

Leo Lampainen

VAAHTOLASI INFRARAKENTAMISESSA

Foam glass in civil engineering applications

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: Minna Leppänen
Toukokuu 2020

TIIVISTELMÄ

Leo Lampainen: Vaahtolasi infrarakentamisessa
(Foam glass in civil engineering applications)
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2020

Vaahtolasimurske on keräyslasista jalostettu huokoinen ja palamaton kevytkiviaines. Vaahtolasimurskeen valmistukseen voidaan hyödyntää keräyslasia, joka jäisi hyödyntämättä muissa jatkokäyttötarkoituksissa kuten pakkaustuoteollisuudessa.

Vaahtolasin valmistuksessa pääraaka-aineena käytettävä puhdistettu keräyslasi murskataan jauhatusprosessissa jauhomaiseksi, jonka jälkeen jauhatetun keräyslasiin sekoitetaan vaahdotusagenttia. Lasijauhe-vaahdotusagentti -sekoitus kuumennetaan tunneliuunissa, jolloin lasijauhe muuttuu viskoosiksi nesteeksi ja vaahdotusagentti alkaa muodostamaan kaasua. Lopputuloksena syntyy huokoinen vaahtolasilaatta, joka jäähtyessään lämpöjännityksien vaikutuksesta murskautuu 10-60 mm kokoisiksi rakeiksi.

Vaahtolasimurskeen tilavuuspaino on muihin luonnon maa- ja kiviaineksiin nähden alhainen. Huokoisena materiaalina vaahtolasimurskeeseen sitoutuu kosteutta lähes jokaisessa käyttötarkoituksessa ja sen tilavuuspaino kasvaa merkittävästi kosteuspitoisuuden kasvaessa. Vaahtolasimurskeen verrattain korkea kitkakulma antaa sille hyvät lujuusominaisuudet. Jännitystilan kasvaessa vaahtolasimurskeen kitkakulma kuitenkin pienenee, joka on otettava huomioon etenkin rakenteita mitoitettaessa. Vesipitoisuuden kasvaessa vaahtolasimurskeen lämmöneristävyysominaisuudet kuitenkin pienenevät. Vaahtolasimurske luokitellaan routimattomaksi maarakennusmateriaaliksi ja sen vedenläpäisevyyden on todettu olevan likimain sama, kuin rakeiltaan samanmuotoisella ja jakeisella luonnon kiviaineksella. Tilavuuteen nähden vaahtolasimurskeen haitta-ainepitoisuudet ja haitta-aineiden liukoisuus ovat varsin pieniä. Näin ollen vaahtolasimurskeen on todettu olevan ympäristölleen vaaratonta.

Vaahtolasimurskeella on useita maarakennuskäytön kannalta hyödyllisiä ominaisuuksia. Vaahtolasimurske soveltuu hyvin kevennysmateriaaliksi pienen tilavuuspainon perusteella, mutta sitä käytetään myös yleisesti routaeristeenä, taustatäyttönä ja kuivatuskerroksen materiaalina. Vaahtolasimurskekerrosta käytetään rakenteessa yleensä useampaan kuin yhteen käyttötarkoitukseen samanaikaisesti, jolloin sen hyödyllisten materiaaliominaisuuksien käyttö tehostuu. Suomessa vaahtolasimurskerakenteiden rakentaminen ja suunnittelu tapahtuu materiaalinvalmistajan rakennus- ja suunnitteluohjeiden mukaisesti.

Tuotteistamisprosessin tarkoituksena on saattaa markkinakelpoinen ja kilpailukykyinen tuote markkinoille. Keräyslasista valmistettavan vaahtolasimurskeen tuotteistamisprosessin alussa raaka-aineena toimivan keräyslasin jätestatus saadaan poistettua täyttämällä EU:n jätedirektiivin ja Suomen jätelainsäädännön sisältämät End of Waste -menettelyn kriteerit. EoW-kriteerien täyttämisen uusiomateriaalin tuotantoon ja käyttöön tulee soveltaa kemikaalilainsäädäntöä ja REACH-asetusta. Tuotteistettavan rakennustuotteen tulee täyttää sille asetetut tekniset toimivuus- sekä muut vaatimukset. EU:n rakennustuoteasetuksen mukaan rakennustuotteet, jotka kuuluvat harmonisoidun tuotestandardin piiriin, tulee CE-merkitä ennen markkinoille viemistä. Tuotteistamisprosessin aikana tehdyistä kokeista ja koerakentamisesta laaditaan dokumentteja eri tahoille. Osa tuotteistamisprosessissa tuotetuista dokumenteista on lakisääteisiä, mutta dokumentteja tehdään myös markkinointitarkoituksiin sekä ohjeina tuotteen käyttäjille ja ostajille.

Avainsanat: Vaahtolasimurske, tuotteistaminen, maarakennusmateriaali, uusiomateriaali, infrarakentaminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. VAAHTOLASIMURSKEEN VALMISTUS	3
2.1 Jauhatus	4
2.2 Vaahdotus	5
3. MATERIAALIOMINAISUUDET	7
3.1 Tiheys	8
3.2 Lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet	9
3.2.1 Leikkauskestävyysskulma	9
3.2.2 Kimmomoduuli	9
3.2.3 Resilient-moduuli	10
3.2.4 Viruma	11
3.3 Termiset ominaisuudet	11
3.4 Hydrauliset ominaisuudet	12
3.5 Kemialliset ominaisuudet	13
4. VAAHTOLASIN KÄYTTÖKOHTEET INFRARAKENTAMISESSA	16
4.1 Vaahtolasikerroksen rakentaminen	16
4.1.1 Rakentamisen suunnittelu	16
4.1.2 Asentaminen ja tiivistys	16
4.2 Kevennysrakenteet	18
4.3 Routaeristys	19
4.4 Taustatäyttö	20
4.5 Kuivatusrakenteet	21
5. TUOTTEISTAMINEN	23
5.1 Vaahtolasimurskeen tuotteistamisprosessin eteneminen	23
5.2 CE-merkintä ja siihen liittyvät menettelyt	25
6. YHTEENVETO	26
LÄHTEET	28

1. JOHDANTO

Kierrätystilastojen mukaan lasin kierrätysaste Suomessa on ollut kasvussa. Nykyisin lasin kierrätysaste on jo noin 99 % (Ympäristö.fi). Kierrätyslasin perinteiset jatkojalostajat kuten pakkausteollisuus pystyvät kuitenkin hyödyntämään tuotteissaan vain laadullisesti kelpoisen kierrätyslasin. Tätä muihin kierrätyskohteisiin laadullisesti sopimatonta lasijätettä voidaan hyödyntää vaahtolasin raaka-aineena. Vaahtolasi on vaahdotetusta lasista valmistettua huokoista, palamatonta kevytkiviainesta. Sen valmistuksessa on mahdollista hyödyntää lajittelematonta kierrätyslasia sekä vähentää neitseellisten raaka-ainesten, kuten kiviaineksen käyttöä infrarakentamisessa. (Ritola & Vares 2008, s. 8)

Euroopassa vaahtolasin valmistus aloitettiin Sveitsissä ja Saksassa 1980-luvulla. Pohjoismaissa vaahtolasin tuotanto alkoi Norjassa 1990-luvulla. Suomessa vaahtolasimurskeen valmistuksen aloitti Uusioaines Oy vuonna 2011 tuotenimellä Foamit. Suomessa valmistetun Foamit-vaahtolasimurskeen pääraaka-aineena on keräyslasi, josta on poistettu metallit sekä muut epäpuhtaudet. Vaahtolasi sopii ominaisuuksiltaan moniin käyttötarkoituksiin infra- ja talonrakentamisessa. Suomessa vaahtolasimursketta on käytetty infrarakentamisessa yleisesti kevennysrakenteisiin, kapillaarikatkoihin, routaeristeeksi sekä kuivatuskerroksen materiaaliksi. Tämän lisäksi vaahtolasimurskeella on myös useita sovelluskohteita talonrakennuksessa. Vaahtolasin tyypillisten materiaaliominaisuuksien kuten pienen tilavuuspainon ja lämmönjohtavuuden perusteella vaahtolasimursketta voidaankin hyödyntää useampaan käyttötarkoitukseen samanaikaisesti maa- ja pohjarakentamisessa esimerkiksi yhdistettynä kevennysrakenteena ja routasuojauksena. Tällä hetkellä vaahtolasimursketta käytetään maarakennuskohteissa pääasiassa materiaalivalmistajan teettämien suunnitteluohjeiden mukaisesti. (Uusioaines Oy 2015)

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tutustua vaahtolasimurskeen valmistusprosessiin sekä sen keskeisiin rakennusteknisiin ominaisuuksiin. Työn tavoitteena on tarkastella erityisesti, mihin käyttökohteisiin vaahtolasimurske soveltuu ominaisuuksiltaan infrarakentamisessa sekä mihin sitä yleisesti sovelletaan. Tämän lisäksi työssä tutustutaan vaahtolasituotteiden tuotteistamisprosessiin sekä sen sisältämiin vaiheisiin. Tutkimus rajautuu vaahtolasin käyttöön infrarakentamisessa väylä- ja pohjarakentamisen rakennekerroksissa.

Tutkimus on toteutettu kirjallisuustutkimuksena ja tietoa on etsitty pääasiassa verkko- sekä kirjallisuuslähteistä. Lähdemateriaalina ovat toimineet tieteelliset julkaisut, materiaalivalmistajan dokumentit, väyläviraston verkkojulkaisut sekä opinnäyte- ja diplomityöt.

2. VAAHTOLASIMURSKEEN VALMISTUS

Vaahtolasin valmistuksen pääraaka-aineena käytetään eri lasityyppejä sisältävää keräyslasia. Keräyslasista voidaan kierrätyslaitoksilla erotella sekaan joutuneet roskat sekä lyijylasi. Tällöin jäljelle jää lasiseosta, jota jatkojalostetaan. Suomessa pakkauslasijätteestä lähes kaikki eli noin 99 % päätyy keräyslasiksi ja noin 6 % lasipakkauksista käytetään uudelleen sellaisenaan (Rinkiin.fi). Lasijätettä syntyy myös tasolasina esimerkiksi ovista, ikkunoista sekä ajoneuvojen tuulilaseista, mutta toistaiseksi tasolasituotteista syntyvää jätettä ei käytetä Suomessa valmistettavan vaahtolasimurskeen raaka-aineena.

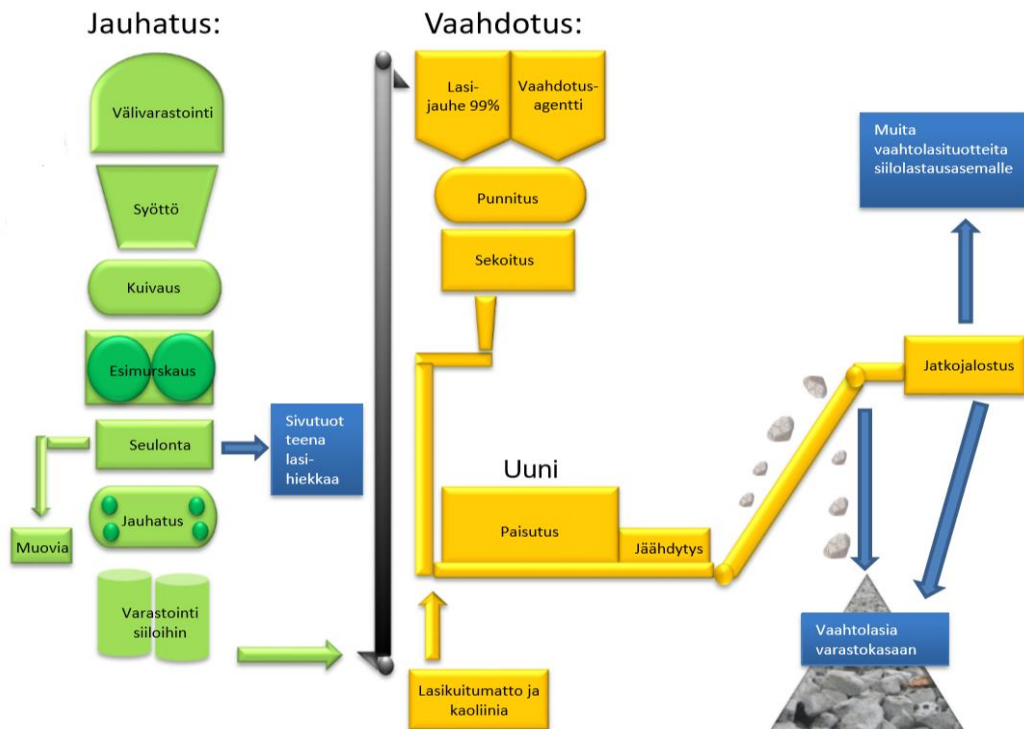
Uusioaines Oy:n valmistaman Foamit-vaahhtolasimurskeen tuotannossa käytetään useita eri raaka-aineita, mutta noin 98,27 % käytettävästä raaka-aineesta on murskattua keräyslasia (Uusioaines Oy 2020, s. 2). Keräyslasi puhdistetaan monipuolisesti Uusioaines Oy:n lasinpuhdistuslaitoksessa, jossa se käy läpi kaksivaiheisen puhdistusprosessin. Prosessi jakaantuu ensin karkeampaan lajitteluun, jonka jälkeen jäljelle jääneelle massalle suoritetaan tarkempi erotteluvaihe. Keräyslasin puhdistuksessa hyödynnetään eri menetelmiä metallin, muovin sekä paperin erottelemiseksi massasta. Tämän lisäksi puhdistettu keräyslasi eritellään omiksi jakeikseen väriluokkaperusteisesti. (Köylijärvi 2014, s. 17)

Keräyslasi koostuu pääasiassa pakkauslasituotteista, kuten esimerkiksi erilaisista väritömistä sekä värillisistä lasipurkeista ja -pulloista. Valtaosa maailman pakkauslasista on tyypiltään sooda-kalkki-silikaattilasina, joka on samalla myös maailman eniten käytetty lasi. Sooda-kalkki-silikaattilasi eli soodakalkkilasi on valmistuskustannuksiltaan muihin lasityyppeihin nähden edullista ja sen työstettävyyden on hyvä. Soodakalkkilasin kestävyysominaisuuksien ja työstettävyyden perusteella sitä voidaankin hyödyntää lukuisissa eri käyttökohteissa, kuten ikkunalaseissa tai hehkulampuissa. (Kolb & Kolb 1979, s. 605)

Vaahtolasin valmistuksen raaka-aineeksi voidaan kelpuuttaa lasijätettä, joiden hyödyntäminen muihin kierrätyskohteisiin ei olisi mahdollista materiaalin myrkyllisyyden, keraamisten epäpuhtauksien tai muiden tuotantoa häiritsevien ominaisuuksien perusteella. (Aabøe & Øiseth 2005). Vaahtolasin valmistuksen tuotantoprosessissa käytettävä kierrätyslasi jauhetaan jauhomaiseksi, jolloin lasimassa homogenisoituu ja epäpuhtaudet jakaantuvat tasaisesti. Tämän perusteella kierrätyslasin epäpuhtaudet eivät muodostu vaahtolasin tuotannossa ongelmaksi. (Köylijärvi 2014, s. 17)

2.1 Jauhatus

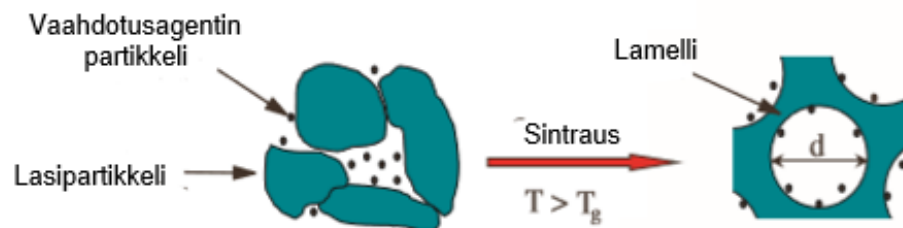
Lasinpuhdistusprosessin jälkeen lajiteltu sekä puhdistettu kierrätyslasi-murska kuivataan ennen jauhatusprosessia. Kuivattu lasimurska esimurskataan ja seulotaan, jotta murskeen seasta saadaan erotettua lasinpuhdistamolla seulontaprosessin läpäisemät paperin, metallin ja muovin jäämät. Seulonnan jälkeen lasimurska jauhetaan kuulamylyllä, jossa teräskuulat jauhavat lasimurskaa mekaanisesti. Jauhatusen tuloksena lasimurskasta saadaan raekooltaan alle 0,1 mm. (Köylijärvi, 2014, s. 17). Kuvassa 1 on esitetty periaatekaavio Uusioaines Oy:n Foamit-vahtolasimurskeen tuotantoprosessista.



Kuva 1. Foamit-vahtolasimurskeen tuotantoprosessin periaatekuva (Muokattu lähteestä Parkkali 2017)

2.2 Vaahdotus

Jauhatuksen jälkeen lasijauheeseen sekoitetaan vaahdotusagattia. Yleisimmin vaahtolasin valmistuksessa käytetty vaahdotusagatti on piikarbidi (SiC), jonka etuna pidetään helpompaa prosessinaikaista hallintaa sekä sen tuottamaa tasaista laatua verrattuna muihin vaahdotusagenteihin (Niemelä 2014, s. 97). Lasijauhe-vaahdotusagatti -sekoituksen lasipartikkelit sintrataan toisiinsa kiinni niiden sulamislämpötilassa 700-900°C, jolloin lasijauhe muodostaa viskoosin nesteen. Tällöin vaahdotusagattipartikkelit jäävät sulaneen lasijauheen ympäröimäksi, jolloin niiden aktivoitumisesta johtuva kaasuuntuminen saa aikaan kaasukuplia viskoosissa massassa. Vaahdotuksen lopputuloksena ilmakuplat ovat noin viisinkertaistaneet alkuperäisen sekoituksen tilavuuden ja muodostaneet vaahtolasille tyypillisen huokosmaisen rakenteen, jolloin jokaista kaasukuplaa ympäröi lasinen lamelliseinä. Kuvassa 2 on esitetty vaahdotuksessa tapahtuvan reaktion periaate. (Ritola & Vares 2008, s. 22; Köylijärvi 2014, s. 17)



Kuva 2. Periaatekuva kaasukuplan muodostumisesta vaahdotuksessa. (Muokattu lähteestä Steiner 2006, s. 120)

Vaahdotuksessa sulaneen lasimassan viskositeetin täytyy olla sopiva, jotta vaahdotusagentin synnyttämät kaasukuplat jäisivät lasimassan ympäröimäksi. Mikäli vaahdotuksessa käytetty lämpötila on liian korkea, nousevat vaahtokuplat liian viskoosin massan läpi pintaan. Myös lämpötilan muutosnopeus on tärkeä tekijä vaahdotuksessa. Liian hitaasti tapahtuvassa kuumennuksessa vaahdotusagentin kaasu saattaa vapautua ennenaikaisesti, kun taas liian äkillisessä kuumennuksessa vaahtokuplat saattavat murtua. (Ritola & Vares 2008, s. 22)

Vaahdotuksen jälkeen uunista tulevan vaahtolasilaatan annetaan jäähtyä huoneenlämmössä, jolloin sen sisäiset lämpötilaerot muodostavat jännityksiä aiheuttaen vaahtolasin hajoamisen murskeeksi, kuten kuvasta 3 voidaan havaita. Normaalisti vaahtolasimurskeen tuotannossa vaahtolasilaatta hajoaa noin 10-60 millimetrin kokoisiksi jakeiksi jäähtyessään. (Aabøe & Øiseth 2005)



Kuva 3. Vahtolasilaatta murenee lämpöjännityksien vaikutuksesta. (Vanhanen 2015)

3. MATERIAALIOMINAISUUDET

Tässä kappaleessa tarkastellaan vaahtolasin keskeisiä materiaaliominaisuuksia Suomessa valmistetun Foamit-vahtolasimurskeen tuotetietojen pohjalta. Uusioaines Oy:n valmistama Foamit-vahtolasimurskeet ovat CE-merkittyjä rakennustuotteita ja ne täyttävät tuotestandardin SFS-EN 13055-2:2004 kevytkiviaineksen sidottuihin ja sitoutumattomiin käyttötarkoituksiin 2+ mukaiset vaatimukset (Uusioaines Oy 2015, s. 3). Standardissa SFS-EN 13055-2 kevytkiviaines määritellään mineraaliseksi kiviainekseksi, jonka kiintotiheys ei ylitä arvoa 2 000 kg/m³ tai jonka tiivistämätön irtotiheys on enintään 1 200 kg/m³ (SFS-EN 13055-2). Taulukossa 1 on esitettyä Foamit-vahtolasimurskeen materiaaliominaisuuksia materiaalinvalmistajan suunnitteluohjeen perusteella.

Taulukko 1. Foamit-vahtolasimurskeen mitoituksessa käytettäviä materiaaliominaisuuksia. (Uusioaines Oy 2015, s. 5)

Ominaisuus	FOAMIT® Mitoitusarvot	Standardi / koemenetelmä
Raekoko	10-60 mm	SFS-EN 933-1 / SFS-EN 13055-2
Tiheys (irtokuiva)	210 kg/m ³ (±15 %)	SFS-EN 1097-3
Tiheys (kuiva, tiivistetty) *	220-280 kg/m ³	XXX
Kuivatilavuuspaino rakenteeseen tiivistettynä *	2,2-2,8 kN/m ³	XXX
Tilavuuspaino		
rakenne, jossa toimiva kuivatus	3,5 kN/m ³	XXX
rakenne ajoittain veden alla, ≤ 1 kk	6 kN/m ³	XXX
rakenne pitkäaikaisesti veden alla (>1v.)	10 kN/m ³	XXX
Tilavuuspaino (nostemitoitus)	3,0 kN/m ³	XXX
Tiivistymiskerroin	1,15-1,25 XX	kokemusperäinen
Kitkakulma (leikkauskestävyyskulma)		
kuormitus yli n. 100 kPa	max. 36°	kolmiakiaalioke
kuormitus alle n 100 kPa	max. 40°	
pH-arvo	10	
Vedenläpäisevyys	10-1 m/s	arvio
Vedenimeytyminen **		
lyhytaikainen (4 viikkoa)	≈ 60 paino-%	EN 12087
pitkäaikainen (1 vuosi)	≈ 100 paino-%	
Kapillaarinen nousukorkeus	200 mm	SFS-EN 1097-10
Puristuslujuus / murskautuvuus		
20 % kokoonpuristuma	> 0,9 MPa	SFS-EN 13055-1
Lämmönjohtavuus		
kuiva	0,1 W/mK	SFS-EN 12667
kosteaa ***	0,15 W/mK	
märkä	0,23 W/mK	
Vastaavuus eristävyuden kannalta X	ai = 4	katso taulukko 2.3

3.1 Tiheys

Tiheys on materiaaleille ominainen suure, joka ilmaisee materiaalin massan suhteessa sen tilavuuteen. Tämän perusteella irtotiheydelle saadaan muodostettua yhtälö

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

jossa ρ on tiheys [kg/m^3], m on materiaalin massa [kg] ja V on materiaalin tilavuus m^3 .

Maarakenteiden mitoituslaskennassa käytetään hyvin usein tilavuuspainoja. Tilavuuspaino ilmoittaa materiaalin painon suhteessa sen tilavuuteen, ja se voidaan määrittää tiheyden avulla yhtälöllä

$$\gamma = g\rho, \quad (2)$$

jossa γ on materiaalin tilavuuspaino [N/m^3] ja g on putoamiskiikkyvyys [m/s^2].

Eri valmistajien vaahtolasimursketuotteiden tiheys vaihtelee, sillä tuotantoprosessit sekä niissä käytettävät materiaalit eriyvät toisistaan valmistajakohtaisesti. Esimerkiksi vaahtotuksenaikaiset prosessilämpötilat sekä käytetyt vaahtotusagentit vaikuttavat vaahtolasimurskeen huokoisuuteen, jolla taas on suora vaikutus materiaalin irtotiheyteen. Ritolan ja Sareksen (2008) selvityksen mukaan vaahtolasin kuivairtitiheys vaihtelee yleisesti välillä $200\text{--}300\text{ kg}/m^3$ (Ritola & Vares 2008, s. 24). Suomessa valmistettavan Foamitvaahtolasimurskeen kuivairtitiheyden mitoitusarvoksi on ilmoitettu $210\text{ kg}/m^3$ taulukossa 1. Taulukosta 1 nähdään myös, että tuotteen kuivairtitiheydelle on määritetty 15 % vaihteluväli.

Kuten taulukosta 1 voidaan huomata, Foamitvaahtolasimurskeen irtotiheydelle ja tilavuuspainolle on määritetty useita eri arvoja. Vaahtolasimurskeen tilavuuspainoon rakenteessa vaikuttavat eri tekijät. Näitä tekijöitä ovat murskeen tiivistyminen ja hienominen sekä murskeeseen sitoutunut kosteus (Köylijärvi 2014, s. 35). Vaahtolasimurskeen hienonemista tapahtuu mursketta käsitellessä, esimerkiksi sitä kuljetettaessa tai tiivistettäessä. Vaahtolasimurskekerroksen tiiviyteen voidaan vaikuttaa työmaateknisillä toimenpiteillä.

Huokoisena materiaalina vaahtolasiin voidaan olettaa sitoutuvan kosteutta lähes kaikissa käyttökohteissa. Huokoisuus vaikuttaa merkittävästi vaahtolasin tilavuuspainoon sen ollessa vedenpinnan alapuolella. Tällöin vaahtolasin tilavuuspaino kasvaa merkittävästi, sillä ilmatäytteisiin huokosiin pääsee imeytymään vettä, joka nostaa materiaalin massaa suhteessa sen tilavuuteen. Tilavuuspainoksi on taulukossa 1 ilmoitettu 10

kN/m , joka on myös likimain veden tilavuuspaino. Vertaamalla arvoa kuivatilavuuspainoon huomataan, että vaahtolasissa on myös umpihuokosia, joihin vesi ei pääse imeytymään (Köylijärvi 2014, s. 35).

3.2 Lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet

3.2.1 Leikkauskestävyyskulma

Leikkauskestävyyskulma (kitkakulma) on termi, jolla kuvataan maa-aineksen rakeiden välistä kitkaa sekä sitä, että maan rakeiden on leikkautuessaan niin ikään kiivettävä osittain toistensa ylitse. Leikkauskestävyyskulmaan vaikuttavat oleellisesti etenkin maa-aineksen raekoko, rakeiden muoto sekä maa-aineksen tiiviyysaste (Lehtonen 2017, s. 12). Maa-aineksien kitkakulmaa voidaan arvioida tarkastelemalla kaltevuuskulmaa, johon maa-aines jää luonnollisesti.

Uusioaines Oy:n valmistamalle Foamit-vaahtolasimurskeelle on määritetty leikkauskestävyyskulmat kolmiakksiaalikoekokeiden perusteella. Valmistajan suunnitteluohjeen mukaan kitkakulman arvo vaihtelee välillä $35-45^\circ$. Kitkakulman verrattain suuri vaihteluväli johtuu etenkin vaahtolasin pyöristymisestä sekä rikkoutumisesta, johon vaikuttaa rakenteeseen kohdistuvan kuormituksen suuruus. Tämän vuoksi esimerkiksi taulukossa 1 määritetyt leikkauskestävyyskulman arvot ovat määritetty eri jännityksille (Uusioaines Oy 2015, s. 5). Vaahtolasimurskeesta koostuvia rakennekerroksia mitoitettaessa täytyy näin ollen huomioida rakenteeseen kohdistuvat jännitykset sekä niiden aiheuttamat muutokset vaahtolasin muotoon ja rakeisuuteen.

3.2.2 Kimmomoduuli

Kimmomoduulilla (E) kuvataan lujuusopissa materiaalin muodonmuutosominaisuuksia suhteessa siihen kohdistuvaan kuormitukseen. Kimmomoduuli on materiaalille ominainen vakio ja se osoittaa materiaalin jäykkyyden elastisella muodonmuutosalueella (Hibbeler 2014, s. 92-93). E-moduuli voidaan määrittää materiaaliin kohdistuvan jännityksen sekä sen aiheuttaman muodonmuutoksen suhteena. Näin ollen Hooken laista johtamalla saadaan muodostettua yhtälö

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (3)$$

jossa E on kimmomoduuli [Pa], σ on materiaaliin kohdistuva jännitys [Pa] ja ε kuvaa materiaalin muodonmuutosta (Hibbeler 2014, s. 92-93). Yhtälön 3 avulla voidaan päätellä, että kimmomoduuli on sitä korkeampi, mitä jäykempi materiaali on kyseessä.

Vaahtolasin kimmomoduuli voidaan määrittää esimerkiksi levykuormituskokeen tuloksien pohjalta. Suomessa valmistetun Foamit-vahtolasimurskeen E-moduulin likiarvo on esitetty taulukossa 2. Materiaalinvalmistajan mukaan kimmomoduulin arvoa kasvattavat mm. päällysrakenteen paksuus, tukipenkereet ja pohjamaan kantavuus. Kimmomoduuli on rakenteita mitoitettaessa oleellinen parametri. Se on välttämätön esimerkiksi kuormituskestävyyssuhteissa eli kantavuusmitoituksessa, jossa määritetään rakenteen kykyä vastustaa muodonmuutosta kuormituksen alaisena. (Uusioaines Oy 2015, s. 13)

Taulukko 2. Suomessa valmistetun Foamit-vahtolasimurskeen kantavuusominaisuuksia. (Uusioaines Oy 2015, s. 6)

Moduuli *	FOAMIT* Mitoitusarvot	Määrittäminen
E-moduuli, E2	50 MPa *	levykuormituskokeista takai-sinlaskettu
Resilient-moduuli M_r		
keskimääräinen pääjännitys 40 kPa	≥ 80 MPa	
keskimääräinen pääjännitys 100 kPa	≥ 150 MPa	syklinen 3-akselikoe
Sekanttimoduuli, E50	40 MPa	tiivistetty ≥ 15 %

3.2.3 Resilient-moduuli

Resilient-moduulilla eli jäännösmoduulilla kuvataan sitomattomien materiaalien vakiintunutta ja kimmoista muodonmuutoskäyttäytymistä hetkellisten ja toistuvien kuormitusten jälkeen. Resilient-moduuli määritetään kuormituspulssin deviatorisen jännityksen ja sen aiheuttaman suhteellisen muodonmuutoksen suhteena. Tämän perusteella voidaan muodostaa yhtälö

$$M_r = \frac{\Delta\sigma_d}{\Delta\varepsilon_e}, \quad (4)$$

jossa M_r on resilient-moduuli [MPa], $\Delta\sigma_d$ deviatorisen jännityksen eli pystysuuntaisen leikkausjännityksen vaihteluväli ja $\Delta\varepsilon_e$ on palautuva suhteellinen muodonmuutos. (Tielaitos 1997, s. 8-9)

Suomessa valmistetun Foamit-vahtolasimurskeen resilient-moduulin arvot on määritetty kolmiakselikokeilla. Materiaalinvalmistajan ilmoittamat mitoitusarvot on esitetty taulukossa 2. Resilient-moduulia voidaan pitää keskeisenä vaahtolasin muodonmuutosparametrinä etenkin tierakenteiden suunnittelun kannalta, sillä niissä kuormitus on syklistä. Pysyvien deformaatioiden vähentämiseksi vaahtolasimurskeen rakentamisen ja

käytönaikaisen syklisen kuormituksen ylärajaksi suositellaan 75 kPa. (Aabøe et al. 2005).

3.2.4 Viruma

Staattisessa kuormituksessa vaahtolasi käyttäytyy samantyyppisesti kuin muutkin maa- rakennusmateriaalit, kuten esimerkiksi kalliomurske. Sintefin teettämässä ödometriko- keissa vuonna 2004 tutkittiin ruotsalaisvalmisteisen HASOPOR-vahtolasimurskeen pit- kääikaista muodonmuutoskäyttäytymistä eli virumaa pysyvillä kuormilla. Viruma mallin- nettiin 100 vuoden päähän vuorokauden mittaisen kuormitusjakson perusteella, jossa kuormitus oli noin 300 kPa. Koe tehtiin tiivistymiskertoimiltaan erisuuruksille vaahtolasi- kerroksille. Vaahtolasikerroksen tavanomainen tiivistymiskerroin rakenteessa on noin 1,15-1,3. Tiivistymiskerroin on todellisen rakennetilavuuden (m^3_{rtd}) ja irtotilavuuden (m^3_{itd}) suhdeluku. Tiivistämättömän ja löyhän vaahtolasikerroksen tiivistymiskerroin on 1. Mallinnuksen tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3: Mallinnettu viruma HASOPOR-vahtolasimurskeelle 100 vuoden ajalle, kun kuormitus on 300 kPa ja tiivistymiskerroin vaihtelee. (Muokattu lähteestä Aabøe et al. 2005)

Tiivistymiskerroin	1 vuosi	5 vuotta	25 vuotta	100 vuotta
1,25	2,9 %	3,8 %	4,6 %	5,3 %
1,34	2,0 %	2,6 %	3,1 %	3,5 %

Viruman kokonaismäärään vaikuttaa rakenteeseen kohdistuva kuormitus. Staattisen kuormituksen ollessa yli 250 kPa viruman on todettu kasvavan merkittävästi. Esimerkiksi Byggforsk:n (2005) ja Sintef:n (2010) tutkimustulosten perusteella vaahtolasin viruma on kuormitusjaksoilla 0-1 v ja 1-50 v alle 0,1%, kun staattinen kuormitus on noin 80-120 kPa. Kun tätä verrataan taulukon 3 arvoihin, nähdään kuormituksen vaikutus vaahtola- sissa tapahtuvaan virumaan. (Aabøe et al. 2005; Köylijärvi 2014, s. 49; Uusioaines Oy 2015, s. 6)

3.3 Termiset ominaisuudet

Vaahtolasi on huonosti lämpöä johtavaa materiaalia ja tämän perusteella sitä käytetään- kin lämmöneristeenä sekä talon- että maarakentamisessa. Suomessa valmistetun Foamit-vahtolasimurskeen lämmönjohtavuuden arvoja on esitetty taulukossa 1. Vaah-

tolasin lämmönjohtavuus huokoisena materiaalina riippuu sen vesipitoisuudesta. Esimerkiksi kun vaahtolasimurskeen vesipitoisuus on 25 paino-%, on lämmönjohtavuus noin 50% korkeampi täysin kuivaan murskeeseen verrattuna. Näin ollen vaahtolasin lämmönjohtavuuden mitoitusarvoa valittaessa tulee huomioida sen pitkäaikainen vesipitoisuus rakenteessa (Uusioaines Oy 2015, s. 5).

Verrattuna etenkin muihin luonnon maa- ja kiviaineksiin vaahtolasin lämmöneristävyysominaisuudet ovat paremmat, mikä mahdollistaa ohuemat rakennekerrokset saman lämmöneristykseen saavuttamiseksi. Taulukossa 4 on materiaalinvalmistajan likimääräinen vertailu lämmöneristävyyden vastaavuudesta muihin luonnon kiviaineksiin.

Taulukko 4. Foamit-vahtolasimurskeen lämmöneristävyyden kerrosvastaavuuksien arvio luonnon kiviaineksiin nähden. (Uusioaines Oy 2015, s. 5)

	Vaahtolasi- murske	Muut materiaalit		
		Hiekka	Murske / sora	Louhe
Kerros paksuus	0,2 m	0,8 m	0,9 m	1,0 m
	0,25 m	1,0 m	1,1 m	1,25 m
	0,3 m	1,2 m	1,3 m	1,5 m

Materiaalinvalmistajan kokemusten perusteella vaahtolasi kestää hyvin syklistä jäätymis-sulamisrasitusta ilman, että se lisää vaahtolasi- ja murskeiden vedenimua tai vähentäisi niiden puristuslujuutta. Ruotsissa ja Norjassa valmistettuja vaahtolasimurske-tuotteiden jäätymis-sulamiskestävyyttä on testattu standardin EN 12091 mukaisesti. Kokeiden tulosten pohjalta on myös todettu, että jäätymis-sulamiskerasitus ei vaikuta vaahtolasin lujuusominaisuuksiin. (Uusioaines Oy 2015, s. 6; Köylijärvi 2014, s. 51)

3.4 Hydrauliset ominaisuudet

Foamit-vahtolasimurskeen kapillaarinen nousukorkeus on materiaalinvalmistajan mukaan tiivistämättömänä noin 200 mm. Kapillaarinen nousukorkeus on määritetty Foamit-vahtolasimurskeelle standardin SFS-EN 1097-10 (*Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 10: Vedenimeytymiskorkeus*) mukaisesti (Uusioaines Oy 2015, s. 7). Vaahtolasi- ja murskeiden kapillaariset nousukorkeudet voivat poiketa huomattavasti toisistaan. Rakeisissa rakennusmateriaaleissa veden kapillaarista nousukorkeutta ei voida määrittää tarkasti. Materiaalin kapillaarinen nousukorkeus pohjautuu yhtälöön (Hagenhowt 2003, s. 100):

$$h = \frac{2T \cos\theta}{gr\rho_w}, \quad (5)$$

jossa h = veden pinnan korkeusero verrattuna ympäröivään veden pintaan [m]

T = rajapinnan pintajännitys [N/m]

$\cos \theta$ = meniskuksen ja huokosputken seinämän välinen kulma [$^{\circ}$]

g = putoamiskiihtyvyys [m/s^2]

r = huokosputken säde [m]

ρ_w = veden tilavuuspaino [kg/m^3]

Tarkastelemalla yhtälöä 5 voidaan päätellä, että veden kapillaariseen nousukorkeuteen vaahtolasissa sekä muissa huokoisissa rakennusmateriaaleissa vaikuttaa etenkin huokosputkien poikkiala. Mitä suurempi materiaalin kapillaarihuokosten poikkiala, sitä matalampi myös kapillaarinen nousukorkeus, olettaen, että muut olosuhteet pysyvät vakioina.

Huokoisena materiaalina vaahtolasin tilavuuspainoon vaikuttaa merkittävästi sen vesipitoisuus. Tämän vuoksi esimerkiksi rakennekerroksia mitoitettaessa on tärkeä tuntea materiaalin vedenimeytymisominaisuudet. Suomessa valmistetun Foamit-vahtolasimurskeen vedenimeytymistä on testattu standardin EN 12087 (*Thermal insulating products for building applications. Determination of long-term water absorption by immersion*) mukaisesti. Vedenimeytymisen arvot on esitetty taulukossa 1. (Köylijärvi 2014, s. 51; Uusioaines Oy 2015, s. 5)

Vaahtolasin vedenläpäisevyyden on arvioitu vastaavan saman raekoon ja muodon omaavan kiviaineksen läpäisevyyttä. Lisäksi on huomioitava, että myös huokoiset rakeet läpäisevät vettä. Foamit-vahtolasimurskeen valmistaja arvioi esimerkiksi raekooltaan 10/60 vaahtolasimurskan vedenläpäisevyydeksi noin 0,1 m/s. (Uusioaines Oy 2015, s. 7)

3.5 Kemialliset ominaisuudet

Vaahtolasi on keraaminen ja palamaton materiaali, jonka on todettu kestävän tavallisimpia kaduilla sekä teillä esiintyviä kemiallisia aineita. Suomessa valmistettu Foamit-vahtolasimurske on lievästi emäksistä sen pH-arvon ollessa noin 10. Vaahtolasi ei sisällä orgaanisia haitta-aineita tai haihtuvia yhdisteitä, joten keskeisimmät vaahtolasin ympäristö- ja terveysvaikutukset liittyvät epäorgaanisten haitta-aineiden kokonaispitoisuuksiin sekä niiden liukoisuuteen (Ramboll 2013, s. 2). Foamit-vahtolasimurskeen eräitä alkuainepitoisuuksia on esitetty ja verrattu PIMA-kynnysarvoihin taulukossa 5.

Taulukko 5. Foamit-vahtolasimurskeen alkuainepitoisuuksia verrattuna PIMA-kynnysarvoihin ja alempiin ohjearvoihin (VNa 214/2007), joita käytetään maan pilaantuneisuuden arvioinnissa. (Ramboll 2013; VNa 214/2007)

Alkuaine	Foamit ICP-MS määrittäminen	Pitoisuus [mg/kg]	
		PIMA-kynnysarvo	PIMA-asetuksen alempi ohjearvo
Arseeni	3,4 – 13	5	50
Barium	2,6 – 31	-	-
Kadmium	0,2 – 0,46	1	10
Kromi	7,4 – 18	100	200
Kupari	< 10 – 19	100	150
Elohopea	< 0,2	0,5	2
Molybdeeni	< 2 – 4,4	-	-
Nikkeli	4 - 20	50	100
Lyijy	23 - 37	60	200
Antimoni	0,92 - 6,6	2	10
Seleen	< 1	-	-
Sinkki	< 5 - 7,3	200	250

Suomessa vahtolasimurskeen alkuainepitoisuuksille ei ole toistaiseksi asetettu rajoituksia. Taulukossa 5 esitetyt PIMA-asetuksen kynnysarvo ja alempi ohjearvo on tarkoitettu vain maaperän pilaantuneisuuden arviointiin. Taulukosta voidaan huomata, että kaikki vahtolasille määritetyt alkuainepitoisuudet alittavat PIMA-asetuksessa määritetyt alemmat ohjearvot. Lisäksi ainoastaan arseenin ja antimonin kokonaispitoisuudet massayksikköä kohden ylittävät PIMA-kynnysarvot. Kokonaisuudessaan tilavuutta kohden vahtolasin haitta-ainepitoisuudet ovat melko vähäiset, sillä vahtolasimurskeen kuivatilavuuspaino on verrattain pieni (2,2 – 2,8 kN/m³). (Ramboll 2013, s. 2-3; Köylijärvi 2014, s. 53-54)

Taulukossa 6 on esitetty Foamit-vahtolasimurskeen alkuaineiden liukoisuusmäärittämisen tuloksia sekä MARA-asetuksessa (VNa 843/2017) ilmoitettuja haitallisten alkuaineiden liukoisuuden raja-arvoja. Foamit-vahtolasimurskeen alkuaineiden liukoisuudet on määritetty kaksivaiheisella ravistelutestillä standardin SFS-EN 12457-3 mukaisesti (Köy-

lijärvi 2014, s. 54). MARA-asetuksessa määritetyt raja-arvot vaihtelevat riippuen maarakentamiskohteesta ja siitä, peitetäänkö vai päällystetäänkö MARA-asetuksen mukaan hyödynnettävä jätemateriaali (VNa 843/2017).

Taulukko 6. Vertailu Foamit-vahtolasimurskeen sekä MARA-asetuksessa määriteltyjen tiettyjen alkuaineiden liukoisuuksien raja-arvojen välillä kaksivaiheisessa ravistelutetissä. (Ramboll 2013; VNa 843/2017)

Liukoisuus (mg/kg LS 10 l/kg)

Alkuaine	Foamit	Väylä: jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5 m		Kenttä: jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5 m		Valli: jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5 m	Teollisuus- ja varastorakennuksen pohjarakenne: jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5 m	Tuhkamursketie: jätteen kerrospaksuus ≤ 1,5 m
		Peitetty	Päällystetty	Peitetty	Päällystetty	Peitetty		
Arseeni	0,75 - 2,6	1	2	0,5	1,5	0,5	2	2
Barium	0,11 - 0,39	40	100	20	60	20	100	80
Kadmium	< 0,02	0,04	0,06	0,04	0,06	0,04	0,06	0,06
Kromi	< 0,02 - 0,048	2	10	0,5	5	1	10	5
Kupari	< 0,02 - 0,12	10	10	2	10	10	10	10
Elohopea	< 0,003 - 0,003	0,03	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03
Molybdeeni	0,044 - 0,12	1,5	6	0,5	6	1	6	2
Nikkeli	< 0,02 - 0,09	2	2	0,4	1,2	1,2	2	2
Lyijy	0,036 - 0,057	0,5	2	0,5	2	0,5	2	1
Antimoni	0,43 - 1,9	0,7	0,7	0,3	0,7	0,7	0,7	0,7
Seleeni	< 0,02 - 0,043	1	1	0,4	1	1	1	1
Sinkki	< 0,02	15	15	4	12	15	15	15

Taulukosta 6 nähdään, että vahtolasimurskeen liukoisuuden määrät ylittävät MARA-asetuksen raja-arvot ainoastaan arseenin ja antimonin osalta. Rambollin tekemässä kulkeutumisriskiselvityksessä todettiin, että Foamit-vahtolasimurskeen kriittisimmät haitta-aineet ovat arseeni ja antimoni, joiden kulkeutuminen voi tapahtua vain veteen liuenneena. Selvityksen mukaan vahtolasimurskeen haitta-aineiden liukeneminen ei muodosta merkittävää pohjaveden pilaantumisriskiä. (Ramboll 2013, s. 16)

4. VAAHTOLASIN KÄYTTÖKOHTEET INFRARAKENTAMISESSA

4.1 Vaahtolasikerroksen rakentaminen

4.1.1 Rakentamisen suunnittelu

Vaahtolasirakenteita suunniteltaessa tehdään geotekninen vakavuus-, painuma-, noste-, routa- ja kantavuusmitoitus tarpeenmukaisessa laajuudessa. Ennen rakentamisen aloittamista laaditaan rakentamisen aikainen työ- ja laaduntarkkailusuunnitelma. Työ- ja laaduntarkkailusuunnitelmassa tulee olla vähintään esitettyä mm. työjärjestys, työtä estävät sekä rajoittavat rakenteet ja niiden suojaaminen, työtapa, tiivistäminen, tarkkailumittaukset sekä työturvallisuuteen liittyvät seikat rakentamisen aikana. Suomessa valmistetun Foamit-vahtolasimurskeen suunniteltu käyttöikä vaatimuksien mukaisesti toteutetussa rakenteessa on vähintään 50 vuotta. (Uusioaines Oy 2015, s. 15)

4.1.2 Asentaminen ja tiivistys

Vaahtolasimurskeen käsittely on rakennustyön aikana verrattain helppoa. Rakeet ovat muodoltaan kulmikkaita ja ne pyöristyvät kuljetettaessa, levitettäessä ja tiivistettäessä. Rakennuskohteessa vaahtolasimurskeen levitetään tavallisesti joko kaivinkoneella tai puskutraktorilla kasasta. Vaahtolasimursketta levitettäessä on huomioitava, että vaahtolasimurskeen seassa ei saa olla luonnonmateriaaleja ja sen sekoittuminen muiden maakerrosten kanssa tulee estää. Vaahtolasikerros täytyy erottaa suodatinkankaalla muista maakerroksista. Normaalisti vaahtolasikerroksen erottamiseen käytettävä suodatinkangas on luokaltaan N3. (Uusioaines Oy 2012, s. 14)

Kerralla levitettävän kerroksen paksuus riippuu pääosin käytettävästä esitiivistyskalustosta. Maksimipaksuudeksi on Foamit-vahtolasimurskeen suunnitteluohjeessa ohjeistettu 0,6 m, jolloin tiivistyksessä on käytettävä raskasta telakonetta, jonka pohjapaine on 30-50 kPa. Tärylevyllä (150-200 kg) tiivistettäessä kerrospaksuuden tulee olla suunnitteluohjeen mukaan alle 0,4 m. Levitetyn kerroksen yliajokertojen määrä on vähintään 2,

mutta esimerkiksi telakalustolla esitiivistettäessä kerroksen voidaan katsoa olevan riittävän tiivis, kun levitetyn kerroksen pinta on tasainen, eikä siinä ole telojen muodostamia jälkiä, kuten kuvassa 4 nähdään. (Uusioaines 2015, s. 15; Köylijärvi 2014, s. 22)



Kuva 4. Esitiivistystä tehdään telakalustolla. Vaahtolasikerros ei ole riittävän tiivis, sillä yliajoista jää vielä telan jälkiä. (Kuisma 2013, s. 7)

Rakenteen lopullinen tiivistys tehdään täryvalssijyrällä, jolloin vaahtolasimurskerakenteen ja jyrän välissä tulee olla paksuudeltaan noin 150-200 mm kalliomurskekerros. Täryjyrällä tehtävällä varsinaisella tiivistyksellä voidaan vähentää rakenteen pysyviä muodonmuutoksia sekä varmistua riittävästä kuormituskestävyydestä. Foamit-vahtolasimurskeen suunnitteluohjeen mukaan täryvalssijyrällä tehtävien ylityskertojen määrä tulisi olla vähintään 4 ja ylimääräistä tiivistämistä tulisi välttää vaahtolasimurskeen liiallisen hienonemisen estämiseksi. Vaahtolasimurskeen tiivistyminen ei ole riippuvainen vesipitoisuudesta, joten vaahtolasimurskekerros voidaan tiivistää sekä kuivana että kosteana. Tiivistämisen yhteydessä tapahtuva kokoonpuristuma riippuu kerrospaksuudesta, ja esimerkiksi ohuimmissa rakennepaksuuksissa kokoonpuristuma voi olla noin 20-30%. Tiivistämisestä aiheutuva kokoonpuristuma on tärkeä ottaa huomioon jo mursketta levitetäessä. (Uusioaines Oy 2015, s. 16; Köylijärvi 2014, s. 23)

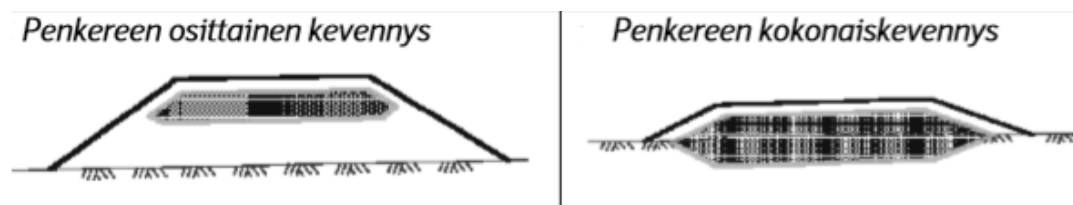
4.2 Kevennysrakenteet

Rakennettaessa pehmeikölle maan kantavuus ja lujuusominaisuudet saatetaan ylittää, mikä voi heikentää rakenteen pitkäaikaistoimivuutta isojen painumien tai maan vakavuuden heikkenemisen takia. Pehmeikköalueilla kantokykyä voidaan parantaa joko pohjavahvistuksilla johtamalla kuormat kantavaan maahan tai keventämällä rakenteesta aiheutuvaa kuormaa esimerkiksi korvaamalla tilavuuspainoltaan raskaampaa maa-ainesta. Kevennysrakenteita sovelletaan useisiin eri käyttökohteisiin, kuten tiepenkereisiin, sillan tulopenkereisiin, meluvalleihin, siirtymärakenteisiin sekä putkilinjakaivantojen täyttöihin. (Liikennevirasto 2011 a, s. 10)

Vaahtolasimurske on tilavuuspainoltaan verrattain kevyttä. Esimerkiksi Foamit-vahtolasimurskeen tilavuuspaino on vedenpinnan yläpuolella noin 15% tavanomaisesti käytettyjen maa- ja kiviaineksien tilavuuspainosta. Näin ollen vaahtolasimurskeen soveltuvuus kevennysmateriaaliksi on hyvä, sillä se pienentää rakenteen aiheuttamaa kokonaiskuormaa. (Uusioaines Oy 2015, s. 5). Kevennysrakenteen mitoituksen yhteydessä on huomioitava suunniteltavan kohteen erityispiirteet sekä niiden mahdolliset vaikutukset rakenteen mitoitukseen. Kevennyksen mitoituksessa tarkastellaan etenkin maaperän ja maarakenteen stabiliteettia, painumia, maanpainetta, nostevoimaa ja päällysrakenteen kantavuusominaisuuksia. (Liikennevirasto 2011 a, s. 14; Uusioaines Oy 2015, s. 12)

Kevennysrakenteen laajuus ja paksuus määritetään vakavuustarkasteluiden perusteella, jotta varmuus rakenteen sortumista vastaan saadaan riittäväksi. Kevennysrakenteen vakavuus eli stabiliteetti mitoitetaan Eurokoodi 7:n sekä liikenne- ja viestintäministeriön kansallisen liitteen soveltamisohjeen (NCCI 7) mukaisesti. (Liikennevirasto 2011 a, s. 15)

Painumat arvioidaan ja kevennysrakenteen mitoitus geoteknisillä laskelmilla, jossa on huomioitu kohteen maaperän tiedot ja kohdistuvat kuormat. Kevennysmitoituksessa rakennetta mitoitetaan, joko kokonaiskevennykselle tai osittaiselle kevennykselle. Kuvassa 4 on kokonais- ja osittaiskevennyksien poikkileikkauksia esimerkkipenkereessä.



Kuva 5. Penkereen osittainen- ja kokonaiskevennys. (Muokattu lähteestä Liikennevirasto 2011 a, s. 11)

Kokonaiskevennyksessä mitoitettava kevennysrakenne ei muodosta lisäkuormaa tai on kuormitukseltaan pienempi kuin aikaisempi kuormitus. Osittaisessa kevennyksessä kevennysrakenne mitoitetaan tavoitepainumalle. Merkitsevimmät painumalajit kevennysrakenteiden mitoituksessa ovat konsolidaatio- ja jälkipainuma. (Liikennevirasto 2011 a, s. 15)

Kevennysrakenteelle tehdään myös nostemitoitus, jos veden nousemista rakenteeseen pidetään mahdollisena. Nostemitoituksessa käytetään materiaalikohtaisia tilavuuspainoja. Esimerkiksi Foamit-vahtolasimurskeen nostemitoituksessa käytettävä tilavuuspaino on valmistajan mukaan (taulukko 1) noin 3 kN/m². Kevennysrakenteen nostemitoitus toteutetaan Eurokoodi 7:n ja LVM:n kansallisen liitteen soveltamisohjeen (NCCI 7) mukaisesti. (Liikennevirasto 2011 a, s. 16)

4.3 Routaeristys

Ilman keskilämpötilan laskiessa alle 0 °C pitkäksi aikaa maa alkaa jäätyä eli routaantua. Routimisilmiöllä tarkoitetaan routaantumisen yhteydessä tapahtuvaa prosessia, jossa routarajalle imeytyy alemmista maakerroksista vettä, joka jäätyy aiheuttaen nk. routanousua. Maan jäätyä lisäksi routiminen edellyttää routivaa maalajia, vettä ja jäälinssin kasvupainetta pienempää yläpuolista kuormitusta. Routiminen aiheuttaa rakennetulle ympäristölle ja sen käyttäjille haittoja mm. epätasaisen routanousun sekä sen sulamisajan aiheuttaman maan pehmenemisen muodossa. (Liikennevirasto 2015, s. 10) Routasuojuuksen ja -eristyksen periaatteena on pysäyttää routarajan tunkeutuminen rakennekerroksien alapuolelle, mahdollisesti routivaan perusmaahan. (Köylijärvi 2014, s. 28)

Kuten kappaleessa 3.3 todettiin, vahtolasimurske on hyvin lämpöä eristävä, routimaton materiaali, jonka ominaisuudet pysyvät lähes muuttumattomina syklisessä jäätymis-sulamisrasituksessa. Etenkin nämä ominaisuudet tekevät vahtolasimurskeesta hyvän routaeristeen kentille, pihuille sekä katu- ja tierakenteisiin, joissa routa on merkittävin kuormitustekijä Suomessa. Vahtolasimurskeen hyvä lämmöneristyskyky mahdollistaa routivan perusmaan alueella huomattavasti ohuemmat rakennekerrokset, kuten taulukossa 4 tehdyn vertailun perusteella voidaan huomata. Rakenteiden toteutuksen kannalta tämä merkitsee usein myös pienempiä kaivumääriä, pienempiä maa-ainesmääriä, nopeampaa rakentamista sekä tapauskohtaisesti matalampia rakentamiskustannuksia. Vahtolasimurskeella toteutettavilla routaeristerakenteilla on myös selkeitä vahvuuksia verrattuna esimerkiksi tavanomaisesti käytettyihin eristelevyihin. Näitä ovat muun mu-

assa vaahtolasilla toteutetun routaeristeen kestävyys maan muodonmuutoksista huolimatta sekä vaahtolasin verrattain helppo asennettavuus, sillä kerroksen rakentaminen ei vaadi tasaista asennuspintaa, kuten levymäiset lämmöneristeet. (Uusioaines Oy 2015, s. 10)

Maarakentamisen kannalta vaahtolasimurskeen positiivisimpia materiaaliominaisuuksia on mahdollista tehostaa rakentamista toteuttamalla rakenteita, jossa vaahtolasikerros palvelee useampaa käyttötarkoitusta samanaikaisesti. Tällainen ratkaisu on esimerkiksi vaahtolasimurskeen käyttö putkijohtokaivannon täyttömateriaalina, jolloin vaahtolasin toimii kevennysrakenteena sekä routaeristeenä samanaikaisesti, jolloin putkilinjojen paikoittaisia painumia sekä routanousuja voidaan vähentää.

4.4 Taustatäyttö

Rakenteissa, joissa taustoja täytetään täyttömateriaalin luontaista maksimikaltevuutta (kitkakulmaa) jyrkemmäksi, tulee huomioida maanpaine. Maanpaine kohdistuu rakenteessa maan ja rakenteen rajapintaan, jossa se pyrkii työntämään rakennetta sivulle. Maanpaineelle mitoitettavia rakenteita ovat muun muassa ponttiseinät, tukimuurit, siltojen taustatäytöt, perustukset ja maatuet. Kevyen tilavuuspainon ja verrattain suuren kitkakulman ansiosta vaahtolasimurske muodostaa lähtökohtaisesti huomattavasti pienemmän maanpaineen kuin luonnon maa- tai kiviaineksella toteutettu taustatäyttö. Pienempi maanpaine mahdollistaa rakenteen optimoinnin. (Uusioaines Oy 2015, s. 9; Leca Finland Oy 2016, s. 15) On kuitenkin myös huomioitava, että vaahtolasimurskeen kitkakulmaan vaikuttaa oleellisesti siihen kohdistuva kuormitus. Esimerkiksi isolla hyötykuormilla sekä päälle asennettavan maakerroksen kuormituksella on maanpainetta lisäävä vaikutus. Lisäksi maanpainemitoituksessa laskettavaan maanpaineen suuruuteen vaikuttavat tukimuurirakenteen taustalla olevan maa-aineksen laatu ja tukimuurirakenteen teoreettisesti määrätty liike. Tukirakenteen liikkeiden perusteella määritetään, tarkastellaanko mitoituksessa aktiivi- ja passiivipainetta vai lepopainetta. Väyläviraston rakennuttamissa hankkeissa rakenteeseen kohdistuva maanpaine lasketaan eurokoodi 7:n ja LVM:n soveltamisohjeen (NCCI 7) mukaisesti. (SFS-EN 1997-1; Liikennevirasto 2011 a; Liikennevirasto 2011 b).

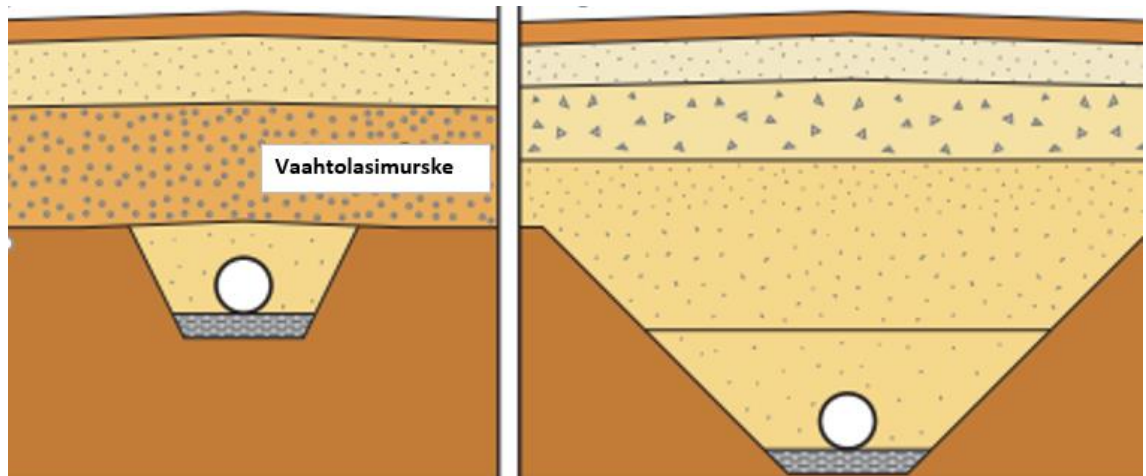


Kuva 6. Vaahtolasia käytetään kuvassa ponttiseinän taustatäyttönä. (Foamit.fi 2020)

4.5 Kuivatusrakenteet

Vaahtolasimurskeen hydrauliset ominaisuudet, kuten verrattain pieni kapillaarinen nousukorkeus sekä hyvä vedenläpäisevyys (0,1 m/s) mahdollistavat sen käytön erilaisissa kuivatuskerroksissa. Vaahtolasimurskeen käyttöä kuivatuskerroksessa voi rajoittaa puristuslujuus. Tapauskohtaisesti on tarkasteltava vaahtolasimurskan puristuslujuuden riittävyyttä suhteessa rakenteeseen kohdistuvaan kuormitukseen. (Köylijärvi 2014, s. 30)

Kun vaahtolasimurskettä käytetään routaeristeenä, voidaan normaalisti routaeristekerroksen alle rakennettava kuivatuskerros korvata täysin paksuntamalla vaahtolasikerrosta. (Uusioaines Oy 2015, s. 10) Työmaatekniikan kannalta tämä suoraviivaistaa rakentamista. Kuvassa 7 havainnollistetaan periaateratkaisun avulla, miten vaahtolasimurskeen käyttö voi nopeuttaa ja suoraviivaistaa rakentamista esimerkiksi putkikaivannoissa. Kuvassa 7 vasemmalla esitetyssä rakenteessa vaahtolasimurske toimii samanaikaisesti kuivatuskerroksena, kevennyksenä sekä routaeristeenä, madaltaen kaivantoa ja yksinkertaistaen rakennetta.



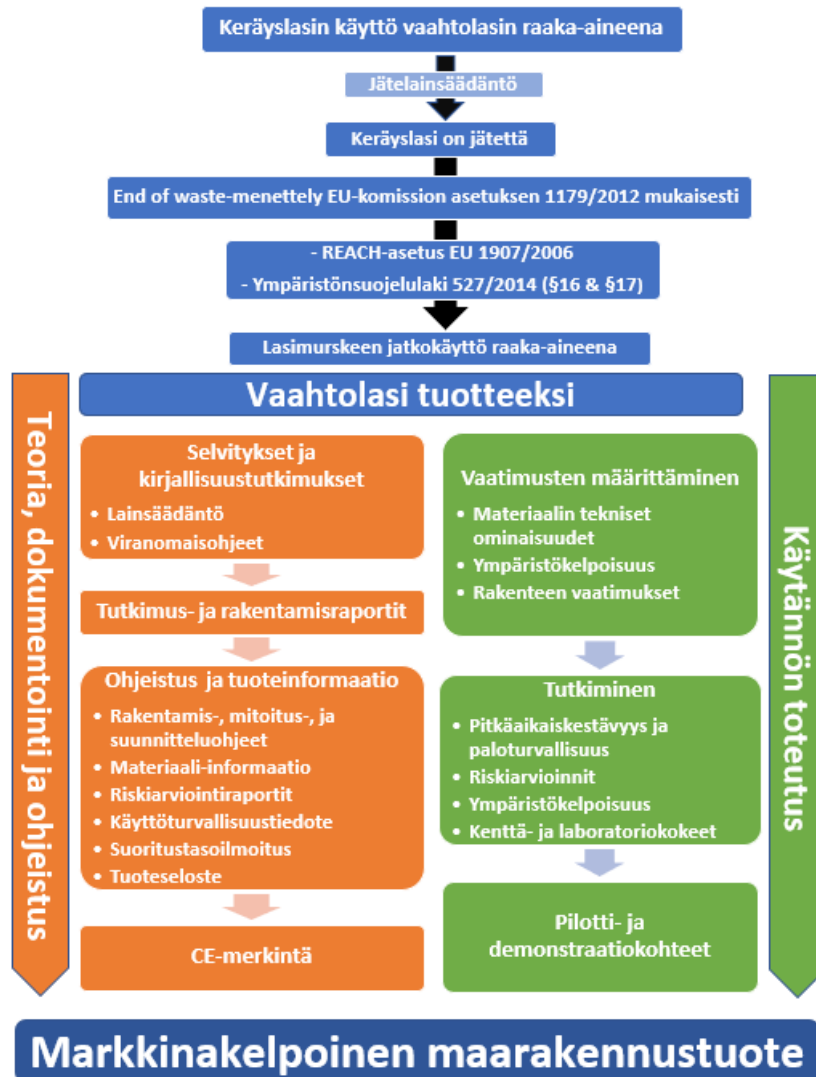
Kuva 7. Vasemmalla on esitetty putkikaivanto, jossa on käytetty vaahtolasimurskettä kevennyksenä, kuivatuksena sekä routaeristeenä. Oikealla on esitetty tavanomainen ratkaisu, jossa putki on asennettu roudattomaan syvyyteen (1,8 - 2,5 m). (Muokattu lähteestä Leca Finland Oy 2016, s. 13)

5. TUOTTEISTAMINEN

Tuotteistaminen määrittää palvelun tai tuotteen vakioimiseksi, jolloin tuote on valmistukseltaan, laadultaan ja käytöltään toistuvasti samanlainen. Tuotteistamisen tavoitteena on synnyttää uusi markkinakelpoinen tuote sekä saattaa se markkinoille.

5.1 Vaahtolasimurskeen tuotteistamisprosessin eteneminen

Kuvassa 8 on esitetty vaahtolasimurskeen tuotteistamisprosessin eteneminen. Tuotteistaminen on aikaa ja resursseja vievä prosessi. Tämän vuoksi ennen tuotteistamis päätöksen tekemistä on suositeltavaa arvioida huolella etenkin tuotteen mahdollisia käyttökohteita, kysyntää, markkina-asemaa ja tuotteen valmistamisen edellytyksiä. Arvioinnin



Kuva 8. Foamit-vaahtolasimurskeen tuotteistamisprosessin vaiheet hahmoteltuna. (UUMA 2, s. 4-22; Pekkala 2017)

perusteella pystytään paremmin tarkastelemaan, onko tuotteistamisprosessin aloittaminen taloudellisesti kannattavaa ja pienentämään tuotteistamisen epäonnistumiseen liittyvää riskiä. Mikäli tuotteistaminen vaikuttaa arvioinnin perusteella kannattavalta sekä vaatimustenmukaisen tuotteen valmistaminen on teknisesti mahdollista, päädytään tuotteistamisprosessin aloittamiseen. (UUMA 2 2016, s. 3 & 20)

Useimmissa tapauksissa uusiomateriaalin tuotteistamisen alkutilanteessa materiaalinvalmistajalla on saatavilla merkittäviä määriä tuotteistettavaa uusiomateriaalia. EU:n sekä Suomen jätelainsäädännön mukaan materiaalit ja tavarat luokitellaan joko tuotteeksi tai jätteeksi. EU:n jätedirektiivi, ja näin ollen myös Suomen jätelainsäädäntö sisältää nk. End of Waste-kriteerit, joiden täytyessä aiemmin jätteeksi luokitellun materiaalin jätestatus voidaan poistaa. Mikäli uusiomateriaalin jätestatus poistetaan EoW-kriteerien täytyessä, sovelletaan sen tuotantoon ja käyttöön kemikaalilainsäädäntöä sekä REACH-asetusta (UUMA 2 2016, s. 4). Vaahtolasimurskeen pääraaka-aine on keräyslasi, ja esimerkiksi Suomessa Foamit-vahtolasimursketta valmistavalla Uusioaines Oy:lla on hyvät edellytykset keräyslasin hankintaan yrityksen lasinkierrätystoiminnan pohjalta. Vaahtolasimurskeen pääraaka-aineena lasimurske täyttää EU:n komission asetuksessa 1179/2012 määritetyt kriteerit. Näin ollen vaahtolasimurskeen valmistuksessa käytettävän lasimurskeen jätestatus on mahdollista poistaa, jolloin sen käyttö maarakentamisessa ei tarvitse ympäristölupaa.

Tuotteistamisprosessin lähtökohtana ovat tuotteen tekniset vaatimukset ja toimivuusvaatimukset. Foamit-vahtolasimurskeen tuotteistamisessa vaatimusten perustana olivat Suomen lainsäädäntö, viranomaisten ohjeet, eurooppalainen standardisointi sekä käyttökohteiden eli rakenteiden asettamat vaatimukset (Pekkala 2017). Jotta tuotteen ominaisuuksien kelpoisuudesta sovellettavaan käyttökohteeseen voidaan varmistua, tulee tuotetta testata. Foamit-vahtolasimurskeelle tehtyjä tuotetestauksia olivat sen teknisten ominaisuuksien testaaminen standardin SFS-EN 13055-2:2004 (Kevytkiviainekset sidottuihin ja sitomattomiin käyttötarkoituksiin) mukaisesti. Testattavia ominaisuuksia olivat esimerkiksi tiheys, kiviaineksen raekoko ja rakeisuus. Teknisten ominaisuuksien lisäksi uusiomateriaalin ympäristökelpoisuus tulee osoittaa nk. perusmäärittelytutkimuksilla. Perusmäärittelytutkimuksilla määritellään ne ominaisuudet, joilla taataan materiaalin pitkäaikaisen käytön ja sijoittamisen turvallisuus (UUMA 2 2016, s. 41).

Jotta tuotteen rakentamista, kuljetusta sekä tuotantoa pystyttäisiin testaamaan käytännössä, voidaan tuotteella suorittaa koerakentamista. Onnistuneen koerakentamisen jälkeen tuotteen toimivuutta voidaan tuoda esille pilottikohteissa ja demonstraatiokohteissa. Tehtyjen selvitysten, kokeiden ja koerakentamisen pohjalta voidaan laatia tuotteen käytettävyyttä sekä markkinointia edistäviä dokumentteja. (UUMA 2 2016, s. 16)

Tällaisia dokumentteja ovat esimerkiksi materiaalinvalmistajan laatimat erilaiset mitoitus-, rakennus- ja suunnitteluohjeet.

5.2 CE-merkintä ja siihen liittyvät menettelyt

Euroopan unionin rakennustuoteasteuksen mukaan CE-merkintä tulee liittää kaikkiin markkinoille saatettaviin rakennustuotteisiin, jotka kuuluvat harmonisoitujen tuotestandardien piiriin (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus 305/2011; Ympäristöministeriö 2011, s. 24-26). CE-merkintä osoittaa, että valmistaja noudattaa tuotestandardin edellyttämää laadunvalvontajärjestelmää sekä ilmoittaa tuotteesta tietyt standardin mukaiset ominaisuudet. Rakennustuoteasetuksen mukaan rakennustuotteen laadunvalvonnan varmentamisessa käytetään ilmoitettua laitosta, silloin kun tuotteen käyttökohteelle on merkittäviä mekaanisen kestävyuden ja turvallisuuden vaatimuksia. Varmentamisjärjestelmän tasoa kuvataan AVCP-luokituksella (Assessment of Verification of Constancy of Performance). Kiviainestuotteiden AVCP-luokka voi olla 4 tai 2+. Foamitvaahtolasimurskeen suoritustason pysyvyyden arvioinnissa ja varmentamisessa käytetään AVCP-järjestelmää 2+ (Uusioaines Oy 2015, s. 17). Käytännössä tämä tarkoittaa, että ilmoitettu laitos eli arviointilaitos arvioi tuotannon laadunvalvontaa (Euroopan komissio, s. 8).

Tuotteelle tehdään EU:n rakennustuoteasetuksen 305/2011 liitteen 3 mukainen suoritus-tasoilmoitus hyväksytyjen testitulosten sekä muiden vaadittujen selvitysten pohjalta. Suoritus-tasoilmoituksessa esitetään tiedot tuotteen CE-merkinnässä käytetyn harmoni-soidun tuotestandardin liitteen ZA mukaisista ominaisuuksista. Suoritus-tasoilmoitus toi-mitetaan asiakkaalle. Esimerkiksi Foamit-vaahtolasimurskeen suoritus-tasoilmoitus on la-dattavissa materiaalinvalmistajan verkkosivuilta. Tehdyn suoritus-tasoilmoituksen perus-teella voidaan tuotteelle laatia CE-merkintä. CE-merkinnässä ilmoitettavat tiedot on mää-riteltä tarkemmin käyttötarkoituksen perusteella standardin liitteessä ZA. Keräyslasista valmistettavalle vaahtolasimurskeelle tulee luoda käyttöturvallisuusseloste, sillä tuotteen pääraaka-aine on käynyt läpi EoW-prosessin (End of Waste) ja kuuluu näin ollen REACH-asetuksen piiriin. (UUMA 2 2016, s. 5-7)

6. YHTEENVETO

Vaahtolasimurske on keräyslasista valmistettua huokoista, kevyttä ja karkearakeista materiaalia. Tässä kandidaatintyössä selvitettiin vaahtolasimurskeen valmistusprosessin vaiheita sekä vaahtolasimurskeen keskeisimpiä materiaaliominaisuuksia. Työssä tutustuttiin myös vaahtolasimurskeen yleisimpiin käyttökohteisiin infrarakentamisessa, jonka lisäksi tarkasteltiin vaahtolasimurskeen tuotteistamisprosessin vaiheita. Tämä työ toteutettiin kirjallisuustutkimuksena.

Suomessa valmistettava Foamit-vaahtolasimurskeen pääraaka-aine on keräyslasi, josta on poistettu lajitteluprosessin aikana mahdolliset epäpuhtaudet. Keräyslasi murskataan ja jauhetaan lasijauheeksi. Lasijauheen sekaan lisätään vaahdotusagentti, jonka jälkeen sekoitus kuumennetaan tunneliuunissa. Kuumennettaessa lasijauhe muuttuu viskoosiksi nesteeksi ja sekoitettu vaahdotusagentti alkaa muodostamaan kaasua aiheuttaen massan laajenemisen ja huokoistumisen. Jäähtyessään vaahdotettu sekoitus halkeilee lämpöjännityksien vaikutuksesta 10-60 mm kokoisiksi rakeiksi.

Kuiva vaahtolasimurske on tilavuuspainoltaan kevyttä verrattuna maarakentamisessa käytettyihin luonnon maa- ja kiviaineksiin. Vaahtolasimurskeen leikkauskestävyyskulma eli kitkakulma on varsin suuri, mutta se vaihtelee hyvin voimakkaasti riippuen jännitystilasta. Suuren kitkakulman ansiosta vaahtolasimurskeen lujuusominaisuudet ovat maarakentamisen kannalta hyvät. Toisaalta vaahtolasi on verrattain haurasta ja se saattaa murskautua sekä hienontua raskaassa ja sykklisessä kuormituksessa. Kuivan vaahtolasimurskeen lämmönjohtavuus on pieni, mutta sen lämmönjohtavuuteen vaikuttaa huokoisena materiaalina sen vesipitoisuus. Vesipitoisuus vaikuttaa myös voimakkaasti vaahtolasimurskeen tilavuuspainoon. Vaahtolasimurske on ympäristölleen vaaratonta ja sen haitta-ainepitoisuudet ovat tilavuuteen suhteutettuna pieniä.

Vaahtolasimursketta sovelletaan lähtökohtaisesti kevennysmateriaaliksi useissa eri käyttökohteissa. Kevennysrakenteen lisäksi vaahtolasimursketta voidaan käyttää myös materiaaliominaisuuksiensa puolesta routaeristeenä, taustatäyttönä sekä kuivatusrakenteena. Yleensä vaahtolasimursketta käytetään useampaan kuin yhteen käyttötarkoitukseen samanaikaisesti, jolloin vaahtolasimurskeen hyödyllisten ominaisuuksien käyttö tehostuu. Suomessa vaahtolasirakenteiden suunnittelu ja rakentaminen tapahtuu pitkälti materiaalinvalmistajan laatimien rakennus- ja suunnitteluohjeiden pohjalta.

Keräyslasista valmistettavan vaahtolasimurskeen tuotteistamisprosessi alkaa pääraaka-aineena toimivan keräyslasin jätestatuksen poistamisella End of Waste -kriteerien täytyessä. Tällöin vaahtolasimurskeen valmistukseen ja käyttöön sovelletaan kemikaalilainsäädäntöä sekä REACH-asetusta. Tuotteistamisprosessissa lähtökohtana on tuotteen tekniset- sekä toimivuusvaatimukset, joita tuotteelle asettavat lukuisat eri tahot. EU:n rakennustuoteasetuksen mukaan kaikki rakennustuotteet, jotka ovat harmonisoidun tuotestandardin piirissä tulee CE-merkitä ennen markkinoille viemistä. Suomessa valmistetun Foamit-vaahtolasimurskeen CE-merkinnässä käytetään standardia SFS 13055-2:2004 (kevytkiviainekset sidottuihin ja sitomattomiin käyttötarkoituksiin). Tuotteistamisprosessiin kuuluu dokumentaatiota. Osa tuotetuista dokumenteista on lakisääteisiä, mutta dokumentteja laaditaan myös markkinoinnin tarkoituksiin sekä ohjeistuksena tuotteen loppukäyttäjille ja ostajille. Tuotteistamisprosessin tavoitteena on saattaa markkinoille markkinakelpoinen ja kilpailukykyinen tuote.

Suomessa vaahtolasimurskeen käyttö saattaa kasvaa maltillisesti tulevaisuudessa. Tätä voidaan perustella yhteiskunnallisella paineella, joka liittyy raaka-aineiden kestävään kulutukseen. Lisäksi vaahtolasimurske on tullut markkinoille Suomessa vasta vuonna 2011 ja sitä voidaan pitää verrattain uutena maarakennusmateriaalina. Näin ollen on vaikeaa arvioida, onko vaahtolasimurskeen markkina-asema vielä täysin vakiintunut Suomessa, vai tuleeko sen suosio kasvamaan jatkossa referenssikohteiden lisääntyessä.

LÄHTEET

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). Granulated Foamed Glass for Civil Engineering Applications. 2005.

Belt, J. (1997). Sitomattomien kerrosten ja alusrakenteen jäännösmoduulit ja deformaation. Tielaitoksen sisäisiä julkaisuja. Tielaitos. Helsinki. 51 s. + liit. 14 s. Saatavissa (Viitattu 19.3.2020): https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/171127/4000173-sitomattomien_kerosten_ja_alusrak_jaannosmod_ja_deform.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Euroopan komissio. (2020). Rakennustuotteiden CE-merkintä vaihe vaiheelta. 22 s. Saatavissa (viitattu 2.4.2020): <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/12322/attachments/1/translations/fi/renditions/native>

Euroopan komission asetus 1179/2012. (2012). Saatavissa (Viitattu 1.4.2020): <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:337:0031:0036:FI:PDF>

Euroopan parlamentin neuvoston asetus 305/2011. Saatavissa: (Viitattu 30.3.2020): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011R0305&from=FI>

Foamit.fi. (2020) Verkkosivut. Saatavissa (viitattu 30.3.2020): <https://foamit.fi/category/referenssit/>

Hagentoft, C. (2003). Introduction to Building Physics. Lund, Ruotsi: Studentlitteratur AB, 422 s.

Hibbeler R. C. (2014). Mechanics of materials. 9th edition. Pearson, 2013. 912 p. ISBN 978-0133254426.

Kolb, D. & Kolb, K.E. (1979). The chemistry of glass. Journal of chemical education, 56(9), pp. 604. ISSN 0021-9584

Kuisma, H. (2013). Vaahtolasimurskeen hyödyntäminen kevennysrakenteissa ja routaeristeenä kaupunkiympäristössä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 84 s. + liit. 6 s. (Viitattu 26.3.2020)

Köylijärvi, E. (2014). Vaahtolasimurskeen käyttö maa- ja pohjarakentamisessa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 90 s. + liit 25 s.

Leca Finland Oy. (2016). Leca-sora infrarakentamisessa, suunnittelu ja rakentaminen. 27 s. Saatavissa (Viitattu 1.4.2020): [https://leca.fi/sites/default/files/2-11-Leca-sora-inf-rarakentamisessa-04%20\(1\).pdf](https://leca.fi/sites/default/files/2-11-Leca-sora-inf-rarakentamisessa-04%20(1).pdf)

Lehtonen V. (2017). RAK -22110: Maan lujuus. Luentomateriaali. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere. 38 s. Saatavissa (viitattu 16.3.2020): <https://moodle.tuni.fi/> > RAK-22110 > Aineistot > Luento: Maan lujuus

Liikennevirasto. (2011 a). Kevennysrakenteiden suunnittelu, Tien pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. 05/2011 Liikenneviraston ohjeita. Helsinki 2011, Liikennevirasto. 44 s. + liit. 1 s. Saatavissa (Viitattu 1.4.2020): https://julkaisut.vayla.fi/pdf3/lo_2011-05_kevennysrakenteiden_suunnittelu_web.pdf

Liikennevirasto. (2011 b). Eurokoodin soveltamisohje, Geotekninen suunnittelu - NCCI 7, Siltojen ja pohjarakenteiden suunnitteluohjeet. 12/2011 Liikenneviraston ohjeita. Helsinki 2011, Liikennevirasto. 133 s. Saatavissa (Viitattu 15.3.2020): https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lo_2017-13_ncci7_web.pdf

Liikennevirasto. (2015). Routa ja routiminen ratarakenteissa. 22/2015 Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä. Helsinki 2015, Liikennevirasto. 210s. + liit. 10 s. Saatavissa (Viitattu 1.4.2020): https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2015-22_routa_routiminen_web.pdf

Niemelä M. (2014). Rifolasi – innovaatioita kierrätyslasista. Hämeenlinna 2014, Hämeen ammattikorkeakoulu. 145 s. ISBN 978-951-784-664-6.

Pajukallio, M. et al. (2011). Maarakentamisen uusimateriaalit: Ympäristökelpoisuuden osoittaminen ja tuotteistaminen. 11/2011. Ympäristöministeriön raportteja. Helsinki 2011, Ympäristöministeriö. 93 s. + liit. 13 s. ISBN 978-952-11-3862-1. Saatavissa (Viitattu 15.3.2020): <http://www.ym.fi/download/noname/%7B13DE6161-BF77-4AC5-98E3-7C73F9380A2C%7D/32052>

Parkkali J. (2017). Uusioaines Oy yritysesitys. Hämeenlinnan ammattikorkeakoulu, 28.11.2017. Hämeenlinna. Saatavissa: <https://www.hamk.fi/wp-content/uploads/2018/07/Parkkali-Jussi.pdf>

Pekkala, J. (2017). Tuotteistaminen: Vaahtolasimurske. Seminaariesitys. Tampereen yliopisto 2018. Uusioaines Oy.

Ramboll. (2013). Foamit-vahtolasi, Kulkeutumisriskin tarkasteluja pohjavesialueilla. Luopioinen, Ramboll. 17 s. + liit. 23 s.

Rinkiin.fi. (2020). Pakkausten kierrätystilastot. Verkkosivut. Saatavissa (Viitattu 16.2.2020): <https://rinkiin.fi/yrityksille/pakkaustilastot/>

Ritola, J. & Vares, S. (2008). Keräyslasin hyötykäyttö vaahtolasituotteina. Espoo, VTT Tiedotteita 2458. 51 s. + liit. 2 s.

SFS-EN 13055-2. (2004). Kevytkiviainekset asfalttimassoihin ja pintauksiin sekä sitomattomiin ja sidottuihin käyttötarkoituksiin. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 39 s.

SFS-EN 1997-1. (2014). Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset Säännöt. Helsinki: Suomen standardoimisliitto. 163 s.

STEINER, A. (2006). Foam glass production from vitrified municipal waste fly ashes. Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven, 2006. 222 p. ISBN 90-386-2748-3

UUMA 2. (2016). Uusiomateriaalien tuotteistamisohje maarakentamiseen. Ramboll Oy. 56 s. + liit. 10 s. Saatavissa (Viitattu 1.4.2020): http://www.uusiomaarakentaminen.fi/sites/default/files/Tuotteistamisohje%202016_05_20_0.pdf

Uusioaines Oy. (2015). Suunnitteluohje infrarakentamiseen. 19 s. Saatavissa: http://www.foamit.fi/wp-content/uploads/2016/10/Suunnittelu-ja_Rakennusohje.pdf

Uusioaines Oy. (2020). Environmental product declaration (EPD) -kortti. 8 s. Saatavissa (Viitattu 16.2.2020): <https://foamit.fi/wp-content/uploads/2019/06/Foamit-EPD.pdf>

Valtion neuvoston asetus maaperän pilaantuneisuuden ja puhdistustarpeen arvioinnista. 217/2007. Helsinki, 1.3.2007.

Valtionneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. 843/2017. Helsinki, 7.12.2017.

Vanhanen, H. (2015). Keräyslasi jalostuu menestystuotteeksi. Kauppalehti, 2015. Saatavissa (Viitattu 1.3.2020): <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/kerayslasi-jalostuu-menestystuotteeksi/584c52e3-8c7f-333e-a565-ff209caa2bf7>

Ympäristö.fi. (2019). Pakkausjätetilastot. Verkkosivut. Pirkanmaan ELY-keskus. Saatavissa (Viitattu 16.2.2020): <https://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B8E0AFA44-9F1D-45B8-A8E0A643EC6F3F06%7D/152818>