results			
SP	0,1	mm ² /Kh	
Load	2,4	kPa	
Water content	before test	6,8	%
	after test	7,3	%

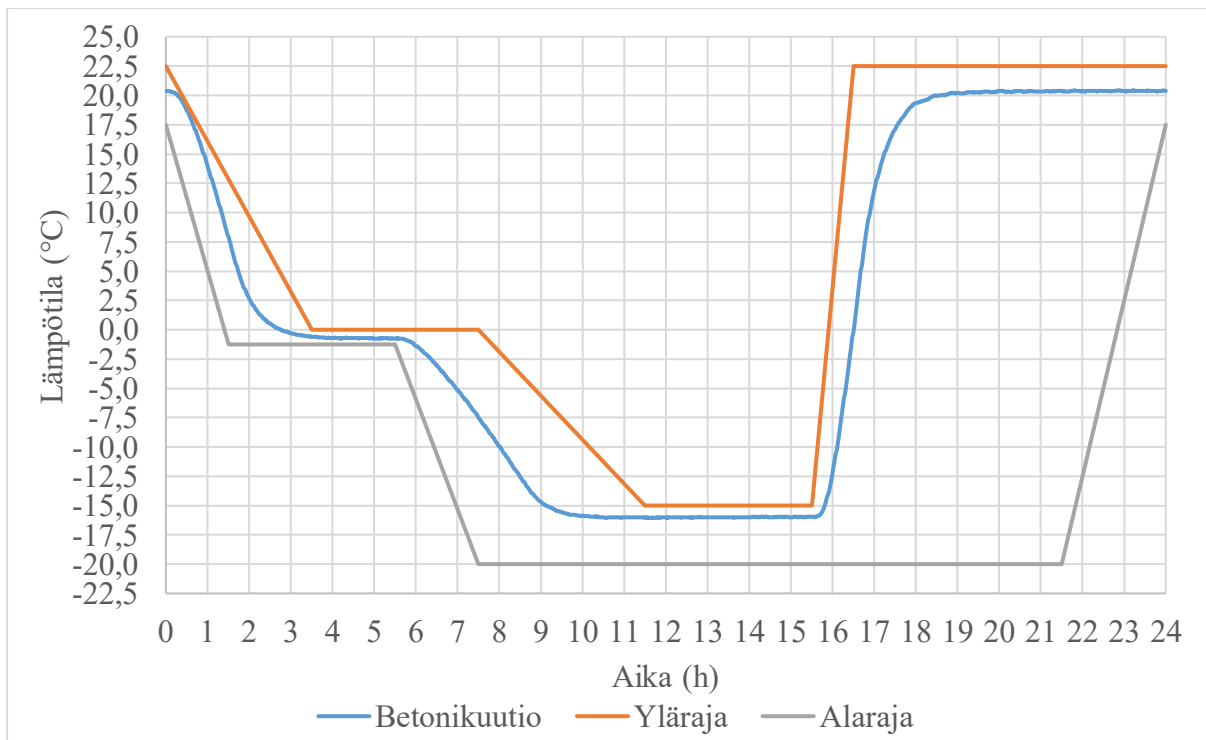
Notes:

Liite 5. Jäädytys-sulatuskokeen lämpötiladata

Jäädytys-sulatuskokeen aikana kerättiin toteutunutta lämpötiladataa betonikuution sisään asennetusta lämpötila-anturista. Koko kokeen aikainen lämpötiladata on alla olevassa kuvassa.



Lämpötilan tuli pysyä teknisen spesifikaation CEN/TS 13286-54 (2014) mukaisissa rajoissa, jotka on esitetty seuraavassa kuvassa yhden toteutuneen syklin mittausdatan kanssa.



Liite 6. Väyläviraston materiaaliyhväksyntään tarvittavat tutkimukset ja tutkimusmenetelmät

Väyläviraston materiaaliyhväksynnän mukaiset vaatimukset materiaaliominaisuuksille				
Tutkittava ominaisuus	Soveltuva tutkimusmenetelmä	Vaatimustaso Suomessa	Saavutettu taso, jos tutkittu	Käytetty tutkimusmenetelmä
Yleiset				
Rakeisuus	SFS-EN 933-1	InfraRYL 21110, kuva K1	OK	SFS-EN 933-1
Routivuus	Rakeisuuden perusteella SFS-EN ISO 13793 tai routanousuko-keella TPPT6	Routima- ton	Routima- ton	SFS-EN ISO 13793 ja TPPT6
Optimivesipitoisuus	SFS-EN 13286-2	-	15,50 %	SFS-EN 13286-2
Tiivistettävyy- s	Koerakenne	Tiiviyssaste ≥ 95 %	-	-
Vedenläpäisevyys	CEN ISO/TS 17892-11	InfraRYL, k > 4,0E-05 m/s	1,033E-04... 8,932E-05 m/s	CEN ISO/TS 17892-11
Leikkauskestävyy- s- kulma (kitkakulma)	SFS-EN ISO 17892-10	-	38...40 °	SFS-EN ISO 17892-10
Kapillaarisuus (suodatinkerros)	SFS-EN 1097-10	<1 m	0,2 m	TVH 2.660. Luku 1.42
Mitoitusparametrit				
Mitoitusmoduuli E (MPa)	Koerakenne	-	-	-
Materiaalin vastaavuus eristävyys- kannalta a _i	Koerakenne	-	-	-
Tilavuuspaino eri kosteustiloissa (kN/m ³)	SFS-EN 13286-1	-	-	-
Pitkäaikaiskestävyys				
Liikennesäätös- rasitus	Koerakenne	-	-	-
Ilmastorasitus	Koerakenne	-	-	-
Kemiallinen rasitus	Koerakenne	-	-	-

Liite 7. Koerakenteen mitoitus

Laskenta perustuu Liikenneviraston ohjeeseen 38/2018 Tierakenteen suunnittelu. Laskennassa on käytetty Liikenneviraston julkaisemaa laskentapohjaa, jota on täydennetty routamitoituksella. Alusrakenneluokka H -> E=20 MPa ja t=12 %.

Kerros	Paksuus m	Annettu		Ehto nxEa	Käytetty		Laskettu		Tavoite	Routa- turpoama	Vastaavuus eristävyyden kannalta a	Mitoitettava routansyvyys	
		E	MN/m ²		n	E	MN/m ²	Ey				MN/m ²	m
Pohjamaa	0,15	20		6	50	20	27		1			1,6	
Suodatin (WFS/Hk)	0,15	50		6	50	33			1				
	0,29	50		6	50	43			1				
	0,30	50		6	50	47			1				
Jakava (KaM)	0,15	280		6	280	83			0,9				
Kantava (KaM)	0,15	280		6	280	124			0,9				
	0,00	280		6	280	124			0,9				
	0,15	280		6	280	163			0,9				
Asfaltti (AB)	0,06	2500			2500	218			1				
Yht	1,40												
									RN _{lask}	0,0294	m		
									RN _{lask}	29,4	mm	RN _{sall}	30
													mm

V4. Puunkuormausalueet