



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

EMILIA KÖYLIJÄRVI
VAAHTOLASIMURSKEEN KÄYTTÖ MAA- JA
POHJARAKENTAMISESSA
Diplomityö

Tarkastaja: professori Pauli Kolisoja
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tuotantotalouden ja rakentamisen
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
4. syyskuuta 2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Rakennustekniikan koulutusohjelma

KÖYLJÄRVI, EMILIA: Vaahtolasimurskeen käyttö maa- ja pohjarakentamisessa

Diplomityö, 90 sivua, 25 liitesivua

Marraskuu 2013

Pääaine: Yhdyskuntarakentaminen

Tarkastaja: professori Pauli Kolisoja

Avainsanat: Vaahtolasimurske, vaahtolasi, kierrätysmateriaalit, kevennysrakenne, routaeriste, taustatäyttö, tiivistys, kolmiaksaalikoe

Tämä diplomityö on tehty WSP Finland Oy:ssä yhteistyössä Liikenneviraston ja Uusioaines Oy:n kanssa. Vaahtolasimurske on huokoinen, kevyt ja karkearakeinen kierrätetystä lasista valmistettu materiaali. Vaahtolasimurske valmistetaan lasijauheesta ja lisäaineesta tunneliuunissa hitaasti kuumentamalla. Lopputuote on huokoinen, raekokojakaumaltaan 10-60 mm, kova murske, joka soveltuu kohteisiin, joissa vaaditaan materiaalilta kevyttä tilavuuspainoa ja hyviä lujuusominaisuuksia.

Vaahtolasimurske on ympäristölle haitaton CE-merkitty rakennustuote, jonka haitta-ainepitoisuudet sekä liukenevuudet ovat tilavuuteen nähden pieniä. Vaahtolasimurskeen eristävyys on hyvä sen pienen lämmönjohtavuuden ansiosta. Vaahtolasimurske soveltuu kevennys-, eristys- ja taustatäyttömateriaaliksi moniin rakennuskohteisiin. Tässä työssä käsitellään vain maa- ja pohjarakennuskohteita.

Vaahtolasimurskeella on hyvät lujuusominaisuudet sen suuren leikkauskestävyyden ansiosta. Vaahtolasimurskeen jännitys-muodonmuutoskäyttäytyminen kuitenkin vaihtelee vallitsevan jännitystilan mukaisesti. Näin ollen vaahtolasimurskeen leikkauskestävyydelle on syytä käyttää suunnittelussa vaihtelevia leikkauskestävyyden arvoja vastaavasti vallitsevan jännitystilan mukaisesti.

Vaahtolasimurskerakenteen toimivuus taataan ohjeidenmukaisella tiivistyksellä. Erityisesti kertaalleen purettu ja uudelleen rakennettu rakenne on tärkeää tiivistää ohjeiden mukaisesti. Tässä työssä tehdyssä tiivistyskokeessa havaittiin, että tiivistyksen tiivistävä vaikutus ulottuu noin 60 cm syvyydelle tiivistetävän vaahtolasimurskekerroksen pinnasta. Vaahtolasimurske ei hienone merkittävästi tiivistystyön tuloksena. Oikealla tiivistämisellä vaahtolasimurskerakenteelle saavutetaan hyvä jäykkyys. Vaahtolasimurskerakenteen päältä saavutettava jäykkyys on suoraan verrattavissa tiivistysaikaan.

Vaahtolasimurskeen käytössä on tärkeää noudattaa aina materiaalivalmistajan rakennusohjetta. Tämä julkaisu toimii taustatutkimuksena erillisille ohjeistuksille. Tätä julkaisua ei pidä käyttää suunnitteluohjeena.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Civil Engineering

KÖYLJÄRVI, EMILIA: Foamed Glass Aggregate in Infrastructure Construction

Master of Science Thesis, 90 pages, 25 Appendix pages

November 2013

Major: Civil Engineering

Examiner: Professor Pauli Kolisoja

Keywords: Foamed glass aggregate, lightweight fill, compaction, load bearing capacity, angle of friction

This master's thesis has been made at WSP Finland Ltd in co-operation with Finnish Transport Agency and Uusioaines Ltd. Foamed glass aggregate is a lightweight aggregate that is produced from recycled glass. Recycled glass is being crushed into fine dust and then heated in a tunnel oven with an additive. During the heating glass melts and additive produces small bubbles inside the molten glass. The end product is a coarse grained and lightweight aggregate which can be used in several areas of civil engineering.

Foamed glass aggregate works well as a lightweight embankment fill, background filling or as a drainage layer. Foamed glass aggregate has a low thermal conductivity and due to that it is a good insulation material. Foamed glass aggregate does not cause pollution to ground water.

A compaction test was conducted on foamed glass aggregate. Tests showed that foamed glass aggregate does not show significant pulverization during compaction. Foamed glass aggregate should not be compacted in over 60 cm thick layers. Proper compaction ensures optimal load bearing capacity. Load bearing capacity is directly proportional to the compaction time.

Foamed glass aggregate has a good angle of friction which is the main reason for its good load bearing capacity. The existing stress level affects the stress-strain behaviour of foamed glass aggregate. This is why different values of angle of friction should be used in different planning situations.

It is highly important to always use manufacturers' guidelines in foamed glass aggregate construction. This publication should not be used as a construction or planning guideline.

ALKUSANAT

Tärkein liikkeellepaneva voima tämän työn aikaansaamisessa on ollut Kari-Matti ”Ville Vaahtolasi” Malmivaara, joka innolla loi tyhjästä mielenkiintoisen ja minulle juuri sopivan diplomityöaiheen sekä löysi sille tuen ja rahoituksen. Professori Pauli Kolisoja on antanut suuren ammatillisen tuen työn aikana ja auttanut minua ymmärtämään työn (sekä koko yliopistourani) aikana ilmiöitä ja niiden taustalla vaikuttavia voimia.

Diplomityötä ovat menestyksekkäästi ohjanneet Panu Tolla Liikennevirastosta sekä Jarmo Pekkala Uusioaines Oy:stä. Lisäksi arvokasta tukea ovat antaneet ohjausryhmän jäsenet Jaakko Heikkilä Insinööritoimisto Arcus Oy:stä sekä Erkki Mäkelä Liikennevirastosta.

Haluan lämpimästi kiittää Tampereen teknillisen yliopiston rakennushallin vakituisia työntekijöitä sekä kesätyöntekijöitä ja TTY:n tutkijoita heidän korvaamattomasta avustaan työn laboratorioskokeiden aikaansaamisessa. Erityiskiitokset osoitan Tapani Jäniskankaalle tiivistyskokeen vetovastuusta ja Nuutti Vuorimiehelle kolmiakksiaaliskokeiden päävastuullisuudesta.

WSP Finland Oy:n työntekijöille osoitan kiitokseni kannustamisesta sekä vertaistuesta koko diplomityön ajan.

Haluan kiittää perhettäni koko koulutieni varrella osoittamasta tuesta, esimerkiksi lähettämällä kotiin unohtuneen prujun postitse halki Suomen. Erityiskiitos kuuluu kihlatulleni, joka kannusti minua läpi koko diplomityöprojektin, mutta silti suurin kiitos kuuluu aviomiehelleni, joka lopulta patisti minut pake-toimaan diplomityön kasaan.

Tästä eteenpäin seuraan paremmin siskoni antamaa neuvoa: seuraavalla kerralla vähemmän projekteja samanaikaisesti.

Düsseldorfissa 13.11.2013

Emilia Köylijärvi

Sisällysluettelo

Merkinnät.....	ix
Lyhenteet.....	xi
Taulukot.....	xii
1 JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta	1
1.2 Työn tavoitteet.....	1
1.3 Aiheen rajaus	2
1.4 Tutkimuksen toteutus.....	2
2 VAAHTOLASIMURSKEEN VALMISTUS	3
2.1 Yleistä	3
2.2 Valmistusprosessi.....	4
2.2.1 Lasinpuhdistus.....	4
2.2.2 Kuivaus ja jauhatus.....	4
2.2.3 Vaahdotus.....	4
2.3 Ympäristönäkökohdat.....	7
3 VAAHTOLASIMURSKEEN NYKYISET KÄYTTÖKOHTEET.....	8
3.1 Yleistä	8
3.2 Työmaatekniikka	8
3.2.1 Kuljetus.....	8
3.2.2 Levitys.....	9
3.2.3 Tiivistys	9
3.3 Kevennys.....	11
3.3.1 Nostemitoitus.....	14
3.4 Routaeriste.....	15
3.5 Taustatäyttö.....	17
3.6 Kuivatuskerros.....	17
3.7 Jyrkkien luiskien täyttö	18
4 VAAHTOLASIMURSKEEN OMINAISUUDET	19
4.1 Vaahtolasimurskeiden ominaisuudet valmistajien antamien tietojen mukaisesti	19
4.2 Perusominaisuudet.....	21
4.2.1 Vaahtolasimurskeen tiheys.....	21
4.2.2 Tiiviyys.....	24
4.2.3 Raemuoto ja -koko	26
4.2.4 Murskautuvuus	27
4.3 Lujuusominaisuudet	28
4.3.1 Leikkauskestävyysskulma	28
4.4 Muodonmuutosominaisuudet	30
4.4.1 Yleistä	30
4.4.2 Kimmomoduuli.....	30
4.4.3 Resilient-moduuli	31
4.4.4 Ödometri-moduuli.....	32
4.4.5 Poissonin luku	34
4.4.6 Pysyvät muodonmuutokset	34
4.5 Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet	36
4.5.1 Kapillaarinen nousukorkeus.....	36
4.5.2 Vedenimeytyminen	37
4.5.3 Jääditys-sulatuskestävyys.....	38
4.5.4 Vedenläpäisevyys	38
4.5.5 Lämmönjohtokyky.....	38
4.6 Kemialliset ominaisuudet.....	40

4.6.1	Yleistä.....	40
4.6.2	Kokonaispitoisuudet.....	40
4.6.3	Liukoisuus.....	41
5	TUTKIMUSMENETELMÄT JA TULOKSET	43
5.1	Kenttätutkimukset.....	43
5.1.1	Kosteuspitoisuus.....	43
5.2	Laboratoriotutkimukset	44
5.2.1	Tiivistyskoe.....	44
5.2.2	Staattiset kolmiaksiaalikoheet.....	48
6	TULOSTEN TARKASTELU.....	53
6.1	Tiiviys	53
6.2	Kantavuus.....	55
6.3	Hienoneminen.....	56
6.4	Kosteuspitoisuus.....	58
6.5	Lujuusominaisuudet.....	58
6.5.1	Leikkauskestävyysskulma	58
6.6	Muodonmuutosominaisuudet.....	60
6.6.1	Poissonin luku	60
6.6.2	Lepopainekerroin	64
6.6.3	Kimmomoduuli.....	65
7	YHTEENVETO SOVELTUVISTA KÄYTTÖKOHEISTA JA JATKOTUTKIMUSSUOSITUKSET...69	
8	YHTEENVETO	71
9	KIRJALLISUUSLUETTELO	72
10	STANDARDILUETTELO.....	75

LIITTEET

Liite 1	Laskuesimerkit
Liite 2	Vaahtolasimurskeen tilavuus ja tiheys
Liite 3	Muodonmuutosmoduulit
Liite 4	Kosteuspitoisuuden määrittäminen
Liite 5	Vaahtolasimurskeelle tehtävän tiivistyskokeen periaate
Liite 6	Tiivistyskoe, Näytteen rakentaminen
Liite 7	Tiivistyskoe, Tärytys
Liite 8	Tiivistyskoe, Pudotuspainolaitemittaus
Liite 9	Tiivistyskoe, Näytteen purku
Liite 10	Kolmiaksiaalikoehenäytteiden mitat ja tiedot
Liite 11	Rakeisuusmäärittäminen

Merkinnät

a_i	materiaalin vastaavuus eristävyiden kannalta verrattuna hiekkaan [-]
c'	koheesio [kN/m^2]
d/D	nimelliskoko, pienin raekoko (d) / suurin raekoko (D)
E	Odemarkin laskentamenettelyssä käytettävä muodonmuutosmoduuli [kPa]
E_d	avoimen tilan kimmomoduli [MPa]
F	voima [kN]
g	putoamiskiikkyvyys [m/s^2]
$G_{dst;d}$	kaatavien pysyvien pystykuormien mitoitusarvo nostemitoituksessa [kN]
$G_{stb;d}$	vakauttavien pystysuorien kuormien mitoitusarvo nostemitoituksessa [kN]
GW	groundwater, pohjavedenpinta
h	materiaalikerroksen paksuus [m]
h_{kev}	kevennyksen paksuus maanpinnan alapuolella, pohjavedenpinnan yläpuolella [m]
h_{kev}'	kevennyksen paksuus pohjavedenpinnan alapuolella [m]
h_{rak}	kevennyksen yläpuolisten rakennekerrosten paksuus [m]
$h_{tä}$	maanpinnan yläpuolisen kevennystäytön paksuus [m]
$h_{\Delta w}$	pohjavedenpinnan alenema [m]
K_o	lepopaine kerroin [-]
m	massa [kg]
M	kokoonpuristuvuusmoduuli [MPa]
M_r	resilient-moduuli (jäykkyysmoduuli) [MPa]
p'	keskimääräinen pääjännitys [kPa]
q	deviatorinen jännitys [kPa]
q	kokonaislämpövuoto [W/m^2]
q	materiaalikerroksen aiheuttama jännitys [kN/m^2]
$Q_{dst;d}$	kaatavien muuttuvien pystykuormien mitoitusarvo nostemitoituksessa [kN]
$q_{kaiv.maa}$	pois kaivetun maan aiheuttama jännitys [kN/m^2]
$q_{kev.kost}$	keventeen aiheuttama jännitys maanpinnan alapuolella [kN/m^2]
$q_{kev.kuiv}$	keventeen aiheuttama jännitys maanpinnan yläpuolella [kN/m^2]
$q_{kev.sat}'$	keventeen aiheuttama jännitys pohjavedenpinnan alapuolella [kN/m^2]
q_{pc}	olomuodon muutosten aiheuttama lämpövuoto [W/m^2]
q_{rak}	kevennyksen yläpuolisten rakennekerrosten aiheuttama jännitys [kN/m^2]
q_w	pohjavedenpinnan aleneman aiheuttama jännitys [kN/m^2]
r	korrelaatiokerroin [-]
R_d	lisäkestävyyden mitoitusarvo [kN]
T	lämpötila [K]
TSV	tasausviiva
U_{noste}	nosteen aiheuttama voima [kN/m^3]
V	tilavuus [m^3]
$V_{dst;d}$	kaatavien pysyvien ja muuttuvien pystysuorien kuormien yhdistelmän mitoitusarvo nostemitoituksessa [kN]
γ	materiaalikerroksen tilavuuspaino [kN/m^3]
$\gamma_{kev.kost}$	kevennysmateriaalin tilavuuspaino maanpinnan alapuolella, pohjavedenpinnan yläpuolella [kN/m^3]
$\gamma_{kev.kuiv}$	kevennysmateriaalin tilavuuspaino maanpinnan yläpuolella [kN/m^3]
$\gamma_{kev.sat}'$	vedellä kyllästyneen kevennysmateriaalin tilavuuspaino pohjavedenpinnan alapuolella [kN/m^3]
γ_{maa}	maan tilavuuspaino [kN/m^3]

x

γ_{maa}	maan tehokas tilavuuspaino pohjavedenpinnan alapuolella [kN/m ³]
γ_{rak}	kevennyksen yläpuolisten rakennekerrosten tilavuuspaino [kN/m ³]
ε_1	akksiaalinen muodonmuutos [%]
ε_3	vaakasuuntainen muodonmuutos [%]
λ^*	kostean materiaalin lämmönjohtavuuden arvo [W/mK]
ν	Poissonin luku [-]
ρ	tiheys [kg/m ³]
σ_1	suurin pääjännitys [kPa]
σ_3	pienin pääjännitys [kPa]
τ	leikkausjännitys [kN/m ²]
φ	leikkauskestävyysskulma, luonnollinen kaatumiskulma [°]

Lyhenteet

BISAR	Bitumen Structures in Roads, tietokoneohjelma, joka laskee jännityksiä ja muodonmuutoksia kerrosrakenteessa
CE-merkintä	ransk. Conformité Européene; valmistajan ilmoitus siitä, että tuote täyttää sitä koskevat Euroopan unionin vaatimukset
CUAP	Common Understanding Assessment Procedure, yhteisymmärrykseen perustuva arviointimenettely standardeista poikkeavista tutkimusmenetelmistä ETA hyväksyntää varten
E-moduuli	Odemarkin laskentamenettelyssä käytettävä muodonmuutosmoduuli [kPa]
ETA	European Technical Approval, Eurooppalainen tekninen hyväksyntä
ICP-MS	massaspektrometri (Inductively coupled plasma mass spectrometry)
LVM	Liikenne- ja viestintäministeriö
läjäkulma	materiaalin luonnollinen kaatumiskulma kasalle läjitettäessä
murskautuvuus	murskautumiskestävyys puristusvoimaa vastaan (crushing resistance)
NBI	Norwegian Building Research Institute = SINTEF = Byggforsk, Norjan rakennustutkimuskeskus
NCCI 7	Liikenneviraston eurokoodin soveltamisohje – Geotekninen suunnittelu
NPRA	Norwegian public road administration, sittemmin Statens vegvesen, Norjan tiehallinto
pH	happamuusaste, vetyionien aktiivisuuden negatiivinen logaritmi
PIMA	pilaantuneet maat
PIMA-asetus	Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista (214/2007).
RIL	Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry
SGI	Statens geotekniska institut, Ruotsin geoteknillinen instituutti
TTY	Tampereen teknillinen yliopisto
VNp	valtioneuvoston päätös
XPS	suulakepuristettu polystyreeni
XRF	röntgenfluoresenssi

Taulukot

Taulukko 1.	Vaahtolasimurskerakenteen lämmöneristävyuden vastaavuus verrattuna luonnon maa- ja kiviaineksiin suuntaa-antavilla kerrospaksuuksilla (Uusioaines Oy 2012)	16
Taulukko 2.	Suomalaisen Foamit-vaahtolasimurskeen teknisiä ominaisuuksia (Uusioaines Oy 2012).....	19
Taulukko 3.	Norjassa ja Ruotsissa valmistettavan HASOPOR-vaahtolasimurskeen materiaaliominaisuudet. (Eriksson & Hägglund 2008).....	20
Taulukko 4.	Norjassa valmistettavan Glasopor –vaahtolasimurskeen materiaaliominaisuudet (Norsk Glassjenvinning AS)	20
Taulukko 5.	Glasopor- ja HASOPOR-vaahtolasimurskeiden tiheydet kuivalle ja kostealle materiaalille eri tiivistymiskertoimilla. (Byggforsk 2005 b; Sintef 2010)	23
Taulukko 6.	Kenttätutkimustulokset HASOPOR-vaahtolasimurskeelle tierakenteessa Norjassa (Aabøe et al. 2005 a; Aabøe & Øiseth 2005).....	24
Taulukko 7.	Havaitut muodonmuutokset vaahtolasimursketäytöissä Norjassa (Aabøe et al. 2005 a).....	25
Taulukko 8.	Foamit vaahtolasimurskeen murskautuvuuden arvot (Uusioaines Oy 2012).....	27
Taulukko 9.	HASOPOR- ja Glasopor-vaahtolasimurskeiden murskautuvuuden arvot (Byggforsk 2005 b; Sintef 2010)	28
Taulukko 10.	HASOPOR Light-vaahtolasimurskeen suunnittelussa sovellettavat leikkauskestävyyskulman arvot kohteen jännitystilasta riippuen kolmiaksaalikokeiden perusteella (Statens vegvesen 2012).....	29
Taulukko 11.	Foamit-vaahtolasimurskeen resilient-moduuli (M_r) (Uusioaines Oy 2012).....	31
Taulukko 12.	HASOPOR- ja Glasopor-vaahtolasimurskeiden resilient-moduuli (M_r) (Byggforsk 2005 b; Sintef 2010).....	31
Taulukko 13.	HASOPOR- ja Glasopor-vaahtolasimurskeiden ödometrimoduulit (Byggforsk 2005 b; Sintef 2010).....	33
Taulukko 14.	HASOPOR-vaahtolasimurskeen pysyvät muodonmuutokset staattisessa kuormituksessa eri jännitystasoilla (Byggforsk 2005 b)	35
Taulukko 15.	Glasopor-vaahtolasimurskeen pysyvät muodonmuutokset staattisessa kuormituksessa eri jännitystasoilla (Sintef 2010).....	35
Taulukko 16.	HASOPOR- ja Glasopor-vaahtolasimurskeiden kapillaariset nousukorkeudet (Byggforsk 2005 b; Sintef 2010)	37
Taulukko 17.	Vedenimeytyminen Foamit-vaahtolasimurskeeseen, kun näyte on vesiupotuksessa (Uusioaines Oy 2012).....	37
Taulukko 18.	Vedenimeytyminen Glasopor- ja HASOPOR-vaahtolasimurskeisiin, kun näyte on vesiupotuksessa (Byggforsk 2005 b; Sintef 2010)	38
Taulukko 19.	Foamit-vaahtolasimurskeen lämmönjohtavuuden arvot (Uusioaines Oy 2012)	39
Taulukko 20.	Glasopor- ja HASOPOR-vaahtolasimurskeiden lämmönjohtavuuden arvot (Skogstad et al. 2005; Byggforsk 2005 b; Eriksson & Hägglund 2008; Sintef 2010)	39
Taulukko 21.	Glasopor-, HASOPOR- ja Foamit-vaahtolasimurskeissa esiintyvien tiettyjen alkuaineiden kokonaispitoisuudet ja viitearvot (Byggforsk 2005; Petkovic et al. 2006; VNa 591/2006; VNa 214/2007; Sintef 2010; Ramboll 2013).....	41

Taulukko 22.	Glasopor-, HASOPOR- ja Foamit-vahtolasimurskeissa esiintyvien tiettyjen alkuaineiden liukoisuudet 2- vaiheisessa ravistelutestissä ja viitearvot (Byggforsk 2005 b; VNa 591/2006; Sintef 2010; Ramboll 2013).....	42
Taulukko 23.	Pudotuspainolaitemittausten E_2 -moduuliarvojen kierroskohtaiset kolmen mittauspisteen keskiarvot, täysi mittausdata liitteessä 8.....	47
Taulukko 24.	Tiivistyskokeen tulokset. Kerrosjärjestys esitetty kuvassa 25.....	48
Taulukko 25.	Kolmiakksiaalikoenäytteiden tiheydet, kosteuspitoisuudet ja mitat ennen koetta ja kokeen jälkeen.....	52
Taulukko 26.	Leikkausjännityksen ja kitkakulman arvot kolmiakksiaalikoeksessa eri sellipaineissa ja muodonmuutostasoilla	60
Taulukko 27.	Vahtolasimurskeen kolmiakksiaalikoeksissa eri sellipaineissa toteutuneet muodonmuutokset ja niitä vastaavat Poissonin luvun arvot sekä niistä johdetut lepopainekertoimen (K_0) arvot.....	61
Taulukko 28.	Vahtolasimurskeen avoimen tilan kimmomoduulit (E_d) kolmiakksiaalikoeksissa eri sellipaineissa.....	67

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Vaahtolasimurske on kierrätetystä lasijätteestä valmistettu huokoinen kevytkiviaines. Vaahtolasimurskeen käyttö vähentää neitseellisten raaka-aineiden käyttöä maarakentamisessa ja tarjoaa vaihtoehdon eriste- ja kevennysrakentamiseen. Vaahtolasimurskeen tuotannossa pystytään hyödyntämään myös kierrätyslasiä, joka ei keraamisten epäpuhtauksien tai muiden laadullisten seikkojen takia soveltuisi lasiteollisuuden perinteisiin jatkojalostustapoihin.

Euroopassa on valmistettu lasijätteestä kierrättämällä vaahtolasimursketta 1980-luvulta saakka. Alkuun vaahtolasimurskeen käyttö keskittyi lähinnä saksankielisiin maihin. Pohjoismaiden ensimmäinen tuotantolaitos avattiin 90-luvulla Norjassa. Suomessa vaahtolasimurskeen valmistus aloitettiin vuonna 2011. Vaahtolasimursketta käytetään maailmanlaajuisesti eristeenä niin talo- kuin maa- ja pohjarakentamisessa. Vaahtolasimurske on suosittu materiaali niin keventeenä, routaeristeenä, lämmöneristeenä, kapillaarikatkona kuin kuivatuskerroksen materiaalinakin, mutta yleensä vaahtolasimurske toimii maarakenteessa useammassa kuin yhdessä edellä mainituista käyttötarkoituksista. Tällä hetkellä vaahtolasimurskeen käyttö Suomessa pohjautuu materiaalivalmistajan omaan suunnitteluohjeeseen.

Muissa Pohjoismaissa vaahtolasimurskeen käytöstä on paljon hyviä kokemuksia monissa erilaisissa pohjarakennuskohteissa, erityisesti väylärakentamisessa. Tässä diplomityössä perehdytään tarkemmin Pohjoismaissa tutkittuihin vaahtolasimurskeen ominaisuuksiin sekä vaahtolasimurskeella toteutettuihin pohjarakennussovelluksiin. Lisäksi työssä täydennetään suomalaisen vaahtolasimurskeen ominaisuuksien tutkimusta ja esitellään lopuksi vaahtolasimurskeelle soveltuvat maa- ja pohjarakennuskäyttökohteet Suomessa.

1.2 Työn tavoitteet

Työn tavoitteena on tarkentaa vaahtolasimurskerakenteiden suunnittelussa käytettäviä mitoitusparametreja. Tutkimuksen pääpaino on vaahtolasimurskeen tiiviystilan tutkimuksessa sekä vaahtolasimurskeen lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksissa. Erityisesti tutkimuksella tarkennetaan vaahtolasimurskeen maanpainerakenteissa vaikuttavia ominaisuuksia. Työtä tehdään tiiviissä yhteistyössä suomalaisen materiaalivalmistajan Uusioaines Oy:n sekä Liikenneviraston kanssa. Työ tehdään taustaselvityksenä tulevia erillisiä ohjeistuksia varten. Tätä julkaisua ei pidä käyttää suunnitteluohjeena.

Työssä hyödynnetään alan kirjallisuuden lisäksi Uusioaines Oy:n tutkimuksia vaahtolasimurskeen ominaisuuksista ja kokemuksia vaahtolasimurskeen käyttökohteista. Työn tavoitteena on arvioida vaahtolasimurskeen soveltuvuutta erityisesti rautatie- ja maanpainerakenteisiin.

1.3 Aiheen raja

Tämä työ käsittelee kierrätetystä lasista kuivavaahdotusmenetelmällä valmistettua vahtolasimursketta. Tässä työssä ei käsitellä levymäisiä vaahdotettuja solulasituotteita. Vaikka vahtolasimurske on suosittu eristemateriaali myös talonrakentamisessa, keskitytään tässä työssä vain vahtolasimurskeen käyttökohteisiin infra- ja väylärakentamisessa. Erityisesti tutkimuksessa aihe rajataan vahtolasimurskeen mekaanisiin ominaisuuksiin. Referenssinä käytetään lähinnä muita Pohjoismaita, joissa luonnonolot ja pohjaolosuhteet vastaavat suomalaisia olosuhteita. Työssä tarkastellaan kriittisesti Suomeen soveltuvia vahtolasimurskeen käyttökohteita.

1.4 Tutkimuksen toteutus

Työ aloitetaan kirjallisuustutkimuksella, jolla selvitetään tarkemmin vahtolasimurskeen jo tutkittuja ominaisuuksia ja käyttökohteita sekä yksilöidään jatkotutkimusta vaativat materiaalitiedot. Lähteenä käytetään kirjastoista löytyvää painettua kirjallisuutta sekä sähköisenä löytyvää aineistoa. Näillä tarkoitetaan lehtiartikkeleita, tutkimusartikkeleita, suunnitteluohjeita ja muuta alan kirjallisuutta. Nämä lähtötiedot ovat lähtökohtana kokeelliselle osuudelle, jonka tavoitteena on täydentää puutteellisia materiaalitietoja. Kokeellisen osuuden tutkimukset ja mittaukset tehdään Tampereen teknillisen yliopiston rakennustekniikan koehallissa sekä soveltuvissa kenttäkohteissa. Laboratoriotutkimusten perusteella tarkennetaan vahtolasimurskeen mitoitusparametreja. Lopuksi työssä esitellään maa- ja pohjarakentamiseen liittyviä käyttökohteita, joihin vahtolasimurske soveltuu erityisen hyvin.

2 Vaahtolasimurskeen valmistus

2.1 Yleistä

Suomen kaikesta pakkauslasijätteestä noin 88 % päättyy keräyslasiksi (PYR Oy 2011). Lisäksi lasijätettä kertyy tasolasina ikkunoiden ja auton tuulilasien muodossa. Suurin osa lasista kierrätetään uudelleen pakkauslasiksi tai hyödynnetään lasivillateollisuudessa. Vaahtolasimurskeen valmistukseen voidaan hyödyntää puhtaan lasijätteen lisäksi lasijäte, joka ei sovellu muuhun jatkokäyttöön epäpuhtauksien tai keraamien takia. (Ritola & Vares 2008)

Norjassa sittemmin jo suljetulla HASOPORin tehtaalla hyödynnettiin erityisesti loisteputkista ja kuvaputkista syntyvä lasijäte, joka ei elohopea- tai muun raskasmetallipitoisuutensa takia soveltunut perinteisiin jatkojalostustapoihin. Vaahtolasimurskeen valmistuksessa pystyttiin poistamaan täysin raskasmetallikomponentit sekä muut ympäristölle haitalliset aineet. (Aabøe et al. 2005 a; Ritola & Vares 2008)

Euroopan ensimmäinen vaahtolasimursketta valmistava tehdas on perustettu Sveitsiin vuonna 1982 (Misapor AG 2013). Suomessa vaahtolasimursketta valmistaa Uusioaines Oy Forssassa lasinpuhdistuslaitoksen yhteydessä olevalla vaahtolasimurske-tehtaalla. Uusioaines Oy valmistaa vaahtolasimursketta tuotemerkillä Foamit. Foamit-vahtolasimurskeen valmistus on aloitettu talvella 2011. Foamit-vahtolasimurske on CE-merkitty rakennustuote, joten sen käyttö rakennuskohteissa ei edellytä ympäristölupaa. (Uusioaines Oy 2012)

Norjassa ja Ruotsissa vaahtolasimursketta on käytetty vuodesta 1988 lähtien ja oma vaahtolasimursketuotanto alkoi Norjassa vuonna 1999. Norjassa vaahtolasimursketta tuottaa Norjan lasinkeräysosekeyhtiö, Norsk Glassgjenvinning AS, tuotenimellä Glasopor. Glasopor on CE-merkitty rakennustuote, jolla on Eurooppalainen tekninen hyväksyntä, European Technical Approval (ETA). Glasopor-vahtolasimursketta tuotetaan Glasitt AS:n tehtaalla Skjåkin kunnassa, noin 350 km Oslosta pohjoiseen. (Sintef 2010)

Ruotsissa vaahtolasimursketta tuotetaan tuotenimellä HASOPOR Hammar AB:n tehtaalla Hammarissa. Myös HASOPOR on CE-merkitty rakennustuote. Kaikki edellä mainitut vaahtolasimursketuotteet valmistetaan kuivavaahdotusmenetelmällä, kuten Sveitsissä patentoitu Misapor-vahtolasimurske. (Skogstad et al. 2005; Zegowitz 2010; Uusioaines Oy 2012)

Vaahtolasimurskeen lopullisiin ominaisuuksiin vaikuttaa valmistusvaiheessa käytetyn lasin laatu, uunin lämpötila, kuljetushinnan nopeus sekä lisäaineen ominaisuudet ja määrä. Näin ollen eri tuotemerkeillä valmistettavien vaahtolasimurskeiden ominaisuudet vaihtelevat, joten eri tuotemerkkien vaahtolasimurskeita ei voi suoraan käyttää korvaamaan toisiaan.

Vuodesta 1998 Norjan tielaitos, Statens vegvesen, on käyttänyt vaahtolasimursketta ensin lämmöneristeenä ja myöhemmin keventeenä. Vuodesta 2000 alkaen Norjassa on aktiivisesti tutkittu ja seurattu vaahtolasimurskeen käyttöä tierakenteissa kansallisen kierrätysprojektin yhteydessä. (Statens vegvesen 2012)

2.2 Valmistusprosessi

2.2.1 Lasinpuhdistus

Uusioaines Oy:llä on käytössään Suomen ainoa lasijätteen puhdistuslaitos. Uusioaines Oy käsittelee vuodessa noin 90 000 tonnia lasia ja puhdistuslaitoksen kapasiteetti riittää jopa 120 000 tonnin käsittelyyn vuodessa. Lasinpuhdistuslaitoksessa lasijäte käy läpi monipuolisen puhdistusprosessin, joka jakaantuu alun karkeampaan erotteluun ja toiseen tarkempaan erotteluvaiheeseen. Puhdistuksen aikana hyödynnetään niin magneetti-, tuuli-, röntgen kuin värierottelua, joiden aikana lasimurska jaotellaan eri värilajien mukaan ja lasijätteen joukossa oleva metalli, muovi ja paperijäte eritellään omiksi jakeikseen. Kaikki kierrätykseen soveltuvat jätelajit toimitetaan kierrätysketjussa eteenpäin. Kaikesta Uusioaines Oy:lle toimitetusta lasijätteestä vain 1-2 % päätyy kaatopaikalle ilman uudelleenkäyttömahdollisuutta. (Pekkala 2013 b)

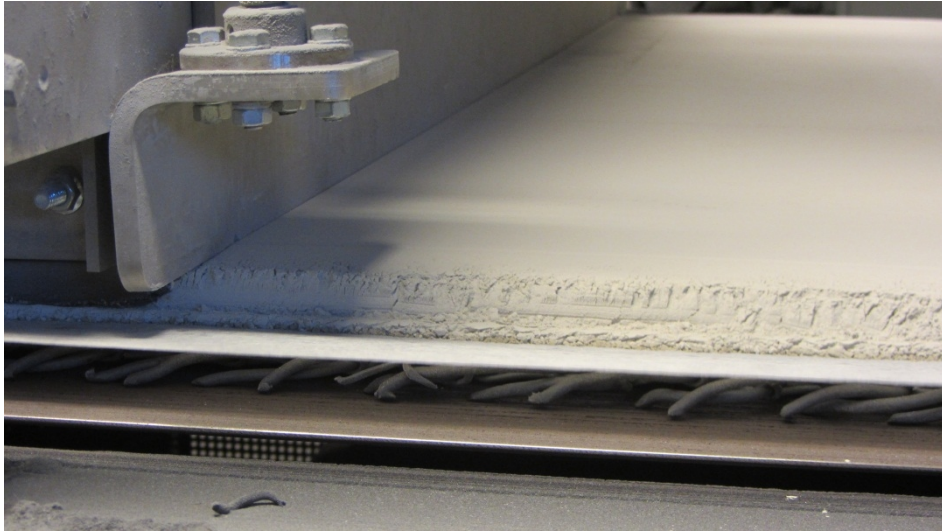
Vahtolasimurskeen valmistukseen voidaan hyödyntää lasimurska, joka ei sovellu lasivillan tai uusiolasin valmistukseen keraamisten epäpuhtauksien vuoksi. Yleisimmät ongelmat lasin uudelleenikäytössä ovat lasijätteen joukossa olevat lämpölasi ja keramiikka, jotka tavallisesta lasista poikkeavien sulamisominaisuuksiensa vuoksi voivat tukkia perinteiset tuotantolinjastot. Tämä ei kuitenkaan aiheuta ongelmia vahtolasimurskeen valmistusmenetelmässä, kun lasimurska jauhetaan hienoksi jauheeksi ja epäpuhtaudet jakautuvat tasaisesti jauheen joukkoon. Myös lasinkierrätyksessä syntyvä alle 6 mm hienoaines, jonka puhdistaminen ei ole taloudellista voidaan hyödyntää vahtolasimurskeen valmistuksessa. (Pekkala 2013 b)

2.2.2 Kuivaus ja jauhatus

Lasinpuhdistamolta saapuva lasinsiru kuivatetaan kuivaamolla, ja välivarastoinnin kautta kuivatettu lasinsiru syötetään esimurskaukseen. Esimurskauksen jälkeen lasimurska seulotaan vielä mahdollisten epäpuhtauksien varalta. Tässä vaiheessa lasimurskasta poistetaan viimeisetkin metallijäämät, paperi ja muovi. Jauhatus tapahtuu sähkökäyttöisellä kuulamylyllä, joka jauhaa puhtaan ja kuivan lasirakeen alle 0,1 mm lasijauheeksi. Myllyssä on noin 9 tonnia teräskuulia jauhamassa lasimurskettä. Jauhatus tapahtuu jatkuvana prosessina, missä valmis lasijauhe poistuu myllystä paineilman avulla. Valmis lasijauhe varastoidaan siloissa. (Pekkala 2013 b)

2.2.3 Vaahdotus

Silosta lasijauhe siirtyy paineilman avulla vaahdotukseen. Uusioaines Oy:n tehtaalla vahtolasimurskeen vaahdotusagentiksi lisätään piikarbidia. Lisäaine ja lasijauhe punnitaan ja sekoitetaan, minkä jälkeen lasijauhe-piikarbidiseos annostellaan kustutetulle lasikuitumatolle. Kuvassa 1 on esitetty lasikuitumatolle annosteltu lasijauhe-piikarbidiseos. Lasikuitumattoa kuljettaa teräsviira, joka kulkee tunneliuunin läpi noin tunnissa. Uunissa lämpötila on 900 °C, mikä saa lasijauheen sulamaan lasimassaksi ja vaahdotusagentin aktivoitumaan. Vaahdotusagentti tuottaa sulan lasimassan sisälle pieniä ilmakuplia, jotka muodostavat vahtolasimurskeelle ominaisen huokosrakenteen. (Pekkala 2013 b) Jokainen ilmakupla on ohuen läpäisemättömän lasiseinämän ympäröimä (Aabøe & Øiseth 2005).

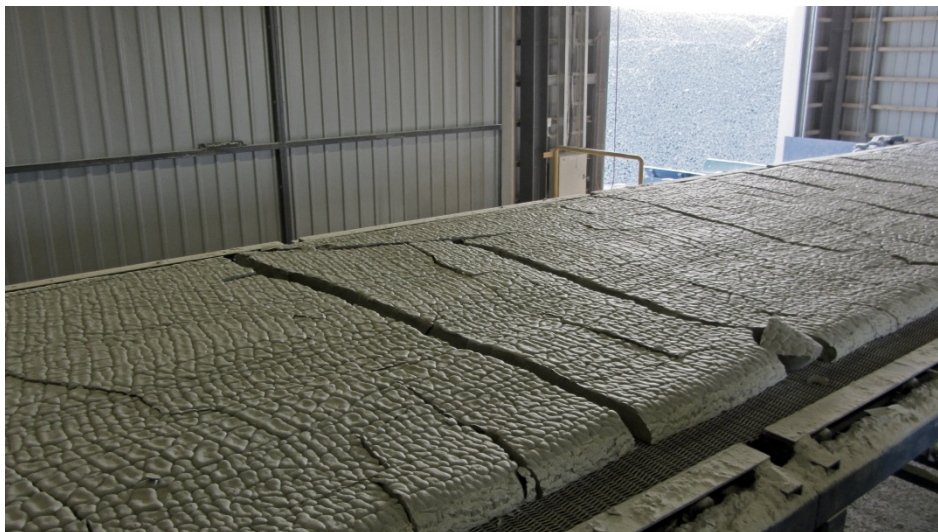


Kuva 1. Teräsviira, lasikuitumatto ja vaahtolasijauhe ennen kuumennusta Uusioaines Oy:n tehtaalla 5.4.2013 (Emilia Köylijärvi 2013)

Tunneliuunin toisesta päästä tulee ulos viiranlevyinen ja noin 6 cm paksuinen, tasainen vaahtolasilaatta, joka on esitetty kuvassa 2. Vaahtolasilevy jäähtyy hitaasti, jolloin lämpötilajännitykset pirstovat vaahtolasin levystä murskeeksi. Koska pirstoutuminen tapahtuu luonnonmukaisesti, joukkoon voi jäädä normaalia suurempiakin kappaleita. Kuvassa 3 on jäähdytyshuoneessa rikkoutuvaa vaahtolasimursketta. Tasaisemman rakeisuuden takaamiseksi vaahtolasimurske voidaan vielä murskata murskaimella. Uusioaines Oy:llä on mahdollisuus erotella murskaimelta viisi eri raekoon lajitetta. (Pekkala 2013 b)



Kuva 2. Uunista tuleva vaahtolasilaatta Uusioaines Oy:n tehtaalla 5.4.2013 (Emilia Köylijärvi 2013)



Kuva 3. Vaahtolasimurske jäätyymishuoneessa Uusioaines Oy:n tehtaalla 5.4.2013 (Emilia Köylijärvi 2013)

Mikäli vaahtolasimurske murskataan ja seulotaan, siitä poistetaan alle 4 mm hienoaines. Kuvassa 4 on murskattua ja seulottua valmista vaahtolasimurskettä Uusioaines Oy:n tehtaalla. Vuonna 2012 Uusioaines Oy on myynyt 90 000 m³ vaahtolasimurskettä, vaikka tuotantolaitoksen kapasiteetti riittäisi jopa 150 000 m³ valmistukseen vuodessa. (Pekkala 2013 b)



Kuva 4. Valmis Foamit-vaahtolasimurske Uusioaines Oy:n tehtaalla 5.4.2013 (Emilia Köylijärvi 2013)

Vaahtolasimurskeen valmistus tapahtuu jatkuvana prosessina hitaasti. Päivässä vaahtolasimursketehdas tuottaa noin 400 m³ vaahtolasimurskettä. Lopullisesta vaahtolasimurskeesta ilmaa on noin 80–92 % vaahtolasimursketuotteesta riippuen (Statens vegvesen 2012; Uusioaines Oy 2012; Pekkala 2013 b; Norsk Glassgjenvinning AS).

2.3 Ympäristönäkökohdat

Uusioaines Oy:n kokemusten mukaan vaahtolasimurskeen tuotannon hiilidioksidipäästöt ovat vain kolmasosan kevytsoran tuotannon päästöistä. Uusioaines Oy:n vaahtolasimurskeen jauhatuksessa toimiva kuulamyly on sähkökäyttöinen. Tunneli-uuni, jossa vaahtolasimurske paisutetaan, lämpenee nestekaasulla ja lasimurskeen kuivatus toimii öljylämmitteisesti. (Pekkala 2013 b) Vaahtolasimurskeen käyttöön maarakenteissa ei tarvita erillistä ympäristölupaa, sillä vaahtolasimurske luokitellaan CE-merkityksi rakennustuotteeksi.

Vaahtolasimurskeen valmistus lisää lasijätteen kierrätysastetta ja vähentää kaatopaikalle joutuvan lasijätteen määrää. Vaahtolasimurskeen käyttö vähentää luonnonkiviaineksen käyttöä. Rakenteesta poistettu vaahtolasimurske voidaan kierrättää edelleen käyttämällä se vastaavassa rakenteessa uudelleen. Uudelleen käytettäessä vaahtolasimurskeen tulee olla puhdasta, eli siihen ei saa olla sekoittuneena esimerkiksi maa-aineksia. (Eriksson & Hägglund 2008)

Vaahtolasimurskeen avulla päästään ohuempisiin rakennepaksuuksiin ainakin routamitoituksen vaativissa kohteissa. Ohuemmat rakennekerrokset tuottavat vähemmän materiaalivirtoja ja vähentävät kaivutyötä. Kuorma-autoilla kuljetettaessa vaahtolasimurske aiheuttaa keveytensä ansiosta luonnonkiviainekseen verrattuna vähemmän hiilidioksidipäästöjä. (Uusioaines Oy 2012) Toisaalta etäisyys tuotantolaitokseen määrää kuljetusmatkan pituuden ja voi siten aiheuttaa enemmän päästöjä.

Vaahtolasimurske ei sisällä haihtuvia yhdisteitä eikä orgaanisia haitta-aineita. Vaahtolasimurskeesta ei liukene vaarallisia määriä haitta-aineita, sillä vaahtolasi on ke-raami. Vaahtolasin valmistuksessa käytetyn lasin takia vaahtolasimurskeesta voi liuetta raja-arvot ylittäviä määriä antimonia ja arseenia. Vaahtolasin kemiallisia ominaisuuksia on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.6. (Ramboll 2013)

3 Vaahtolasimurskeen nykyiset käyttökohteet

3.1 Yleistä

Vaahtolasimurskerakenteen soveltuvuus suunniteltuun käyttökohteeseen on aina varmistettava tapauskohtaisesti. Suomessa geotekninen mitoitus tehdään tulevan käyttökohteen suunnitteluohjeiden mukaisesti. Näin ollen Liikenneviraston kohteissa suunnittelu ja mitoitus tehdään Eurokoodin mukaisesti, ja muissa kohteissa geotekninen mitoitus tehdään Pohjarakennusohjeen (RIL 121-2004) mukaisesti. Vaahtolasimurskerakenteen kantavuus- ja routamitoitus tehdään tulevan käyttökohteen mukaista ohjeistusta käyttäen ja mitoituksessa on aina huomioitava suunnittelukohteen erityispiirteet. (Uusioaines Oy 2012) Vaahtolasimurskeen suunniteltu käyttöikä on 50 vuotta (Byggforsk 2005 a; Uusioaines 2012).

3.2 Työmaatekniikka

3.2.1 Kuljetus

Vaahtolasimursketta voidaan kuljettaa tavallisella kuorma-auton lavalla. Koska vaahtolasimurske on luonnonkiviainekseen verrattuna kevyttä, voidaan kuljetuksessa käyttää erityiskorkeita lavoja. (Statens vegvesen 2012) Tela-alustaiset koneet voivat liikkennöidä suoraan tiivistämättömän vaahtolasimurskekerroksen päällä, kuten voidaan nähdä kuvasta 5. (Uusioaines Oy 2012)



Kuva 5. Vaahtolasimurskeen kuljetuskalusto ja levitys tela-alustaisella kaivukoneella (Uusioaines Oy 2012)

3.2.2 Levitys

Kevennysrakenteessa vaahtolasimurske levitetään tiivistyslaitteistosta riippuen 0,6 – 1,0 m paksuisina kerroksina. Tärylevyllä tiivistettäessä tiivistettävän kerroksen paksuus saa olla korkeintaan 0,6 m ja tela-alustaisella koneella tiivistettäessä 1,0 m. Routaeriste levitetään korkeintaan 0,6 m paksuisina kerroksina. (Statens vegvesen 2012) Kerrosten välissä huolehditaan asennusohjeiden mukaisesta tiivistyksestä. Vaahtolasimurskeen esitiivistys on nähtävissä kuvassa 6.

Koska vaahtolasimurske lasketaan teolliseksi rakennustuotteeksi, se ei saa sekoittua luonnonmateriaalien kanssa. Näin ollen vaahtolasimurskekerros tulee erottaa alapuolisista ja yläpuolisista rakenteista sekä pohjamaasta suodatinkankaalla. Näin varmistetaan, etteivät materiaalit sekoitu rakenteessa ja mahdollisessa rakenteen purkuvaiheessa eri lajitteet saadaan eroteltua eri jatkokäyttötarkoituksiin. Suodatinkankaalla varmistetaan myös rakenteen toimivuus. Käytettävän suodatinkankaan tulee olla polypropeenista valmistettua vaahtolasimurskeen emäksisyyden takia. Polyesteristä valmistettu suodatinkangas ei sovellu vaahtolasimurskeen kanssa käytettäväksi. (Statens vegvesen 2012; Uusioaines Oy 2012)



Kuva 6. Vaahtolasimurskeen tiivistys tela-alustaisella kaivukoneella (Vaasan kaupunki, 2011)

Vaikka vaahtolasimurske voidaan levittää luiskassa 1:1 kaltevuuteen, on suositeltavampaa käyttää vaahtolasimurskekerroksen reunamilla samaa luiskakaltevuutta kuin yläpuolisissa täytöissä. Tällöin yläpuolinen täyttö aiheuttaa yhtä suuren kuormituksen kauttaaltaan vaahtolasimurskekerrokseen. Vaahtolasimurskeluiskan päälle levitetään vähintään 0,5 m paksuinen täyttömaakerros. (Statens vegvesen 2012; Uusioaines Oy 2012)

Vaahtolasimursketta voidaan työstää talvisin, mutta tällöin täytyy varmistaa, ettei vaahtolasimurske ole jäänytynyt paakuiksi ja ettei vaahtolasimurskeen joukkoon ole sekoittunut lunta. (Statens vegvesen 2012) Vaahtolasimurske on kuivana vettä kevyempää, mikä on otettava huomioon veden pinnan alapuolelle asennettaessa.

3.2.3 Tiivistys

Vaahtolasimurskerakenteen toimivuus taataan tarkoituksenmukaisella tiivistyksellä. Vaahtolasimurskeen ei tarvitse olla optimikosteuspitoisuudessa tiivistyäkseen kun-

nolla, vaan sitä voidaan rakentaa sekä kuivana että kosteana. Mikäli kuiva vaahtolasimurske pölyää liikaa, pölyämistä voi ehkäistä materiaalia kostuttamalla. Tiivistyksen aikana vaahtolasimurskerakeiden viimeiset terävät kulmat lohkeavat ja murskerros pystyy tiivistymään edelleen. (Uusioaines Oy 2012)

Tiivistyksellä varmistetaan vaahtolasimurskekerroksen riittävä kuormituskestävyys ja rajoitetaan pysyviä muodonmuutoksia. Ylimääräistä vaahtolasimurskeen tiivistämistä tulee välttää, jottei vaahtolasimurske hienone tarpeettoman paljon. Vaahtolasimurskeen tiivistystä suunniteltaessa on hyvä käyttää tiivistyskertoimena 1,2–1,3. Rakennuspaikoilla, missä työmaaliikenne on ohjattu suoraan vaahtolasimurskekerroksen päälle, on tiivistymiskerroin vieläkin suurempi. (Byggforsk 2005 a; Statens vegvesen 2012) Vaahtolasimurskekerroksen rakentamisessa on otettava huomioon vaahtolasimurskeen suuri tiivistymiskerroin. Vaahtolasimursketta levitetään toivotusta tiivistymiskertoimesta riippuen 10–25 % lopullista rakennepaksuutta paksumpi kerros (Uusioaines Oy 2012).

Vaahtolasimurskekerros suositellaan esitiivistettäväksi suoraan vaahtolasimurskekerroksen päältä tela-alustaisella koneella, jonka maahan kohdistama paine on alle 50 kPa, kuten on esitetty kuvissa 5 ja 6. Tämän esitiivistyksen jälkeen vaahtolasimurske tulee peittää normaalilla kiviaineksella, jonka päältä lopullinen rakenne tiivistetään tavanomaisia tiivistyslaitteita käyttämällä. (Sintef 2010) Norjalaisen lähteen mukaan täryjyrän käyttöä tulee välttää (Norsk Glassjenvinning AS), mutta suomalainen rakennusohje suosittelee täryjyrän käyttöä lopulliseen, murskekerroksen päältä tehtyyn tiivistykseen (Uusioaines Oy 2012). Valsisijyrän käyttöä vaahtolasimurskeen lopullisessa tiivistyksessä murskepedin päältä on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Vaahtolasimurskeen lopullinen tiivistys valsisijyrällä murskekerroksen päältä (Vaasan kaupunki, 2011)

Tiivistystuloksesta tulee parempi, jos vaahtolasimurskekerroksen reunoilla on tukipenkereet. Näin vältetään penkereen leviäminen ja varmistetaan tasalaatuinen tiivistyslopputuloksena koko rakenteessa. (Uusioaines Oy 2012) Pienissä täytöissä ja suoraan rakenteeseen kiinni tulevassa vaahtolasimursketäytössä vaahtolasimurskekerros tiivistetään tärylevyllä. (Sintef 2010) Tarpeetonta liikennöintiä tulee välttää suoraan vaahtolasimurskekerroksen päällä.

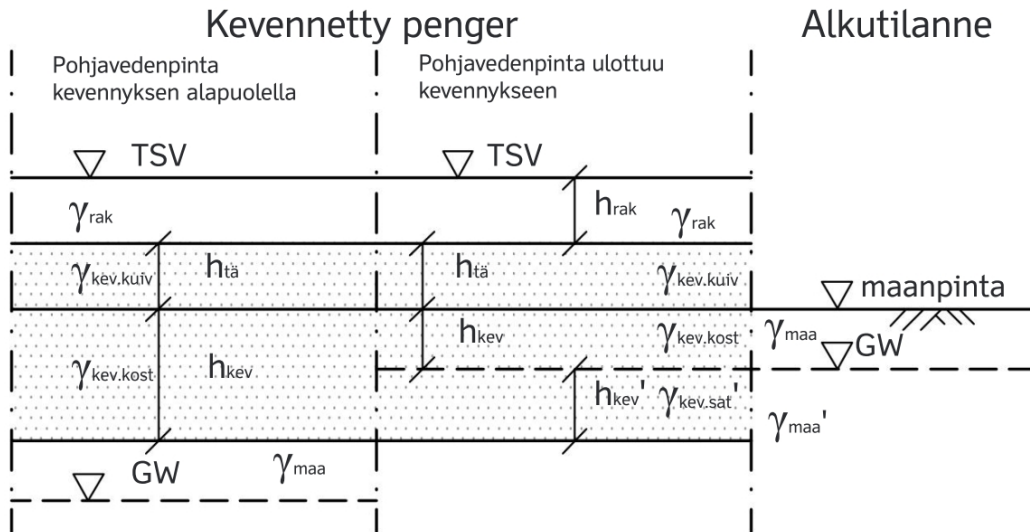
3.3 Kevennys

Pehmeikköalueilla rakenteiden maahan kohdistamat kuormat saattavat aiheuttaa rakenteille painumaongelmia tai häiritä penkereen tai alueen vakavuutta. Näitä ongelmia voidaan ehkäistä kevennysrakenteilla, jotka joko tekevät uudesta rakenteesta kevyemmän tai jopa korvaavat olemassa olevia massoja kevyemmällä. (Liikennevirasto 2011 b) Vaahtolasimurske soveltuu hyvin kevennysrakenteisiin kevyen tilavuuspainonsa ansiosta. Vaahtolasimurskeen kevyt tilavuuspaino pienentää pohjamaahan kohdistuvaa kuormaa, ja vaahtolasimurskeen suuri leikkauskestävyyskulma lisää penkereen stabiiliteettia. (Norsk Glassjenvinning AS)

Kevennyksen tarve todennetaan suunnittelukohteen tietojen perusteella tehtyjen vakavuustarkastelujen pohjalta. Väylärakenteiden suunnittelussa rakenteen vakavuus mitoitetaan Eurokoodi 7:n ja LVM:n kansallisen liitteen soveltamisohjeen (NCCI 7) mukaisesti. Vaahtolasimurskekevennyksen paksuus ja laajuus suunnitellaan vakavuustarkasteluiden mukaisesti siten, että varmuus sortumista vastaan on riittävä. (SFS-EN 1997-1; Liikennevirasto 2011 b)

Pehmeikköalueilla uudet rakenteet aiheuttavat painumia, joista konsolidaatio- ja jälkipainuma ovat merkittävimpiä kevennystä mitoitettaessa. Kevennyksen mitoitus painumien ehkäisemiseksi tehdään geoteknisillä laskelmilla, joissa otetaan huomioon suunnittelukohteen mukaiset maaperän ominaisuudet ja rakenteesta aiheutuvat kuormat. Kevennysmitoituksen tavoitteena on niin sanottu kokonaiskevennys, jolloin uusi rakenne ei aiheuta lisäkuormaa pohjamaalle tai kuorma jää lähtötilannetta pienemmäksi. Mikäli kevennys toteutetaan vain osittaisena kevennyksenä, kevennysrakenne mitoitetaan tavoitepainumalle. Tuolloin painumamitoitus tehdään ohjeen ”Tiepenkereiden ja -leikkausten suunnittelu” mukaisesti. (Liikennevirasto 2010; Liikennevirasto 2011 b) Esimerkki riittävän kokonaiskevennyksen laskemiseen tilanteessa, jossa pohjaveden pinta jää kevennysrakenteen alapuolelle sekä tilanteessa, jossa kevennysrakenteen asianmukainen kuivatus ei toimi, on esitetty liitteessä 1.

Kuvassa 8 on esitetty kadulle tehtävän vaahtolasimurskekevennyksen periaatepiirrokset. Kuvan oikeassa reunassa on esitetty maanpinnan korkeusasema sekä maan tilavuuspainoa merkitsevät symbolit (γ) alkutilanteessa. Pohjavedenpinnan korkeutta on merkitty kirjainlyhenteellä GW. Kuvassa keskellä on esitetty kokonaiskevennys, joka ulottuu pohjavedenpinnan alapuolelle. Kuvan vasemmassa reunassa on esitetty kokonaiskevennys, joka ei ulotu pohjaveden pinnan alapuolelle. Kuvassa 8 on havainnollistettu yhtälöissä 1-7 käytettyjen symboleiden merkitys.



Kuva 8. Katurakenteen kokonaiskevennyksen laskentayhtälöiden 1-7 symbolit (muokattu lähteestä Liikennevirasto 2011 b)

Kokonaiskevennys tilanteessa, jossa vaahtolasimurskeella kevennetty penger on kokonaan pohjavedenpinnan yläpuolella suunnitellaan niin, että se toteuttaa yhtälön:

$$q_{kaiv.maa} \geq q_{rak} + q_{kev.kuiv} + q_{kev.kost} , \quad (1)$$

- missä $q_{kaiv.maa}$ on pois kaivetun maan aiheuttama jännitys [kN/m²]
 q_{rak} on keventeen päälle tehtävän rakenteen aiheuttama jännitys [kN/m²]
 $q_{kev.kuiv}$ on maanpinnan yläpuolella olevan, kuivan keventeen aiheuttama jännitys [kN/m²]
 $q_{kev.kost}$ on maanpinnan alapuolella olevan, kostean keventeen aiheuttama jännitys [kN/m²]

Mikäli osa kevennysmateriaalista sijoitetaan pohjavedenpinnan alapuolelle, tulee kokonaiskevennyksen toteuttaa yhtälön (1) sijaan yhtälö:

$$q_{kaiv.maa} \geq q_{rak} + q_{kev.kuiv} + q_{kev.kost} + q_{kev.sat}' + q_w , \quad (2)$$

- missä $q_{kev.sat}'$ on vedellä kyllästyneen keventeen aiheuttama jännitys pohjavedenpinnan alapuolella [kN/m²]
 q_w on pohjavedenpinnan aleneman aiheuttama jännitys [kN/m²]

Yhtälöiden (1) ja (2) tilanteissa kevennyksen kohdalta poistetun maan jännitys toteuttaa yhtälön:

$$q_{kaiv.maa} = (\gamma_{maa} \times h_{kev}) + (\gamma_{maa}' \times h_{kev}'), \quad (3)$$

- missä γ_{maa} on maan tilavuuspaino [kN/m³]
 h_{kev} on maaleikkauksen paksuus pohjavedenpinnan yläpuolella [m]
 γ_{maa}' on maan tilavuuspaino pohjaveden pinnan alapuolella [kN/m³]
 h_{kev}' on kevennyksen paksuus pohjavedenpinnan alapuolella [m]

Yhtälöiden (1) ja (2) tilanteissa keventeen päälle tehtävien rakennekerrosten pohjamaalle aiheuttama jännitys pohjavedenpinnan yläpuolella toteuttaa yhtälön:

$$q_{rak} = \gamma_{rak} \times h_{rak} , \quad (4)$$

missä γ_{rak} on keventeen päälle tehtävän rakenteen tilavuuspaino [kN/m³]
 h_{rak} on keventeen päälle tehtävän rakenteen paksuus [m]

Yhtälöiden (1) ja (2) tilanteissa kevennysmateriaalin pohjamaalle aiheuttama jännitys pohjavedenpinnan yläpuolella toteuttaa yhtälön:

$$q_{kev} = (\gamma_{kev.kost} \times h_{kev}) + (\gamma_{kev.kuiv} \times h_{tä}) , \quad (5)$$

missä $\gamma_{kev.kost}$ on vaahtolasimurskeen mitoittava tilavuuspaino maanpinnan alapuolelle sijoitettaessa [kN/m³]
 h_{kev} on kevennyksen paksuus maanpinnan alapuolella [m]
 $\gamma_{kev.kuiv}$ on vaahtolasimurskeen mitoittava tilavuuspaino maanpinnan yläpuolelle sijoitettaessa [kN/m³]
 $h_{tä}$ on täytön paksuus maanpinnan yläpuolella [m]

Vaahtolasimurskeen poikkeava tilavuuspaino maanpinnan ala- ja yläpuolella johtuu vaahtolasimurskekerroksen kosteustilasta. Vallitsevan maanpinnan alapuolella vaahtolasimurskeeseen pidättyy enemmän pintavesiä kuin maanpinnan yläpuolella. (Pekala 2013 b)

Yhtälön (2) tilanteessa, kun kevennys ulottuu pohjavedenpinnan alapuolelle, kevennysmateriaalin jännitys alkuperäisen pohjavedenpinnan alapuolella toteuttaa yhtälön:

$$q_{kev.sat}' = \gamma_{kev.sat}' \times h_{kev}' , \quad (6)$$

missä $\gamma_{kev.sat}'$ on vaahtolasimurskeen tilavuuspaino pohjavedenpinnan alapuolella [kN/m³]
 h_{kev}' on kevennyksen paksuus pohjavedenpinnan alapuolella [m]

Yhtälön (2) viimeinen termi ottaa huomioon rakentamisen aiheuttaman pohjavedenpinnan alenemisen, joka aiheuttaa pohjamaalle jännityksen, joka toteuttaa yhtälön:

$$q_w = (\gamma_{maa} - \gamma_{maa}') \times h_{\Delta w} , \quad (7)$$

missä $h_{\Delta w}$ on pohjavedenpinnan alenema [m]

(Muokattu lähteestä Liikennevirasto 2011 b)

Vaahtolasimurske on kevyen tilavuuspainonsa ansiosta oiva kevennysmateriaali. Vedellä kyllästyneenäkin sen tilavuuspaino vastaa pelkän veden tilavuuspainoa. Norjassa vaahtolasimurskeen käytöstä on hyviä kokemuksia teiden ja rautateiden kevennysmateriaalina. Tien kevennysrakenteessa Glasopor-vaahtolasimurskeen päälle suositellaan 0,5 m mursketäyttöä ja rautatiepenkereellä vastaavasti vähintään 0,6 m mursketäyttöä. (Norsk Glassjenvinning AS) Vaahtolasimurskeen käyttö putkijohtokaivannon täyttönä ehkäisee painumien syntymistä, tasaa pitkällä putkilinjalla painumia ja näin pidentää rakenteen käyttöikää (Uusioaines 2012).

3.3.1 Nostemitoitus

Mikäli vaahtolasimursketta käytetään pohjavedenpinnan alapuolella tai lähellä vesistöjä, voi noste muodostua ongelmaksi. Nostemitoitus täytyy tehdä aina vaahtolasimurskerakenteelle, jos on vaarana, että vedenpinta nousee rakenteen tasolle, esimerkiksi tulvatilanteessa. Vaahtolasimurskerakenteen nostemitoitus tehdään Eurokoodi 7:n ja LVM:n kansallisen liitteen soveltamisohjeen (NCCI 7) mukaisesti. (SFS-EN 1997-1; Liikennevirasto 2011 a; Liikennevirasto 2011 b)

Eurokoodi 7:n mukaisesti nostemitoituksessa kaatavien pysyvien ja muuttuvien pystysuorien kuormien yhdistelmän mitoitusarvon ($V_{dst;d}$) on oltava pienempi tai yhtä suuri kuin vakauttavien pysyvien pystysuorien kuormien mitoitusarvon ($G_{stb;d}$) ja muun lisäkestävyyden mitoitusarvon (R_d) summa:

$$V_{dst;d} \leq G_{stb;d} + R_d, \quad (8)$$

missä $G_{stb;d}$ on vakauttavien pystysuorien kuormien mitoitusarvo nosteelle mitoitettaessa [kN]

R_d on lisäkestävyyden mitoitusarvo [kN]

Tämän tasapainoyhtälön on toteuduttava kaikilla tasoilla.

Kaatavien pysyvien ja muuttuvien kuormien yhdistelmä toteuttaa yhtälön:

$$V_{dst;d} = G_{dst;d} + Q_{dst;d}, \quad (9)$$

missä $G_{dst;d}$ on kaatavien pysyvien pystykuormien mitoitusarvo nosteelle mitoitettaessa [kN]

$Q_{dst;d}$ on kaatavien muuttuvien pystykuormien mitoitusarvo nosteelle mitoitettaessa [kN]

Nostemitoituksen periaate on esitetty kuvassa 9. Nostemitoituksessa kaatava pystykuorma on pohjavedenpaine. Nostevoima on esitetty kuvassa 9 merkinnällä U_{noste} . Vaahtolasimurskeelle sovellettava nostevoiman arvo on $6,5 \text{ kN/m}^3$. (Pekkala 2013 b)

Pysyvä vakauttava pystykuorma muodostuu tarkasteltavan tason yläpuolisesta maanpainosta. Kuvassa 9 pysyvät vakauttavat pystyjännitykset muodostuvat kevenysrakenteen yläpuolisen rakenteen aiheuttamasta jännityksestä sekä kevenysmateriaalin aiheuttamasta jännityksestä:

$$G_{stb;d} = q_{rak} + q_{kev.kuiv} + q_{kev.kost}, \quad (10)$$

missä q_{rak} on keventeen päälle tehtävän rakenteen jännitys [kN/m^2]

$q_{kev.kuiv}$ on keventeen aiheuttama jännitys maanpinnan yläpuolella [kN/m^2]

$q_{kev.kost}$ on keventeen aiheuttama jännitys maanpinnan alapuolella, pohjaveden pinnan yläpuolella [kN/m^2]

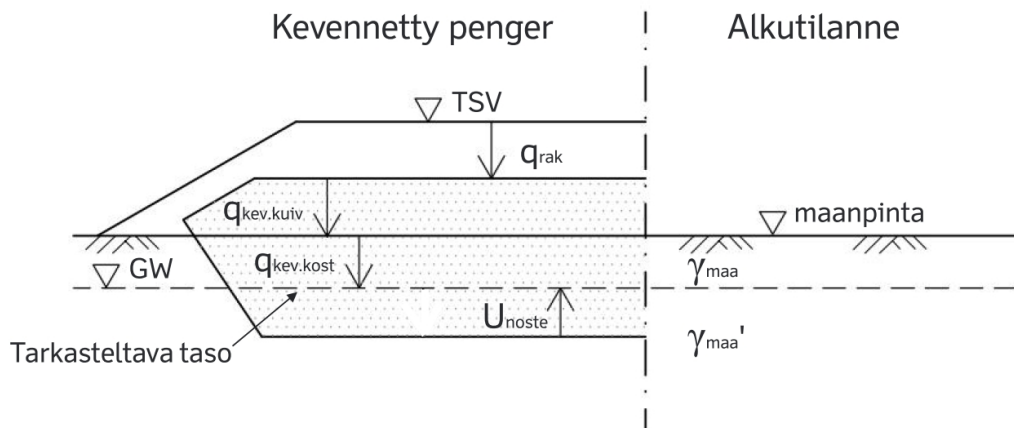
Pystyjännitykset toteuttavat yleisesti yhtälön:

$$q = \gamma \times h, \quad (11)$$

missä	q	on kerroksen aiheuttama jännitys [kN/m ²]
	γ	on kerroksen tilavuuspaino [kN/m ³]
	h	on kerroksen paksuus [m]

Kuormille ja jännityksille käytettävät Eurokoodi 7:n mukaiset osavarmuusluvut on esitetty liitteen 1 taulukossa 1. Mitoitustilanteesta riippuen käytetään kuormalle muuttuvan tai pysyvän kuorman osavarmuuslukuja. Laskuesimerkki nostemitoituksesta on esitetty liitteen 1 laskuesimerkissä 2.

(Muokattu lähteistä SFS-EN 1997-1 ja RIL 207-2009)



Kuva 9. Kevennysrakenteen nostemitoitus, merkinnät. (Muokattu lähteestä Liikennevirasto 2011 b)

Jotta taataan rakenteelle kauttaaltaan samanlaiset muodonmuutokset, on maapohjan ja rakenteen selkeille muutoskohdille suunniteltava siirtymärakenteet.

3.4 Routaeriste

Pohjoismaissa routa aiheuttaa vakavia vaurioita tiestölle ja katurakenteille. Routaus vaurioittaa rakenteita ja pinnoitteita sekä lisää väylien korjaustarvetta. Routasuojauksen tarkoituksena on estää routarajan tunkeutumista syvälle pohjamaahan ja näin taata pohjaveden vapaa virtaaminen väylärakenteen alla. (Aho & Saarenketo 2006) Roudalta voidaan suojautua ulottamalla rakennekerrokset routarajaa syvemmälle. Eristemateriaalien käytöllä roudan tunkeutuminen pohjamaahan voidaan estää tavanomaista rakennetta pienemmällä kokonaisrakennepaksuudella. (Øiseth et al. 2006)

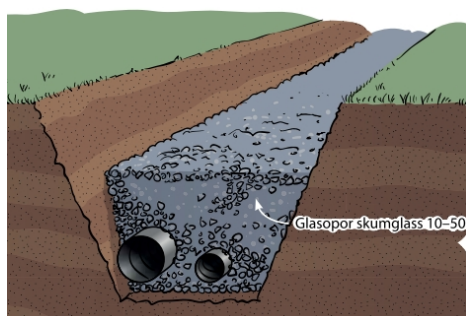
Vaahtolasimurske soveltuu lämmöneristävyytensä ansiosta hyvin routaeristeeksi katu- ja tierakenteisiin sekä kentille ja pihoille. Vaahtolasimurskerakenteen lämmöneristävyksiä on vertailtu luonnon maa- ja kiviaineksiin taulukossa 1. Tierakenteiden suunnitteluohjeiden mukaisessa routamitoitusmenettelyssä vaahtolasimurskeen vastaavuus eristävyuden kannalta verrattuna hiekkaan (a_i) on 4. (Tiehallinto 2004; Uusioaines Oy 2012) Vaahtolasimurskeen jäädytys-sulatuskestävyys on hyvä,

eikä vaahtolasimurskeen vedenimu kasva tai kantavuus heikkene jäädytys-sulatussykliin rasiuksesta (Byggforsk 2005 b; Sintef 2010). Vaahtolasimurske itsesään on routimaton materiaali. (Eriksson & Hägglund 2008)

Taulukko 1. Vaahtolasimurskerakenteen lämmöneristävyyden vastaavuus verrattuna luonnon maa- ja kiviaineksiin suuntaa-antavilla kerrospaksuuksilla (Uusioaines Oy 2012)

	Kerrospaksuus [m]		
Hiekka	0,8	1,00	1,2
Vaahtolasimurske	0,2	0,25	0,3
Murske/sora	0,9	1,10	1,3
Louhe	1,0	1,25	1,5

Norjassa Glasopor-vaahtolasimursketta on käytetty routasuojaukseen erityisesti tie- ja pysäköintialueiden, ratojen, laattojen, perustuksien ja urheilukenttien alla. Vaahtolasimurskeella on myös routasuojausvaikutus putkijohtokaivantojen täyttönä. (Norsk Glassjenvinning AS) Periaatekuva vaahtolasimurskeen käytöstä putkijohtokaivannon kevennysmateriaalina ja routaeristeenä on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Vaahtolasimursketta putkijohtokaivannon kevennys- ja eristysmateriaalina (Norsk Glassjenvinning AS)

Vaahtolasimurske mahdollistaa tie- ja katurakenteisiin routamitoituksen kannalta ohuemmat rakennekerrokset. Ohuemmat rakennekerrokset tarkoittavat vähemmän kaivumaita, vähemmän materiaalivirtoja, nopeampaa rakentamista ja pienempiä kustannuksia. Lisäksi kokoonpuristuvilla pohjamailla vaahtolasimurskeella routaeristeenä on myös keventävä vaikutus, joten rakenteesta syntyy pienempiä painumia. (Øiseth et al. 2006; Uusioaines Oy 2012) Routaeristettä suunniteltaessa on tärkeää mitoitaa myös rakenteen kuormituskestävyys esimerkiksi Odemarkin yhtälöllä tehdyn kantavuuslaskennan avulla (Aabøe & Øiseth 2005; Uusioaines Oy 2012).

Vaahtolasimurskeen eristävä vaikutus voi johtaa tienpinnan jäätymiseen muusta tienympäristöstä poikkeavasti. (Aabøe & Øiseth 2005) Vaahtolasimurske hidastaa lämmön johtumista maapohjasta rakenteen pintaan. Näin ollen syksyn ensimmäisillä pakkasilla routasuojattu rakenne jäätyy pinnasta aiemmin kuin eristeetön rakenne, jota maasta johtuva lämpö vielä pitää kuivana. Epätasaiselta pinnan jäätymiseltä voidaan suojautua mitoittamalla vaahtolasimurskekerroksen päälle riittävän paksut päällysrakenteet (Liikennevirasto 2011 b).

3.5 Taustatäyttö

Ahtailla rakennuspaikoilla rakennetaan usein luiskatun penkereen sijasta tukimuuri. Maamassoista aiheutuva maanpaine kohdistuu rakenteeseen maan ja rakenteen kosketuspinnassa. Tukimuurin taustatäyttö kohdistaa tukimuriin maanpaineen. (Liikennevirasto 2011 b) Kevyen tilavuuspainonsa ja suuren leikkauskestävyyskulmansa ansiosta vaahtolasimurske soveltuu hyvin taustatäyttöihin, joissa on tarpeen pienentää rakenteeseen kohdistuvaa maanpainetta. Käyttämällä vaahtolasimursketta tukimuurin taustatäyttönä rakenteen dimensioita voidaan pienentää, kun rakenteeseen kohdistuva maanpaine pienenee. Rakenteen pienemmät dimensiot tarkoittavat halvempia rakennuskustannuksia. Vaahtolasimurske toimii taustatäytössä samanaikaisesti routaeristeenä ja kuivatuskerroksena. (Norsk Glassjenvinning AS) Vaahtolasimurskeella tehdyn taustatäytön vaakasuora maanpaine on vain noin 15–45 % luonnon kiviaineksellä tehdyn täytön aiheuttamasta maanpaineesta (Uusioaines 2012). Periaatekuva vaahtolasimurskeen käytössä taustatäyttönä on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Vaahtolasimurske tukimuurin kevyenä taustatäyttönä (Uusioaines 2012)

Liikenneviraston rakennuttamissa kohteissa maanpaine mitoitetaan Eurokoodi 7:n ja LVM:n kansallisen liitteen soveltamisohjeen (NCCI 7) mukaisesti (SFS-EN 1997-1; Liikennevirasto 2011 a; Liikennevirasto 2011 b). Glasopor-vaahtolasimurskeen suunnitteluohjeen mukaan taustatäyttöä mitoitettaessa vaahtolasimurskeen leikkauskestävyyskulman arvo vaihtelee sen mukaan, millaiset muodonmuutokset rakenteelle sallitaan. Kun sallitaan vain 1 % muodonmuutos rakenteelle, leikkauskestävyyskulman arvona käytetään 36,8°, mutta sallimalla 10 % muodonmuutokset rakenteelle, jopa 43° leikkauskestävyyskulman arvoa voidaan käyttää. (Norsk Glassjenvinning AS)

3.6 Kuivatuskerros

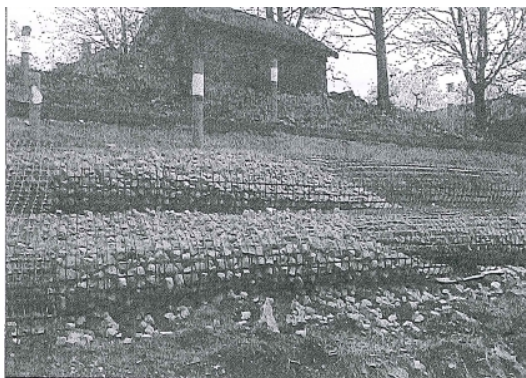
Mikäli vaahtolasimurskeen puristuslujuus on suunniteltuun kohteeseen riittävä, talonrakentamisessa sekä betonirakenteissa, kuten tukimuureissa, vaahtolasimursketta voidaan käyttää kuivatuskerroksena rakenteiden alla. Vaahtolasimurskeen vedenläpäisevyyden on arvioitu olevan $\geq 0,1$ m/s, joten se on hyvin vettäläpäisevää ja näin ollen soveltuu hyvin kuivatuskerroksen materiaaliksi. (Eriksson & Hägglund 2008) Routaeristeenä toimivan vaahtolasimurskekerroksen alla erillinen kuivatuskerros voidaan korvata rakentamalla vaahtolasimurskekerroksesta ylipaksu (Uusioaines Oy 2012). Jos vaahtolasimurskepenkereen luiskat tehdään huonosti vettäläpäisevästä materiaalista, on luiskatäyttöön rakennettava pysyvä vedenpoistojärjestelmä tai vettä läpäiseviä aukkoja noin 30 metrin välein. (Liikennevirasto 2011 b)

Kapillaarisuus tarkoittaa nesteen taipumusta tunkeutua ohuita huokoskäytäviä pitkin. Ilmiö johtuu nesteen ja ympäröivän seinämän välisestä vetovoimasta ja nesteen pintajännityksestä. Koska kapillaarinen nousukorkeus on kääntäen verrannollinen kapillaarihuokosen sisäläpimittaan, nousee vesi kapillaarisesti maamateriaalin huokostilassa sitä vähemmän, mitä laajempia rakeiden väliset huokokset ovat. Sopivan raekokojakauden omaavalla materiaalilla pysäytetään pohjaveden ja vapaan veden kapillaarinen nousu pohjamaasta rakennekerrokseen. (Rantamäki et al. 2009)

Vahtolasimurske soveltuu pysäyttämään veden kapillaarisen nousun, sillä vahtolasimurskeessa rakeiden väliset tyhjätilat ovat kapillaarisen nousun kannalta suuria. Vahtolasimurskeessa kapillaarinen nousukorkeus on kohtalaisen matala, kuten kapaleen 4.1 taulukoista 2, 3 ja 4 voidaan nähdä. Foamit-vahtolasimurskeen laboratorio-olosuhteissa mitattu kapillaarinen nousukorkeus on 200 mm, HASOPOR Standard-vahtolasimurskeen 170 mm, HASOPOR Light-vahtolasimurskeen 120 mm ja Glasopor-vahtolasimurskeen 175 mm. Vahtolasimurskeen mitoitus kapillaarista veden nousua vastaan on aina määritettävä tapauskohtaisesti.

3.7 Jyrkkien luiskien täyttö

Vahtolasimurske soveltuu suuren leikkauskestävyyskulmansa ansiosta käytettäväksi jyrkissäkin luiskissa. Vahtolasimurskeen suuri leikkauskestävyyskulma parantaa rakenteen stabiliteettia ja materiaalin keveys vähentää pohjamaalle aiheutuvia kuormia. Norjassa on toteutettu vahtolasimurskeella koerakenteita, joiden pyrkimyksenä on parantaa jyrkissä luiskissa tierakenteen stabiliteettia. Vahtolasimurskeen suuri leikkauskestävyyskulma parantaa muuten sortumisalttiiden, jyrkkien tiepenkereiden stabiliteettia. Vahtolasimursketta on käytetty yhdessä geomembraanien kanssa maksimaalisen stabiliteetin aikaansaamiseksi, mikä on esitetty kuvassa 12. Rakenteen toimivuus perustuu sekä penkereen keventyneeseen kuormaan että vahtolasimurskeen korkean leikkauskestävyyskulman parantamaan stabiliteettiin. Vahtolasimurskeen käyttö on vähentänyt jyrkkien luiskien muodonmuutoksia ja painumia. (Hagen & Vaslestad 2013)



Kuva 12. Geomembraanilla ympäröityä vahtolasimursketta jyrkän tieluiskan pohjarakenteessa (Hagen & Vaslestad 2013)

4 Vaahtolasimurskeen ominaisuudet

4.1 Vaahtolasimurskeiden ominaisuudet valmistajien antamien tietojen mukaisesti

Vaahtolasimurskeen huokosmainen rakenne ja suuri raekoko tuovat omat haasteensa vaahtolasimurskeen teknisten ominaisuuksien tutkimiseen. Vaahtolasimurske käytättyy koetilanteessa eri tavalla kuin perinteinen murske tai kevytsora, koska vaahtolasimurskeen raekoko on suuri ja murskautumiskestävyys pieni. Jotta vaahtolasimurskeelle on pystytty saamaan eurooppalainen tekninen hyväksyntä, European technical approval (ETA), materiaalin tutkimukselle on täytynyt luoda ensin oma kansainväliseen yhteisymmärrykseen perustuva arviointimenettely, Common Understanding Assessment Procedure (CUAP). Tehdasvalmisteiselle irtonaiselle huokoiselle lasille on CUAP:ssa määritetty yhtenäiset, perinteisten kiviainesten tutkimusstandardeista poikkeavat tutkimustavat, jolloin voidaan varmistaa, että eri vaahtolasimurskeutuotteiden materiaaliominaisuuksia voidaan verrata toisiinsa. (Byggforsk 2005 a; Byggforsk 2005 b; Sintef 2010)

Suomessa Foamit-vaahtolasimurskeen tutkimuksista on vastannut materiaalivalmistaja Uusioaines Oy. Foamit-vaahtolasimurske on CE-merkitty rakennustuote, joka täyttää standardin SFS-EN 13055-2 kevytkiviainekset sidottuihin ja sitomattomiin käyttötarkoituksiin 2 + mukaiset vaatimukset. Tutkimukset on toteuttanut sekä Ramboll Oy että Tampereen teknillinen yliopisto. Taulukossa 2 on esitetty Foamit-vaahtolasimurskeen suunnitteluohjeessa esitetyt tekniset ominaisuudet, joita käsitellään tulevaisuudessa kappaleissa tarkemmin. Kun mitoitetaan Foamit-vaahtolasimurskerakennetta, käytetään taulukossa 2 esitettyjä arvoja. Mikäli mitoitus tehdään Eurokoodin mukaisesti, käytetään taulukon 2 arvoja ominaisarvoina, joita täydennetään vaadittavilla osavarmuuskertoimilla. (Uusioaines Oy 2012)

Taulukko 2. Suomalaisen Foamit-vaahtolasimurskeen teknisiä ominaisuuksia (Uusioaines Oy 2012)

	Foamit
Raekoko [mm]	10...60
Tiheys (kuiva, löyhä) [kg/m ³]	210 ± 15 %
Tiheys (kuiva, tiivistetty)* [kg/m ³]	220...280
Tiheys (kosteaa, pitkäaikaisesti tierakenteessa) [kg/m ³]	350
Tiheys, pitkäaikaisesti veden alla (<1 vuosi) [kg/m ³]	600
Tiheys, pysyvästi veden alla [kg/m ³]	1000
Mitoittava tilavuuspaino (nostemitoitus) [kN/m ³]	3,5
Mitoittava tilavuuspaino (pysyvästi veden alla) [kN/m ³]	10
Kapillaarinen nousukorkeus [mm]	200
Leikkauksenkestävyysskulma [°]	36...45
pH-arvo	10
Tiivistymiskerroin	1,15...1,25

* tiheys riippuu tavoitetiivyydestä

Taulukossa 3 on esitetty HASOPOR tuotemerkillä valmistettavan vaahtolasimurskeen tavallisimmat materiaalitekniset ominaisuudet, niin kuin ne on Ruotsin geoteknillisen instituutin, Statens geotekniska Institut (SGI), tuottamassa ohjeistuksessa esitetty. HASOPOR-vaahtolasimurskeesta on kaksi eri materiaaliheydellä valmistettavaa vaahtolasimursketuotetta, Standard ja Light. HASOPOR Standard-vaahtolasimurske on tiheämpää ja hieman pienirakeisempää kuin HASOPOR Light-vaahtolasimurske. HASOPOR Standard-vaahtolasimurskeen suurempi tiheys selittyy suuremmalla kiintoaineksen määrällä. HASOPOR Standard-vaahtolasimurskeen pienempi maksimirakekoko selittää HASOPOR Light-vaahtolasimursketta korkeamman kapillaarisen nousukorkeuden. HASOPOR-vaahtolasimurskeen leikkauskestävyyskulma on määritetty vain HASOPOR Light-vaahtolasimurskeelle. Vaahtolasimurskeiden ominaisuuksia on käsitelty tarkemmin kappaleissa 4.2 – 4.6. (Eriksson & Hägglund 2008)

Taulukko 3. *Norjassa ja Ruotsissa valmistettavan HASOPOR-vaahtolasimurskeen materiaaliominaisuudet. (Eriksson & Hägglund 2008)*

	HASOPOR Light	HASOPOR Standard
Raekoko [mm]	10..60	10..50
Tiheys (kuiva, löyhä) [kg/m ³]	180	230
Partikkelitiheys (kuiva) [kg/m ³]	300	430
Tehokas tiheys (kuiva) [kg/m ³]	350	320
Mitoittava tiheys (40 vuotta rakenteessa) [kg/m ³]	350	400
Kapillaarinen nousukorkeus [mm]	<120	<170
Leikkauskestävyyskulma [°]	45	-

Taulukossa 4 on esitetty norjalaisen Glasopor-vaahtolasimurskeen tavallisimmat materiaalitekniset ominaisuudet Glasopor-vaahtolasimurskeen teknisen myyntiesitteen mukaisesti. (Norsk Glassjenvinning AS)

Taulukko 4. *Norjassa valmistettavan Glasopor –vaahtolasimurskeen materiaaliominaisuudet (Norsk Glassjenvinning AS)*

	Glasopor
Raekoko [mm]	10...50
Tiheys (kuiva, löyhä) [kg/m ³]	180
Mitoittava tilavuuspaino [kN/m ³]	3,5
Kapillaarinen nousukorkeus [mm]	170
Tiivistymiskerroin	1,15...1,25
Leikkauskestävyyskulma [°]	45

Glasopor-vaahtolasimurskeen kuivairtotiheys vastaa HASOPOR Light-vaahtolasimurskeen kuivairtotiheyttä, vaikka sen raekokojakauma vastaa pikemminkin HASOPOR-Standardin raekokojakaumaa. Rakeiden pienempi maksimirakekoko selittää Glasopor-vaahtolasimurskeen kapillaarisen nousukorkeuden, joka on HASOPOR Standard-vaahtolasimurskeen tavoin 170 mm. Glasopor vaahtolasimurskeen leikkauskestävyyskulmaksi on ilmoitettu 45°. (Norsk Glassjenvinning AS)

4.2 Perusominaisuudet

4.2.1 Vaahtolasimurskeen tiheys

Tiheys on suure, joka ilmoittaa materiaalin massan suhteessa sen tilavuuteen. Tiheyden määrittää näin ollen yhtälö:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (12)$$

missä ρ	on tiheys [kg/m ³]
m	on materiaalierän massa [kg]
V	on materiaalierän tilavuus [m ³]

Tilavuuspaino taas ilmoittaa materiaalin painon suhteessa tilavuuteen. Tiheyden avulla määritetään materiaalin tilavuuspaino yhtälöllä:

$$\gamma = \rho * g, \quad (13)$$

missä γ	on tilavuuspaino [N/m ³]
g	on putoamiskiintyvyyys [m/s ²]

Puhuttaessa vaahtolasimurskeen materiaaliominaisuuksista käytetään mittayksikkönä tiheyttä. Huokoisten materiaalien tiheydessä merkittävä rooli on materiaalirakeiden sisäisillä suljetuilla ilmatäytteisillä huokosilla. Liitteessä 2 on kuvin havainnollistettu vaahtolasimurskeen tilavuuden komponentit ja niiden muuttuminen materiaalin kosteuspitoisuuden muuttuessa. Rakenteita mitoitettaessa käytetään vaahtolasimurskeen tilavuuspainoa ilmoittamaan materiaalin paino tilavuusyksikköä kohti.

Vaahtolasimurskeen tiheys vaihtelee eri materiaalivalmistajien vaahtolasimurskeen valmistuksessa esiintyvien eroavaisuuksien mukaisesti. Vaahtolasimurskeen tiheys on vahvasti riippuvainen valmistuksen aikaisesta uunin lämpötilasta, kuljetushinnan nopeudesta ja käytetyn lisäaineen ominaisuuksista ja määrästä. Kuten kappaleen 4.1 taulukoita 2-4 vertailemalla voidaan nähdä, Glasopor- ja HASOPOR Light-vaahtolasimurskeen kuivairtitiheys on huomattavasti pienempi kuin Foamit ja HASOPOR Standard-vaahtolasimurskeen kuivairtitiheys.

Suomalaisen Foamit-vaahtolasimurskeen tiheyden arvot on esitetty kappaleessa 4.1 taulukossa 2. Foamit-vaahtolasimurskeen partikkelitiheyttä ei ilmoiteta materiaali-valmistajan ohjeessa. Norjalaisen HASOPOR-vaahtolasimurskeen tiheyden mitoitussarvot on esitetty kappaleessa 4.1 taulukossa 3. HASOPOR Light-vaahtolasimurskeen partikkelitiheys on 300 kg/m³ ja HASOPOR Standard-vaahtolasimurskeen 430 kg/m³. HASOPOR Standard-vaahtolasimurske sisältää siis vähemmän ilmahuokosia kuin HASOPOR Light-vaahtolasimurske.

Vaahtolasimurskeen valmistustavasta johtuen vaahtolasimurskeen kuivairtitiheydelle määritetty mitoitussarvo sisältää aina 15 % vaihteluvälin. Tämä vaihteluväli on määritetty kevytkiviainesstandardissa 13055-2. Näin ollen esimerkiksi suomalaisen Foamit-vaahtolasimurskeen valmistusprosessista saatavan vaahtolasimurskeen kuivairtitiheys voi vaihdella 178,5–241,5 kg/m³ välillä. Vaahtolasimurskeen kuivairtitiheys täytyy tutkia prosessissa päivittäin, mutta koska kyseessä on hidaskäyttöinen prosessi, prosessiin tehtävät korjaukset vaikuttavat viiveellä lopputuotteeseen.

Rakenteiden suunnittelussa käytettävään vaahtolasimurskeen tilavuuspainoon vaikuttaa vaahtolasimurskeen tiivistäminen, kosteuspitoisuus ja työnaikainen vaahtolasimurskeen hienoneminen. Aiemmin mainittujen vaahtolasimursketuotteiden tilavuuspainona suositellaan käyttämään mitoituksessa $3,5 \text{ kN/m}^3$. Ainoa poikkeus on HASOPOR Standard-vaahtolasimurske, jonka mitoittava tilavuuspaino on $4,0 \text{ kN/m}^3$. Mitoituksessa käytettävässä tilavuuspainossa otetaan huomioon vaahtolasimurskerakenteen painon muutos pitkäaikaisessa tilanteessa veden imeytyessä rakenteeseen. Vallitsevan maanpinnan alapuolella voidaan vaahtolasimurskerakenteen mitoituksessa käyttää vieläkin suurempaa tilavuuspainon arvoa, sillä vallitsevan maanpinnan alapuolella vaahtolasimurskerakenteeseen voidaan olettaa imeytyvän enemmän pintavesiä ja valumavesiä. (Pekkala 2013 b)

Vaahtolasimurskeen huokosmaiseen rakenteeseen imeytyy osittain vettä kaikissa rakenteissa, mutta erityisesti silloin, kun vaahtolasimurske on pysyvästi pohjavedenpinnan alapuolella. Foamit-vaahtolasimurskeen suunnitteluohjeessa pysyvästi veden alla olevan vaahtolasimurskeen tiheydeksi ilmoitetaan 1000 kg/m^3 ja tilavuuspainoksi 10 kN/m^3 . Tämä tilavuuspaino vastaa veden tilavuuspainoa, mistä voidaan päätellä, että vaahtolasimurske sisältää täysin suljettuja huokosia, joihin ei pääse vesi imeytymään edes pitkäaikaisessa upotuksessa.

Vaahtolasimurske on huokoisen rakenteensa vuoksi herkkä nesteelle. Tämä seikka tulee erityisesti ottaa huomioon tulvariskialueilla. Foamit- ja Glasopor-vaahtolasimurskeiden teknisten ohjeiden mukaan vaahtolasimurskeen mitoittava tilavuuspaino nostetta vastaan on $3,5 \text{ kN/m}^3$. (Uusioaines Oy 2012; Norsk Glassjenvinning AS)

Tiivistämisen ja kosteuspitoisuuden vaikutuksen vaahtolasimurskeen tiheyteen havaitsee parhaiten norjalaisille Glasopor- ja HASOPOR-vaahtolaseille ETA-määrittystä varten tehdyistä tiheyksien tutkimuksista (Byggforsk 2005 b; Sintef 2010). Tiheydet on määritetty standardin EN 1097-3 mukaisesti. CUAP:ssa määritettyjen vaatimusten mukaisesti vaahtolasimurskeen tiheys on määritetty vaihtelevilla tiivistymiskertoimilla ja kosteuspitoisuuksilla. Kosteuspitoisuuden muuttamiseksi vaahtolasimurskenäytteet on pidetty vesiupotuksessa 28 päivää standardin EN 12087 mukaisesti. Jäädytys-sulatuskokeet on tehty standardin EN 12091 mukaisesti. Kosteuspitoisuuksien ja jäädytys-sulatus-kokeiden tulokset on käsitelty tarkemmin kappaleessa 4.5. Glasopor- ja HASOPOR-vaahtolasimurskeiden tiheyksien arvot vaihtelevilla kosteuspitoisuuksilla ja tiivistymisasteilla on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Glasopor- ja HASOPOR-vahtolasimurskeiden tiheydet kuivalle ja kostealle materiaalille eri tiivistymiskertoimilla (Byggforsk 2005 b; Sintef 2010)

	Tiheys [kg/m ³]		
	HASOPOR Light	HASO- POR Standard	Glasopor
Kuiva, irto	180 ± 15	225 ± 15	185 ± 15
Kuiva, tiivistymiskerroin 1,15	~210	~260	-
Kuiva, tiivistymiskerroin 1,25	~225	~280	~230
Kosteaa, kosteuspitoisuus 30 paino-%, tiivistys 1,15 (28 pvä upotuksessa)	~270	~335	-
Kosteaa, kosteuspitoisuus 30 paino-%, tiivistys 1,25 (28 pvä upotuksessa)	~295	~365	-
Kosteaa, kosteuspitoisuus 60 paino-%, tiivistys 1,25 (28 pvä upotuksessa)	-	-	~370
Kosteaa, kosteuspitoisuus 80 paino-%, tiivistys 1,15 (28 pvä upotuksessa, 300 jäädytys-sulatussykliä)	~375	~465	-
Kosteaa, kosteuspitoisuus 80 paino-%, tiivistys 1,25 (28 pvä upotuksessa, 300 jäädytys-sulatussykliä)	~425	~530	-
Kosteaa, kosteuspitoisuus 55 paino-%, tiivistys 1,25 (28 pvä upotuksessa, 300 jäädytys-sulatussykliä)	-	-	~355
Nosteen alaisena, kuivana, tiivistys 1,0	~350	~320	~350

Taulukon 5 tuloksista voidaan nähdä, että suuremman tiivistyskerroimen ja korkeamman kosteuspitoisuuden näytteillä on suurempi tiheys. Vaahtolasimurskeen jäädytys-sulatus-kokeilla ei ole suurta vaikutusta vaahtolasimurskeen tiheyteen, vaan enemmän vaikuttaa vaahtolasimurskeen kosteuspitoisuus ja tiivistymiskerroin.

Aabøe et al. (2005) esittelee Norjan tiehallinnon (Statens Vegvesen) monitorointikohteet norjalaisilta tienrakennusyrityksiltä, missä tutkittiin vaahtolasimurskeen pitkäaikaisista tiheys- ja kosteuskäyttäytymistä tienrakenteessa. Monitorointikohteiden vaahtolasimurskeen kosteuspitoisuuden ja tiheyden muutoksen tutkimustulosten keskiarvot on esitetty taulukossa 6. Rakennusvuosi-sarakkeessa on esitetty vaahtolasimurskerakenteen rakennusvuosi ja kenttätutkimus-sarakkeessa on esitetty tutkimusvuosi. Määrä-sarakkeessa on esitetty täytössä käytetyn vaahtolasimurskeen kokonaismäärä kuutiometreinä, kosteuspitoisuus-sarakkeessa rakenteesta otetun näytteen kosteuspitoisuus painoprosentteina ja tiheys-sarakkeessa rakenteesta olleen vaahtolasimurskeen tiheys kosteana. Näytteistä määritettiin myös seulomalla alle 8 mm vaahtolasimurskerakeiden määrä, joka on esitetty prosentteina viimeisessä sarakkeessa. (Aabøe et al. 2005 a; Aabøe & Øiseth 2005)

Taulukko 6. Kenttätutkimustulokset HASOPOR-vahtolasimurskeelle tierakenteessa Norjassa (Aabøe et al. 2005 a; Aabøe & Øiseth 2005)

Kohde	Materiaali- tyyppi	Raken- nus- vuosi	Kenttä- tutkimus	Määrä [m ³]	Kosteus- pitoisuus [paino-%]	Tiheys kosteana [kg/m ³]	Alle 8 mm # osuus [%]
Lodalen	Light	2001	2001	1500	3 - 18	325	-
Rv 120	Light	2001	2001	2900	-	500 ¹⁾	15 - 65
E 6 Mule	Light	2002	2002	550	-	295	25 - 35
E6 Egge- marka	Standard	2002	2003 2004	1000	15 - 20?	345 384 ²⁾	20 7 - 14
Postter- minalen	Standard	2000	2000	2750	-	-	30
E6 Ro- sendal	Standard	1999	2002	310	18	530 ³⁾	30
E6 Kle- metsrud	Light	2003	2003	1100	0,5	271	5 - 20

1) Toimitetun materiaalin ja rakenteen tilavuuden avulla arvioitu asennetun materiaalin tiheys kuivana keskimäärin 300 kg/m³.

2) Keskiarvo kahdesta ylemmän kerroksen näytteestä. Mitattu kuivairtotiheys ja arvioitu kosteuspitoisuus 15 %.

3) Toimitetun materiaalin ja rakenteen tilavuuden avulla arvioitu asennetun materiaalin tiheys kuivana keskimäärin 350 kg/m³.

Vahtolasimursketta käytettiin rakentamisen aikaisten kiertoteiden keventeenä ja rakenteesta otettiin näytteitä rakennusaikana ja sen jälkeen. Näytteistä määritettiin rakenteen tiheys ja kosteuspitoisuus sekä seulomalla jaekokojakauma. Rv 120:n ja E6 Rosendalin työmailla vasta-asennetusta vahtolasimurskerakenteesta ei tehty tiheysmäärittystä, vaan asennetun vahtolasimurskeen tiheys arvioitiin työmaalle toimitetun materiaalin ja rakenteen tilavuuden avulla. Rakenteesta mitatut tiheyden arvot osoittavat vahtolasimurskeen tiheyden kasvaneen käytön aikana, mikä voi olla seurausta vahtolasimurskeen kosteuspitoisuuden kasvusta. (Aabøe et al. 2005 a; Aabøe & Øiseth 2005)

4.2.2 Tiiviys

Vahtolasimurskerakenteen tiiviys vaikuttaa paljon rakenteen toimivuuteen. Löyhän tiivistämättömän vahtolasimurskeen tiivistymiskerroin vastaa arvoa 1. Rakenteessa vahtolasimurskeen tiivistymiskerroin on yleensä välillä 1,15–1,3. Tiivistymiskerroin kuvaa suhdelukua valmiin tiivistetyn rakenteen ja tiivistämättömän irtotavaran tiheyden välillä. (Skogstad et al. 2005; Aabøe et al. 2005 a)

Koska vahtolasimurskerakennekerroksen tiiviyttä ei voi mitata luotettavasti suoraan vahtolasimurskeen päältä, lasketaan vahtolasimurskekerroksen tiiviys vertaamalla materiaalimenekkiä täytettävään tilavuuteen. Tällöin mitataan maanpinta ennen täyttöä sekä täytön jälkeen ja lasketaan näin täytön tilavuus. Kun tiedetään täsmälleen toimitetun vahtolasimurskeen määrä sekä murskeen tiheys löyhänä, saadaan vahtolasimurskekerroksen tiivistymiskerroin jakamalla toimitetun vahtolasimurskeen määrä lasketulla täytön tilavuudella. (Uusioaines Oy 2012)

Vaihtoehtoisesti valmiiseen tiivistettyyn rakenteeseen voidaan upottaa teräsputki, jonka tilavuus on tiedossa. Vahtolasimurske poistetaan putken sisältä ja poistetun vahtolasimurskeen massa punnitaan maakosteana ja kuivana. Kun tiedetään putken

tilavuus ja vaahtolasimurskeen massa kuivana ja kosteana, saadaan määritettyä vaahtolasimurskekerroksen tiheys sekä kosteuspitoisuus. Tämä määrittystekniikka on esitetty kuvissa 13 ja 14. Kuvassa 14 teräsputkea asennetaan vaahtolasimurskerakenteeseen ja kuvassa 13 mitataan näytteen korkeus tilavuusmäärittystä varten. (Aabøe & Øiseth 2005; Statens vegvesen 2012)



Kuva 14. Tiheyden määrittäminen teräsputken avulla (Aabøe & Øiseth 2005)



Kuva 13. Tiheyden määrittäminen teräsputken avulla (Kjell Eriksen, Statens vegvesen 2012)

Taulukossa 7 on esitetty jo edellisessä kappaleessa esitettyjen, Norjan tiekohteissa tehtyjen kenttätutkimusten tulokset vaahtolasimursketäytöissä havaituista muodonmuutoksista pitkäaikaisessa rakenteessa. (Aabøe & Øiseth 2005)

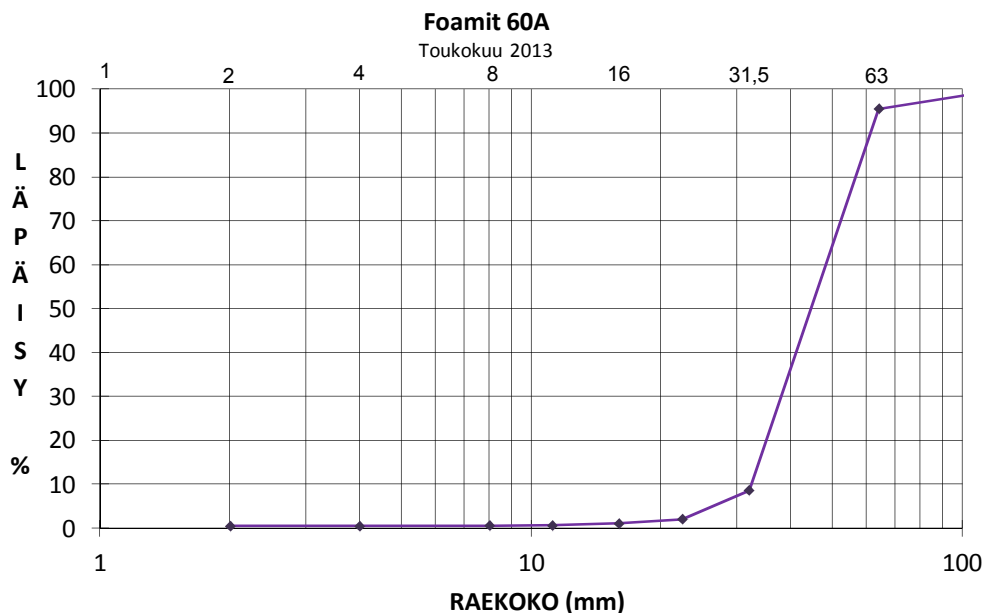
Taulukko 7. Havaitut muodonmuutokset vaahtolasimursketäytöissä Norjassa (Aabøe et al. 2005 a)

Kohde	Täytön maksimipaksuus [m]	Tiivistymiskerros [-]	Lyhytaikainen muodonmuutos [%]	Pitkäaikainen muodonmuutos [%]	Muodonmuutos luiskissa [%]	Tiivistyskerroksen paksuus
Lodalen	2	1,25	1,5 - 2,5	+0,5 - 1,0	4	2 m
Rv 120	3	1,60	1	+0 - 0,5	2 - 3	1 m
E6 Mule	3	1,25	-	-	-	-
E6 Eggemarka	4	-	1	+1,5	2 - 3	1 - 1,5 m
E6 Rosendal	2,5	1,40	-	-	-	0,5 m
E6 Klemetsrud	3	1,20	1	-	-	Jopa 4 m

Aabøe et al. (2005) mukaan vaahtolasimurskerakenteen asennuksen jälkeinen muodonmuutos, eli rakenteen jälkitiivistyminen, jää pieneksi. Taulukossa 7 esitettyjen kenttätutkimusten mukaan lyhyen aikavälin rakenteen kokoonpuristumista on tapahtunut 1–2 % kerrospaksuudesta. Kolmen vuoden aikana havaitut muodonmuutokset ovat vähäisiä, ja korkeimmillaan rakentamisen jälkeistä tiivistymistä on kokeessa tapahtunut 1,5 % vaahtolasimurskekerroksen paksuudesta. Liikennekuorman aiheuttamat muodonmuutokset näyttäisivät olevan tierakenteen reunoilla huomattavasti muuta rakennetta suurempia, mikä viittaa siihen, että vaahtolasimurske kaipaisi parempaa sivuttaissuuntaista tukea, kuten tukipenkereitä. (Aabøe & Øiseth 2005)

4.2.3 Raemuoto ja -koko

Vaahtolasimurskeen normaali raekoko on 10/60 mm (nimelliskoko d/D) ennen tiivistämistä. Tiivistämisen aikana vaahtolasimurskerakeet murtuvat, jolloin tiivistetyssä rakenteessa raekokojakauma poikkeaa suunnitteluohjeissa ilmoitetusta 10–60 mm raekokojakaumasta. (Pekkala 2013 b) Tiivistämättömän vaahtolasimurskeen raekokojakauma on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Foamit vaahtolasimurskeen raekokojakauma toukokuussa 2013, neljän näytteen keskiarvo (Pekkala 2013 a)

Kuvasta 15 nähdään selvästi, kuinka raekooltaan lajittunut materiaali vaahtolasimurske on. Vaahtolasimurske luokitellaan tasarakeiseksi ja routimattomaksi materiaaliksi. Vaahtolasimurskeessa saa olla alle 2 mm rakeita enintään 4 %. Vaahtolasimurskeen raekokojakauma selvitetään seulomalla standardin SFS-EN 933-1 mukaisesti käyttäen standardissa SFS-EN 933-2 määriteltyä seulasarjaa. Vaahtolasimurskeen jauhaantumisen välttämiseksi seulominen tehdään varovaisesti ja mieluiten käsin, ja seulomisaika on pidettävä mahdollisimman lyhyenä. (Byggforsk 2005 a; Uusioaines Oy 2012) Kuvan 15 raekokojakaumaa ei ole määritetty standardin SFS-EN 933-2 mukaisella seulasarjalla, vaan kevytkiviainesstandardin SFS-EN 13055-2 perussarja +seulasarja 1 mukaisella seulasarjalla 2 mm raekoosta ylöspäin.

Vaahtolasimurskeen raemuoto on kulmikas, mutta kuljetuksen ja käsittelyn ansiosta kulmistaan pyöristynyt. Vaahtolasimurskeen raemuoto säilyy samana, vaikka materiaali hienonee. Kaikki vaahtolasimurskeen terävät kulmat pyöristyvät materiaalin käsittelyn, kuljetuksen, levityksen ja tiivistyksen aikana ja viimeisetkin terävät kulmat murtuvat asennuksen yhteydessä. (Pekkala 2013 b) Kuvissa 16 ja 17 on havainnollistettu, kuinka vaahtolasimurskeen raemuoto muuttuu käsittelyn seurauksena terävän kulmikkaasta kulmistaan pyöristyneeksi.



Kuva 17. Kulmikasta vaahtolasimursketta suoraan tuotantolinjalta (Emilia Köyljärvi 2013)



Kuva 16. Käsittelyn aikana kulmistaan pyöristynyttä vaahtolasimursketta (Emilia Köyljärvi 2013)

4.2.4 Murskautuvuus

Murskautuvuus on kevytkiviainekselle määritettävä standardin EN 13055-1 mukainen materiaaliominaisuus, joka määritetään saman standardin liitteen A ”Murskautuvuuden määrittäminen” mukaisesti. Kokeessa vaahtolasimurske on terässylinterissä ja sylinteriin työnnetään paineen avulla mäntä määrätyle etäisyydelle. Työntöön vaadittava työntövoima mitataan. Työntövoima jaettuna männän pinta-alalla ilmoitetaan murskautumiskestävyytenä.

Käytännössä murskautuvuus siis tarkoittaa partikkelien murskauskestävyyttä eli puristuslujuutta. CUAP:n mukaan asennettaessa vaahtolasimurske kantavaan rakentamiseen on sen murskautuvuus määritettävä. (Byggforsk 2005 a) Foamitvaahtolasimurskeen murskautuvuuden arvot on esitetty taulukossa 8. HASOPOR-vaahtolasimurskeen murskautuvuuden mittaustulokset on esitetty taulukossa 9.

Taulukko 8. Foamit vaahtolasimurskeen murskautuvuuden arvot (Uusioaines Oy 2012)

Tuote	Kokoonpuristuma [%]	Murskautuvuus [MPa]
Foamit	10	0,3...0,4
	20	> 0,9

Taulukko 9. HASOPOR- ja Glasopor-vahtolasimurskeiden murskautuvuuden arvot (Byggforsk 2005 b; Sintef 2010)

Tuote	Tiheys (kuiva, löyhä) [kg/m ³]	Tiheys (kuiva, tiivistetty) [kg/m ³]	Kokoon- puristuma [%]	Murskautuvuus [MPa]
HASOPOR Light	180	180	0*	0
		216	20	0,77
		234	30	1,09
		252	40	1,5
HASOPOR Standard	230	230	0*	0
		276	20	0,92
		299	30	1,35
		322	40	1,96
Glasopor	185	185	0*	0*
		231	20	0,77
		264	30	1,33
		308	40	1,89

* koe aloitettu kuormittamattomassa tilassa

Taulukoiden 8 ja 9 arvoja vertaamalla voidaan havaita eri vahtolasimursketuotteiden murskautuvuuden arvojen vastaavan hyvin toisiaan. Standardin EN 13055-1 mukaan kevytkiviaineksen murskauskestävyyden ja loppukäyttöominaisuuksien välille ei voida esittää selvää riippuvuutta.

4.3 Lujuusominaisuudet

4.3.1 Leikkauskestävyysskulma

Silmämääräisesti voidaan arvioida vahtolasimurskeen leikkauskestävyysskulman arvoksi vähintään 45 °, kun tarkastellaan luonnollista läjäkulmaa esimerkiksi varastokasasta (Statens vegvesen 2012). Suomessa Foamit-vahtolasimurskeelle annetaan suunnitteluohjeessa leikkauskestävyysskulman mitoitusarvoksi 36–45° (Uusioaines Oy 2012). Tämä vaihteluväli on todella suuri, eikä leikkauskestävyysskulma näin ollen tuota luotettavia arvoja esimerkiksi rakenteita mitoittaessa.

Taulukossa 10 on esitetty HASOPOR Light-vahtolasimurskeelle sovellettavat leikkauskestävyysskulman (φ) arvot. Taulukosta voidaan havaita, että eri jännitysalueille lujuusparametrien tulkinta on tehtävä eri tavalla. Leikkauskestävyysskulman suunnitteluarvona on käytettävä eri arvoja riippuen käyttökohteesta toteutuvista vaakasuuntaisista jännityksistä. Aksiaalisen muodonmuutoksen prosentuaaliset arvot, jotka on annettu vasemmanpuolimmaisessa sarakkeessa, viittaavat kolmiaksaalikokeissa saavutettuihin tuloksiin. Oikeanpuoleisin sarake vastaa tilannetta, jossa partikkelien lujuus eli toisaalta vahtolasimurskeen hienoneminen dominoi vahtolasimurskeen käyttäytymistä ja on täten määräävä tekijä jännitystilan kannalta. (Statens vegvesen 2012)

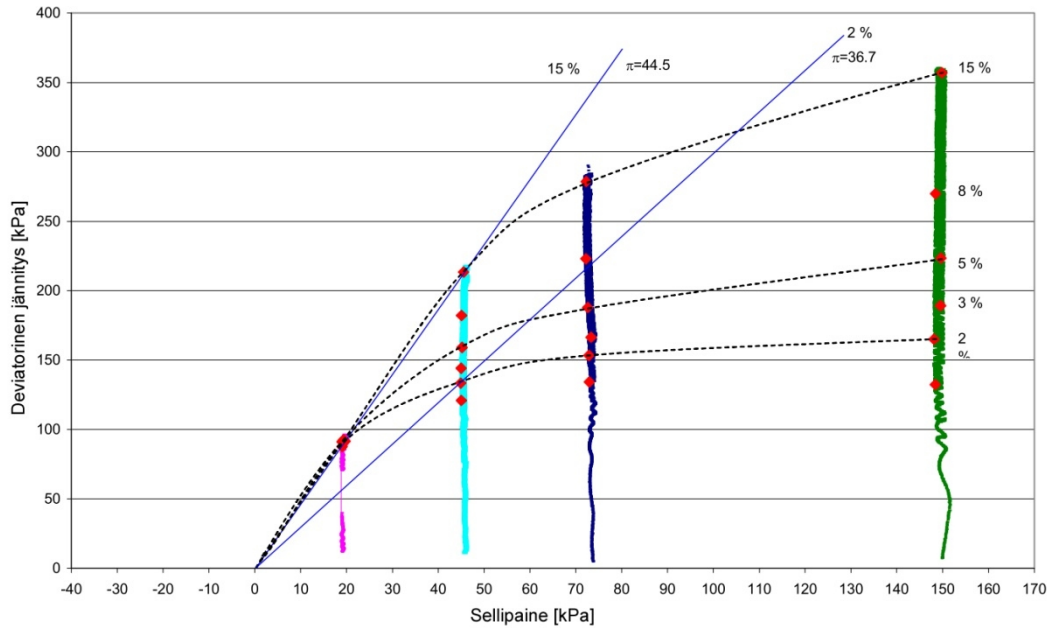
Taulukko 10. HASOPOR Light-vahtolasimurskeen suunnittelussa sovellettavat leikkauskestävyysskulman arvot kohteen jännitystilasta riippuen kolmiakksiaalikoekokeiden perusteella (Statens vegvesen 2012)

Aksiaalinen muodonmuutos	Vaakasuuntaiset jännitykset		
	0-20 kPa	0-45 kPa	> 75 kPa
2 %	$\varphi = 44,5; c = 0 \text{ kPa}$	$\varphi = 36,7; c = 0 \text{ kPa}$	Max pystykuormitus = 220 kPa
15 %	$\varphi = 44,5; c = 0 \text{ kPa}$	$\varphi = 44,5; c = 0 \text{ kPa}$	Max pystykuormitus = 350 kPa

Norjalaiselle HASOPOR Light-vahtolasimurskeelle on tehty isomittakaavainen kolmiakksiaalikoel leikkauskestävyysskulman määrittämiseksi. Koejärjestelyn purkaminen on esitetty kuvassa 18, mistä voidaan havaita, että vahtolasimurske pysyy kulmikkaan raemuotonsa ja karheen pintansa ansiosta lähes pystysuorassa kulmassa. Taulukossa 10 esitetyt arvot tukevat HASOPOR Light-vahtolasimurskeelle tehtyjen kolmiakksiaalikoekokeiden tulokset, jotka on esitetty kuvan 19 kuvaajassa. (Aabøe et al. 2005 b)



Kuva 18. HASOPOR-vahtolasimurskeen leikkauskestävyysskulman määrittäminen suurimittakaavaisella kolmiakksiaalikoekokeella (Aabøe et al. 2005 b)



Kuva 19. Kuvaaja HASOPOR-vahtolasimurskeen leikkauskestävyysskulman määrittämisestä kolmiakselikokeella (Aabøe et al. 2005 b)

Kuvan 19 kuvaajassa on esitetty Norjassa tehtyjen kolmiakselikokeiden tulokset sellipaineen ja deviatorisen jännityksen suhteen. Kokeita on tehty 20, 45, 75 ja 150 kPa sellipaineissa. Punaisin ruuduin on esitetty pystysuuntaisen jännityksen kasvattamisen aiheuttama prosentuaalinen pystysuuntainen muodonmuutos näytteessä. Kuvaajassa on myös esitetty tietyillä mobilisoituneilla muodonmuutostasolla (2 % ja 15 %) saavutettavat leikkauskestävyysskulman arvot. Muodonmuutostasolla 2 % leikkauskestävyysskulman arvoksi on saatu kolmiakselikokeessa 36,7°. Muodonmuutostasolla 15 % leikkauskestävyysskulman arvo on 44,5°.

4.4 Muodonmuutosominaisuudet

4.4.1 Yleistä

Vahtolasimurskeen ominaisuuksien ymmärtämisen kannalta kiinnostavimmat muodonmuutosmoduulit ovat kimmomoduuli (E), kokoonpuristuvuusmoduuli (M), sekä Resilient-moduuli (M_r). Lisäksi vahtolasimurskeen muodonmuutosominaisuuksia voidaan kuvata Poissonin luvun (ν) avulla. Liitteessä 3 on esitetty tarkemmin muodonmuutosmoduulien määräytyminen.

4.4.2 Kimmomoduuli

Mitoitettaessa tierakenteen kuormituskestävyyttä niin kutsutulla kantavuusmitoituksella eli Odemarkin menetelmällä on tunnettava materiaalin kimmomoduuli (E). Kimmomoduuli kuvaa materiaalin muodonmuutosominaisuuksia. Vahtolasimurskeen kimmomoduuli riippuu jännitystasosta ja siirtymätasosta. Materiaalissa vallitseva jännitystaso riippuu kunkin rakennuskohteen vallitsevasta kuormituksesta, kuten liikennekuormasta. (Aabøe & Øiseth 2005; Sintef 2010; Uusioaines Oy 2012)

E-moduulin likiarvo voidaan mitata esimerkiksi levykuormituslaitteella. Foamitvahtolasimurskeen E-moduuli on määritetty levykuormituskokeista takaisinlasken-

nalla. Ohuella päällysrakenteella Foamit-vahtolasimurskeen E-moduuli on 55 MPa. Paksulla päällysrakenteella vahtolasimurskeen E-moduuli on suurempi, 70 MPa. Vahtolasimurskeen kimmomoduuli rakenteessa on sitä parempi, mitä paksumpi päällysrakenne on. Lisäksi pohjamaan hyvä kantavuus sekä tukipenkereet kasvattavat vahtolasimurskerakenteen kimmomoduulia. (Uusioaines Oy 2012)

4.4.3 Resilient-moduuli

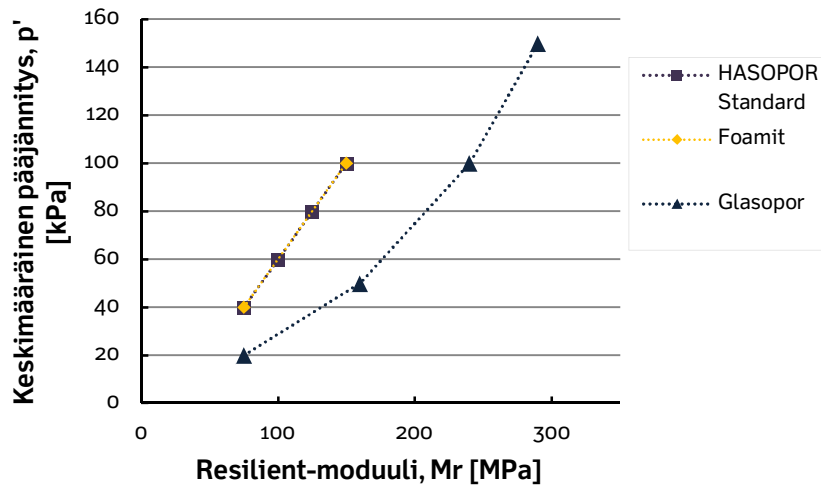
Jäykkyyshmoduuli, eli resilient-moduuli (M_r), pystytään määrittämään toistokuormituksella, ja se on esitelty tarkemmin liitteessä 3. Foamit-vahtolasimurskeen resilient-moduuli on määritetty syklisellä kolmiakσιαalikokeella. Glasopor- ja HASOPOR-vahtolasimurskeiden resilient-moduulit on määritetty standardissa EN 13286-7 esitettyä syklistä kolmiakσιαalikoetta vastaavalla koejärjestelyllä. Foamit-vahtolasimurskeen resilient-moduulit on esitetty taulukossa 11 ja HASOPOR- ja Glasopor-vahtolasimurskeiden resilient-moduulit taulukossa 12. Samat arvot on esitetty myös kuvaajalla kuvassa 20.

Taulukko 11. Foamit-vahtolasimurskeen resilient-moduuli (M_r) (Uusioaines Oy 2012)

Keskimääräinen pääjännitys [kPa]	Resilient - moduuli [MPa]
40	≥ 75
100	≥ 150

Taulukko 12. HASOPOR- ja Glasopor-vahtolasimurskeiden resilient-moduuli (M_r) (Byggforsk 2005 b; Sintef 2010)

Tuote	Tiheys (irtokuiva) [kg/m ³]	Tiivistymiskerros [-]	Tiheys (tiivistetty) [kg/m ³]	Keskimääräinen pääjännitys [kPa]	Resilient - moduuli [MPa]
HASOPOR Standard	~230	~1,25	~290	40	75
				60	100
				80	125
				100	150
Glasopor	~185	~1,25	~230	20	75
				50	160
				100	240
				150	290



Kuva 20. Foamit-, Glasopor- ja HASOPOR Standard-vahtolasimurskeiden resiliient-moduuli (M_r) (Byggforsk 2005 b; Sintef 2010, Uusioaines Oy 2012)

Kuvasta 20 voidaan nähdä, että Foamit- ja HASOPOR-vahtolasimurskeiden tulokset vastaavat täysin toisiaan, mutta Glasopor-vahtolasimurskeen resiliient-moduulit ovat huomattavasti korkeampia.

Rakenteessa vahtolasimurskeeseen kohdistuva dynaaminen kuormitus suositellaan rajoittamaan 75 kPa:iin (Aabøe et al. 2005 a; Uusioaines Oy 2012). Edes rakennusvaiheessa vahtolasimursketta ei saa saattaa yli 75 kPa kuormituksen alaiseksi. Tiivistettäessä rakennusvaiheessa vahtolasimurskeeseen ei tule kohdistaa yli 50 kPa dynaamista kuormaa. (Sintef 2010) Suurille liikennemäärille tarkoitetuissa rakenteissa vahtolasimurske ei saa joutua yli 50 kPa dynaamisen kuormituksen alaiseksi (Byggforsk 2005 b).

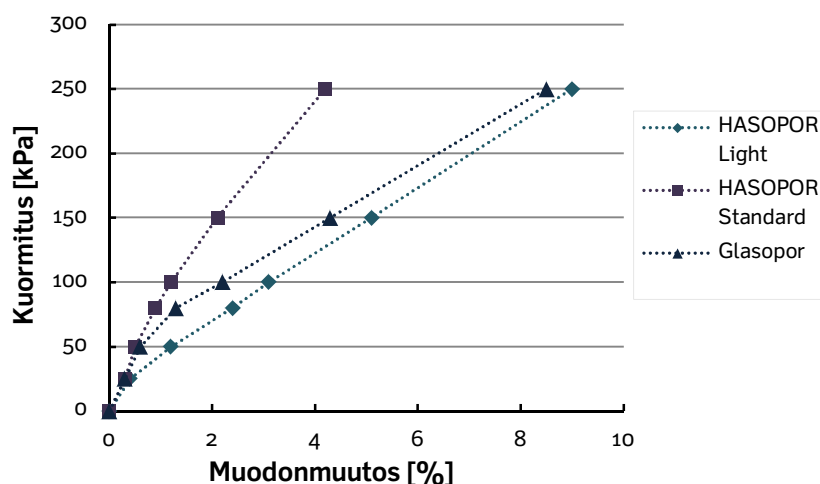
Tierakenteessa vahtolasimurskeen elastisia ominaisuuksia voi verrata tavalliseen murskeeseen ja esimerkiksi pudotuspainomittauksissa mursketäytön ja vahtolasimursketäytön väliset erot ovat osoittautuneet hyvin pieniksi (Aabøe et al. 2005 a). Jännityksen jakautumista vahtolasimurskekerroksessa pystytään mallintamaan jännitysanalyysi-ohjelmistolla, kuten BISAR (Byggforsk 2005 b; Sintef 2010).

4.4.4 Ödometri-moduuli

Ödometri-moduuli on kokoonpuristuvuusmoduuli, M , jonka määräytyminen on esitetty tarkemmin liitteessä 3. Vahtolasimurskerakenteen kokoonpuristumisen riski staattisen kuormituksen, kuten betonilaatan, alaisena arvioidaan vahtolasimurskeen kuormituskestävyyden perusteella. Sekä Glasopor- että HASOPOR-vahtolasimurskeiden kuormituskestävyyttä on tutkittu suurella ödometrikokeella CUAP:n liite B:n mukaisesti. Tulokset on esitetty taulukossa 13. Tulokset on saatu jäykkäseinämaisessä sellissä asteittain staattista kuormitusta kasvattamalla ja tallentamalla pystysuuntainen muodonmuutos ajan funktiona. Kuvassa 21 on esitetty kuvaajalla saman kokeen tuloksista muodonmuutoksen kasvu kuormituksen funktiona. Ödometri-moduuli lasketaan jakamalla pystysuuntaisen kuormituksen muutos näytteen pystysuuntaisella muodonmuutoksella jokaisella kuormitusportaalla. (Byggforsk 2005 a)

Taulukko 13. HASOPOR- ja Glasopor-vahtolasimurskeiden ödometri-moduulit (Byggforsk 2005 b; Sintef 2010)

Tuote	Tiheys (kuiva, löyhä) [kg/m ³]	Tiheys (kuiva, tiivistetty) [kg/m ³]	Tiivistymiskerros	Kuormitusporras [kPa]	Ödometri-moduuli [MPa]	Muodonmuutos [%]
HASOPOR Light	180	225	1,25	0	7,0	0
				25	4,0	0,4
				50	3,0	1,2
				80	2,5	2,4
				100	2,5	3,1
				150	2,5	5,1
				250	2,5	9,0
HASOPOR Standard	230	290	1,25	0	10	0
				25	10	0,3
				50	8,0	0,5
				80	7,0	0,9
				100	6,5	1,2
				150	5,5	2,1
				250	4,0	4,2
Glasopor	185	-	1,25	0	7,0	0
				25	7,0	0,3
				50	4,0	0,6
				80	2,5	1,3
				100	2,5	2,2
				150	2,5	4,3
				250	2,5	8,5



Kuva 21. HASOPOR- ja Glasopor-vahtolasimurskenäytteiden muodonmuutos kuormituksen funktiona ödometrikokeessa (Byggforsk 2005 b; Sintef 2010)

Taulukossa 13 esitetyt ödometri-moduulin arvot määritetään tilanteessa, jossa materiaalin tiivistyminen ja murskautuminen ovat mukana ödometri-moduulin määrittä-

sessä. Näin ollen ödometri-moduulin arvot ovat varsinkin suuremmilla kuormitus-tasoilla todella pieniä. Vaahtolasimurskeen ödometri-moduulit näyttävät myös piene-
nevän, kun vaahtolasimurskeen tilavuuspaino kevenee. Jos vaahtolasimursketta käy-
tetään suurten pistemäisten kuormien alla, on tehtävä lisätutkimuksia materiaalin
soveltuvuudesta kohteeseen. (Byggforsk 2005 a)

4.4.5 Poissonin luku

Poissonin luku (ν) on kimmoparametri, joka kuvaa materiaalin muodonmuutosomi-
naisuuksia. Poissonin luku yhdistää aksiaalisen muodonmuutoksen ja poikittaiset
normaalimuodonmuutokset:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_1}, \quad (14)$$

missä ε_1 on näytteen aksiaalinen muodonmuutos
 ε_3 on näytteen vaakasuuntainen muodonmuutos

(RIL 1985)

Aiempiä tutkimustuloksia vaahtolasimurskeen Poissonin luvusta ei ole käytettävissä.

Poissonin luvun avulla on johdettavissa myös lepopainekerroin, K_0 :

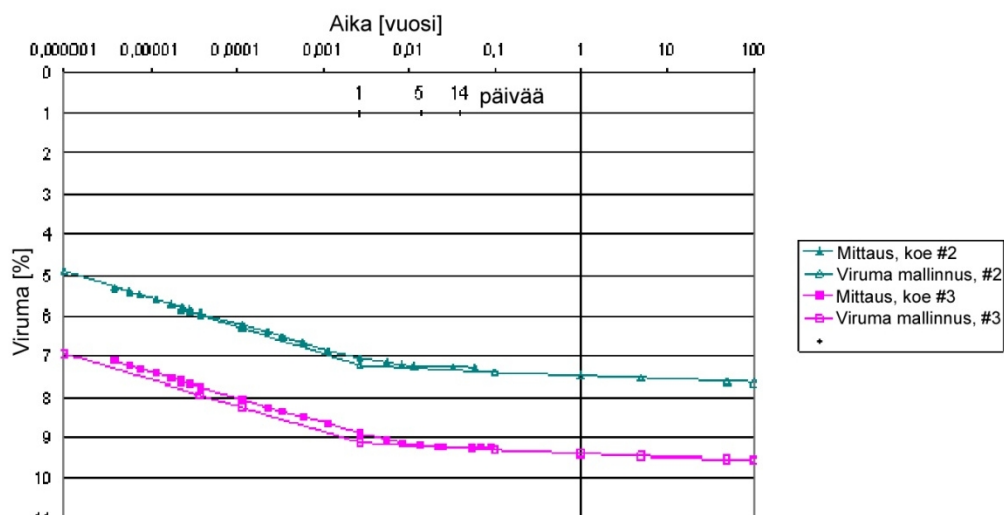
$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu}, \quad (15)$$

missä ν on Poissonin luku

(RIL 1985)

4.4.6 Pysyvät muodonmuutokset

Staattisen kuormituksen alaisena vaahtolasimurskekerros käyttäytyy kuten maa-
ainekset yleensä. Vaahtolasimurskekerrokseen jää plastinen, palautumaton muodon-
muutos, eli viruma, jännityksen poistuttua (Aabøe et al. 2005 a; RIL 157-I). Viruma-
tutkimukset on tehty HASOPOR-vaahtolasimurskeelle 500 mm halkaisijaltaan oleval-
la isomittakaavaisella ödometrikokeella jopa 250 kPa kuormituksella. Staattisen 250
kPa kuormituksen alla suurimmat virumat tapahtuvat ensimmäisen vuorokauden ai-
kana. Mittauksia on jatkettu 14 vuorokautta, minkä jälkeen muodonmuutoskäyttäyty-
minen on mallinnettu 100 vuoden käyttöikään asti. Kuvassa 22 on esitetty kuvaajalla
HASOPOR-vaahtolasimurskeen viruminen ja taulukossa 14 on esitetty saman kokeen
tulokset. Taulukossa 15 on esitetty Glasopor vaahtolasimurskeen muodonmuutokset
saman koejärjestelyn alaisena. (Byggforsk 2005 b; Aabøe et al. 2005 a; Sintef 2010)



Kuva 22. Isomittakaavaisessa ödometrikokeessa mitatut ja mallinnetut virumat staattisella 250 kPa kuormitustasolla (Aabøe et al. 2005 a)

Kuten kuvasta 22 voidaan havaita, ensimmäisen päivän aikana kokoonpuristumista tapahtuu 2- 2,5 %. Ensimmäisen päivän jälkeen seuraavan 50 vuoden aikana kokoonpuristumista tapahtuu alle 0,6 %. (Byggforsk 2005 b; Aabøe et al. 2005 a; Sintef 2010)

Taulukko 14. HASOPOR-vahtolasimurskeen pysyvät muodonmuutokset staattisessa kuormituksessa eri jännitystasoilla (Byggforsk 2005 b)

Jännitystaso	HASOPOR		
	80 kPa	150 kPa	250 kPa
Muodonmuutos 1 päivän jälkeen [%]	2,4	5,1	9
Viruminen 1 päivän jälkeen, 1 vuoden aikana [%]	0,12	0,25	0,47
Viruminen 1 päivän jälkeen, 50 vuoden aikana [%]	0,17	0,31	0,6
Kokonaisviruminen 50 vuoden aikana [%]	2,6	5,5	9,6

Taulukko 15. Glasopor-vahtolasimurskeen pysyvät muodonmuutokset staattisessa kuormituksessa eri jännitystasoilla (Sintef 2010)

Jännitystaso	Glasopor		
	80 kPa	150 kPa	250 kPa
Muodonmuutos 1 päivän jälkeen [%]	2,4	5	8,7
Viruminen 1 päivän jälkeen, 1 vuoden aikana [%]	< 0,1	< 0,1	< 0,35
Viruminen 1 päivän jälkeen, 50 vuoden aikana [%]	< 0,1	< 0,1	< 0,5
Kokonaisviruminen 50 vuoden aikana [%]	2,5	5,1	9,2

Eri vaahtolasimursketuotteiden viruman arvot vastaavat hyvin toisiaan. Kokonaisviruminen lisääntyy huomattavasti staattisen kuormituksen ollessa 250 kPa. Tie- ja katurakenteissa staattista kuormitusta tärkeämmäksi nousee syklisen kuormituksen vaikutus rakenteen pysyviin muodonmuutoksiin.

Hienoneminen

Kappaleen 4.2.1 taulukossa 6 on esitetty norjalaiset seulontatutkimuksen tulokset vaahtolasimurskeelle, joka on ollut vuoden raskaasti liikennöidyn tien rakenteessa. Tuloksista ei voida nähdä erityistä taipumusta vaahtolasimurskeen hienonemiseen tiekuormituksen alla (Aabøe et al. 2005 a). Seulotuissa näytteissä on alle 8 mm rae-kokoa keskimäärin 30 %, vaikkakin lajitteen suhteellisen osuuden vaihtelu on eri kohteiden välillä hyvin suuri. TTY:n laboratorioissa aiemmin tehdyissä korkean kuormitustason dynaamisissa kolmiaksaalikokeissa materiaalin hienoneminen vaikeutti luotettavien tulosten saamista (TTY 2012).

Suoraan liikennekuormituksen alla oleva vaahtolasimurske hienonee silminnähdessä, kuten voidaan havaita kuvasta 23.



Kuva 23. Toistuvasti pyöräkuormaajalla yliajettua vaahtolasimursketta Uusio-aines Oy:n tehtaan varastoalueella 5.4.2013 (Emilia Köyljärvi 2013)

Kuvan 23 tilanteen ehkäisemiseksi ylimääräistä liikennöintiä suoraan vaahtolasimurskekerroksen päällä tulisi työmaolosuhteissa välttää. On ensiarvoisen tärkeää noudattaa vaahtolasimurskevalmistajan rakennusohjeita.

4.5 Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet

4.5.1 Kapillaarinen nousukorkeus

Vaahtolasimurskeen kapillaarinen nousukorkeus määritetään standardin EN 1097-10 mukaisesti sillä erolla, että näytteen on oltava viisi kertaa näytteen suurimman rae-koon levyinen ja korkuinen, mutta mitoiltaan vähintään 300 mm. Tutkittava näyte tiivistetään tulevaa käyttötarkoitusta vastaavasti. Ilmoitettu kapillaarinen nousukorkeus on kolmen koetuloksen keskiarvo. HASOPOR- ja Glasopor-vaahtolasimurskeiden kapillaariset nousukorkeudet on esitetty taulukossa 16. (Byggforsk 2005 a)

Taulukko 16. HASOPOR- ja Glasopor-vahtolasimurskeiden kapillaariset nousukorkeudet (Byggforsk 2005 b; Sintef 2010)

Tuote	Tiheys (tiivistetty) [kg/m ³]	Kapillaarinen nousu- korkeus [mm]	Veden imeytyminen [kg/m ²]
HASOPOR Light	~240	< 120	3,9 ¹⁾
HASOPOR Standard	~330	< 170	12,3 ¹⁾
Glasopor	~230	< 175	6,8 ²⁾

1) Vedenimeytyminen 50 viikon jälkeen

2) Vedenimeytyminen 52 viikon jälkeen

HASOPOR Standard- ja Glasopor-vahtolasimurskeiden kapillaariset nousukorkeudet ovat melko lähellä toisiaan. Foamit-vahtolasimurskeen kapillaariseksi nousukorkeudeksi ilmoitettu 200 mm on norjalaisia vahtolasimurskeita korkeampi. (Byggforsk 2005 a)

4.5.2 Vedenimeytyminen

Vedenimeytyminen vahtolasimurskeeseen on tärkeä materiaaliominaisuus, sillä se vaikuttaa suuresti vahtolasimurskeen tilavuuspainoon pitkäaikaisessa rakenteessa. Vedenimeytyminen Foamit-vahtolasimurskeeseen on määritetty pitkäaikaisessa upotuksessa. Foamit-vahtolasimurskeen vedenimeytymisarvot on esitetty taulukossa 17.

Taulukko 17. Vedenimeytyminen Foamit-vahtolasimurskeeseen, kun näyte on ve-siupotuksessa (Uusioaines Oy 2012)

	Kosteuspitoisuus [paino-%]
Lyhytaikainen upotus (28 vrk)	60
Pitkäaikainen upotus (52 vk)	100

Vedenimeytymiskokeet on tehty Glasopor- ja HASOPOR-vahtolaseille standardin EN 12087 metodin 2 mukaisesti seuraavin CUAP:ssa määritetyin poikkeuksin: näyte on tilavuudeltaan vähintään 10 litraa ja näyte ympäröidään verkolla, jonka silmäkoko on noin 2 mm. Varma tulos saadaan kolmelle näytteelle tehdystä koesarjasta. (Byggforsk 2005 a) Näytteitä ei ole tiivistetty ennen vedenimeytymiskokeita (Skogstad et al. 2005). Glasopor- ja HASOPOR-vahtolasimurskeiden vedenimeytymisen arvot on esitetty taulukossa 18.

Taulukko 18. Vedenimeytyminen Glasopor- ja HASOPOR-vahtolasimurskeisiin, kun näyte on vesiuotuksessa (Byggforsk 2005 b; Sintef 2010)

Tuote	Tiheys [kg/m ³]	Kosteuspitoisuus			
		28 vrk upotuksessa [paino-%]	52 vk upotuksessa [paino-%]	68 vk upotuksessa [paino-%]	68 vk upotuksessa [paino-%]
Glasopor	185	60	116	-	-
HASOPOR Light	180	31	-	70	40*
HASOPOR Standard	225	30	-	65	50*

*) Vedenimeytymisestä vähennetty 5 minuutin aikana kokeen alussa rakeiden pinnalle tapahtunut imeytyminen.

Glasopor- ja Foamit-vahtolasimurskeiden vedenimeytymisen arvot ovat todella lähellä toisiaan. HASOPOR-vahtolasimurskeen arvot pitkäaikaisessa upotuksessa eivät ole näiden kanssa täysin vertailukelpoisia eripituisen tutkimusjakson takia. HASOPOR-vahtolasimurskeen vedenimeytymisen tuloksissa on vähennetty heti ensimmäisen 5 minuutin aikana tapahtunut veden imeytyminen rakeiden pinnalle.

4.5.3 Jäädytys-sulatuskestävyys

Glasopor- ja HASOPOR-vahtolasimurskeiden jäädytys-sulatuskestävyyttä on tutkittu ETA:a varten EN 12091 standardin mukaisesti Norjassa. Ensin koekappaleet on altistettu vedenimeytymiselle standardin EN 12087 mukaisesti. Vahtolasimurskeen on annettu kyllästyä vedellä 4 viikkoa ja kokeen aikana vahtolasimursketta on rasitettu 300 jäädytys-sulatussyklillä. Sintef:n (2010) ja Byggforsk:n (2005) mukaan vahtolasimurskeen puristuslujuus ei osoita heikkenemisen merkkejä lähtötilanteeseen verrattuna jäädytys-sulatusrasituksen jälkeisessä isomittakaavaisessa ödometrikokeessa, joka on tehty sekä kostealle että kuivatulle materiaalille. Vahtolasimurskeessa ei Aabøe et al. (2005) mukaan ole myöskään havaittavissa halkeamia tai hajoamista jäädytys-sulatuskokeen jälkeen. Jäädytys-sulatuskokeen jälkeisen vahtolasimurskeen tiheyden arvot on esitetty taulukossa 5 kappaleessa 4.2.1. (Aabøe et al. 2005 a; Byggforsk 2005 b; Sintef 2010)

4.5.4 Vedenläpäisevyys

Vahtolasimurskeen vedenläpäisevyys arvioidaan raekokojakauman ja raemuodon perusteella mursketta ja soraa vastaavaksi. Vedenläpäisevyyden on arvioitu olevan $\geq 0,1$ m/s. (Eriksson & Hägglund 2008)

4.5.5 Lämmönjohtokyky

Vahtolasimurske soveltuu kaikkien materiaalivalmistajien ja materiaalitutkimusten mukaan lämmöneristeeksi matalan lämmönjohtokykynsä ansiosta. Norjan rakennustutkimuskeskus, Norwegian Building Research Institute (NBI), on tutkinut HASOPOR-vahtolasimurskeen lämmönjohtavuutta lämpövuoto -kokeella EN 12667 ja ISO 8301 standardien mukaisesti (Skogstad et al. 2005).

Foamit-vahtolasimurskeen lämmönjohtavuuden arvot on esitetty taulukossa 19. Glasopor- ja HASOPOR-vahtolasimurskeiden lämmönjohtavuuden arvot on esitetty taulukossa 20. Vahtolasimurskeiden lämmönjohtavuudet vastaavat hyvin toisiaan.

Taulukko 19. Foamit-vahtolasimurskeen lämmönjohtavuuden arvot (Uusioaines Oy 2012)

	Lämmönjohtavuus [W/mK]
Kuiva	0,11
Kostea	0,15
Märkä	0,20

Aabøe et al. (2005) mukaan HASOPOR:n lämmönjohtavuus kuivana ja tiivistettynä on laboratorio-olosuhteissa 0,10 W/mK, kun ilman lämpötila on +10 °C. Skogstad et al. (2005) mukaan kostean vahtolasimurskeen taulukossa 20 esitetyt lämmönjohtavuuden korjatut arvot on laskettu seuraavan yhtälön mukaan:

$$q = -\lambda^* \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + q_{pc}, \quad (16)$$

missä q on kokonaislämpövuoto [W/m²]
 λ^* on kostean materiaalin lämmönjohtavuuden arvo [W/mK]
 T on lämpötila [K]
 q_{pc} on olomuodon muutosten aiheuttama lämpövuoto [W/m²]

(Sandberg & Jonsson 1995, Skogstad et al. 2005 mukaan) Koska vesihöyryn diffuusion vastustusarvoa ei ollut tiedossa, sille käytettiin arvoa $\mu = 3$. (Skogstad et al. 2005)

Taulukko 20. Glasopor- ja HASOPOR-vahtolasimurskeiden lämmönjohtavuuden arvot (Skogstad et al. 2005; Byggforsk 2005 b; Eriksson & Hägglund 2008; Sintef 2010)

	HASOPOR Light	HASOPOR Standard	Glasopor
Tiheys (kuiva) [kg/m ³]	~210	~280	~230
Tiivistymis-kerroin	1,15	1,25	1,25
Lämmönjohtavuus, kuiva materiaali λ [W/mK]	0,102	0,110	0,112
Korjauskerroin, kosteuspitoisuus 25 paino-% [Fm]	1,26	1,32	1,23
Korjattu lämmönjohtavuus, λ^* kosteuspitoisuus 25 paino-% [W/mK]	0,129	0,145	0,138
Korjattu lämmönjohtavuus, λ^* kosteuspitoisuus 58 paino-% [W/mK]	0,190	0,215	-

Vahtolasimurskeen mekaanisen kestävyuden vuoksi pelkkää lämmöneristyskerrosta suunniteltaessa on tärkeää ottaa huomioon, ettei vahtolasimurskekerrokseen kohdistu murskaavaa tai leikkaavaa jännitystä liikennekuormituksesta. Vahtolasimurskeen eristävä vaikutus voi myös johtaa tienpinnan jäätymiseen muusta tieympäristöstä poikkeavasti. (Aabøe & Øiseth 2005)

Øiseth et al. (2006) esittelevät norjalaisessa tiekohteessa toteutetun tutkimuksen, jossa samalle tieosuudelle tehtiin 4 koerakennetta. Yksi rakenteista oli tavallinen murskerakenne ilman eristystä ja kolme muuta rakennetta oli eristetty XPS-eristeellä, kevytsoralla ja vahtolasimurskeella. Tutkimuksen tuloksena vahtolasimurskerakenne toimi parhaiten eristeenä. Tutkimuksen tulosta ei voida kuitenkaan pitää absoluut-

tisena totuutena ennen kuin mittauksia on saatu pidemmältä tutkimusjaksolta. (Øiseth et al. 2006)

4.6 Kemialliset ominaisuudet

4.6.1 Yleistä

Vahtolasimurske on palamaton amorfinen aine, joka koostuu pääosin piioksidista, eli kvartsista. Vahtolasimurske on keraaminen materiaali, eikä vahtolasimurske reagoi yleisten infrarakenteissa esiintyvien kemiallisten aineiden, kuten tiesuolan ja öljytuotteiden, kanssa. (Eriksson & Hägglund 2008; Ramboll 2013) Vahtolasimurske ei sisällä haihtuvia yhdisteitä, eikä orgaanisia haitta-aineita (Ramboll 2013). Suomalaisen Foamit-vahtolasimurskeen pH on 10. Emäksisyytensä vuoksi vahtolasimurskeen ja sinkityn rakenteen väliin asennetaan suodatinkangas. (Uusioaines Oy 2012) Ruotsalaisen julkaisun mukaan vahtolasimurske on kemiallisesti neutraali tai osallistuu reaktioihin heikkona emäksenä (Eriksson & Hägglund 2008).

4.6.2 Kokonaispitoisuudet

Eräiden alkuaineiden kokonaispitoisuudet Foamit-, Glasopor- ja HASOPOR-vahtolasimurskeissa on esitetty taulukossa 21. Foamit-vahtolasimurskeen arseenin, bariumin, kadmiumin, kromin, kuparin, elohopean, molybdeenin, nikkelin, lyijyn, antimonin, seleenin ja sinkin kokonaispitoisuudet on määritetty standardien ISO 17294-2, EPA 3051A ja SFS-EN ISO 15587-1 mukaisesti. Metallien kokonaispitoisuudet on analysoitu ICP-MS tekniikalla. (Ramboll 2013)

Taulukossa 21 vahtolasimurskeen kokonaispitoisuuksia on verrattu seuraaviin arvoihin:

- Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista liitteessä esitettyihin kynnysarvoihin, eli PIMA-kynnysarvoihin (VNa 214/2007).
- Norjalaisiin vahtolasimurskeelle määritettyihin, tierakentamisessa sovellettaviin, raja-arvoihin (Petkovic et al 2006).
- Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa liitteessä 1 esitettyihin betonimurskejätteen uudelleenkäyttöä maarakenteessa koskeviin raja-arvoihin (VNa 591/2006).

Suomessa ei ole omaa raja-arvoasteikkoa vahtolasimurskeen sisältämien alkuaineiden kokonaispitoisuuksille. PIMA-kynnysarvot on tarkoitettu maaperän pilaantuneisuuden arviointiin, joten ne soveltuvat huonosti rakennustuotteeksi hyväksytyyn vahtolasimurskeen laadun arviointiin. Norjassa vahtolasimurske on vakiinnuttanut paikansa tierakenteissa käytettynä rakennustuotteena niin, että sen sisältämien alkuaineiden kokonaispitoisuuksille on määritetyt raja-arvot (Petkovic et al. 2006).

Taulukko 21. Glasopor-, HASOPOR- ja Foamit-vahtolasimurskeissa esiintyvien tiettyjen alkuaineiden kokonaispitoisuudet ja viitearvot (Byggforsk 2005; Petkovic et al. 2006; VNa 591/2006; VNa 214/2007; Sintef 2010; Ramboll 2013)

Alkuaine	Alkuaineen pitoisuus [mg/kg]						
	Glasopor ICP-AES määrittäminen	HASOPOR ICP-AES määrittäminen	HASOPOR XRF määrittäminen	Foamit ICP-MS määrittäminen	PIMA kynnys-arvo	Norjalaiset raja-arvot	Betonimurskeen raja-arvot
Arseeni	27	< 30		3,4 - 13	5	30	50
Barium				2,6 - 31			
Kadmium	1,2	< 2		0,2 - 0,46	1	2	10
Kromi	488		< 400	7,4 - 18	100	550	400
Kupari	24		< 150	< 10 - 19	100	200	400
Elohopea	< 0,01 ¹⁾	< 0,15		< 0,2	0,5	1	
Mangaani	9218						
Molybdeeni				< 2 - 4,4			
Nikkeli	14			4 - 20	50	50	
Lyijy	448		< 1000	23 - 37	60	800	300
Antimoni				0,92 - 6,6	2	150	
Seleen				< 1			
Sinkki	87			< 5 - 7,3	200	200	700

1) Alle havaittavan rajan

Foamit-vahtolasimurskeen arseenipitoisuus on korkeimmillaan 13 mg/kg, joka ylittää arseenin PIMA-arvon 5 mg/kg. Arseeni on erittäin myrkyllistä vesieliöille. Myös antimonin määrä, joka on korkeimmillaan 6,6 mg/kg, ylittää PIMA-raja-arvon 2 mg/kg. Tietyt antimoniyhdisteet luokitellaan erittäin myrkyllisiksi vesieliöille. (Reinikainen 2007) PIMA-arvot on määritetty maaperälle, jonka tilavuuspaino 1500–2000 kg/m³ on huomattavasti suurempi kuin vahtolasimurskeen 200–250 kg/m³, joten tilavuutta kohti vahtolasimurskeen sisältämät haitta-ainemäärät ovat verrattain pieniä. (Ramboll 2013)

4.6.3 Liukoisuus

Glasopor-, HASOPOR- ja Foamit-vahtolasimurskeiden liukoisuusmääritykset on esitetty taulukossa 22. Vahtolasimurskeiden liukoisuudet on määritetty 2-vaiheisella ravistelutestillä standardin SFS-EN 12457-3 mukaisesti. Vertailun vuoksi taulukossa on esitetty maarakenteissa uudelleenkäytettävän betonimurskejätteen liukoisuuksien raja-arvot (VNa 591/2006).

Taulukko 22. Glasopor-, HASOPOR- ja Foamit-vahtolasimurskeissa esiintyvien tiettyjen alkuaineiden liukoisuudet 2- vaiheisessa ravistelutestissä ja viitearvot (Byggforsk 2005 b; VNa 591/2006; Sintef 2010; Ramboll 2013)

Alkuaine	Alkuaineen pitoisuus [mg/kg]			
	Glasopor	HASOPOR	Foamit	Betonimurske- jätteen raja-arvot
Arseeni	1,66	2	0,75 - 2,6	0,5
Barium			0,11 - 0,39	20
Kadmium	< 0,0019	< 0,005 ¹⁾	< 0,02	0,02
Kromi	0,018	0,05	< 0,02 - 0,048	0,5
Kupari	0,025	0,1	< 0,02 - 0,12	2,0
Elohopea		0,002	< 0,003 - 0,003	0,01
Mangaani	1,35			
Molybdeeni			0,044 - 0,12	0,5
Nikkeli	0,014		< 0,02 - 0,09	0,4
Lyijy	0,055	0,05	0,036 - 0,57	0,5
Antimoni			0,43 - 1,9	0,06
Seleeni			< 0,02 - 0,043	0,1
Sinkki	0,032		< 0,02	4,0

1) Alle havaittavan rajan

Vahtolasimurskeiden liukoisuuksissa arseenin ja antimonin määrät ovat vertailtuja raja-arvoja korkeammat, samoin kuin alkuaineiden kokonaispitoisuuksissakin. Myös lyijyn määrä ylittää korkeimmillaan 0,57 mg/kg arvolla 0,5 mg/kg raja-arvon. Lyijypitoisuus selittyy kierrätyslasin joukossa olevalla mahdollisella lyijyylasijätteellä. Myös liukenevuusarvojen tarkastelussa on huomioitava, että raja-arvot on määritetty rakennusaineelle, jonka tilavuuspaino 1500–2000 kg/m³ on huomattavasti suurempi kuin vahtolasimurskeen 200–250 kg/m³, joten tilavuutta kohti vahtolasimurskeen sisältämät haitta-ainemäärät ovat verrattain pieniä. (Ramboll 2013)

Rambollin tekemässä kulkeutumisriskianalysissä on todettu, ettei vahtolasimurskeen käyttö tierakenteessa aiheuta pohjaveden pilaantumisriskiä vettäläpäisevän maa-aineksen alueilla, sillä tällaisilla alueilla pohjavedenvirtaus laimentaa edellä mainittujen kriittisten haitta-aineiden pitoisuudet merkityksettömän alhaiselle tasolle. Myöskään hienorakeisten maalajien alueilla vahtolasimurske ei aiheuta merkittävää pohjavedenpilaantumisriskiä, sillä tällaisten alueiden pohjavesimuodostumat eivät ole hyödynnettävissä. (Ramboll 2013)

5 Tutkimusmenetelmät ja tulokset

5.1 Kenttätutkimukset

5.1.1 Kosteuspitoisuus

Maarakenteessa pitkäaikaisesti olevan vaahtolasimurskeen kosteuspitoisuuden kehittymistä tutkittiin ottamalla vaahtolasimurskenäyte varastokasasta. Näytteen kosteus on kasassa vaahtolasimurskeeseen kertyvää kosteutta, joka syntyy, kun sadevesi ja muu ympäristöstä kertyvä kosteus pääsee hitaasti virtaamaan varastokasan läpi. Kuvassa 24 on esitetty vaahtolasimurskeen varastokasa Kirkkonummella. Vaahtolasimurske oli ajettu varastokasaan 5.10.2012. Näytteet otettiin 13.5.2013 kaivamalla kasa auki työkoneavusteisesti. Näytteitä otettiin kaksi. Kummankin näytteen määrä oli 10 litraa. Näytteet säilytettiin vesitiiviissä astioissa ennen kosteuspitoisuuden määrittystä.

Varastokasasta otettujen näytteiden kosteuspitoisuuden määrittäminen tehtiin Uusioaines Oy:n tehtaassa laboratorioissa 22.5.2013. Kosteat näytteet punnittiin aluksi kuljetusastian kanssa. Ensimmäinen näyte jaettiin kahdelle kuivatuspellille ja toinen näyte kolmelle kuivatuspellille. Näytteitä kuivattiin 110 °C lämpötilassa kaksi tuntia ja jäähdytettiin vähintään kaksi tuntia ennen punnitsemista. Tätä toistettiin yhteensä kolme kertaa. Neljännellä kerralla näytteitä kuivattiin vain 1 tunti. Ensimmäisen näytteen kosteuspitoisuudeksi saatiin 34 % ja toisen näytteen kosteuspitoisuudeksi 27 %. Kosteuspitoisuuden määrittämisen mittauspöytäkirja on esitetty liitteessä 4.

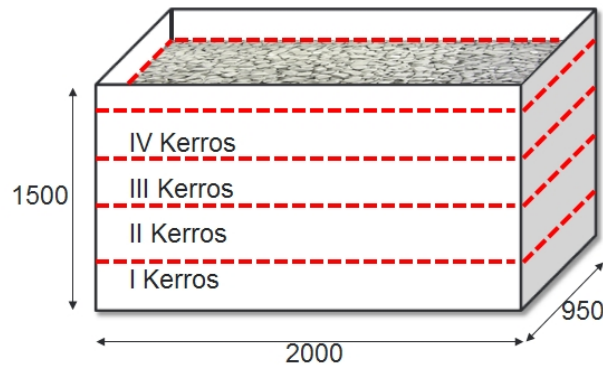


Kuva 24. Vaahtolasimursketta varastokasassa Kirkkonummella (Uusioaines Oy Jarmo Pekkala 2013)

5.2 Laboratoriotutkimukset

5.2.1 Tiivistyskoe

Vaahtolasimurskeelle tehtiin laboratorio-olosuhteissa tiivistyskoe, jonka tarkoituksena oli replikoida tiivistystyön vaahtolasimursketta hienontavaa vaikutusta ja toisaalta tiivistyksen ja hienonemisen vaikutusta vaahtolasimurskeen kantavuusarvoihin. Vaahtolasimurskeen tiivistyskokeet tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston rakennushallissa 13.–17.6.2013. Professori Pauli Kolisojan suunnittelema tiivistyskokeen periaate on esitetty liitteessä 5. Koe rakennettiin 2 metriä pitkään, 0,95 metriä leveään ja 1,5 metriä korkeaan, pohjasta avoimeen teräslaattikkoon. Periaatekuva koejärjestelystä on esitetty kuvassa 25. Koetta varten Uusioaines Oy toimitti 3 suursäkillistä Foamit 60A -vaahtolasimursketta, josta seulottiin ennen näytteen rakentamista pois alle 18 mm raekoon aines. Vaahtolasimurske oli koehetkellä toimituskosteudessa, kuivana suoraan valmistuslinjalta.



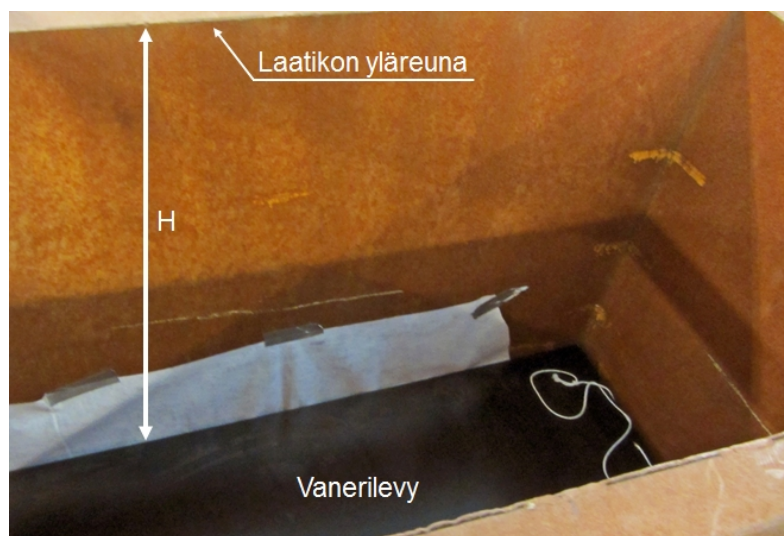
Kuva 25. Periaatekuva tiivistyskokeen laatikon dimensioista ja koejärjestelystä

Jokaisen vaahtolasimurskekerroksen alle asennettiin suodatinkangas löyhästi niin, että voimat välittyivät vaahtolasirakeelta toiselle myös kerrosten välillä. Näyte rakennettiin 30 cm paksuisina kerroksina. Kuvassa 26 on esitetty, kuinka suodatinkangas on asetettu teräslaattikon pohjalle lattiaa vasten ja kuinka vaahtolasimursketta levitetään laatikon sisällä.



Kuva 26. Tiivistyskoe näytteen pohjakerroksen rakentaminen (Emilia Köyljärvi 2013)

Kerroksen paksuus määritettiin asettamalla vaahtolasimurskeen päälle vaneri, jonka yläreunan etäisyys laatikon yläreunasta mitattiin, kuten kuvassa 27 on esitetty. Mittaukset tehtiin 6 mittapistestä, joiden sijainti on esitetty mittauspöytäkirjassa liitteessä 6. Jokaiseen kerrokseen levitetyn vaahtolasimurskeen määrä punnittiin 5 gramman tarkkuudella. Näytteen kokonaiskorkeus oli 122 cm ennen tiivistyksen aloitusta. Näytteen rakentamisen aikana mitatut näytteen painon ja korkeuden mittaustulokset on esitetty mittauspöytäkirjassa liitteessä 6. Näytteeseen käytettiin kokonaisuudessaan 492 kg vaahtolasimursketta ja näytteen lopullinen kokonaistilavuus oli 2,3 m³. Näin ollen näytteen keskimääräinen irtotiheys ennen tiivistyksen aloitusta oli 217 kg/m³. Näytteen dimensiot ennen tiivistyksen aloittamista on esitetty taulukon 24 ylälaidassa.



Kuva 27. Periaatekuva tiivistysnäytteen korkeusmittojen mittaamisesta (Emilia Köylijärvi 2013)

Koko vaahtolasimurskenäytettä tiivistettiin vanerilevyn päältä 127 kg painoisella Jytätärylevyllä yksi kierros kerrallaan, kuten on esitetty kuvassa 28. Yksi kierros täryjyrällä laatikon sisäpuolen ympäri vanerin päällä kesti noin 30 sekuntia. Tiivistäminen tapahtui vanerilevyn päältä, jolloin tärylevyn vaikutus tasattiin laajemmalle alueelle kerroksen pinnalla ja tärylevyn helppo liikkuvuus pystyttiin takaamaan. Tärylevy ei osunut tiivistyksen aikana laatikon reunoihin, jolloin tiivistävä vaikutus tuli vaahtolasimurskekerrokseen vain ylhäältä päin.

Jokaiseen tiivistyskierrokseen kulunut aika kelloitettiin ja tiivistyksen jälkeen kerroksen korkeus mitattiin samoista 6 mittauspisteestä kuin näytteen kokoamisvaiheessa. Näin tiivistämällä ja mittaamalla jatkettiin yhteensä 8 tiivistyskierrosta. Sen jälkeen tehtiin vielä kaksi korkeusmittausta niin, että ennen korkeusmittausta tärylevyllä tehtiin kaksi tiivistyskierrosta, eli yhtä korkeusmittausta vastaava tiivistysaika kaksinkertaistui. Tiivistyskoetta jatkettiin niin kauan, että rakenteen tiivistyminen yhden tiivistyskierroksen aikana vakiintui noin 6 mm:iin. Näytteen kokonaispaksuuden muutoksen mittaustulokset tärytyskierrosten välillä sekä tärytysajat on esitetty mittauspöytäkirjassa liitteessä 7. Kokonaisuudessaan näyte tiivistyi 130 mm, eli noin 10 % kokonaispaksuudestaan, kuten voidaan lukea taulukosta 24.



Kuva 28. Tiivistyskoenäytteen tiivistys täräjäjyrällä vanerilevyn päältä (Emilia Köylijärvi 2013)

Ennen tiivistystyön aloitusta ja jokaisen tiivistyskierroksen jälkeen vaneri nostettiin näytteen päältä ja tiivistetyn kerroksen pinnalta mitattiin tiivistetyn materiaalin jäykkyyttä kuvaava moduularvo käsikäyttöisellä Loadman-pudotuspainolaitteella. Loadman-pudotuspainolaitteen alla käytettiin 200 mm halkaisijaltaan olevaa kuormituslevyä. Pudotettava paino oli massaltaan 10 kg. Pudotuspainomittaukset tehtiin jokaisen tiivistyskierroksen jälkeen näytteen keskilinjalta kolmesta pisteestä, joiden sijainti on esitetty mittauspöytäkirjassa liitteessä 8. Jokaisesta mittauspisteestä tehtiin jokaisella mittauskerralla kolme peräkkäistä pudotuspainomittausta. Loadman-pudotuspainolaitteen käyttö on esitetty kuvassa 29.



Kuva 29. Tiivistetyn vaahtolasimurskeen jäykkyyttä kuvaavan moduularvon mittaus käsikäyttöisellä Loadman-pudotuspainolaitteella (Emilia Köylijärvi 2013)

Tiivistystyön loputtua vaahtolasimurskeen lopullinen korkeustaso mitattiin ja tehtiin pudotuspainolaitemittaukset kahdessa mittauspisteessä kolmesti ja viimeisessä mittauspisteessä kuudesti, jotta pystyttiin havainnoimaan, mihin E-moduulin arvoon mittauspisteen pudotuspainolaitemittauks tulokset asettuvat. Taulukossa 23 on esitet-

ty pudotuspainolaitemittauksen toisen pudotuksen tuottamien E_2 -arvojen kolmen mittauspisteen keskiarvot tiivistyskierroskohtaisesti. Taulukon viimeisessä sarakkeessa on esitetty moduuliarvon muutos tiivistyskierrosta kohti, sillä ennen kahta viimeistä pudotuspainolaitemittausta täryjyrällä tiivistettiin kaksi kierrosta. Täysi mittaustiedot on esitetty mittauspöytäkirjassa liitteessä 8.

Taulukko 23. Pudotuspainolaitemittausten E_2 -moduuliarvojen kierroskohtaiset kolmen mittauspisteen keskiarvot, täysi mittaustiedot liitteessä 8

Tiivistyskierrokset	E-moduuli [MPa]	Muutos edelliseen [MPa]	Muutos/tiivistyskierros [MPa]
0	18	-	-
I	26	8	8
II	29	3	3
III	33	4	4
IV	34	1	1
V	37	3	3
VI	40	2	2
VII	41	1	1
VIII	43	2	2
IX	47 *	4	2
X	49 *	2	1

* Kaksi tiivistyskierrosta

Ylin vaahtolasimurskekerros purettiin käsityönä muovisia työkaluja avuksi käyttäen, koska ylimmän kerroksen pinta oli pakkautunut hyvin tiiviiksi. Vaahtolasimurskekapaleet olivat liikkuneet vain vähän paikaltaan. Suuri osa suurimmista vaahtolasimurskerakeista oli murtunut ja halkeillut, mutta pysynyt muuten paikallaan. Mitä lähemmäksi ylimmän kerroksen pohjaa purkamisen eteni, sitä pienemmäksi rakeet olivat hajonneet. Suodatinkankaan päälle oli varissut ohut kerros hienorakeista vaahtolasimursketta.

Näytteestä purettu vaahtolasimurske seuloittiin 18, 8 ja 4 mm seulaverkkoja käyttäen hellävaroin manuaalisesti ja eri raekoon jakeet punnittiin 5 g tarkkuudella. Suodatinkangas poistettiin ja seuraavan vaahtolasikerroksen yläpinnan korkeusasema mitattiin vanerin päältä. Vaneria käytettiin korkeuserojen tasaamiseksi. Alemmat kerrokset eivät olleet pakkautuneet pinnastaan yhtä tiukaksi kerrokseksi kuin ylimmän kerroksen pinta. Näin ollen toisen ja kolmannen kerroksen purkamisessa pystyttiin käyttämään avuksi teräslapiota. Kun näytteen rakenne purkamisen edetessä löyhtyi, pienemmät vaahtolasirakeet varisivat lähemmäs kerroksen pohjaa.

Ennen näytteen alimman kerroksen purkamista teräslaatikko nostettiin pois näytteen ympäriltä purkamisen helpottamiseksi. Näytteen purkuvaiheen korkeusmittaustulokset ja seulantatulokset on esitetty liitteessä 9. Näytteen kerrosten yläpintojen korkeustasojen muutokset sekä niistä johdetut kerrospaksuuksien ja tiheyden muutokset on esitetty taulukossa 24.

Taulukko 24. Tiivistyskokeen tulokset. Kerrosjärjestys esitetty kuvassa 25.

		I Kerros	II Kerros	III Kerros	IV Kerros	Yhteensä
ENNEN TIIVISTYSTÄ	Näytteen paino [kg]	119,5	123,0	131,4	118,1	492,0
	Paksuus [mm]	325,7	298,8	313,0	279,8	1217,3
	Tilavuus [m ³]	0,6	0,6	0,6	0,5	2,3
	Tiheys [kg/m ³]	193,1	216,6	221,0	222,0	212,7
	< 18 mm # aines [kg]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TIIVISTYKSEN JÄLKEEN	< 18 mm # aines [kg]	1,4	2,1	3,4	4,0	11,0
	Hienontuminen [%]	1,2	1,7	2,6	3,4	2,2
	Yläpinnan muutos [mm]	-9,2	-17,3	-46,3	-130,3	-130,3
	Paksuuden muutos [mm]	-9,2	-8,2	-29,0	-84,0	-130,3
	Paksuuden muutos [%]	-2,8	-2,7	-9,3	-30,0	-10,7
	Uusi tilavuus [m ³]	0,6	0,6	0,5	0,4	2,1
	Uusi tiheys [kg/m ³]	198,7	222,7	243,5	317,3	238,2
	Tiheyden muutos [%]	2,8	2,7	9,3	30,0	10,7

5.2.2 Staattiset kolmiaksiaalikoeket

Kolmiaksiaalikoeksessa kuormitetaan sylinterinmuotoista materiaalinäytettä aksiaalisyymmetrisessä jännitystilassa. Näin voidaan imitoida luonnossa materiaaliin kohdistuvia maanpaineita ja kuormituksia. Kun tutkitaan karkearakeisia materiaaleja, kolmiaksiaalikoenäyte rakennetaan sullontamuottiin tiivistämällä. Kuvassa 30 on esitetty Tampereen teknillisen yliopiston suurimittakaavainen kolmiaksiaalikoelaitteisto, jolla voidaan testata jopa 200 mm ja 300 mm halkaisijaltaan olevia näytteitä. Rakennettava näyte ympäröidään kumilla, jolloin näytteen sisälle saadaan imettyä tyhjiö, kuten voidaan nähdä kuvasta 31. Tämän jälkeen näyte sijoitetaan tiiviiseen terässelliin, jonka sisälle saadaan paineilmalla luotua kaikissa kolmessa akselisuunnassa yhtä suuret pääjännitykset (σ_3). Näytettä puristetaan kokoon pystysuunnassa päätylevyn avulla. Pystysuora puristava voima aiheuttaa näytteeseen pystysuoran lisäjännityksen. Kun laskennallisesti lisäjännitys lisätään sellipaineeseen, saadaan pystysuora pääjännitys (σ_1). Deviatoriseksi jännitykseksi (q) kutsutaan pääjännitysten erotusta, ($\sigma_1 - \sigma_3$). Kolmiaksiaalikoelaitteiston anturit mittaavat näytteessä tapahtuvia muodonmuutoksia sekä näytteeseen vaikuttavia voimia kuormituksen aikana.



Kuva 30. Kolmiaksaalikoelaitteisto, näyteselli. Kuormitus ei vielä alkanut. (Emilia Köyljärvi 2013)

Uusioaines Oy:n Foamit 60A vaahtolasimurskeella tehtiin staattiset kolmiaksaalikoeket tarkemman lujuus-muodonmuutuskäyttäytymisen selvittämiseksi. Kokeet tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston rakennushallissa 18.–23.7.2013 suurella kolmiaksaalikoelaitteistolla.

Kolmiaksaalikoelaitteiston omien mitta-antureiden lisäksi vaahtolasimurskenäytteen ympärysmittan muodonmuutosta tarkkailtiin kolmella mitta-anturilla, jotka on esitetty kuvassa 31. Näillä mitta-antureilla pystyttiin mittaamaan näytteen vaakasuuntainen muodonmuutos luotettavasti, sillä mittatulos jakautuu paremmin useamman rakeen vaikutuspiiriin, eikä yksittäisen suuren rakeen siirtymä vaikuta harhaanjohtavan voimakkaasti vaakasuuntaisen muodonmuutoksen mittaustuloksiin.



Kuva 31. Kolmiakksiaalikoenäytteen ympärysmitan muodonmuutoksen mittalaitteisto. 20 kPa sellipaineessa kuormitettava vaahtolasimurskenäyte ennen terässällin paikalleen asentamista. (Emilia Köylijärvi 2013)

Näytekappaleet olivat sisähalkaisijaltaan 300 mm ja korkeudeltaan 550–600 mm. Näytteen piiri mitattiin 6 eri korkeusasemasta. Näytteiden tarkemmat mitat on esitetty liitteessä 10. Näytteet tehtiin vaahtolasimurskeella, josta oli poistettu alle 18 mm raekoon aines ennen näytteen rakentamista. Vaahtolasimurskeen raekoko oli tehdyissä näytteissä välillä 18–64 mm. Vaahtolasimurske kostutettiin pintakosteaksi sumuttamalla rakeiden päälle tislattua vettä ja antamalla veden imeytyä yön yli rakeiden pinnalle. Näytteiden kosteuspitoisuudet ennen kokeita ja kokeiden jälkeen on esitetty taulukossa 25. Kosteiden näytteiden tiheydet olivat ennen koetta 243–256 kg/m³, jotka asettuvat tiivistetyn Foamit-vahtolasimurskeen suunnitteluohjeessa annetun tiheyden vaihteluvälin (220–280 kg/m³) keskivaiheille tai hieman puolivälin alle.

Koesarjassa kuormitettiin kolme näytettä: ensimmäinen 20 kPa, toinen 40 kPa ja kolmas 80 kPa sellipaineessa. Ensimmäinen näyte tiivistettiin yhtenä kerroksena. Tiivistys tehtiin tärylevyllä teräslevyn päältä. Tärylevyllä täryttiin 5 kertaa noin 1 sekunnin jaksoissa. Tiivistysvaikutus jäi vähäiseksi, mikä näkyi näytteen alaosan yläosaa pienempänä halkaisijana, kun näyte mitattiin ennen kuormitusta. Kuvasta 31 voidaan nähdä näytteen ympärysmitan epätasalaatuisuus. Ensimmäisen näytteen kosteuspitoisuus kokeen alkaessa oli 13 %.

Ensimmäinen näyte kuormitettiin vakioidulla 20 kPa sellipaineella. Deviatorista jännitystä kasvatettiin siirtymäohjauksella, eli muodonmuutosnopeus pidettiin vakiona. Deviatorinen jännitys ja pystysuuntainen muodonmuutos kasvoivat tasaisesti ilman selkeitä porrastuksia. Kuormitusta jatkettiin niin kauan, että näytteessä oli tapahtunut pystysuuntaista kokoonpuristumista noin 5 % näytteen kokonaiskorkeudesta. Kuormituksen jälkeen näytteen mitat kirjattiin ylös ja puretun näytteen vaahtolasimurske seulottiin 2, 4, 8 ja 16 mm seuloilla. Seulontojen tulokset on esitetty liitteessä 11.

Ensimmäisen näytteen halkaisija kasvoi kokeen aikana keskiarvoisesti 1,38 %. Eniten näytteen leviämistä tapahtui näytteen alaosassa, jonka halkaisija kasvoi jopa 3,3 % kuormituksen seurauksena. Liitteen 11 seulontatuloksista voidaan nähdä, että näytteen kahdessa alemmassa kolmanneksessa oli 2 prosenttiyksikköä enemmän alle 16 mm raekoon materiaalia kuin näytteen yläosassa.

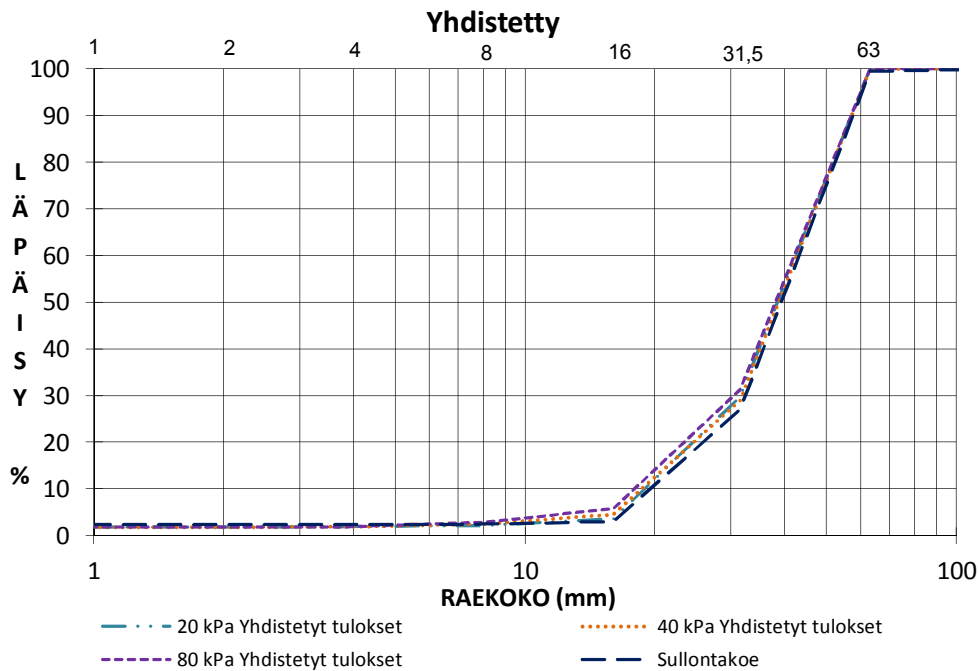
Toinen näyte tiivistettiin kolmessa kerroksessa. Jokaista kerrosta tiivistettiin tärylevyllä 3 kertaa noin 1 sekunnin jaksoissa. Kerroksittainen tiivistys johti mitoiltaan tasaisempaan näytteeseen verrattuna ensimmäiseen näytteeseen. Toinen näyte kuormitettiin 40 kPa sellipaineessa ja koe tehtiin samoin kuin ensimmäiselle näytteelle. Toinen näyte oli kokeen alkaessa 8,8 % kosteuspitoisuudessa.

Toisen näytteen halkaisija kasvoi kokeen aikana maltillisemmin kuin 20 kPa sellipaineen kokeessa, eli keskiarvoisesti vain 0,25 %. Näytteen alaosa säilyi mitoiltaan täysin muuttumattomana. 40 kPa sellipaineessa kuormitettu näyte hienoni kokonaisuutena yhtä paljon kuin 20 kPa sellipaineella kuormitettu näyte. Raekokojakauma kuitenkin paljastaa alle 16 mm raekoon aineksen määrässä jopa 4 prosenttiyksikön eron näytteen yläosan ja alaosan välillä. Tämä voi selittyä sillä, että hienontunut vaahtolasimurske varisee kokeen aikana näytteen pohjalle.

Kolmas näyte tiivistettiin, kuten toinenkin, kolmessa kerroksessa. Kolmas näyte kuormitettiin 80 kPa sellipaineella ja koe tehtiin samoin kuin aiemmille näytteille. Kolmas näyte oli kokeen alkaessa 5,0 % kosteuspitoisuudessa. Sellipaineella 80 kPa kuormitettu näyte käyttäytyi aiempiin koekappaleisiin nähden erikoisesti, sillä sen halkaisija ei suurentunut lainkaan kokeen aikana eli näyte ei puristuksen alaisena levinnyt. Päinvastoin näytteen halkaisija pieneni koko näytteen korkeudelta 0,2–1,4 %. Kolmannessa näytteessä oli kokeen jälkeen kaikista koenäytteistä eniten alle 16 mm raekoon ainesta, kuten voidaan nähdä kuvasta 32. Koko näytteen materiaalmäärästä kuitenkin vain 5,8 % oli raekooltaan alle 16 mm.

Vaahtolasimurskeelle tehdyt kolmiakσιαalikokeet tehtiin avoimessa tilassa, jolloin huokosvedenpainetta ei ole. Näin ollen mitatut kokonaisjännitykset vastaavat tehokkaita jännityksiä. Tavallisesti maanäytteessä syntyisi murtotilanne, kun pystysuora lisäjännitys saavuttaa suurimman arvonsa, mutta vaahtolasimurskenäytteillä ei saavutettu selvää murtotilannetta.

Kolmiakσιαalikokeiden lisäksi suoritettiin yhdelle näytteelle vertailun vuoksi sullontakoe. Tämä näyte jäi kaikista löyhimmäksi ja materiaalin hienonemistakin tapahtui sullontakokeessa vähiten, mikä voidaan havaita kuvasta 32.



Kuva 32. Kolmiakσιαalikokeessa kuormitettujen näytteiden yhdistetyt seulontatulokset

Taulukko 25. Kolmiakσιαalikoenäytteiden tiheydet, kosteuspuitoisuudet ja mitat ennen koetta ja kokeen jälkeen

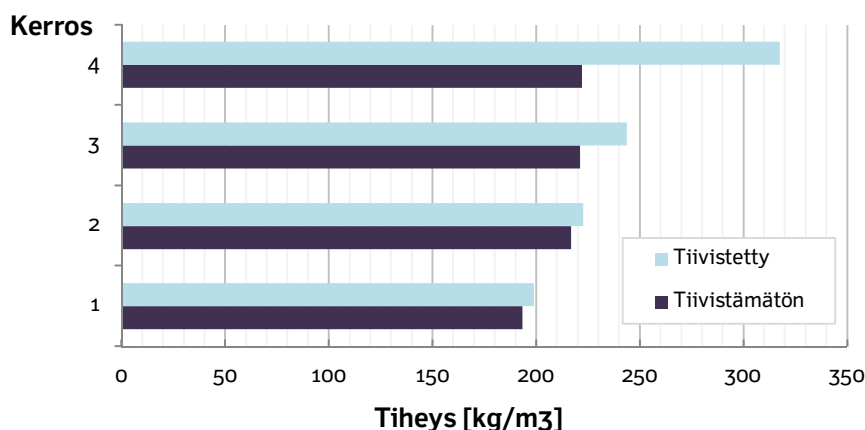
	20 kPa	40 kPa	80 kPa	Sullonta
Koenäytteen tiheys [kg/m ³]	256	248	243	231
Kosteuspitoisuus ennen koetta [%]	13,0	8,8	5,0	4,9
Kosteuspitoisuus kokeen jälkeen [%]	10,2	8,2	4,6	4,1
Kuivairtoteiheys ennen koetta [kg/m ³]	227	228	231	-
Kuivairtoteiheys kokeen jälkeen [kg/m ³]	233	239	247	221
Piiri, keskiarvo, ennen koetta [mm]	929,2	934,4	940,3	-
Piirin muutos, keskiarvo [mm]	12,7	5,0	-5,6	-
Halkaisija, keskiarvo, ennen koetta [mm]	291,8	294,4	295,3	-
Halkaisijan muutos, keskiarvo [mm]	4,0	0,7	-1,8	-
Halkaisijan muutos [%]	1,38	0,25	-0,60	-
Korkeuden muutos [mm]	30,0	32,0	32,0	-
Korkeuden muutos [%]	5,35	5,33	5,30	-

Kolmiakσιαalikoenäytteiden mittaustulokset on laajemmin esitetty liitteessä 10. Kolmiakσιαalikokeiden näytteet jäivät kohtalaisen löyhiksi verrattuna tiivistyskokeella saavutettuihin tiiviyksiin. Vaahtolasimurskenäytteitä ei haluttu tiivistää liikaa, ettei vaahtolasimurske hienontuisi ennen varsinaista kolmiakσιαalikoeetta.

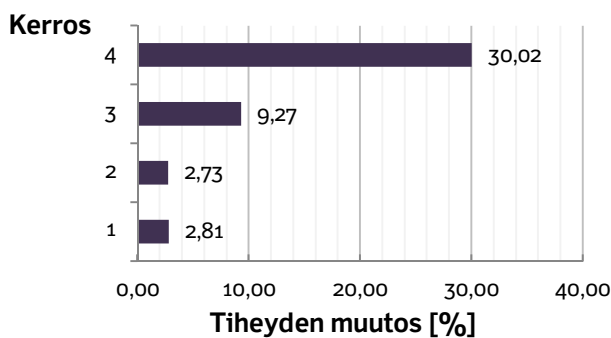
6 Tulosten tarkastelu

6.1 Tiiviys

TTY:n rakennushallissa tehdyssä tiivistyskokeessa selvästi eniten tiivistyi näytteen ylin eli 4. kerros. Silmämääräisen havainnoinnin lisäksi mittaukset vahvistavat tätä päätelmää, kuten kuvaajista kuvista 33 ja 34 voi nähdä.



Kuva 33. Vaahtolasimurskeen tiheyden muutos tiivistyskokeen aikana. Kerrosjärjestys esitetty kuvassa 25.



Kuva 34. Vaahtolasimurskeen tiivistyminen tiivistyskokeessa. Kerrosjärjestys esitetty kuvassa 25.

Ylimmän kerroksen 30 % tiivistyminen tarkoittaa samaa kuin tiivistymiskerroin 1,3, joka on hieman korkeampi kuin kappaleessa 4.1 taulukossa 2 esitetty Foamitvaahtolasimurskeen tiivistymiskertoimen vaihteluväli 1,15–1,25. Ero ylimmän (4) ja toiseksi ylimmän (3) kerroksen tiivistymisen välillä on merkittävä. Alimmat kaksi kerrosta (1 ja 2) ovat tiivistyneet ylempiin kerrokseen verrattuna todella vähän. Ylempien kerrosten suurta tiivistymisprosenttia selittää suoraan ylhäältä näytteeseen kohdistettu tiivistystyö. Alempien kerroksien kohdalla osa tiivistymisestä voi johtua laatikon seinämien resonoinnin aiheuttamasta tärinästä, sillä täryjyrällä tiivistettäessä teräslaatikko resonoi jossain määrin tärytyksen kanssa. Kuvan 34 perusteella olisi suositeltavaa tiivistää vaahtolasimursketta korkeintaan kokeen kahden kerroksen paksuisena, eli 60 cm paksuisina kerroksina, jotta voidaan taata koko tiivistettävän kerroksen tasainen tiivistyminen. Vaahtolasimurskeen rakennusohjeessa suositellaan huo-

mioimaan rakenteen tiivistyminen levittämällä vaahtolasimursketta vähintään 10 % rakenteen tavoitepaksuutta paksumpi kerros ennen rakenteen tiivistämistä. Kuvan 34 perusteella rakennusohjeen suositus on hyvä, sillä ylimmät vaahtolasimurskekerrokset ovat tiivistyneet 9-30 %.

Kuten kuvasta 35 voi nähdä, vaahtolasimurskeen pinta on hakeutunut tiivistyksen aikana tasaiseen vanerin määrittämään muotoon. Tiivistyksen aikana vaahtolasimurskeen yksittäiset rakeet halkeavat ja vaihtavat asentoa, mitä on havainnollistettu kuvassa 36.



Kuva 35. Tiivistyskoe näytteen yläpinta ennen tiivistystä ja tiivistyksen jälkeen. (Emilia Köyljärvi 2013)



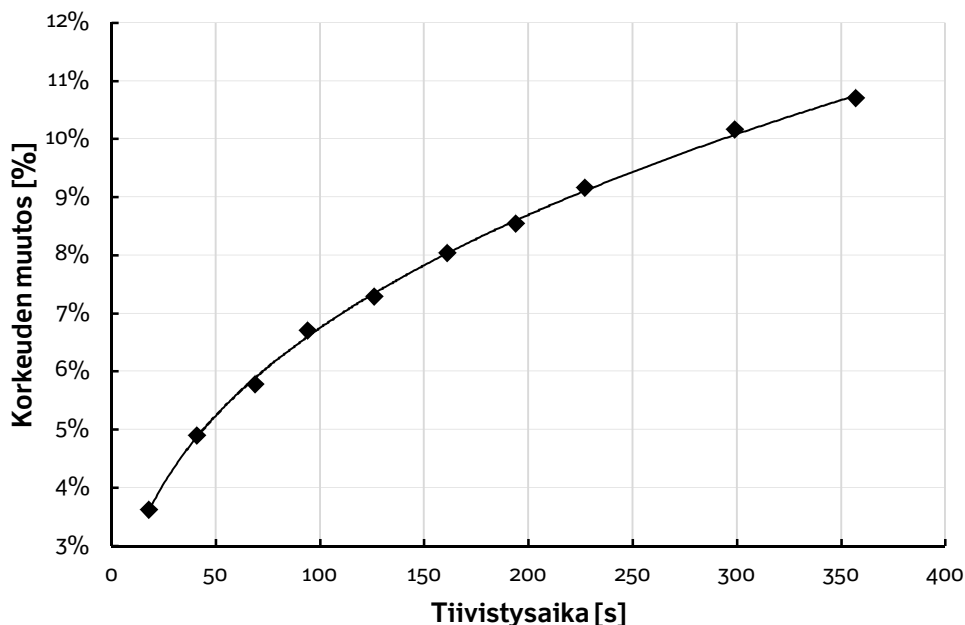
Kuva 36. Halkeillut yksittäinen vaahtolasimurskerake tiivistyksen jälkeen näytteen yläpinnassa. (Emilia Köyljärvi 2013)

Vaikka vaahtolasimurskekappaleet murtuvat ja halkeavat, murtumiskohtan karhea pinta estää kappaleita liikkumasta merkittävästi paikaltaan. Kitka vaahtolasimurskekappaleiden välillä on todella suuri, mikä oli tiivistyskokeessa havaittavissa erityisesti tiukimmin tiivistyneessä ylimmässä kerroksessa. Kun vaahtolasimurskekappaleiden välinen jännitys purkautuu ja rakenne löyhtyy, lohkeavat yksittäisestä rakeesta haljenneet kappaleet irralleen.

Tämän kokeen valossa vaahtolasimurskerakenne säilyi muuttumattomana niin kauan kun jännitykset kohdistuivat siihen samasta suunnasta, kuin mistä tiivistys oli tapahtunut. Rakennuskohteessa vaahtolasimurskerakenteeseen voi kohdistua nostavia ja vaakasuuntaisia voimia roudan tai vedenpinnan nousun seurauksena. Tällöin rakeiden väliset jännitykset voivat purkautua ja rakenne voi löyhtyä rakeiden siirtymisen

seurauksena. Rakenteen löyhtyminen on huomioitava erityisesti tilanteessa, jossa vaahtolasimurskerakenne puretaan osittain, esimerkiksi putkijohtokaivannon huoltotöiden aikana. Vaahtolasimurskekerros on tiivistettävä huolellisesti huoltotöiden jälkeen, jotta taataan rakenteen toimivuus ja riittävä kantavuus.

Tiivistyskoetta jatkettiin niin kauan, että rakenteen tiivistyminen yhden tiivistyskierron aikana muuttui vakioksi. Kuvassa 37 on esitetty näytteen kokonaiskorkeuden muutos kumulatiivisen tiivistysajan funktiona.



Kuva 37. Kumulatiivinen vaahtolasimurskenäytteen korkeuden muutos prosentteina näytteen alkuperäiseen korkeuteen nähden tiivistysajan funktiona

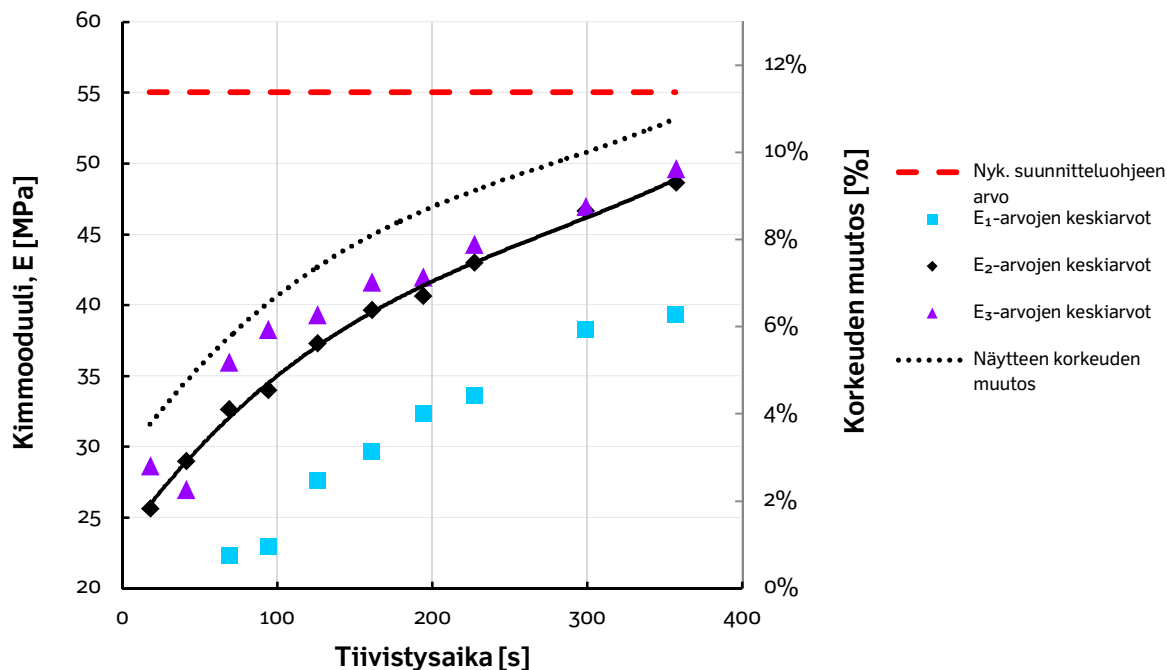
Mittauspisteiden välille piirretystä trendiviivasta voi selkeästi nähdä, että näytteen tiivistyminen on ollut voimakkainta tiivistyksen alussa, ja tiivistyminen alkaa tasaantua vakionopeuteen 200 sekunnin kumulatiivisen tiivistysajan kohdalla.

6.2 Kantavuus

Uusioaines Oy:n aiempien kokemusten mukaan pudotuspainolaite ei anna todenmukaisia kantavuuden arvoja suoraan vaahtolasimurskekerroksen päältä mitattaessa. Kuitenkin, kuten taulukosta 23 voidaan nähdä, suoraan tiivistetyn vaahtolasimurskeen päältä tehty pudotuspainolaitemittaus antaa viimeisellä mittauskerralla kantavuuden keskiarvoiseksi tulokseksi 49 MPa. Liitteen 5 mittauspöytäkirjasta voi nähdä, että pudotuspainolaitteella saatiin viimeisellä (X) mittauskerralla E_4 -tulokseksi jopa 55 MPa, joka vastaa täysin vaahtolasimurskeen kantavuudelle suunnitteluohjeessa annettua arvoa.

Pudotuspainolaitteella mitattaessa ensimmäinen (E_1) pudotus antaa aina huomattavan alhaisen kimmomoduulin (E) arvon. Parhaiten vaahtolasimurskeen kantavuutta näyttäisivät edustavan aina jokaisen mittausarjan toiset pudotukset, jotka on liitteessä 8 merkitty E_2 -arvoina. Kuvassa 38 pudotuspainolaitemittauksen kimmomoduuli-

liarvot on esitetty kumulatiivisen tiivistysajan funktiona. Edustavimmille E_2 -arvoille on piirretty yhtenäinen trendiviiva. Punaisella katkoviivalla on esitetty nykyinen Foamit-vahtolasimurskeen suunnitteluohjeessa annettu kimmomoduulin arvo. (Uusiaines Oy 2012) Lisäksi pisteviivalla on esitetty samassa kuvaajassa näytteen korkeuden muutos prosentteina eli näytteen tiivistyminen tiivistysajan funktiona.



Kuva 38. Vahtolasimurskenäytteen pudotuspainolaitteella mitatut kimmomoduulin E_2 -mittauksien keskiarvot tiivistysajan funktiona sekä vastaava näytteen korkeuden prosentuaalinen muutos

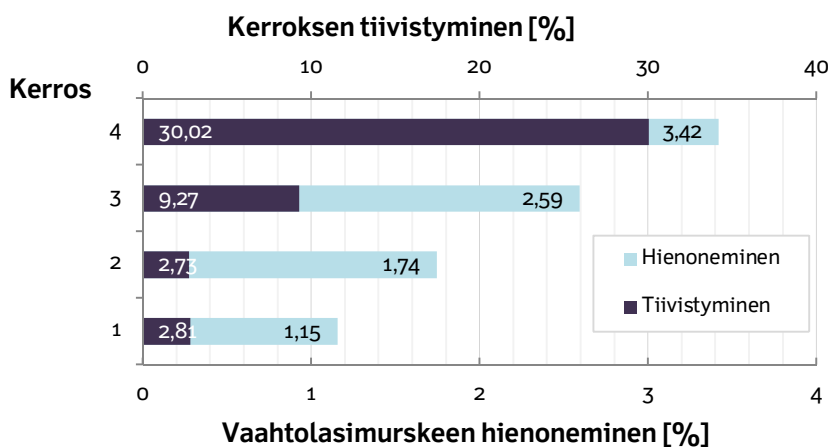
Korrelaatiokerroin kuvaa kahden muuttujan välistä riippuvuutta. Korrelaatiokerroin vaihtelee välillä $-1 \leq r \leq 1$. Riippuvuus on sitä voimakkaampaa, mitä lähempänä -1 tai $+1$ korrelaatiokerroin r on. Lähellä nollaa oleva korrelaatiokerroin r tarkoittaa, ettei tilastollista riippuvuutta esiinny. Näytteen korkeuden muutoksen ja pudotuspainolaitteella mitattujen E_2 -arvojen välinen korrelaatiokerroin r tiivistysajan suhteen on 0,997. Näin ollen näytteen tiivistymisen ja kantavuuden kasvun välillä on selvä riippuvuus tiivistysajan suhteen.

Pudotuspainolaitteella mitattaessa käytettiin 200 mm pohjalevyä. Suuresta pohjalevystä huolimatta levyn sijainnilla vahtolasimurskeen pinnalla on vaikutusta saataviin kantavuuden arvoihin. Mikäli levyn alle jää paljon tyhjätillaa, ei vahtolasimurskeelle saada tarpeeksi edustavia kimmomoduulin arvoja. Parhaat kimmomoduulin arvot saatiin aivan vahtolasimurskenäytteen keskeltä, jossa laatikon reunan tukivaikutuksen pitäisi olla pienimmillään. Toisaalta tiivistyksen vaikutus voi olla suurimmillaan laatikon keskellä.

6.3 Hienoneminen

Tiivistyskokeessa tutkittiin materiaalin hienonemista seulomalla ennen näytteen rakentamista alle 18 mm raekoon aines kokonaan pois vahtolasimurskeesta ja punnitsemalla näytteen purkamisen jälkeen tiivistyksessä ja työn aikana syntyneen alle 18

mm raekoon aineksen määrä. Taulukossa 24 on esitetty painon mukaan tiivistyksen jälkeen seulotun hienoaineksen määrä sekä kuvassa 39 on esitetty tummalla värillä ja ala-akselilla koko näytteen prosentuaalinen hienoneminen.



Kuva 39. Vahtolasimurskenäytteen hienoneminen verrattuna näytteen tiivistymiseen tiivistyskokeessa. Kerrosjärjestys esitetty kuvassa 25.

Kun verrataan eri kerroksissa tapahtunutta materiaalin prosentuaalista hienonemista kerrosten tiivistymiseen, voidaan huomata, että nämä eivät aivan suoraan korreloi toisiinsa nähden. Laskennallinen korrelaatiokerroin r kerroksittaisen hienonemisen ja tiivistymisen välillä on 0,908. Alimman (1) kerroksen hienoneminen on ollut suurta kerroksen tiivistymiseen nähden. Näin voidaankin päätellä, että jo pelkkä käsittely hienontaa materiaalia.

Seulontatulosten ja visuaalisen arvion perusteella vahtolasimurskeen hienonemisessa syntyy ehdottomasti eniten hienoa jauhetta, kuten kuvasta 40 voidaan havaita. Tämä on selitettävissä sillä, että vahtolasimurskerakeet eivät murtuessaan murene, vaan ennemminkin halkeavat siististi tuottaen murroskohdasta vain hienorakeista jauhetta. Vahtolasimurskeen kokonaishienoneminen tiivistyskokeessa oli vain 2,23 %. Tämä prosenttilukema käsittää alle 18 mm aineksen. Foamit-suunnitteluohjeen mukaan alle 2 mm hienoainesta saa rakennusvaiheessa olla korkeintaan 4 % materiaalista.



Kuva 40. Tiivistyskoe­näytteen ylimmän kerroksen alle 18 mm raekoon aines kokeen jälkeen. (Emilia Köylijärvi 2013)

Vaahtolasimurskeen pinta on niin karhea, että se rikkoo nopeasti suodatinkankaan. Kokeessa käytetty piharakentamiseen tarkoitettu Lektex-suodatinkangas oli hiutunut puhki paikoista, joissa se oli puristuneena kahden vaahtolasimurskerakeen väliin. Näiden reikien kautta hienoaines pääsi todennäköisesti jonkin verran varisemaan alempaan kerrokseen ja näin kerrosten välinen hienoaineksen määrä voi olla osittain harhaanjohtava. Tästä voidaan päätellä, että vaahtolasimurske tulee ympäröidä kun­nollisilla, vahvoilla maarakennuskäyttöön tarkoitetuilla suodatinkankailla materiaali­en sekoittumisen ehkäisemiseksi.

6.4 Kosteuspitoisuus

Pitkäaikaisesta vaahtolasimurskekasasta otettujen näytteiden kosteuspitoisuus 27–34 % on yllättävän alhainen verrattuna materiaalille suunnitteluohjeessa annettuihin vedenimeytymisarvoihin, jotka ovat kuukauden ajanjaksolla 60 paino-% ja vuoden ajanjaksolla 100 paino-%. Vertaaminen vedenimeytymisen arvoihin on kuitenkin harhaanjohtavaa, sillä vedenimeytymisen arvot määritetään niin, että vaahtolasimurske­näytteet ovat vesiupotuksessa.

Varastokasassa vallitseva vaahtolasimurskeen kosteus ei välttämättä vastaa täysin maarakenteessa olevan materiaalin kosteutta. Maarakenteessa vaahtolasimurske altistuu suuremmalle määrälle valumavesiä kuin varastokasassa, jossa vaahtolasimurske on selvästi ympäröivää maanpintaa korkeammalla. Varastokasassa vaahtolasimurske pääsee kuivattumaan alaspäin, kun vesi valuu kasasta kohti alempaa gradienttia, kuten pohjavedenpintaa.

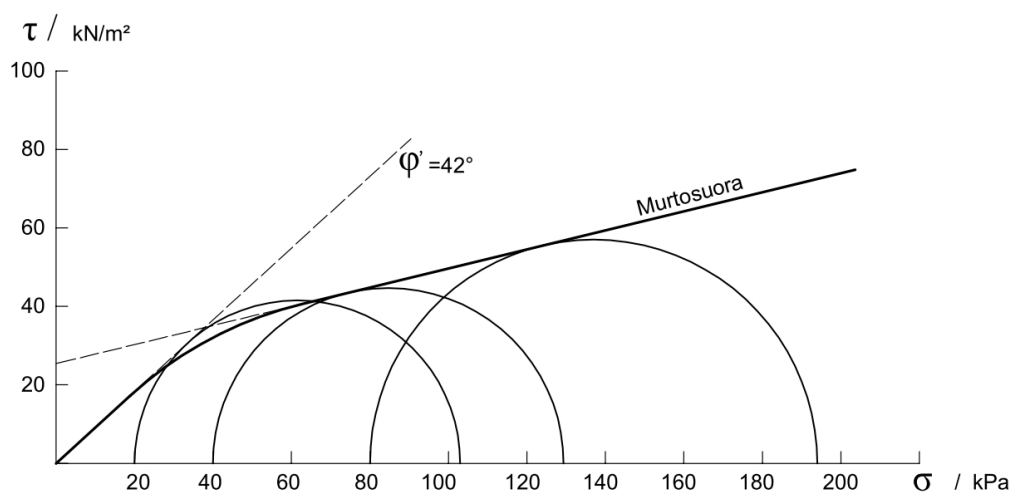
6.5 Lujuusominaisuudet

6.5.1 Leikkauskestävyyskulma

TTY:llä tehtyjen kolmiakσιαalikokeiden tulokset vastaavat 20 kPa ja 80 kPa sellipai­neessa kuormitettujen näytteiden kohdalla norjalaisten HASOPOR-vaahtolasimurskeen vastaavia koetuloksia, jotka on esitetty kuvassa 19. Kuitenkaan 40 kPa sellipaineella kuormitetulla näytteellä ei saavutettu aivan samoja jännitys­tasoja kuin norjalaisella HASOPOR -vaahtolasimurskeella.

Jos kaikkien kolmiaksiaalikokeiden tulokset tulostetaan Mohrin jännitysympyröillä samalle kuvaajalle, saadaan materiaalin leikkauskestävyyskulman arvoksi 12° ja koheesion suuruudeksi 29 kN/m^2 . Tämä ei kuitenkaan vastaa todellista vaahtolasimurskeen käyttäytymistä. Erikoinen tulos viittaa siihen, että 80 kPa sellipaineessa vaahtolasimurskenäytteessä vaikuttavat eri ilmiöt kuin matalamman sellipaineen näytteissä. Mohrin ympyrätulkinta ei ota huomioon materiaalin partikkelitason murtumista, joka taas on vaahtolasimurskeen tapauksessa yksi merkittävä ilmiö kuormituksen aikana.

Vaahtolasimurskeen todellista käyttäytymistä edustaisi murtosuora, joka tulostetaan eri kaltevuuteen eri sellipaineissa saatujen koetulosten perusteella, kuten on esitetty kuvassa 41. Mohrin ympyrällä 20 kPa sellipaineella kuormitettu vaahtolasimurskenäyte tuottaa leikkauskestävyyskulmalle (φ) arvon 42° . Sellipaineissa 40 kPa ja 80 kPa kuormitettujen näytteiden Mohrin ympyröiden kautta piirretty yhteinen murtosuora tuottaa leikkauskestävyyskulmalle arvon 14° , mikä edellyttäisi, että vaahtolasimurskerakeiden välinen koheesio kokeen aikana olisi 25 kN/m^2 . Vaahtolasimurskeen rakeiden välillä vaikuttavaa voimaa ei kuitenkaan voida nimittää koheesioksi.



Kuva 41. Kolmiaksiaalikokeiden tulokset Mohrin jännitysympyröillä esitettynä. Murtosuora koostuu kahdesta osasta, joista alkupään määrää 20 kPa sellipaineessa kuormitettu näyte ja loppupään 40 ja 80 kPa sellipaineissa kuormitetut näytteet.

Taulukkoon 26 on koottu kolmiaksiaalikoeläineistosta eri sellipaineella kuormitettujen näytteiden eri muodonmuutostasoilla mitatut deviatoriset jännitykset sekä näiden pohjalta lasketut leikkausjännityksen maksimiarvot sekä leikkauskestävyyskulman arvot.

Taulukko 26. Leikkausjännityksen ja kitkakulman arvot kolmiakσιαalikokeessa eri sellipaineissa ja muodonmuutostasoilla

ϵ_1 [%]	σ_3 [kPa]	σ_1 [kPa]	φ [°]	τ [kN/m ²]
1	20	50,5	25,6	25,3
2	20	72,7	34,6	36,4
3	20	90,6	39,7	45,3
4	20	98,0	41,4	49,0
5	20	103,0	42,4	51,5
1	40	66,0	14,2	33,0
2	40	88,7	22,2	44,4
3	40	106,0	26,9	53,0
4	40	119,0	29,8	59,5
5	40	130,5	32,1	65,3
1	80	94,8	4,9	47,4
2	80	129,0	13,6	64,5
3	80	152,5	18,2	76,3
4	80	177,0	22,2	88,5
5	80	196,3	24,9	98,2

Taulukosta 26 voidaan havaita, että vaahtolasimurskeen leikkauskestävyysskulman arvo vaihtelee suuresti näytteen kuormitustasosta ja muodonmuutostasosta riippuen. Näihin tuloksiin perustuen vaahtolasimurskeen Foamit-suunnitteluohjeen mukainen leikkauskestävyysskulman laaja vaihteluväli on hyvin perusteltu. Kun suunnitellaan rakennetta vaahtolasimurskeella, erilaisia leikkauskestävyysskulman arvoja tulisi käyttää suunnittelukohteessa vallitsevista kuormituksista riippuen.

6.6 Muodonmuutosominaisuudet

6.6.1 Poissonin luku

Taulukossa 27 on esitetty yhtälön (14) avulla määritetyt vaahtolasimurskeen Poissonin luvun arvot sekä yhtälön (15) avulla määritetyt lepopaineen K_0 arvot, jotka ovat toteutuneet kolmiakσιαalikokeissa eri sellipaineissa.

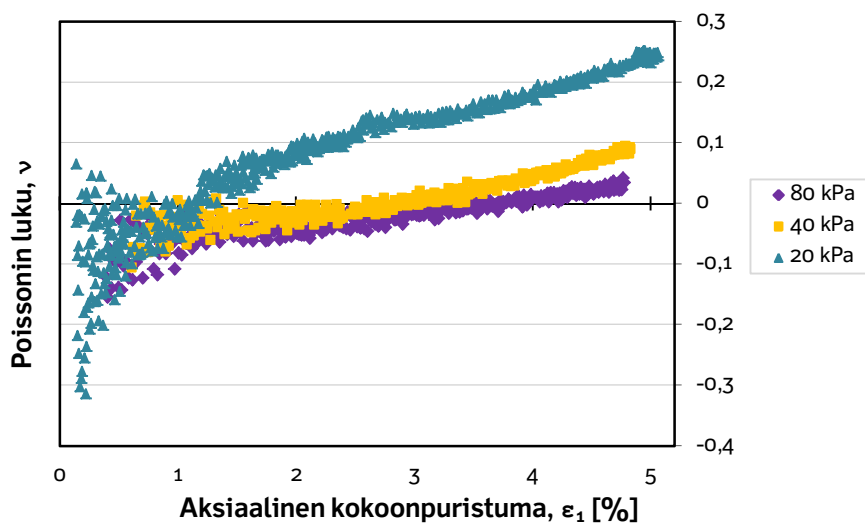
Taulukko 27. Vaahtolasimurskeen kolmiakσιαalikokeissa eri sellipaineissa toteutuneet muodonmuutokset ja niitä vastaavat Poissonin luvun arvot sekä niistä johdetut lepopainekertoimen (K_0) arvot

ε_1 [%]	σ_3 [kPa]	ε_3 [%]	ν [-]	K_0 [-]
1	20	-0,026	-0,026	-
2	20	0,199	0,099	0,110
3	20	0,430	0,143	0,167
4	20	0,750	0,188	0,231
5	20	1,190	0,238	0,312

1	40	-0,055	-0,055	-
2	40	-0,051	-0,026	-
3	40	0,043	0,014	0,014
4	40	0,163	0,041	0,042
5	40	0,442	0,094	0,104

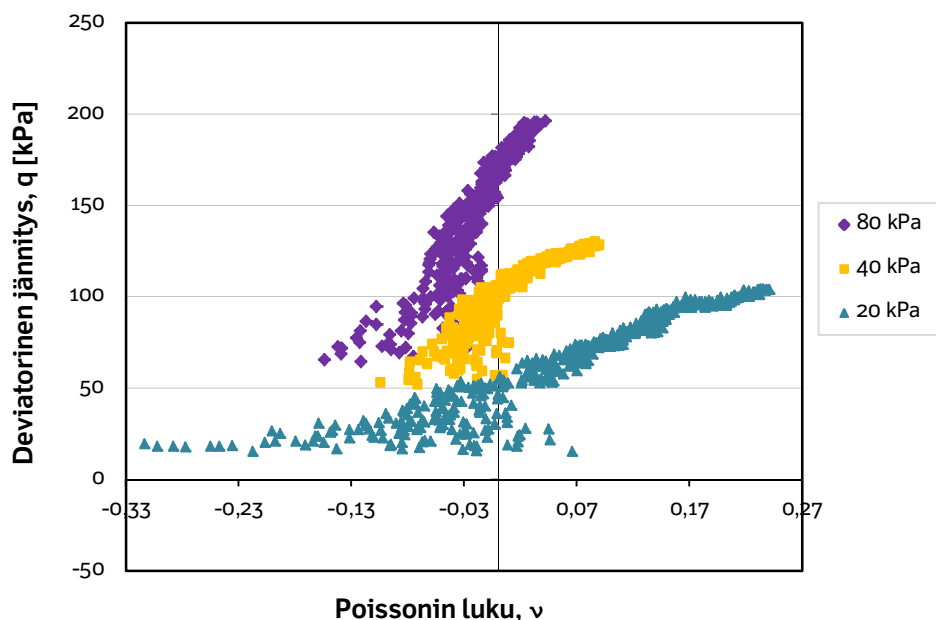
1	80	-0,042	-0,042	-
2	80	-0,049	-0,025	-
3	80	-0,052	-0,017	-
4	80	0,037	0,009	0,009
5	80	0,163	0,035	0,036

Taulukosta 27 voidaan nähdä, että Poissonin luvun arvot vaihtelevat paljon kolmiakσιαalikokeen sellipaineen mukaan. Suurissa sellipaineissa vaahtolasimurske puristuu pystysuunnan tavoin myös vaakasuunnassa kokoon, jolloin Poissonin luku saa pieniä arvoja. Poissonin luku saa suurimmat arvot pienimmässä sellipaineessa kuormitettusta näytteestä. Poissonin luvut on esitetty kuvassa 42 kuvaajalla aksiaalisen kokoonpuristuman funktiona.



Kuva 42. Vaahtolasimurskeen Poissonin luvut staattisissa kolmiakσιαalikokeissa eri sellipaineissa aksiaalisen muodonmuutoksen funktiona

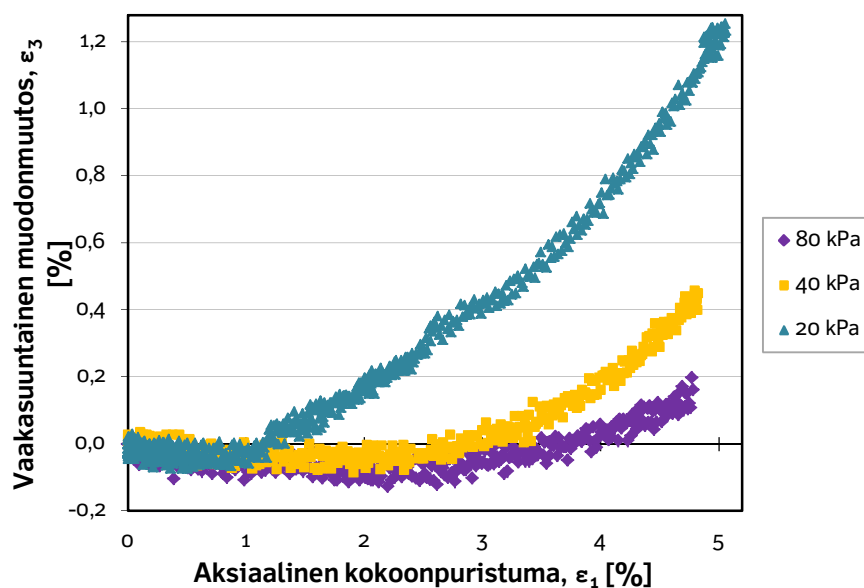
Aksiaalisen muodonmuutoksen funktiona esitettynä voidaan havaita, että Poissonin luku saa suurimmat arvot, kun aksiaalinen kokoonpuristuma on suurimmillaan. Poissonin luku on suurimmillaan 20 kPa sellipaineessa kuormitetussa näytteessä. Kuvassa 43 Poissonin luvut on esitetty deviatorisen jännityksen funktiona.



Kuva 43. Vahtolasimurskeen Poissonin luvut staattisissa kolmiakselikokeissa eri sellipaineissa deviatorisen jännityksen funktiona

Kuvasta 43 voidaan havaita, että pienillä jännitystasoilla Poissonin luvuissa on rajallista mittaustarkkuudesta johtuen suurta hajontaa. Kun deviatorinen jännitys kasvaa, Poissonin luvun hajonta pienenee. Sellipaineessa 80 kPa kuormitetun näytteen Poissonin luku on negatiivinen, kun deviatorinen jännitys on alle 180 kPa. Deviatorisen jännityksen kasvaessa Poissonin luku muuttuu positiiviseksi. Tämä johtuu siitä, että deviatorisen jännityksen voimistuessa deviatorisen jännityksen aiheuttama näytteen laajeneminen on suurempaa kuin sellipaineen aiheuttama näytteen kokoonpuristuminen.

Poissonin luku muodostuu kolmiakselikoenäytteen aksiaalisesta ja vaakasuuntaisesta muodonmuutoksesta, jotka on esitetty kuvaajalla kuvassa 44. Vaakasuuntaisen muodonmuutoksen negatiiviset arvot tarkoittavat, että näyte on puristunut sivusuunnassa kokoon.

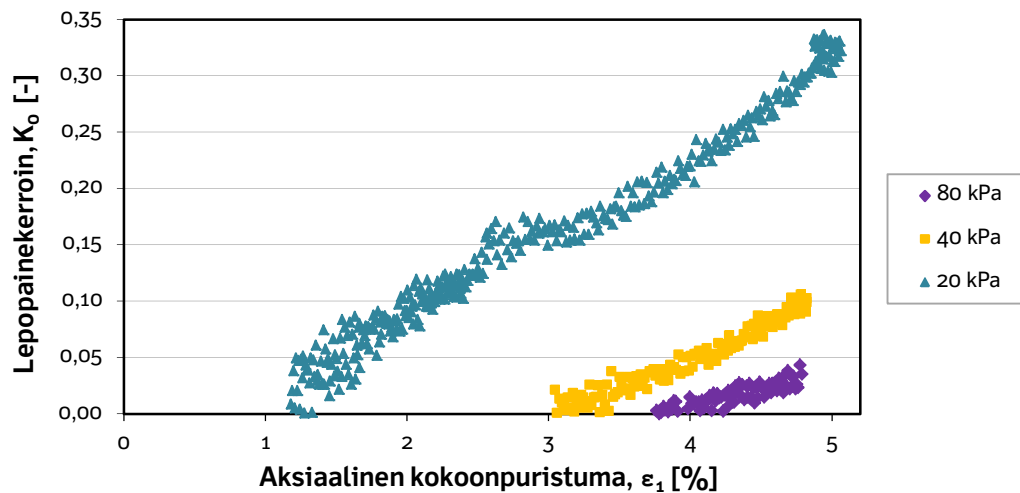


Kuva 44. Vahtolasimurskeen aksiaalisen kokoonpuristuman ja vaakasuuntaisen muodonmuutoksen suhde kolmiaksaalikokeessa. Vaakasuuntaisen muodonmuutoksen negatiiviset arvot tarkoittavat, että näyte on puristunut vaakasuunnassa kokoon.

Kuvasta 44 voidaan nähdä, että aksiaalisen muodonmuutoksen ollessa pieni, vaakasuuntainen muodonmuutos on negatiivinen, eli näyte puristuu sivusuunnassa kasaan. Kun aksiaalinen kokoonpuristuma kasvaa, myös vaakasuuntainen muodonmuutos kasvaa, eli näyte leviää. 20 kPa sellipaineessa kuormitetun näytteen leviäminen alkaa jo 1 % aksiaalisen muodonmuutoksen jälkeen. 40 kPa sellipaineessa kuormitetun näytteen vaakasuuntainen muodonmuutos on positiivista noin 3 % aksiaalisen muodonmuutoksen jälkeen. 80 kPa sellipaineessa kuormitetun näytteen vaakasuuntainen muodonmuutos muuttuu positiiviseksi, eli leviämiseksi, vasta, kun aksiaalista muodonmuutosta on tapahtunut 4 %.

6.6.2 Lepopainekerroin

Kuvassa 45 on esitetty yhtälön (15) avulla määritetyt vaahtolasimurskeen lepopaine kertoimet aksiaalisen kokoonpuristuman funktiona.

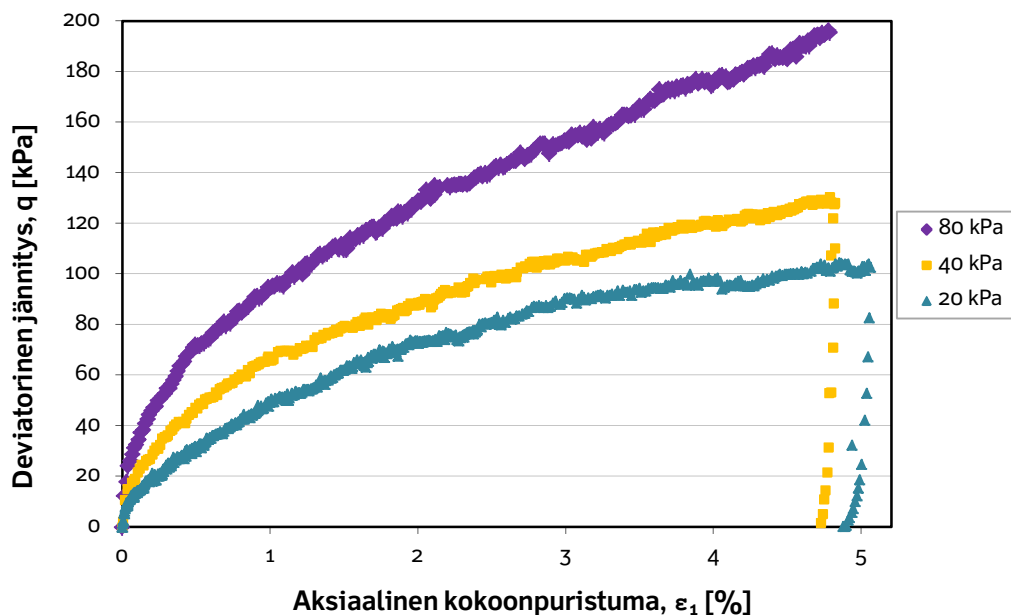


Kuva 45. *Vaahtolasimurskeen lepopaine kerroin aksiaalisen kokoonpuristuman funktiona staattisessa kolmiakselikokeessa 20 kPa, 40 kPa ja 80 kPa sellipaineessa*

Kuvasta 45 voidaan havaita, että lepopaine kerroin saa suurimmat arvonsa pienessä sellipaineessa. Sellipaineen kasvaessa lepopaine kertoimen arvo pienenee huomattavasti. Tämän tutkimustuloksen perusteella vaahtolasimurske ei aiheuta suuren vallitsevan paineen alaisena suurta painetta esimerkiksi maanpainerakenteessa.

6.6.3 Kimmomoduuli

Kuvassa 46 on esitetty vaahtolasimurskenäytteiden aksiaalinen kokoonpuristuma suhteessa deviatoriseen jännitykseen kolmiaksaalikokeissa eri sellipaineissa.



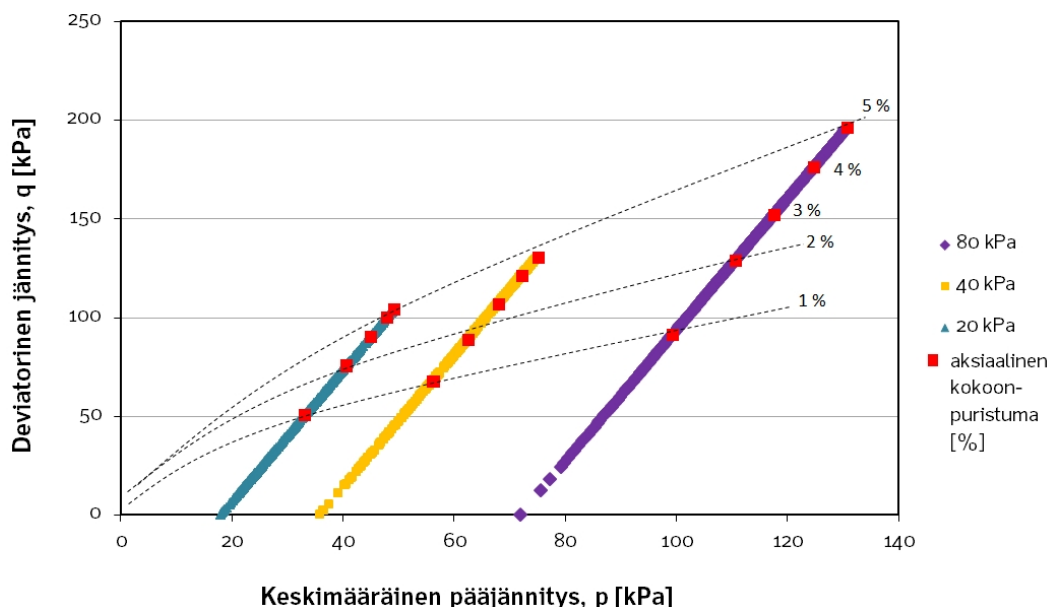
Kuva 46. Vaahtolasimurskeen deviatorinen jännitys aksiaalisen, pystysuuntaisen kokoonpuristuman funktiona 20, 40 ja 80 kPa sellipaineessa

Kuten kuvasta 46 voidaan havaita, vaahtolasimurskenäytteen lujuudessa ei tapahdu selvää romahtamista missään kuormituksen vaiheessa. Deviatorinen jännitys kasvaa tasaisesti aksiaalisen muodonmuutoksen kasvaessa. Alhaisilla kuormitustasoilla, 0–60 kPa, näytteen kokoonpuristuma on hyvin pieni. Suuremmilla jännitystasoilla kokoonpuristuma jännityslisäystä kohti vakioituu.

Kuvassa 47 on esitetty vaahtolasimurskeen jännityspolut eri sellipaineissa toteutetuissa kolmiaksaalikokeissa. Kuvaajalla on myös esitetty näytteiden aksiaalista kokoonpuristumaa kuvaavat muodonmuutostasot punaisiin ruuduihin ja katkoviivoin. Jännityspolun p - q -koordinaatiston vaaka-akselin keskimääräisen pääjännityksen arvo on laskettu seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3), \quad (17)$$

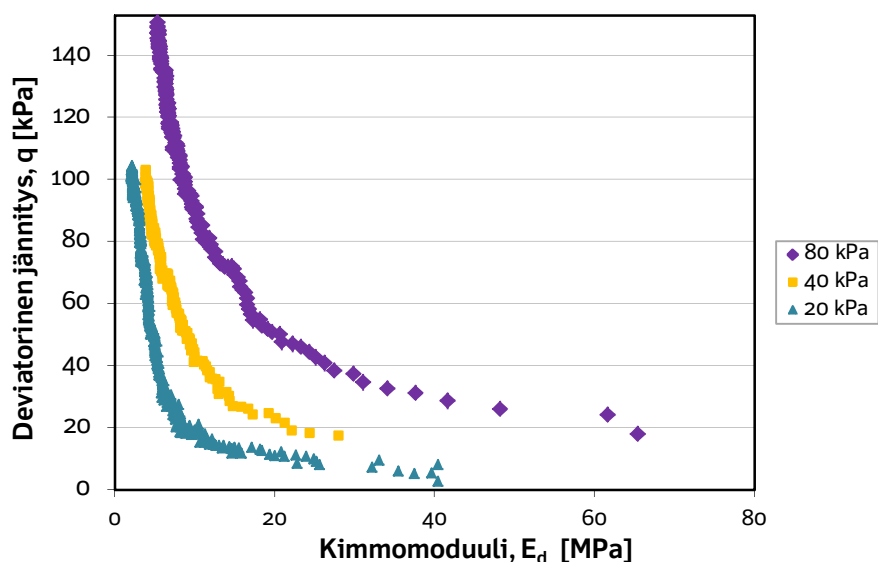
missä σ_1 on aksiaalinen jännitys (sellipaine + deviatorinen jännitys) [kPa]
 σ_3 on sellipaine [kPa]



Kuva 47. Vaahtolasimurskeen pq -koordinaatistoon piirretyt jännityspolku-kuvaajat ja muodonmuutostasot

Jännityspolku kuvaajasta kuvasta 47 nähdään, miten 40 kPa sellipaineessa kuormitettu kolmiakiaalikoenaite ei saavuta eri muodonmuutostasoilla aivan vastaavia jännitystasoja kuin 20 ja 80 kPa sellipaineessa kuormitetut näytteet.

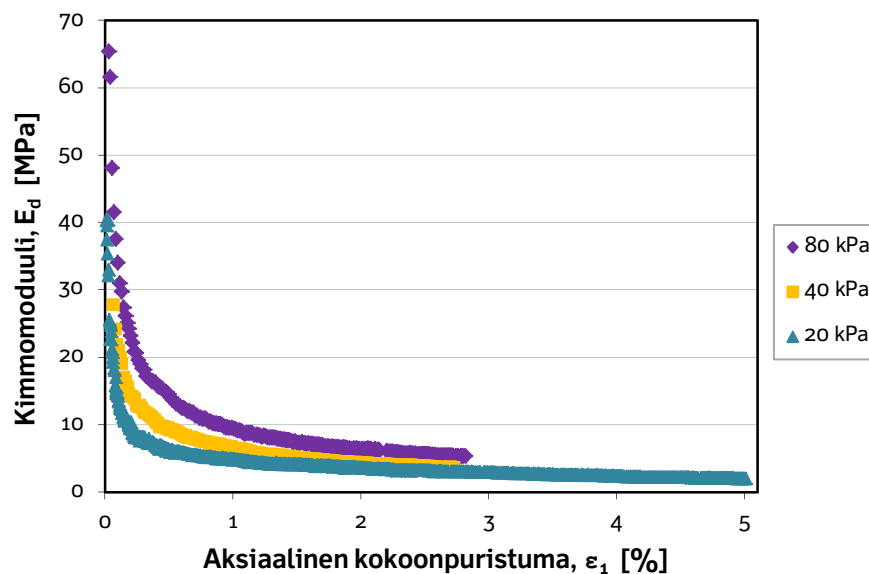
Staattisen kolmiakiaalikokeen perusteella lasketut muodonmuutosmoduulit ovat avoimen tilan kimmomoduuleja (E_d). Kimmomoduulit on laskettu sekanttmoduulin periaatetta soveltaen. Sekanttmoduulin määräytyminen on esitetty liitteen 3 kuvassa 1. Vaahtolasimurskeen avoimen tilan kimmomoduulit (E_d) on esitetty kuvassa 48 suhteessa deviatoriseen jännitykseen.



Kuva 48. Vaahtolasimurskeen avoimen tilan kimmomoduuli (E_d) suhteessa deviatoriseen jännitykseen kolmiakiaalikoeteissa

Avoimentilan kimmomoduuli (E_d) saa kaikilla näytteillä suurimmat arvonsa deviatorisen jännityksen ollessa pienimmillään, eli silloin kun muodonmuutostaso on pieni. Suurimmat kimmomoduulin arvot ovat 80 kPa sellipaineessa kuormitetulla näytteellä,

eli jännitystason kasvu kasvattaa moduuleja. Kuvassa 49 on esitetty avoimen tilan kimmomoduulin arvot suhteessa näytteen aksiaaliseen kokoonpuristumaan kolmiak-siaalikoeksessa.



Kuva 49. Vaahtolasimurskeen muodonmuutosmoduulin suhde aksiaaliseen kokoonpuristumaan kolmiak-siaalikoeksessa

Vaahtolasimurskeen kimmomoduuli on suurimmillaan pienillä muodonmuutostasoilla. 40 kPa ja 80 kPa sellipaineissa kuormitettujen näytteiden osalta ei esitetä kimmomoduulia yli 3 % aksiaalisen muodonmuutoksen jälkeen, sillä kimmomoduulin arvo pysyy lähes samalla tasolla kuormituksen loppuun saakka. Taulukossa 28 on esitetty lukuarvoina kimmomoduulin (E_d) arvot eri sellipaineissa kuormitetuilla näytteillä eri aksiaalisen muodonmuutoksen tasoilla.

Taulukko 28. Vaahtolasimurskeen avoimen tilan kimmomoduulit (E_d) kolmiak-siaalikoeksissa eri sellipaineissa

ϵ_1 [%]	σ_3 [kPa]	E_d [MPa]
1	20	5,01
2	20	3,63
3	20	3,01
4	20	2,44
5	20	2,06

1	40	6,56
2	40	4,39

1	80	9,46
2	80	6,44

Taulukon 28 arvot edustavat paljon suurempia muodonmuutostasoja kuin levykuormituskokeen takaisinlaskentatulokset tai syklisen kokeen resilient-moduulit. Taulu-

kossa 28 esitettyjä avoimen tilan kimmomoduulin arvoja ei voi suoraan verrata luvussa 4.4. esitettyihin muodonmuutosmoduuleihin, sillä eri muodonmuutosmoduulit on määritetty eri tutkimus- ja laskentamenetelmillä. Kimmomoduulien arvot ovat melko pieniä, sillä kolmiakksiaalikohteessa näytteen vaakasuuntaista muodonmuutosta ei ole estetty. Liitteessä 3 on selvennetty eri muodonmuutosmoduulien määräytymistä.

7 Yhteenvedo soveltuvista käyttökohteista ja jatkotutkimussuositukset

Vaahtolasimurske soveltuu tutkimusten pohjalta kevennysrakenteeksi kaikkiin luvussa 3 esiteltyihin kohteisiin. Näiden käyttökohteiden lisäksi vaahtolasimurske soveltuu pienen lepopaineekertoimensa ansiosta kevyeksi taustatäytöksi siltarakenteisiin.

Kaikissa vaahtolasimurskeen käyttökohteissa on tärkeää huomioida vaahtolasimurskeen ohjeiden mukainen tiivistys. Tässä työssä toteutettujen tiivistyskokeiden tuloksena vaahtolasimursketta olisi suositeltava tiivistää korkeintaan 60 cm paksuisina kerroksina, jotta voidaan taata koko tiivistettävän kerroksen tasainen tiivistyminen. Vaahtolasimurskeen päältä saavutettava kantavuus on suoraan verrannollinen tiivistysaikaan nähden. Lisäksi on huomioitava vaahtolasimurskeen runsas tiivistyminen tiivistämisen aikana, eli vaahtolasimursketta on levitettävä vähintään 10 % rakenteen tavoitepaksuutta paksumpi kerros ennen rakenteen tiivistämistä. Vaahtolasimurske tulee ympäröidä tukevalla maarakennuskäyttöön tarkoitettulla suodatinkankaalla materiaalien sekoittumisen ehkäisemiseksi.

Jo pelkkä käsittely hienontaa vaahtolasimursketta. Ylimääräisiä työvaiheita tulisi siis pyrkiä välttämään työmaolosuhteissa. Tässä työssä toteutettujen tiivistys- ja kolmiaksiaalikokeiden perusteella vaahtolasimurske ei kuitenkaan hienone työstettäessä tai kokeiden aikana haitallisen paljon. Materiaalin hienoneminen ei heikennä vaahtolasimurskeen toimivuutta.

Työmaolosuhteissa pudotuspainolaite soveltuu suoraan vaahtolasimurskekerroksen päältä tehtäviin alustaviin kantavuusmittauksiin. Tällöin on käytettävä ehdottomasti halkaisijaltaan 200 mm:stä pohjalevyä.

Tässä työssä toteutettujen kolmiaksiaalikokeiden perusteella voidaan todeta, että vaahtolasimurskeelle suunnitteluohjeessa annettu leikkauskestävyyskulman laaja vaihteluväli on hyvin perusteltu. Vaahtolasimurskerakennetta mitoitettaessa tulisi huomioida kohteessa vallitsevat jännitykset ja valita niiden mukaisesti vaahtolasimurskeen mitoittava leikkauskestävyyskulma.

Vaahtolasimurskeen huokosrakenteen selvittämiseksi vaahtolasimurskeen materiaalitutkimuksia olisi hyvä jatkaa. Nostemitoituksen kannalta olisi tärkeää tietää vaahtolasimurskeen huokoisuus sekä suljettujen, ilmatäytteisten huokosten määrä. Samalla selviäisi myös vaahtolasimurskeen partikkelitiheys.

Tarkemmat jatkotutkimukset vaahtolasimurskeen lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksista vaativat suurempia näytekojoja. Vaahtolasimurskeen suuri raekoko vaikeuttaa laboratorio-olosuhteissa materiaalin tutkimusta. Parhaiten vaahtolasimurskeen toimintaa pystyisi tutkimaan instrumentoiduissa ja monitoroiduissa rakennuskohteissa. Erityisesti vaahtolasimurskeen pitkäaikainen käyttäytyminen rakenteessa valottuisi paremmin todellisissa käyttöympäristöissä toteutetuissa koerakenteissa. Laboratoriossa tehtyjä tiivistyskokeita olisi hyvä jatkaa suuremmissa mittakaavassa työmaolosuhteissa.

Tässä työssä toteutetuissa kolmiaksiaalikokeissa olisi ollut mielenkiintoista poistaa kuormitus näytteestä ja tehdä seuraava staattinen kuormitusyksi, jotta olisi nähty, millainen on vaahtolasimurskeen kuormitus-muodonmuutoskäyttäytyminen, eli mikä

osa muodonmuutoksesta on elastista. Leikkauskestävyysskulman määrittäminen vaatii jatkokokeita korkeammilla jännitystasoilla ja pidemmälle viedyillä muodonmuutostasoilla.

Vahtolasimurskeen käyttöä rautateiden rakenteissa tulisi tutkia tarkemmin ja suuremmilla jännitystasoilla. Huolellisesti instrumentoidussa koerakenteessa vahtolasimurskeen toimintaa voitaisiin tutkia parhaiten.

Vahtolasimursketta voisi hyödyntää jossakin rakentamisen aikaisessa väliaikaisessa tierakenteessa. Erityisesti rakennuskohde, jolla liikennöi paljon raskasta liikennettä, olisi mielenkiintoinen tutkimuskohde. Väliaikaisen rakenteen purkuvaiheessa voitaisiin tutkia materiaalin hienoneminen, tiheyden muutos, materiaalin sitoman veden määrä ja rakenteen pitkäaikainen painuminen vahtolasimurskeen muodonmuutosten sekä hienonemisen tuloksena.

8 Yhteenveto

Vaahtolasimurske on kevyt, huokoinen, karkearakeinen materiaali, joka valmistetaan kierrätetystä lasista. Kierrätetty lasi hienonnetaan ja siihen lisätään lisäaine. Jauhe kuumennetaan hitaasti jatkuvana prosessina tunneliuunissa, jolloin lasijauhe sulaa ja sulan lasimassan sisään muodostuu pieniä ilmakuplia. Jäähdyessään vaahtolasimurske pirstoutuu huokoisiksi rakeiksi, joiden raekoko on 10–60 mm.

Vaahtolasimurske soveltuu moniin käyttökohteisiin, joissa vaaditaan maarakennusmateriaalilta kevyttä tilavuuspainoa ja hyvää kantavuutta. Erityisen hyvin vaahtolasimurske soveltuu katujen, alueiden ja putkijohtokaivantojen kevennysmateriaaliksi. Lisäksi vaahtolasimurske vähentää erilaisissa taustatäytöissä rakenteeseen kohdistuvaa maanpainetta.

Vaahtolasimurskeen lujuusominaisuudet ovat hyvät sen suuren leikkauskestävyysskulman ansiosta. Leikkauskestävyysskulman suuruus vaihtelee materiaalissa vallitsevan jännitystilan mukaisesti. Vaahtolasimurskeella saavutetaan rakenteelle hyvä jäykkyys. Vaahtolasimurskeen muodonmuutosominaisuuksien tutkiminen on haasteellista materiaalin suuren raekoon vuoksi.

Vaahtolasimurskeen lämmönjohtavuus on todella pieni kosteanakin. Näin ollen vaahtolasimurskeen eristävyys on hyvä. Vaahtolasimurske on ympäristölle haitaton maarakennustuote. Sen haitta-ainepitoisuudet sekä liukenevuudet ovat tilavuuteen nähden pieniä.

Tässä työssä tehdyssä tiivistyskokeessa havaittiin, että tiivistyksen tiivistävä vaikutus ulottuu noin 60 cm syvyydelle tiivistettävän vaahtolasimurskekerroksen pinnasta. Vaahtolasimurskeen päältä saavutettava kantavuus kasvaa suoraan verrattuna tiivistysaikaan nähden. Vaahtolasimurske ei hienone merkittävästi tiivistystyön tuloksena.

Vaahtolasimurskeella tehdyissä staattisissa kolmiaksiaalikoikeissa havaittiin, että vaahtolasimurskeen lujuus-muodonmuutuskäyttäytyminen vaihtelee vallitsevan sellipaineen mukaisesti. Vaahtolasimurskeen leikkauskestävyydelle on syytä käyttää vaihtelevia leikkauskestävyyden arvoja sen mukaisesti, millaiset jännitykset suunnittelu-kohteessa vallitsevat.

9 Kirjallisuusluettelo

Aabøe, R. & Øiseth, E. 2005. Foamed glass – An alternative lightweight and insulating material. Nordic Road & Transport Research, No. 1, 8 s.

Aabøe, R., Øiseth, E. & Hägglund, J. 2005 a. Granulated Foamed Glass for Civil Engineering Applications. 2005.

Aabøe, R., Øiseth, E. & Hägglund, J. 2005 b. Granulated Foamed Glass for Civil Engineering Applications. 25.6.2005. Oslo, Workshop nr 2, Recycled materials in road and airfield pavements, overcoming barriers. [esitelmä] 29 s. [viitattu 10.4.2013]. Saatavissa: <http://www.penosteklo1.ru/Downloads/Other/Foamed%20glass%20in%20Road.pdf>.

Aho, S. & Saarenketo, T. 2006. Managing drainage on low volume roads Executive Summary. April 2006. Roadex III Project.

Byggforsk. 2005 a. CUAP Common Understanding of Assessment Procedure for an European Technical Approval according to Article 9.2 of the Construction Products Directive Factory made cellural glass loose fill. ETA request No 12.01/08. Final version 06.12.2005. The Norwegian Building Research Institute. Oslo. 15 s. + liit. 4 s.

Byggforsk. 2005 b. Hasopor, European Technical Approval No. ETA-05/0187. 13 s.

Eriksson, L. & Hägglund, J. 2008. Handbok. Skumglas i mark- och vägbyggnad. Linköping. Statens geotekniska institut (SGI), Information 18:1. 26 s. + liit. 13 s.

Hagen, M. & Vaslestad, J. 2013. Case histories using foamglass for roads to reduce settlement and stability problems. Proceedings of the 9th BCRRA Conference, Trondheim, Norway, 25-27 June, 2013.

Liikennevirasto. 2010. Tiepenkereiden ja –leikkausten suunnittelu. Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. Liikenneviraston ohjeita 9/2010. Helsinki 2010, Liikennevirasto. 110 s. + liit. 13 s.

Liikennevirasto. 2011 a. Eurokoodin soveltamisohje, Geotekninen suunnittelu - NCCI 7, Siltojen ja pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. 12/2011 Liikenneviraston ohjeita. Helsinki 2011, Liikennevirasto. 133 s.

Liikennevirasto. 2011 b. Kevennysrakenteiden suunnittelu, Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. 05/2011 Liikenneviraston ohjeita. Helsinki 2011, Liikennevirasto. 44 s. + liit. 1 s.

Misapor AG. 2013. Yrityksen Internetsivu. [viitattu 15.10.2013]. Saatavissa: www.misapor.com

Norsk Glassjenvinning AS. Teknisk brosjyre: Glasopor skumglass 10-15. Veiledning i bruk av Glasopor skumglass. 42 s.

Pekkala, J. 2013 a. Foamit rakeisuuskäyrät. [sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Köylijärvi. E. Lähetetty 11.9.2013 klo 8:07 (GMT+2).

- Pekkala, J. 2013 b. Myyntipäällikkö, Uusioaines Oy. Forssa 5.4.2013. Tehdaskierros ja keskustelu 5.4.2013.
- Petkovic, G., Håøya, A.-O., Engelsen, C. J., Breedveld, G., Moen, S., Aabøe, R., Jørgensen, T. & Thue Unsgård, G. 2006. Acceptance limits for the content of pollutants in recycled materials in road construction. TRA-konferansen. Sintef 2006.
- PYR Oy, Pakkausalan Ympäristörekisteri PYR Oy, Pakkaustilastot 2011 [viitattu 1.8.2013]. Saatavissa: www.pyr.fi
- Ramboll. 2013. Foamit-vahtolasi, Kulkeutumisriskin tarkasteluja pohjavesialueilla. Luopioinen, Ramboll. 17 s. + liit. 23 s.
- Rantamäki, M., Jääskeläinen, R. & Tamminne, M. 2009. Geotekniikka. 464 Otatieto. Helsinki: Hakapaino Oy. 307 s.
- Reinikainen, J. 2007. Maaperän kynnys- ja ohjearvojen määrittäminen, Suomen ympäristö, 23/2007.
- RIL 121-2004. 2004. Pohjarakennusohjeet. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry. 137 s.
- RIL 207-2009. 2009. Geotekninen suunnittelu. eurokoodin EN 1997-1 suunnitteluohje. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry. 244 s.
- RIL 157-I Geomekaniikka I. 1985. Suomen Rakennusinsinöörin Liitto RIL ry. Espoo: Otapaino. 479 s.
- Ritola, J. & Vares, S. 2008. Keräyslasin hyötykäyttö vahtolasituotteina. Espoo, VTT Tiedotteita 2458. 51 s. + liit. 2 s.
- Sintef 2010. European Technical Approval No. ETA-10/0297. 13 s.
- Skogstad, H. B., Geving, S. & Hägglund, J. 2005. Hygrothermal material properties for granulated cellular glass used in ground constructions. Proceedings of the 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Reykjavík, 2005. The Icelandic Building Research Institute. pp. 47-54
- Statens vegvesen. 2012. Grunnforsterkning, fyllinger og skråninger. Håndbok 274. Statens vegvesen, Vegdirektoratet - Teknologidivisjonen. Oslo. 350 s.
- Tiehallinto. 2004. Tierakenteen suunnittelu. Suunnitteluvaiheen ohjaus. Helsinki 2004. Tiehallinto. 74 s.
- TTY. 2012. Vahtolasi, sykliset kolmiaksaalikokeet. Testausselektio MPR/269/2011. 5s.
- Uusioaines Oy. 2012. Foamit Suunnittelu & Rakennusohje. 16 s. + liit. 7 s.
- Vaasan kaupunki. 2011. Rakennuttaminen. [valokuvat]
- Valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. 591/2006. Helsinki, 28.6.2006.

Valtioneuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista. 214/2007. Helsinki, 1.3.2007.

Zegowitz, A. 2010. Cellular Glass Aggregate Serving as Thermal Insulation and a Drainage Layer. Ashrae. 8 s.

Øiseth, E., Aabøe, R. & Hoff, I. 2006. Field test comparing frost insulation materials in road construction. Current Practices in Cold Regions Engineering: pp. 1-11. doi: 10.1061/40836(210)62

10 Standardiluettelo

SFS-EN 1097-10. 2003. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 10: Vedenimeytymiskorkeus = Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 10: Determination of water suction height. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto. 11 s.

EN ISO 17294-2. 2004. Water quality. Application of inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). Part 2: Determination of 62 elements. CEN. 21 s.

EPA Method 3051A. 2007. Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils. 30 s.

ISO 8301:1991. 1991. Thermal insulation. Determination of steady-state thermal resistance and related properties. Heat flow meter apparatus. 38 s.

SFS-EN 1097-3. 1998. Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 3: Irtotiheyden ja tyhjätilan määrittäminen = Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Part 3: Determination of loose bulk density and voids. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto. 7 s.

SFS-EN 12087. 1997. Lämmöneristetuotteet rakentamiskäyttöön. Vedenimeytymisen määrittäminen pitkäaikaisessa upotuksessa = Thermal insulating products for building applications. Determination of long term water absorption by immersion. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto. 8 s.

SFS-EN 12091. 1997. Lämmöneristetuotteet rakentamiskäyttöön. Jäätymisulamiskestävyuden määrittäminen = Thermal insulating products for building applications. Determination of freeze-thaw resistance. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto. 9 s.

SFS-EN 12457-3. 2002. Jätteiden karakterisointi. Liukoisuus. Jauhemaisten tai rakeisten jätemateriaalien ja lietteiden liukoisuuden laadunvalvontatesti. Osa 3: Kaksivaiheinen ravistelutesti uuttoliuoksen ja kiinteän jätteen suhteessa 2 ja 8 l/kg jätteille, joiden kiinteä osuus on suuri ja raekoko alle 4 mm (raekoon pienentäminen tarvittaessa) = Characterisation of waste. Leaching. Compliance test for leaching of granular waste materials and sludges. Part 3: Two stage batch test at a liquid to solid ratio of 2 l/kg and 8 l/kg for materials with high solid content and with particle size below 4 mm (without or with size reduction). Yleinen teollisuusliitto. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto. 30 s.

SFS-EN 12667. 2001. Rakennusmateriaalien ja -tuotteiden lämpötekniset ominaisuudet. Lämmönvastuksen määrittäminen kuumalevy- ja lämpövirtalevyllä. Tuotteet, joilla on korkea tai suhteellisen korkea lämmönvastus = Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance. Rakennustuoteteollisuus. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto. 54 s.

SFS-EN 13055-1 + AC. 2002. Kevytkiviainekset. Osa 1: betonin, laastin ja juotoslaastin kevytkiviainekset = Lightweight aggregates. Part 1: Lightweight aggregates for concrete, mortar and grout. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto. 37 s.

SFS-EN 13055-2. 2004. Kevytkiviainekset. Osa 2: kevytkiviainekset asfalttimassoihin ja pintauksiin sekä sitomattomiin ja sidottuihin käyttötarkoituksiin = Lightweight aggregates. Part 2: Lightweight aggregates for bituminous mixtures and surface treatments and for unbound and bound applications. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto. 40 s.

SFS-EN 13286-7. 2004. Sitomattomat ja hydraulisesti sidotut seokset. Osa 7: syklinen kolmiaksaalikoelaitteisto sitomattomia kiviainesseoksia varten = Unbound and hydraulically bound mixtures. Part 7: Cyclic load triaxial test for unbound mixtures. Tiehallinto. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto. 37 s.

SFS-EN 1997-1. 2004. Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt. Tiehallinto. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto. 168 s.

SFS-EN 933-1. 2012. Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus. Osa 1: rakeisuuden määrittäminen. Seulontamenetelmä = Tests for geometrical properties of aggregates. Part 1: Determination of particle size distribution. Sieving method. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto. 16 s.

SFS-EN 933-2. 1996. Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus. Osa 2: rakeisuuden määrittäminen. Seulasarjat, Aukkojen nimelliskoko = Tests for geometrical properties of aggregates. Part 2: Determination of particle size distribution. Test sieves, nominal size of apertures. Rakennustuoteteollisuus RTT. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto. 1 s + liit. 3 s.

SFS-EN ISO 10456 + AC. 2008. Rakennusaineet ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnitteluarvot ja menetelmät ilmoitetun lämpöteknisen arvon ja lämpöteknisen suunnitteluarvon määrittämiseksi = Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto. 30 s.

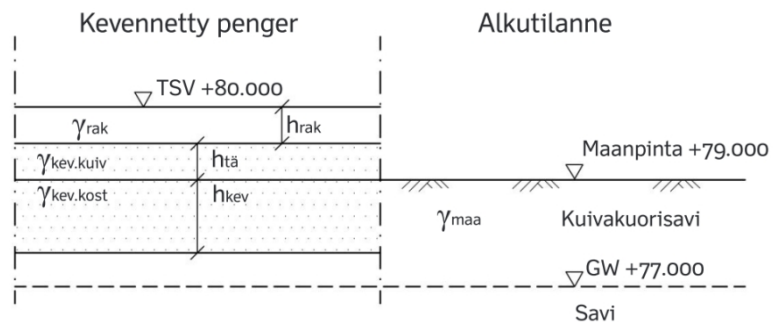
SFS-EN ISO 15587-1. 2002. Veden laatu. Hajotus tiettyjen alkuaineiden määrittämiseksi vedestä. Osa 1: kuningasvesihajotus = Water quality. Digestion for the determination of selected elements in water. Part 1: Aqua regia digestion. Suomen ympäristökeskus. Helsinki, Suomen Standardisoimisliitto. 22 s.

Laskuesimerkki 1

Tien kevennysrakenne, pohjavedenpinta syvällä

Tulevan tien tasausviiva (TSV) on 1 m korkeammalla nykyistä maanpintaa. Pohjavedenpinta on syvyydellä 2 m maanpinnasta. Pohjamaa on 2 metrin syvyydelle kuivakuorisavea, jonka tilavuuspaino $\gamma_{maa} = 17 \text{ kN/m}^3$. Tien rakennekerrosten paksuus on 0,7 m, jolloin maanpinnan yläpuolisen täytön korkeus on 0,3 m. Suunnitellaan kohteeseen kokonaiskevennys vaahtolasimurskeella, jonka tilavuuspaino maanpinnan yläpuolella on $\gamma_{kev} = 3,5 \text{ kN/m}^3$ ja maanpinnan alapuolella $\gamma_{kev.kost} = 5 \text{ kN/m}^3$.

$$\begin{aligned}\gamma_{maa} &= 17 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_{rak} &= 19 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_{kev.kuiv} &= 3,5 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_{kev.kost} &= 5 \text{ kN/m}^3 \\ h_{rak} &= 0,7 \text{ m} \\ h_{tä} &= 0,3 \text{ m}\end{aligned}$$



Kokonaiskevennys tilanteessa, jossa kevennetty penger on kokonaan pohjavedenpinnan yläpuolella suunnitellaan niin, että se toteuttaa yhtälön:

$$q_{kaiiv.maa} \geq q_{rak} + q_{kev.kuiv} + q_{kev.kost}$$

Kevennysmateriaalin päällä olevien tien rakennekerrosten pohjamaalle aiheuttama jännitys:

$$q_{rak} = \gamma_{rak} \times h_{rak}$$

$$q_{rak} = 19 \text{ kN/m}^3 \times 0,7 \text{ m} = 13,3 \text{ kN/m}^2$$

Kokeillaan 1,5 m paksuista kevennystä. Tällöin $h_{kev} = 1,2 \text{ m}$.

Kevennyksen pohjamaalle aiheuttama jännitys:

$$q_{kev} = (\gamma_{kev.kost} \times h_{kev}) + (\gamma_{kev.kuiv} \times h_{tä})$$

$$q_{kev} = (5 \text{ kN/m}^3 \times 1,2 \text{ m}) + (3,5 \text{ kN/m}^3 \times 0,3 \text{ m}) = 7,05 \text{ kN/m}^2$$

Kevennyksen kohdalta poistetun maan aiheuttama jännitys:

$$q_{kaiiv.maa} = (\gamma_{maa} \times h_{kev})$$

$$q_{kaiiv.maa} = (17 \text{ kN/m}^3 \times 1,2 \text{ m}) = 20,4 \text{ kN/m}^2$$

Pohjamaalle tulevat uudet kuormitukset:

$$13,3 \text{ kN/m}^2 + 7,05 \text{ kN/m}^2 = 20,35 \text{ kN/m}^2$$

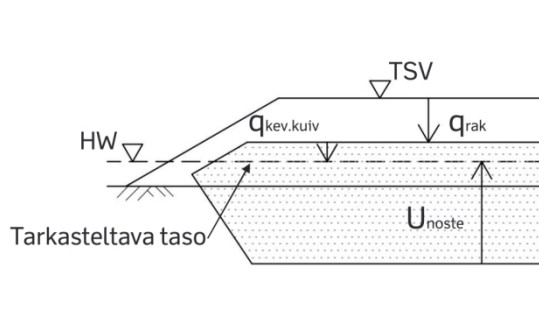
Jolloin kokonaiskevennyksen yhtälö toteutuu: $20,40 \text{ kN/m}^2 \geq 20,35 \text{ kN/m}^2$ OK!

Laskuesimerkki 2

Tien kevennysrakenteen tulvatilanteen nostemitoitus

Oletetaan, että laskuesimerkki 1 sijaitsee tulva-alueella, joten mitoitetaan laskuesimerkki 1:ssä esitetty tilanne myös nosteelle. Oletetaan, että vesi nousee tulvatilanteessa 0,1 metrin korkeudelle maanpinnasta. Vaahtolasimurskeen aiheuttama nostevoima on $U_{noste} = 6,5 \text{ kN/m}^3$. Vaahtolasimurskekerroksen alapinta on 1,2m syvyydellä maanpinnasta.

$$\begin{aligned}\gamma_{rak} &= 19 \text{ kN/m}^3 \\ h_{rak} &= 0,7 \text{ m} \\ \gamma_{kev.kuiv} &= 3,5 \text{ kN/m}^3 \\ h_{kev.kuiv} &= 0,2 \text{ m} \\ U_{noste} &= 6,5 \text{ kN/m}^3 \\ h_{noste} &= 1,2\text{m}+0,1\text{m}=1,3 \text{ m}\end{aligned}$$



Taulukko 1. Kuormien osavarmuusluvut nostemitoituksessa (γ_F) (UPL) (SFS-EN 1997-1)

Kuorma	Merkintä	Arvo
Pysyvä:		
Epäedullinen (kaatava) kuorma	$\gamma_{G,dst}$	$1,1 * K_{FI}$
Edullinen (vakauttava) kuorma	$\gamma_{G,stb}$	0,9
Muuttuva:		
Epäedullinen (kaatava) kuorma	$\gamma_{Q,dst}$	$1,5 * K_{FI}$

K_{FI} määräytyy seuraamusluokan perusteella. Tässä laskuesimerkissä käytetään seuraamusluokkaa CC2 vastaavaa $K_{FI} = 1,0$ arvoa.

Eurokoodi 7:n mukaisesti nostemitoituksessa kaatavien pysyvien ja muuttuvien pystysuorien kuormien yhdistelmän mitoitussarvon ($V_{dst;d}$) on oltava pienempi tai yhtä suuri kuin vakauttavien pysyvien pystysuorien kuormien mitoitussarvon ($G_{stb;d}$) ja muun lisäkestävyyden mitoitussarvon (R_d) summa:

$$V_{dst;d} \leq G_{stb;d} + R_d$$

missä $G_{stb;d}$ on vakauttavien pystysuorien kuormien mitoitussarvo nosteelle mitoitettaessa [kN]
 R_d on lisäkestävyyden mitoitussarvo [kN]

Tässä laskuesimerkissä kaatava kuorma on vaahtolasimurskeen nostevoima. Koska tulvaveden oletetaan nousevan kohtalaisen hitaasti, voidaan osavarmuuslukuna käyttää $\gamma_{G,dst} = 1,1$:

$$V_{dst;d} = h_{noste} \times U_{noste} \times \gamma_{Q,dst}$$

$$V_{dst;d} = (1,3\text{m} \times 6,5 \text{ kN/m}^3) \times 1,1 = 9,3 \text{ kN/m}^2$$

Tässä laskuesimerkissä ei esiinny lisäkestävyyttä aiheuttavia elementtejä, joten termiä R_d ei tässä oteta huomioon. Tasapainoehdon tulee täyttyä kaikilla mahdollisilla tasoilla. Mitoittava tilanne syntyy, kun tarkasteltava taso asetetaan tulvavedenkorkeuden tasolle. Vakauttavat

pystysuorat kuormat muodostuvat rakenteen painosta sekä kevennysmateriaalin painosta tarkasteltavan tason yläpuolella:

$$G_{stb;d} = (q_{rak} + q_{kev.kuiv}) \times \gamma_{G,stb}$$

$$G_{stb;d} = (0,7m \times 19 \text{ kN/m}^3 + 3,5\text{kN/m}^3 \times 0,2m) \times 0,9 = 12,6 \text{ kN/m}^2$$

Nosteen aiheuttama rajatila ei ylity, kun

$$V_{dst,d} \leq G_{stb;d}$$

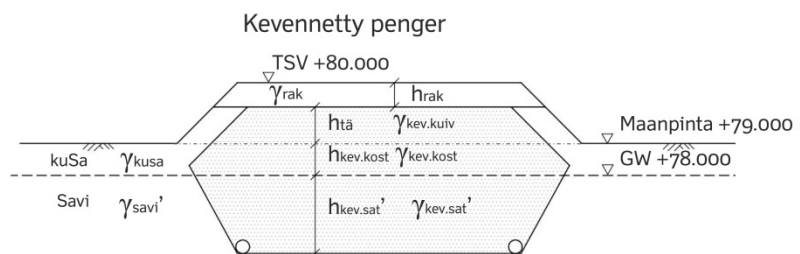
$$9,3 \text{ kN/m}^2 \leq 12,6 \text{ kN/m}^2 \quad \text{OK!}$$

Laskuesimerkki 3

Tien kevennysrakenteen kuivatus ei toimi

Tulevan tien tasausviiva (TSV) on 1 m korkeammalla nykyistä maanpintaa. Pohjavedenpinta on syvyydellä 1 m maanpinnasta. Pohjamaa on 1 metrin syvyydelle kuivakuorisavea, jonka tilavuuspaino on $\gamma_{kusa} = 17 \text{ kN/m}^3$. Pohjavedenpinnan alapuolella pohjamaa on savea, jonka tilavuuspaino on $\gamma_{savi} = 16 \text{ kN/m}^3$. Tien rakennekerrosten paksuus on 0,7 m, jolloin maanpinnan yläpuolisen täytön korkeus on 0,3 m. Suunnitellaan kohteeseen kokonaiskevennys vaahtolasimurskeella, jonka tilavuuspaino maanpinnan yläpuolella on $\gamma_{kev.kuiv} = 3,5 \text{ kN/m}^3$ ja maanpinnan alapuolella $\gamma_{kev.kost} = 5 \text{ kN/m}^3$. Vaahtolasimurskeen tilavuuspaino pysyvästi veden alla on $\gamma_{kev.sat} = 10 \text{ kN/m}^3$.

$$\begin{aligned} \gamma_{kuSa} &= 17 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_{Savi} &= 16 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_{rak} &= 19 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_{kev.kuiv} &= 3,5 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_{kev.kost} &= 5,0 \text{ kN/m}^3 \\ \gamma_{kev.sat} &= 10 \text{ kN/m}^3 \\ h_{rak} &= 0,7 \text{ m} \\ h_{tä} &= 0,3 \text{ m} \end{aligned}$$



Ideaalitilanteessa, jossa kevennysmateriaalin kuivatus toimii, laskenta tehdään kuten esimerkki 1:ssä. Jos kuivatus ei toimikaan ja vaahtolasimurske imee vettä rakenteessa, tulee kevennyksen olla silti riittävä. Tällöin kevennyksen tulee toteuttaa yhtälö:

$$q_{kaiiv.maa} \geq q_{rak} + q_{kev.kuiv} + q_{kev.kost} + q_{kev.sat}' + q_w$$

Kokeillaan 1,7 m paksuista kevennystä. Tällöin $h_{kev.kost} = 1 \text{ m}$ ja $h_{kev.sat}' = 0,4 \text{ m}$. Kevennyksen kohdalta poistetun maan aiheuttama jännitys:

$$q_{kaiiv.maa} = (\gamma_{kusa} \times h_{kev.kost}) + (\gamma_{savi}' \times h_{kev.sat}')$$

$$q_{kaiiv.maa} = \left(17 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \times 1\text{m}\right) + \left(\left(16 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} - 10 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}\right) \times 0,4 \text{ m}\right) = 19,4 \text{ kN/m}^2$$

Rakenteen pohjamaalle aiheuttama jännitys:

$$q_{rak} = \gamma_{rak} \times h_{rak}$$

$$q_{rak} = 19 \text{ kN/m}^3 \times 0,7\text{m} = 13,3 \text{ kN/m}^2$$

Kevennyksen aiheuttama jännitys maanpinnan yläpuolella:

$$q_{kev.kuiv} = \gamma_{kev.kuiv} \times h_{tä} = 3,5 \text{ kN/m}^3 \times 0,3 \text{ m} = 1,05 \text{ kN/m}^2$$

Kevennyksen aiheuttama jännitys maanpinnan alapuolella, pohjavedenpinnan yläpuolella:

$$q_{kev.kost} = \gamma_{kev.kost} \times h_{kev.kost} = 5 \text{ kN/m}^3 \times 1 \text{ m} = 5 \text{ kN/m}^2$$

Veden tilavuuspaino on otettava huomioon pohjavedenpinnan alapuolella:

$$\gamma_{kevsat}' = \gamma_{kev.sat} - \gamma_{vesi} = 10 \text{ kN/m}^3 - 10 \text{ kN/m}^3 = 0 \text{ kN/m}^3$$

Jolloin kevennysmateriaalin kuorma pohjavedenpinnan alapuolella on:

$$q_{kev.sat}' = \gamma_{kev.sat}' \times h_{kev.sat}' = 0 \text{ kN/m}^3 \times 0,4 \text{ m} = 0 \text{ kN/m}^2$$

Rakentamisen aiheuttamaa pohjavedenpinnan alenemaa ei oleteta tapahtuvan savisessa pohjamaassa, jolloin termi q_w jätetään huomiotta.

Pohjamaalle tulevat uudet jännitykset:

$$13,3 \text{ kN/m}^2 + 1,05 \text{ kN/m}^2 + 5 \text{ kN/m}^2 + 0 \text{ kN/m}^2 = 19,35 \text{ kN/m}^2$$

Jolloin kokonaiskevennyksen yhtälö toteutuu: $19,4 \text{ kN/m}^2 \geq 19,35 \text{ kN/m}^2$ OK!

Lähteet:

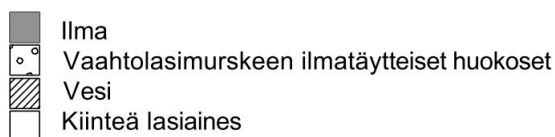
Liikennevirasto. 2011. Kevennysrakenteiden suunnittelu, Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. 05/2011 Liikenneviraston ohjeita. Helsinki 2011, Liikennevirasto. 44 s. + liit. 1 s.

RIL 207-2009. 2009. Geotekninen suunnittelu. eurokoodin EN 1997-1 suunnitteluohje. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. 244 s.

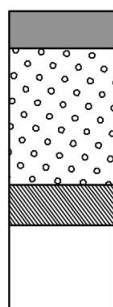
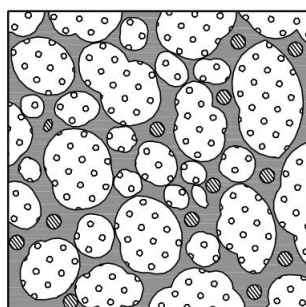
SFS-EN 1997-1. 2004. Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt. Tiehallinto. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto. 168 s.

Vaahtolasimurskeen tilavuus ja tiheys

Geotekniikka – kirjan s. 80 mukailten (Rantamäki et al. 2009)

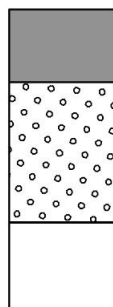
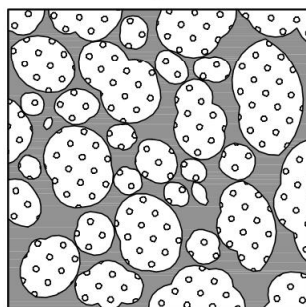


Luonnonkosteä näyte



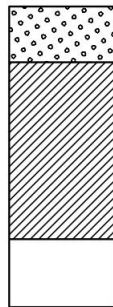
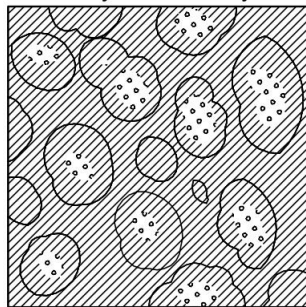
Ilma
Vaahtolasimurskeen
ilmatäytteiset huokokset
Vesi
Kiinteä lasiaines

Kuivatettu näyte



Ilma
Vaahtolasimurskeen
ilmatäytteiset huokokset
Kiinteä lasiaines

Veden kyllästämä näyte



Vaahtolasimurskeen
ilmatäytteiset huokokset
Vesi
Kiinteä lasiaines

Tilavuus	Tiheys	Massa	Painovoima
V_i			
V_{ih}			
V_w	ρ_w	m_w	G_w
V_s	ρ_s	$m_s = m_d$	$G_s = G_d$
Yhteensä V	ρ	m	G

Yhteensä V ρ m G

Tiheys

$$\rho = \rho_s + \rho_w$$

Tilavuus

$$V = V_s + V_w + V_i$$

$$V_h = V_w + V_{ih} + V_i$$

Massa

$$m = \rho * V$$

$$m = m_d + m_w$$

$$m_d = m_s = \rho_s * V_s$$

$$m_w = \rho_w * V_w$$

Painovoima

$$G = m * g$$

$$G = \gamma * V$$

$$G = G_d + G_w$$

$$G_d = m_d * g$$

$$G_w = m_w * g$$

V = kokonaistilavuus

V_s = kiinteän lasiaineksen tilavuus

V_w = huokosissa ja väleissä olevan veden tilavuus

V_i = näytteessä olevan ilman tilavuus

V_h = näytteen huokostilavuus

V_{ih} = vaahtolasimurskeen huokostilavuus

ρ_s = kiinteän lasiaineksen kiintotiheys

ρ_w = veden tiheys

$m_s = m_d$ = kiinteän lasiaineksen massa = kuivan vaahtolasimurskeen massa

m_w = näytteessä olevan veden massa

$G_s = G_d$ = kiinteään lasiainekseen = kuivaan vaahtolasimurskeeseen kohdistuva painovoima

G_w = veteen kohdistuva painovoima

m = kiinteän aineksen ja veden yhteismassa

Muodonmuutosmoduulit

Kimmomoduuli

Moduulit ilmaisevat jännityksen ja muodonmuutoksen välisen riippuvuuden. Jännityksen, muodonmuutoksen ja kimmokertoimen välinen yhteys tunnetaan Hooken lakina:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E},$$

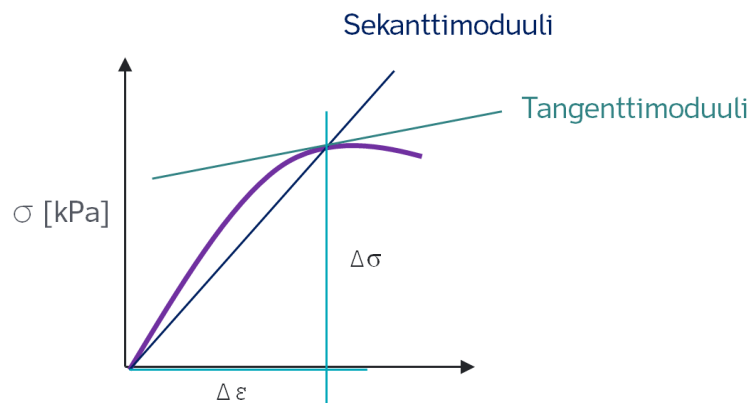
missä ε on suhteellinen muodonmuutos
 σ on jännitys [kPa]
 E on kimmomoduuli [kPa]

(Ehrola 1996)

Hooken laki on voimassa esimerkiksi teräkselle, mutta ei maa-aineksille, sillä niiden käyttäytyminen on voimakkaasti epälineaarista sekä muodonmuutostason että jännitystason suhteen.

Maa-aineksille on tavallista, että niiden kuormitus-muodonmuutoskäyttäytyminen voidaan arvioida lineaarisesti kimmoiseksi vain hyvin alhaisella muodonmuutostasolla. Muodonmuutostason noustessa materiaalin jäykkyys alenee ja samalla aina suurempi osa muodonmuutoksesta on plastista, eli palautumatonta. Materiaalissa vallitsevan hydrostaattisen jännitystilän kasvu vaikuttaa myös materiaalin moduulien kasvuun.

Todellisuudessa jännitys-muodonmuutoskäyttäytyminen on epälineaarista, mutta se voidaan moduulisuureen muodossa yksinkertaistaen esittää joko tangenttimoduulina tai sekanttimoduulina. Kuvassa 1 on esitetty, kuinka moduulisuure määritetään sekanttimoduulina tai tangenttimoduulina.



Kuva 1. Sekanttimoduulin ja tangenttimoduulin määrittämisen ero. Tangenttimoduuli on suora, joka on moduulikäyrän tangenti. Sekanttimoduuli kuvaa tietyssä pisteessä suhdetta ($\Delta\sigma/\Delta\varepsilon$)

Kuten kuvasta 1 voidaan havaita, tangenttimoduuliarvoa vastaava suora sivuaa havaittua epälineaarista jännitys-muodonmuutosyhteyttä pistemäisesti. Sekanttimoduulin tapauksessa suoraviivainen approksimaatio tehdään jollekin jännitysvälille, jonka ulkopuolella approksimaatio toteutuu paikoin tarkemmin ja paikoin epätarkemmin todellisesta epälinearisesta käyttäytymisestä riippuen.

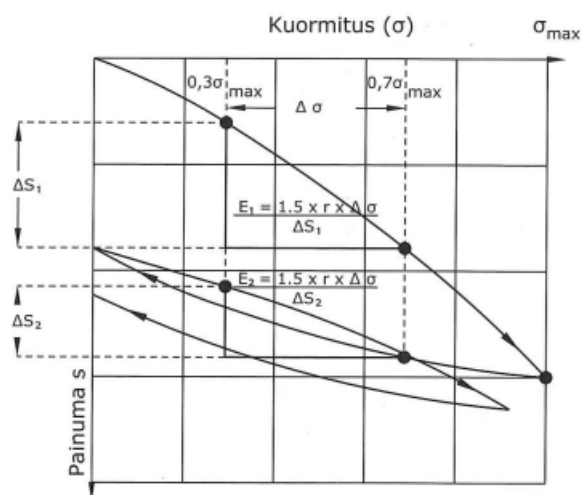
E-moduuli

Kimmomoduuli E on Odemarkin mitoitusmenettelyn yhteydessä käytettävä maa- ja kiviainesten jäykkyyttä kuvaava moduulisuure. E -moduuli on materiaalikohtainen suure, joka on koke-

E-moduuli

Kimmomoduuli E on Odemarkin mitoitusmenettelyn yhteydessä käytettävä maa- ja kiviainesten jäykkyyttä kuvaava moduulisuure. E -moduuli on materiaalikohtainen suure, joka on kokeusperäisesti määritetty vastaamaan tavanomaisessa rakenteessa materiaaliin kohdistuvaa jännitys-muodonmuutostilaa. Odemarkin mitoitusmenettelyssä eri rakennekerrosten ja pohjaan yhteisvaikutus summataan rakenteen kokonaisjäykkyydeksi. Tätä Odemarkin mitoitusmenettelyn avulla määritettyä kokonaisjäykkyyden arvoa kutsutaan yleisesti kantavuudeksi.

Levykuormituskokeella mitataan kokeellisesti Odemarkin mitoitusmenettelyä vastaava rakenteen kokonaisjäykkyys. Levykuormituskokeen tuloksista käytetään useimmiten toisen kuormitusyhteydessä mitattua kuormitusta ja painumaa vastaavaa E_2 -arvoa. Yleensä E_2 -arvo vastaa paremmin materiaalin todellista käyttäytymistä, sillä suurin palautumaton muodonmuutos on tapahtunut jo E_1 -arvoa määritettäessä ensimmäisellä kuormitusyhteydellä. (Ehrola 1996) Kuormitusyhteyksien E_1 ja E_2 eroavaisuuksia on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2. Muodonmuutosmoduulin määrittäminen (InfraRYL 2006)

Pudotuspainolaite mittaa saman asian kuin levykuormituskoe, mutta impulssimaista lyhytaikaista kuormitusta käyttäen. Eripainoisilla laitteilla maahan mobilisoitua jännitystaso ja muodonmuutostaso ovat erilaisia, joten pudotuspainolaitteella ja levykuormituslaitteella saadut tulokset eivät välttämättä täysin vastaa toisiaan. Jos pudotuspainomittauksen yhteydessä mitataan kuormituslevyn ympäriltä kuormitettavan rakenteen pinnan taipumamuoto, voidaan takaisinlaskentamenettelyillä arvioida rakennekerroskohtaisia moduularvoja. Kuvassa 3 on esitetty vasemmalla levykuormituslaitteisto ja oikealla käsikäyttöinen pudotuspainolaite.



Kuva 3 Vasemmalla levykuormituslaitteisto (Museovirasto 2013) ja oikealla käsikäyttöinen pudotuspainolaite Loadman (Erkki Oksanen 2011)

Resilient-moduuli M_r

Resilient-moduuli on maan palautuvaa muodonmuutuskäyttäytymistä kuvaava jäykkyyshmoduuli. Se kuvaa sitomattomien materiaalien toistuvien kuormitusten jälkeen vakiintunutta kimmoista kuormituskäyttäytymistä ja on niin kutsuttu jäännösmoduuli. Jäännösmoduuli määritellään kuormituspulssin aiheuttaman deviatorisen jännityksen ja muodonmuutoksen palautuvan osan suhteena seuraavan kaavan mukaisesti:

$$M_r = \frac{\Delta\sigma_d}{\Delta\varepsilon_e}$$

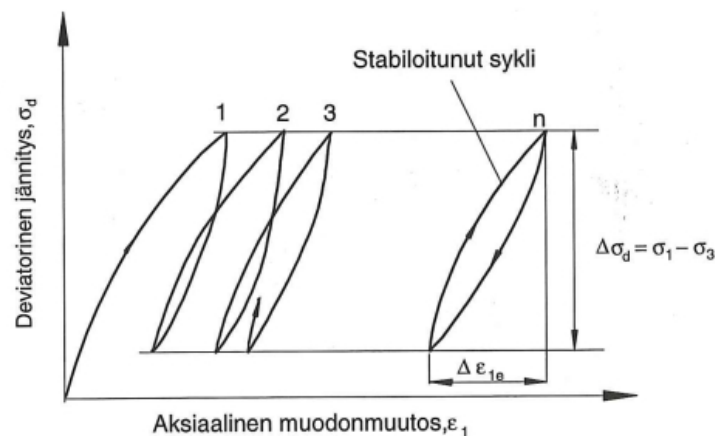
missä M_r on jäännösmoduuli

$\Delta\sigma_d$ on deviatorisen jännityksen vaihteluväli

$\Delta\varepsilon_e$ on palautuva suhteellinen muodonmuutos

(Ehrola 1996)

Toistuvan kuormituksen alaisena maarakennusmateriaalin jännitys-muodonmuutossykli stabiiloituu, mikä on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Sitomattoman materiaalin kuormitus-muodonmuutuskäyttäytyminen toistuvan kuormituksen alaisena (Ehrola 1996)

Ödometri-moduuli

Ödometri-moduuli on kokoonpuristuvuusmoduuli, jolla tarkoitetaan pystysuuntaisen jännityksen ja muodonmuutoksen suhdetta yksisuuntaisessa muodonmuutostilassa. Kokoonpuristuvuusmoduuli voidaan määrittää ödometrikokeella, jossa näytteen sivusiirtymät on estetty jäykällä metallirenkaalla. Ödometrikokeessa merkityksellistä on nimenomaan yksiakselinen muodonmuutostila, jolloin kuormitusta vastaan kohtisuorat muodonmuutokset on kokonaan estetty. Kokoonpuristuvuusmoduuli voidaan sekanttimoduulina määrittää kaavalla:

$$M_S = \frac{\Delta\sigma_1}{\Delta\varepsilon_1},$$

missä M_S on jännitysväliä $\Delta\sigma_1$ vastaava kokoonpuristuvuusmoduuli (sekanttimoduuli)

$\Delta\varepsilon_1$ on jännitysväliä $\Delta\sigma_1$ vastaava muodonmuutos σ_1 suunnassa

(RIL 157-1)

Lähteet:

Ehrola, E. 1996. *Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet*. Rakennustieto Oy. Helsinki. 357 s. + liit. 6 s.

InfraRYL 2006. *Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Osa 1 Väylät ja alueet*. Rakennustieto Oy.

Museovirasto. 2013. *levykuormituslaite*. [viitattu 4.11.2013] Saatavissa: <http://suomenmuseotonline.fi/fi/kuva/Mobilia/pv008unl.jpg>

Oksanen, Erkki. 2011. *Metsätutkimuslaitoksen uutiskirje 2011-4* [viitattu 4.11.2013] Saatavissa: <http://www.metla.fi/uutiskirje/metpro/2011-4/uutinen-4.html>

RIL 157-1 *Geomekaniikka I*. 1985. Rakennustieto Oy.

KOSTEUSPITOISUUDEN MÄÄRITYS**Uusioaines Oy**

Tuote: FOAMIT 60A
 Hakupaikka: Kirkkonummi
 Materiaalin toimitusaika: 5.10.2012
 Näytteen haku aika: 13.5.2013, näyte otettu kaivamalla kasa auki.

Kosteus mitattu astioineen ja jaettu kuivausastioihin, tämän jälkeen kuivattu 110 °C lämpötilassa ja jäädytetty vähintään 2 tuntia toistuvasti.

NÄYTE #:

1							
Punnitus [#]	Pvm/Aika	Pelti [#]	Punnitus [g]	Erotus [g]	Muutos [%]	Kuivaus [h]	
0	14.5.2013 8:30	#1	1399,87				
0	14.5.2013 8:30	#2	1623,81				
1	14.5.2013 12:30	#1	1116,15	283,72	25,420	2	
1		#2	1223,44	400,37	32,725	2	
2	15.5.2013 8:00	#1	1087,56	28,59	2,629	2	
2		#2	1176,75	46,69	3,968	2	
3	15.5.2013 12:15	#1	1085,73	1,83	0,169	2	
3		#2	1173,62	3,13	0,267	2	
4	15.5.2013 16:00	#1	1084,55	1,18	0,109	1	
4		#2	1172,75	0,87	0,074	1	
Yhteensä:	4	15.5.2013 16:00	#1/#2		766,38	25,346	7

Kosteuspitoisuus**34 %****NÄYTE #:**

2							
Punnitus [#]	Pvm/Aika	Pelti [#]	Punnitus [g]	Erotus [g]	Muutos [%]	Kuivaus [h]	
0	15.5.2013 16:30	#1	1406,68			0	
0	15.5.2013 16:30	#2	572,64			0	
0	15.5.2013 16:30	#3	1501,25			0	
1	16.5.2013 8:00	#1	1165,51	241,17	20,692	2	
1		#2	436,91	135,73	31,066	2	
1		#3	1172,43	328,82	28,046	2	
2	16.5.2013 12:15	#1	1158,4	7,11	0,614	2	
2		#2	435,69	1,22	0,280	2	
2		#3	1163,45	8,98	0,772	2	
3	16.5.2013 16:15	#1	1155,83	2,57	0,222	2	
3		#2	435,15	0,54	0,124	2	
3		#3	1161,64	1,81	0,156	2	
4	17.5.2013 7:00	#1	1155,08	0,75	0,065	1	
4		#2	435,15	0	0,000	1	
4		#3	1161,19	0,45	0,039	1	
Yhteensä:	4	17.5.2013 7:00	#1/#2/#3		729,15	20,949	7

Kosteuspitoisuus**27 %**

Vahtolasimurskeelle tehtävän tiivistyskokeen periaate / P.Kolisoja 10.5.2013

Kokeet tehdään Foamit Oy:n toimittamalle materiaalille TTY:n Rakennustekniikan laitoksen koehallissa. Tiivistyskoe tehdään muuhun tarkoitukseen aiemman valmistetussa, kooltaan noin 1 x 2 m² olevassa, pohjaltaan avoimessa teräslaatikossa. Tiivistäminen tehdään 1 kN painoista tärylevyä käyttäen.

Tiivistettävän kerroksen kokonaispaksuus on 1 m. Tiivistäminen tapahtuu kerroksen pinnalle asennetun vanerilevyn päältä. Tiivistystyön aiheuttaman vahtolasimursketta hienontavan vaikutuksen testaamiseksi tiivistettävä kerros jaetaan suodatinkankailla neljään 0,25 m paksuiseen osakerrokseen. Tiivistyskoe tehdään toimituskosteudessa olevalle vahtolasimurskeelle.

Tiivistyskoe toteutetaan seuraavien työvaiheiden mukaisesti:

- Tiivistyskoelaatikon pohjalle asennetaan suodatinkangas
- Lisätään ensimmäinen 0,25 m paksuinen osakerros. Kerroksen paksuus määritetään asentamalla kerroksen pinnalle vanerilevy, jonka yläpinnan korkeustaso mitataan useasta pisteestä.
- Vanerilevy poistetaan ja ensimmäisen osakerroksen pinnalle laitetaan suodatinkangas. Kangas asennetaan hieman löysäksi laskostaen, jotta se vaikuttaisi mahdollisimman vähän kuormien välittymiseen vahtolasipartikkelilta toiselle.
- Toinen ja kolmas 0,25 m paksuinen osakerros asennetaan samalla tavoin kuin ensimmäinen.
- Viimeisen vahtolasikerroksen päälle ei asenneta suodatinkangasta, mutta toteutunut kerrospaksuus määritetään samalla tavoin kuin muidenkin osakerrosten tapauksessa kerroksen pinnalle asennettavan vanerilevyn päältä mittaamalla.
- Koko vahtolasikerrosta tiivistetään vanerilevyn päältä yksi tiivistyskierros tärylevyä käyttäen.
- Tiivistämisen aiheuttama tiivistyskerroksen pinnan painuma havaitaan vanerilevyn pinnankorkeutta mittaamalla.
- Vanerilevy poistetaan tilapäisesti ja tiivistetyn kerroksen pinnalta mitataan tiivistetyn materiaalin jäykkyyttä kuvaava moduularvo käsikäyttöisellä Loadman-pudotuspainolaitteella.
- Vanerilevy asennetaan takaisin paikoilleen ja tehdään toinen tiivistyskierros. Tämän aiheuttaman tiivistyskerroksen pinnan painuman mittaus sekä Loadman-mittaus tehdään samalla tavoin kuin edellä.
- Sama toistetaan niin monta kertaa kunnes kerros ei enää mainittavasti tiivisty. Kokeen edetessä mitausten välillä voidaan harkinnan mukaan tehdä myös useampikin kuin yksi tiivistyskierros.
- Ylin osakerros poistetaan ja siinä tapahtunut hienontuminen todetaan jakamalla se manuaalisesti fraktioihin 4, 8 ja 16 mm seulaaverkkoja käyttäen. Osakerroksen pohjalla olevan suodatinkankaan pinnalle varisseen hienontuneen aineksen määrä havainnoidaan myös visuaalisesti.
- Suodatinkangas poistetaan ja toiseksi ylimmän osakerroksen pinnataso mitataan asentamalla jälleen vanerilevy tilapäisesti kerroksen pinnalle korkeusmitausten ajaksi.
- Toiseksi ylin osakerros poistetaan ja siinä tapahtunut hienontuminen todetaan samalla tavoin kuin ylimmän osakerroksen osalta edellä.
- Kaiksi alinta osakerrosta poistetaan samalla tavoin.

Tiivistyskoe, 13.-17.6.2013**Näytteen rakentaminen, 13.6.2013**

TTY, Rakennushalli

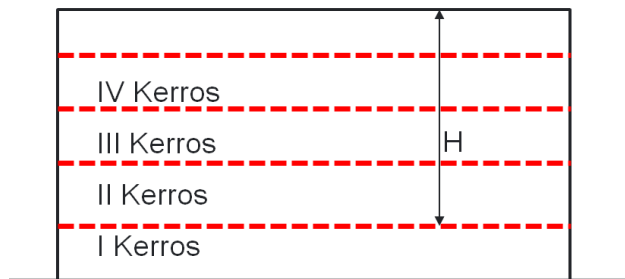
Foamit 60A

Pohjasta avoin teräslaatikko betonilattialla

Pituus	2000 mm
Leveys	950 mm
Korkeus	1500 mm

Rullamitta Würth	5 m
Vanerilevy	14 mm

Foamit 60A, Poistettu < 18 mm # aines

**Näytteen massa**

Laatikko	I Kerros	II Kerros	III Kerros	IV Kerros
Massa [g]				
1	9600	10850	9500	11250
2	8550	8650	8900	9350
3	9300	9850	9000	9500
4	9050	8800	9450	9850
5	10000	9600	9150	9950
6	10250	10500	9050	10100
7	9100	11250	9900	8000
8	8650	7600	9350	9250
9	9300	9200	9700	9300
10	9000	9150	9000	9300
11	8500	10400	9750	10150
12	9300	8300	9300	12050
13	8900	8850	10500	-
14	-	-	8850	-
Yhteensä [g]:	119500	123000	131400	118050
Yhteensä [kg]:	119,5	123	131,4	118,05
Kokonaismassa [kg]:				491,95

Syvyys laatikon yläpinnasta vanerin pintaan, 6 mittapistettä (ks. kuva)

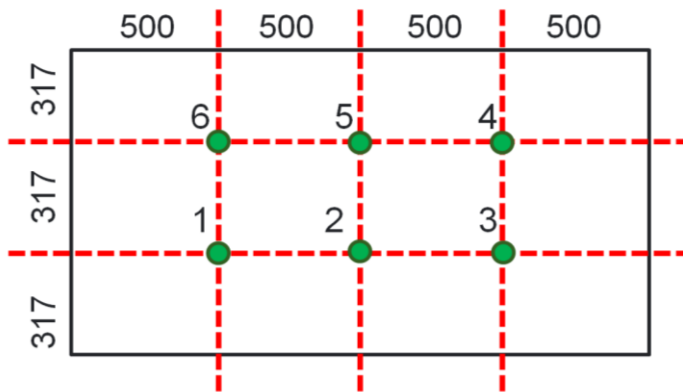
Mittapiste	I Kerros	II Kerros	III Kerros	IV Kerros
Korkeus (H) [mm]				
1	1174	880	564	273
2	1165	863	550	271
3	1154	849	533	268
4	1145	843	533	262
5	1156	860	548	267
6	1168	874	563	271
KA:	1160	862	549	269
Todellinen KA	1174	876	563	283
Kerrospaksuus [mm]:	326	299	313	280
Kokonaispaksuus [mm]:				1217

Kerroksen tilavuus

	I Kerros	II Kerros	III Kerros	IV Kerros
Tilavuus [mm ³]	618766667	5,68E+08	594700000	531683333
Tilavuus [m ³]	0,62	0,57	0,59	0,53

Kerroksen tiheys

	I Kerros	II Kerros	III Kerros	IV Kerros
Tiivistämätön [kg/m ³]	193,13	216,63	220,95	222,03

Mittapisteet

Tiivistyskoe, 13.-17.6.2013**Tärytys, 14.6.2013**

TTY, Rakennushalli

Foamit 60A

Jytä-tärylevy 127,15 kg
 Vanerilevy 14 mm

Korkeusmitat vanerilevyn yläpinnasta laatikon yläpintaan

Kaksi
tärytyskierrosta

Tärytyskierros	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
klo	9:57	10:18	10:27	10:41	10:53	11:08	11:21	11:40	12:35	12:51
Tärytyksen kesto [s]	18	23	28	25	32	35	33	33	72	58
Mittapisteet	Korkeus [mm]									
1	312	327	338	350	356	366	372	381	392	400
2	312	329	339	350	357	366	374	380	393	401
3	313	330	338	350	357	365	372	379	391	397
4	312	328	339	349	356	366	370	378	390	396
5	314	329	340	351	359	367	374	381	394	400
6	313	327	340	352	359	369	374	382	394	400
Keskiarvo [mm]:	312,67	328,33	339,00	350,33	357,33	366,50	372,67	380,17	392,33	399,00
tod keskiarvo [mm]:	326,67	342,33	353,00	364,33	371,33	380,50	386,67	394,17	406,33	413,00
koko näytteen korkeus [mm]:	1173,33	1157,67	1147,00	1135,67	1128,67	1119,50	1113,33	1105,83	1093,67	1087,00
muutos alkup. kork. [mm]:	44,00	59,67	70,33	81,67	88,67	97,83	104,00	111,50	123,67	130,33
ero edelliseen kierr. [mm]:	44,00	15,67	10,67	11,33	7,00	9,17	6,17	7,50	12,17	6,67
kork. muutos/aika [mm/s]:	2,44	0,68	0,38	0,45	0,22	0,26	0,19	0,23	0,17	0,11
kok. muutos/kok. aika [mm/s]:	2,44	1,46	1,02	0,87	0,70	0,61	0,54	0,49	0,41	0,37
kumulatiivinen aika [s]:	18,00	41,00	69,00	94,00	126,00	161,00	194,00	227,00	299,00	357,00
kumulatiivinen kork. muutos [mm]:	44,00	59,67	70,33	81,67	88,67	97,83	104,00	111,50	123,67	130,33
Kokonaistiivistymisen [mm]:										130,33
Kokonaistiivistymisen [%]:										10,71

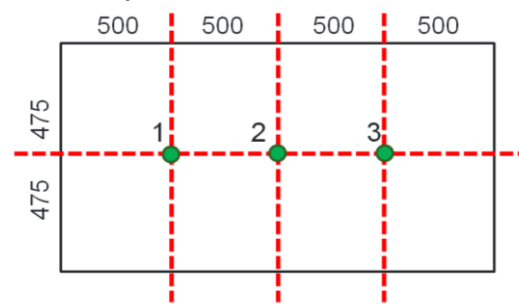
Tiivistyskoe, 13.-17.6.2013**Pudotuspainolaitemittaus, 13.-14.6.2013**

TTY, Rakennushalli

Foamit 60A

Easetus : 130
 Massa: 10 kg
 Kuormituslevy: 200 mm

Mittauspisteet

**Ennen tiivistystä**

Mittauspiste	Pudotus	E-moduuli [MN/m ²]	Painuma [mm]	Voima [kN]
1	E1	87	1,49	640
	E2	16	> 8,00	790
	E3	21	6,17	880
2	E1	148	0,88	660
	E2	18	7,03	850
	E3	21	6,19	910
3	E1	127	1,02	640
	E2	19	6,95	860
	E3	22	5,89	900

I kierroksen jälkeen

Mittauspiste	Pudotus	E-moduuli [MN/m ²]	Painuma [mm]	Voima [kN]
1	E1	15	> 8,00	670
	E2	25	5,1	980
	E3	28	4,71	980
2	E1	17	7,44	770
	E2	27	4,89	1070
	E3	31	4,26	1060
3	E1	15	> 8,00	700
	E2	25	5,14	960
	E3	27	4,8	990

II kierroksen jälkeen

Mittauspiste	Pudotus	E-moduuli [MN/m ²]	Painuma [mm]	Voima [kN]
1	E1	18	7,07	760
	E2	29	4,43	1070
	E3	32	4,01	1060
2	E1	20	6,48	820
	E2	31	4,14	1050
	E3	20	6,56	730
3	E1	17	7,65	730
	E2	27	4,87	980
	E3	29	4,48	1000

levyä siirretty kesken mittausarjan

III kierroksen jälkeen

Mittauspiste	Pudotus	E-moduuli [MN/m ²]	Painuma [mm]	Voima [kN]
1	E1	22	5,91	900
	E2	31	4,14	1120
	E3	36	3,62	1130
2	E1	24	5,5	880
	E2	34	3,83	1120
	E3	37	3,48	1100
3	E1	21	6,31	770
	E2	33	3,99	1090
	E3	35	3,7	1110

IV kierroksen jälkeen

Mittauspiste	Pudotus	E-moduuli [MN/m ²]	Painuma [mm]	Voima [kN]
1	E1	23	5,75	830
	E2	34	3,8	1140
	E3	37	3,55	1120
2	E1	26	5	930
	E2	35	3,69	1170
	E3	39	3,37	1140
3	E1	20	6,41	790
	E2	33	3,89	1150
	E3	39	3,37	1150

V kierroksen jälkeen

Mittauspiste	Pudotus	E-moduuli [MN/m ²]	Painuma [mm]	Voima [kN]
1	E1	28	4,63	960
	E2	37	3,56	1180
	E3	37	3,48	1170
2	E1	30	4,3	1020
	E2	37	3,5	1190
	E3	40	3,29	1170
3	E1	25	5,19	930
	E2	38	3,46	1250
	E3	41	3,18	1220

VI kierroksen jälkeen

Mittauspiste	Pudotus	E-moduuli [MN/m ²]	Painuma [mm]	Voima [kN]
1	E1	29	4,44	1000
	E2	38	3,43	1190
	E3	40	3,22	1200
2	E1	32	4,06	1050
	E2	41	3,16	1190
	E3	43	3,03	1220
3	E1	28	4,65	920
	E2	40	3,23	1190
	E3	42	3,09	1220

VII kierroksen jälkeen

Mittauspiste	Pudotus	E-moduuli [MN/m ²]	Painuma [mm]	Voima [kN]
1	E1	33	3,99	1070
	E2	38	3,44	1190
	E3	40	3,28	1200
2	E1	34	3,81	1080
	E2	43	3,05	1280
	E3	44	2,95	1240
3	E1	30	4,29	1020
	E2	41	3,2	1280
	E3	42	3,07	1290

VIII kierroksen jälkeen

Mittauspiste	Pudotus	E-moduuli [MN/m ²]	Painuma [mm]	Voima [kN]
1	E1	31	4,22	1030
	E2	42	3,09	1280
	E3	44	2,97	1280
2	E1	37	3,56	1180
	E2	45	2,89	1310
	E3	46	2,81	1300
3	E1	33	3,99	1010
	E2	42	3,11	1240
	E3	43	3,05	1260

IX jälkeen (2 tärytyskierrosta)

Mittauspiste	Pudotus	E-moduuli [MN/m ²]	Painuma [mm]	Voima [kN]
1	E1	34	3,78	1050
	E2	44	2,96	1280
	E3	43	2,99	1280
2	E1	40	3,29	1150
	E2	45	2,9	1240
	E3	46	2,82	1240
3	E1	41	3,16	1180
	E2	51	2,57	1350
	E3	52	2,52	1350

X jälkeen (2 tärytyskierrosta)

Mittauspiste	Pudotus	E-moduuli [MN/m ²]	Painuma [mm]	Voima [kN]
1	E1	38	3,41	1120
	E2	45	2,87	1310
	E3	47	2,78	1300
2	E1	41	3,15	1150
	E2	50	2,59	1320
	E3	51	2,53	1290
3	E1	39	3,33	1160
	E2	51	2,57	1340
	E3	51	2,55	1380
	E4	55	2,36	1300
	E5	51	2,54	1320
	E6	51	2,53	1340

Tiivistyskoe, 13.-17.6.2013**Näytteen purku, 14.-17.6.2013**

TTY, Rakennushalli

Foamit 60A

Vaneri 14 mm

Korkeusmitat kerroksen yläpinnasta vanerin päältä laatikon yläreunaan

Korkeusmittaus

	I kerros	II kerros	III kerros	IV kerros
	Korkeus [mm]			
1	1178	896	608	400
2	1174	880	595	401
3	1168	868	581	397
4	1158	860	580	396
5	1166	876	595	400
6	1173	893	610	400
KA	1169,50	878,83	594,83	399
tod	1183,50	892,83	608,83	413

Seulonta

	I kerros	II kerros	III kerros	IV kerros
	Massa [g]			
alle 4 mm	720	1550	2750	3310
4-8 mm	45	125	115	140
8 - 18 mm	615	470	540	585
alle 18 mm	1380	2145	3405	4035

Koko kerroksen materiaalista seulan läpäisi [%]

Seula [mm]	I kerros	II kerros	III kerros	IV kerros
18	1,15 %	1,74 %	2,59 %	3,42 %
8	0,04 %	0,10 %	0,09 %	0,12 %
4	0,60 %	1,26 %	2,09 %	2,80 %

< 18 mm # aines [g]:	1380	2145	3405	4035
hienontuminen [%]:	1,15	1,74	2,59	3,42
Kerroksen yläpinnan muutos [mm]:	-9,17	-17,33	-46,33	-130,33
Kerros­paksuuden muutos [mm]:	-9,17	-8,17	-29,00	-84,00
Kerros­paksuuden muutos [%]:	2,81	2,73	9,27	30,02
Kerroksen uusi tilavuus [m ³]:	0,60	0,55	0,54	0,37
Kerroksen uusi tiheys [kg/m ³]:	198,72	222,72	243,51	317,27
Tiheyden muutos [%]:	2,81	2,73	9,27	30,02

Kolmiaksaalikoenäytteiden mitat ja tiedot

18.-23.7.2013

TTY, Rakennushalli

Foamit 60A

20 kPa Tiivistys yhdessä kerroksessa, tiivistystyö 5 x 1 sek

kumin paksuus 2 mm ENNEN KOETTA			kumin paksuus 2 mm KOKEEN JÄLKEEN			MUUTOS		
Korkeus- asema [cm]	Piiri [mm]	Halkaisija [mm]	Korkeus- asema [cm]	Piiri [mm]	Halkaisija [mm]	Piiri [mm]	Halkaisija [mm]	
49	945	296,8	47	948	297,8	3,0	1,0	
40	938	294,6	38,5	946	297,1	8,0	2,5	
29	937	294,3	28	949	298,1	12,0	3,8	
21	927	291,1	20	944	296,5	17,0	5,4	
12	908	285,0	12	938	294,6	30,0	9,5	
6	920	288,8	6	926	290,8	6,0	1,9	
Keskiarvo	929,2	291,8	Keskiarvo	941,8	295,8	Keskiarvo	12,7	4,0
Korkeus [mm]		561	Korkeus [mm]		531	Halkaisijan muutos [%]	1,38	
Tilavuus [cm ³]		37507	Tilavuus [cm ³]		36489	Korkeuden muutos [mm]	30	
Massa, ennen koetta [g]		9607	Massa, ennen koetta [g]		9607	Korkeuden muutos [%]	5,35	
Tiheys [kg/m ³]		256	Tiheys [kg/m ³]		263			
			Kokeen jälkeen talteen saatu massa [g]		9372			
Kokeen jälkeen talteen saatu kuiva massa [g]		8503	Kokeen jälkeen talteen saatu kuiva massa [g]		8503			
Vesipitoisuus [%]		13,0	Vesipitoisuus [%]		10,2			
Kuivairtoteiheyys [kg/m ³]		227	Kuivairtoteiheyys [kg/m ³]		233			
Sullontamuotissa laskettuna			Sullontamuotissa laskettuna					
Korkeus [mm]		551	Korkeus [mm]		551			
Tilavuus [cm ³]		38948	Tilavuus [cm ³]		38948			
Massa, ennen koetta [g]		9607	Massa, kokeen jälkeen [g]		9371,6			
			Tiheys, kokeen jälkeen [kg/m ³]		241			
Tiheys [kg/m ³]		247	Kokeen jälkeen talteen saatu kuiva massa [g]		8503			
			Kuivairtoteiheyys [kg/m ³]		218			

40 kPa Tiivistys kolmessa kerroksessa, tiivistystyö 3 x 1 sek /kerros

Kumin paksuus 1,5 mm

ENNEN KOETTA

Korkeus- asema	Piiri	Halkaisija
[cm]	[mm]	[mm]
54	928	292,4
44	934	294,3
34	940	296,2
29	933	294,0
24	936	294,9
14	938	295,6
6	932	293,7
Keskiarvo	934,4	294,4

Kumin paksuus 1,5 mm

KOKEEN JÄLKEEN

Korkeus- asema	Piiri	Halkaisija
[cm]	[mm]	[mm]
52	934	293,3
42	939	294,9
33	948	297,8
28	944	296,5
23	936	293,9
13,5	943	296,2
6	932	293,7
Keskiarvo	939,4	295,2

MUUTOS

Piiri	Halkaisija
[mm]	[mm]
6,0	0,9
5,0	0,6
8,0	1,5
11,0	2,5
0,0	-1,0
5,0	0,6
0,0	0,0
Keskiarvo	5,0

Korkeus [mm]	600
Tilavuus [cm ³]	40853
Massa, ennen koetta [g]	10115
Tiheys [kg/m ³]	248

Kokeen jälkeen talteen saatu kuiva massa [g]	9296,6
Vesipitoisuus [%]	8,8
Kuivairtoteihs [kg/m ³]	228

Sullontamuotissa laskettuna

Korkeus [mm]	591
Tilavuus [cm ³]	41775
Massa, ennen koetta [g]	10115
Tiheys [kg/m ³]	242

Korkeus [mm]	568
Tilavuus [cm ³]	38868
Massa, ennen koetta [g]	10115
Tiheys [kg/m ³]	260

Kokeen jälkeen talteen saatu massa [g]	10056,5
--	---------

Kokeen jälkeen talteen saatu kuiva massa [g]	9296,6
Vesipitoisuus [%]	8,2
Kuivairtoteihs [kg/m ³]	239

Sullontamuotissa laskettuna

Korkeus [mm]	591
Tilavuus [cm ³]	41775
Massa, kokeen jälkeen [g]	10056,5
Tiheys, kokeen jälkeen	241
Kokeen jälkeen talteen saatu kuiva massa [g]	9296,6
Kuivairtoteihs [kg/m ³]	223

Halkaisijan muutos [%]	0,25
Korkeuden muutos [mm]	32
Korkeuden muutos [%]	5,33

80 kPa Tiivistys kolmessa kerroksessa, tiivistystyö 3 x 1 sek /kerros

Kumin paksuus 2 mm ENNEN KOETTA			Kumin paksuus 2 mm KOKEEN JÄLKEEN			MUUTOS		
Korkeus- asema [cm]	Piiri [mm]	Halkaisija [mm]	Korkeus- asema [cm]	Piiri [mm]	Halkaisija [mm]	Piiri [mm]	Halkaisija [mm]	
54	943	296,2	52	941	295,5	-2,0	-0,6	
44	928	291,4	41,5	920	288,8	-8,0	-2,5	
34	948	297,8	32	943	296,2	-5,0	-1,6	
29	946	297,1	27,5	943	296,2	-3,0	-1,0	
24	930	292,0	23	927	291,1	-3,0	-1,0	
14	944	296,5	12,5	939	294,9	-5,0	-1,6	
6	943	296,2	6	930	292,0	-13,0	-4,1	
Keskiarvo	940,3	295,3	Keskiarvo	934,7	293,5	Keskiarvo	-5,6	-1,8
Korkeus [mm]		604	Korkeus [mm]		572	Halkaisijan muutos [%]	-0,60	
Tilavuus [cm ³]		41368	Tilavuus [cm ³]		38707	Korkeuden muutos [mm]	32	
Massa, ennen koetta [g]		10050	Massa, ennen koetta [g]		10050	Korkeuden muutos [%]	5,30	
Tiheys [kg/m ³]		243	Tiheys [kg/m ³]		260			
			saatu massa [g]		10011,5			
Kokeen jälkeen talteen saatu kuiva massa [g]		9568,1	Kokeen jälkeen talteen saatu kuiva massa [g]		9568,1			
Vesipitoisuus [%]		5,0	Vesipitoisuus [%]		4,6			
Kuivairtotiheys [kg/m ³]		231	Kuivairtotiheys [kg/m ³]		247			
Sullontamuotissa laskettuna			Sullontamuotissa laskettuna					
Korkeus [mm]		596	Korkeus [mm]		596			
Tilavuus [cm ³]		42129	Tilavuus [cm ³]		42129			
Massa, ennen koetta [g]		10050	Massa, kokeen jälkeen [g]		10011,5			
Tiheys [kg/m ³]		239	Tiheys, kokeen jälkeen		238			
			Kokeen jälkeen talteen saatu kuiva massa [g]		9568,1			
			Kuivairtotiheys [kg/m ³]		227			

Sullonta

Massa [g]	10928	Kokeen jälkeen talteen saatu massa [g]	10849,4
Sullonnan jälkeen talteen saatu kuiva massa [g]	10418,2	Sullonnan jälkeen talteen saatu kuiva massa [g]	10418,2
Vesipitoisuus [%]	4,9	Vesipitoisuus [%]	4,1

Sullontamuotissa laskettuna

Korkeus [mm]	668	Korkeus [mm]	668
Tilavuus [cm ³]	47218	Tilavuus [cm ³]	47218
Massa [g]	10928	Kokeen jälkeen talteen saatu massa [g]	10849,4
Tiheys [kg/cm ³]	231	Tiheys [kg/cm ³]	230
		Kokeen jälkeen talteen saatu kuiva massa [g]	10418,2
		Kuivairtotiheys [kg/m ³]	221

Näytteen jakaminen:

Yläosa 1/3
Alaosa 2/3

RAKEISUUSMÄÄRITYS Kolmiakksiaalikoheet

SEULASARJA
 NÄYTE
 TUTKI

454 34/RL (31,5 - 63,0mm) ja 454/31 (2,0 - 16,0mm)
 H272 Kuivaseulontojen koonti
 12.8.2013 NL

Seula (mm)	LÄPÄISY (%)									
	Sullonta- koe	20 kPa Yläosa 1/3	20 kPa Alaosa 2/3	20 kPa Yhdistetyt tulokset	40 kPa Yläosa 1/3	40 kPa Alaosa 2/3	40 kPa Yhdistetyt tulokset	80 kPa Yläosa 1/3	80 kPa Alaosa 2/3	80 kPa Yhdistetyt tulokset
63	99,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100
31,5	27,0	27,5	31,0	29,8	19,6	34,1	29,0	25,0	34,7	31,3
16	3,1	2,3	4,3	3,6	1,9	6,0	4,5	3,2	7,2	5,8
8	2,5	1,6	2,6	2,3	1,0	3,3	2,5	1,4	3,7	2,9
4	2,4	1,5	2,1	1,9	1,0	2,5	1,9	1,2	2,3	2,0
2	2,3	1,5	1,9	1,8	1,0	2,3	1,8	1,2	2,0	1,8
1	2,3	1,5	1,9	1,8	1,0	2,3	1,8	1,2	2,0	1,8

