




Deliverable D2: Vettä läpäisevät pinnoitteet ja rakenteet - Materiaalikehitys ja simulointi- testaus

Kirjoittajat: Hannele Kuosa, Kalle Loimula ja Emma Niemeläinen

Luottamuksellisuus: julkinen

Raportin nimi Deliverable D2: Vettä läpäisevät pinnoitteet ja rakenteet - Materiaalikehitys ja simulointitetaus		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot	Asiakkaan viite	
Projektin nimi Climate Adaptive Surfaces CLASS	Projektin numero/lyhytnimi 79524/CLASS WP2	
Raportin laatijat Hannele Kuosa, Kalle Loimula ja Emma Niemeläinen	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 117 s	
Avainsanat Läpäisevä päällyste, materiaalit, läpäisevä betoni, avoin asfaltti, läpäisevä betonikivipinta, läpäisevä luonnonkivipinta, saumamateriaali, kiviaines, laboratoriokoe, vedenläpäisevyys, simulointi, kestävyys, jäädytys-sulatus.	Raportin numero VTT-R-05001-14	
Tiivistelmä <p>Tässä raportoinnissa esitetään CLASS-projektin vettä läpäisevien päällysteiden materiaalikehityksessä saadut tulokset yksittäisten materiaalien oleellisten teknisten ominaisuuksien sekä koko rakenteen hydrologisen toiminnan osalta. Näillä tutkimuksilla täydennettiin kirjallisuustietoon perustuvissa selvityksissä jo hankittua tietämystä. Tavoitteena oli saada suomalaisia materiaaleja käyttäen kokemusta ja tuloksia Suomen ilmasto-olosuhteisiin soveltuvista materiaalikoostumuksista ja vettä läpäisevistä päällysteistä.</p> <p>Tutkimuksissa ja testauksessa käytettiin mahdollisuuksien mukaan vettä läpäiseville materiaaleille soveltuvia standardoituja menetelmiä (EN standardit tai ASTM standardit). Tällaisia menetelmiä on käytössä erityisesti avoimen asfaltin ja läpäisevän betonin huokoisuuden ja vedenläpäisevyyden määrittämiseen sekä myös muiden ratkaisujen kuten vettä läpäisevien betonikivipintojen vedenläpäisevyyden määrittämiseen.</p> <p>Lisäksi kehitettiin myös uusia testaus- ja simulointimenetelmiä, joilla materiaalien tai rakenteiden kelvollisuutta ja toimivuutta tutkittiin. Näitä menetelmiä kehitettiin erityisesti säilyvyyden todentamiseen jäädytys-sulatusrasituksessa sekä koko rakenteen hydrologisen toiminnan simulointiin. Jäädytys-sulatusrasituksen keston osalta lähtökohtana olivat Suomessa jo käytössä olevat menetelmät. Koko läpäisevän päällysteen ja rakenteen hydrologisen toiminnan simulointiin suunniteltiin ja rakennettiin laboratoriomittakaavan Rig-laitteisto, jolla koko vettä läpäisevän rakenteen tai sen tietyn kerroksen kuten esimerkiksi pintakerroksen hydrologista toimintaa voitiin simuloida. Rig-laitteisto mahdollisti tutkimukset myös siitä, miten rakenteen päälle kulkeutuva huokostiloinen tukkiva aines vaikuttaa vedenläpäisyyn, ja miten tukkeutumista seuraavilla puhdistuksilla vedenläpäisevyyttä voidaan palauttaa.</p> <p>Raportointi jakaantuu pintamateriaalien kehittämiseen sekä niiden materiaaliominaisuuksien tutkimuksiin ja toisaalta Rig-laitteistolla tehtyihin hydrologisen toiminnan tutkimuksiin. Rig-tutkimukset jakaantuvat pääosin pintakerrosten tutkimuksiin ja koko rakenteen tutkimuksiin. Pintakerroksia oli useita eri tyyppisiä kuten betonikivipinta, luonnonkivipinta, avoin 2-kerrosasfaltti ja vettä läpäisevä betoni. Pintakerros sisälsi tarvittaessa tasaavan vettä läpäisevän kiviaineskerroksen. Rig-tutkimuksissa rakennekerrokset eli kantava kerros ja jakava kerros, kuten myös mahdolliset tasaavat kerrokset, olivat Suomessa saatavilla olevia soveltuviksi arvioituja Ruduksen kiviaineksiä. Lähinnä vedenläpäisevyyteen liittyvissä kokeellisissa tutkimuksissa oli mukana myös muita materiaaleja kuten geotekstiili, Leca-sora (kevytsora) ja Leca-betoni, kierrätetty betonimurske Betorock, sidottu vettä läpäisevä saumamateriaali ja lasimurskepohjainen pinnoitemateriaali.</p>		
Luottamuksellisuus	julkinen	
Espoo 12.1.2015 Laatijat (edustaa kirjoittajia)	Tarkastaja	Hyväksyjä
 Hannele Kuosa Tutkija	 Markku Leivo Johtava tutkija	 Eila Lehmus Tutkimusalueen päällikkö
VTT:n yhteystiedot Teknologian tutkimuskeskus VTT, PL 1000, 02044 VTT		
Jakelu (asiakkaat ja VTT) CLASS projekti, VTT Arkisto (1 alkuperäinen)		
VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:itä saadun kirjallisen luvan perusteella.		

Alkusanat

Tämä on CLASS-projektin (Climate Adaptive Surfaces, 2012–14) WP2:n kokeellisen tutkimuksen raportti (D2). Projektissa kehitettiin Pohjoismaiden olosuhteisiin soveltuvia vettä läpäiseviä päällysteratkaisuja, jotka poikkeavat oleellisesti perinteisistä päällyste- ja rakenneratkaisuista. Pintakerroksen materiaaleiksi soveltuvat vettä läpäisevä betoni ja avoin asfaltti sekä betoni- ja luonnonkivipäällysteet, joissa saumojen tai aukkojien materiaali läpäisee hyvin vettä. Pintakerroksen alapuoliset rakennekerrokset ovat suuren huokoisuuden omaavia vettä viivytäviä kerroksia kuten erityisesti kiviaineskerroksia, joihin voi liittyä myös erilaisia putkituksia, geosynteettisiä tuotteita sekä hulevesikasetteja ja -tunneleita sekä -säiliöitä. Tällaisilla päällysteillä voidaan vähentää kaupunkitulvia, joita muodostuu, kun hulevesiverkosto ei kykene kerralla vastaanottamaan rankkasateiden suuria vesimääriä. Läpäisevien päällysteiden tarvetta lisää ilmastonmuutos, jossa Suomen kokonaissademäärät kasvavat ja myös yksittäiset sekä syys- että talvisateet voimistuvat.

CLASS-projektin rahoitti TEKES yhdessä suomalaisten kaupunkien, yritysten, organisaatioiden ja VTT:n kanssa. Kiitämme kokeelliseen tutkimukseen ja tuotekehitykseen sekä tämän raportin kirjoittamiseen ja kommentointiin osallistuneita kuten Lemminkäinen Infra Oy:tä, Rudus Oy:tä, Kaitos Oy:tä, Pipelife Finland Oy:tä sekä Saint Gobain Weber Oy:tä.

Hankkeen johtoryhmään kuuluivat:

Pirjo Sirén (puheenjohtaja), Espoon kaupunki, tekninen keskus
Eeva-Riikka Bossmann, FCG Suunnittelu ja tekniikka Oy
Osmo Torvinen, Helsingin kaupunki, Rakennusvirasto
Tommi Fred, Helsingin seudun ympäristöpalvelut – kuntayhtymä (HSY)
Olli Böök, Kaitos Oy
Pekka Jauhiainen, Kiviteollisuusliitto ry
Lars Forstén, Lemminkäinen Infra Oy
Tapio Siikaluoma, Oulun kaupunki
Mika Ervasti, Pipelife Finland Oy
Tomi Tahvonen, Puutarha Tahvoset Oy
Juha Forsman, Ramboll Finland Oy
Tiina Suonio, RTT Betoniteollisuus
Kimmo Puolakka, Rudus Oy Ab
Kati Alakoski, Saint Gobain Weber Oy Ab
Marika Orava, Vantaan kaupunki
Angelica Roschier, TEKES
Eila Lehmus, VTT

Yhteenveto

Yleistä laboratoriotutkimuksista

Tässä raportissa esitetään CLASS-projektin vettä läpäisevien päällysteiden materiaalikehityksessä sekä pintamateriaalien ja koko rakenteen hydrologisen toiminnan simuloinnissa saadut tulokset. Tavoitteena oli saada hyvä käsitys suomalaisia materiaaleja käyttäen valmistetuista vettä läpäisevistä materiaaleista ja päällysteistä.

Materiaalikehitystä ja testausta tehtiin VTT:n tutkimuslaboratoriossa ja avoimen asfaltin osalta myös Lemminkäinen Infra Oy:ssä. Yleisenä tavoitteena oli kehittää materiaaleja ja tuotteita, jotka soveltuvat Suomen ilmasto-olosuhteiden vettä läpäiseviin päällysteisiin. Tässä merkitystä on materiaalien jäädytys-sulatuskestävyydellä, jota tutkittiin kokeellisesti läpäisevän betonin (LB) ja avoimen asfaltin (AA) osalta. Koko rakenteen käyttäytymistä kylmissä olosuhteissa ei tutkittu laboratorion kokein. Läpäisevien päällysteiden talvikäyttäytymisestä ja suosituksista Suomen talviolosuhteisiin tehtiin erillinen selvitys [Kuosa et al. 2014]. Lisätietoa talvikäyttäytymisestä saadaan jatkossa erillisissä kaupunkien pilot-tutkimuksissa.

Raportointi jakaantuu pintamateriaalien kehittämiseen (LB ja AA) sekä niiden eri koostumusten materiaaliominaisuuksien tutkimuksiin ja toisaalta Rig-laitteistolla tehtyihin hydrologisen toiminnan tutkimuksiin. Rig-tutkimukset jakaantuvat pääosin pintakerrosten tutkimuksiin ja koko rakenteen tutkimuksiin. Pintakerroksia oli useita eri tyyppisiä kuten betonikivipinta, luonnonkivipinta, avoin 2-kerrosasfalttipinta ja vettä läpäisevä betonipinta. Pintakerros sisälsi tarvittaessa tasaavan vettä läpäisevän kiviaineskerroksen. Betoni- ja luonnonkivipintojen osalta tutkittiin leveydeltään eli samalla %-osuudeltaan ja materiaaliltaan erilaisten vettä läpäisevien saumojen vaikutusta vedenläpäisevyyteen puhtaana, tukkeutuneena ja puhdistettuna.

Vedenläpäisevyyttä mitattiin läpäisevien päällysteiden ja materiaalien standardisoiduilla mitausmenetelmillä (EN- ja ASTM-standardit). Näitä mittausmenetelmiä käytettäessä tulee huomata, että ne eivät ole keskenään suoraan vertailukelpoisia. Eri menetelmissä eroja on esimerkiksi käytettävän vedenpaineen osalta, joka voi olla erisuuruinen ja joko vakio tai kokeen aikana muuttuva. Tämä vaikuttaa veden tunkeutumismuutokseen ja näin ollen myös menetelmien vertailukelpoisuuteen. Läpäisevän päällysteen hydraulisessa mitoituksessa käytetään yleisesti vedenläpäisevyydelle määritettyä arvoa [m/s]. Mittausmenetelmä voi antaa tulokseksi myös arvon suhteelliselle hydrauliselle johtavuudelle [s^{-1}], jota voidaan käyttää esimerkiksi tuotekehityksessä ja laadunvalvonnassa.

Avoin asfaltti (AA)

Avoimen asfaltin tuotekehityksessä ja tutkimuksissa tavoitteena oli räätälöidä avoimia asfaltteja, jotka soveltuvat nimenomaan hulevesirakenteisiin infrarakentamisessa. Tutkimuksen toteuttamiseen osallistuvat Lemminkäinen Infra Oy ja VTT. Lemminkäinen suunnitteli ja valmisti avoimet asfaltit Tuusulan keskuslaboratoriossa sekä omiin että VTT:n tutkimuksiin.

Laboratoriokokeissa hankittiin kokeellista tietoa AA:n ominaisuuksista ja käyttäytymisestä itsenäisenä materiaalina ja päällysrakenteen osana yksi- ja kaksikerroksisena päällysteenä. Koostumusten valinta perustui Lemminkäinen Infra Oy:n kokemuksiin avoimista asfalteista. Tutkimukset painottuivat valmistettujen avointen asfalttien vedenläpäisevyysominaisuuksien määrittämiseen sekä puhtaana, tukkeutuneena että puhdistettuna. Lisäksi tutkittiin avointen asfalttien huokoisuutta (tyhjätilaa), mekaanisia ominaisuuksia ja jäädytys-sulatuskestävyyttä. Laboratoriokokeiden tuloksia on tarkoitus käyttää hulevesikohteiden suunnittelussa ja kaupunkien pilotti-kohteissa käytettävien AA-päällysteiden valinnassa.

Kaikkiaan kehitettiin kolme erilaista AA-koostumusta, joista kaksi on tarkoitettu 2-kerroksisen AA-päällysteen pintamateriaaliksi ja yksi sen pohjamateriaaliksi. Näiden AA-tyyppien koostumus poikkesi toisistaan mm. kiviaineksen rakeisuuden, tyhjätilan ja näin ollen myös

vedenläpäisevyyden osalta. Vedenläpäisevyys ei ollut riippuvainen ainoastaan tyhjätilasta, vaan siihen vaikuttivat myös tyhjätilojen väliset kulkureitit, jotka sallivat veden kulkeutumisen pinnoitemateriaalissa. Myöskään asfaltin tukkeutuessa pelkkä tyhjätila ei kerro materiaalin vedenläpäisykapasiteetista, vaan siihen vaikuttaa oleellisesti myös huokosverkoston rakenne. 2-kerroslaattojen vedenläpäisevyys oli pienempi kuin yksinomaan pintakerroksen materiaalille ja laatalle määritetty vedenläpäisevyys.

Asfaltin testimenetelmistä tiheyden, tyhjätilan, ja jäykkyyssmoduulin määrittäminen soveltuvat hyvin myös AA:n ominaisuuksien määrittämiseen. Sen sijaan jos deformaatiokestävyyden ja kulutuskestävyyden määrittämistä halutaan käyttää AA:n laadunvalvontamenetelmänä, niin testiolosuhteita tulisi muuttaa AA:lle sopiviksi. Testeissä pienet poranäytteet eivät ole sivultaan tuettuja, minkä vuoksi varsinkin kulumiskestävyys- ja deformaatiotestit rikkovat näytteen sen pienen koon vuoksi. Käytännössä avoimet asfalttipäällysteet ovat kuitenkin aina sivultaan tuettuina. AA-päällysteiden kulumiskestävyys nastarengaskulutusta vastaan on kuitenkin varsin rajoitettua ja AA-päällysteitä ei tulisikaan käyttää kohteissa joissa on vilkas liikenne tai joissa ajonopeudet ovat suuria. Avoimia päällysteitä ei tulisi käyttää liikennöidyissä kohteissa joiden keskimääräinen vuorokausiliikennemäärä (KVL) on suurempi kuin 1000.

Avoimen asfaltin jäädytys-sulatuskestävyyden määrittämisessä tässä tutkimuksessa sovellettiin aiemmin Suomessa tavanomaiselle asfaltille kehitettyä PANK-menetelmää [PANK-4306]. Saatujen tulosten mukaan avoin asfaltti kestää keskimäärin hyvin jäädytys-sulatussyklejä, mutta tuloksissa oli suuri hajonta erityisesti tiiviimmän pintaseoksen sekä pohjaseoksen tapauksissa. Halkaisuvetolujuuden standardin suosituksen mukaan näytteiden hajonta saisi olla korkeintaan 10 %, mitä arvoa ei näiden seoksien osalta täytetty. Halkaisuvetolujuuskoe on suunniteltu ja soveltuu lähtökohtaisesti perinteisille asfalteille, ei avoimille. Se ei välttämättä anna oikeaa kuvaa AA:n käyttäytymisestä osana 2-kerroslaattaa.

Läpäisevä betoni (LB)

Kokeellisissa tutkimuksissa tavoitteena oli saada hyvä käsitys läpäisevästä betonista (LB) ja sen ominaisuuksista. Erityisesti tavoitteena oli tutkia LB:n jäädytys-sulatuskestävyyttä sekä ilman suolan vaikutusta että sen kanssa. Tähän liittyi uusina asioina sekä jäädytys-sulatusmenetelmien että suojahuokostuksen ja muun mikrorakenteen arviointi- ja analyysimenetelmien valinta ja näillä menetelmillä tehdyt testaukset. Säilyvyysominaisuuksien lisäksi LB:n oleellisia tutkittuja ominaisuuksia olivat kokonaishuokoisuus, vedenläpäisevyys ja lujuusominaisuudet. Lisäksi tutkittiin sekä läpäisevän betonin tukkeutumisen että sitä seuraavan puhdistuksen vaikutusta vedenläpäisevyyteen (ks. tässä jäljempänä: Hydrologisen toiminnan kokeet ja simulointi).

LB on erikoisbetoni, jonka koostumus ja ominaisuudet poikkeavat oleellisesti tavanomaisesta betonista. Oleellisinta on, että kiviaineksen rakeisuus on suhteellisen tasarakeinen, jotta betoniin jää toisiinsa yhteydessä olevia suhteellisen suuria, huokosia (1–8 mm), joiden kautta vesi voi kulkeutua betonin läpi. Käytännössä LB:n koostumuksen valinta ja optimointi lähtee paikallisista materiaaleista kuten saatavilla olevasta kiviaineksestä. Tässä tutkimuksessa käytettiin Rudus Oy:n soveltuviksi arvioituja kiviaineksia. Myös tiivistysmenetelmä vaikuttaa lopullisiin ominaisuuksiin kuten vedenläpäisevyyteen ja lujuuteen. Tässä tutkimuksessa tiivistys tehtiin joko Proctor-tyyppistä tiivistystä tai jyrätiivistystä käyttäen.

LB-massoja valmistettiin käyttäen kahta rakeisuudeltaan ja suurimmalta raekooltaan erilaista kiviainesta. Pienemmän suurimman raekoon LB (<8 mm) soveltuu vettä läpäisevän päällysteen pintamateriaaliksi ja suuremman raekoon LB (<12 mm) soveltuu paremmin esimerkiksi päällysteen kantavaan kerrokseen. Pakkaskestävyyden tutkimiseksi massat pyrittiin suojahuokostamaan ja yhdessä massassa käytettiin polymeerilisäainetta. Massojen vesi-sementtisuhteet olivat pieniä ($w/c = 0,27-0,30$). Tulosten mukaan suhteellisen pienetkin erot vesimäärässä ja samalla vesi-sementtisuhteessa voivat vaikuttaa tiivistymiseen, suojahuokostukseen sekä kuivumiseen ja näin myös sementin hydrataatioon.

Valmistettujen LB-massojen ja koekappaleiden ja -laattojen kokonaishuokoisuus oli noin 20 %. Vedenläpäisevyys oli joko erittäin hyvä tai riittävän hyvällä tasolla ($1,1\text{--}5,4 \cdot 10^{-3}$ m/s) kuten myös puristuslujuus (15,4–26,3 MPa). Yleisesti mitä suurempi vedenläpäisevyyden arvo oli, sitä suurempi LB:n lujuus oli. Käytännössä lujuuden ja vedenläpäisevyys tulisi optimoida tapauksen ja käyttökohteen mukaisesti halutulle tasolle.

Jäädytys-sulatusrasituksen keston testauksessa lähtökohtana olivat Suomessa jo vakiintuneissa käytössä olevat menetelmät (laattakokeet), joita sovellettiin ja kehitettiin vettä läpäiseville betoneille soveltuviksi [CEN/TR 15177. 2006, CEN/TS 12390-9:2006]. Jäädytys-sulatuskestävyyttä tutkittiin käyttäen kolmea erilaista koemenetelmää. Nämä menetelmää erosivat toisistaan kosteusolosuhteidensa osalta ja lisäksi yksi siksi, että siinä oli mukana suolan vaikutus (3 % NaCl-liuos). Ankarin rasitus oli jäädytys-sulatus siten, että koekappale oli koko ajan yhteydessä sen alapuoliseen suolaliuokseen. Myös jäädytys-sulatus, jossa koekappaleet olivat koko ajan vesiupotuksessa, oli lähes yhtä ankara silloin, kun betonin suojaahuokostus ja näin ollen myös kestävyys oli vaillinainen. Parhaiten LB kesti kokeessa, jossa 50 d vesi-imeytyksen jälkeen jäädytys-sulatus tapahtui muoviin käärittynä.

LB:n riittävän jäädytys-sulatuskestävyyden ja pakkas-suolakestävyuden eli pienen pintarapautumisen takaaminen vaati sen, että kovettuneessa LB:ssä oli määrältään (%) riittävä suojaahuokostus. Sementtipastan suojahuokosten (huokokset $<0,800$ mm) erittäin pieni huokosjako (mm) ei yksin taannut hyvää kestävyttä kaikissa tapauksissa. Polymeerilisäaine paransi kestävyttä, mutta ei niin merkittävästi kuin hyvä suojaahuokostus. Tutkimuksissa havaittiin että LB:n huokostaminen on sikäli vaativaa, että huokosten stabiiliuden takaaminen (massa vs. tiivistetty ja kovettunut LB) on pienen vesi-sementtisuhteen vuoksi tavallista vaikeampaa. Huokostuksen onnistuminen ja riittävä jäädytys-sulatuskestävyys voitiin varmistaa jäädytys-sulatuskokeella ja kovettuneen betonin ilmahuokosanalyysillä.

Hydrologisen toiminnan kokeet ja koko rakenteen toiminnan simulointi (Rig-tutkimukset)

Koko rakenteen tai sen tietyn kerroksen hydrologisen toiminnan simulointiin suunniteltiin ja rakennettiin laboratoriomittakaavan Rig-laitteisto. Laitteiston oleellisia toimintoja olivat säädettävissä oleva sadetusyksikkö sekä rakenteen läpi kulkeutuneen vesimäärän mittaaminen. Rig-laitteisto mahdollisti tutkimukset myös siitä, miten rakenteen päälle kulkeutuva huokostiloja tukkiva aines vaikutti vedenläpäisyyn, ja miten tukkeutumista seuraavilla puhdistuksilla vedenläpäisevyyttä voitiin palauttaa.

Betonikivipintoja tutkittiin kolmella eri saumalla. Tutkittavat saumat olivat Rudus Oy:n 1/5 mm vesiseulottu (VS) sepeli 5 % ja 10 % aukkomäärällä sekä kaupallinen komposiittisauma 10 % aukkomäärällä. Saumaleveydet valittiin aukkomääriä vastaaviksi ja ne olivat 2,7 mm ja 5,6 mm. Luonnonkivipintoja tutkittiin myös kolmella eri saumalla. Tutkittavat saumat olivat tavannomaisesti käytettävä 0/4 mm hiekka sekä vettä läpäisevät 1/5 mm VS sepeli ja komposiittisauma. Luonnonkivien (10 cm noppakivet) kanssa saumaleveys oli kaikissa tapauksissa 10 mm. Tasauskerroksena käytettiin 50 mm kerrosta ko. tapauksessa käytettyä saumamateriaalia. Poikkeuksena oli komposiittisaumamateriaali, jonka yhteydessä käytettiin 1/5 mm VS sepeliä.

Pintakerrosten vedenläpäisevyys- tai veden viivytykskapasiteetin tutkimuksissa oli mukana myös joitakin lisämateriaaleja kuten geotekstiili (Kaito Oy), Leca-sora (kevytsora) (Saint Gobain Weber Oy) ja Leca-betoni (Posiva Oy:n erillinen tutkimus), kierrätetty betonimurske Betorock (Rudus Oy) sekä kaupallinen lasimurskepohjainen sidottu pintamateriaali. Näiden vedenläpäisevyydet määritettiin vedenläpäisevyyden standardimenetelmällä, tai ne tutkittiin irtotiheyden ja avoimen huokoisuuden osalta. Geotekstiili tutkittiin myös hienoaineksella tukittuna. Geotekstiiliä tukkiva, yläpuolisesta kiviaineskerroksesta irronnut ja veden mukana siihen kulkeutunut hienoaines pienensi sen vedenläpäisevyyttä selvästi.

Pintakerroksista kaksi läpäisevää betonia, kaksi 2-kerrosasfalttia sekä betonikivipinta kahdella eri saumalla tutkittiin Rig'issä myös koko alusrakenteen kanssa. Alusrakenne koostui

320 mm kantavasta kerroksesta Rudus Oy:n 5/32 mm raekoon kiviainesta ja 520 mm jakavasta kerroksesta 32/63 mm raekoon kiviainesta. Kiviainekset pestiin hienoaineksesta ennen Rig'iin tiivistämistä. Kutakin päällystettä sadetettiin ensin 10 minuuttia valitulla mitoitussateella ja sen jälkeen varsinaiset mittaukset tehtiin käyttäen 10 minuutin mitoitussadetta, jonka suuruus oli $2,75E \times 10^{-5}$ m/s (275 l/s/ha). Vertailun vuoksi, esimerkiksi Helsingin alueella kerran 10 vuodessa tapahtuva 10 minuutin rankkasadetapahtuma, jossa ilmastonmuutos on otettu huomioon, on suuruudeltaan $2,17 \times 10^{-5}$ m/s (216 l/s/ha). Sadetuksen jälkeen päällysteet tukittiin fillerin (0/1 mm) ja kaoliinisaven seoksella (paino-osissa puolet molempia, yhteensä 2 kg/m²) ja sen jälkeen puhdistettiin ensin imupuhdistuksella ja sitten painepesurilla. Vedenläpäisevyysmittaukset (m/s) suoritettiin koko rakenteelle puhtaana, liattuna, imupuhdistettuna sekä painepestyinä.

Sekä asfalttilaattojen että betonilaattojen osalta eri koostumusten välillä oli selvä ero vedenläpäisevydessä. Kirjallisuudessa ja ulkomaisissa ohjeissa esitetyt arvot ja tässä tutkimuksessa läpäiseville päällysteille saadut vedenläpäisevyyden arvot vastaavat joka tapauksessa toisiaan hyvin. Tutkitut materiaalit selviytyivät hyvin mitoitussateesta, joka vastasi kerran 50 vuodessa tapahtuvaa rankkasadetta $2,75E \times 10^{-5}$ m/s (275 l/s/ha). Hienon hiekan sekä hiekkaa oleellisesti hienojakoisemman materiaalin kerääntyminen vettä läpäiseviin pintamateriaaleihin heikensi vedenläpäisevyyttä materiaalista riippuen 10–37 % alkuperäisestä. Tästä huolimatta vedenläpäisevyys pysyi kaikissa tapauksissa valitun mitoitussateen voimakkuutta suurempana.

Imupuhdistuksen ja painepesun avulla vedenläpäisevyys saatiin palautettua arvoon 39–96 % alkuperäisestä. Suhteellisen pienten läpäisevyyksien AA:n ja LB:n puhdistus ei palauttanut läpäisevyyttä tässä tutkimuksessa kuitenkaan erityisen hyvälle tasolle, mutta se jäi kuitenkin yleisesti suositeltavaa suunnitteluarvoa sekä käytettyä mitoitussadetta suuremmaksi. Toisaalta, hyvän vedenläpäisevyyden LB:n läpäisevyys kyettiin palauttamaan lähes alkuperäiselle tasolle. Vettä läpäisevän materiaalin ominaisuuksilla ja esimerkiksi vedenläpäisevyydellä ja huokosverkoston rakenteella onkin merkitystä sen kokonaistoiminnan kannalta. Kaikkiaan sekä puhdistusmenetelmä ja sen teho että materiaalin huokoisuus ja huokosrakenne vaikuttavat siihen, mille tasolle puhdistus voi vedenläpäisevyyden palauttaa. Tulee myös ottaa huomioon, että tässä käytetyt puhdistusmenetelmät eivät todennäköisesti täysin vastaa käytännössä käytettäviä menetelmiä ja niiden puhdistustehoja. Tuloksia voidaankin kuitenkin pitää hyvin suuntaa antavina.

Sietokykyksadetuskokeissa, joissa sadetuksen intensiteettiä nostettiin aina mitoitussateen $2,75 \times 10^{-5}$ m/s verran kerrallaan kunnes pintavalumaa voitiin havaita, valumaa syntyi vasta, kun sadetuksen intensiteetti 2–4 kertaa mitoitussateen suuruinen. Nämä kokeet tehtiin vain paremmaksi vedenläpäisevyyden LB:lle ja AA:lle. Tuloksia ei voi suoraan verrata standardimenetelmällä määritettyihin vedenläpäisevyyksiin menetelmäerojen vuoksi. Myöskään käytettyä laboratoriosadetusta ei voi suorana verrata luonnonmukaiseen sateeseen. Saadut tulokset ovatkin vain suuntaa antavia.

Tässä tutkimuksessa saatuja kokeellisia tuloksia on hyödynnetty ensimmäistä suomalaisista läpäisevien päällysteiden käsikirjaa laadittaessa [Kling et al. 2015]. Tämän raportin kokeellisissa tutkimuksissa saadut tulokset sekä suunnitteluun, rakentamiseen ja ylläpitoon laadittu käsikirja ovat jatkossa hyödynnettävissä CLASS-projektia seuraavien Suomen kaupunkien pilot-projektien suunnittelussa ja rakentamisessa.

Summary

General information about laboratory studies

This report includes the CLASS-project results of the pervious pavement material development, the different surface course material properties, and the simulation results for the pervious pavements with different surface courses. The aim was to get understand the behaviour of water pervious materials and pavements, which were made by using available Finnish raw materials.

Material development was made in VTT's research laboratory, and for porous asphalt (PA) also at Lemminkäinen Infra Ltd. The main aim was to develop materials and product suitable for pervious pavements in Finnish winter conditions. Good freeze-thaw durability is essential, and thus it was studied experimentally with regards to pervious concrete (PC) and porous asphalt (PA). The winter performance of the whole pavement structure was not studied experimentally. Instead, a separate survey was performed on the pervious pavement winter performance, and recommendations were given on the use of pervious pavements in the Finnish winter conditions [Kuosa et al. 2014]. Further additional information on the winter performance will be available after the separate pilot projects in Finland.

This report includes information on the pavement surface course material development work for PA and PC and on the related testing results for the different mix designs. There are results of the hydrological simulation of the whole layered pavement structures, and also results of the water permeability testing for the different types of pavement surface courses. There were several types of surface courses studied, including concrete block pavements, natural stone pavements made of stone cobbles, porous 2-layer asphalts and pervious concrete pavements. In the permeability testing, bedding layer made of porous aggregate material was included in the surface course/layer. In the case of the block pavements with joints, joint width, i.e. the %-fraction of the pervious material in the pavement surface area, was studied both as in the initial state, and also as clogged and cleaned with two methods.

Water permeability was measured by using standardised methods for pervious materials and pavements (EN- and ASTM-standards). It was noticed that these methods are not directly comparable. In different methods, different water pressures are used, and the water pressure can be constant or may change during the measurement. This will have an effect on the water penetration rate and thus also on the comparability of the methods. In the hydrological design of pervious pavements, the value for the water penetration rate is used [m/s]. The measurement method and standard may also define a value for the relative hydraulic conductivity of the pavement [s^{-1}], which can also be used for instance in product development or quality control.

Porous asphalt (PA)

In the product development and research of porous asphalt (PA) the aim was to develop PA-mixes suitable for stormwater structures in infra construction. The research was conducted by Lemminkäinen Infra Ltd and VTT. Lemminkäinen designed and produced the PA-mixes and specimens in their central laboratory at Tuusula both for their own testing, and for the testing at VTT laboratory.

By laboratory testing, experimental results were obtained for PA properties and behaviour as a material, and also results for PA as a one- or two-layer surfacing material as a part of a pervious pavement. The mix design choices were based on the former experience regarding PA by Lemminkäinen Infra Ltd. The new research concentrated on the water permeability properties of PA as in the initial clean state, and also as clogged and cleaned after that. Also porosity (void content), mechanical properties and freeze-thaw resistance were studied. The intention was to use the results in the future design of stormwater construction projects and in the choice of PA-surfaces for future pervious pavement pilot projects in Finland.

Overall, three PA-mixes were developed. Two mixes were for the top surface course in a 2-layer porous asphalt system, and one was for the bottom course of the PA. In these mixes there were differences in the aggregate gradation, void content and thus also in the water permeability. Water permeability is not only dependent on the void content but also on the smaller passages between the bigger voids. Also for the clogged PA, the empty void content alone does not indicate the remaining water permeability capacity, but also the void structure after clogging is efficient. It was also found that the water permeability for the 2-layer PA-slab was smaller than the water permeability for the top surface PA-material used as the surface course in the 2-layer slab.

Of the testing methods for asphalt the determination of density, void content and modulus of elasticity are suitable also for PA. But if determination of resistance to deformation or resistance to wearing is wished to be used as a PA quality control method, these methods should be modified to be suitable for PA. In these studies, small cored specimen are not confined, and this is why especially in the testing of resistance to deformation or resistance to wearing, the cores may be broken easily because of their small size. Instead in practice, PA surface courses are always in confinement. Anyway, it was found that the resistance of PA to wearing by studded tyres is limited, and the PA should not be used if there is a lot of traffic, or if the driving speeds are high in the pavement in question. The results to-date showed that PA was suitable only for areas with average daily traffic volume less than 1000.

For determining PA freeze-thaw resistance, the existing Finnish PANK-method for normal dense asphalt was used [PANK-4306]. Based on the results, PA freeze-thaw resistance was evaluated to be good, but there was relatively high variation in the testing results especially in the case of less porous surface course, and also in the case of PA bottom layer mix with the larger maximum aggregate size. According to the recommendation in the testing standard for splitting tensile strength, the variation should not be more than 10%. This demand was not fulfilled in all the cases. This is apparently because the testing method for the splitting tensile strength is designed for normal dense asphalt, not for PA. It may not give the right information on the behaviour of PA as used in a 2-layer surfacing or slab.

Pervious concrete (PC)

In the experimental research the aim was to get a good understanding of the pervious concrete (PC) material properties. Specifically, the aim was to study freeze-thaw resistance of PC, both without and with salt. A new testing method for freeze-thaw was created by with a method for studying the protective air pore structure and PC microstructure. Besides durability properties in freeze-thaw, also total porosity, water permeability and strength properties of the PC-mixes were studied. The effect of clogging and cleaning after that on the water permeability were also studied.

PC is a special concrete material having very different properties from normal structural concrete. It is essential to have a relatively even-grained aggregate so that there will remain relatively big (1–8 mm) interconnected pores between them. These pores should form an interconnected network that makes PC water pervious. In practise the PC mix design optimization is started from the selection of the available local aggregates. In this research suitable aggregates from Rudus Ltd were used. Also the compaction method will have an effect on the PC properties such as water permeability and strength. In this research Proctor-type compaction and roller compaction were used.

PC-mixes with two different aggregate gradations, having different maximum aggregate sizes, were used. The mix with the smaller maximum aggregate size (<8 mm) was found to be suitable to be used as a pervious pavement surface course. The mix with the larger maximum aggregate size (<12 mm) could be used for instance as a pervious pavement base layer. Air entrainment was used to make the mixes freeze-thaw resistant. One PC was made with a polymeric admixture. Water/cement ratios were small ($w/c = 0.27-30$). It was found that relatively small differences in the total water content, and at the same time in the w/c

ratio, will have an effect on the air entrainment (amount, stability) and drying and thus also on the cement hydration.

The total void content in the fresh PC-mixes, and also in the specimen (cubes and slabs), was about 20%. Water permeability was from very good to acceptable ($1.1\text{--}5.4 \cdot 10^{-3}$ m/s), at suitable levels of compressive strength (15.4–26.3 MPa). In general, lower water penetration rate meant higher compressive strength. In practice, water permeability and compressive strength can be optimized to the desired levels.

In the testing of the freeze-thaw resistance of PC, the starting point in the selection of the methods was the methods which are most frequently used in Finland for normal structural concrete, i.e. slab tests (reference methods) in [CEN/TR 15177. 2006, CEN/TS 12390-9:2006]. These methods were developed and adapted for water pervious PC. After all, freeze-thaw resistance was studied by using three different testing methods. These methods were different with regard to the moisture conditions in the testing. In addition, in one method salt solution (3% NaCl) was in contact with the specimen during the freeze-thaw cycles. The method with salt solution in contact with the PC-specimen was found to be the most severe. The method with the specimen immersed in water all the time during the freeze-thaw cycles was almost as severe for the PC-mixes with too small protective air content and thus with an inadequate resistance in freezing with the high moisture content. When PC was not in contact with water or salt solution, but instead as wrapped in plastic during the freeze-thaw, the deterioration was always much slower in comparison with the two other more severe methods. This was in spite of the long (50 d) water immersion time before freeze-thaw.

To have a good freeze-thaw resistance for PC, both with and without de-icing salt exposure, good air entrainment was essential. There must be a high enough amount (%) of air pores in the PC paste fraction. It was found that a small spacing factor (mm) of the protective air pores (pores <0.800 mm) did not always ensure a good enough freeze-thaw resistance. A polymeric admixture increased also freeze-thaw resistance but not as much as an adequate air entrainment. It was also found that the air entrainment of the PC was demanding because of the low water/cement ratio and low water content of the PC-mix. It was difficult to ensure the stability of the protective air pores (small air pores in the fresh mix after mixing vs. small air pores in the compacted and hardened PC). It was found to be possible to ensure a good freeze-thaw resistance for PC by freeze-thaw testing and by optical air pore analysis of the hardened PC.

Studies on the water permeability and hydrological simulation of pervious pavement systems (Rig-testing)

For the simulation and water permeability testing of the whole pavement structure, or a selected layer of the pavement, a laboratory scale Rig was designed and constructed. The essential components and functions of this Rig were the adjustable sprinkler irrigation system, and the on-line measurement of the water content filtrated through the structure in the Rig. This Rig-system enabled also studies on how clogging and cleaning of the pavement changed pavement water permeability.

Concrete block pavement surface courses with three different joints were studied. These joints included 1/5 mm water sieved (washed, with no fines) aggregate from Rudus Ltd. These joints covered 5% or 10% of the total pavement surface area. In addition, a commercial water pervious bound joint material was studied with 10% joint surface area in the pavement. The joint widths representing 5% or 10% joint areas were 2.7 mm and 5.6 mm. Natural stone block pavements (100 mm cobbles) were studied also with three different joints. In this case the joints were filled with a comparison joint material (aggregate 0/1 mm) and with water pervious water sieved 1/5 mm aggregate from Rudus Ltd, and with a commercial water pervious bound joint material. In the case of natural stone cobbles the joint width was in all the cases 10 mm. In most concrete and natural stone block pavements the bedding layer aggregate was the same material as was used in the joints, and the thickness

of this layer was always 50 mm. Only in the case of the composite joint material, the bedding layer was water pervious aggregate (water sieved 1/5 mm aggregate).

Also some additional materials were included in the water penetration rate studies, or in base/subbase water retention capacity studies. These materials were a geotextile (Kaitos Oy), light weight *Leca*-gravel (Saint Gobain Weber Oy) and *Leca*-concrete (a separate study by Posiva Oy), recycled concrete *Betorock* (Rudus Oy), and a bound surface course made of crushed glass. For these the water infiltration capacity (m/s) or loose density as dry and moist, and the water retention capacity (vol.-%) were determined. Water permeability for the geotextile was measured as clean and as clogged by fine material. The fine material was from the base aggregate, which included fines. The fines as carried along with water from the base aggregate to the geotextile clearly decreased the water permeability of the geotextile.

In the Rig-simulation of the whole pavement structures, two porous concretes, two 2-layer asphalts, and two concrete block pavements with 2 different joint widths, both with a 1/5 mm aggregate, were studied in the Rig. In this simulation there was a base (h320 mm) and a subbase (h520 mm) aggregate layer in the Rig. Aggregates were from Rudus Ltd, and they were first washed, to remove the fines, before they were compacted in the Rig. First, after 10 minutes wetting period with the selected design rain, a 10 minutes design rain $2,75E \times 10^{-5}$ m/s (275 l/s/ha) was used in the pavement hydrological simulation. As a comparison, the 10 minutes heavy rain once in 10 years in Helsinki city area, including the effect of climate change, is $2.17 \cdot 10^{-5}$ m/s (216 l/s/ha). After that pavement were clogged with fine sand (0/1 mm) and kaolin clay. The used clogging material amount was in all 2 kg/m^2 , and 50 w.-% of the both clogging materials was used. Finally the pavement was cleaned by two methods, first by a vacuuming method, and after that by pressure washing. Water penetration was determined for the pavement as cleaned, clogged and as cleaned by the two successive cleaning methods.

The two PA-mixes with different mix designs and the different PCs were all found to have clearly different water infiltration capacities in the Rig-simulation testing. The water permeability values presented in international scientific literature and instructions for pervious pavements were similar to the values determined in this research. The studied pervious surface course materials and pavements worked well without surface runoff under the forecasted exposure of once in 50 years heavy rainfall $2.75E \times 10^{-5}$ m/s (275 l/s/ha). Heavy exposure with fine (<1 mm) clogging material decreased the water infiltration capacity to 10–37 % of the initial value, depending on the material. In spite of the clogging, water infiltration capacity was always maintained higher than needed to handle the design rain intensity.

By cleaning with a vacuum method and pressure washing, it was possible to increase the pavement water permeability to a value which was 39–96% of the initial value. For the relatively low infiltration capacity PA and PC, cleaning did not increase the permeability to a higher level, but was still higher than the design rain intensity or the generally recommended design value. Instead, in the case of the high permeability PC it was possible to restore the permeability almost back to the initial value. It was concluded that the porosity and also pore structure in a porous pavement material will have an effect on the overall function of the surface course and the pavement.

In all, both the cleaning method and efficiency, as well as the material porosity and pore structure, will influence how much it is possible to restore the filtration capacity by cleaning. It must be also noted that the cleaning methods which were used in this research do not fully represent the cleaning capacity of the field methods which are used in practise. The result in this research can anyway be considered as suitably indicative.

Finally, a rain amount tolerance testing was performed. In this scenario the intensity of the rain was increased by steps. First the intensity was for the testing selected design rain ($2.75 \cdot 10^{-5}$ m/s). After that the intensity was increased to be 2-, 3- and 4-fold design rain intensity. This simulation was made only for one selected LB-slab, and one PA-slab. Surface runoff

was detected only when the 4-fold design rain was used in the simulation. It is not possible to compare these results directly with the water infiltration rate determined according to standard methods, as there are differences in the testing principles and details. In addition, it is not possible to directly compare laboratory sprinkler exposure with the natural rain exposure.

The results of these laboratory experimentals have been used as a basis for the first Finnish guidelines for implementation of pervious pavements [Kling et al.2015]. The results and guidelines serve for design and construction of pilot demonstration sites in Finnish cities after the conclusion of this project.

Sisällysluettelo

Alkusanat	2
Yhteenveto	3
Summary	7
1. Johdanto	14
2. Pintamateriaalien kehitys ja tutkimukset	15
2.1 Lämpäisevät betonikivi- ja luonnonkivipinnat	15
2.1.1 Betonikivipinnat	15
2.1.1.1 Saumamateriaalit, -leveydet ja tasauskerrokset	15
2.1.1.2 Vedenläpäisevyys	15
2.1.2 Luonnonkivipinnat	16
2.1.2.1 Saumamateriaalit, -leveydet ja tasauskerrokset	17
2.1.2.2 Vedenläpäisevyys	17
2.2 Avoin asfaltti	18
2.2.1 Johdanto	18
2.2.2 Asfalttiseokset, koekappaleet ja niiden valmistus (Lemminkäinen)	18
2.2.3 Asfalttiseosten rakenne	19
2.2.4 Lemminkäisen laboratoriossa tehdyt tutkimukset (Lemminkäinen)	21
2.2.4.1 Tutkimushavainnot ja tulosten arviointi (Lemminkäinen)	22
2.2.5 Jäädytys-sulatuskokeet (VTT)	24
2.2.6 Vedenläpäisevyyskokeet (VTT)	26
2.2.7 Yhteenveto ja johtopäätökset (VTT)	30
2.3 Lämpäisevä betoni (LB)	33
2.3.1 Johdanto	33
2.3.2 Materiaalit	33
2.3.3 Massojen valmistus, koekappaleiden valu ja tiivistys	34
2.3.4 Alustavat laboratoriotutkimukset ja koemenetelmäkehitys	36
2.3.4.1 Ennakkokoe 1 – Proctor-tiivistys, tiheys ja kokonaisuukoisuus ...	37
2.3.4.2 Ennakkokoe 2 – Mikrorakenne, suojahuokostus ja koelaatan (jyrätiivistys) lujuusominaisuudet ja vedenläpäisevyys	38
2.3.4.3 Ennakkokoe 3 – Puristuslujuus ja sen määrittäminen	40
2.3.4.4 Ennakkokoe 4 – LB-massan ilmamäärän pikakoe	41
2.3.4.5 Ennakkokoe 5 – Suojahuokostuksen määrä tiivistämättömässä LB- massassa (%)	42
2.3.5 LB-massat, massaominaisuudet sekä puristuslujuudet ja vedenläpäisevyudet	44
2.3.6 Jäädytys-sulatuskokeet, mikro- ja huokosrakenne	47
2.3.6.1 Koemenetelmät	47
2.3.6.2 LB-massat	50
2.3.6.3 Koetulokset	50
2.3.6.4 Koetulosten analysointi	54
2.3.7 Johtopäätökset	64
2.4 Muut materiaalit ja tuotteet	64
2.4.1 Geotekstiili	64
2.4.2 Leca-sora	66
2.4.3 Leca-betoni	66
2.4.4 Betorock	68
2.4.5 FilterPave®	69
3. Simulointitestaus (Rig)	70
3.1 Laitteisto ja sen toiminta	70
3.2 Tutkimusmenetelmät	72
3.3 Referenssitestit	74

3.3.1	Ei pintamateriaalia, vain puhtaat kiviaineskerrokset	74
3.3.2	Muut referenssitestit	75
3.4	Pintakerrokset	76
3.4.1	Betonikivipinta	76
3.4.2	Luonnonkivipinnat	77
3.4.3	Avoin asfaltti	78
3.4.4	Läpäisevä betoni	79
3.5	Koko rakenne eri pintakerroksilla	80
3.5.1	Betonikivipinnat	80
3.5.2	Avoin asfaltti	81
3.5.3	Läpäisevä betoni	83
3.6	Yhteenveto ja johtopäätökset	86
	Lähdeviitteet	90

LIITTEET:

Liite 1. Asfalttiporapalojen jäätymis-sulamiskokeiden yksittäiset tulokset PANK-4306 mukaisesti

Liite 2. Asfaltin vedenläpäisevyyskokeet, yksittäiset tulokset

Liite 3. LB-massoissa käytettyjen kiviainesten laadunvalvontaraportit [Rudus Oy 2012]

Liite 4. Sementtien tuote-esitteet. [Finnsementti 2014]

Liite 5. Vedenläpäisevyyskokeiden kiviainesten laatuselosteet [Rudus Oy 2012]

Liite 6. Betonimurskeen suoritusasoilmoitus

Liite 7. Menetelmä A. Jäädytys sulatus vedessä. Yksittäisten koekappaleiden tulokset

Liite 8. Menetelmä B. Pakkas-suolakoe. Yksittäisten koekappaleiden tulokset

Liite 9. Menetelmä C. Jäädytys-sulatus muovissa (50 d vesi-imeytyksen jälkeen)

Liite 10. Koekappaleiden PC3 suhteellinen massa menetelmissä A ja C

1. Johdanto

Tässä raportoinnissa esitetään CLASS-projektin vettä läpäisevien päällysteiden materiaali-kehityksessä saadut tulokset yksittäisten materiaalien oleellisten teknisten ominaisuuksien sekä koko rakenteen hydrologisen toiminnan osalta. Näillä tutkimuksilla täydennettiin kirjallisuustietoon perustuvissa selvityksissä jo hankittua tietämystä [Kuosa et al. 2013a, Kuosa et al. 2013b, Loimula & Kuosa 2013, Korkealaakso et al. 2013, Kuosa et al. 2014]. Tavoitteena oli saada suomalaisia materiaaleja käyttäen kokemusta ja tuloksia Suomen ilmasto-olosuhteisiin soveltuvista materiaalikoostumuksista ja vettä läpäisevistä päällysteistä.

Tutkimuksissa ja testauksessa käytettiin mahdollisuuksien mukaan vettä läpäiseville materiaaleille soveltuvia standardoituja menetelmiä (EN standardit tai ASTM standardit). Tällaisia menetelmiä on käytössä erityisesti avoimen asfaltin ja läpäisevän betonin huokoisuuden ja vedenläpäisevyyden määrittämiseen sekä myös muiden ratkaisujen kuten vettä läpäisevien betonikivipintojen vedenläpäisevyyden määrittämiseen. Osa näistä menetelmistä soveltuu myös käytännön kohteessa tai koerakenteen päältä tehtävään vedenläpäisevyyden mittaukseen. [Kuosa et al. 2013b]

Lisäksi kehitettiin myös uusia testaus- ja simulointimenetelmiä, joilla materiaalien tai rakenteiden kelvollisuutta ja toimivuutta voitiin tutkia. Näitä menetelmiä kehitettiin erityisesti säilyvyyden todentamiseen jäädytys-sulatusrasituksessa sekä koko rakenteen hydrologisen toiminnan simulointiin.

Jäädytys-sulatusrasituksen keston osalta lähtökohtana olivat Suomessa jo vakiintuneessa käytössä olevat menetelmät. Erityisesti näitä menetelmiä sovellettiin ja kehitettiin vettä läpäiseville betoneille soveltuviksi. Tämä mahdollistaa jatkossa niiden laajemmankin käyttöönoton ja mahdollisen jatkokehittämisen, koska peruslaitteistot ja -menettelyt ovat Suomessa kuten myös muissa Pohjoismaissa käytettävissä ja tunnettuja [CEN/TR 15177. 2006, CEN/TS 12390-9:2006]. Avoimen asfaltin osalta tässä tutkimuksessa sovellettiin aiemmin Suomessa tavanomaiselle asfaltille kehitettyä PANK-menetelmää [PANK-4306].

Koko rakenteen hydrologisen toiminnan simulointiin suunniteltiin ja rakennettiin laboratoriomittakaavan Rig-laitteisto, jolla koko vettä läpäisevän rakenteen tai sen tietyn kerroksen kuten esimerkiksi pintakerroksen hydrologista toimintaa voitiin simuloida. Laitteiston oleellisia toimintoja ovat säädettävissä oleva sadetusyksikkö sekä rakenteen läpi kulkeutuneen vesimäärän mittaaminen. Rig-laitteisto mahdollisti tutkimukset siitä, miten rakenteen päälle kulkeutuva huokostiloja tukkiva aine vaikuttaa vedenläpäisyyn, ja miten tukkeutumista seuraavilla puhdistuksilla vedenläpäisevyyttä voidaan palauttaa.

Raportointi jakaantuu pintamateriaalien kehittämiseen sekä niiden materiaaliominaisuuksien tutkimuksiin ja toisaalta Rig-laitteistolla tehtyihin hydrologisen toiminnan tutkimuksiin. Rig-tutkimukset jakaantuvat pääosin pintakerrosten tutkimuksiin ja koko rakenteen tutkimuksiin. Pintakerroksia oli useita eri tyyppisiä kuten betonikivipinta, luonnonkivipinta, avoin 2-kerros-asfaltti ja vettä läpäisevä betoni. Pintakerros sisälsi tarvittaessa tasaavan vettä läpäisevän kiviaineskerroksen. Rig-tutkimuksissa rakennekerrokset eli kantava kerros ja jakava kerros, kuten myös mahdolliset tasaavat kerrokset, olivat Suomessa saatavilla olevia soveltuviksi arvioituja Ruduksen kiviaineksia. Lähinnä vedenläpäisevyyteen liittyvissä kokeellisissa tutkimuksissa oli mukana myös muita materiaaleja kuten geotekstiili ("NorGeoSpec N2; 0,085 m/s"), Leca-sora ja Leca-betoni, kierratettu betonimurske Betorock, sidottu saumamateriaali Grepur 294-UV ja lasimurskepohjainen pinnoitemateriaali Filterpave.

2. Pintamateriaalien kehitys ja tutkimukset

2.1 Lämpäisevät betonikivi- ja luonnonkivipinnat

2.1.1 Betonikivipinnat

Betonikivipintatutkimuksissa käytettiin Ruduksen 'Luostarikiviä', joiden koko oli h80 x 68 x 208 mm. Betonikivet eivät itsessään ole vettä läpäiseviä, mutta ne voidaan asentaa saumamateriaaleilla, jotka on suunniteltu hyvin vettä läpäiseviksi. Kuvassa 1 on esitetty tutkimuksiin käytetty betonikivityyppi. Tavoitteena oli tutkia saumaleveyden ja saumamateriaalin vaikutusta vedenläpäisevyyteen. Nämä kivet eivät sinänsä sovellu hyvin vettä läpäiseviin pintoihin, koska ne eivät lukkiudu toisiinsa, mikä heikentää pinnan kuormituksenkestävyyttä. Tutkimukseen ne valittiin siksi, että niitä käyttäen voitiin muuntaa saumaleveyttä alueella, joka tiedettiin alustavasti soveltuvaksi (aukkomäärä 5 % ja 10 %).



Kuva 1. Tutkimuksiin käytettyjä Ruduksen betonikiviä (Luostarikivi h80 x 68 x 208 mm³).

2.1.1.1 Saumamateriaalit, -leveydet ja tasauskerrokset

Saumamateriaaleina betonikivitutkimuksissa käytettiin Rudus Oy:n vesiseulottua (VS) 1/5 mm sepeliä sekä kaupallista komposiittisaumamateriaalia. 1/5 mm sepeliä tutkittiin saumaleveyksillä 2,7 mm (aukkomäärä 5 %) ja 5,6 mm (aukkomäärä 10 %). Komposiittisaumamateriaalia tutkittiin saumaleveydellä 5,6 mm (aukkomäärä 10 %).

Materiaalien 1/5 mm laatuseloste on esitetty liitteessä 5. Komposiittisaumamateriaali oli kaupallinen tuote 'Grepur 294 UV'.

Betonikivilaattojen tutkimuksissa käytettiin kaikkien saumamateriaalien yhteydessä 1/5 mm VS sepeliä tasauskerroksessa. Lämpäisevää kiviainesta käytettiin siis myös sidotun komposiittisaumamateriaalin tapauksessa.

2.1.1.2 Vedenläpäisevyys

Vedenläpäisevyys mitattiin standardin [ASTM C1701/C1701M: 2009] mukaisesti. Menetelmässä tunnettu määrä vettä imeytettiin tunnetun pinta-alan läpi käyttäen menetelmään suunniteltua 'single-ring' mittalaitetta. Vesipatsaan pinta pidettiin mittauksen ajan vakiona ja imeytymiseen kulunut aika mitattiin 0,1 s tarkkuudella. Vedenläpäisevyys laskettiin kaavan (1) mukaisesti.

$$I = \frac{KM}{(D^2 * t)} \quad (1)$$

missä:

I on vedenläpäisevyys, mm/h
M mittaukseen käytetyn veden massa, kg

D 'single-ring' laitteen sisähalkaisija
 t punnitun vesimäärän imeytymiseen kulunut aika, s
 K kerroin, $4\,583\,666\,000\text{ (mm}^3\text{s)/(kg}\times\text{h)}$.

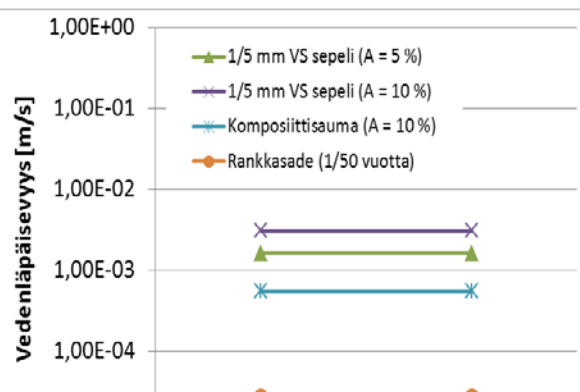
Vedenläpäisevyysarvot muutettiin yksiköiksi m/s. Taulukossa 1 on esitetty vedenläpäisevyysarvot betonikivipinnoille tutkituilla saumoilla.

Taulukko 1. Vedenläpäisevyysarvot betonikivipinnoille tutkituilla saumoilla.

Sauman tiedot	Vedenläpäisevyys [m/s]
1/5 mm VS sepeli (A = 5 %)	$1,6 \times 10^{-3}$
1/5 mm VS sepeli (A = 10 %)	$3,1 \times 10^{-3}$
Komposiittisauma (A = 10 %)	$5,5 \times 10^{-4}$

Vedenläpäisevyys oli odotetusti suurempi 10 % saumalla kuin 5 % saumalla. Komposiittisauma läpäisi vettä hitaammin kuin soramurskesauma, mutta vedenläpäisevyys oli kuitenkin hyvällä tasolla. Kaikki tutkitut saumamateriaalit läpäisivät puhtaina vettä siten, että ne selviytyisivät hyvin esimerkiksi kerran 50 vuodessa tapahtuvasta rankkasadetapahtumasta, jonka intensiteetti on $2,75 \times 10^{-5}$ m/s eli 275 l/s/ha (99 mm/h).

Kuvasta 2 voidaan nähdä, että vettä läpäisevällä saumalla vedenläpäisevyys on oleellisesti suurempi kuin valittu mitoitusrankkasade. Tämä tarkoittaa myös sitä, että tietty määrä sauman tukkeutumista ei vielä vaikuta merkittävästi pinnan toimintaan. Tuloksia tukkeutumisen ja puhdistuksen vaikutuksista vedenläpäisevyyteen esitetään jäljempänä kohdassa 3 (*Simulointitestausta (Rig)*).



Kuva 2. Vedenläpäisevyysarvot betonikivipinnoille eri saumamateriaaleilla ja vertailuna valittu mitoitusrankkasade.

2.1.2 Luonnonkivipinnat

Luonnonkivipintojen tutkimuksiin käytettiin Rudus Oy:n noppakiviä (sivu n. 10 cm). Noppakivet asennetaan yleensä saumamateriaalilla, joka ei ole erityisen hyvin vettä läpäisevää, koska se sisältää myös hienoainesta (0/4 mm hiekka). Ne voidaan kuitenkin periaatteessa asentaa myös vettä läpäisevällä saumalla. Kuvassa 3 on esitetty tutkimuksissa käytetty noppakivi.



Kuva 3. Tutkimuksissa käytetty noppakivi (n. 10 cm kivi).

2.1.2.1 Saumamateriaalit, -leveydet ja tasauskerrokset

Noppakivipintoja tutkittiin kolmella eri saumamateriaalilla, jotka olivat 0/4 mm hiekka, 1/5 mm VS sepeli sekä komposiittisaumamateriaali (kaupallinen tuote 'Grepur 294 UV'). Asennus-saamana käytettiin saumaleveyttä 10 mm.

Tasauskerroksena käytettiin 50 mm paksuista kerrosta saumamateriaalia paitsi komposiittisauman yhteydessä. Komposiittisauman yhteydessä käytettiin 1/5 mm VS sepeliä eli vettä hyvin läpäisevää kiviainesta.

2.1.2.2 Vedenläpäisevyys

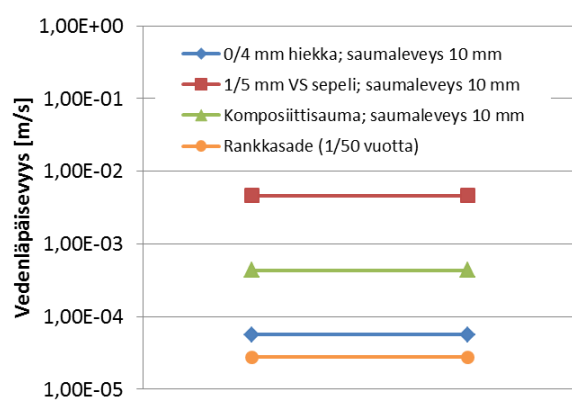
Vedenläpäisevyys mitattiin myös luonnonkivipinnoille betonikivipinnoille tarkoitetun standardin [ASTM C1701/1701M: 2009] mukaisesti. 'Single ring' renkaan tiivistykseen jouduttiin kiinnittämään erityistä huomiota, koska kivien pinta oli epätasainen. Tiivistys onnistui kuitenkin hyvin käyttämällä tarvittava määrä tiivistykseen käytettävää putkimiehen kittiä. Vuotoja renkaan välistä ei esiintynyt mittausten yhteydessä. Vedenläpäisevyysarvot laskettiin kaavan (1) mukaisesti. Taulukossa 2 on esitetty vedenläpäisevyysarvot luonnonkivipinnoille eri saumoilla.

Taulukko 2. Vedenläpäisevyys luonnonkivipinnoille eri saumamateriaaleilla.

Sauman tiedot	Vedenläpäisevyys [m/s]
0/4 mm hiekka; saumaleveys 10 mm	$5,6 \times 10^{-5}$
1/5 mm VS sepeli; saumaleveys 10 mm	$4,6 \times 10^{-3}$
Komposiittisauma; saumaleveys 10 mm	$4,3 \times 10^{-4}$

Vedenläpäisevyys luonnonkivipinnoille oli odotetusti puhtaana hyvä käytettäessä 1/5 mm vesiseulottua sepeliä saumamateriaalina. 0/4 mm hiekka, jota tyypillisesti käytetään luonnonkivien saumamateriaalina, oli tutkituista materiaaleista hitaimmin vettä läpäisevää. Komposiittisaumamateriaali läpäisee vettä hyvin, mutta kuitenkin hitaammin kuin 1/5 mm vesiseulottu sepeli.

Kuvassa 4 vedenläpäisevyksiä on verrattu rankkasateeseen $2,75 \times 10^{-5}$ m/s (275 l/s/ha). Voidaan nähdä, että vettä läpäisevän sauman tapauksessa luonnonkivipinnan vedenläpäisevyys on selvästi suurempi kuin valittu mitoitusarvo ja myös varaa tietylle määrälle sauman tukkeutumista on. Sen sijaan normaalin luonnonkivipinnan (saumoissa 0/4 mm hiekka) vedenläpäisevyys on erittäin lähellä mitoitusrankkasateen arvoa.



Kuva 4. Vedenläpäisevyysarvot luonnonkivipinnoille eri saumamateriaaleilla ja vertailuna valittu mitoitusrankkasade.

2.2 Avoin asfaltti

2.2.1 Johdanto

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli kokemuksen perusteella räätälöidä avoimia asfaltteja, jotka soveltuvat nimenomaan hulevesirakenteisiin infrarakentamisessa. Tutkimuksen toteuttamiseen osallistuvat Lemminkäinen Infra Oy ja VTT. Avoimet asfaltit suunnitteli ja valmisti Lemminkäinen Tuusulan keskuslaboratoriossa omiin sekä VTT:n tutkimuksiin.

Avoimen asfaltin laboratoriokokeiden tarkoituksena oli saada kokeellista tietoa avoimen asfaltin ominaisuuksista ja käyttäytymisestä itsenäisenä materiaalina sekä päällysrakenteen osana sekä yksi- että kaksikerroksisena päällysteenä. Koostumusten valinta perustui Lemminkäisen kokemuksiin avoimista asfalteista. Tutkimukset painottuivat valmistettujen avointen asfalttien vedenläpäisevyysominaisuuksien määrittämiseen sekä puhtaana, tukkeutuneena että puhdistettuna. Lisäksi tutkittiin avointen asfalttien huokoisuutta (tyhjätilaa), mekaanisia ominaisuuksia ja jäädytys-sulatuskestävyyttä. Laboratoriokokeiden tuloksia on tarkoitus käyttää tulevaisuudessa hulevesikohteiden suunnittelussa ja kaupunkien pilottikohteissa käytettävien avointen asfalttipäällysteiden valinnassa.

2.2.2 Asfalttiseokset, koekappaleet ja niiden valmistus (Lemminkäinen)

Suunnittelun lähtökohtana oli kehittää ja räätälöidä Lemminkäisen keskuslaboratoriossa avoimia asfaltteja hulevesien hallintaan rakennettavien koekohteiden käyttötarpeiden mukaisesti. Suunnittelu sisälsi asfaltin reseptin suunnittelun eli kiviaineksen, sideaineen (bitumi) ja lisäaineiden optimointia, laattojen ja näytteiden valmistusta ja testausta. Suunnitteluvaiheen tuloksena kehitettiin kolme erityyppistä avoimen asfaltin massaa, joissa runkoaineksen rakeisuuskoostumus sekä bitumin ja lisäaineiden määrä optimoitiin tarpeiden mukaiseksi. Lisäksi valmistettiin ja testattiin asfalttilaattoja ja näytteitä.

Tutkimuksien edetessä suunnittelu ja testaus osoittautuivat haastavaksi. Valmistetut avoimet koeasfaltit käyttäytyivät eri tavalla kuin normaalitiepäällysteet ja siksi jouduttiin tekemään useita kokeita tavoiteltujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Tyhjätiloissa oli hajontaa ja ne vaihtelivat $\pm 3-4$ % yksikköä eri valmistuserissä. Tyhjätiloissa päästiin kuitenkin halutulle tasolle.

Kolme kehitettyä avointa asfalttilaattaa olivat seuraavat:

- AA8 – ”tiivis” – pintakerros (kulutuskerros) – Lempore 8T
 - Liikennöidyt kohteet: 50–1000 autoa/d eli KVL (keskimääräinen vuorokausiliikenne)
 - Normaali kerrospaksuus työkohteessa: 30–40 mm
 - Kiviaineksen maksimiraekoko 8 mm

- AA8 – ”avoin” – pintakerros (kulutuskerros) – Lempore 8P
 - Ei liikennöidyt kohteet: 0-50 autoa/d (KVL)
 - Normaali kerrospaksuus kohteessa: 30–40 mm
 - Kiviaineksen maksimiraekoko 8 mm

- AA16 – pohjakerros (pintakerrosten alusta) – Lempore 16B
 - Normaali kerrospaksuus työkohteessa: 40–70 mm
 - Kiviaineksen maksimiraekoko 16 mm.

Lemminkäisen avoimen asfaltin tuotenimi on Lempore. Tässä tutkimuksessa kehitetyt Lempore-päällysteet täyttävät eurooppalaiselle AA-asfaltille laaditun tuotestandardin vaatimukset (EN 13108-7). Tiivis AA8-laatu tässä yhteydessä tarkoittaa *tiivimpää huokosrakennetta* kuin avoimessa AA8-laadussa, eikä se ole missään määrin ns. tiivisasfalttia (esim. Lemdense, ABT), joka on vettä läpäisemätön asfalttilaatu. Tiivis AA8-laatu on vettä hyvin läpäisevä päällyste, jonka kulumiskestävyys on *tiivimpänä* pintarakenteena parempi kuin avoimen AA8:n.

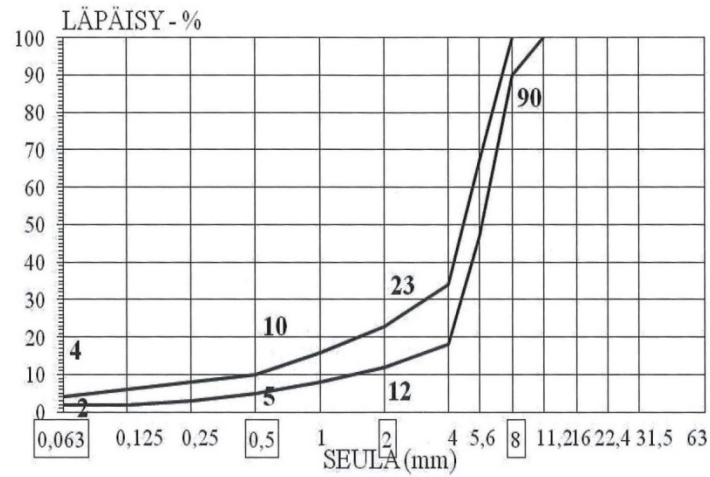
Asfalttimassat valmistettiin Lemminkäisen keskuslaboratorion asfalttisekoittajalla 160 °C lämpötilassa. Asfalttimassasta valmistettiin asfalttilaattoja (500mm x 500 mm) keinujuyrällä standardin SFS-EN 12697-33 mukaisesti. Asfalttilaatasta porattiin näytteitä (eli porapaloja) testausmenetelmien vaatimusten mukaisesti. Sen lisäksi joihinkin testimenetelmiin valmistettiin näytteitä asfalttimassasta Marshall-iskutiivistyksellä menetelmän SFS-EN 12697-34 mukaisesti.

VTT:n tutkimuksia varten valmistettiin asfalttilaattoja (500 x 500 mm) yhteensä viisi: kaksi kaksikerroksista laattaparia (paksuus 40 mm + 50 mm) ja kolme yksittäistä yksikerroksista laattaa (paksuus 60 mm). Kaikista kolmesta seoksesta toimitettiin lisäksi 20–21 kpl halkaisijaltaan noin 100 mm yksikerroksista porapalaa (60–65 mm). Porapalat valmistettiin testausmenetelmien vaatimaan paksuuteen. Sen sijaan yksi- ja kaksikerrosalat valmistettiin vastaamaan käytännön kerrospaksuutta.

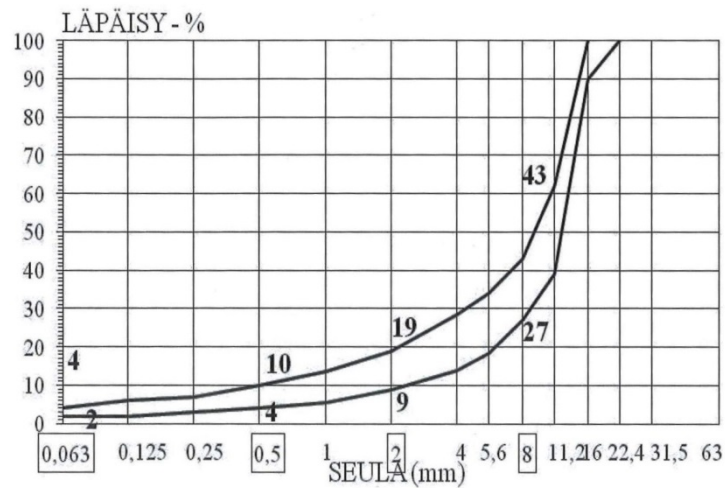
Valmiit asfalttilaatat ja porapalat toimitettiin VTT:lle Espoon tutkimushalliin kevään 2014 aikana. Ne säilytettiin ilmastavasti vaakatasossa noin 24 asteen lämmössä.

2.2.3 Asfalttiseosten rakenne

Kunkin asfalttiseoksen rakenne poikkesi toisistaan käytetyn raekoon mukaisesti. Pintaosassa käytettävät avoin ja tiivis asfaltti oli valmistettu rakeisuudesta AA 8, ks. kuva 5 (Asfalttinormit 2011). Avoin ja tiivis rakenne poikkesivat kuitenkin toisistaan tyhjätilan perusteella, mikä on erotettavissa esimerkkiporapalojen leikkauspinnasta kuvista 7 ja 8. Pohjassa käytetyssä laatussa raekoko oli suurin, rakeisuus AA 16, ks. kuva 6 (Asfalttinormit 2011) ja sen huokoisuus oli silminnähtävän suuri, kuva 9.



Kuva 5. Avoimen asfaltin AA 8 massan rakeisuuden ohjealue ja läpäisyprosentit (PANK 2011).



Kuva 6. Avoimen asfaltin AA 16 massan rakeisuuden ohjealue ja läpäisyprosentit (PANK 2011).



Kuva 7. Avoin asfaltti, avoin pintamassa Lempore 8P. Esimerkkiporapala ylhäältä ja sivulta.



Kuva 8. Avoin asfaltti, tiivis pintamassa Lempore 8T. Esimerkkiorapala ylhäältä ja sivulta.



Kuva 9. Avoin asfaltti, pohjamassa Lempore 16B. Esimerkkiorapala ylhäältä ja sivulta.

2.2.4 Lemminkäisen laboratoriossa tehdyt tutkimukset (Lemminkäinen)

Lemminkäisen keskuslaboratoriossa tutkittiin avoimesta asfaltista seuraavat ominaisuudet

- | | |
|--|-----------------|
| • Massan tiheys | SFS-EN 12697-5 |
| • Päällysteen tiheys | SFS-EN 12697-6 |
| • Tyhjätila (ulkomitoista ja IPK) | SFS-EN 12697-8 |
| • Halkaisuvetolujuus (HVL) | SFS-EN 12697-23 |
| • Vedenkestävyys (Q-arvo) | SFS-EN 12697-23 |
| • Deformaatiokestävyys (Jaksollinen viruma, Creep) | SFS-EN 12697-25 |
| • Kulumiskestävyys (Prall) | SFS-EN 12697-16 |
| • Jäykkyysmoduuli (IT-CY) | SFS-EN 12697-26 |

Tyhjätila kuvaa päällysteen huokoisuutta ja epäsuorasti tiiveyttä. Se määritetään laskennallisesti massan tiheyden ja porapalan ulkomittojen perusteella.

Lujuusominaisuuksien määrittämiseksi avoimista asfalteista määritettiin **halkaisuvetolujuudet** (HVL). Halkaisuvetolujuuskokeessa mitattuja suureita käytetään massan koossapysyvyyden, jäykkyyden ja vedenkestävyyden arvosteluparametreina. Halkaisuvetolujuus kuvaa asfaltin koossapysyvyyttä lähinnä vetojännityksiä vastaan. Asfaltin **vedenkestävyyttä** osoittaa Q-arvo, joka saadaan lasketuksi märkänä ja kuivana määritettyjen HVL-lukujen suhteesta.

Päällysteen **kulumiskestävyys** määritettiin porapaloista Prall-menetelmällä. Kulumiskestävyydellä simuloidaan nastarenkaiden kuluttavaa vaikutusta asfaltin pintaan. Testimenetelmä on tarkoitettu tieasfalteille ja koska testi on raju, niin se ei sovellu käytettäväksi avoimille asfalteille standardin mukaisesti tehtynä.

Päällystenäytteiden deformaatiokestävyyttä määritettiin jaksollisella virumiskokeella 40 °C:n lämpötilassa. Koekappaleita kuormitettiin jaksoittaisella akselin suuntaisella kuormituksella. Koekappaleessa tapahtuva muodonmuutos (kokoonturistuma) mitattiin tietyin kuormitusjaksovälein. Tämäkin testimenetelmä on tarkoitettu lähinnä tieasfalteille ja kuormitus avoimelle asfaltille on liian suuri. Lemminkäisen keskuslaboratoriossa muutettiin testiolosuhteita siten, että standardimenetelmän mukainen kuormitus puolitettiin ja vertailtiin näitä tuloksia keskenään.

Viskoelastisten materiaalien, kuten avoimien asfalttien jäykkyyttä ja kykyä kantaa kuormaa kuvaa jossain määrin jäykkyyshmoduuli. Se on laajempi käsite kimmomodulille, sillä se on ajan lisäksi myös lämpötilan funktio.

Taulukoihin 3 ja 4 on koottu Lemminkäisen keskuslaboratoriossa tehtyjen testien tulokset.

Taulukko 3. VTT:lle toimitettujen näytteiden (porapalat) ominaisuudet.

Porapala	Tiheys, keskiarvo	Tiheys, min.-max.	Tyhjättila, keskiarvo	Tyhjättila, min.-max.
Menetelmä	SFS-EN 12697-5	SFS-EN 12697-5	SFS-EN 12697-8	SFS-EN 12697-8
Yksikkö	kg/m ³	kg/m ³	%	%
Lempore 8P	2021	1972–2061	25,5	24,1–27,3
Lempore 8T	2147	2121–2186	20,7	19,3–21,7
Lempore 16B	1937	1870–1998	21,4	18,9–24,1

Taulukko 4. Lemminkäisen testaustulokset. TT = tyhjättila.

Massa/ Porapala	HVL Kuiva /märkä	HVL Kuiva /märkä	Q-arvo	Creep, Deform. Norm. (3600 cycl.)	Creep, Deform. Mod. (1800 cycl.)	Jäykkyysh- moduuli
Menetelmä	SFS-EN 12697-23 Creep	SFS-EN 12697-23 Marshall	SFS-EN 12697-23	SFS-EN 12697-25	SFS-EN 12697-25	SFS-EN 12697-26
Yksikkö	kPa	kPa	%	%	%	MPa
Lempore 8P	533/487 (TT 25,4)	-	91,4	-	5,5 (TT 25,2)	2179 (TT 25,3)
Lempore 8T	935/821 (TT 15,1)	985/1081 (TT n. 13)	87,8 (Creep) 109,8 (Marshall)	5,5 (TT 17,4)	2,7 (TT 16,8)	2973 (TT 21,0)
Lempore 16B	-	934/772 (TT 15,2)	82,7	-	3,2 (TT 14,3)	2161 (TT 20,2)

2.2.4.1 Tutkimushavainnot ja tulosten arviointi (Lemminkäinen)

Avointen asfalttimassojen suunnittelutyössä (suhteituksessa) kohdattiin epäloogisuuksia odotuksiin nähden. VTT:n tutkimuksiin valmistettujen asfaltinäytteiden tyhjättilat vaihtelivat

välillä 21–26 %. Avoimen pintarakenteen (Lempore 8P) tyhjätila oli 26 % ja tiiviimmän pintarakenteen (Lempore 8T) 21 %. Pohjarakenteen (Lempore 16B) tyhjätilaksi saatiin 21 %.

Avoimista asfalteista valmistettujen asfalttilaattojen mitatut tyhjätilat eivät olleet odotetun mukaiset. Kokemusperäisesti odotettiin, että avoin pohja-asfaltti Lempore 16B (AA 16) olisi ollut selkeästi kaikkein ”avonaisin” ja että sillä olisi ollut suurin tyhjätila mutta näin ei ollut. Vedenläpäisevyytulosten mukaan se oli kuitenkin läpäisevin päällyste. Avoimet pinta-asfaltit Lempore 8P (AA 8 ”avoin”) ja Lempore 8T (AA 8 ”tiivis”) käyttäytyivät keskenään odotetusti sekä tyhjätilojen että vedenläpäisevyyksien suhteen. Vedenläpäisevyyksimittaukset (ks. kohta 2.2.6) antavat loogiset ja odotetut keskinäiset järjestykset eri avointen asfalttipäällysteiden välillä – *vedenläpäisevyys*: Lempore 16B > Lempore 8P > Lempore 8T.

Havaintojen ja tulosten mukaan voidaan arvioida että karkeamman avoimen päällysteen, Lempore 16 (AA16), huokokset ja veden kulkeutumisreitit poikkeavat hienorakeisista asfalttipäällysteistä (Lempore 8P ja Lempore 8T).

Avoimen asfaltin lujuusominaisuuksien määrittämiseksi tutkittiin halkaisuvetolujuuksia (HVL). Lähtökohtaisesti testimenetelmänä HVL:n määritystarkkuus on heikohko ja tuloksissa muodostuu helposti hajontaa. Tässä tutkimuksessa saadut tulokset olivat kuitenkin loogisia keskenään. Lempore 8T (AA8 ”tiivis”) ja Lempore 16B (AA16 pohja) -päällysteiden HVL-arvot olivat odotetun mukaisesti parempia kuin Lempore 8P (AA8 ”avoin”) -päällysteellä (ks. taulukko 4). Tulosten perusteella voidaan arvioida, että lujuusominaisuudet ovat hyvällä tasolla verrattuna normaaleihin katu- ja tiepäällysteisiin (mm. AB, SMA).

Lisäksi avoimen asfaltin jäykkyyttä ja kykyä kantaa kuormaa arvioitiin jäykkyys-moduulimäärittelyksellä. Kaikkien tutkittujen asfalttilaattojen (Lempore 8T, 8P ja 16B) jäykkyysmoduulit olivat hyvällä tasolla (2161–2973 MPa) vastaten suunnilleen normaalien katu- ja tiepäällysteiden (mm. AB, SMA) testituloksia.

Avoimen asfaltin deformaatiokestävyys (jaksollinen viruminen, Creep) määritettiin ensin menetelmästandardin mukaisesti, jolloin tulos avoimelle asfaltille AA8 (avoin) oli 5,5 %. Em. tulos oli huono, mutta se tulkittiin enemmänkin testimenetelmäongelmaksi. Sen jälkeen testaus tehtiin pienemmillä kuormituskerroilla, jolloin määritystulokset eri asfalttilaattojen välillä olivat loogisia keskenään (ks. taulukko 4).

Kulumiskestävyys (Prall) määritettiin AA8 ”tiivis”-päällysteelle (Lempore 8T). Tulos oli 56 ml. AA8-asfaltin nastarengaskulutuskestävyys oli odotetusti heikko. Muita asfalttilaattuja (Lempore 8P ja Lempore 16B) ei tutkittu Prall-menetelmällä.

Yleisesti voidaan todeta, että testimenetelmistä tiheys, tyhjätila, HVL ja jäykkyysmoduuli soveltuvat hyvin avoimien asfalttien ominaisuuksien määrittämiseen. Sen sijaan jos deformaatiokestävyyttä (Creep) ja/tai kulutuskestävyyttä (Prall) halutaan käyttää avoimen asfaltin laadunvalvontamenetelmänä, niin testiolosuhteita tulisi muuttaa avoimille asfalteille sopiviksi.

Kuten edellä on kuvattu normaali tie- ja katuasfalteille kehitetyt testimenetelmät ovat liian rajuja avoimille asfalteille. Testeissä pienet (pora)näytteet eivät ole tuettuja sivuiltaan. Siksi kovakouraiset testit, varsinkin kulumiskestävyys- ja deformaatiotestit, rikkovat näytteen. Käytännössä avoimet asfalttipäällysteet ovat aina tuettuja sivuiltaan. Käytännössä avoimilla asfalttipäällysteillä on varsin hyvä kestävyys muodonmuutoksia vastaan (deformaatiokestävyys) ja siten niiden vaikutus päällysrakenteen kantavuuteen ei juurikaan poikkea normaali-päällysteistä. Avointen asfalttipäällysteiden kulumiskestävyys nastarengaskulutusta vastaan on kuitenkin varsin rajoitettu. Siksi avoimia asfalttipäällysteitä ei tulisi käyttää kohteissa joissa on vilkas liikenne tai joissa ajonopeudet ovat suuria. Avoimia päällysteitä ei tulisi käyttää liikennöidyissä kohteissa joiden liikennemäärä (KVL) on >1000.

2.2.5 Jäädytys-sulatuskokeet (VTT)

Kaikille kolmelle asfalttiseokselle suoritettiin PANK-4306 mukainen asfalttimassan jäädytys-sulatuksen kestävyyskoe. Menetelmänä oli B1, jossa jäädytys-sulatussyklejä ohjattiin automaattisesti jäätymisen ja sulamisen tapahtuessa vedessä. Jäädytys-sulatus alkoi 6.6.14 ja päättyi 16.6.14. Halkaisuvetolujuuskokeet tehtiin referenssien osalta 16.6.14. ja syklettujen näytteiden osalta 17.6.14.

Kokeessa käytettiin halkaisijaltaan noin 100 mm kokoisia porapaloja. Kustakin asfalttiseoksesta (pinta avoin, pinta tiivis, pohja) käytettiin viisi porapalaa referenssiksi ja kahdeksan porapalaa varsinaiseen jäädytys-sulatuskokeeseen. Porapalat valittiin niin, että näytteiden tyhjätilajakauma oli mahdollisimman monipuolinen. Näytteitä varastoitiin ennen kokeen alkamista +23...+24 °C lämpötilassa. Referenssinäytteiden säilytyslämpötila oli jäädytys-sulatuskokeen aikana (10 päivää) +4...+6 °C. Kaikki testattavat näytteet temperoitiin samaan kosteuteen ja lämpötilaan ennen halkaisuvetolujuuden testausta.

Poikkeamat PANK-4306 menetelmäkuvauksen mukaisesta koejärjestelystä:

- Näytteiden varastointi ennen koejärjestelyä lämpötilassa +23...+24 °C.
- Jäädytys-sulatuskokeen lämpötilakierto automaattisesti lämpötilaa säätävässä (syklaavassa) pakastearkussa, ei varsinaisessa jäädytys-sulatuskokeeseen tarkoitettussa arkussa. Tällöin lämpötilasykliin asennus tehtiin käsin ja lämpötilojen muutoksia seurattiin ja tallennettiin erillisellä laitteella.
- Lämpötilan mittaus muovipurkissa olevan asfalttiporapalan sisältä: muovipurkki meni rikki n. 8 syklin jälkeen, joten porapalan sisäinen lämpödata ko. ajanhetken jälkeen oli epäluotettavaa. Arkun ilmalämpötila seurasi kuitenkin normaalia, rikkoutumista edeltävää rytmää, joten todennäköisesti varsinaisissa koestettavissa porapaloissa lämpötilanvaihtelu pysyi myös vakaana.
- Punnituksia ei tehty halkaisuvetolujuuden määrittämisvaiheella.

Muutoin koejärjestelyt suoritettiin menetelmäkuvauksen PANK-4306 B1 mukaisesti.

Taulukossa 5 on esitetty jäädytys-sulatuskokeen näytteiden ominaisuuksien keskiarvotulokset.

Taulukko 5. Jäädytys-sulatuskokeen näytteiden ominaisuudet, keskiarvot. JS = jäädytys-sulatuskokeen näytteet, REF = referenssinäytteet.

Massatyyppi	N	Maksimiraekoko keskiarvo [mm]	Tyhjätila keskiarvo [%]	Korkeus keskiarvo [mm]	Halkaisija keskiarvo [mm]	Massa kuivana, keskiarvo [g]	Massa JS-vaiheen jälkeen kosteana, keskiarvo [g]
Lempore 8P JS	8	na	25,6	65,00	102,0	1072	1125
Lempore 8P REF	5	na	25,6	66,7	102,0	1100	1150
Lempore 8T JS	7	na	20,9	64,04	102,0	1121	1173
Lempore 8T REF	4	na	20,5	63,20	102,0	1111	1160
Lempore 16B JS	8	na	21,4	68,65	102,2	1078	1115
Lempore 16B REF	5	na	21,4	67,56	102,2	1072	1103

Taulukossa 6 on esitetty Jäädytys-sulatuskokeeseen liittyvien halkaisuvetolujuuskokeiden tulokset, keskiarvot ja hajonnat. Liitteessä 1 on esitetty PANK-4306 mukaiset asfalttiporapalojen jäätymis-sulamiskokeiden yksittäiset tulokset.

Taulukko 6. Jäädytys-sulatuskokeeseen liittyvien halkaisuvetolujuuskokeiden tulokset, keskiarvot ja hajonnat. JS = jäädytys-sulatuskokeen näytteet, REF = referenssinäytteet.

Massatyyppe	Halkaisuvetolujuus keskiarvo [kPa]	Halkaisuvetolujuus hajonta	Halkaisuvetolujuus hajonta [%]	Jäätymis-sulamis-kestävyys keskiarvo [%]
Lempore 8P JS	920,3	64,5	8,4	100,2
Lempore 8P REF	918,6	80,0	10,5	
Lempore 8T JS	1336,7	57,0	5,1	96,0
Lempore 8T REF	1392,5	69,0	6,0	
Lempore 16B JS	1028,4	180,0	21,1	100,1
Lempore 16B REF	1027,8	233,8	27,4	

Kuvissa 10–12 on esitetty esimerkit jäädytys-sulatuskokeen näytteistä halkaisuvetolujuuskokeen jälkeen kunkin AA-koostumuksen osalta.



Kuva 10. Avoin asfaltti, Lempore 8T. Vasen: Jäädytys-sulatuskokeen näyte halkaisuvetolujuuskokeen jälkeen. Oikea: Referenssinäyte halkaisuvetolujuuskokeen jälkeen.



Kuva 11. Avoin asfaltti, Lempore 8P. Vasen: Jäädytys-sulatuskokeen näyte halkaisuvetolujuuskokeen jälkeen. Oikea: Referenssinäyte halkaisuvetolujuuskokeen jälkeen.



Kuva 12. Avoin asfaltti, Lempore 16B. Vasen: Vasen: Jäädytys-sulatuskokeen näyte halkaisuvetolujuuskokeen jälkeen. Oikea: Referenssinäyte halkaisuvetolujuuskokeen jälkeen.

2.2.6 Vedenläpäisevyyskokeet (VTT)

Kaikki vedenläpäisevyyskokeet suoritettiin VTT:n tutkimushallissa Espoossa kevään, kesän ja syksyn 2014 aikana. Taulukossa 7 on esitetty käytetyt koemenetelmät kullekin seokselle. Rig -kokeet tehtiin syksyllä 2014 (ks. kohta 3 (*simulointitestaus (Rig)*). Jäljempänä on esitetty standardeissa esitettyjen vaatimusten mukainen raportointi kustakin testimenetelmästä. Liitteessä 2 on esitetty vedenläpäisevyyskokeiden yksittäiset tulokset.

Taulukko 7. Avoimille asfalteille tehdyt vedenläpäisevyyskokeet.

Laatat	1. EN 12697-40 (In situ drainability)	2. ASTM C1701/C1701 M ("Single ring")	3. EN 12697-19 (Permeability of specimen)	4. Rig-kokeet ¹⁾
Lempore 8P laatta	x	x		
Lempore 8T laatta	x	x		
Lempore 16B laatta	x	x		
Lempore 8P porapala			x	
Lempore 8T porapala			x	
Lempore 16B porapala			x	
Lempore 8P + 16B 2-kerroslaatta	x	x		x
Lempore 8T + 16B 2-kerroslaatta	x	x		x

1) Rig-koe sisälsi sadetuskokeet, vedenläpäisevyyskokeet 1 ja 2 sekä tukkeutumiskokeet

Jokaiselle kolmelle yksittäiselle asfalttiseoslaatalle ja molemmille kaksikerroslaatoille tehtiin asfalttipäällysteiden in situ -mittaamiseen tarkoitettu vedenläpäisevyyskoe EN 12697-40 (*Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 40: In situ drainability*). Testissä alustan päälle asetetaan vesitiiviisti pystysuuntainen putki, jonka pohjassa on tulppa (kuva 13). Putkessa olevan veden määrä on kontrolloitu merkkiviivoin. Tulppa avataan ja halutun vesimäärän alustaan imeytymisen kesto mitataan sekunneissa merkkiviivojen avulla. Normaalisti koetta käytetään kenttäolosuhteissa. Laboratorio-olosuhteissa laatat olivat asetettu tasaisesti ilman kaltevuutta. Tiivistämiseen käytetty kuorma oli 119,5 kg, käytetyn laitteen tulokseen laskettu sarjavastusaika oli 1,4 sekuntia ja laitteistosta tapahtuvaa vuotoa ("parallel leakage time") ei tapahtunut. Kullekin laatalle ja laattayhdistelmälle testi toistettiin kolme kertaa. Testin tiivistelmä ja laattakohtaiset keskiarvotulokset on esitetty taulukossa 8.



Kuva 13. Vasemmalla: EN 12697-40 mukainen vedenläpäisevyyden mittausjärjestely. Oikealla: kuva standardin mukaisesta mittauslaitteesta (näkyv vasemmassa kuvassa keskellä).

Taulukko 8. Avointen asfalttien vedenläpäisevyyksien keskiarvot menetelmän EN 12697-40 mukaisesti mitattuna. Kaksikerroslaattoja oli kahdet rinnakkaiset kappaleet, merkittyinä /1 ja /2.

Tunniste	Mittausaika keskiarvo [s]	Suht. hydraulinen johtavuus, keskiarvo [s^{-1}]	Suht. hydraulinen johtavuus, keskihajonta
Lempore 8P	11,99	0,09	0,003
Lempore 8T	21,18	0,05	0,005
Lempore 16B	12,75	0,09	0,003
Lempore 8P + 16B/1	24,17	0,04	0,002
Lempore 8P + 16B/2	29,57	0,04	0,001
Lempore 8T + 16B/1	43,32	0,02	0,002
Lempore 8T + 16B/2	48,46	0,02	0,003

Jokaiselle kolmelle yksittäiselle asfalttiseoslaatalle ja molemmille kaksikerroslaatoille tehtiin läpäiseville betoneille tarkoitettu vedenläpäisevyyskoe ASTM C1701/C1701M-09 Standard Test for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete -standardin mukaisesti. Kyseisessä testissä mitataan tietyn vesimäärän alustaan imeytymisen kesto sekunneissa. Imeytyminen tapahtuu renkaan läpi, jonka mukaan testiä kutsutaan myös ”Single ring” -nimellä (kuva 14). Normaalisti koetta käytetään kenttäolosuhteissa. Kullekin laatalle ja laattayhdistelmälle testi toistettiin 3–4 kertaa standardissa suositellun kahden kerran sijaan. Esikastelukoe kesti kussakin tapauksessa alle 30 sekuntia. Käytetyn renkaan halkaisija oli 295 mm ja käytetty vesimäärä oli kaikissa mittauksissa 3,6 kg. Testin tulokset laattakohtaisina keskiarvoina on esitetty taulukossa 9.



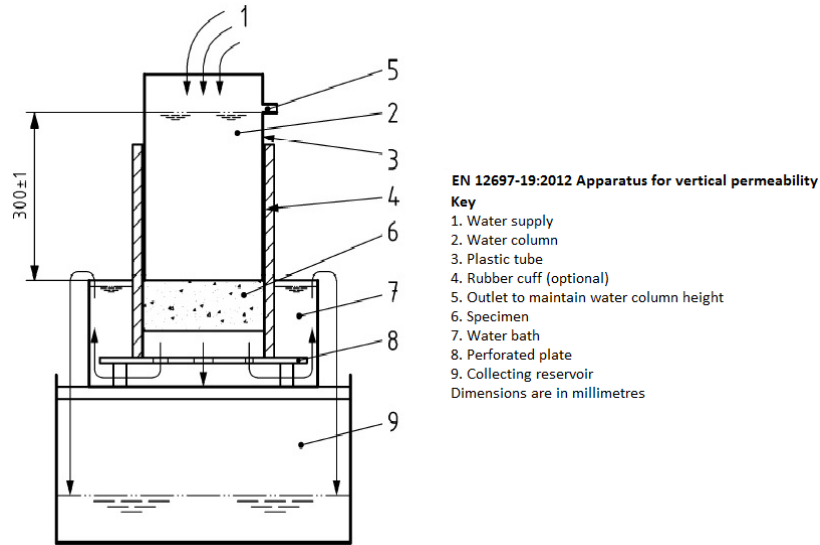
Kuva 14. ASTM C1701/C1701M-09 mukainen vedenläpäisevyyskoe.

Taulukko 9. Avoimen asfaltin vedenläpäisevyytulokset keskiarvoina menetelmän ASTM C1701/C1701M-09 mukaisesti mitattuna. Kaksikerroslaattoja oli kahdet rinnakkaiset kappaleet, merkittyinä /1 ja /2.

Tunniste	Mittausten lukumäärä N	Kulunut aika, keskiarvo [s]	Suotautumismäärä K, keskiarvo [m/s]	Suotautumismäärä hajonta
Lempore 8P laatta	3	88,5	5,98E-04	2,04E-04
Lempore 8T laatta	4	218,5	3,06E-04	1,19E-04
Lempore 16B laatta	3	66,0	4,00E-03	4,09E-05
Lempore 8P + 16B/1	3	121,0	4,48E-04	9,29E-05
Lempore 8P + 16B/2	3	140,6	3,86E-04	7,86E-05
Lempore 8T + 16B/1	3	275,2	1,96E-04	3,78E-05
Lempore 8T + 16B/2	3	417,1	1,35E-04	4,49E-05

Jokaisesta kolmesta asfaltiseoksesta valmistetuille porapaloille tehtiin tavanomaisille asfalttiporapaloille suunniteltu vertikaalisuuntainen vedenläpäisevyyskoe. Koejärjestely muistutti standardia EN 12697-19: Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 19: Permeability of specimen (procedure for vertical permeability). Suoraan standardissa esitettyä laitteistoa ei ollut saatavilla (ks. mallipiirustus kuva 15), joten laitteisto suunniteltiin ja toteutettiin itse (ks. kuva 16). Toiminnallisuudeltaan laitteet olivat kuitenkin lähes vastaavat; läpivirtaavan veden keruu toteutettiin VTT:n laitteistolla yksinkertaisemmin. Kaikkien porapalojen mittaus suoritettiin 10.6.2014. Standardissa yksittäisen näytteen mittaus toistetaan kaksi kertaa, tässä kokeessa mittauksia tehtiin kolme tai neljä yhdelle näytteelle. Mittausaika oli joko 60 tai 61 sekuntia ja tässä ajassa näytteen läpi valunut vesimäärä otettiin talteen ja punnittiin. Vertikaalinen vedenläpäisevyys [m/s] laskettiin Darcy'n lain mukaisesti standardissa esitetyllä tavalla.

Tulokset on esitetty kunkin mitatun porapalan keskiarvona sekä kunkin massan keskiarvona taulukossa 10. Standardin mukaan avoimen asfaltin vedenläpäisevyys on tavallisesti välillä $0,5 \times 10^{-3}$ m/s ja $3,5 \times 10^{-3}$ m/s. Mitattujen näytteiden vedenläpäisevyydet olivat keskimäärin annettujen rajojen mukaiset.



Kuva 15. Mallikuva EN 12697-19:2012 mukaisesta pystysuuntaiseen vedenläpäisevyyden mittaukseen tarkoitettusta laitteesta (EN 12697-19:2012, muokattu).



Kuva 16. Kuva standardia EN 12697-19:2012 mukailleessa kokeessa käytetystä laitteesta. Porapala ja vesiputki on yhdistetty mansetilla solukumia tiivisteenä käyttäen. Vesi valuu pienemmästä altaasta uloimpaan altaaseen, jonka pohjassa on ulostulo ja talteenotto vedelle.

Taulukko 10. Avoimen asfaltin vedenläpäisevyyskokeen tulokset EN 12697-19:2012 (pysyvuusuntainen läpäisevyys) mukaillusta kokeesta

Tunniste	Porapalan ID	Mittausaika [s]	Mittausten määrä	Vedenläpäisevyys K, keskiarvo [m/s]	Vedenläpäisevyys hajonta	Koko laatan keskiarvo [m/s]
Lempore 8P	1	60	3	2,35E-03	2,74E-04	2,57E-03
	2	60	3	2,94E-03	1,90E-04	
	25	60	4	2,43E-03	1,37E-04	
Lempore 8T	4	61	3	2,72E-03	2,66E-05	2,28E-03
	17	60	3	1,98E-03	1,05E-04	
	23	60	3	2,14E-03	2,36E-04	
Lempore 16B	8	60	3	3,49E-03	3,47E-04	2,95E-03
	13	60	3	3,04E-03	1,46E-04	
	18	60	4	2,32E-03	1,09E-04	

2.2.7 Yhteenveto ja johtopäätökset (VTT)

Jäädytys-sulamiskokeet

Jäädytys-sulatuskokeiden tulosten mukaan avoin asfaltti kestää keskimäärin hyvin jäädytys-sulamissyklejä, mutta tuloksissa oli suuri hajonta erityisesti avoimen pintaseoksen Lempore 8P ja pohjaseoksen Lempore 16B kohdalla; näissä massoissa oli myös suurempi tyhjätila. Asfalttinäytteiden halkaisuvetolujuuden standardi SFS-EN 12697-23 suosittaa, että näytteiden hajonta saisi olla korkeintaan 10 %, joten tätä suositusta ei näiden seoksien kohdalla täytetty. Erityisesti pohjaseoksessa hajonta oli jopa yli 20 %. Toisaalta seokset ovat varsinaisessa käytössä kaksikerrosrakenteen osana, jolloin pelkästään yksikerroksisesta porapalasta tehdyt kokeet eivät anna todellista kuvaa seoksien käyttäytymisestä todellisessa jäätymsulamisympäristössä. Halkaisuvetolujuuskoe on myös suunniteltu lähtökohtaisesti perinteisille asfalteille, ei avoimille.

Vedenläpäisevyyskokeet

Avoimen asfaltin vedenläpäisevyyskokeiden perusteella pohjaseoksen Lempore 16B vedenläpäisevyys oli suurin, kun läpäisevyyttä mitattiin ASTM:n single ring-kokeella ja EN 12607-19:n mukaisesti. Seuraavaksi suurin se oli avoimessa pintaseoksessa Lempore 8P ja odotetusti pienin tiiviissä pintaseoksessa Lempore 8T (ks. kuvat 17 ja 18).

Menetelmällä EN 12697-40 mitattuna Lempore 8P oli läpäisevin, seuraavaksi läpäisevin oli Lempore 16B ja Lempore 8T heikoiten läpäisevä. Tulokset ovat vertailtavissa taulukossa 11. Tuloksissa oli kuitenkin hieman hajontaa.

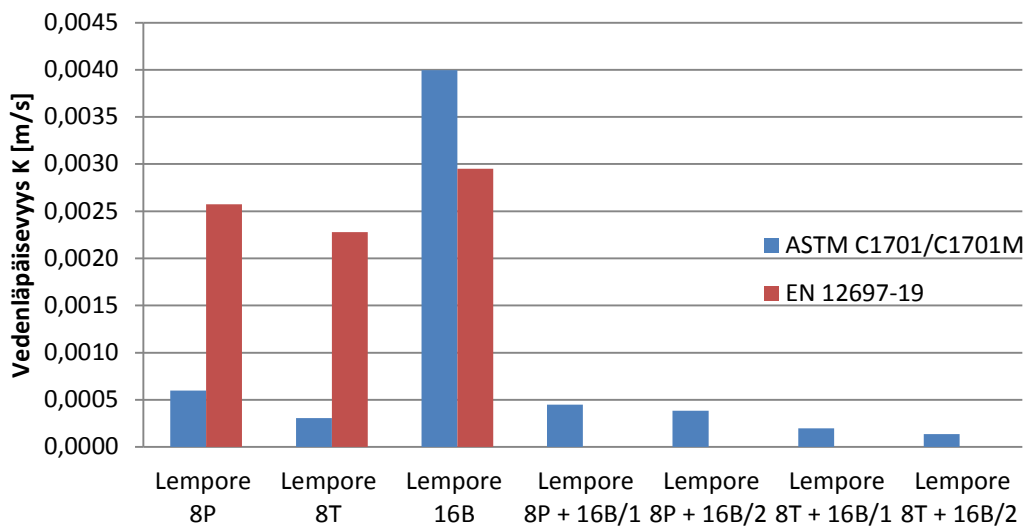
Kaksikerroksisten laattojen vedenläpäisevyys oli selvästi pienempi kuin yksikerroslaattojen. Sekä EN 12697-19- että ASTM C1701/C1701M -menetelmissä avoimen pintalaatan ja pohjalaatan yhdistelmä (Lempore 8P + 16B) läpäisi paremmin vettä kuin tiiviin pintalaatan ja pohjalaatan yhdistelmä (Lempore 8T + 16B). Näiden standardien mukaisissa vedenläpäisevyyslaskelmissa ei oteta päällysteen paksuutta huomioon, mutta sen vaikutus vedenläpäisevyyteen vaikuttaisi olevan merkittävä.

Eri mittausmenetelmät eivät olleet keskenään suoraan vertailukelpoisia. EN 12697-40 In situ drainability -standardissa tuloksena oli hydraulinen johtavuus (hydraulic conductivity HC, [s⁻¹]), kun taas ASTM C1701/C1701M ja EN 12697-19 mittasivat vedenläpäisevyyttä (permeability K, [m/s]). Olennainen ero mittausmenetelmissä oli myös asfaltin pinnan päälli-

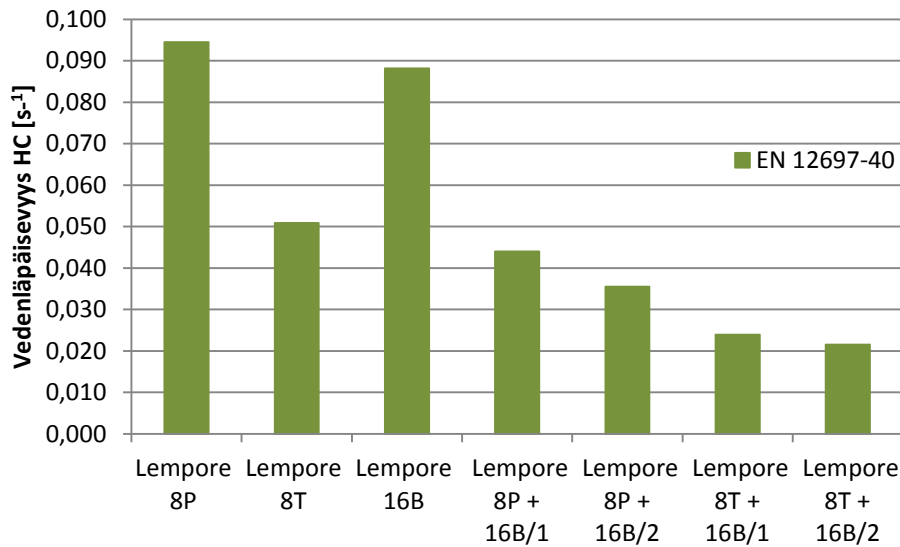
sen vedenpaineen määrä mittaussprosessin aikana. Menetelmissä ASTM C1701/C1701M ja EN 12697-19 vedenpaine on vakio mittauksen ajan, mutta menetelmässä EN 12697-19 paine pienenee mittauksen aikana. Tämä ominaisuus vaikuttaa menetelmien vertailukelpoisuuteen, sillä vedenpaine vaikuttaa veden tunkeutumismopeuteen huokoisessa alustassa.

Taulukko 11. Vedenläpäisevyysskoekkeiden keskiarvotulosten vertailu.

Laatta/porapala	1. EN 12697-40 (In situ drainability) HC [s ⁻¹]	2. ASTM C1701/C1701M ("Single ring") K [m/s]	3. EN 12697-19 (Permeability of specimen) K [m/s]
Lempore 8P	0,095	5,98E-04	2,57E-03
Lempore 8T	0,051	3,06E-04	2,28E-03
Lempore 16B	0,088	4,00E-03	2,95E-03
Lempore 8P + 16B/1	0,044	4,48E-04	na
Lempore 8P + 16B/2	0,036	3,86E-04	na
Lempore 8T + 16B/1	0,024	1,96E-04	na
Lempore 8T + 16B/2	0,022	1,35E-04	na



Kuva 17. Vedenläpäisevyydet (K) ASTM C1701/C1701M (sininen pylväs) ja EN 12697-19 (punainen pylväs) mukaisesti määritettynä.

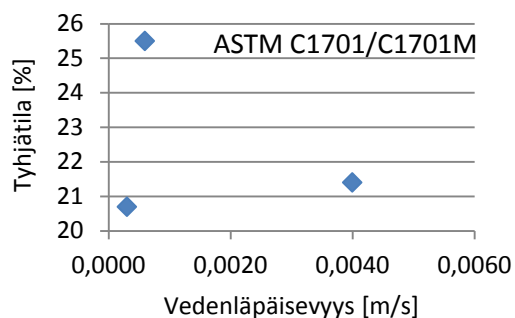


Kuva 18. Vedenläpäisevyydet (HC) EN 12697-40 mukaisesti määritettynä.

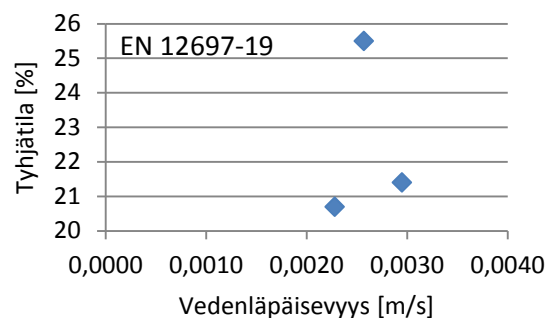
Vedenläpäisevyyden ja asfaltin tyhjätilan korrelaatiot on esitetty taulukossa 12 ja kuvaparissa 19a ja 19b. Tyhjätilojen keskiarvot ovat kaikkien VTT:lle toimitettujen porapalojen keskiarvo asfalttiseoksittain ja vedenläpäisevyydet (K; m/s) ovat menetelmien ASTM C1701/C1701M (laatat) ja EN 12697-19 (porapalat) mukaisesti mitattuja keskiarvoja eri asfalttilaaduille.

Taulukko 12. Vedenläpäisevyyden ja tyhjätilan välinen korrelaatio.

Tunniste	Vedenläpäisevyys, laattojen keskiarvo (ASTM C1701/C1701M) K [m/s]	Vedenläpäisevyys, porapalojen keskiarvo (EN 12697-19) K [m/s]	Tyhjättila, kaikkien VTT:lle toimitettujen porapalojen keskiarvo [%]
Lempore 8P	0,0006	0,0026	25,5
Lempore 8T	0,0003	0,0023	20,7
Lempore 16B	0,0040	0,0030	21,4



a)



b)

Kuva 19. Vedenläpäisevyyksien ja asfaltin tyhjätilan välinen korrelaatio: a) ASTM C1701/1701M mukaisesti mitattu vedenläpäisevyys; b) EN 12697-19 mukaisesti mitattu vedenläpäisevyys.

Korrelaatiotarkastelu osoittaa, että vedenläpäisevyys ei ole riippuvainen ainoastaan tyhjätilasta, vaan siihen vaikuttaa esimerkiksi tyhjätilojen väliset kulkureitit, jotka sallivat veden kulkeutumisen rakenteessa. Esimerkiksi asfaltin tukkeutuessa pelkkä tyhjättila ei kerro mate-

riaalin vedenläpäisykapasiteetista; vedenläpäisykyky tulisi määrittää erikseen esimerkiksi tässä tutkimuksessa mainituilla menetelmillä. Lisää soveltuvia menetelmiä on esitelty esimerkiksi viitteessä [Kuosa et al. 2013b].

2.3 Lämpäisevä betoni (LB)

2.3.1 Johdanto

Tässä CLASS-projektin kokeellisessa osuudessa kehitettiin ja testattiin vettä läpäiseviä betoneja (LB) lähinnä suomalaisia materiaaleja käyttäen ja Suomessa vakiintuneessa käytössä olevia betonin testausmenetelmiä soveltaen. Tavoitteena oli saada hyvä käsitys tästä betonityypistä ja sen valmistuksesta laboratoriossa sekä ominaisuuksista. Erityisesti tavoitteena oli tutkia LB:n jäädytys-sulatuskestävyyttä sekä ilman suolan vaikutusta että sen kanssa. Tähän liittyi uusina asioina sekä jäädytys-sulatusmenetelmien että suojahuokostuksen ja muun mikrorakenteen arviointi- ja analyysimenetelmien valinta ja näillä menetelmillä tehdyt testaukset. Tällä hetkellä ei ole vielä olemassa vakiintuneita tai standardoituja menetelmiä läpäisevän betonin jäädytys-sulatuskestävyyden arviointiin. Asiaa on kuitenkin jo tutkittu esimerkiksi U.S.A:ssa ja Kanadassa, joissa ilmasto voi olla tältä kannalta vaativa. [Kuosa et al. 2013a, Kevern et al. 2009, Yang et al. 2006, Delatte et al. 2007, Kuosa & Holt 2013]. Säilyvyysominaisuuksien lisäksi LB:n oleellisia tutkittuja ominaisuuksia olivat kokonaishuokoisuus, vedenläpäisevyys ja lujuusominaisuudet. Lisäksi tutkittiin sekä läpäisevän betonin tukkeutumisen että sitä seuraavan puhdistuksen vaikutusta vedenläpäisevyyteen. Nämä tutkimukset ja tulokset on esitetty pääosion kohdassa 3 (*Simulointitestausta (Rig)*).

Lämpäisevä betoni (LB), englanninkielisessä kirjallisuudessa ja standardeissa nimityksellä 'pervious concrete' (PC), on erikoisbetoni, jonka koostumus ja ominaisuudet poikkeavat oleellisesti tavanomaisesta betonista. Oleellisinta on, että kiviaineksen rakeisuus on suhteellisen tasarakeinen, jotta betoniin jää toisiinsa yhteydessä olevia suhteellisen suuria, huokosia (1–8 mm), joiden kautta vesi voi kulkeutua betonin läpi.

Tässä raportissa ei esitetä tietoja siitä, minkälainen LB:n koostumus tyypillisesti on ja mitkä sen ominaisuudet ovat suhteessa tavanomaiseen betoniin. Tässä ei myöskään käsitellä lähemmin jo käytössä olevia testausmenetelmiä. Nämä tiedot löytyvät CLASS-projektin State-of-the-Art raportoinneista, kirjallisuudesta ja ulkomaisista ohjeistuksista. [Kuosa et al. 2013a, Kuosa et al. 2013b]

Käytännössä LB:n koostumuksen valinta ja optimointi lähtee paikallisista materiaaleista kuten saatavilla olevasta kiviaineksesta. Myös tiivistysmenetelmä vaikuttaa lopullisiin ominaisuuksiin kuten vedenläpäisevyyteen ja lujuuteen. Massan koostumus tulee suhteuttaa käytettävään valu- ja tiivistysmenetelmään ja myös massan kuljetus- ja valuolosuhteisiin. Laboratoriossa massan ja koekappaleiden valmistus on hieman suoraviivaisempaa kuin vaihtelevissa käytännön olosuhteissa. Yksinomaan laboratoriokokein ei välttämättä voida löytää kuhunkin kohteeseen parhaiten soveltuvaa massakoostumusta.

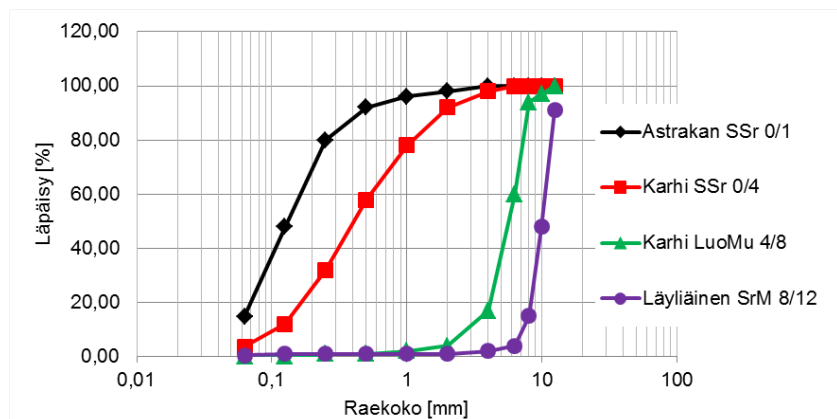
2.3.2 Materiaalit

Betoneissa käytettiin Rudus Oy:n kiviaineksia ja Finnsementti Oy:n sementtejä. Lisäksi käytettiin Finnsementti Oy:n lisäaineita sekä yhtä Wacker Chemie AG:n lisäainetta. Perustiedot näistä materiaaleista on esitetty taulukossa 13.

Kuvassa 20 on esitetty kiviainesten rakeisuudet. Liitteessä 3 on esitetty kiviainesten laadunvalvontatiedot ja liitteessä 4 sementtien tuote-esitteet. [Rudus 2013, Finnsementti 2014]

Taulukko 13. Lämpäisevien betonien materiaalit.

Kiviainekset			
Karhi LuoMu 4/8	vesiseulottu		
Läyliäinen SrM 8/12	murske		
Astrakan SSr 0/1	filleri		
Karhi SSr 0/4	'muuraushiekka'		
Sementit			
CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N	Plussementti	Normaalisti kovettuva portlandseossementti	
CEM I 52,5 R	Pikasementti	Erittäin nopeasti kovettuva portlandsementti	
CEM I 42,5 N - SR3	SR-sementti	Normaalisti kovettuva sulfaatinkestävä portlandsementti	
Lisäaineet			
VB-Parmix	Polykarboksylaattipohjainen nesteystin		
AIRMIX	Synteettisiin tensideihin pohjautuva huokostin		
ETONIS 260	Polymeerilisäaine		



Kuva 20. Kiviainesten rakeisuudet.

2.3.3 Massojen valmistus, koekappaleiden valu ja tiivistys

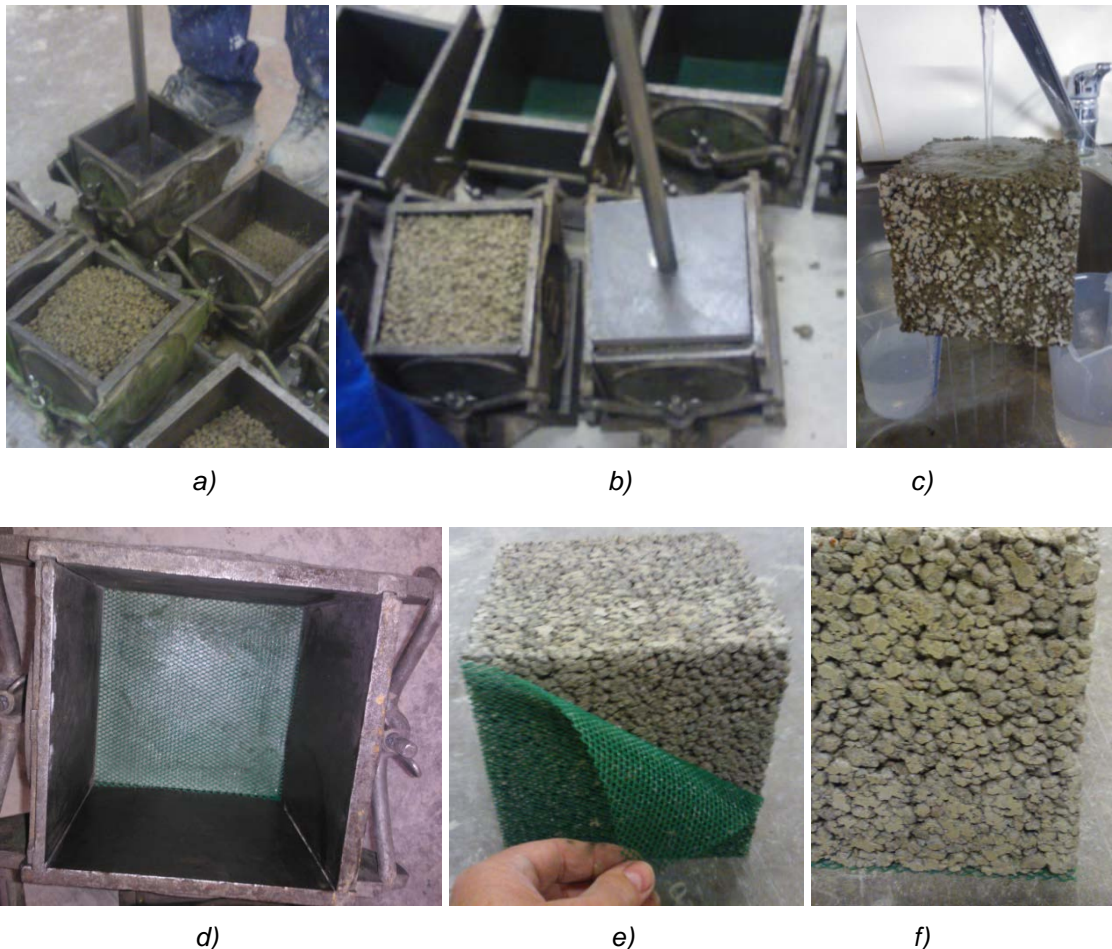
LB-massat sekoitettiin tavanomaisilla laboratoriokäyttöön tarkoitetuilla 'Zyklos' tasosekoittimilla (kuva 21), jonka kapasiteetti oli 170 litraa. Joitakin ennakkovaluja tehtiin vastaavan tyypisellä 35 litran betonisekoittimella. Ensin esisekoitettiin kiviaineksia pienen vesimäärän kanssa puolen minuutin ajan. Tämän jälkeen lisättiin sementti, vesi ja lisäaineet, ja sekoitettiin 8 minuuttia. Suhteellisen pitkä sekoitusaika valittiin sen varmistamiseksi, että massoihin kehittyisi laboratoriosekoittimia käytettäessä suojahuokostusta.



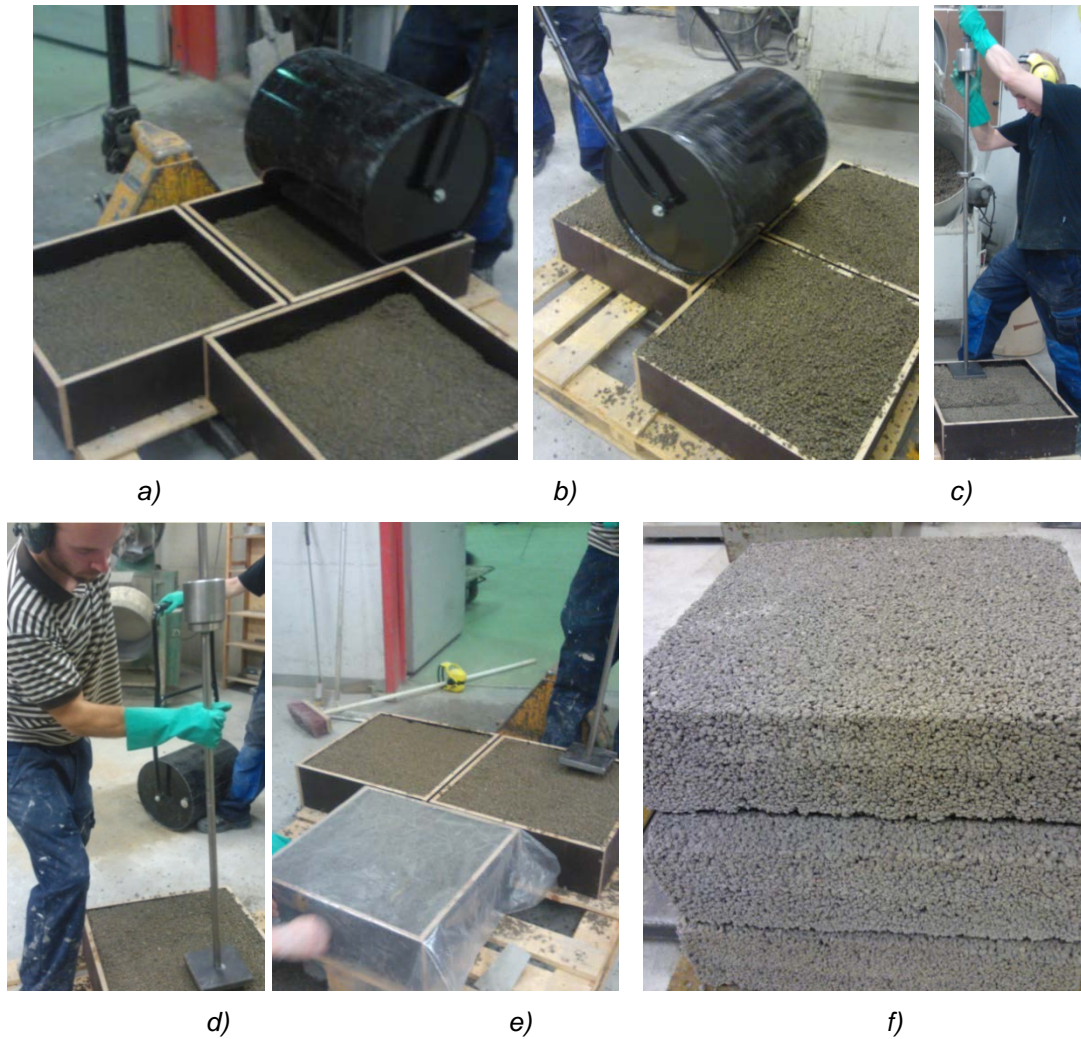
Kuva 21. LB-massojen valmistuksessa käytetty 170 litran sekoitin.

Tutkimuksia varten valmistettiin sekä koekuutioita (kuva 22) että koelaattoja (kuva 23). Koekuutioita valmistettiin puristuslujuustestaukseen, jäädytys-sulatuskokeisiin, mikrorakennetutkimuksiin ja optiseen ilmahuokosanalyysiin. Kuutiomuotit olivat purettavia 150 mm:n ja joissakin tapauksissa 100 mm:n metallikuutioita. Muovikuutioita ei käytetty, koska niiden purku paineilmatekniikalla ei olisi onnistunut betonin suuren läpäisevyyden vuoksi. Koekuutiot tiivistettiin Proctor-tyyppisellä tiivistyksellä, jossa paino oli 4,5 kg ja sen pudotuskorkeus 0,45 m. Tiivistystangon alaosassa oli jäykkä metallilevy, jonka koko vastasi koekuution kokoa. Alustavissa kokeissa tiivistyspudotusten lukumäärä kuten myös tiivistettyjen kerrosten lukumäärä vaihtelivat (ks. kohta 2.3.4 (*Alustavat laboratoriotutkimukset ja koemenetelmäkehitys*)).

Laatat (505x505x150 mm³) valmistettiin lähinnä vedenläpäisevyydetutkimuksia ja Rig-kokeita varten. Tiivistys tehtiin joko käyttäen osin vedellä täytettyä jyrää jonka paino oli 50 kg/m (jyrän paino 25 kg ja leveys 0,5 m) tai samaa Proctor-tiivistystä kuin kuutioille (ks. kuva 22a ja 22b sekä kuva 23c ja 23d) Proctor-tiivistyksen etuna oli se, että laatat ja kuutiot saatiin keskenään vertailukelpoisiksi eli niihin muodostui periaatteessa sama tiheys, huokoisuus, vedenläpäisevyys ja lujuus. Tämän vuoksi laattojen valmistuksessa päätettiin käyttää pääasiassa Proctor-tiivistystä. Arvion mukaan se oli suhteellisen tehokas, minkä vuoksi tehtiin vertailuksi myös laattoja käyttäen jyrätiivistystä (ks. kuva 23). Käytännön ennakkokokeissa tiivistyksen tulisi vastata mahdollisimman hyvin käytännön tiivistystä ja sen tehoa.



Kuva 22. a) & b) Koekuutioiden tiivistystä Proctor-tekniikalla; c) Vedenläpäisevyyden alustava kokeilu; d) & e) Kuutiomuoteissa käytettiin niiden pohjalla verkkoa, joka esti sementtiliimakerroksen muodostumista; f) Vähäistä sementtiliimakerroksen muodostumista kuution sivupinnalla, jossa ei käytetty verkkoa.



Kuva 23. LB-laattojen valmistus laboratoriossa: a) ja b) Laattojen tiivistys jyrällä; c) ja d) Laattojen Proctor-tiivistys; e) Välittömästi tiivistyksen jälkeen koekappaleet peitettiin hyvin muovilla; f) Valmiita LB-laattoja (h150 mm).

2.3.4 Alustavat laboriotutkimukset ja koemenetelmäkehitys

Vettä läpäisevästä betonista ja sen valmistamisesta ei ollut ennakkoon kokemusta. Perustietämys LB:stä hankittiin State-of-the-Art selvityksessä [Kuosa et al. 2013a]. Osa- ja lisäaineet sekä massakoostumukset valittiin lähinnä tähän tietämykseen perustuen. Ennen betonien valmistusta tehtiin lisäksi joitakin alustavia kokeita ja selvityksiä.

Alustavissa kokeissa kiinnitettiin huomiota sementtipastan ja laastimassan viskositeettiin. Liian pienen viskositeetin massa ei pysy LB:n kiviainesten pinnalla vaan valuu alaspäin. Tällöin vettä läpäisevän betonipinnoitteen alaosan läpäisevyys pienenee tai jää lähes olemattomaksi. Jos taas tasarakeista kiviainesta sitova laastiosuus on liian jäykkää tai kuivaa, ei LB-massa pysy kasassa ja lisäksi sementin hydrataatio voi jäädä vaillinaiseksi ja LB:n lujuus- ja säilyvyysominaisuudet kärsivät.

Alustavin kokein selvitettiin, mitkä ovat käytetyillä materiaaleilla sementtipastan ja betonin laastiosuuden soveltuva vesi-sementtisuhde (w/c) ja lisäainemäärät. Lisäaineina käytettiin notkistinta ja huokostinta. Myös stabilaattorin käyttöä kokeiltiin. Stabilaattoria ei kuitenkaan jatkossa käytetty, koska hienolaastiosuuden tai pastan valuminen ja erottuminen koekappaleiden alaosaan ei ollut alustavasti valituilla massakoostumuksilla ongelma.

Koska oli tiedossa, että LB:n hyvä jäädytys-sulatuskestävyys vaatii sen huokostamisen, alustavin kokein selvitettiin myös sitä, onnistuuko laastiosuuden huokostaminen tavanomai-

sia laboratoriosekoittimia käyttäen. Huokostamisen onnistumisen tiedettiin myös vaativan sen, että LB:n kiviaineksessa on noin 7 % hienoa kiviainesta [Kuosa et al. 2013a].

Alustaviin kokeisiin sisältyi perustutkimuksina koekappaleiden ja koelaattojen valmistusta eri tiivistystavoilla sekä tiivistetyn massan tiheys- ja huokoisuusmäärytyksiä sekä kovettuneen betonin lujuusmäärytyksiä. Lisäksi tehtiin alustavia mikrorakennetutkimuksia mikroskooppisesti murtopinnoista sekä ohuthieitä käyttäen. Tuoreen tiivistämättömän LB-massan suoja-huokostuksen alustavaan arviointiin kehitettiin ja kokeiltiin myös uusia menetelmiä. Alla on esitetty ennakkokokeet ja niissä saadut tulokset.

2.3.4.1 Ennakkokoe 1 – Proctor-tiivistys, tiheys ja kokonaishuokoisuus

Tämän ennakkokokeen massassa kiviaineksena oli 4/8 mm kiviaines ja lisäksi 7 % kokonaishuokoisuusmäärästä oli filleriä 0/1 mm. Sementtimäärä oli 305 kg/m³ ja vesi-sementtisuhde 0,28. Massan koostumus on esitetty taulukossa 14.

Taulukko 14. Ennakkokokeen 1 massakoostumus.

	PC-E1
CEM II/B-M (S.LL) 42,5 N (Plussementti) [kg/m ³]	305
Kiviainekset [kg/m ³]	1582
Filleri 0/1 [% kiviaineksesta]	7
SSr 4/8 [% kiviaineksesta]	93
Vesi (tehollinen) [kg/m ³]	85
w/c (eff.) [-]	0,28
Tehonotkistin: VB-Parmix [% sementistä]	3
Huokostin: AIRMIX [% sementistä]	0,1
Avoin huokoisuus (tavoite) [%]	>20
Suojahuokokset (arvio) [%]	2 - 3

Proctor-tiivistyksen ennakkokokeessa valmistettiin 150 mm ja 100 mm kuutioita käyttäen edellä kuvattua Proctor-tiivistystä. Isommat kuutiot tiivistettiin kaikkiaan 30 pudotuksella joko siten, että muotti täytettiin ensin puoliväliin tai siten, että se täytettiin heti täyteen asti. Molemmissa tapauksissa, kun muotti oli täytetty yläpintaan asti ja kun massan pinta ei pysynyt täyttöä seuraavassa tiivistyksessä muotin yläpinnan tasolla, lisättiin massaa jokaisen 5 pudotuksen jälkeen siten, että muotti saatiin lopulta täyteen.

Taulukossa 15 on esitetty massojen tiheydet ja huokosmäärät eri tiivistystavoilla. Tiheydet olivat kaikkiaan 1965–1995 kg/m³ ja vastaavat kokonaishuokosmäärät olivat 22–23 %. Tämä huokosmäärä sisälsi suojahuokosten osuuden (pieni). Käytetty tiivistys oli kaikissa tapauksissa suhteellisen tehokas, mikä todennäköisesti vaikutti siihen, että erot olivat tässä tapauksessa erittäin pieniä. Koekappaleiden huokostilavuudet olivat kuitenkin tavoitteen mukaisia (noin 20 %).

Lopullisiin kokeisiin kaikille massoille valittiin sama tiivistystekniikka, jossa kuutiot täytettiin aluksi kokonaan ja massaa lisättiin tiivistyksen edetessä (ks. kohta 2.3.5 (*LB-massat, massaominaisuudet sekä puristuslujuudet ja vedenläpäisevyudet*)).

Taulukko 15. Proctor-tiivistyksellä valmistettujen koekappaleiden tiheydet ja kokonaishuokoisuudet.

Koekappale (kuutio)	Tiivistys (Proctor; 4,5 kg)	Koekappaleen tilavuus [mm ³]	Tiheys (massa) [kg/m ³]	Huokostilavuus [%]
Ia (150 mm)	1 kerros: 30 pudotusta	3262500	1987	22,2
Ib (150 mm)		3375000	1965	23,1
II (150 mm)	2 kerrosta: 5 + 25 pudotusta	3307500	1995	21,9
III (150 mm)	2 kerrosta: 15 + 15 pudotusta	3352500	1981	22,5
IVa (100 mm)	2 kerrosta: 15 + 10 pudotusta	1000000	1980	22,5
IVb (100 mm)		1000000	1969	22,9
Keskiarvo			1980	22,5
Keskihajonta			11	0,4
Pienin arvo			1965	21,9
Suurin arvo			1995	23,1

2.3.4.2 Ennakkokoe 2 – Mikrorakenne, suojahuokostus ja koelaatan (jyrätiivistys) lujuusominaisuudet ja vedenläpäisevyys

Tämän ennakkokokeen massassan (PC0) kiviaineksena oli 4/8 mm kiviaines ja lisäksi 7 % kokonaiskiviainesmäärästä oli filleriä 0/1 mm. Sementtimäärä oli 305 kg/m³ ja vesi-sementtisuhte 0,27. Massan koostumus on esitetty taulukossa 16.

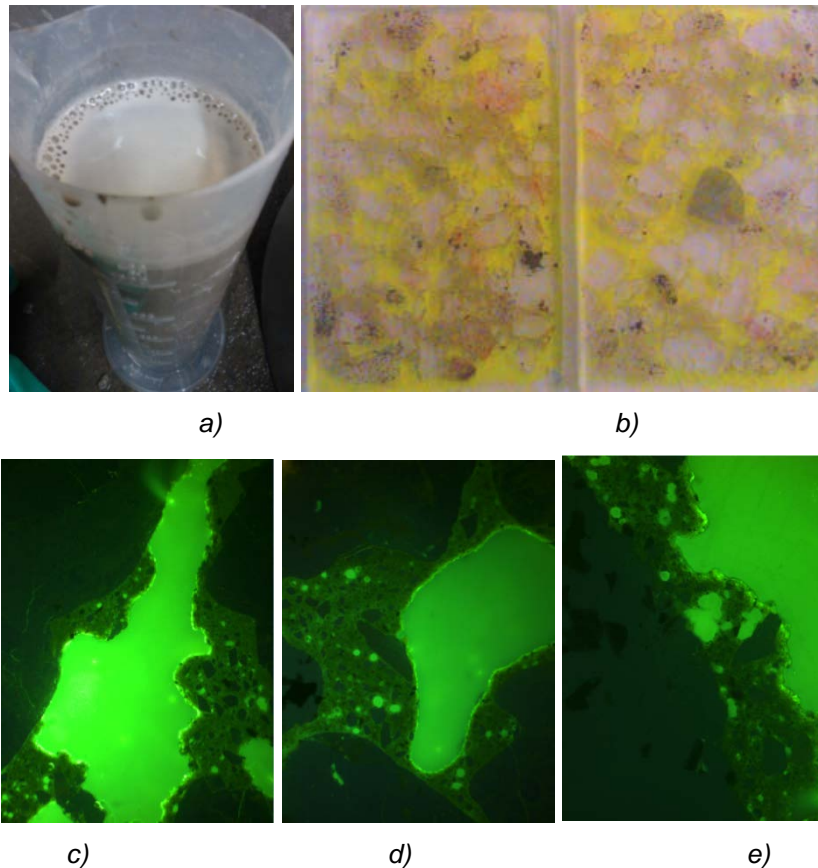
Taulukko 16. Ennakkokokeen 2 massakoostumus.

	PC0
CEM II/B-M (S.LL) 42,5 N (Plussementti) [kg/m ³]	305
Kiviainekset [kg/m ³]	1565
Filleri 0/1 [% kiviaineksesta]	7
SSr 4/8 [% kiviaineksesta]	93
Vesi (tehollinen) [kg/m ³]	82
w/c (eff.) [-]	0,27
Tehonotkistin: VB-Parmix [% sementistä]	3
Huokostin: AIRMIX [% of cement]	0,1
Avoin huokoisuus (tavoite) [%]	>20
Suojahuokoset (arvio) [%]	2 - 4

Tässä ennakkokokeessa tavoitteena oli selvittää, onnistuuko ohutheiden valmistus LB:stä ongelmitta sekä saada alustavaa tietoa LB:n mikrorakenteesta ja suojahuokostuksesta. Suojahuokosanalyysiä [VTT TEST R003-00 2011] ei kuitenkaan vielä tehty, koska tämän LB:n (PC0) jäädytys-sulatuskestävyyttäkään ei määritetty.

Kuvassa 24a on ennakkokokeen 2 tuoreesta tiivistämättömästä massasta mittalasin pohjalla veteen erotettuja suojahuokosia, jotka ovat nousseet kerrokseksi vesipatsaan päälle. Tällä tekniikalla saatiin alustava tieto siitä, että LB-massan pastaosuuteen/mikrolaastiin oli muodostunut myös pieniä (<0,300 mm) suojahuokosia.

Kuvassa 24b on esitetty valokuvat valmistetuista ohuthieistä sekä kuvissa 20b-d joitakin mikrorakennekuvia. Tulosten mukaan massan sementtipastassa (mikrolaastissa) oli pieniä suojahuokosia isojen vettä läpäisevien huokosten lisäksi. Sementtipasta-kiviainesrajapinnat olivat tiiviitä ja mikrorakenne oli muutenkin hyvä. (ks. kuvat 24b-d).



Kuva 24. Vettä läpäisevän betonin huokosrakenne ja pakkasenkestoa lisäävä suojahuokostus: a) Kerros pieniä suojahuokosia (reunoilla myös isompia huokosia), jotka vapautuivat pienestä määrästä (n. 1 dl) LB-massaa, kun se hajotettiin sekoittamalla veteen mitta-astian pohjalla; b) Ohuthieet (2 kpl), joiden koko on a' 30 mm x 50 mm ja paksuus noin 30 µm. Isot kellertävät/vihertävät alueet ovat fluoresoivalla epoksilla täyttyneitä vedenläpäisyyden tarkoitettuja huokosia; c) – e) Mikrorakennekuvia (ohuthie, fluoresoiva valo), joiden korkeus on 4,5 mm. Pienet pyöreät huokokset ovat sementtipastaosuuden pieniä suojahuokosia, jotka parantavat LB:n jäädytys-sulatuskestävyyttä.

Kovettuneen betonin suojahuokosten huokosjaon on todettu korreloivan suhteellisen hyvän sen jäädytys-sulatuskestävyyden kanssa (ei suolaa). Viitteen [Kevern et al. 2009] tutkimuksessa huokosjako määritettiin tunnetulla kaupallisella automaattisella laitteistolla 'RapidAir 457', jossa analysoitava pinta on hiottu betonipinta (nk. pintahie). Analyysi tehtiin standardin ASTM C457 mukaisesti.

'RapidAir 457' laitteisto on käytössä myös Suomessa. Lisäksi Suomessa betonin suojahuokosten analyysiin käytetään ohuthieitä ja analyysi tehdään tällöin menetelmän [VTT TEST R003-00 2011] mukaisesti. Tässä menetelmässä analyysiin otetaan mukaan suojahuokokset, joiden lävistyspituus analyysissä on 0,020–0,800 mm.

Menetelmässä [VTT TEST R003-00 2011] analysoitavan kokonaispinta-alan tulee olla riittävän suuri kuten myös pastamäärän (sementtipasta = sideaineet + vesi + lisäaineet). Tavanomaisen betonin tapauksessa, kun analysoitava kokonaispinta-ala on vähintään 3000 mm² (esim. kaksi hieettä, joiden koko on 30 x 50 mm²) pastamäärän tulee olla keskimäärin vähintään 23 %. Näin ollen LB:n pastamäärän tulisi olla tässä analyysissä vähintään 690 mm² (= 0,23 x 3000), jotta tulosta voidaan pitää luotettavana. Tässä ennakkokokokeessa analyysiä ei vielä tehty, mutta se tehtiin jatkossa (ks. kohta 2.3.6 (Jäädytys-sulatuskokeet, mikro- ja huokosrakenne)).

Ennakkokokokeen 2 massasta valmistettiin myös 3 laattaa jyrätiivistyksellä (2 kerroksessa). Tämä tiivistystekniikka ei ole niin tehokas kuin Proctor-tiivistys. Yhdestä laatasta porattiin lie-

riöitä (\varnothing 100 mm), joista määritettiin puristuslujuus ja halkaisuvetolujuus. Laattojen vedenläpäisevyys määritettiin menetelmällä [ASTM C1701/C1701M: 2009]. Tiivistämättömän LB-massan huokosmäärän määrittäminen menetelmä on esitetty alempana kohdassa 2.3.4.5 (*Ennakkokoe 5 – Suojahuokostuksen määrä tiivistämättömässä LB-massassa (%)*). Ennakkokokeen 2 mittaus tulokset on esitetty taulukossa 17.

Taulukko 17. Jyrätiivistyksellä valmistetun laatan lujuusominaisuudet (testauksessa \varnothing 100 mm poralieriöt) ja muut LB-massan ja -laatan ominaisuudet.

PCO	
Kuutiot 150 mm	
Tiheys (150 mm kuutiot, tuore massa) [kg/m ³]	1950
keskihajonta	57 ¹⁾
Huokoisuus, tuore LB (avoimet huokokset ja suojahuokokset) [%]	24,3
Suojahuokokset (alustava/kokeilu; tiivistämätön LB-massa) [% betonista]	3,8
Suojahuokokset (alustava/kokeilu; tiivistämätön LB-massa) [% sementtipastasta]	17,4
Vettä läpäisevät huokokset [%]	20,5
Laatta 505x505xh150 mm ³	
Puristuslujuus 28 d [MPa]	12,2 ²⁾
keskihajonta	2,0
Halkaisuvetolujuus (\varnothing 100 mm poralieriöt) [MPa]	1,0
keskihajonta	0,4
Tiheys (laatta, säilytys RH 95%:ssa [kg/m ³])	1984 ³⁾
keskihajonta	57 ³⁾
Vedenläpäisevyys (ASTM) [$\times 10^{-3}$ m/s]	6,3
keskihajonta	0,1

1) Hieman toisistaan poikkeavia tiivistystehoja.

2) 150 mm kuutiolujuus, määritetty \varnothing 100 mm poralieriöistä (3 kpl)

3) Määritetty \varnothing 100 mm poralieriöistä (3 kpl)

2.3.4.3 Ennakkokoe 3 – Puristuslujuus ja sen määrittäminen

Läpäisevälle betonille ei ole vielä olemassa eurooppalaista eikä myöskään vielä lopullista ASTM-standardia puristuslujuuden testaukseen. Tällä hetkellä on kuitenkin olemassa ehdotettu ASTM standardi WK29213, *Test Method for Compressive Strength of Pervious Concrete*. Tätä standardiehdotusta ei ollut tässä tutkimuksessa käytettävissä. [ASTM standardization 2010]

Ennakkokokeessa 3 tavoitteena oli saada tieto siitä, onnistuuko LB:n rikitys ja puristuslujuusmääritys ongelmitta sekä myös tieto valitun LB-koostumuksen lujuudesta ja lujuustulosten sekä tiheyden hajonnoista. Tavoitteena oli myös saada tieto siitä, miten LB:n murtuminen tapahtuu. Käytetyn massan koostumus on esitetty taulukossa 18 ja mittaus tulokset taulukossa 19.

Tulosten mukaan tämän massan lujuus (22,5 MPa) oli jopa hieman suurempi kuin massasta mitattuun kokonaishuokoisuuteen (23,9 %) perustuen oletettiin. Yleensä kevyen liikenteen alueilla noin 17 MPa:n lujuusvaatimus on LB:lle riittävä. Vaativissa kohteissa ja suurilla kuormituksilla voidaan vaatia suurempaa lujuutta, esimerkiksi 23–28 MPa.

Koekuutioiden rikitys onnistui normaalisti. Lujuudenmäärityksessä koekuutio ei vaurioitunut silmin havaittavasti, vaan pysyi kasassa (ks. kuva 25). Kolmella 150 mm kuutiolla määritetyn lujuuden keskihajonta oli 3,1 MPa ja koekappaleiden tiheyden keskihajonta 71 kg/m². Hajontoja voidaan pitää läpäisevälle betonille hyväksyttävänä, vaikka ne ovatkin hieman suurempia kuin hajonnat keskimäärin tavanomaisille betoneille. Käytännössä LB:n arvostelu on perustunut ennemminkin massan tiheyteen ja valmiin kohteen vedenläpäisevyyteen kuin lujuuteen. [Kuosa et al. 2013a]

Taulukko 18. Ennakkokokeen 3 massakoostumus.

	PCA
CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N (Plussementti) [kg/m ³]	300
Kiviainekset [kg/m ³]	1596
Filleri 0/1 [% kiviaineksesta]	7
SSr 4/8 [% kiviaineksesta]	93
Vesi (tehollinen) [kg/m ³]	70
w/c (eff.) [-]	0,27
Tehonotkistin: VB-Parmix [% sementistä]	3
Huokostin: AIRMIX [% sementistä]	0,1
Avoin huokoisuus (tavoite) [%]	>20
Suojahuokokset (arvio) [%]	2 - 4

Taulukko 19. Ennakkokokeen 3 tulokset.

	PCA
Tiheys, tuore massa [kg/m ³]	1956
Kokonaishuokoisuus, tuore massa [%]	23,9
Tehollinen läpäisevä huokoisuus (arvio) [%]	20
Puristuslujuus (3 kuutiota) 28 d [MPa]	22,5
keskihajonta [MPa]	3,1
suurin arvo [MPa]	24,7
pienin arvo [MPa]	19,0
Tiheys (3 kuutiota) [kg/m ³]	1973
keskihajonta [kg/m ³]	71
suurin arvo [kg/m ³]	2050
pienin arvo [kg/m ³]	1960

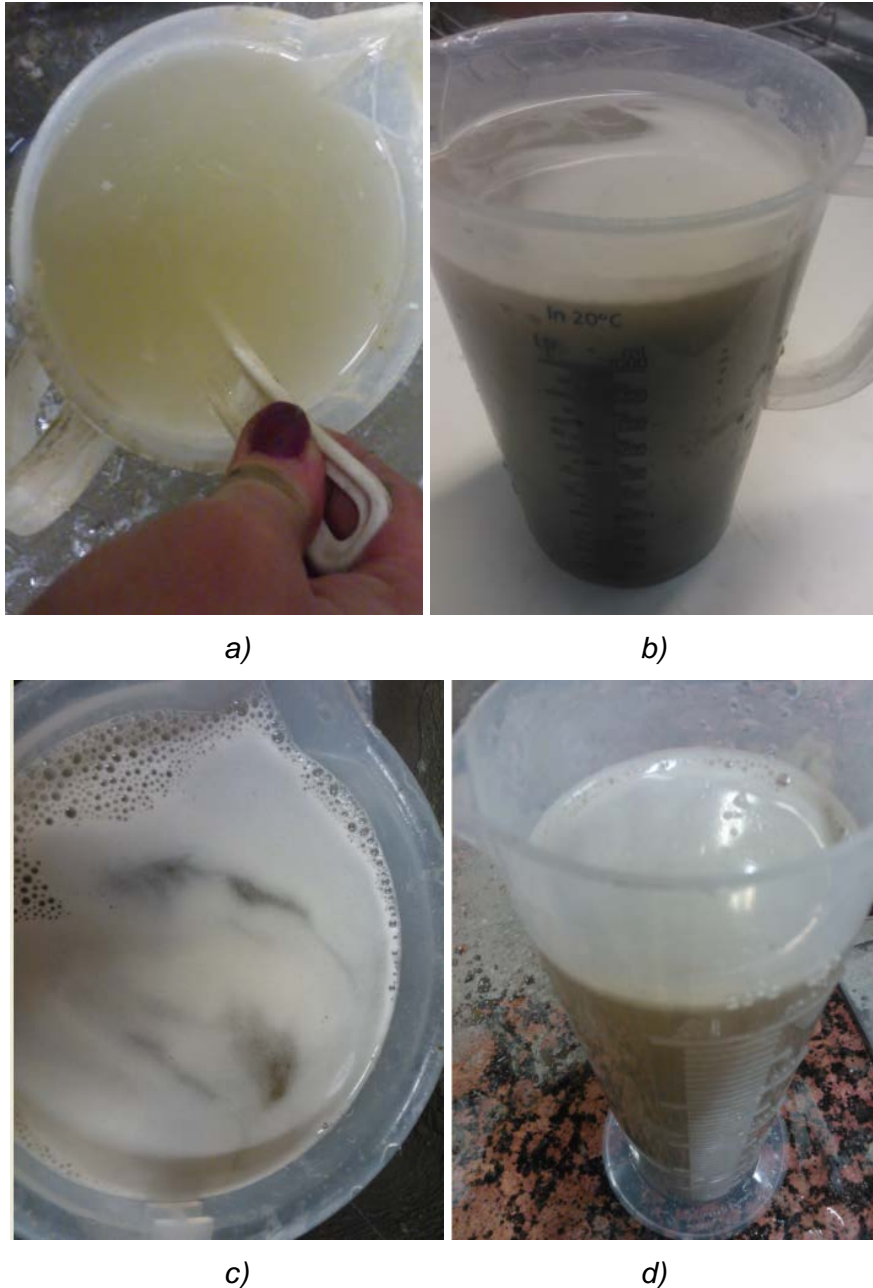


Kuva 25. Puristuslujuusmääritykset tehtiin 150 mm kuutioilla, jotka rikitettiin. Kuvassa kuutiot puristuslujuustestauksen jälkeen.

2.3.4.4 Ennakkokoe 4 – LB-massan ilmamäärän pikakoe

LB-massan suojuhuokostuksen alustavassa arvioinnissa käytettiin menetelmää, jossa pieni tiivistämätön massanäyte (n. 1 dl) siirrettiin joko vedellä täytetyn 1 litran mitta-astian tai 2 litran mittakannun pohjalle ja hajotettiin sekoittamalla esimerkiksi tavallisella vispilällä. (ks. kuva 26) Tässä menettelyssä kaikki huokokset ja myös pienet suojuhuokokset nousevat veden pinnalle. Ensin nousevat suurimmat huokokset ja lopulta tietyn ajan kuluessa myös kaikkein pienimmät suojuhuokokset. Suojuhuokosten koko on niin pieni, että niitä ei voi yksittäisinä havaita vaan ne muodostavat veden pinnalle vaahtomaisen kerroksen (ks. kuva 26). Suojuhuokosten määrää on tällä menettelyllä vaikea arvioida, mutta kokemuksen karttuessa määrästä on mahdollista saada jonkinlainen alustava arvio ja esimerkiksi kokemuksen jälkeen massakoostumusten vertailu voi olla mahdollista. Menettelyn huonoin puoli on se, että se antaa arvion vain tuoreen massan suojuhuokosista. Lisäksi tässä tutkimuksessa arvioitiin vain tiivistämättömän LB:n suojuhuokostusta suhteellisen pian massan sekoittamisen jäl-

keen. Huokosten pysyvyys voi myös olla huono, jolloin kaikki huokokset eivät jää tiivistettyyn ja kovettuneeseen betoniin. Lopullinen tieto suojahuokostuksesta saadaan vasta kovettuneen betonin analyysissä.



Kuva 26. LB-massan suojahuokostuksen alustava arviointi: a) LB-massanäyte siirretään vedellä täytetyn astian pohjalle ja hajotetaan veteen (esim. vispilällä); b) – d) Massan kaikki huokokset nousevat veden pinnalle ja niiden määrästä saadaan jonkinlainen käsitys.

LB-massan ilmamäärän pikakoetta käytettiin jatkossa tiivistämättömän massan huokostuksen alustavassa arvioinnissa.

2.3.4.5 Ennakkokoe 5 – Suojahuokostuksen määrä tiivistämättömässä LB-massassa (%)

Tavanomainen betonimassan ilmamäärämittaus (painemenetelmä) ei sovellu LB:lle eikä myöskään tuoreen massan AVA-testaus (*Air Void Analyzer*), jossa määritetään suojahuokostuksen määrä ja erityisesti laatu (suojahuokosten kokojakautuma, huokosjako ym.) tuoreessa massassa. Näillä menetelmillä ei ole saatu luotettavaa tietoa suojahuokostuksesta [Kuosa et al. 2013a Kevern et al. 2009].

Tässä tutkimuksessa kokeiltiin menetelmää, jolla pienten suojahuokosten määrästä (% betonissa tai % sementtipastassa) saadaan mittaustulos. Menetelmää ei kuitenkaan kehitetty yksityiskohdiltaan, minkä vuoksi tässä esitetty menettely on vain suuntaa antava kokeilu. Mahdollisesti riittävän luotettavan menetelmän kehittäminen vaatii huomattavasti lisätutkimuksia. Tässä tapauksessa suojahuokosten määrä määritettiin tiivistämättömästä massanäytteestä. Näin ollen se kertoo lähinnä, muodostuuko massa huokosia sekoituksessa, mutta ei niiden pysyvyyttä tiivistyksessä ja massan kovettumisvaiheessa. Lopullinen tieto huokostuksesta voidaan saada vain kovettunutta betonia tutkimalla (ks. mikrorakenne kohdassa 2.3.4.2 (*Ennakkokoe 2*)).

Menetelmä perustuu siihen, että sekoitettaessa betonimassanäyte liuokseen, suojahuokokset erottuvat siitä ja alkavat nousta liuoksen pinnalle. Veden pinnalle kaikki suojahuokokset nousevat suhteellisen nopeasti, mutta suuremman viskositeetin liuoksessa tiettyä koko pienemmät huokokset pysyvät suhteellisen kauan. Tätä hyödynnetään myös AVA-mittauksessa, jossa betonista erotettu laastimassanäyte (yleensä 20 ml raekoon <6 mm laastiosuutta) sekoitetaan ensin vesi-glyseroliseokseen, jonka viskositeetti on tarkoin tunnettu ja veden viskositeettia suurempi.

Nyt kysymyksessä olevassa mittauskokeilussa tietyistä LB-massamäärästä vesi-glyseroliseokseen erotettujen suojahuokosten määrä mitattiin tavanomaisella laastimassan ilmamäärämittarilla (tilavuus 1 litra). Oleellista oli myös se, että massanäyte siirrettiin vesi-glyseroliliuokseen vähittäin ja siten, että LB:n rakenne rikkoutui niin paljon, että isot vedenläpäisevyyteen tarkoitetut huokokset (yleensä huokokset \varnothing 1–8 mm) eivät siirtyneet tai jääneet vesi-glyseroliseokseen. Jotta suojahuokosten määrä betonissa tai sementtipastaosuudessa voitiin laskea, tarvittiin seuraavat tiedot ja punitustulokset:

- LB-massan koostumus, kg/m^3
- LB-massan osa-aineiden kiintotiheydet, kg/m^3
- glyseroli-vesiseoksen tiheys, kg/m^3
- glyseroli-vesiseoksen määrä mittauksessa, kg
- LB-massan määrä mittauksessa, kg
- ilmamäärämittauksen ilmamäärä, %

Tiheystiedot tarvittiin tilavuuksien laskentaan.

LB-massan ilmamäärä voidaan laskea %-arvona koko massan tilavuudesta tai haluttaessa myös %-arvona pastan tai laastiosuuden tilavuudesta. Laskelmat voidaan tehdä (Excel), kun massan koostumus tunnetaan. Koska itse ilman tilavuus tietyssä massamäärässä vaikuttaa pieneltä osaltaan ko. massamäärän tilavuuteen, joudutaan todellinen ilman tilavuus tarkkaan ottaen hakemaan iteroimalla tai laskemalla.

Kuvassa 27 on esitetty kuvia ilmamäärämittauksen vaiheista. Mittauksessa, jossa ilmamäärämittariin laitettiin LB-massan sijaan pelkkää kiviainesta, tulokseksi saatiin erittäin pieni ilmamäärä, <0,3 %. (kuva 27g).

Tällä muunnetulla ilmamäärämittausmenetelmällä määritettiin jatkossa kaikkien valmistettujen LB-massojen ilmamäärät (ks. kohta 2.3.5 (*LB-massat, massaominaisuudet sekä puristuslujuudet ja vedenläpäisevyydet*)).



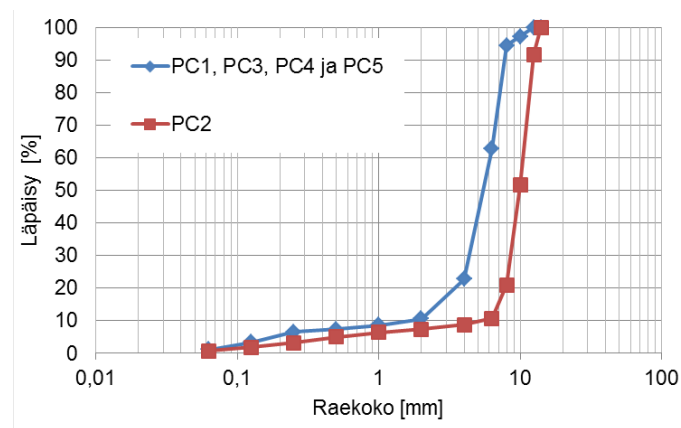
Kuva 27. LB-massan ilmamäärämittauskokeilun vaiheet: a) Tyhjä 1 litran ilmamäärämittari vaa'an päällä ja mittausta varten otettu LB-massanäyte (tiivistämätön); b) Ilmamäärämittariin lisätään vesi-glyseroliseosta; c) Ilmamäärämittariin lisätään vähittäin LB-massaa; d) ja e) Ilmamäärämittari täytetään kokonaan LB-massalla ja vesi-glyseroliseoksella, joiden molempien määrät punnitaan (kaikki lisäykset vaa'an päällä). Suuret ilmahuokokset nousevat nesteen pinnalle eivätkä tule mukaan mittaukseen; f) Ilmamäärä mitataan normaalisti; g) Pelkkää kiviainesta ja vesi-glyseroliseosta ilmamäärämittarissa 'kalibroitimittausta' varten.

2.3.5 LB-massat, massaominaisuudet sekä puristuslujuudet ja vedenläpäisevyydet

Ennakkokokeiden jälkeen valmistettiin tutkimusten varsinaiset LB-massat laajempaan testaukseen. Näiden massojen koostumukset on esitetty taulukossa 20. Massojen kiviainesten rakeisuudet on esitetty kuvassa 28.

Taulukko 20. LB-massat.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N (Plussementti) [kg/m ³]	305	280	305	0	0
CEM I 52,5 R (Pikasementti) [kg/m ³]	0	0	0	305	0
CEM I 42,5 N - SR3	0	0	0	0	305
Kiviainekset [kg/m ³]	1565	1534	1565	1565	1516
Astrakan SSr 0/1 [% kiviaineksestä]	7	0	7	7	7
Karhi SSr 0/4 [% kiviaineksestä]	0	7	0	0	0
Karhi LuoMu 4/8 [% kiviaineksestä]	93	0	93	93	93
Läyliäinen SrM 8/12 [% kiviaineksestä]	0	93	0	0	0
Vesi (tehollinen) [kg/m ³]	85	85	85	92	91
w/c (tehollinen) [-]	0,28	0,28	0,28	0,30	0,30
Notkistin: VB-Parmix [% sementistä]	3	3	2	3	3
Huokostin: AIRMIX [% sementistä]	0,1	0,1	0	0,1	0,2
ETONIS 260 [% sementistä]	0	0	16	0	0
Kokonaishuokoisuus (tavoite) [%]	>20	>20	>20	>20	>20
Suojahuokokset (tavoite) [%]	2 - 4	2 - 4	-	2 - 4	5-6



Kuva 28. LB-massojen kiviainesten rakeisuudet (yhdistetyt rakeisuuskäyrät).

Massaominaisuuksien osalta arvioitiin massan työstettävyys ja koossapysyvyys menettelyssä, jossa massasta puristettiin käsin pieni pallo [Tennis et al. 2004, Kuosa et al. 2013b] (ks. kuva 29). Massojen valmistus sekä koekappaleiden valu ja tiivistysmenettelyt on esitetty edellä kohdassa 2.3.3 (*Massojen valmistus, koekappaleiden valu ja tiivistys*). Massojen tiheys määritettiin 150 mm kuutiomuotteihin tiivistetyistä massoista (a´ 3 kuutiota). Tiheyteen perustuen laskettiin massojen kokonaishuokoisuudet. Lisäksi arvioitiin suojahuokostuksen määrää edellä kohdassa 2.3.4 (*Alustavat laboratoriotutkimukset ja koemenetelmäkehitys*) esitetyillä kahdella menetelmällä (tiivistämättömän massan huokostumisen pika-arviointi: ks. kuva 30). Lujusmääritykset tehtiin 150 mm kuutioista 28 d iässä (a´ 3 kpl).

Koekappaleiden ja laattojen tiivistyksen jälkeen ne peitettiin välittömästi hyvin muovilla. Muotit purettiin valua seuraavana päivänä ja jälkihoitoa jatkettiin sen jälkeen noin suhteellisessa kosteudessa RH 95 % (T = 21±2 C). Kuitenkin massan PC3, jossa lisäaineena oli polymeerilisäaine 'ETONIS 260', jälkihoito oli lisäaineen edustajan ohjeen mukaisesti 7 d iän jälkeen noin suhteellisessa kosteudessa RH 60 % (T = 21±2 C).

Kuutiomuotteihin tiivistettyjen massojen tiheydet ja huokoisuudet sekä kovettuneen betonin vedenläpäisevyydet ja puristuslujuudet on esitetty taulukossa 21. Kaikista massoista ei valmistettu laattoja, vaan ainoastaan koekuutioita puristuslujuuden, jäädytys-sulatuskestävyyden ja mikrorakenteen tutkimuksiin. Näiden massojen koostumus poikkesi niistä massoista, joista laattoja valmistettiin, lähinnä vain sementtityypin ja suojahuokostuksen osalta (ks. taulukko 20).

Jäädytys-sulatuskokeiden tulokset sekä mikrorakenne- ja suojahuokosanalyysien tulokset on esitetty kohdassa 2.3.6 (*Jäädytys-sulatuskokeet, mikro- ja huokosrakenne*).

LB-laattojen vedenläpäisevyydetulokset sekä menetelmällä [ASTM C1701/C1701M. 2009] että sadetuksessa ja lisäksi koko rakenteen Rig-kokeessa tukkeutumattomana, tukkeutuneena ja puhdistettuna on esitetty kohdassa 3 (Simulointitestausta (Rig)).



PC1 kuutiovalu.



PC1 laattavalu.



PC2 kuutio- ja laattavalu.



PC3 kuutiovalu.

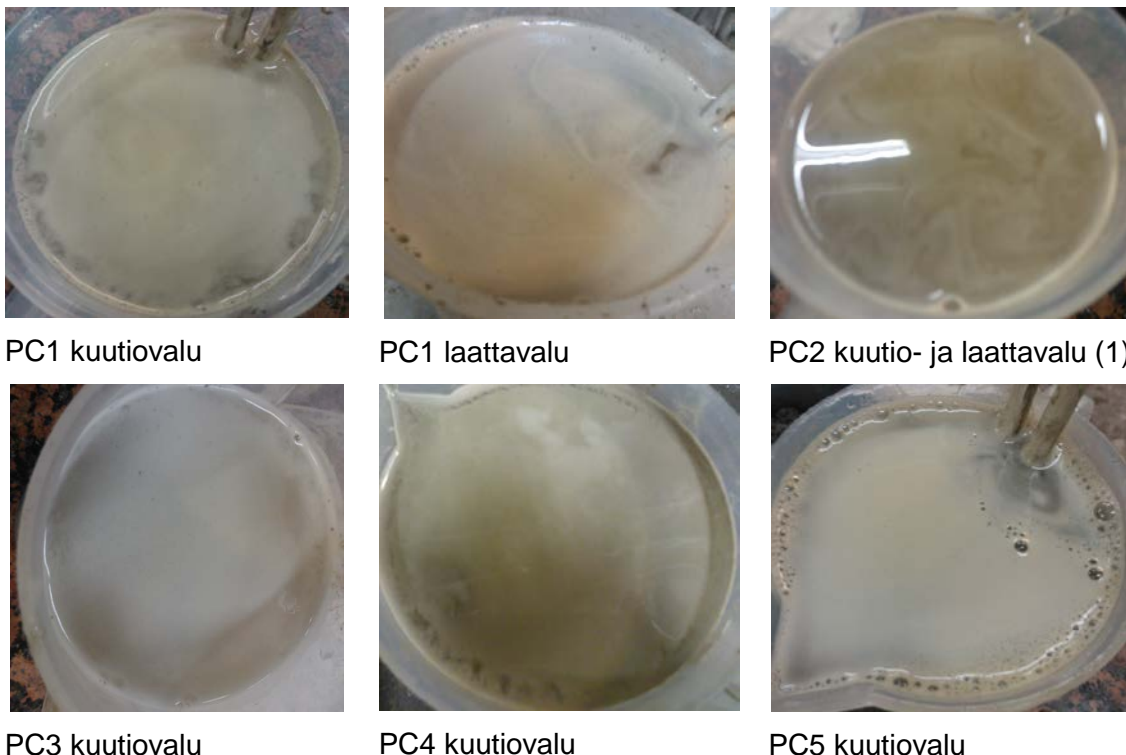


PC4 kuutiovalu.



PC5 kuutiovalu.

Kuva 29. Työstettävyyden ja koossapysyvyyden arviointi.



Kuva 30. Huokostuksen alustava arviointi. Tiivistämättömästä LB-massasta veden pinnalle erottuneet huokokset.

Taulukko 21. LB-massojen tiheydet, huokoisuudet, vedenläpäisevyydet ja puristuslujuudet.

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Kuutiovalut (150 mm kuutiot)					
Tiheys, tuore tiivistetty massa [kg/m ³]	1938	1956	1926	1888	1969
keskihajonta	21	16	16	18	65
Kokonaishuokoisuus, tuore tiivistetty massa [%]	23,8	23,6	23,6	26,5	22,8
Suojahuokokset, tiivistämätön massa [% betonista]	3,7	2,9	2,4	2,2	10,1
Suojahuokokset, tiivistämätön massa [% sementtipastasta]	16,9	14,6	10,5	11,0	34,7
Puristuslujuus 28 d [MPa]	17,5	15,6	15,9	15,4	26,3
keskihajonta	0,9	0,6	0,8	0,1	8,7
Laattavalut (laatat 505 x 505xh150 mm3)					
Tiheys, tuore tiivistetty massa (mittauksessa 150 mm kuutiot) [kg/m ³]	1902	1843			
keskihajonta	8	(1 kuutio)			
Kokonaishuokoisuus, tuore tiivistetty massa [%]	25,9	28,0			
Suojahuokokset, tiivistämätön massa [% betonista]	-	3,0			
Suojahuokokset, tiivistämätön massa [% sementtipastasta]	-	14,8			
Vedenläpäisevyys (ASTM C1701/C1701M: 2009) [x10 ⁻³ m/s]	(0,4)/2,8 ¹⁾	6,1			
keskihajonta	0,1/0,1	0,4			
Vedenläpäisevyys (EN 12697-19: 2012) [x10 ⁻³ m/s] (noin)					2,8

1) 2 eri valua ja tiivistystä (1. 'liian tehokas')

2.3.6 Jäädys-sulatuskokeet, mikro- ja huokosrakenne

2.3.6.1 Koemenetelmät

Käytännössä LB:n jäädys-sulatuskestävyys on suhteessa sen käyttöolosuhteisiin, joita määrittelevät erityisesti kosteusolosuhteet ja tiesuolauksen käyttö. Lisäksi merkitystä on esimerkiksi jäätymisnopeudella.

LB:lle ei ole vielä olemassa vakiintuneita jäädys-sulatuskestävyyden määritys- ja laadunvalvontamenetelmiä edes maissa, joissa sitä on käytetty jo suhteellisen pitkään. Asiaan on alettu kiinnittää huomiota vasta viime aikoina. Vedenläpäisevyytensä vuoksi LB poikkeaa

tavanomaisesta betonista, minkä vuoksi kaikki tavanomaisen betonin jäädytys-sulatuskokeet eivät sovellu sille ainakaan sellaisenaan. Lisäksi soveltuvaa menetelmää valittaessa joudutaan ottamaan kantaa siihen, minkälaiset menetelmän kosteusolosuhteiden tulisi jotta ne vastaisivat halutulla tavalla käytännön olosuhteita. Koska LB-pinta läpäisee suuren osan sen käyttöajasta vettä, ei LB:n kosteusrasitus muodostu samaksi kuin tavanomaisen betonin kosteusrasitus samoissa käyttöolosuhteissa.




Esimerkiksi USA:ssa paljon käytetyn ASTM C666-menetelmän suurta jäädytysnopeutta (noin 4–10 °C/h) on pidetty sekä tavanomaiselle betonille ja erityisesti läpäisevälle betonille liian suurena. Lisäksi ASTM C666-menetelmää 'A', jossa sekä jäädytys että sulatus tapahtuvat vedessä, on pidetty erityisen ankarana myös suuren kosteusrasituksen vuoksi. Toisaalta menetelmä yksin ei ratkaise, vaan myös asetettavat hyväksyntäkriteerit. Tässä tutkimuksessa tavoitteena oli saada lisätietoa paitsi erilaisten LB-massojen kestävyydestä myös erityyppisistä kestävyiden arviointimenetelmistä. [Kuosa et al. 2013a, ASTM C666/C666M-2003: 2008, Kevern et al. 2009, Yang et al. 2006, Delatte et al. 2007, Kuosa & Holt 2013]

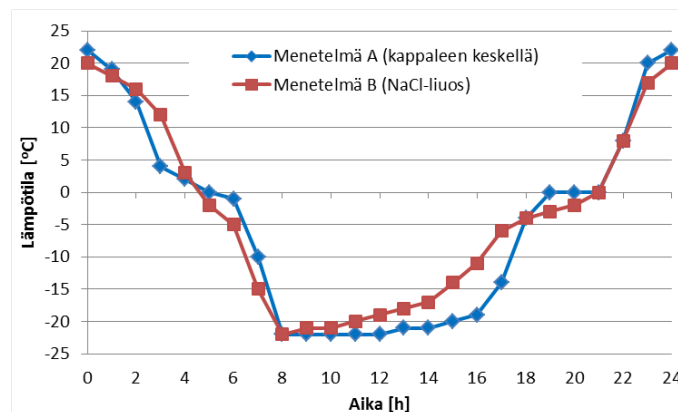
Tässä tutkimuksessa käytettiin kolmen tyyppisiä jäädytys-sulatuskokeita (A, B ja C), jotka erosivat toisistaan koetta edeltäneiden ja sen aikaisten kosteusolosuhteiden osalta. Lisäksi yhdessä menettelyssä oli mukana suola-altistus (3 % NaCl-liuos). Menetelmät ovat muunnoksia Suomessa tavanomaisen betonin osalta hyvin tunnetuista ja yleisesti laadunvalvonnan [By 50 2012] käytetyistä menetelmistä [CEN/TR 15177. 2006] ja [CEN/TS 12390-9:2006]. Nämä menettelyt valittiin osin myös siksi, että ko. kokeiden tekemiseen tarvittavat jäädytys-sulatus- ja mittauslaitteet ovat Suomessa ja myös monissa muissa maissa kuten erityisesti Pohjoismaissa laajalti käytössä olevia.

Kaikissa menettelyissä jäädytysnopeus vastasi likimain Suomessa yleisessä käytössä olevan laattakokeen (Borås-koe) jäädytys-sulatusnopeutta. Laattakokeessa vuorokaudessa tehdään yksi jäädytys-sulatus ja jäädytysnopeus alle 0 °C:ssa on noin 2,5 °C/h. [CEN/TR 15177: 2006, CEN/TS 12390-9: 2006] Kuvassa 31 on esitetty lämpötilaseurannassa saadut jäädytys-sulatuskäyrät menettelyjen A ja B osalta. Menettelyn C osalta tätä mittausta ei tehty. On kuitenkin oletettavaa, että koekappaleiden lämpötilat eivät menettelyssä C oleellisesti poikenneet menettelyjen A ja B lämpötiloista, koska käytetyn jäädytys-sulatuslaitteiston ohjelmointi oli kaikissa menettelyissä sama ja myös menettelyssä C koekappaleiden kosteuspitoukset olivat suuret.

Valittujen koemenettelyjen tarkempi kuvaus on esitetty taulukossa 22. Kuvassa 32 on koejärjestelyjä ja mittauksia selventäviä valokuvia.

Taulukko 22. Jäädytys-sulatuskokeiden kuvaukset.

Menettely	A	B	C
Menettelyn periaate	Jäädytys-sulatus, jossa koekappaleet kokonaan vedessä.	Jäädytys-sulatus, jossa kappaleen alla NaCl-liuos (3 %).	Jäädytys-sulatus muovitetuina pitkän vesiupotuksen (vesi-imeytyksen) jälkeen.
Lisätietoja	Testaus muuten kuten menetelmässä [CEN/TR 15177. 2006], mutta koekappaleet alkuimeytyksessä ja jäädytys-sulatuksessa veteen upotettuina. Kukin koekappale (150x150x50 mm ³) muoviastiassa, jonka koko hieman koekappaletta suurempi. Kokeen aikana astian kansi kiinni. Mittaukset kuten testausohjeessa [CEN/TR 15177. 2006] ja lisäksi painon seuranta (ks. alla). Kokeen kesto 56 kierrosta (vuorokautta) tai kunnes kappale hajoaa siinä määrin, että mittauksia ei voida enää tehdä.	Testaus muuten kuten menetelmässä [CEN/TR 12390-9:2006], mutta kukin koekappale jäädytys-sulatuskierrosten aikana alapinnasta noin 5 mm NaCl-liuokseen (3 %) upotettuna ja noin 5 mm paksujen muovivälikkeiden päällä. Kukin koekappale (150x150x50 mm ³) muovi-astiassa, jonka koko hieman koekappaletta suurempi. Kokeen aikana astian kansi kiinni. Mittaukset kuten testausohjeessa [CEN/TR 12390-9:2006] ja lisäksi RDM seuranta (ks. alla). Kokeen kesto 56 kierrosta (vuorokautta) tai kunnes kappale hajoaa siinä määrin, että mittauksia ei voida enää tehdä.	Testaus muuten kuten menetelmässä [CEN/TR 15177. 2006], mutta koekappaleet alkuimeytyksessä (+20 °C) kokonaan veteen upotettuina 50 d ajan ja sen jälkeen jäädytys-sulatuksen aikana tiiviisti muovin käärittynä ja kukin koekappale muoviastiassa, jonka koko hieman koekappaletta suurempi. Kokeen aikana astian kansi kiinni. Kokeen kesto 56 kierrosta (vuorokautta) tai kunnes kappale hajoaa siinä määrin, että mittauksia ei voida enää tehdä.
Lämpötilaseuranta	Koekappaleen keskeltä (erillinen lisäkoekappale).	Alapuoilisesta liuoksesta.	Ei tehty (periaatteessa koekappaleen keskeltä).
Periaatekuva ● Lämpötilaseurannan kohta	 Välikkeet (5 mm) alla Vesikerros päällä ja reunoilla n. 10 mm.	 Alapinnan upotus 5 mm suolaliuokseen (3 % NaCl). Välikkeet (5 mm) alla. Liuoskorkeus 10 mm.	 V Muovitus ympärillä. (—)
Mittaukset, seuranta	RDM (suhteellinen dynaaminen kimmokerroin, sekä ultraäänimittauksella (UPTT) että ominaisfrekvenssimittauksella (FF)). Paino, grammaa (vedenimu kasvattaa ja rapautuminen pienentää) Suhteellinen paino (suhteessa painoon ennen vesi-imeytystä).	Rapautuminen, kg/m ² (kuiva aines, kuivatus +105 °C) RDM (suhteellinen dynaaminen kimmokerroin, sekä ultraäänimittauksella että ominaisfrekvenssimittauksella).	RDM (suhteellinen dynaaminen kimmokerroin, sekä ultraäänimittauksella (UPTT) että ominaisfrekvenssimittauksella (FF)). Paino, grammaa (vedenimu kasvattaa ja rapautuminen pienentää). Suhteellinen paino (suhteessa painoon ennen vesi-imeytystä).
Koetulokset	RDM _{UPTT} , RDM _{FF} ja paino/suhteellinen paino jäädytys-sulatuskierrosten (1/d) funktiona. Silmä määräiset havainnot.	Rapautuminen, RDM _{UPTT} ja RDM _{FF} jäädytys-sulatuskierrosten funktiona. Silmä määräiset havainnot.	RDM _{UPTT} , RDM _{FF} ja paino/suhteellinen paino jäädytys-sulatuskierrosten (1/d) funktiona. Silmä määräiset havainnot.



Kuva 31. Menettelyjen A ja B jäädytys-sulatuskäyrät eli lämpötilat ajan funktiona. Yhden kierroksen pituus on 24 tuntia.



Kuva 32. Jäädytys-sulatuskokeiden (ks. taulukko 22) eri vaiheita: a) Koekappaleita jäädytys-sulatuskaapissa muovivastioissa; b) Lämpötilan mittaus koekappaleen keskeltä (menettelyssä A); c) Koekappale sulamisvaiheessa, vesi vielä osin jäässä (menettely A); d) pakkas-suolakokeen koekappale ja astiassa pohjalla NaCl-liuosta ja hieman rapautunutta ainesta (menettely B); e) Koekappaleita muoviin käärittyinä (menettely C); f) Koekappaleen punnitus; g) Ultraäänmittaus (UPVT); h) Ominaisfrekvenssin (FF) mittaus.

2.3.6.2 LB-massat

Tiedot tutkimusten massoista ja niiden perusominaisuuksista on esitetty edellä kappaleessa 2.3.3 (*Massojen valmistus, koekappaleiden valu ja tiivistys*).

2.3.6.3 Koetulokset

Jäädytys-sulatuskokeissa (menetelmät A ja C) oli 4 koekappaleita/betoni. Pakkas-suolakoekassa (menetelmä B) oli 3 koekappaleita/betoni paitsi betonin PC5 osalta 4 koekappaleita/betoni. Jäädytys-sulatuskokeiden keskiarvotulokset on esitetty taulukoissa 23–25 ja pakkas-suolakoekien keskiarvotulokset taulukoissa 26–28. Kuvissa 33–37 edelliset keskiarvotulokset on esitetty graafisessa muodossa. Kovettuneiden betonien suojahuokosanalyysien tulokset on esitetty taulukossa 33. Liitteissä 7–9 on esitetty menetelmillä A, B ja C saadut koetulokset kunkin koekappaleen osalta erikseen. Liitteessä 10 on esitetty kuvat kaikkien PC3-koekappaleiden suhteellisesta massasta menetelmissä A ja C (jäädytys-sulatus vedes-

sä, säilytys vedessä ja jäädytys-sulatus muovissa). Kuvassa 38 on esimerkkejä betonien huokosrakenteesta.

Taulukko 23. Betonit PC3, PC4 ja PC5. Jäädytys-sulatuskoe (menetelmät A ja C). Sisäinen vaurioituminen (RDM) ultraäänimittauksella (UPTT).

J.-s. kierrosta	RDM _{UPTT} (jäädytys-sulatus vedessä)		RDM _{UPTT} (säilytys vedessä)		RDM _{UPTT} (jäädytys-sulatus muovissa)		RDM _{UPTT} (jäädytys-sulatus vedessä)		RDM _{UPTT} (säilytys vedessä)		RDM _{UPTT} (jäädytys-sulatus vedessä)	
	PC3 j.-s. vedessä keskiarvo (UPTT)	PC3 j.-s. vedessä keski-hajonta	PC3 vedessä keskiarvo (UPTT)	PC3 vedessä keski-hajonta	PC3/j.-s. muovissa keskiarvo (UPTT)	PC3/j.-s. muovissa keski-hajonta	PC4 j.-s. vedessä keskiarvo (UPTT)	PC4 j.-s. vedessä keski-hajonta	PC4 vedessä keskiarvo (UPTT)	PC4 vedessä keski-hajonta	PC5 j.-s. vedessä keskiarvo (UPTT)	PC5 j.-s. vedessä keski-hajonta
0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
7	0,98	0,11	1,05	0,08	0,91	0,09	0,79	0,11	1,05	0,01	0,97	0,08
14	0,68	0,14	1,06	0,08	1,00	0,04	0,78	0,10	1,02	0,03	0,99	0,05
28	Ei voitu mitata, kappaleet menettivät		1,09	0,12	0,95	0,09	0,48	0,17	1,05	0,02	1,04	0,02
42	Ei voitu mitata, kappaleet menettivät		1,14	0,07	0,90	0,07	Ei voitu mitata, kappaleet menettivät		1,05	0,03	0,99	0,06
56	Ei voitu mitata, kappaleet menettivät		Kappaleet jatkossa jäädytys-sulatukseen muovissa,		0,91	0,12	Ei voitu mitata, kappaleet menettivät		1,06	0,05	1,00	0,06

Taulukko 24. Betonit PC3, PC4 ja PC5. Jäädytys-sulatuskoe (menetelmät A ja C). Sisäinen vaurioituminen (RDM) ominaisfrekvenssimittauksella (FF).

J.-s. kierrosta	RDM _{FF} (jäädytys-sulatus vedessä)		RDM _{FF} (säilytys vedessä)		RDM _{FF} (jäädytys-sulatus muovissa)		RDM _{FF} (jäädytys-sulatus vedessä)		RDM _{FF} (säilytys vedessä)		RDM _{FF} (jäädytys-sulatus vedessä)	
	PC3 j.-s. vedessä keskiarvo (FF)	PC3 j.-s. vedessä keski-hajonta	PC3 vedessä keskiarvo (FF)	PC3 vedessä keski-hajonta	PC3/j.-s. muovissa keskiarvo (FF)	PC3/j.-s. muovissa keski-hajonta	PC4 j.-s. vedessä keskiarvo (FF)	PC4 j.-s. vedessä keski-hajonta	PC4 vedessä keskiarvo (FF)	PC4 vedessä keski-hajonta	PC5 j.-s. vedessä keskiarvo (FF)	PC5 j.-s. vedessä keski-hajonta
0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
7	0,87	0,07	1,07	0,01	0,91	0,01	0,76	0,06	1,02	0,01	0,98	0,00
14	0,58	0,29	1,09	0,49	0,91	0,01	0,66	0,15	1,04	0,01	0,99	0,01
28	Ei voitu mitata, kappaleet menettivät		1,12	0,01	0,88	0,02	0,21	0,13	1,06	0,02	0,99	0,01
42	Ei voitu mitata, kappaleet menettivät		1,15	0,01	0,87	0,02	Ei voitu mitata, kappaleet menettivät		1,07	0,02	1,00	0,00
56	Ei voitu mitata, kappaleet menettivät		Kappaleet jatkossa jäädytys-sulatukseen muovissa,		0,86	0,03	Ei voitu mitata, kappaleet menettivät		1,08	0,02	1,00	0,01

Taulukko 25. Betonit PC3, PC4 ja PC5. Jäädytys-sulatuskoe (menetelmät A ja C). Suhteellisen koekappaleiden paino (= 1 ennen 3 d:n vesi-imeytystä).

J.-s. kierrosta	Suhteellinen massa [-] (jäädytys-sulatus vedessä)		Suhteellinen massa [-] (säilytys vedessä)		Suhteellinen massa [-] (jäädytys-sulatus muovissa)		Suhteellinen massa [-] (jäädytys-sulatus vedessä)		Suhteellinen massa [-] (säilytys vedessä)		Rapautuminen [kg/m ²] (jäädytys-sulatus vedessä)	
	PC3 j.-s. vedessä keskiarvo	PC3 j.-s. vedessä keski-hajonta	PC3 vedessä keskiarvo	PC3 vedessä keski-hajonta	PC3/j.-s. muovissa keskiarvo	PC3/j.-s. muovissa keski-hajonta	PC4 j.-s. vedessä keskiarvo	PC4 j.-s. vedessä keski-hajonta	PC4 vedessä keskiarvo	PC4 vedessä keski-hajonta	PC5 j.-s. vedessä keskiarvo	PC5 j.-s. vedessä keski-hajonta
-3	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0		
0	1,0198	0,001	1,0205	0,0015	1,0231	0,0008	1,0062	0,002	1,0077	0,0008	0	0
7	1,0247	0,001	1,0236	0,0014	1,0205	0,0010	1,0032	0,001	1,0107	0,0012	0,030	0,004
14	1,0215	0,004	1,0244	0,0017	1,0193	0,0009	1,0045	0,002	1,0077	0,0015	0,057	0,002
28	Ei voitu mitata, kappaleet menettivät		1,0272	0,0006	1,0198	0,0016	1,0039	0,004	1,0094	0,0022	0,076	0,003
42	Ei voitu mitata, kappaleet menettivät		1,0281	0,0010	1,0195	0,0025	Ei voitu mitata, kappaleet menettivät		1,0170	0,0024	0,088	0,009
56	Ei voitu mitata, kappaleet menettivät		Kappaleet jäädytys-sulatukseen muovissa, menetelmä C.		1,0200	0,0032	Ei voitu mitata, kappaleet menettivät		1,0167	0,0017	0,103	0,005

Taulukko 26. Pakkas-suolakoe (menetelmä B). Rapautuma.

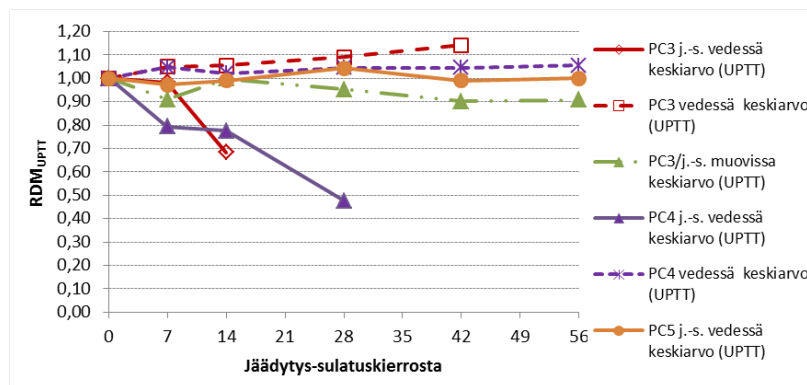
J.-s. kierrosta	Rapautuma [kg/m ²]							
	PC1 keskiarvo	PC1 keski-hajonta	PC3 keskiarvo	PC3 keski-hajonta	PC4 keskiarvo	PC4 keski-hajonta	PC5 keskiarvo	PC5 keski-hajonta
0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0,453	0,091	0,192	0,084	0,755	0,449	0,100	0,035
14	2,660	0,580	2,491	3,721	10,607	13,351	0,250	0,056
28	13,327	2,237					0,523	0,066
42	34,244	8,892					0,974	0,219
56							13,367	11,994

Taulukko 27. Betonit PC1, PC3, PC4 ja PC5. Pakkas-suolakoe (menetelmä B). Sisäinen vaurioituminen (RDM) ultraäänimittauksella (UPTT).

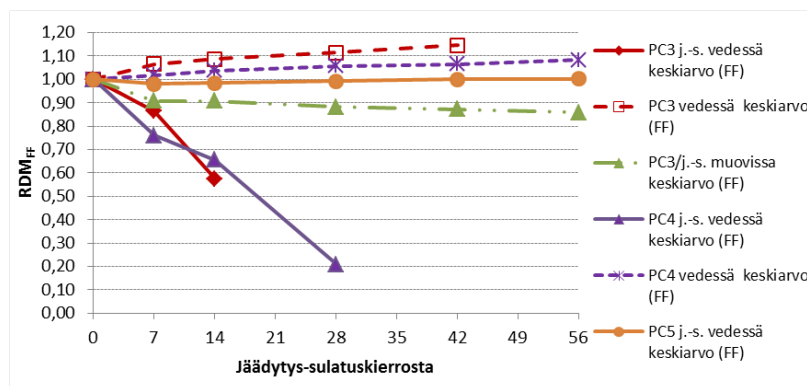
J-s. kierrosta	RDM _{UPTT} (pakkas-suolakoe)							
	PC1 keskiarvo	PC1 keski-hajonta	PC3 keskiarvo	PC3 keski-hajonta	PC4 keskiarvo	PC4 keski-hajonta	PC5 keskiarvo	PC5 keski-hajonta
0	1	0	1	0	1	0	1	0
7	1,00	0,01	0,96	0,07	0,62	0,13	1,00	0,05
14	0,87	0,10	0,87	0,15	0,09	0,02	1,01	0,04
28	0,70	0,14					0,90	0,12
42							0,85	0,15
56							0,86	0,27

Taulukko 28. Betonit PC1, PC3, PC4 ja PC5. Pakkas-suolakoe (menetelmä B). Sisäinen vaurioituminen (RDM) ominaisfrekvenssimittauksella (FF).

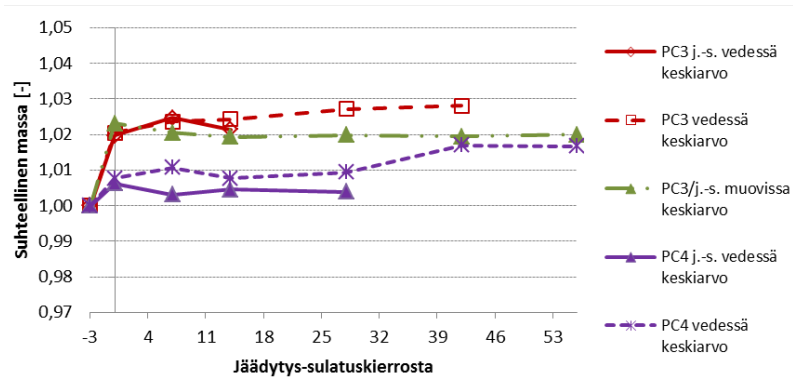
J-s. kierrosta	RDM _{FF} (pakkas-suolakoe)							
	PC1 keskiarvo	PC1 keski-hajonta	PC3 keskiarvo	PC3 keski-hajonta	PC4 keskiarvo	PC4 keski-hajonta	PC5 keskiarvo	PC5 keski-hajonta
0	1	0	1	0	1	0	1,00	0
7	0,76	0,18	0,80	0,14	0,62	0,13	0,96	0,02
14	0,65	0,21	0,52	0,38	0,09	0,02	0,94	0,04
28	0,36	0,20					0,76	0,19
42	0,10	0,10					0,38	0,14
56							0,34	0,30



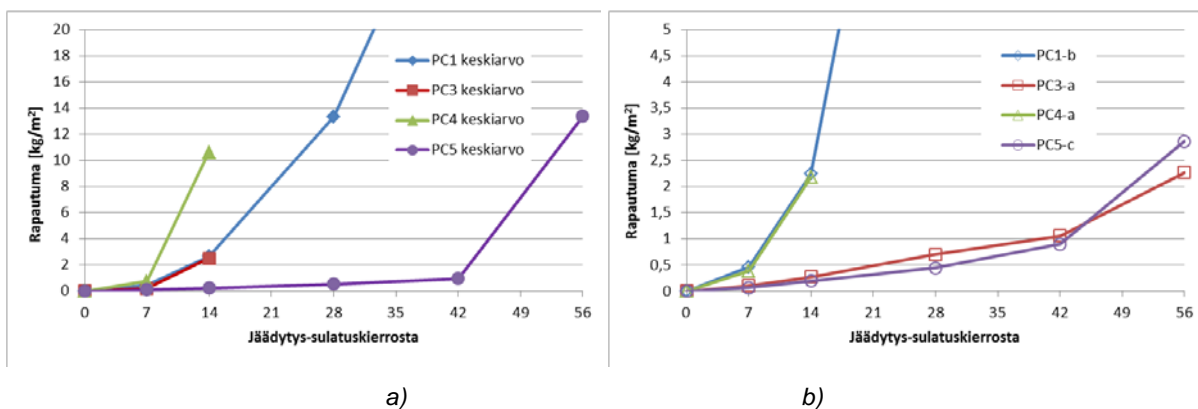
Kuva 33. Jäädytys-sulatuskoe (menetelmät A ja C). Sisäinen vaurioituminen (RDM) ultraäänimittauksella (UPTT).



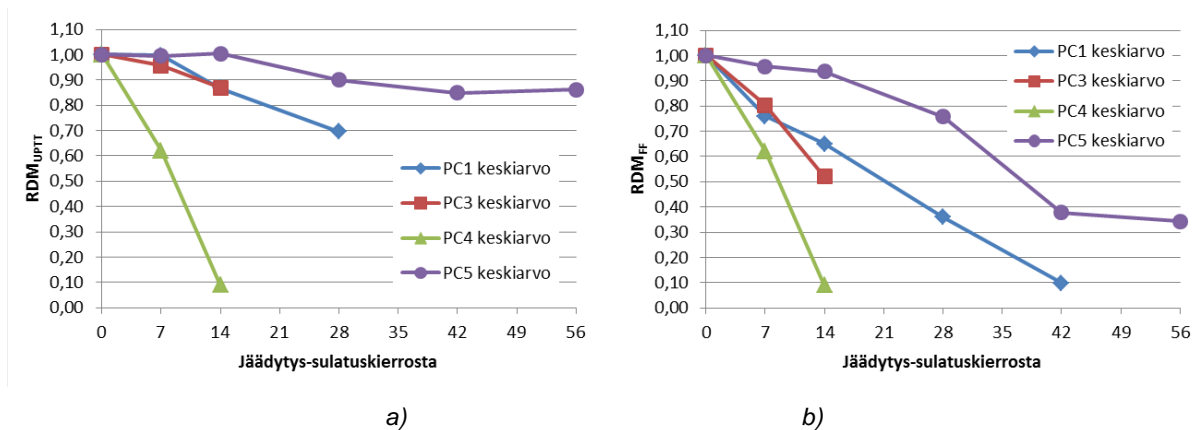
Kuva 34. Jäädytys-sulatuskoe (menetelmät A ja C). Sisäinen vaurioituminen (RDM) ominaisfrekvenssimittauksella (FF).



Kuva 35. Jääditys-sulatuskoe (menetelmät A ja C). Suhteellinen koekappaleiden paino (= 1 ennen 3 d:n vesi-imeytystä). Ei määritetty massalle PC5.



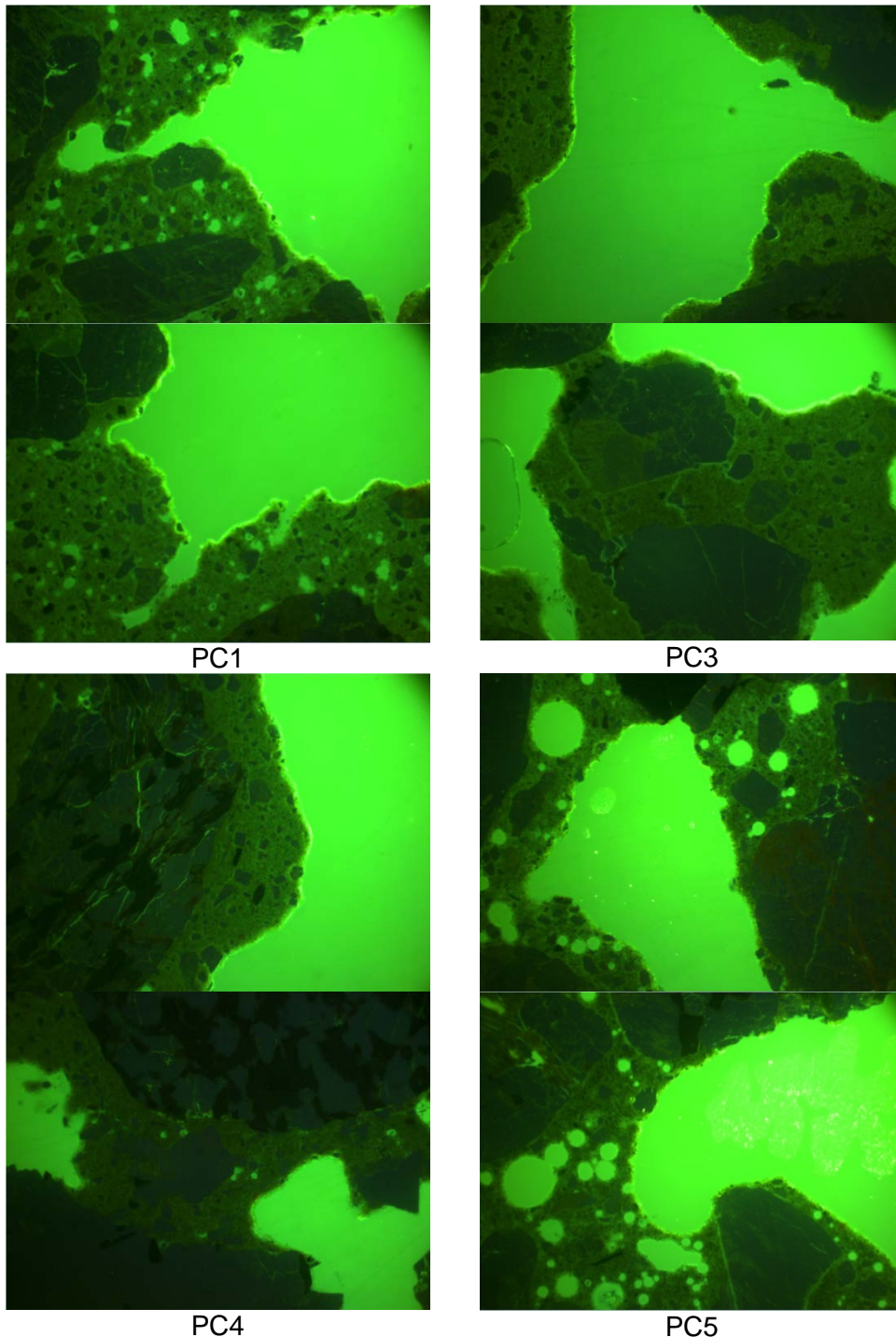
Kuva 36. Pakkas-suolakoe (menetelmä B). Rapautuma: a) keskiarvotulokset; b) paras koekappale/betoni.



Kuva 37. Pakkas-suolakoe (menetelmä B). Sisäinen vaurioituminen (RDM): a) Ultraäänimitauksella (UPTT) ja b) Ominaisfrekvenssimittauksella (FF).

Taulukko 29. Kovettuneen betonin suojuhuokosanalyysin tulokset. [VTT TEST R003-00 2011].

	PC1	PC3	PC4	PC5
Kokonaishuokoisuus [%]	22,7	25,3	31,2	21,1
Pastamäärä (sementti + vesi) [%]	17,9	18,2	16,0	20,1
<0,800 mm huokokset betonissa [%]	0,9	0,2	0,2	2,2
>0,800 mm huokokset betonissa [%]	21,7	25,1	31,1	18,9
<0,800 mm huokokset sementtipastassa [%]	5,0	1,1	1,3	10,9
<0,800 mm huokosten ominaispinta-ala [mm ² /mm ³]	49	28	79	35
<0,800 mm huokosten huokosjako (sementtipastassa) [mm]	0,17	0,54	0,21	0,17



Kuva 38. Mikrorakennekuvia betonien huokosrakenteesta ja sementtipastan/laastiosuuden suojahuokostuksesta. Kuvien leveys on 4,5 mm.

2.3.6.4 Koetulosten analysointi

Tässä analyysissä tavoitteena on käsityksen saaminen jäädytys-sulatuskestävyyden arvioinnissa käytettyjen menetelmien soveltuvuudesta ja niiden keskinäisistä suhteista. Tavoitteena on myös käsityksen saaminen siitä, minkälaista läpäisevän betonin vaurioituminen on erilaisissa rasituksissa ja miten voidaan taata hyväksyttävä jäädytys-sulatuskestävyys Suomen olosuhteissa.

Kaikkiaan tutkimus oli suhteellisen suppea, koska jäädytys-sulatuskokeissa betonikoostumuksia oli vain 4. Toisaalta tuloksia kertyi suhteellisen paljon, koska betonit testattiin kolmella erilaisella jäädytys-sulatusmenetelmällä, joissa kussakin vaurioitumista seurattiin

useilla eri mittausmenetelmillä. Lisäksi analysoitiin betonien huokostuksen määrää ja laatua sekä massasta että kovettuneesta betonista.

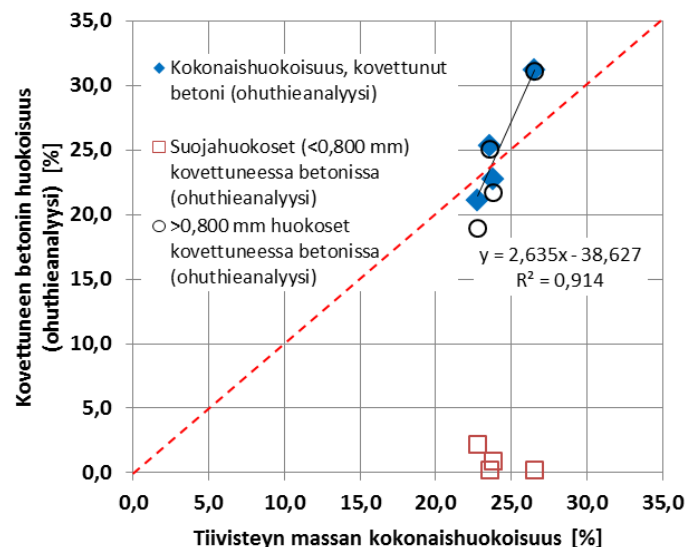
Aiempaa kokemusta LB:n jäädytys-sulatuskestävyydestä ja siihen vaikuttavista tekijöistä ja niiden suhteesta tässä käytettyihin uusiin kokeellisiin menetelmiin ei ollut. Erityisesti kokeesta ei ollut siitä, mikä pienen ($<0,30$) vesi-sementtisuhteen LB:n suojahuokostuksen määrän ja laadun (huokosjako) tulisi olla. Tietoa ei myöskään ollut suojahuokostuksen pysyvyydestä (tiivistemätön massa/kovettunut LB). Tämän vuoksi tulokset olivat osin jopa erittäin huonoja. Toisaalta se, että kokeissa saatiin erilaisia tuloksia, auttoi tunnistamaan tekijöitä, joilla LB:n hyvä jäädytys-sulatuskestävyys voidaan taata. Tunnetusti tässä on merkitystä myös käytännön olosuhteilla eli erityisesti sillä, käytetäänkö kohteessa suolausta ja minkälaisiksi kosteusolosuhteet voivat muodostua. Kosteusolosuhteisiin vaikuttavat myös läpäisevän pinnoitteen alapuoliset rakennekerrokset ja niiden vedenläpäisevyys ja veden varastointikapasiteetti. [Kuosa et al. 2013a]

Kokonaishuokoisuus ja suojahuokosten määrä

Tiivistetyn LB-massan kokonaishuokoisuus määritettiin massan mitattuun tiheyteen perustuen [C1688/C1688M: 2012]. Kuvassa 39 tätä arvoa on verrattu kovettuneen betoni kokonaishuokoisuuteen, joka määritettiin ohuthieanalyysillä. Vastaavuus on suhteellisen hyvä ottaen huomioon, että ohuthieanalyysissä betonin kokonaishuokoisuudesta saadaan aina pienen analyysipinta-alan vuoksi vain suuntaa antava arvo.

Kuvasta 39 ilmenee myös, mikä oli kovettuneen betonin suojahuokosten (0,020–0,800 mm) määrä ja yli 0,800 mm:n huokosten määräärvio (raja-arvot ovat huokosten lävistyspituuksia tasoanalyysissä).

Ohuthieanalyysissä betonien pasta-% (hieissä) oli 16,0–20,1 % eli analyyseissä pastamäärä oli noin 480–600 mm² (2 hiettä/betoni, a´ 30x50 mm²). Tämä ei ole tulosten (suojahuokosten määrä, ominaispinta-ala ja huokosjako) luotettavuuden kannalta aivan riittävä määrä. Analysoitavan pastamäärän tulisi olla vähintään 690 mm² (ks. kohta 2.3.4.2 Ennakkokoe 2). Onkin suositeltavaa tehdä LB:n ohuthieanalyysi käyttäen kolmea hiettä, jos niiden koko on 30x50 mm². Toinen vaihtoehto on käyttää pintahieanalyysiä, jossa analysoitava pinta-ala täyttää ko. analyysissä sille asetetun vaatimuksen. Tällöin kuitenkin tulosten laskentaa varten LB:n pastamäärä tulee tuntea riittävällä tarkkuudella (tieto massan koostumuksesta, osa-aineet kg/m³).



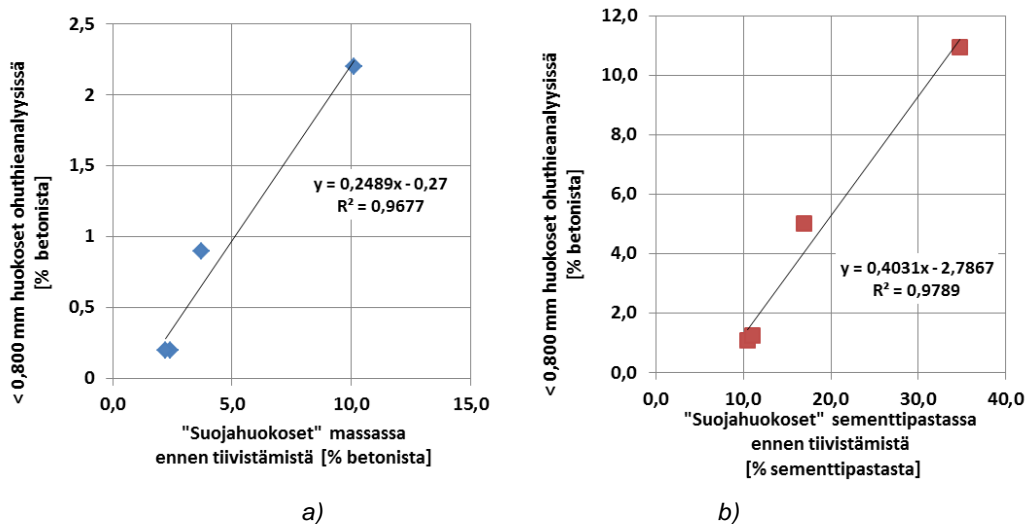
Kuva 39. Tiivistetyn tuoreen massan kokonaishuokoisuuden ja kovettuneen betonin kokonaishuokoisuuden (ohuthieanalyysi, hieiden pienen koon vuoksi kokonaisilmamäärä suuntaa antava tulos) yhteys.

Kovettuneen betonin huokosanalyysissä saatujen tulosten mukaan suojahuokosten määrä oli kovettuneessa betonissa useissa tapauksissa erittäin pieni. Eniten suojahuokosia oli betonissa PC5 (2,2 % betonissa ja 10,9 % sementtipastaosuudessa), mutta muissa betoneissa suojahuokosia oli vain 0,2–0,9 % betonissa ja 1,1–5,0 % sementtipastassa.

Kuvassa 36 tiivistämättömien massojen suojahuokosten määrää on verrattu kovettuneen betonin suojahuokosten määrään. Kovettuneen betonin suojahuokosten määrä ei vastannut tiivistämättömän tuoreen massan suojahuokosten määrän arvioinnissa saatuja tuloksia (ks. myös taulukot 21 ja 29 ja kuvat 30 ja 38). Tuoreen tiivistämättömän betonin ja kovettuneen betonin suojahuokosmäärien välillä oli kuitenkin hyvä korrelaatio (ks. kuva 40).

Myös esimerkiksi viitteen [Vancura et al. 2011] tutkimuksissa havaittiin, että suuressa osassa kartoitettuja läpäiseviä betoneja ei ollut suojahuokosia vaikka niin oli oletettu, koska massat oli valmistettu huokostinta käyttäen. Viitteessä on arveltu, että tämä johtuu ainakin osaltaan siitä, että LB:lle tyypillisellä pienellä vesi-sementtisuhteella ($w/c = 0,27$) massoissa ei ollut riittävästi vettä suojahuokosten muodostamiseen. Suojahuokostamisen mekanismi vaatii sen, että suojahuokosten ympärille muodostuu yhtenäinen vesifilmi, joka mahdollistaa huokostinmolekyyliden toiminnan ja pysyvien suojahuokosten muodostumisen. Pienen vesi-sementtisuhteen vuoksi suhteellisen suuri osuus vedestä kului sementtipartikkelien ympäröimiseen ja kostuttamiseen, ja näin huokosten muodostamiseen ei aina jäänyt riittävästi vettä.

Tässä tutkimuksessa yhtenä huomiona oli se, että kovettuneen LB:n pastaosuuden suojahuokokset olivat usein erittäin pieniä (ks. taulukko 29), minkä vuoksi huokosjako oli pienestä huokosmäärästä huolimatta kuitenkin osin (betonit PC1 ja PC4) hyvällä tasolla (0,17 mm ja 0,21 mm). Betonissa PC 3 (polymeerilisäaine; erillistä lisähuokostinta ei käytetty) huokosjako ei kuitenkaan ollut erityisen pieni. Vain betonissa PC5 pieniä suojahuokosia oli merkittävästi (2,2 % betonissa) ja huokosjako oli samalla pieni (0,17 mm). Tässä betonissa huokostinanostus oli 2-kertainen muihin huokostettuihin betoneihin verrattuna.



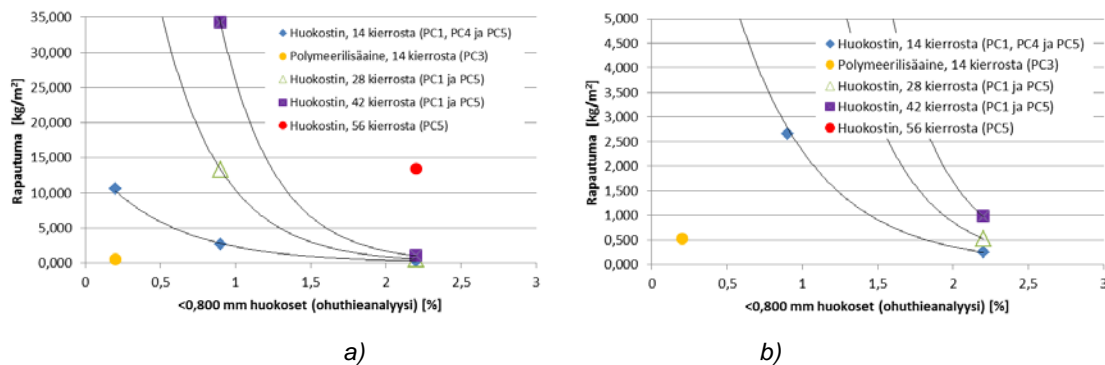
Kuva 40. Massasta ennen tiivistämistä määritetyn "suojahuokosten" määrän ja kovettuneen betonin suojahuokosten määrän välinen yhteys: a) suojahuokokset % betonista; b) suojahuokokset % sementtipastasta.

Kovettuneen betonin suojahuokostuksen suhde pakkas-suolarapautumiseen

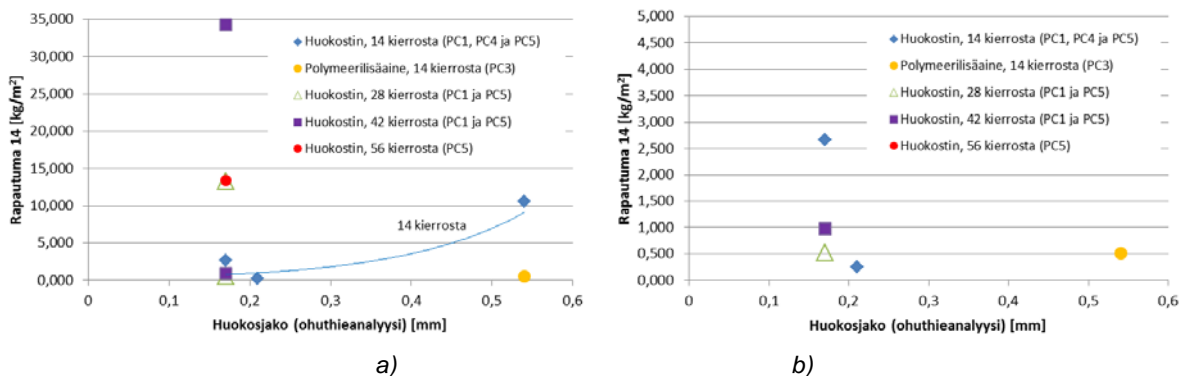
Kuvassa 41 kovettuneiden betonien suojahuokosmääriä on verrattu pakkas-suolakokeessa (menetelmä B) saatuihin rapautumatuloksiin ja kuvassa 42 huokosjakojen arvoja on verrattu rapautumatuloksiin. Kuvissa huokostettuja betoneja ei ole eroteltu toisistaan, vaikka niissä käytettiin eri sementtejä.

Voidaan nähdä (kuva 41a), että suojahuokosten määrä vaikutti selvästi pakkas-suolarapautuman suuruuteen. Lisäksi voidaan nähdä, että betoni, jossa käytettiin polymeerilisäainetta (PC3), rapautui vähemmän samalla suojahuokosmäärällä kuin vastaava huokostettu betoni (tulos vain 14 kierrokseen asti, minkä jälkeen rapautuminen oli liian suurta mitattavaksi).

Sen sijaan huokosjaon ja rapautuman välillä ei ollut selvää riippuvuutta (ks. kuva 41b). Pie-nellä 0,17 mm:n huokosjaolla rapautuminen oli joko voimakasta (PC1) tai suhteellisen vähäistä (PC5).



Kuva 41. Kovettuneen LB:n suojahuokosten (<0,800 mm) ja pakkas-suolarapautumisen väli-set yhteydet: a) Rapautuma-akseli 0–35 kg/m²; b) Rapautuma-akseli 0–5 kg/m².



Kuva 42. Kovettuneen LB:n suojahuokosten (<0,800 mm) huokosjaon ja pakkas-suolarapautuman väli-set yhteydet: a) Rapautuma-akseli 0–35 kg/m²; b) Rapautuma-akseli 0–5 kg/m².

Sementtityypin/sideaineen ja vesi-sementtisuhteen merkitys

Sementtityypin tiedetään olevan yksi tekijä, joka vaikuttaa nimenomaan betonin pintarapautumiseen pakkas-suolarasituksessa. Sementtityypin mahdollista vaikutusta rapautumiseen ei tässä tutkimuksessa kuitenkaan pystytty arvioimaan, koska suoja-huokostuksissa oli niin suuria eroja ja lisäksi kaikissa neljässä betonissa sideaine oli vähintään osin erilainen. Käytännössä sideaineeseen ja sementtityypiin tulee joka tapauksessa kiinnittää huomiota vastaavasti kuin tavanomaisenkin betonin tapauksessa. Eri sideaineilla voi olla erilaisia säilyvyysomaisuuksia erityisesti pitkän ajan kuluessa [Kuosa et al. 2012] Jatkotutkimuksissa siihen, miten riittävän suojahuokostuksen lisäksi myös sideainevalinnalla voitaisiin varmistaa LB:n riittävä kestävyys myös pakkas-suolarasituksessa, tulisi kiinnittää enemmän huomiota.

Vähän rapautuneessa betonissa PC5 vesi-sementtisuhte oli suurin, mutta kuitenkin erittäin pieni (0,30). Todennäköisesti hieman suuremmasta w/c:stä oli ennemminkin etua, koska muiden betonien vesimäärää suurempi vesimäärä yhdessä suuremman huokostin-annostuksen kanssa todennäköisesti edesauttoi suojahuokosten pysyvyyttä (ks. edellä [Vancura et al. 2011]).

Pakkas-suolarapautumisen arvostelukriteeri

Suomessa tavanomaisten betonikivien ja laattojen tulee kestää ulko-olosuhteissa pakkas-suolarasitusta. [SFS 7017: 2014]. Suomalainen standardi SFS 7017 on laadittu eurooppalaisia yhdenmukaistettuja tuotestandardeja täydentäväksi kansalliseksi soveltamisstandardiksi. Lämpäisevä betoni ei sisälly standardin SFS 7017, mutta sen säilyvyysvaatimustasoja voitaisiin periaatteessa soveltaa myös lämpäisevälle betonille, jota käytetään samoissa olosuhteissa kuin esimerkiksi betonikiviä.

Standardin SFS 7017 mukaan tavanomaisen betonikivien tulee ulko-olosuhteissa kestää pakkas-suolarasitusta. Pakkas-suolakestävyyden testaus tehdään standardin EN 1338 Liitteen D (*Annex D (normative) Determination of freeze/thaw resistance with de-icing salt*) mukaisesti. Testaus tehdään siis nk. laattakokeella, jossa betonikivien päällä on kokeen aikana 3 % NaCl-liuos. Periaatteeltaan menetelmä vastaa tässä käytettyä menetelmää B, jossa koekappaleiden alla oli jäädytys-sulatuksen aikana 3 % NaCl-liuos.

Ulko-olosuhteissa betonikivien säilyvyysvaatimuksena on luokka 3/D, mikä tarkoittaa jäädytys-sulatuskestävyyttä, jossa pakkas-suolakokeessa massahävikin keskiarvo on 28 jäädytys-sulatuskierroksen jälkeen $\leq 1,0 \text{ kg/m}^2$ ja mikään yksittäinen arvo ole $> 1,5 \text{ kg/m}^2$. [SFS 7017]

Tulosten mukaan vain betonin PC5 keskimääräinen rapautuma 28 kierroksen jälkeen täytti rapautumavaatimuksen $\leq 1,0 \text{ kg/m}^2$. Betonin PC5 keskimääräinen rapautuma 28 kierroksen jälkeen oli vain $0,523 \text{ kg/m}^2$. Lisäksi suurin yksittäinen rapautumatulos 28 kierroksen jälkeen oli vain $0,590 \text{ kg/m}^2$. Vielä 42 kierroksenkin jälkeen PC5:n keskimääräinen rapautuminen oli vasta $0,974 \text{ kg/m}^2$. Kuitenkin tällöin sisäinen vaurioituminen mitattuna menetelmällä FF oli jo merkittävää (0,38) ja 56 jäädytys-sulatuskierroksen jälkeen myös rapautuminen oli jo erittäin suurta.

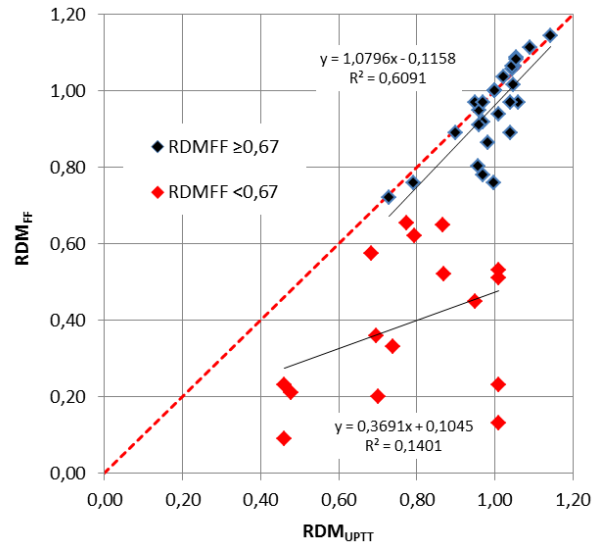
PC5:ssä suojahuokosia oli vain 2,2 % betonissa (10,9 % sementtipastassa). Suuremmalla suojahuokosmäärällä kestävyys olisi mahdollisesti ollut vielä parempi. Toisaalta, koska PC:n huokosrakenne on avoin, on oletettavaa, että sen vedelläkyllästyminen on nopeampaa kuin tavanomaisen betonin vedelläkyllästyminen, mikä lisää vaurioitumisnopeutta.

Betonin PC3 (polymeerilisäaine) yksi koekappale täytti ja toinen tulos melkein täytti rapautumavaatimuksen $\leq 1,0 \text{ kg/m}^2$ (rapautumat $0,701 \text{ kg/m}^2$ ja $1,183 \text{ kg/m}^2$). Kolmannen koekappaleen kestävyys oli kuitenkin selvästi huonompi ja kaikkiaan keskimääräinen rapautuminen 28 kierroksen jälkeen oli yli $1,0 \text{ kg/m}^2$.

LB:n jäädytys-sulatuskestävyyden edelleen parantamisessa kysymykseen voivat tulla suojahuokostuksen lisääminen ja esimerkiksi parhaiten soveltuvien huokostimien käyttö, sideaineen laadun ja tiivyyden parantaminen, erityislisäaineiden käyttö tai nk. mikrohuokosten käyttö (pysyvät muoviset ontot huokokset, $< 60 \mu\text{m}$). Myös LB:n laadunvarmistus tulisi ohjeistaa siten, että säilyvyys voidaan varmistaa myös käytännön olosuhteissa.

Sisäisen vaurioitumisen mittaaminen – UPTT vs. FF

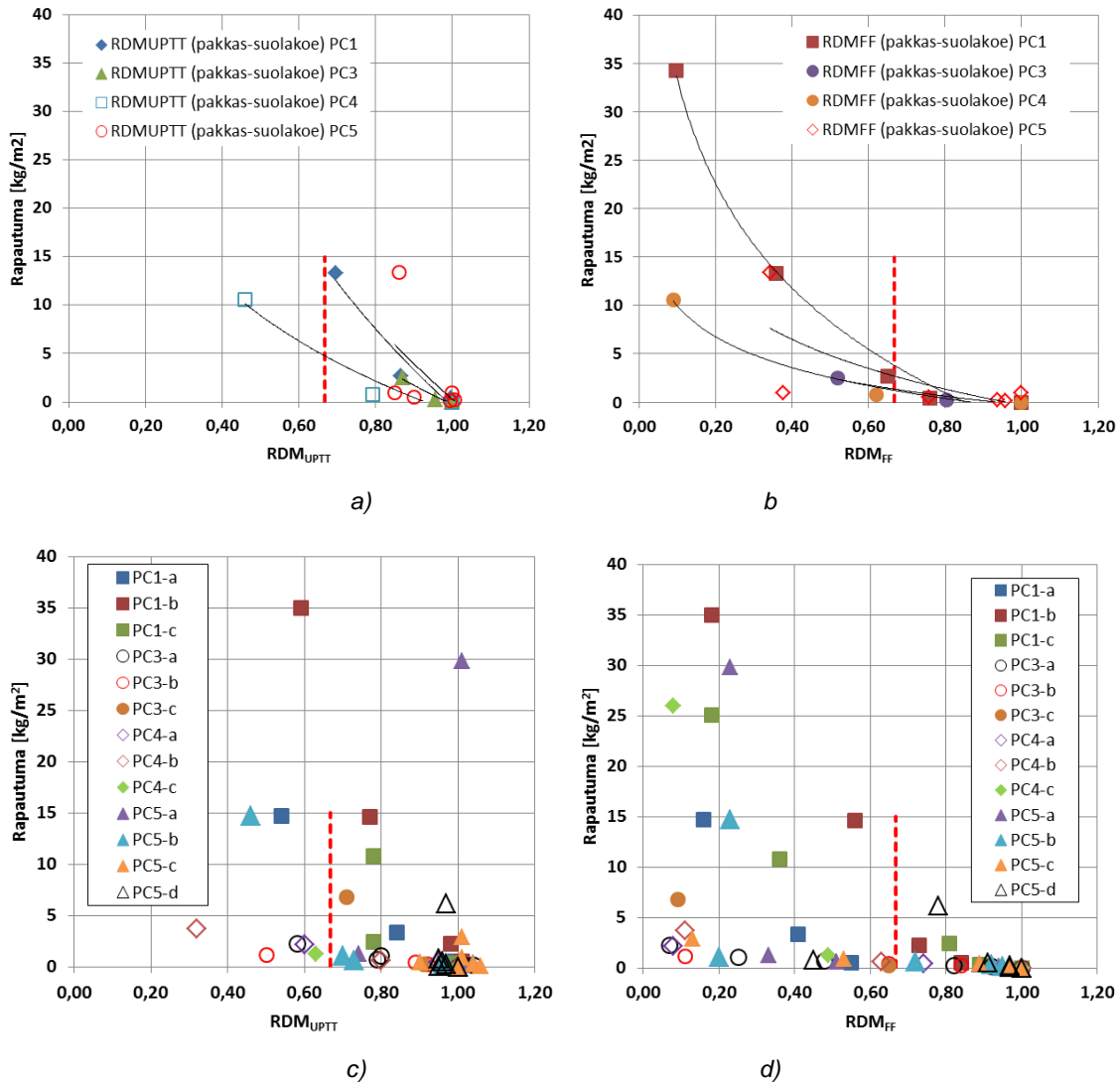
Tässä tutkimuksessa LB-koekappaleiden ($150 \times 150 \times 50 \text{ mm}^3$) sisäistä vaurioitumista mitattiin kaikissa jäädytys-sulatusmenetelmissä (A, B ja C) sekä käyttäen ultraäänimittausta (UPTT) että ominaisfrekvenssimittausta (FF). Näillä menetelmillä saatiin osin toisistaan hieman poikkeava tulos. Molemmilla tavoilla LB:n vaurioituminen oli kuitenkin helposti havaittavissa. Kuvassa 43 on verrattu kaikkia tämän tutkimuksen eri mittauksissa saatuja tuloksia.



Kuva 43. Suhteellisen dynaamisen kimmomoduulin muutos (RDM). Ultraäänimittauksella (UPTT) ja ominaisfrekvenssimittauksella (FF) saatujen tulosten vertailu.

Sisäisen vaurioitumisen (RDM) ja sen yhteys pakkas-suolarapautumiseen menetelmässä B

Pakkas-suolakokeessa (B) tapahtui rapautuman olleessa merkittävää myös nk. sisäistä vaurioitumista, mikä oli havaittavissa suhteellisen dynaamisen kimmokertoimen (RDM) muutoksena. Vaikka koekappale oli vain pinnaltaan (upotus 5 mm) kosketuksessa NaCl-liuoksen kanssa, ulottui pakkasäröjen muodostuminen myös betonin sisäosiin. Tämä vaurioituminen tapahtui suhteellisen nopeasti, kun suojahuokostustuksen määrä oli pieni Kuvassa 44 on esitetty sisäisen vaurioitumisen (RDM) ja pakkas-suolarapautuman välinen yhteys menetelmässä B sekä keskiarvotulosten (a ja b) että yksittäisten koekappaleiden osalta (c ja d). Molemmissa tapauksissa on esitetty tulokset perustuen sekä UPTT- että FF-mittaukseen.



Kuva 44. Sisäisen vaurioitumisen ja pakkas-suolarapautuman välinen yhteys (kaikki tulokset, myös tulokset >28 kierrosta). Kuvissa a) ja b) arvot ovat kunkin betonin keskiarvotuloksia ja kuvien erona vaurioitumisen mittausmenetelmä (UPPT tai FF), Kuvissa c) ja d) arvot ovat kunkin koekappaleen yksittäisiä mittaustuloksia ja kuvien erona vaurioitumisen mittausmenetelmä (UPPT tai FF).

Vesi ja myös suolaliuos pääsee imeytymään LB:n avoimen huokosverkoston kautta ja aluksi huokosten rajapintoja pitkin nopeasti myös betonin sisäosiin. LB voikin saavuttaa pakkasvaurioitumisen suhteen kriittisen vedelläkylästyksen tavallista nopeammin [Yang et al. 2006]. Lämpäisevän betonin suuri rapautumatulos johtuu pitkälti siitä, että kiviainesrakeet voivat irrota tavallista helpommin kokonaan pakkasjäröjen muodostuessa myös kiviaineksen ja sementtipastan rajapinnoille. Nämä rajapinnat (transitiovyöhyke) ovat betonissa ja myös LB:n sementtipastassa huokoisempia (kapillaarihuokokset) kun muu sementtipasta ja näin ollen herkempiä vaurioille. Kiviainesrakeiden ja sementtipastan tartuntaan vaikuttaa myös se, onko LB tiivistetty hyvin. Lisäksi kiviainestartunta voi jäädä vaillinaiseksi, jos sementin hydrataatio tapahtuu liian nopeasti tai massa pääsee kuivumaan liikaa valuvaiheessa. Kuvassa 45 on esimerkit pakkas-suolakokeessa paljon ja vähän vaurioituneista läpäisevistä betoneista.

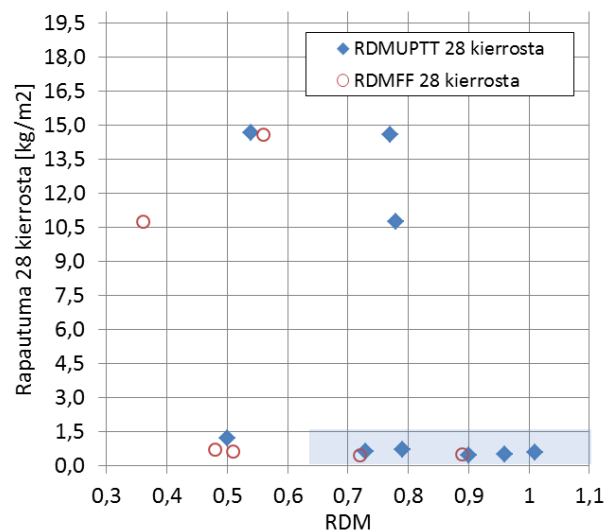


a)

b)

Kuva 45. a) Pakkas-suolakokeessa vaurioitunut huonosti suojahuokostettu LB-koekappale. Suuri rapautuma ja myös kiviainesrakeita irronnut paljon pakkasjäröjen heikennettyä betonin koossapysyvyyden; b) Pakkas-suolakokeessa vain vähän pinnaltaan rapautunut suojahuokostettu LB-koekappale (kuva 14 kierroksen jälkeen). Koekappale on säilyttänyt koossapysyvyytensä.

Yleensä 28 kierroksen jälkeen, kun koekappaleen pakkas-sularapautuma oli alle $1,5 \text{ kg/m}^2$, oli sisäiselle vaurioitumiselle mitattu RDM-arvo yli 0,67. Muutamassa tapauksessa se oli kuitenkin vain noin 0,5. Kaikki tulokset 28 kierroksen jälkeen on esitetty kuvassa 46. Huonosti huokostettujen betonien osalta, rapautuma ja myös sisäinen vaurioituminen olivat 28 kierroksen jälkeen jo niin suuria, että arvoja ei voitu luotettavasti mitata (erittäin suuri rapautuma ja erittäin pieni RDM). Nämä tulokset siis puuttuvat kuvasta 46.



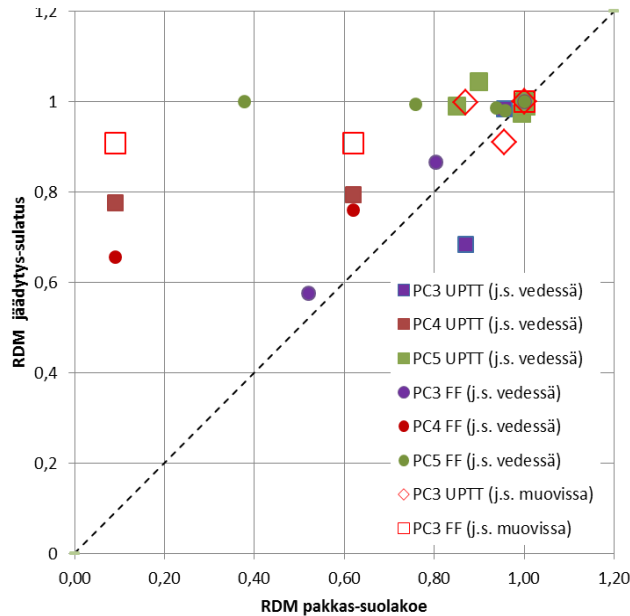
Kuva 46. Sisäisen vaurioitumisen (RDM) ja pakkas-sularapautumisen välinen yhteys 28 jäädytys-sulatuskierroksen jälkeen. Yksittäisille koekappaleille mitattuja arvoja.

Sisäinen vaurioituminen pakkas-suolakokeessa ja jäädytys-sulatuskokeissa (vedessä ja muovissa) – menetelmien A, B ja C vertailu sisäisen vaurioitumisen osalta

Sisäistä vaurioitumista (RDM) tapahtui sekä pakkas-suolakokeessa (B) että jäädytys-sulatuskokeissa (A ja C). Kuvassa 47 on esitetty, miten pakkas-suolakokeen sisäinen vaurioituminen oli suhteessa jäädytys-sulatuskokeissa tapahtuneeseen vaurioitumiseen. Voidaan nähdä, että yleensä jäädytys-sulatuskokeissa sisäinen vaurioituminen oli vähäisempää kuin pakkas-suolakokeessa saman kierrosmäärän jälkeen. Menetelmän C osalta vaurioituminen jäädytys-sulatuksessa oli oleellisesti vähäisempää kuin pakkas-suolakokeessa. Menetelmäs-

sä C pitkään (50 d) vesiupotuksessa säilytettyjä koekappaleita jäädytettiin muoviin käärittyinä.

Kuitenkin kestävyydeltään erittäin huonojen betonien osalta erot menetelmien A ja B välillä olivat käytännössä pieniä. Koekappaleet vaurioituivat nopeasti sekä pakkas-suolakokeessa, jossa ne olivat vain alapinnaltaan kosketuksessa NaCl-liuoksen kanssa, että vesiupotuksessa tapahtuneessa jäädytys-sulatuksessa.



Kuva 47. Sisäinen vaurioituminen pakkas-suolakokeessa (B) suhteessa sisäiseen vaurioitumiseen jäädytys-sulatuskokeessa (A ja C). Kunkin tuloksen (pisteen) jäädytys-sulatuskertojen määrä on sama.

Kuvassa 48 on valokuvat menetelmän C (jäädytys-sulatus muovissa) koekappaleista (PC3) kokeen jälkeen eli 56 kierroksen jälkeen. Silmämääräisesti vaurioitumista ei ollut havaittavissa, mutta mittaustulosten mukaan pakkasväröjä oli kuitenkin hieman muodostunut, koska sisäinen vaurioitumisaste (RDM) oli keskimäärin 0,91 (keskihajonta 0,12). Kappaleet olivat jäädytys-sulatuksessa erittäin märkiä, koska ne olivat ennen jäädytys-sulatusta 50 d ajan vesiupotuksessa. Vesiupotus ja sitä seuraava jäädytys-sulatus on kuitenkin oleellisesti vähemmän ankara menetelmä kuin jäädytys-sulatus vedessä. Lämpisevän betonin kestävyteen voidaan vaikuttaa käytännössä oleellisesti siten, että koko rakenteen vedenläpäisevyys on hyvä. Tällöin sen pintaosan materiaalin kuten esimerkiksi LB:n vesipitoisuus ei pääse muodostumaan liian suureksi.



Kuva 48. Menetelmän C (jäädytys-sulatus muovissa) koekappaleet (PC3) kokeen jälkeen eli 56 kierroksen jälkeen. Sisäinen vaurioitumisaste (RDM) keskimäärin vain 0,91 (keskihajonta 0,12) huolimatta siitä, että betonin PC3 kestävyys ei ollut kaikkiaan hyvä.

Kuvassa 49 on valokuvat menetelmän A (jäädytys-sulatus vedessä) koekappaleista, joiden suojarahukostus oli erittäin huono. Koekappaleissa on huomattavaa vaurioitumista, joka ilmenee erityisesti kiviaines-pastatartunnan peittämisestä.



Kuva 49. Menetelmän A (jäädytys-sulatus vedessä) koekappaleiden vaurioituminen. Betonin suojarahukosten määrä oli erittäin pieni, vain 0,2 % betonissa (1,3 % sementtipastassa).

Kuvassa 50 on valokuvat menetelmän A (jäädytys-sulatus vedessä) koekappaleista, joiden suojarahukostus oli suhteellisen hyvä (PC5). Tässä tapauksessa sisäistä vaurioitumista eli säröjen muodostumista ei ole havaittavissa.



Kuva 50. Menetelmän A (jäädytys-sulatus vedessä) koekappaleita (PC5) 56 jäädytys-sulatuskierroksen jälkeen. Betonin suojuhuokostuksen määrä oli 2,2 % betonissa (>10 % sementtipastassa).

2.3.7 Johtopäätökset

Vettä läpäisevän betonin jäädytys-sulatuskestävyyttä tutkittiin käyttäen kolmea erilaista koemenetelmää. Kaksi menetelmää erosi toisistaan kosteusolosuhteidensa osalta ja yksi lisäksi siksi, että siinä mukana oli mukana suolan vaikutus (3 % NaCl-liuos). Tutkimuksissa oli kaikkiaan neljä betonikoostumusta, joista vain yhdessä oli massan tiivistyksen ja kovettumisen jälkeen merkittävästi suojuhuokostusta. Yhdessä betonissa lisäaineena oli polymeerilisäaine.

Tulosten mukaan ankarin rasitus oli jäädytys-sulatus siten, että koekappale oli koko ajan yhteydessä sen alapuoliseen suolaliuokseen. Myös jäädytys-sulatus, jossa koekappaleet olivat koko ajan vesiupotuksessa, oli lähes yhtä ankara silloin, kun betonin suojuhuokostus oli vaillinainen. Parhaiten LB kesti kokeessa, jossa 50 d vesi-imeytyksen jälkeen jäädytys-sulatus tapahtui muoviin käärittynä.

Tulosten mukaan LB:n riittävän jäädytys-sulatuskestävyyden ja pakkas-suolakestävyyden eli pienen pintarapautumisen takaaminen vaati sen, että kovettuneessa LB:ssä oli määrältään (%) riittävä suojuhuokostus. Suojuhuokosten erittäin pieni huokosjako (mm) ei yksin taannut hyvää kestävyyttä kaikissa testaustapauksissa. Polymeerilisäaine paransi kestävyyttä, mutta ei niin merkittävästi kuin hyvä suojuhuokostus.

LB:n huokostaminen on sikäli vaativaa, että huokosten stabiiliuden takaaminen on pienen vesi-sementtisuhteen vuoksi tavallista vaikeampaa. Huokostimen annostelun tulee olla riittävän suuri ja huokostimen tulee olla alhaisen vesi-sementtisuhteen LB-massan huokostamiseen soveltuva. Huokostuksen onnistuminen ja riittävä jäädytys-sulatuskestävyys tulee varmistaa kovettuneen betonin analyysillä tai soveltuvalla jäädytys-sulatuskokeella. LB:n jäädytys-sulatuskestävyyttä voidaan parantaa tavanomaisen suojuhuokostuksen lisäksi myös monilla muilla tavoilla, jotka eivät sisällyneet tähän perustutkimukseen.

2.4 Muut materiaalit ja tuotteet

2.4.1 Geotekstiili

Tutkimuksissa käytettiin Kaitos Oy:n toimittamaa geotekstiiliä ("NorGeoSpec N2; 0,085 m/s") Geotekstiilin vedenläpäisevyys mitattiin standardin [ASTM C1701/C1701M: 2009] mukaista menetelmää soveltaen (ei siis 'geotekstiilistandardin' [EN ISO 11058: 2010] mukaisesti). Mittaus suoritettiin asettamalla geotekstiili teräsritilän päälle, jolloin geotekstiilin vedenläpäisevyys pystyttiin mittaamaan ASTM:n 'single-ring' mittalaitteella (kuva 51).



Kuva 51. Geotekstiilin vedenläpäisevyyden mittauksessa käytetty järjestely. [ASTM C1701/C1701M: 2009]

Geotekstiilin toimintaa tutkittiin hieman myös Rig-laitteessa (ks. kohta 3). Sillä erotettiin kaksi eri kiviaineskerrosta toisistaan. Geotekstiilin päälle laitettiin Rig:iin n. 300 kg 5/32 mm rae-koon kalliomurskettä, jonka läpi valutettiin vettä. Murskeen kerrospaksuus geotekstiilin päällä oli noin 27 cm. Kun kalliomurskekerros poistettiin, huomattiin että kivistä irronnutta hienoainesta oli jäänyt osin geotekstiiliin sen päälle ja sen huokosiin heikentäen sen vedenläpäisevyyttä. Kaikkein hienoin aines meni lisäksi geotekstiilin läpi veden mukana. Myös tukkiutuneen geotekstiilin vedenläpäisevyys mitattiin standardin [ASTM C1701/C1701M: 2009] mukaista menetelmää soveltaen (ks. kuva 52).



Kuva 52. Tukkeutunut geotekstiili ja vedenläpäisevyyden mittauksessa käytetty järjestely. [ASTM C1701/C1701M: 2009]

Taulukossa 30 on esitetty vedenläpäisevyysarvot sekä puhtaalle että hienoaineksella tukkeutuneelle geotekstiilille.

Taulukko 30. Puhtaan ja tukkeutuneen geotekstiilin vedenläpäisevyys.

Materiaali	Vedenläpäisevyys [m/s]
Geotekstiili	33×10^{-3}
Tukkeutunut geotekstiili	$0,17 \times 10^{-3}$

Puhtaan geotekstiilin vedenläpäisevyys oli lähes 200-kertainen tukkeutuneen geotekstiilin vedenläpäisevyyteen verrattuna. Tässä kokeessa, jossa sovellettiin läpäisevälle betonille tarkoitettua ASTM-standardia, absoluuttisia arvoja ei voida pitää täysin luotettavina vaan yksinomaan suuntaa antavina. Kuitenkin voidaan nähdä, että vettä läpäisevässä rakenteessa kivi-

aineksesta irronneen hienoaineksen vaikutus geotekstiilin vedenläpäisevyyteen on merkittävä, mikä tulee ottaa huomioon rakenteiden suunnittelussa, mitoituksessa ja materiaalive-linnoissa. Mahdollisesti käytettävien geotekstiilien tukkeumista voidaan ehkäistä käyttämällä niiden yläpuolisissa kerroksissa kiviaineksiä, joiden hienainesmäärä on rajoitettu tai kiviainekset ovat pestyjä. Toisena vaihtoehtona on ottaa huomioon hienoaineksen vaikutus vedenläpäisevyyteen rakenteen hydrologisessa mitoituksessa.

2.4.2 Leca-sora

Leca-sora tutkittiin tiivistämättömänä irtotiheyden ja avoimen huokoisuuden osalta. Irtotiheys määritettiin sekä kuivalle että vedellä imeytetyille materiaalille. Leca-soraa oli kahta eri raekokoa (4/10 mm ja 8/20 mm).

Astiat (n. 10 litraa) täytettiin kuivilla materiaaleilla ja punnitustuloksista laskettiin materiaalien irtotiheydet kuivana. Materiaalit imeytettiin tämän jälkeen vedellä upottamalla ne 18 tunniksi veteen. Tämän jälkeen astiat täytettiin vedellä imeytetyillä materiaaleilla ja punnitustuloksista laskettiin vedellä imeytettyjen materiaalien irtotiheydet. Tämän jälkeen astiat, jotka olivat täynnä vedellä imeytettyä materiaalia, täytettiin vedellä ja käytetystä vesimäärästä laskettiin tiivistämättömän materiaalikerroksen avoin huokoisuus. Kumpikaan Leca-soralajike ei ollut vedellä imeytettynä, kun imeytysaika oli 18 h, vettä tiheämpää, jolloin pelkkä veden lisääminen ei onnistunut veden aiheuttaman nosteen takia. Leca-sorien huokoisuus tutkittiinkin siten, että astioiden päälle asetettiin pienen silmäkoon teräsverkko sekä painava rautaverkko. Verkkojen paino piti Leca-soran astiassa nosteesta huolimatta, jolloin avointa huokoisuutta vastaava vesimäärä voitiin lisätä astiaan verkkojen läpi. Tulokset on esitetty taulukossa 31.

Taulukko 31. Leca-sorat. Irtotiheydet ja avoin huokoisuus.

	Leca 4/10 mm	Leca 8/20 mm
Irtotiheys kuivana [kg/m ³]	289	233
Irtotiheys vedellä imeytettynä (18 h) [kg/m ³]	347	291
Avoin huokoisuus [%]	46	46

Tiivistys pienentää hieman avointa huokoisuutta, mutta tiivistyksessä rakeet voivat myös rikkoutua. Tällöin mahdollisesti muodostuva hienoaines pienentää avointa huokostilavuutta sekä vedenläpäisevyyttä.

Käytännössä käytettävää tiivistystä vastaavat materiaalin ominaisuudet kuten avoin huokoisuus ja vedenläpäisevyys sekä se, muodostuuko tiivistyksessä hienoainesta, tulee tuntea, jotta vettä läpäisevä rakenne voidaan suunnitella ja mitoittaa oikein.

2.4.3 Leca-betoni

Tässä esitettävät tulokset sisältyivät aiempaan Posiva Oy:n rahoittamaan tutkimukseen [Hansen 2013], josta tässä esitettävät tulokset ovat [Holt 2016].

Läpäisevää Leca-betonia valmistettiin Leca-sorasta, käyttäen kahta eri raekokoa, 4/10 mm ja 8/20 mm. (kuva 53) Leca-sora on erittäin huokoinen poltetusta savesta valmistettu kevyt materiaali, jota käyttäen voidaan valmistaa myös kevytbetoneita. Leca-soran huokokset ovat erittäin pieniä ja itse materiaalin vedenläpäisevyys on pieni, vaikka se Leca-sorapartikkelit imevätkin vettä kapillaarisesti. Leca-sorasta voidaan kuitenkin valmistaa vettä läpäiseviä betoneita säätämällä pastan osuus riittävän pieneksi, jolloin kovettuneeseen Leca-betoniin muodostuu vettä johtavia kanavia vastaavasti kuin läpäisevään betoniin.

Ensimmäiset kaksi Leca-betonimassaa tehtiin sideainemäärällä 300 kg/m³. Seuraavissa kolmessa massassa sideaineen määrä vähennettiin 200 kg/m³ ja sitä korvattiin fillerillä (0/1 mm). Lisäaineita ei massoissa käytetty. Tutkimuksen viiden massan koostumus on esitetty taulukossa 32.

Taulukko 32. Massojen koostumukset.

Leca-betonimassa	Sideaine [kg/m ³]	Vesi [kg/m ³]	Filleri (0/1) [kg/m ³]	Leca 4/10 [kg/m ³]	Leca 8/20 [kg/m ³]
1	300	173	0	290	0
2	300	171	0	0	287
3	200	173	95	290	0
4	200	149	95	304	0
5	200	125	95	318	0

Massat valmistettiin 170 litran Zyklos sekoittimessa. Ensin Leca-soraa sekoitettiin veden kanssa 1 min, jotta saatiin Leca-sorarakeet tasaisesti kostutettua. Sitten lisättiin sideaine sekä filleri ja sekoitusta jatkettiin vielä 4 minuuttia (kokonaissekoitus aika 5 min).

Massoista valmistettiin 150 mm kuutioita puristuslujuusmääritykseen sekä 505 x 505 x h150 mm³ laattoja vedenläpäisevyyden määritykseen. Kuutiot tiivistettiin kahdessa osassa pudotuspainotiivistimellä (Proctor-tyyppinen tiivistys, vrt. kohta 2.3). Tiivistysvoima aiheutui 4,5 kg painon pudottamisesta 45 cm korkeussuunnassa. Laatat tiivistettiin jyrtiivistimellä, jonka massa oli 25 kg ja leveys 0,5 m.

Tuoreen massan tiheys määritettiin 150 mm kuutioihin tiivistetystä massasta. Kaikki valetut koekappaleet peitettiin muovilla ja säilytettiin huoneenlämmössä ensimmäiset 24 tuntia.

Tämän jälkeen koekuutiot siirrettiin testausajankohtaan asti säilytettäväksi joko RH 95 % kosteushuoneeseen (+20 °C) tai RH 100 % kosteusolosuhteeseen, jossa lämpötila oli +50 °C (lämpökäsittely). Laattoja säilytettiin olosuhteessa RH 95 % (20 °C).

Puristuslujuudet määritettiin 28 d iässä koekappaleista (kuva 40), joita oli säilytetty olosuhteessa RH 95 % (+20 °C) ja/tai koekappaleista, jotka olivat olleet 7 d ajan lämpökäsittelyssä. Lämpökäsitteltyjen (7 d) koekappaleiden puristuslujuus vastasi noin normaalia (20 °C) 28 d puristuslujuutta, mikä voitiin nähdä ensimmäisen Leca-massan puristuslujuustuloksia vertaamalla. Vedenläpäisevyydet määritettiin standardin [ASTM C1701/C1701M: 2009] mukaisesti.

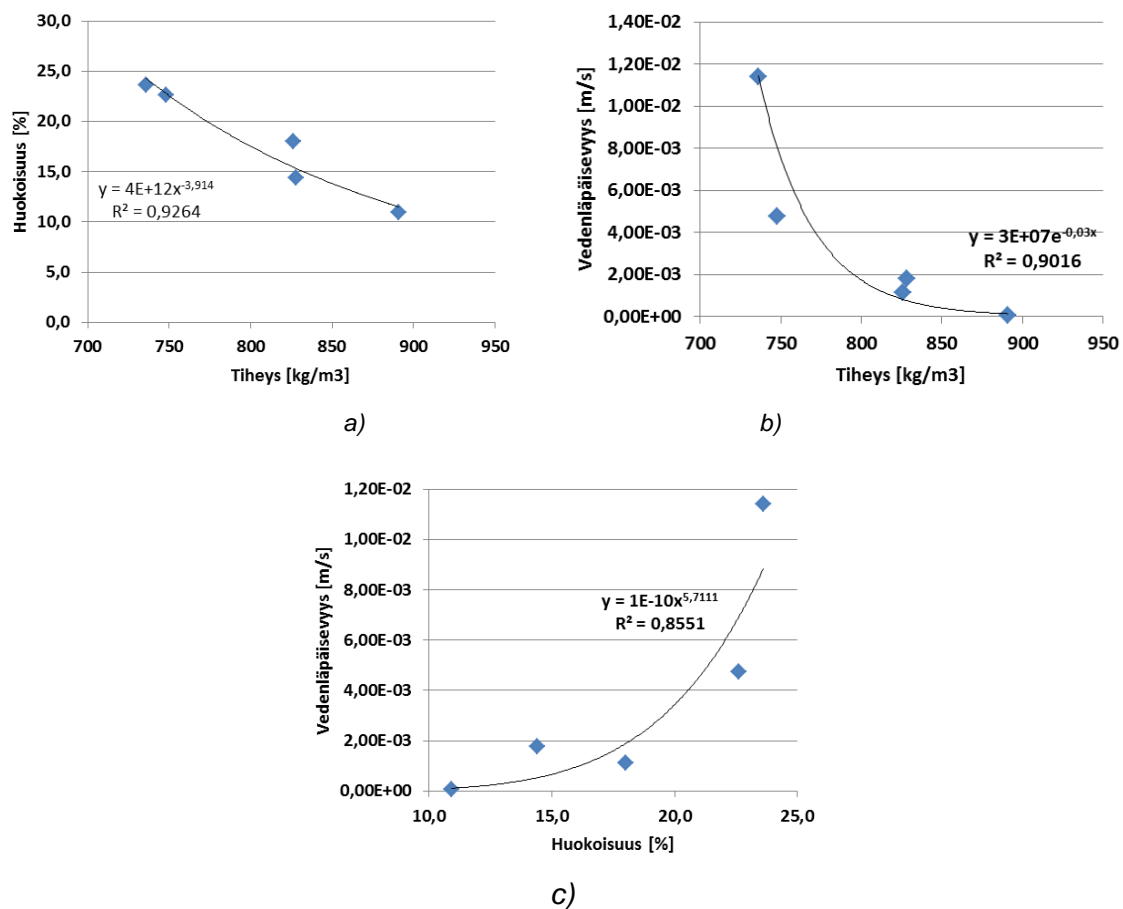
Leca-betonien tiheydet, huokoisuudet, laatoista määritetyt vedenläpäisevyydet sekä puristuslujuudet on esitetty taulukossa 33. Kuvissa 54 on esitetty miten tiheys, huokoisuus ja vedenläpäisevyys olivat suhteessa toisiinsa.

Taulukko 33. Leca-betonien ominaisuudet.

Leca-betoni	Tiheys [kg/m ³]	Huokoisuus, tuore massa [%]	Vedenläpäisevyys [m/s]	Lujuus 7 d lämpökäsittelty [MPa]	Lujuus 28 d [MPa]
1	826	18,0	1,11E-03	3,7	3,65
2	748	22,6	4,74E-03	-	2,23
3	891	10,9	6,03E-05	3,9	-
4	828	14,4	1,78E-03	3,3	-
5	736	23,6	1,14E-02	2,2	-



Kuva 53. Puristuslujuustestausta varten valmistettuja koekuutioita (150 mm). [Holt 2016]



Kuva 54. Leca-betonien ominaisuuksien riippuvuus toisistaan: a) Huokoisuus tiheyden funktiona; b) Vedenläpäisevyys tiheyden funktiona; c) Vedenläpäisevyys huokoisuuden funktiona. [Holt 2016]

2.4.4 Betorock

Betorock on murskattua ja tässä tapauksessa seulottua kierrätysbetonia. Tutkimukseen valitun tuotteen raekoko oli 4/45 mm. Liitteessä 6 on tuotteen 'Betonirock M2 0/45 mm' Suoritusasoilmoitus. Tämän seulomattoman tuotteen hienoainemäärä on suuri ja vastaa luokkaa f_7 [EN 13242: 2008].

Betorock tutkittiin tiivistämättömänä irtotiheyden ja huokoisuuden osalta. Irtotiheys määritettiin sekä kuivalle että veden kyllästämälle materiaalille. Kokeet tehtiin vastaavasti kuin kapaleessa 2.4.2 Leca-soralle.

Tulokset on esitetty taulukossa 34.

Taulukko 34. Betorock. Tiivistämättömän tuotteen irtotiheydet ja avoin huokoisuus.

Betorock 7/45 mm	
Irtotiheys kuivana [kg/m ³]	1164
Irtotiheys vedellä imeytettynä (18 h) [kg/m ³]	1263
Avoin huokoisuus [%]	44

Avoin huokoisuus tiivistämättömänä oli tässä tutkimuksessa suhteellisen suuri ja vastaa lähes täysin pyöreiden partikkelien avointa huokoisuutta. Tiivistys pienentää huokoisuutta, mutta tiivistyksessä hienoaineksen määrää voi kasvaa kuten myös käyttöolosuhteessa ajan kuluessa.

Käytännössä käytettävää tiivistystä vastaavat materiaalin ominaisuudet kuten avoin huokoisuus ja vedenläpäisevyys sekä se, muodostuuko tiivistyksessä hienoainesta, tulee tuntea, jotta vettä läpäisevä rakenne voidaan suunnitella ja mitoittaa oikein.

2.4.5 FilterPave®

FilterPave® on 100 % kierrätyslasista valmistettu vettä läpäisevä päällyste. FilterPavella on myös haitta-aineita sitovia ominaisuuksia, joita voidaan hyödyntää, jos niiden merkitys tutkitaan ja tunnetaan riittävän hyvin kyseessä olevassa käytössä ja olosuhteissa. VTT:lle toimitetussa FilterPave laatassa oli pohjassa kiinni ohut huopakerros, joka yleensä jätetään siihen kiinni asennuksessa. Tietyissä tapauksissa asennus voidaan myös tehdä ilman huopaa. Kuvassa 55 on esitetty tyypillinen FilterPave-laatta.



Kuva 55. FilterPave® laatta.

FilterPave-laatasta mitattiin vedenläpäisevyys standardin [ASTM C1701/C1701M: 2009] mukaisesti. Mittaus tehtiin sekä laatalle huovan kanssa että laatalle ilman huopaa. Kuvassa 56 on esitetty mittausjärjestely ´single-ring´ mittalaitteen kanssa.



Kuva 56. FilterPave® laatan vedenläpäisevyyden testaus.

Vedenläpäisevyytulokset on esitetty taulukossa 35.

Taulukko 35. FilterPave® laatan vedenläpäisevyys.

Laatta	Vedenläpäisevyys [m/s]
FilterPave® huovan kanssa	$1,0 \times 10^{-2}$
FilterPave® ilman huopaa	$1,2 \times 10^{-2}$

3. Simulointitestausta (Rig)

3.1 Laitteisto ja sen toiminta

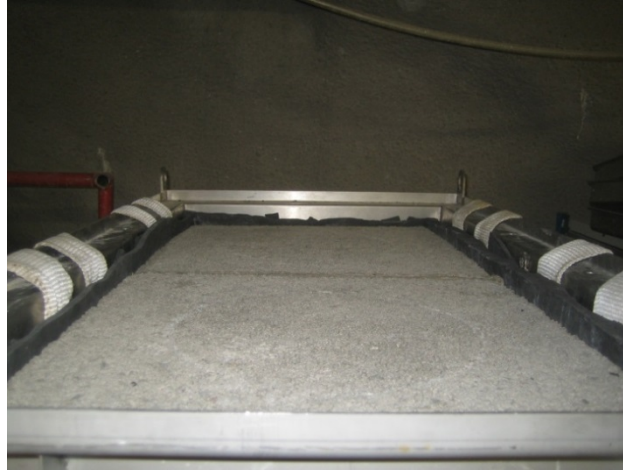
Koko rakenteen tai sen tietyn kerroksen hydrologisen toiminnan simulointia varten suunniteltiin ja rakennettiin laboratoriomittakaavan Rig-laitteisto (Rig). Simulointitestauksessa tavoitteena oli saada mittaustietoa siitä, miten koko rakenne toimii vedenläpäisyn osalta erilaisissa tapauksissa, kuten vedenläpäisevyydeltään tai tukkeutumisasteeltaan erilaisten pintojen tapauksissa. Tällaista mittaustietoa voidaan hyödyntää läpäisevien päällysteiden soveltamisessa käytännön olosuhteisiin ja niiden hydrologisen toiminnan mitoituksessa.

Rig koostui teräskehikosta, sadetussuuttimista, virtausmittarista sekä voima-anturista. Teräskehikon korkeus voitiin säätää tarkoitukseen sopivaksi asettamalla päällekkäin 1–3 kasettia, jotka olivat kukin korkeudeltaan 33,5 cm. Suurin mahdollinen tutkittavan rakenteen korkeus oli siis 100,5 cm. Vesi otettiin vesijohdosta, virtaus säädettiin sopivaksi neulaventtiilin avulla ja johdettiin virtausmittarin läpi sadetussuuttimiin. Virtausmittariin kytketty tietokone tallensi sisään menevää virtausta jatkuvasti. Kasettien alla kehikossa oli suppilo, josta rakenteen läpi virrannut vesi johdettiin voima-anturissa kiinni olevaan sarkoon. Voima-anturi oli myös kytketty tietokoneeseen ja ulos virtaavaa vesimäärää tallennettiin jatkuvasti. Rig-laitteisto on esitetty kuvassa 57.



Kuva 57. Rig-laitteisto kolmella kasetilla ja niiden päällä sadetusyksikkö.

Kasettien sisämitat olivat $106 \times 55 \text{ cm}^2$. Tutkitut asfaltti- ja betonilaatat olivat pinta-alaltaan $50,5 \times 50,5 \text{ cm}^2$ ja ne tiivistettiin Rig-kasetin seinämiin solukumin avulla. Näin voitiin estää veden virtaaminen kasetti-laattarajapinnan kautta. Rig-kokeisiin tarvittiin kaksi laattaa kutakin testattavaa materiaalia. Kuvassa 58 on esitetty läpäisevien betonilaattojen asettelu Rig-kasettiin. Kuvassa 58 on esitetty betonikivipinnan asettelu Rig-kasettiin.



Kuva 58. Betonilaatat, jotka on tiivistetty Rig-kasettiin solukummin avulla.



Kuva 59. Betonikivipinta Rig-kasettiin rakennettuna. Betonikivien väleissä vettä läpäisevää kiviainesta.

Kiviainesten valinta ja testaus

Rig-kokeisiin rakennettiin läpäisevät kantava ja jakava kerros, joiden tyhjättila oli mahdollisimman suuri. SOTA-raportissa [Kuosa et al. 2013] kerättyjen pohjatietojen perusteella rakennekerrokseen päädyttiin valitsemaan kiviainekset, jotka sisälsivät mahdollisimman vähän hienoainesta ($<0,063$ mm aines). Kantavana kerroksena oli 320 mm paksu kerros vesiseulottua murskettä 5/32 mm. Sen alapuolisena jakavana kerroksena oli 520 mm paksu kerros vesiseulottua murskettä 32/63 mm. Tutkimusta varten VTT:lle toimitetut Rudus Oy:n kiviainekset 5/32 mm ja 32/63 mm (laatuselosteet liitteessä 5) vesipestiin ennen niiden käyttöä Rig-tutkimuksissa. Näin voitiin varmistaa se, että kokeen aikainen kiviainesten peseytyminen Rig'issä ei päässyt vaikuttamaan koetuloksiin.

Betonikivien ja noppakivien alapuolinen asennushiekkakerros oli 50 mm kerros vesiseulottua hiekkaa 1/5 mm tai vertailumateriaalina 0/4 mm hiekkaa eli samaa hiekkaa, mitä kulloinkin käytettiin saumahiekkana. Komposiittisaumojen tapauksessa asennushiekkana käytettiin hiekkaa 1/5 mm. Komposiittisaumamateriaali oli kaupallinen tuote 'Grepur 294 UV'. Saumausta tehtiin tuotteen käyttöohjeen mukaisesti. Betoni- ja asfalttilaattojen alla ei käytetty asennushiekkaa. Asennushiekka ja kantavan kerroksen murske erotettiin toisistaan metalliverkolla, jonka silmäkoko oli 0,5 mm saumahiekan poistomahdollisuuden takaamiseksi.

Rakennekerroksissa käytettäville kiviaineksille tehtiin Proctor-kokeet tiivistettävyyden tutkimiseksi. Kokeet tehtiin viitteessä [GLO 1985] esitetyn mukaisesti. Murske 5/32 mm tiivistyi parhaiten 5 % vesipitoisuudessa. Murske 32/63 testattiin vain 5 % vesipitoisuudessa materiaalin

heikosta tiivistyvyydestä johtuen. Asennus-/saumahiekat 1/5 mm ja 1/8 mm tiivistyivät parhaiten 6 %:ssa (1/8 mm ei käytetty varsinaisessa Rig-kokeessa). Hiekkaa 0/4 mm ei testattu. Tiivistettävyyden tutkimiseksi käytettyjä materiaaleja ei vesipesty.

Kantavan ja jakavan kerroksen vesipestyille murskeille tehtiin kantavuuskokeita Loadman-laitteella tarkoituksena tarkkailla E-moduulin muuttumista kuivassa, kyllästyneessä ja kosteassa murskeessa. Kokeiden tulokset eivät kuitenkaan olleet käyttökelpoisia, sillä Rig'issä tehdyissä kokeissa itse Rig-laatikon pohjamateriaali jousti liikaa luotettavien ja vertailukelpoisten tulosten saamiseksi. Kirjallisuudessa [Tiehallinto 2005, Tiehallinto 2005] on esitetty murskeiden kantavuudeksi useista kymmenistä muutamaan sataan MPa:iin rakeisuudesta ja kosteuspitoisuudesta riippuen. Tässä saadut tulokset jäivät alustan joustamisen vuoksi alle arvon 30 MPa.

Murskeiden tiivistys Rig-laitteistoon tehtiin Proctor-tyyppisellä tiivistimellä 95 % tiiveyteen. Tiivistimen pohjalevy oli kooltaan 15 x 15 cm² ja punnuksen paino 4,5 kg. Punnuksen pudotusmatka oli 45 cm. Tiivistys tehtiin kantavan kerroksen osalta kahdessa ja jakavan kerroksen osalta kolmessa kerroksessa.

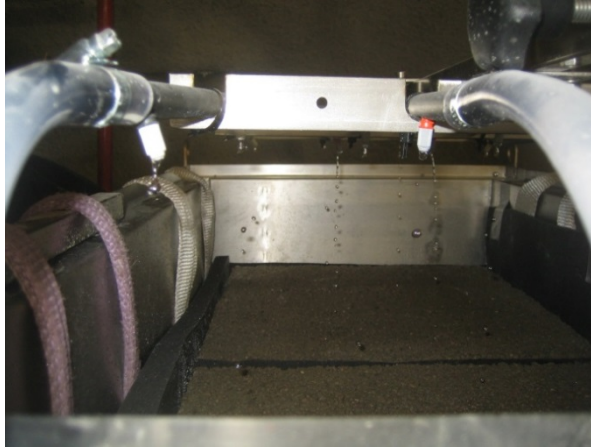
3.2 Tutkimusmenetelmät

Kaikkia pintakerroksia (kun ei alusrakennetta) tutkittiin puhtaana. Lisäksi koko rakenteita valituilla pintakerroksilla sadetettiin sekä puhtaina, liattuina että kahden eri puhdistustoimenpiteen jälkeen.

Sadetukseen menevä vesimäärä mitattiin virtausmittarin avulla ja rakenteesta ulos valuva vesi voima-anturin avulla. Vedenläpäisevyysarvot määritettiin aina myös standardin [ASTM C1701/C1701M: 2009] tai [ASTM ASTM C1781/C1781M: 2014] mukaisella menetelmällä eli käyttäen nk. 'single-ring' menetelmää.

Sadetuskoikeissa tallennettiin sekä sisään menevää että ulos tulevaa vesimäärää jatkuvasti. Sadetusmittauksia tehtiin kolme rinnakkaista (ellei toisin mainita), joista laskettiin keskiarvo. Rinnakkaismittausten perusteella saatiin myös kuva menetelmän luotettavuudesta (hajonnasta saman materiaalin eri mittausten välillä). Sadetusmittausdatasta voitiin muodostaa kuvaaja, jossa sisään menevä ja ulos tuleva vesimäärä esitettiin ajan funktiona. Datasta laskettiin myös viive eli aika, joka vedeltä kuluu kunkin rakenteen läpi menemiseen. Viive laskettiin kaikille materiaaleille 4 litran vesimäärän mukaan. Toisin sanoen aika, joka kuluu siitä hetkestä kun 4 litraa on sadetettu kunnes 4 litraa on tullut rakenteesta ulos. Tulkista voitiin laskea myös kulmakertoimet (l/min) sekä sisään menevälle vedelle että ulos tulevalle vedelle.

Sadetuksiksi valittiin rankkasadetahtuma, jonka intensiteetti oli $2,75 \cdot 10^{-5}$ m/s eli 275 l/s/ha (99 mm/h). Vertailun vuoksi, esimerkiksi Helsingin alueella kerran 10 vuodessa tapahtuva 10 minuutin rankkasadetahtuma, jossa ilmastonmuutos on otettu huomioon, on suuruudeltaan pienempi, $2,17 \cdot 10^{-5}$ m/s (216 l/s/ha). Sadetuksen kestoksi valittiin 10 min, jota käytetään myös tulvareittien tai tulvapatkien mitoituksessa. Yhden sadetusmittauksen kokonaiskestoksi tuli n. 20 min, sillä rakenne valutettiin vapaasta vedestä ennen seuraavaa mittausta. Mittaukset suoritettiin aina kostealle materiaalille, ettei pintakerrosten tai alusrakenteen vedenimu aiheuttaisi hallitsematonta hajontaa mittausten välille. Tulee huomata, että laboratoriosadetus ei vastaa kaikilta osin luonnonmukaista sadetta (jakaantuminen, pisarakoko, pudotuskorkeus/-nopeus), millä on myös oma vaikutuksensa tuloksiin. Kuvassa 60 on esitetty sadetuslaitteisto toiminnassa.



Kuva 60. Rig'in sadetuslaitteisto toiminnassa.

Likaamiseen käytettiin 50/50 paino-% seosta hiekkaa (Astrakan filleri 0/1) ja kaoliinia. Kaoliini on hienoa savea ja raekooltaan hiekkaa selvästi pienempää. Kaoliini valittiin käytettäväksi tutkimukseen, jotta saataisiin tietoa myös hiekkaa hienojakoisemman aineksen vaikutuksista läpäiseviin rakenteisiin. Likaaminen suoritettiin suihkepulloa avuksi käyttäen siten että tukkiva aines lisättiin pintaan pieni määrä kerrallaan, jonka jälkeen se imeytettiin rakenteeseen suihkepullosta lisätyn veden avulla. Kaoliini lisättiin ensin ja hiekka kaoliinin jälkeen. Yhteensä likaamiseen käytettiin tukkivaa ainesta 2 kg/m^2 . Käytetyn tukkivan aineen määrä valittiin viitteeseen [Tan et al. 2003] perustuen. Likaamis- ja puhdistuskokeet tehtiin Rig'issä pintamateriaaleille, joiden alla oli alusrakenne kokonaisuudessaan (mahdollinen tasaava kerros, kantava kerros ja jakava kerros). Kuvassa 61 on esitetty liattu läpäisevä betoni (PC1) Rig'issä.



Kuva 61. Hiekka-kaoliiniseoksella (50/50 paino-%) liattu PC1-betonilaatta.

Puhdistusmenetelmiksi valittiin imurointi ja painepesu. Imurointiin käytettiin Nilfiskin Multi 20 kuiva-märkäimuria. Painepesu tehtiin Kärcherin K3 painepesurilla käyttäen vaativaan pesuun tarkoitettua pyörösuutinta. Imurointiin käytettiin keskimäärin aikaa 4 min ja painepesuun 2 min (kahdelle laatalle). Kummankin puhdistusmenetelmän jälkeen tehtiin sekä sadetus että vedenläpäisevyyssmittaukset 'single-ring' laitteella. Kuvassa 62 on esitetty läpäisevä betoni (PC0), josta oikean puoleinen laatta on imuroitu ja vasemman puoleinen laatta on sekä imuroitu että painepesty.



Kuva 62. Liattu läpäisevä betoni (PC0). Oikean puoleinen laatta on imuroitu ja vasemman puoleinen laatta sekä imuroitu että painepesty.

Ensin suoritettiin pelkän pintakerroksen testaus (ei alusrakennetta) kahdelle läpäisevälle betonille, kahdelle avoimelle asfaltille, betonikivipinnoille kolmella erilaisella saumalla sekä luonnonkivipinnoille kolmella erilaisella saumalla. Kaikista näistä mitattiin vedenläpäisevyys ´single-ring´ laitteella ja lisäksi tehtiin mitoitussadetus ($2,75 \times 10^{-5}$ m/s (99 mm/h); 10 min).

Osa näistä pintakerroksista tutkittiin myös alusrakenteen kanssa. Nämä pintakerrokset olivat molemmat läpäisevät betonit, molemmat avoimet asfaltit sekä betonikivipinnat 1/5 mm kiviaineksella ja komposiittisaumalla. Näille rakenteille tehtiin vedenläpäisevyysmittaus ´single-ring´ laitteella sekä mitoitussadetus ensin puhtaalle materiaalille, sitten tukkeutuneelle, imuroinnilla puhdistetulle ja viimeiseksi vielä painepesun jälkeen.

Kahdelle materiaalille (läpäisevä betoni PC1 ja avoin asfaltti AA75) tehtiin lisäksi sietokyky-sadetusmittaukset, jossa sadetuksen intensiteettiä nostettiin mitoitussateen verran ensin $2,75 \times 10^{-5}$ m/s (99 mm/h), sitten $5,5 \times 10^{-5}$ (198 mm/h) jne. kunnes valumaa syntyi.

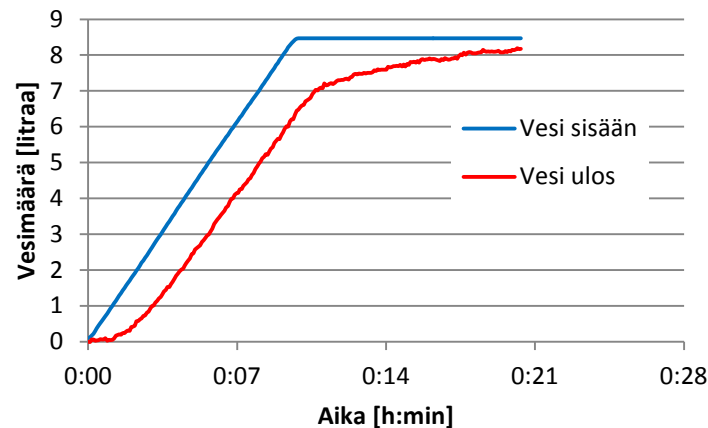
3.3 Referenssitestit

Referenssitestit (mitoitussadetus) suoritettiin yhdelle tyhjälle kasetille (REF1) ilman tutkittavaa päällystettä sekä kolmelle kasetille pelkän alusrakenteen kanssa. Tyhjän kasetin referenssimittauksella saatiin määritettyä viiveaika, joka vedeltä kului systeemin läpi kulkemiseen ilman tutkittavaa materiaalia. Tämä arvo voitiin vähentää pintakerrosten tutkimuksissa saaduista viivearvoista, jotta saatiin aika, joka vedeltä kului tutkittavan pintakerroksen läpi kulkemiseen.

Täysmittaiselle alusrakenteelle (REF2) tehtiin myös mitoitussadetus, jotta voitiin tarkastella pelkän kiviaineskerroksen käyttäytymistä sadestilanteessa. Pintamateriaalille suoritettavassa likaamis- ja puhdistustestissä osa tukkivasta aineesta voi kulkeutua ja jäädä alusrakenteeseen. Alkuperäistä puhtaan kiviaineksen REF2 arvoa voitiin hyödyntää tarkasteltaessa kiviaineskerroksen mahdollista likaantumista. Näin välttyttiin siltä, että aiempi kiviaineskerrosten likaantuminen vaikuttaisi seuraavien pintamateriaalien mittausarvoihin.

3.3.1 Ei pintamateriaalia, vain puhtaat kiviaineskerrokset

Mitoitussadetus $2,75 \times 10^{-5}$ m/s (99 mm/h) tehtiin alusrakenteelle (REF2), joka koostui 520 mm kerroksesta 32/63 mm kiviainesta (jakava kerros) sekä 320 mm kerroksesta 5/32 mm kiviainesta (kantava kerros). Kuvassa 63 on esitetty sisään menevä (sadetus) ja ulos tuleva vesimäärä ajan funktiona.



Kuva 63. Vesimäärä sisään ja ulos ajan funktiona alusrakenteelle.

Taulukossa 36 on esitetty viive (4 litran vesimäärän mukaan) veden kulkeutumisessa rakenteen läpi sekä kulmakertoimet (kk) sisään menevälle ja ulos tulevalle vedelle.

Taulukko 36. Viive ja kulmakertoimet alusrakenteelle, keskihajonnat suluisissa.

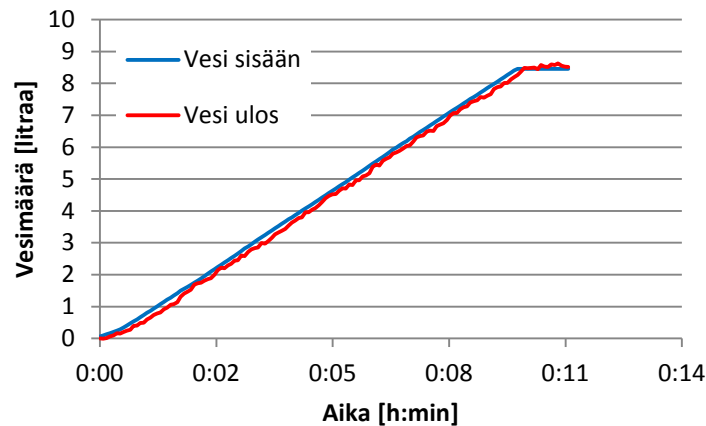
Materiaali	Viive [min:s]	Kk sisään [l/min]	Kk ulos [l/min]
Alusrakenne, puhdas	2:07 (0:08)	0,86 (0,01)	0,78 (0,01)
Alusrakenne, testi1	1:55	0,84	0,76
Alusrakenne, testi2	1:50	0,83	0,80
Alusrakenne, testi3	1:50	0,88	0,83

Kesti siis n. 2 min kunnes virtausmittarin läpi kulkenut vesi oli päätynt putkia pitkin sadetus-suuttimiin sekä kulkeutunut kiviaineskerroksen läpi sankoon, joka oli kiinni voima-anturissa. Vesi tuli ulos hieman hitaammin kuin mitä se meni sisään. Tämä saattaa osittain johtua kivistä, jotka eivät olleet täysin pinnoiltaan kastuneita tai kylläisiä veden suhteen. Vaikka rakenne oli esikasteltu ennen koetta, niin valutusvaiheessa osa kivistä on luultavasti hieman kuivunut aiheuttaen veden absorptiota tai imeytymistä mittauksen yhteydessä.

Kunkin likaamis-puhdistustestin testin jälkeen sadetus uusittiin alusrakenteelle (testit 1–3). Puhdistuksen yhteydessä alusrakenteeseen mahdollisesti päätynt tukosaine ei lisännyt viivettä veden kulkeutumiseen alusrakenteen läpi. Kiviaineskerrosten mahdollinen likaantuminen ei siis vaikuttanut seuraavien pintamateriaalien mittausravoihin. Samaa alusrakennetta voitiin käyttää kaikkien pintamateriaalien tukkeutumiskokeissa.

3.3.2 Muut referenssitestit

Referenssitesti tehtiin myös tyhjälle kasetille (REF1), jota käytettiin sadetettaessa pelkkiä pintakerroksia. REF1 tuloksia voitiin hyödyntää laskettaessa viiveitä pintakerroksille. Tyhjän kasetin aiheuttama viive saatiin näin poistettua. Kuvassa 64 on esitetty sisään menevä ja ulos tuleva vesimäärä ajan funktiona.



Kuva 64. Vesi sisään ja ulos ajan funktiona tyhjälle kasetille.

Taulukossa 37 on esitetty viive (4 litran vesimäärän mukaan) veden kulkeutumisessa kasetin läpi sekä kulmakertoimet (kk) sisään menevälle ja ulos tulevalle vedelle.

Taulukko 37. Viive ja kulmakertoimet tyhjälle kasetille, kahden mittauksen keskiarvo.

Materiaali	Viive [min:s]	Kk sisään [l/min]	Kk ulos [l/min]
Tyhjä kasetti	0:15	0,84	0,85

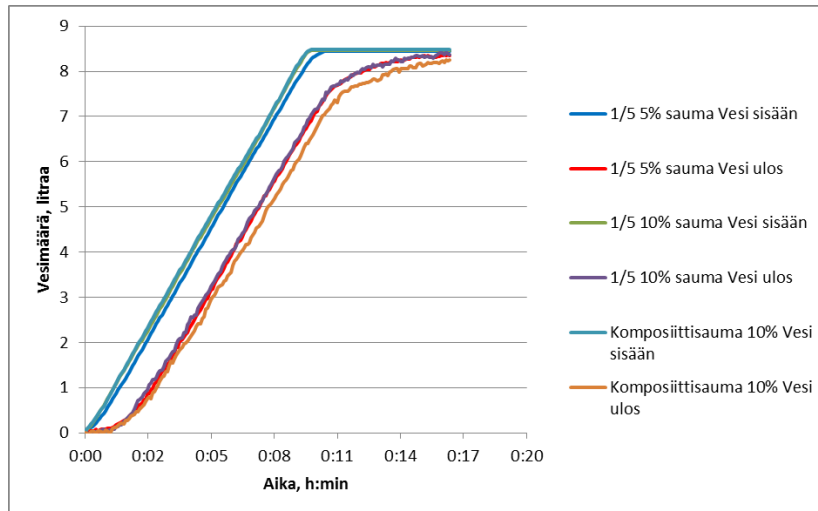
Viive tyhjälle kasetille oli 15 s. Kesti siis 15 s kunnes virtausmittarin läpi kulkenut vesi oli päätynyt putkia pitkin sadetussuuttimiin sekä tippunut tyhjän rakenteen läpi sankoon, joka oli kiinni voima-anturissa. Tämä aika vähennettiin jatkossa pintakerrosten viiveaikoja laskettaessa, jolloin saadaan todellinen viive pelkälle pintakerrokselle. Veden virtaus sisään ja ulos oli käytännössä sama (odotetusti). 0,01 l/min ero kulmakertoimissa johtuu voima-anturin virhemarginaalista.

3.4 Pintakerrokset

Pintakerroksia tutkittiin asettamalla teräsrilä tyhjään kasettiin. Teräsrilän päälle asetettiin tutkittava materiaali ja sille suoritettiin mitoitussadetus.

3.4.1 Betonikivipinta

Betonikivipintoja tutkittiin kolmella eri saumalla. Tutkittavat saumat olivat 1/5 mm VS sepeli 5 % ja 10 % aukkomäärällä sekä komposiittisauma 10 % aukkomäärällä. Saumaleveydet valittiin aukkomääriä vastaaviksi ja ne olivat 2,7 mm ja 5,6 mm. Betonikivipintojen alusrakenteena käytettiin 50 mm kerrosta 1/5 mm kiviainesta (sama kuin saumamateriaali, poikkeuksena komposiittisauma). Alusrakenne asennettiin 0,5 mm seulaverkon päälle, joka puolestaan oli asetettu sitä tukevan teräsrilän päälle Rig-kasettiin. Kuvassa 65 on esitetty sisään menevä ja ulos tuleva vesimäärä ajan funktiona kaikille tutkituille betonikivipinnoille.



Kuva 65. Vesimäärä sisään ja ulos ajan funktiona betonikivipinnoille.

Viive veden kulkeutumisessa betonikivipintojen läpi sekä kulmakertoimet (kk) sisään menevälle ja ulos tulevalle vedelle on esitetty Taulukossa 38.

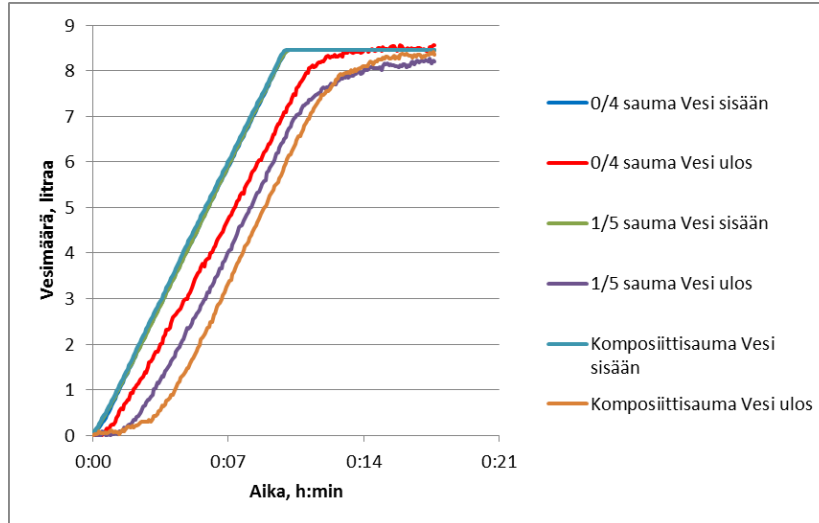
Taulukko 38. Viive ja kulmakertoimet betonikivipinnoille, keskihajonnat suluissa.

Sauman tiedot	Viive [min:s]	Kk sisään [l/min]	Kk ulos [l/min]
1/5 VS sepeli, 5 %	1:22 (0:18)	0,85 (0,06)	0,84 (0,05)
1/5 VS sepeli, 10 %	1:33 (0:10)	0,84 (0,02)	0,82 (0,04)
komposiittisauma, 10 %	2:05 (0:13)	0,84 (0,01)	0,79 (0,02)

Kerroksen läpäisyyn kuluva aika oli samaa luokkaa 1/5 mm VS sepelisaumoilla, komposiittisaumalla viive oli hieman suurempi sepelisaumoihin verrattuna. Rakenteesta poistuvan virtauksen nopeus oli samaa luokkaa molemmilla 1/5 mm sepelisaumoilla, komposiittisaumasta veden poistumisnopeus oli hieman pienempi. 'Single-ring' mittauksista (ks. kohta 2) nähdään että komposiittisaumalla oli betonikivilaatoilla tutkituista saumoista huonoin vedenläpäisevyys. Sadetuskokeiden tulokset olivat tältä osin linjassa vedenläpäisevyytulosten kanssa. Alkuun voi tuntua yllättävältä että läpäisevämmällä 10 % saumalla oli suurempi viive kuin vähemmän läpäisevällä 5 % saumalla. Tämä johtuu luultavasti siitä että päällyste jossa on 10 % sauma sisältää enemmän kiviainesta kuin päällyste jossa on 5 % sauma. Ulos tulevan virran kulmakertoimista nähdään että jo 5 % sauma läpäisi vettä samalla nopeudella kuin vettä tuli sisään rakenteeseen. Näin ollen saumakoon kasvattaminen 10 %:iin ei lisää rakenteen suorituskykyä tämän intensiteetin sateessa, mutta mahdollista vedenimua aiheuttavaa kiviainesta tulee lisää rakenteeseen.

3.4.2 Luonnonkivipinnat

Luonnonkivipintoja tutkittiin kolmella eri saumalla. Tutkittavat saumat olivat 0/4 mm hiekka, 1/5 mm VS sepeli ja komposiittisauma. Saumaleveytenä käytettiin noppakivien asennusohjeissa ilmoitettua 10 mm saumaa. Luonnonkivipintojen alusrakenteena käytettiin 50 mm kerrosta saumamateriaalia, poikkeuksena komposiittisauma minkä yhteydessä käytettiin 1/5 mm VS sepeliä. Alusrakenne oli asennettu 0,5 mm seulaverkon päälle, joka puolestaan oli asetettu sitä tukevan teräsritilän päälle Rig-kasettiin. Kuvassa 66 on esitetty sisään menevän ja ulos tuleva vesimäärä ajan funktiona kaikille tutkituille luonnonkivipinnoille.



Kuva 66. Vesimäärä sisään ja ulos ajan funktiona luonnonkivipinnoille.

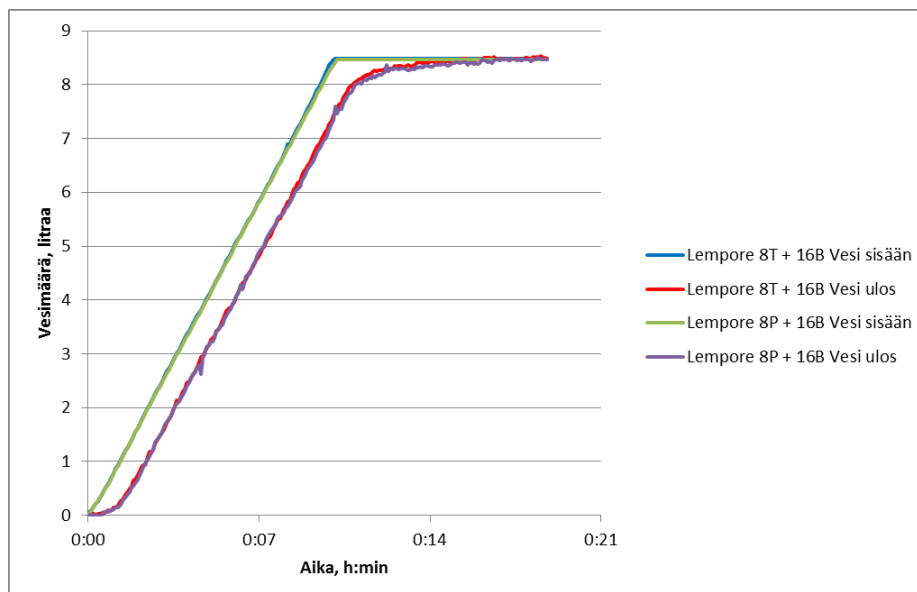
Viive veden kulkeutumiseksi luonnonkivipintojen läpi sekä kulmakertoimet (kk) sisään- ja ulostulevalle vedelle on esitetty Taulukossa 39.

Taulukko 39. Viive ja kulmakertoimet luonnonkivipinnoille, keskihajonnat suluisissa.

Sauman tiedot	Viive [min:s]	Kk sisään [l/min]	Kk ulos [l/min]
0/4 hiekka	1:08 (0:08)	0,84 (0,01)	0,76 (0,01)
1/5 VS sepeli	1:58 (0:06)	0,85 (0,02)	0,82 (0,01)
Komposiittisauma	2:58 (0:31)	0,85 (0,02)	0,88 (0,07)

3.4.3 Avoin asfaltti

Avoimia asfaltteja (AA) oli tutkimuksissa kahta eri laatua. Asfaltit toimitettiin 500 x 500 mm² laattoina. Molemmat avoimet asfaltit olivat 2-kerroslaattoja, jossa pohjalla oli huokoinen/isoraekokoinen asfalttikerros ja pinnalla joko tiiviimpi avoin asfaltti (Lempore 8T + 16B) tai avoimempi avoin asfaltti (Lempore 8P + 16B). Asfalttilaatat tuettiin teräsverkolla Rig-kasettiin ja niille tehtiin sadetusmittaukset. Kuvassa 67 on esitetty sisään menevä ja ulos tuleva vesimäärä ajan funktiona molemmille tutkituille asfalttilaatoille.



Kuva 67. Vesi sisään ja ulos ajan funktiona avoimille asfalteille.

Viive veden kulkeutumiseksi avoimien asfalttien läpi sekä kulmakertoimet (kk) sisään- ja ulostulevalle vedelle on esitetty Taulukossa 40.

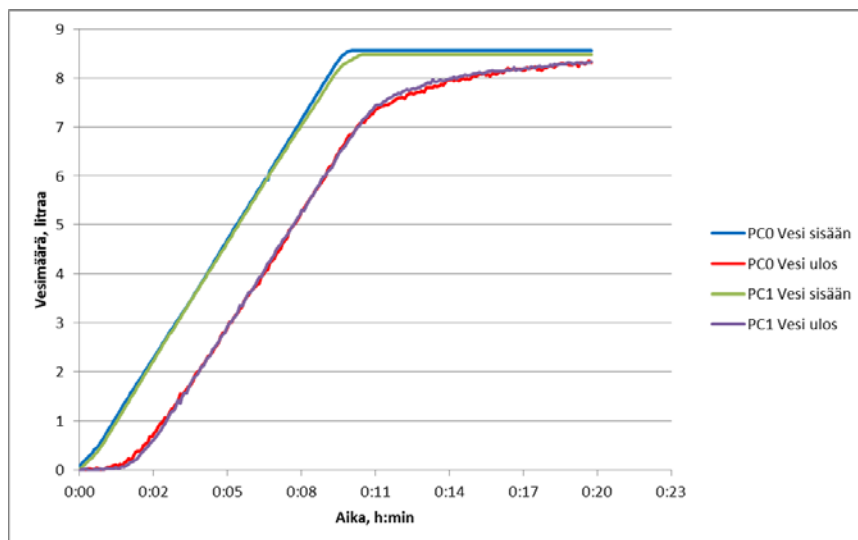
Taulukko 40. Viive ja kulmakertoimet avoimille asfalteille, keskihajonnat suluissa.

Materiaali	Viive [min:s]	Kk sisään [l/min]	Kk ulos [l/min]
Lempore 8T + 16B	0:57 (0:06)	0,82 (0,02)	0,80 (0,02)
Lempore 8P + 16B	0:55 (0:05)	0,82 (0,03)	0,80 (0,03)

Avoimissa asfalteissa ei esiintynyt havaittavaa eroa sadetuskokeissa. Tiiviimmän asfaltin vedenläpäisevyys oli riittävä mitoitussateeseen nähden, jolloin avoimemman asfaltin suurempi vedenläpäisevyys jäi huomaamatta koetuloksissa.

3.4.4 Läpäisevä betoni

Läpäisevää betonia tutkittiin sadetuksissa kahta eri laatua (PC0 ja PC1). Kuten asfalttilaatojen kohdalla, tutkittujen betonien läpäisevydessä oli selkeä ero. PC0 oli erittäin läpäisevä ja PC1 kohtuullisen läpäisevä. Betonilaatat tuettiin teräsverkolla Rig-kasettiin ja niille tehtiin sadetusmittaukset. Kuvassa 68 on esitetty sisään menevä ja ulos tuleva vesimäärä ajan funktiona molemmille tutkituille betonilaatoille.



Kuva 68. Vesimäärä sisään ja ulos ajan funktiona läpäiseville betoneille.

Viive veden kulkeutumiseksi läpäisevien betonien läpi sekä kulmakertoimet (kk) sisään menevälle ja ulos tulevalle vedelle on esitetty Taulukossa 41.

Taulukko 41. Viive ja kulmakertoimet läpäiseville betoneille.

Materiaali	Viive [min:s]	Kk sisään [l/min]	Kk ulos [l/min]
PC0	1:57 (0:18)	0,84 (0,02)	0,81 (0,004)
PC1	1:52 (0:21)	0,84 (0,03)	0,81 (0,02)

Läpäisevissä betoneissa ei esiintynyt havaittavaa eroa sadetuskokeissa. Vähemmän läpäisevän betonin (PC1) vedenläpäisevyys oli riittävä mitoitussateeseen nähden, jolloin läpäisevämmän betonin (PC0) suurempi vedenläpäisevyys jäi huomaamatta koetuloksissa.

3.5 Koko rakenne eri pintakerroksilla

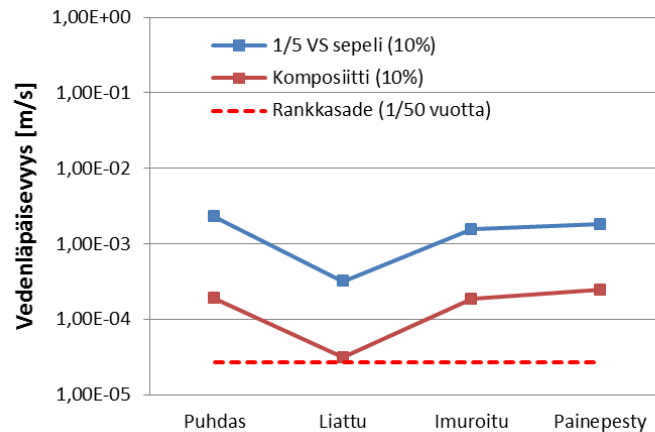
Pintakerroksista molemmat betonit, molemmat asfaltit sekä betonikivipinta kahdella eri saumalla tutkittiin Rigissä myös koko alusrakenteen kanssa. Alusrakenne koostui 52 cm jakavasta kerroksesta 32/63 raekoon kiviainesta ja 32 cm kantavasta kerroksesta 5/32 raekoon kiviainesta. Rakenteille suoritettiin mitoitussadetus, jonka jälkeen ne liattiin kohdassa 3.2 esitetyn menetelmän mukaisesti. Tämän jälkeen ne puhdistettiin ensin imuroimalla ja sitten painepesurilla. Vedenläpäisevyyssmittaukset suoritettiin koko rakenteelle puhtaana, liattuna, imuroituna ja painepestyinä.

3.5.1 Betonikivipinnat

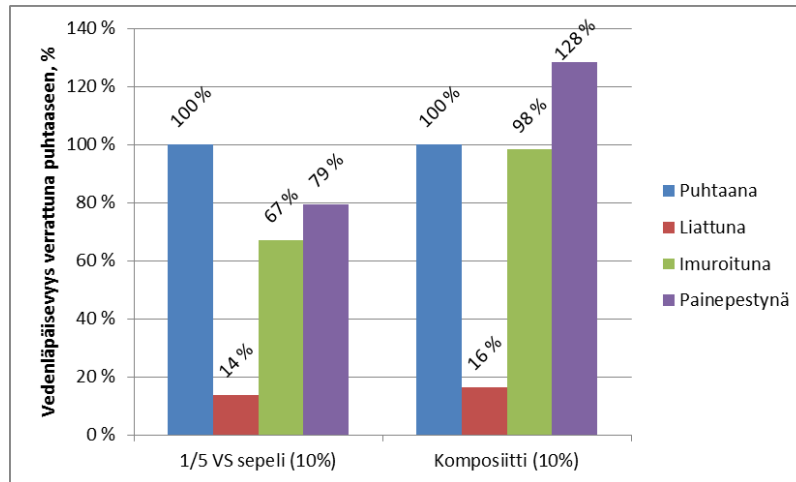
Vedenläpäisevyys mitattiin ´single-ring´ menetelmällä alusrakenteen kanssa betonikivipinnoille kahdella eri saumamateriaalilla puhtaana, liattuna, imuroituna sekä painepesun jälkeen. Tutkitut saumamateriaalit olivat 1/5 VS sepeli sekä komposiittisaumamateriaali (Grepur 294 UV). Molemmissa tapauksissa käytettiin saumaleveyttä 5,6 mm (10 %). Taulukossa 42 on esitetty vedenläpäisevyys eri testaustilanteissa. Kuvassa 69 samat tulokset graafisesti ja verrattuna valittuun mitoitussateeseen ($2,75 \times 10^{-5}$ m/s). Kuvassa 70 on esitetty suhteelliset läpäisevydet, kun alkuperäinen läpäisevyys on 100 %.

Taulukko 42. Betonikivipintojen vedenläpäisevydet eri koetilanteissa.

Sauman tiedot	Vedenläpäisevyys [m/s]			
	Puhdas	Liattu	Imuroitu	Painepesty
1/5 VS sepeli (10 %)	$2,32 \times 10^{-3}$	$3,21 \times 10^{-4}$	$1,56 \times 10^{-3}$	$1,84 \times 10^{-3}$
Komposiittisauma (10 %)	$1,92 \times 10^{-4}$	$3,15 \times 10^{-5}$	$1,88 \times 10^{-4}$	$2,46 \times 10^{-4}$



Kuva 69. Vedenläpäisevyys betonikivipinnoille eri testaustilanteissa sekä vertailuna valittu mitoitusrankkasade.

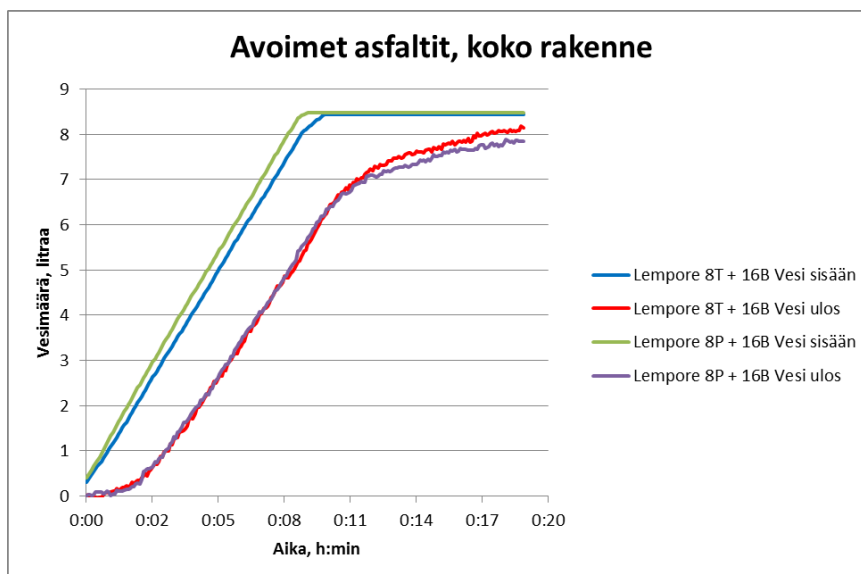


Kuva 70. Vedenläpäisevyys betonikivipinnoille eri testaustilanteissa suhteessa puhtaaseen materiaaliin.

Vedenläpäisevyys puhtaana oli n. 10 kertaa suurempi 1/5 sepelisaumalla kuin komposiittisaumalla. Molemmilla saumoilla likaaminen laski läpäisevyyden n. 15 % alkuperäisestä. Imuroinnilla saatiin parannettua läpäisevyyttä huomattavasti molemmilla saumoilla. Painepesulla saatiin edelleen parannettua läpäisevyyttä molemmissa tapauksissa. Puhdistustoimenpiteiden jälkeen 1/5 sepelisauman vedenläpäisevyys oli 79 % alkuperäisestä ja komposiittisauman 128 % alkuperäisestä. Komposiittisauman vedenläpäisevyys oli siis puhdistustoimenpiteiden jälkeen suurempi kuin alkuperäisellä. Tämä johtuu luultavasti imuroinnin ja painepesun aiheuttamista muutoksista sauman pintaominaisuuksissa. Sauman pinta hieman kuluu ja avautuu tehden siitä vettä läpäisevämmän kuin mitä se alun perin oli. Sepelisaumamateriaalia menetettiin puhdistusmenetelmien seurauksena, jolloin uutta saumamateriaalia täytyi lisätä puhdistustoimenpiteiden jälkeen.

3.5.2 Avoin asfaltti

Avoimille asfalteille (Lempore 8T + 16B ja Lempore 8P + 16B) tehtiin sadetuskokeet alusrakenteen kanssa. Kuvassa 71 on esitetty sisään menevä ja ulos tuleva vesimäärä ajan funktiona molemmille tutkituille asfalttilaatoille.



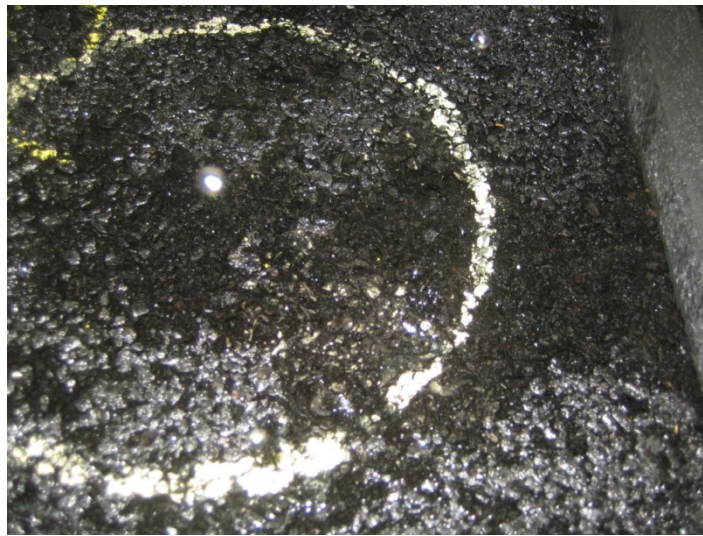
Kuva 71. Vesimäärä sisään ja ulos ajan funktiona avoimille asfalteille alusrakenteen kanssa.

Viive veden kulkeutumisiksi avoimien asfalttien ja alusrakenteen läpi sekä kulmakertoimet (kk) sisään menevälle ja ulos tulevalle vesimäärälle on esitetty Taulukossa 43. Yhden mittauksen data menetettiin materiaalille Lempore 8T + 16B. Raportoituna on tästä syystä kahden mittauksen keskiarvo ilman keskihajontoja.

Taulukko 43. Viive ja kulmakertoimet avoimille asfalteille alusrakenteen kanssa, keskihajonnat suluissa.

Materiaali	Viive, min:s	Kk sisään, l/min	Kk ulos, l/min
Lempore 8T + 16B	2:45	0,83	0,75
Lempore 8P + 16B	2:58 (0:18)	0,83 (0,01)	0,77 (0,01)

Sietokyksadetuskoe tehtiin materiaalille Lempore 8P + 16B. Tässä kokeessa sadetuksen intensiteettiä nostettiin aina mitoitussateen verran kunnes pintavalumaa syntyi. Valumaa syntyi, kun sadetuksen intensiteetti oli mitoitussade 2-kertaisena ($5,5 \times 10^{-5}$ m/s). Kuvassa 72 on esitetty Lempore 8P + 16B asfalttilaatta, jonka pinnalle muodostuu valumaa.

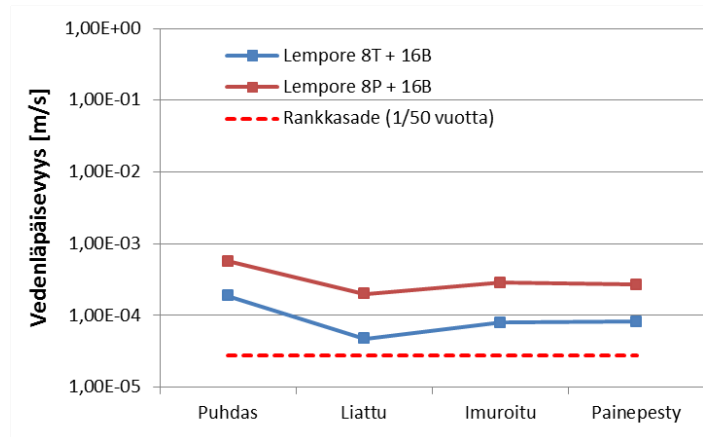


Kuva 72. Valumaa avoimen asfaltin Lempore 8P + 16B pinnalla.

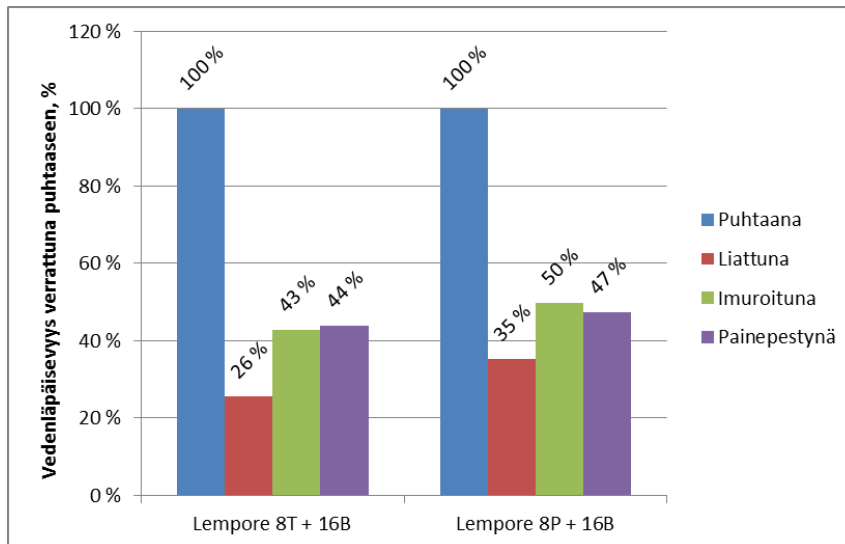
Vedenläpäisevyys mitattiin 'single-ring' menetelmällä alusrakenteen kanssa molemmille asfalteille puhtaana, liattuna, imuroituna sekä painepesun jälkeen. Taulukossa 44 on esitetty vedenläpäisevyys eri testaustilanteissa. Kuvassa 73 samat tulokset graafisesti ja verrattuna valittuun mitoitussateeseen ($2,75 \times 10^{-5}$ m/s). Kuvassa 74 on esitetty suhteelliset läpäisevyudet, kun alkuperäinen läpäisevyys on 100 %.

Taulukko 44. Avoimien asfalttien vedenläpäisevyudet eri koetilanteissa.

Materiaali	Vedenläpäisevyys [m/s]			
	Puhdas	Liattu	Imuroitu	Painepesty
Lempore 8T + 16B	$1,86 \times 10^{-4}$	$4,75 \times 10^{-5}$	$7,95 \times 10^{-5}$	$8,15 \times 10^{-5}$
Lempore 8P + 16B	$5,71 \times 10^{-4}$	$2,01 \times 10^{-4}$	$2,84 \times 10^{-4}$	$2,70 \times 10^{-4}$



Kuva 73. Vedenläpäisevyys avoimille asfalteille eri testaustilanteissa sekä vertailuna valittu mitoitusrankkasade.

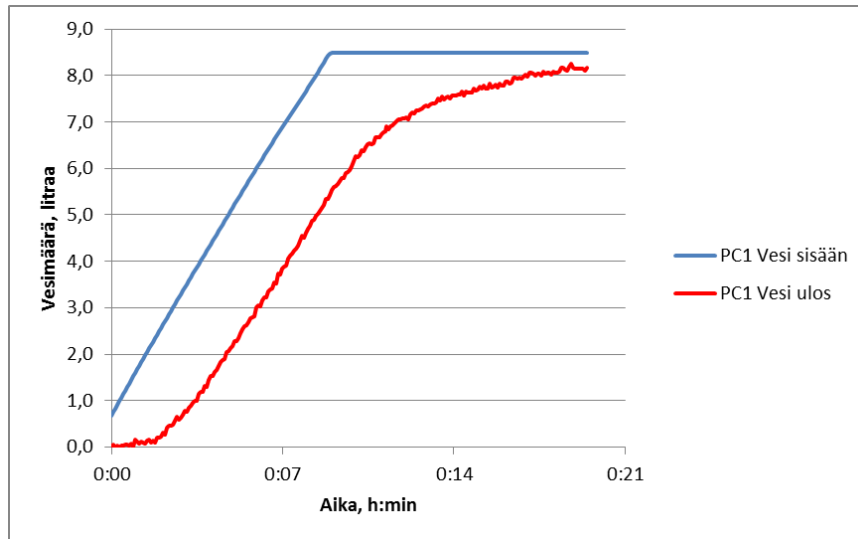


Kuva 74. Vedenläpäisevyys avoimille asfalteille eri testaustilanteissa suhteessa puhtaaseen materiaaliin.

Vedenläpäisevyys oli lähtökohtaisesti n. 3 kertaa suurempi asfaltissa Lempore 8P + 16B kuin asfaltissa Lempore 8T + 16B. Likaaminen aiheutti vedenläpäisevyyden alenemisen noin kolmannekseen tai neljännekseen alkuperäisestä riippuen materiaalista. Imuroinnilla saatiin havaittava parannus vedenläpäisevyyteen molemmissa materiaaleissa. Painepestulla ei saatu enää parannettua AA:n vedenläpäisevyyttä.

3.5.3 Lämpäisevä betoni

Lämpäiseville betoneille (PC0 ja PC1) tehtiin sadetuskokeet alusrakenteen kanssa. Lämpäisevän betonin PC0 osalta kaikki mittausdata kuitenkin kadotettiin tallennusohjelmassa olleen vian takia. Tästä syystä ainoastaan betonista PC1 voitiin raportoida sadetustulokset. Kuvasa 75 on esitetty sisään menevä ja ulos tuleva vesimäärä ajan funktiona lämpäisevälle betonille PC1.



Kuva 75. Vesimäärä sisään ja ulos ajan funktiona läpäisevälle betonille PC1 alusrakenteen kanssa.

Viive veden kulkeutumisesta läpäisevän betonin PC1 ja alusrakenteen läpi sekä kulmakertoimet (kk) sisään menevälle ja ulos tulevalle vesimäärälle on esitetty Taulukossa 45. Materiaalille tehtiin vain kaksi mittausta, raportoituna tästä syystä vain kahden mittauksen keskiarvot.

Taulukko 45. Viive ja kulmakertoimet läpäisevälle betonille (PC1) alusrakenteen kanssa.

Materiaali	Viive [min:s]	Kk sisään [l/min]	Kk ulos [l/min]
PC1	3:25	0,86	0,79

Sietokykykysadetuskoetehtiin materiaalille PC1. Tässä kokeessa sadetuksen intensiteettiä nostettiin aina mitoitussateen verran kunnes pintavalumaa syntyi. Valumaa syntyi, kun sadetuksen intensiteetti oli 4-kertainen mitoitussateeseen verrattuna ($1,1 \times 10^{-4}$ m/s). Kuvassa 76 on esitetty läpäisevä betonilaatta PC1, jonka pinnalle on muodostunut valumaa.



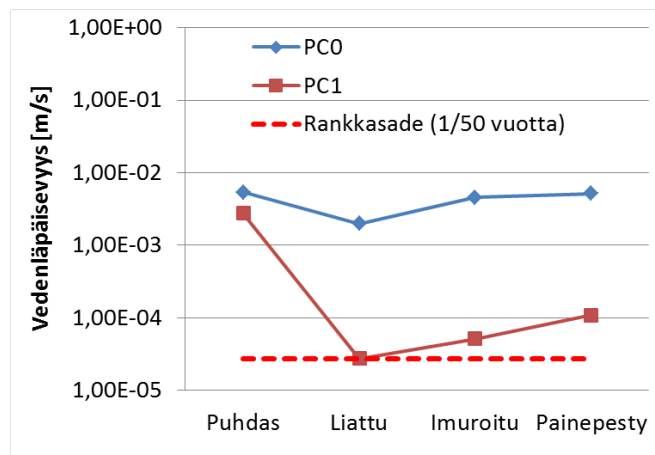
Kuva 76. Valumaa läpäisevän betonin PC1 pinnalla mitoitussadetta selvästi suuremmalla sadetuksella (4-kertaisella).

Vedenläpäisevyys alusrakenteen kanssa mitattiin molemmille betoneille puhtaana, liattuna, imuroituna sekä painepesun jälkeen. Taulukossa 46 on esitetty vedenläpäisevyys eri tes-

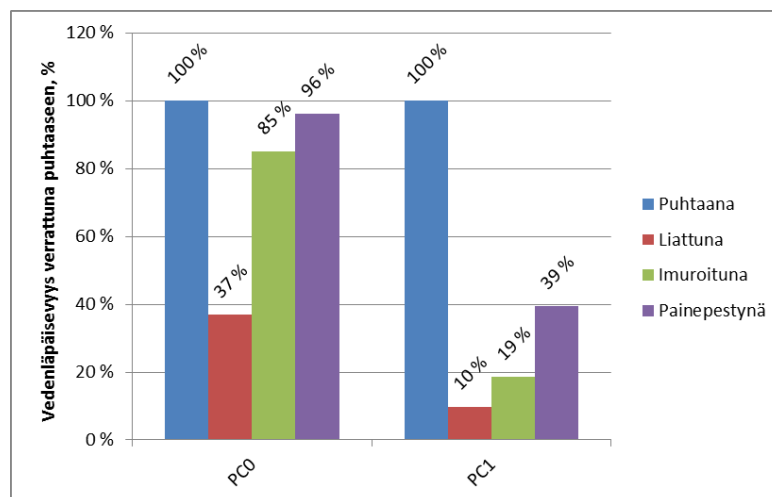
taustilanteissa. Kuvassa 77 samat tulokset graafisesti ja verrattuna valittuun mitoitussateeseen ($2,75 \times 10^{-5}$ m/s). Kuvassa 78 on esitetty suhteelliset läpäisevyydet, kun alkuperäinen läpäisevyys on 100 %.

Taulukko 46. Läpäisevien betonien vedenläpäisevyydet eri testaustilanteissa.

Materiaali	Vedenläpäisevyys [m/s]			
	Puhdas	Liattu	Imuroitu	Painepesty
PC0	$5,36 \times 10^{-3}$	$1,98 \times 10^{-3}$	$4,56 \times 10^{-3}$	$5,16 \times 10^{-3}$
PC1	$2,77 \times 10^{-3}$	$2,73 \times 10^{-5}$	$5,14 \times 10^{-5}$	$1,09 \times 10^{-4}$



Kuva 77. Vedenläpäisevyys läpäiseville betoneille alusrakenteen kanssa eri testaustilanteissa ja vertailu mitoitusrankkasade.



Kuva 78. Vedenläpäisevyys läpäiseville betoneille alusrakenteen kanssa eri testaustilanteissa suhteessa puhtaaseen materiaaliin.

Läpäisevä betoni PC0 oli materiaaleista selvästi läpäisevämpi. Likaaminen aiheutti PC0:ssa vedenläpäisevyyden laskun 37 %:iin kun taas PC1:ssä likaaminen pudotti läpäisevyyden kymmenykseen alkuperäisestä. Molemmilla materiaaleilla saatiin sekä imuroinnilla että painepesulla huomattavaa puhdistusta aikaiseksi. Painepesun jälkeen PC0:n vedenläpäisevyys oli lähes sama kuin puhtaalla materiaalilla. Läpäisevä betoni PC0 oli niin huokoista että lähes kaikki tukkiva aines saatiin huuhdottua materiaalin läpi alusrakenteeseen. Kyseinen ominaisuus on hyvä puhdistuksen kannalta. Alusrakenteen mitoituksessa tulee kuitenkin ottaa huomioon tukkivan materiaalin vuosien varrella tapahtuva kerääntyminen alusrakenteeseen sen alaosaan, jossa se vaikuttaa mm. kokonaishuokostilavuuteen sekä siihen, miten nopeasti vesi voi siirtyä maaperään.

3.6 Yhteenveto ja johtopäätökset

Lähes kaikki tutkitut materiaalit selviytyivät hyvin mitoitussateesta, joka vastasi kerran 50 vuodessa tapahtuvaa rankkasadetta $2,75 \times 10^{-5}$ m/s (275 l/s/ha, 99 mm/h). Hiekan sekä hiekkaa pienijakoisemman materiaalin kerääntyminen läpäiseviin pintarakenteisiin heikensi vedenläpäisevyyttä materiaalista riippuen 10–37 % alkuperäisestä. Tästä huolimatta vedenläpäisevyys pysyi kaikissa tapauksissa valitun mitoitussateen voimakkuutta ($2,75 \times 10^{-5}$ m/s) suurempana. Materiaalista riippuen imuroinnin ja painepesun avulla saatiin vedenläpäisevyys palautettua arvoon 39–128 % alkuperäisestä. Tulee myös ottaa huomioon, että tässä käytetyt puhdistusmenetelmät eivät välttämättä vastaa käytännössä käytettäviä menetelmiä ja niiden puhdistustehoa. Tuloksia voidaankin pitää kuitenkin hyvinkin suuntaa antavina. Likaantumisen vaikutus vedenläpäisevyyteen tulee joka tapauksessa ottaa huomioon suunnitteluvaiheessa, jotta materiaalin vedenläpäisevyyden aleneminen ei muodostu ongelmaksi.

Käytännössä oleellinen merkitys läpäisevän pinnoitteen toimintaan on myös sillä, minkälaisessa ympäristössä pinnoite sijaitsee ja miten sitä huolletaan. Läpäisevien pinnoitteiden tukkeutumisesta käytännön olosuhteissa voidaan saada lisätietoa pilot-projekteissa. Niissä voidaan tehdä vedenläpäisevyyden seurantamittauksia. Tällöin voidaan selvittää, miten valittavat huoltomenetelmät, niiden ajoitus ja määrä vaikuttavat läpäisevän pinnoitteen toimintaan kussakin olosuhteessa.

Taulukossa 47 on esitetty yhtenä yhteenvetona vedenläpäisevyyden arvoja erilaisille vettä läpäiseville päällysteille. Arvoja on esitetty sekä ulkomaisiin ohjeistuksiin ja kirjallisuuteen perustuen että tässä esitettyihin koetuloksiin perustuen. Arvoja on esitetty sekä tukkeutumattomille puhtaille päällysteille että tukkeutuneille päällysteille ja lisäksi puhdistetuille päällysteille. Tulee huomata, että CLASS-projektin tutkimusten kokeelliset arvot on määritetty "ASTM single-ring" menetelmällä [ASTM C1701/C1701M. 2009, ASTM C1781/C1781M. 2014]. Näitä arvoja ei välttämättä voi menetelmäerojen vuoksi verrata suoraan muiden menetelmien antamiin vedenläpäisyarvoihin, eikä esimerkiksi mitoitussateen arvoon. Taulukossa 47 on esitetty myös suunnittelussa käytettäväksi suositeltu arvo [Virginia DCR 2013] sekä vedenläpäisevyys, jolloin pinnoite tulisi viimeistään puhdistaa. [Kuosa et al. 2013a]

Taulukossa 47 on esitetty myös joitakin tyypillisiä huokoisuuden/tyhjätilan sekä tiheyden arvoja läpäisevälle betonille ja avoimelle asfaltille. LB:n osalta on lisäksi esitetty mekaanisten ominaisuuksien tyypillisiä arvoja.

Kuvissa 79–81 on verrattu taulukon 47 arvoja graafisessa muodossa eri pintatyyppien tapauksissa. Kuvissa esitetyt vedenläpäisevyyden arvot ovat taulukossa 47 esitettyjä yksittäisiä arvoja tai taulukossa 47 esitetyn suurimman ja pienimmän arvon keksi-arvoja. Voidaan nähdä, että kirjallisuudessa ja ulkomaisissa ohjeissa esitetyt arvot ja tässä tutkimuksessa olleille läpäiseville päällysteille määritetyt arvot vastaavat toisiaan suhteellisen hyvin.

Kuvissa 76–78 on myös esitetty mitoitussateen arvo sekä lisäksi mitoitussade 2- ja osin myös 4-kertaisena. Standardimenetelmällä ("ASTM single-ring") määritettyjä eri materiaaleille määritettyjä arvoja ei voida menetelmäerojen vuoksi suoraan verrata näihin arvoihin. Myöskään käytettyä laboratoriosadetusta ei voi suorana verrata luonnonmukaiseen sateeseen. Esitetyt vertailut ovatkin vain suuntaa antavia.

Voidaan myös nähdä, että pienen läpäisevyyden AA:n ja LB:n puhdistus ei palauttanut läpäisevyyttä tässä tutkimuksessa erityisen hyvälle tasolle vaan se jäi vain hieman viitteessä [Virginia DCR 2013] suositeltua suunnitteluarvoa paremmaksi. Toisaalta suuren läpäisevyyden LB:n läpäisevyys kyettiin palauttamaan lähes alkuperäiselle tasolle.

Sekä puhdistusmenetelmä ja sen teho että materiaalin huokoisuus ja huokosrakenne vaikuttavat siihen, mille tasolle puhdistus voi vedenläpäisevyyden palauttaa. Koska myös tukkeutuminen on hyvin erilaista eri olosuhteissa eikä se ole välttämättä yhtä voimakasta kuin tässä tehdyissä kokeissa, on tukkeutumisesta ja puhdistuksen palauttavasta vaikutuksesta

hyvä saada kokemusta myös käytännössä. Tätä tietoa voidaan saada erityisesti pilot-projekteissa tehtävin mittauksin. Taulukossa 48 on esitetty vertailuksi arvioita siitä, kuinka suuri tukkivan aineksen määrä on eri olosuhteissa [Mata 2008]. Tässä CLASS-tutkimuksessa käytetty tukkivan aineksen määrä oli Rig-kokeissa 2 kg/m^2 ja se oli sekä hienoa ainesta (kaoliini) että 0–1 mm hiekkaa (50/50 painosuhteessa). Olosuhteen mukaan (ks. taulukko 48) tämä määrä vastaa esimerkiksi yli 40 vuotta parkkialueella tai vain 3 vuotta rakenteilla olevalla alueella. Onkin syytä kiinnittää huomiota siihen, että läpäisevät pinnat suojataan mahdollisuuksien mukaan niille kulkeutuvilta ja niitä tukkivilta aineksilta.

Oleellista on valita suunnitteluarvoksi harkinnan mukaan soveltuva arvo. Viitteessä arvo [Virginia DCR 2013] esitetty suunnitteluarvo on hieman varmemmalla puolella kuin arvo, joka on 10 % läpäisevän pinnoitteen läpäisevyydestä alussa puhtaana. Jos olosuhde on erityisen vaikea eli liikaavaa ainesta voi tulla tavallista enemmän (vrt. taulukko 48), on syytä valita suunnitteluun tavallista pienempi vedenläpäisevyys. Toisaalta hyvissä olosuhteissa ja silloin, kun puhdistus ja huolto tehdään hyvin ja säännöllisesti, voidaan käyttää suurempiakin läpäisevyyden arvoja.

Taulukko 47. Yhteenveto vettä läpäisevien pinnoitteiden vedenläpäisevyydestä ja joistakin muista teknisistä ominaisuuksista. CLASS-tulokset on määritetty "ASTM-single ring"-menetelmällä.

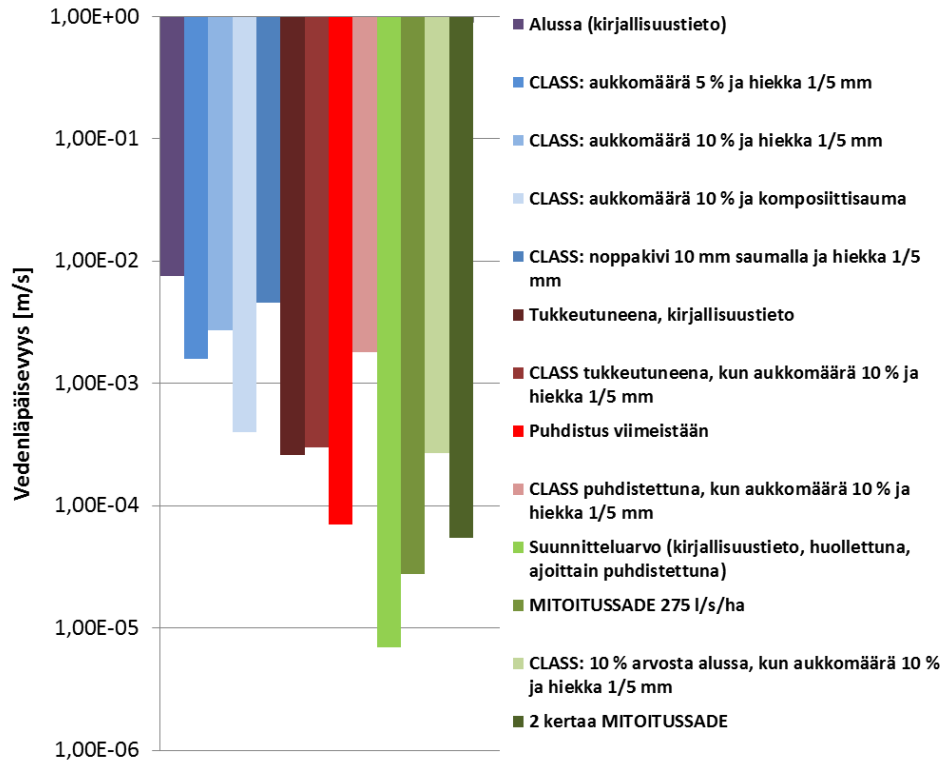
Ominaisuus	Pintamateriaali		
	Betoni- ja lunnonkivipinnat, joissa vettä läpäisevät saumat/ aukkokohtat	Läpäisevä betoni (LB)	Avoin asfaltti (AA)
Vedenläpäisevyys puhtaana [10^{-3} m/s]			
Kirjallisuustieto	1,1 - 14,0	0,5 - 12	0,1 - 3,5
CLASS (kokeelliset tulokset)		2,8 - 5,4	0,2 - 0,6
kun aukkomäärä 5 % ja hiekka 1/5 mm	1,6		
kun aukkomäärä 10 % ja hiekka 1/5 mm	2,3 - 3,1		
kun aukkomäärä 10 % ja komposiittisauma	0,2 - 0,6		
noppakivi 10 mm saumalla ja hiekka 1/5 mm	4,6		
Vedenläpäisevyys tukkeutuneena [10^{-3} m/s]			
Kirjallisuustieto	0,015 - 0,5	0,007 - 0,2	0,004 - 0,01
CLASS (kokeelliset tulokset)		0,03 - 2,7	0,05 - 0,2
kun aukkomäärä 10 % ja hiekka 1/5 mm	0,3		
Puhdistus viimeistään, kun vedenläpäisevyys [10^{-3} m/s]	0,07	0,07	0,07
Vedenläpäisevyys puhdistettuna [10^{-3} m/s]			
CLASS (kokeelliset tulokset)		0,1 - 5,2	0,08 - 0,27
kun aukkomäärä 10 % ja hiekka 1/5 mm	1,8		
Suunnitteluarvo (huollettuna, ajoittain puhdistettuna) [10^{-3} m/s]	0,007 ⁴⁾	0,035 ⁴⁾	0,02 ⁴⁾
Tiheys [kg/m^3]		1600 - 2080	1940 - 2150
Avoin huokoisuus/tyhjättila [%]²⁾		11 - 35	14 - 32
Tyypillinen tai optimaalinen ³⁾		20 ³⁾	16 - 22
Puristuslujuus [MPa]		3,5 - 28,0	
Tyypillinen vaatimus (kantavana pintana) [MPa]		17,0	
Taivutusvetolujuus [MPa]		1,0 - 2,8	
Kimmomoduuli (tyypillinen) [GPa]		13,8	

1) esimerkiksi 7 vuodessa ilman huoltoa

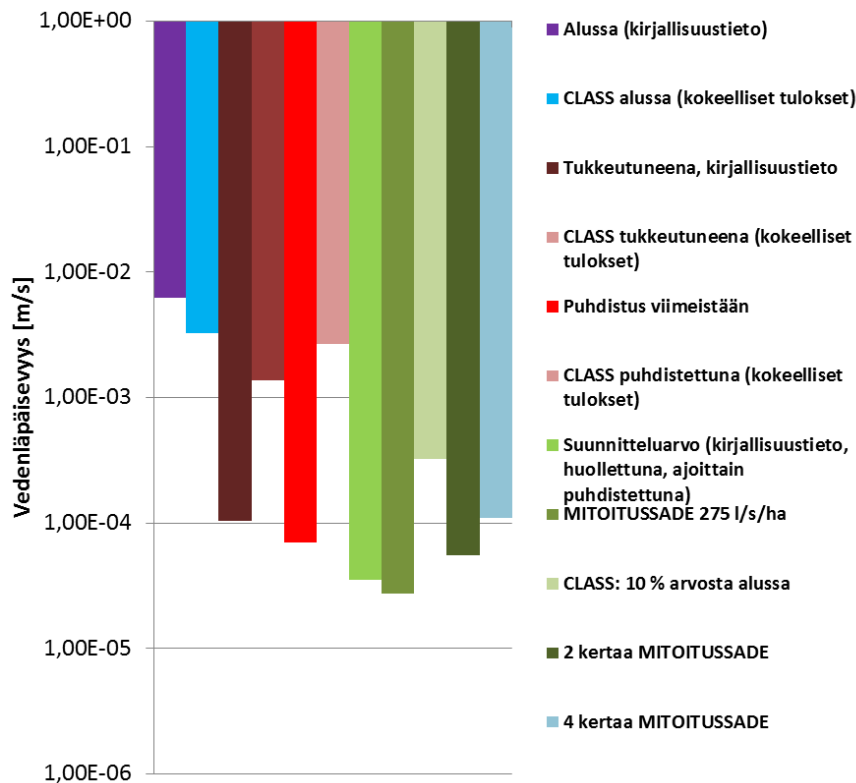
2) tyypillinen toleranssi $\pm 5\%$

3) LB:lle yleensä optimaalinen arvo (liian suuri huokoisuus heikentää lujuus- ja säilyvyysominaisuuksia ja liian pieni huokoisuus lisää tukkeutumiskärsiä ja pienentää vedenläpäisevyyttä)

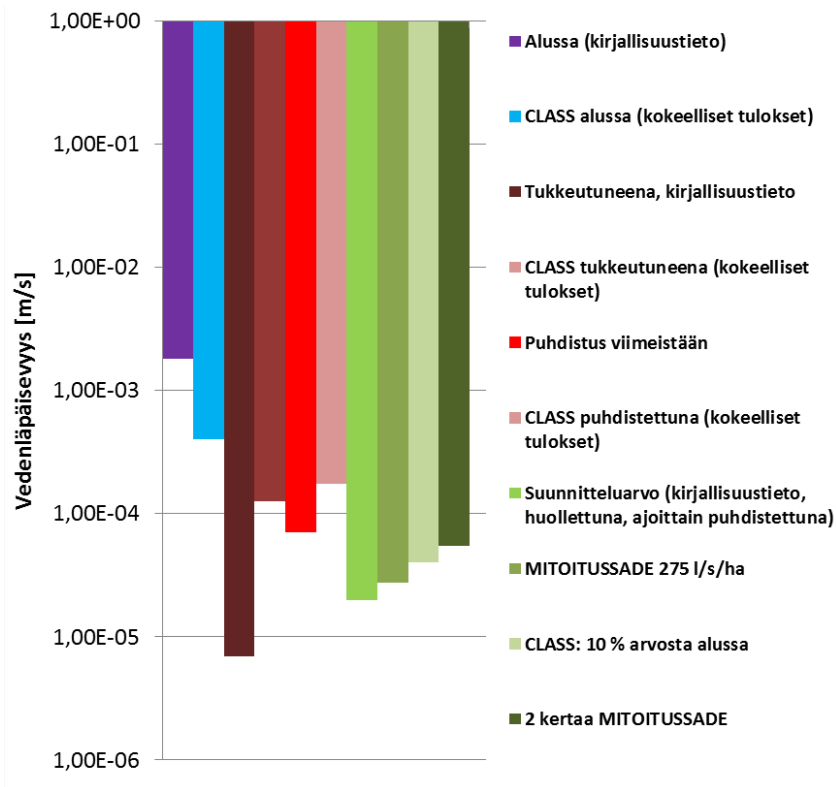
4) [Virginia DCR 2013, Kuosa et al. 2013a]



Kuva 79. Betoni- ja luonnonkivipinnat, joissa vettä läpäisevät saumat/aukot. Vedenläpäisevyysarvojen vertailu. Kuvissa kussakin tapauksessa on esitetty joko yksittäinen taulukon 47 arvo tai keskiarvo, joka on laskettu taulukon 47 pienimän ja suurimman arvon keskiarvona.



Kuva 80. Läpäisevä betoni (LB). Vedenläpäisevyysarvojen vertailu. Kuvissa kussakin tapauksessa on esitetty joko yksittäinen taulukon 47 arvo tai keskiarvo, joka on laskettu taulukon 47 pienimän ja suurimman arvon keskiarvona.



Kuva 81. Avoin asfaltti (AA). Vedenläpäisevyyssarvojen vertailu. Kuvissa kussakin tapauksessa on esitetty joko yksittäinen taulukon 47 arvo tai keskiarvo, joka on laskettu taulukon 47 pienimän ja suurimman arvon keskiarvona.

Taulukko 48. Arvioita tukkivan aineksen määrille erilaisissa olosuhteissa sekä määrää 2 kg/m^2 vastaava aika/vuosimäärä. [Mata 2008]

Olosuhde	Kiintoainemäärä [$\text{kg/m}^2 \times \text{vuosi}$]	Vuosimäärä, joka vastaa määrää 2 kg/m^2
Liikekeskusalue	0,11	18
Parkkipaikka	0,05	44
Tiheä asuinalue	0,05	42
Keskitiheä asuinalue	0,02	93
Harvaan asuttu alue	0,00	1820
Teollisuusalue	0,10	21
Rakenteilla oleva alue	0,68	3

Lähdeviitteet

- ASTM C1701/C1701M. 2009. Standard Test Method for Infiltration Rate of In Place Pervious Concrete. 3 s.
- ASTM C1781/C1781M. 2014. Standard Test Method for Infiltration Rate of Permeable Unit Pavement Systems. 6 s.
- ASTM C457/C457M. 2012. Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete. Englanniksi, 15 s.
- ASTM C666/C666M-2003: 2008. Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. 6 s.
- ASTM standardization. 2010. ASTM:n www-sivut. November/December 2010, Pervious concrete. http://www.astm.org/SNEWS/ND_2010/c0949_nd10.html Vierailtu 26.8.2014.
- By 50. 2012. Betoninormit 2012. Suomen betoniyhdistys r.y., 250 s.
- C1688/C1688M. 2012. Standard Test Method for Density and Void Content of Freshly Mixed Pervious Concrete. 4 s.
- CEN/TR 15177. 2006. Testing the freeze-thaw resistance of concrete. Internal structural damage. 38 p.
- CEN/TS 12390-9:2006. Testing hardened concrete. Freeze-thaw resistance. Scaling. 28 p.
- Delatte, N., Miller, D. & Mrkajic, A. 2007. Portland Cement Pervious Concrete Pavement: Field Performance Investigation on Parking Lot and Roadway Pavements. Final Report, Department of Civil & Environmental Engineering, Fenn College of Engineering, Cleveland State University, 79 p.
- EN 12697-19: 2012. Bituminous mixtures – Test methods for hot mix asphalt. Permeability of specimen. 16 p.
- EN 13242. 2008. Kiviainekset sitomattomiin ja hydraulisesti sidottuihin materiaaleihin maa- ja vesirakentamisessa sekä tienrakenteissa. 35 s.
- EN ISO 11058: 2010. Geotextiles and geotextile-related products – Determination of water permeability characteristics normal to the plane, without load. 17 s.
- Finnsementti. 2014. Finnsementin www-sivut. Sementit. <http://www.finnsementti.fi/tuotteet/sementit> Vierailtu 26.8.2014.
- GLO-85. 1985. Geotekniset laboratorio-ohjeet. Luokituskokeet, Nide 1. Suomen geoteknillinen yhdistys, 107 s.
- Hansen, J., Holt, E. & Palmu, M. 2013. Full-Scale Demonstration of Plugs and Seals. EuraWaste – Euradwaste'13: 8th EC Conference on the Management of Radioactive Waste, Vilnius, Lithuania, 14-16 October 2013.
- Holt, E., Koho, P. & Hansen, J. 2016. Deliverable 4.5 Summary Report: Posiva's Full-Scale Tunnel End Plug Construction and Performance. DOPAS Project. draft, to be published January 2106.

- Kevern, J. T., Wang, K. & Schaefer, V. R. 2009. Test Methods for Characterizing Air Void Systems in Portland Cement Pervious Concrete. Reprinted from JAI, Vol. 6, No. 9. In Journal of ASTM International Selected Technical Papers, STP 1511, Recent Advancement in Concrete Freezing-Thawing (F-T) Durability, Ed. Wang, K., s. 128–143. Lämpäisevän betonin huokostuksen testausmenetelmät.
- Kevern, J. T., Wang, K. & Schaefer, V. R. 2009. Test Methods for Characterizing Air Void Systems in Portland Cement Pervious Concrete. Reprinted from JAI, Vol. 6, No. 9. Journal of ASTM International Selected Technical Papers, STP 1511, Recent Advancement in Concrete Freezing-Thawing (F-T) Durability, Ed. Wang, K., Englanniksi, s. 128–143.
- Kling, T., Holt, E., Kivikoski, H., Korkealaakso, J., Kuosa, H., Loimula, K., Niemeläinen, E. & Törnqvist, J. 2015. Vettä läpäisevät päällysteet. Käsikirja suunnitteluun, rakentamiseen ja ylläpitoon. VTT Technology 201. 59 s. + liitt. 11 s.
- Korkealaakso, J., Kuosa, H., Niemeläinen, E. & Tikanmäki, M. 2013. Review of pervious pavement dimensioning, hydrological models and their parameter needs. State-of-the-Art. VTT Research Report VTT-R-08227-13. 62 p.
- Kuosa, H. & Holt, E. 2013. Development of durable pervious concrete for Finland's stormwater management needs. Concrete Innovation Conference 2014 (CIC2014), Oslo, kesäkuu 2014, englanniksi, 10 s.
- Kuosa, H., Leivo, M., Holt, E. & Ferreira, R. M. 2012. Effect of varying surface ageing on frost-salt scaling. IABMAS 2012. 8 p.
- Kuosa, H., Niemeläinen, E. & Loimula, K. 2013a. Pervious pavement systems and materials. State-of-the-Art. VTT Research Report VTT-R-08222-13, Technical Research Centre of Finland, 95 p.
- Kuosa, H., Niemeläinen, E. & Korkealaakso, J. 2013b. Pervious pavement testing methods. State-of-the-Art and laboratory and field guideline for performance assessment VTT Research Report VTT-R-08222-13. 64 p.
- Kuosa, H., Niemeläinen, E., Kivikoski, H. & Törnqvist, J. 2014. Pervious pavement winter performance. State-of-the-Art. VTT Research Report VTT-R-08223-13, Technical Research Centre of Finland, Espoo, 32 p.
- Loimula, K. & Kuosa, H. 2013. The impact of permeable pavements on water quality. State-of-the-Art. VTT Research Report VTT-R-08224-13. 16 p.
- PANK-4306. Asfalttimassan jäätymis-sulamiskestävyys. Asphalt mix freeze-thaw durability (in Finnish). 13 p.
- Rudus. 2013. Kiviainesten laadunvalvontaraportit. Toimitettu VTT:lle 2013. 4 s.
- SFS 7017: 2014. Betonista tai luonnonkivestä tehdyille ulkotilojen päällystekiville, -laatoille ja reunakiville eri käyttökohteissa vaaditut ominaisuudet ja niille asetetut vaatimustasot.
- SFS-EN 1338 + AC: 2003. Betoniset päällystekivet. Vaatimukset ja testausmenetelmät.
- Tan, S.-A., Fwa, T.-F. & Han, C.-T. 2003. Clogging Evaluation of Permeable Bases. Journal of transportation engineering, June 2003, s. 309–3015.
- Tennis, P. D., Leming, M. L. & Akers, D. J. 2004. Pervious Concrete Pavements. PCA Engineering Bulletin EB 302, Portland Cement Association. Englanniksi, 32 s.

- Tiehallinto. 2004. Tierakenteen suunnittelu - Päälysrakenteen mitoitus, 69 s. <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/pdf/2100029-v-04tierakenteensuunn.pdf> Vierailtu 30.10.2014.
- Tiehallinto. 2005. Tietoa tiensuunnitteluun. Tiehallinto nro 71D/ tie- ja geotekniikka. 13 s. <http://alk.tiehallinto.fi/thohje/tts71d.pdf> Vierailtu 30.10.2014.
- Vancura, M., MacDonald, K. & Khazanovich, L. 2011. Microscopic analysis of paste and aggregate distresses in pervious concrete in a wet, hard freeze climate. Cement & Concrete Composites, Vol. 33, (eng.), s. 1080–1085.
- Virginia DCR. 2013, Stormwater design specification No. 7. Permeable pavement. Version 2.0, 25 p. <http://chesapeakestormwater.net/wp-content/uploads/downloads/2014/04/VA-BMP-Spec-No-7-PERMEABLE-PAVEMENT-FINAL-DRAFT-EDITS-v2-0-02April2014.pdf> Vierailtu 30.10.2014.
- VTT TEST R003-00-10. 2011. Betonin ilmahuokosparametrien määrittäminen ohuthieistä. 8 s.
- Yang, Z., Brown, H. and Cheney, A. 2006. Influence of Moisture Conditions on Freeze and Thaw Durability of Portland Cement Pervious Concrete. 15 p.

Liite 1. Asfalttiporapalojen jäätymis-sulamiskokeiden yksittäiset tulokset PANK-4306 mukaisesti

Pohja Lempore 16B

Massa-tyyppi	Näyte ID	Maksimi-raekoko [mm]	Tyhjätila [%]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Kuiva-massa [g]	Märkä-massa syklauksen/imeytyksen jälkeen [g]	Massa ennen HVL-koetta [g]	Halkaisu-vetolujuus [kPa]	Näytteen jäätymis-sulamiskestävyys [%]
Lempore 16B JS	1	na	23,1	69,9	102,2	1086	1128	na	1013,934	72,371
Lempore 16B JS	3	na	20,4	67,5	102,2	1084,9	1117	na	1228,338	88,163
Lempore 16B JS	4	na	19,1	68,8	102,2	1124,2	1162	na	1173,001	93,276
Lempore 16B JS	5	na	19,4	69,4	102,2	1130,2	1170	na	1272,323	106,970
Lempore 16B JS	15	na	23,6	70,6	102,2	1089,1	1125	na	943,392	59,147
Lempore 16B JS	19	na	20,9	63,2	102,2	1010,3	1044	na	957,420	69,852
Lempore 16B JS	20	na	24	66,4	102,2	1019,8	1056	na	761,851	45,044
Lempore 16B JS	25	na	21	67,7	102,2	1080,1	1116	na	876,981	52,552
Lempore 16B REF	2	na	22,6	72,1	102,2	1127,4	1157	na	1037,165	47,971
Lempore 16B REF	6	na	20,6	69,7	102,2	1117,6	1156	na	1309,335	93,028
Lempore 16B REF	17	na	18,9	62,8	102,2	1028,7	1086	na	1171,964	93,743
Lempore 16B REF	22	na	24,1	67,1	102,2	1028,8	1054	na	700,928	31,758
Lempore 16B REF	27	na	20,9	66,1	102,2	1056,5	1059	na	919,636	60,252

Pinta "avoin" Lempore 8P

Massa- tyyppi	Näyte ID	Maksimi- raekoko [mm]	Tyhjätila [%]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Kuiva- massa [g]	Märkä- massa syklauksen/ imeytyksen jälkeen [g]	Massa ennen HVL- koetta [g]	Halkaisu- vetolujuus [kPa]	Näytteen jäätymis- sulamis- kestävyys [%]
Lempore 8P JS	6	na	25,6	68,1	102,0	1122,7	1180	na	920,268	40,045
Lempore 8P JS	11	na	24,2	64,8	102,0	1088,7	1141	na	916,697	40,924
Lempore 8P JS	16	na	26,6	68,1	102,0	1107,8	1161	na	840,702	40,182
Lempore 8P JS	18	na	24,9	61,1	102,0	1016,7	1070	na	968,690	43,174
Lempore 8P JS	21	na	24,1	63,3	102,0	1065,2	1120	na	1020,623	50,810
Lempore 8P JS	27	na	26,3	63,8	102,0	1042,4	1095	na	840,408	39,782
Lempore 8P JS	30	na	25,8	64,5	102,0	1060,4	1111	na	971,632	57,753
Lempore 8P JS	31	na	27,3	66,3	102,0	1068,7	1124	na	883,634	39,373
Lempore 8P REF	4	na	25,4	67,3	102,0	1113,3	1161	na	931,207	42,114
Lempore 8P REF	9	na	25,1	68,9	102,0	1144,1	1177	na	961,387	45,838
Lempore 8P REF	12	na	24,1	67,0	102,0	1127,8	1192	na	998,598	48,711
Lempore 8P REF	15	na	27,3	66,5	102,0	1071	1128	na	914,215	50,450
Lempore 8P REF	28	na	26	63,8	102,0	1046	1094	na	787,5	37,5

Pinta "tiivis" Lempore 8T

Massa- tyyppi	Näyte ID	Maksimi- raekoko [mm]	Tyhjätila [%]	Korkeus [mm]	Halkaisija [mm]	Kuiva- massa [g]	Märkä- massa syklauksen/ imeytyksen jälkeen [g]	Massa ennen HVL- koetta [g]	Halkaisu- vetolujuus [kPa]	Näytteen jäätymis- sulamis- kestävyys [%]
Lempore 8T JS	5	na	20	62,1	102,0	1099,1	1153	na	1383,819	80,429
Lempore 8T JS	7	na	21,5	63,2	102,0	1097,8	1153	na	1243,719	72,895
Lempore 8T JS	13	na	20,8	64,0	102,0	1121,3	1176	na	1284,951	57,320
Lempore 8T JS	20	na	21,7	64,4	102,0	1115,8	1169	na	1312,027	80,566
Lempore 8T JS	21	na	21,2	64,0	102,0	1116,1	1164	na	1381,708	77,162
Lempore 8T JS	22	na	20,6	65,7	102,0	1154,6	1205	na	1387,847	79,154
Lempore 8T JS	25	na	20,2	63,6	102,0	1123,4	1171	na	na	na
Lempore 8T JS	27	na	20,3	64,9	102,0	1143,9	1194	na	1362,548	81,379
Lempore 8T REF	1	na	21,2	63,6	102,0	1108,7	1156	na	302,803	5,268
Lempore 8T REF	9	na	20,6	62,4	102,0	1096,8	1143	na	1458,831	95,768
Lempore 8T REF	10	na	19,3	62,0	102,0	1106,7	1164	na	1438,418	84,092
Lempore 8T REF	18	na	21,7	64,3	102,0	1113,6	1154	na	1363,223	70,312
Lempore 8T REF	29	na	20,4	64,1	102,0	1128,6	1177	na	1309,335	93,028

Liite 2. Asfaltin vedenläpäisevyysskoheet, yksittäiset tulokset

EN 12697-40 (laatta)

Tunniste	Päiväys	Mittaaja	Sarjavastus-aika, [s]	Mittaus-aika 1 [s]	Mittaus-aika 2 [s]	Mittaus-aika 3 [s]	Suht. hydraulinen johtavuus HC keskiarvo [s ⁻¹]
Lempore 8P	19.6.14	EN, KL	1,4	12,34	11,75	11,87	0,095
Lempore 8T	19.6.14	EN, KL	1,4	19,09	22,19	22,25	0,051
Lempore 16B	na	EN, KL	1,4	12,37	12,78	13,10	0,088
Lempore 8P + 16B/1	na	EN, KL	1,4	23,35	24,00	25,16	0,044
Lempore 8P + 16B/2	na	EN, KL	1,4	29,72	30,12	28,87	0,036
Lempore 8T + 16B/1	na	EN, KL	1,4	40,53	43,34	46,10	0,024
Lempore 8T + 16B/2	na	EN, KL	1,4	42,12	47,41	55,84	0,022

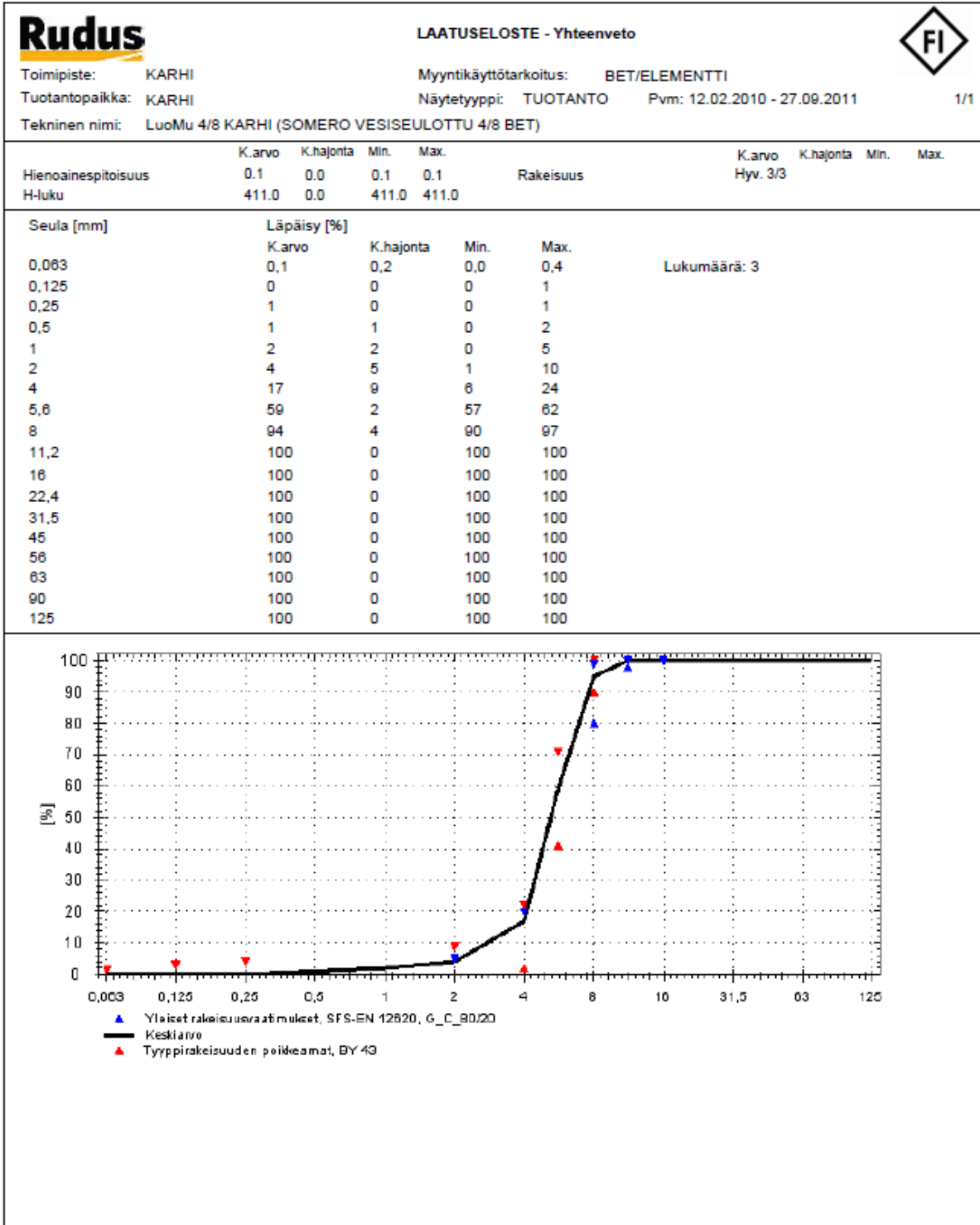
ASTM C1701/C1701M (laatta)

Asfalttimassa	Mittaus	Suotautuneen veden määrä [kg]	Suotautumisaika [s]	Suotautuminen [mm/h]	Suotautuminen [m/s]
Lempore 8P	Esikastelu	3,6	>30		
	1	3,603	82,5	2300,272	0,000639
	2	3,615	88,4	2153,897	0,000598
	3	3,603	94,6	2006,051	0,000557
	Keskiarvo			2153,407	0,000598
Lempore 8T	Esikastelu	3,6	>30		
	1	3,6	112,85	1680,234	0,000467
	2	3,6	167,56	1131,621	0,000314
	3	3,6	207,47	913,9367	0,000254
	4	3,6	280,44	676,132	0,000188
	Keskiarvo			1100,481	0,000306
Lempore 16B	Esikastelu	3,6	<30		
	1	18	62,42	15188,6	0,004219
	2	18	66,55	14246,01	0,003957
	3	18	69,01	13738,19	0,003816
	Keskiarvo			14390,93	0,003997
Lempore 8P + 16B/1	Esikastelu	3,6	>30		
	1	3,616	96,1	1981,865	0,000551
	2	3,599	124,4	1523,809	0,000423
	3	3,601	142,5	1330,997	0,00037
	Keskiarvo			1612,223	0,000448
Lempore 8P + 16B/2	Esikastelu	3,6	>30		
	1	3,6	112,5	1685,462	0,000468
	2	3,602	139,7	1358,051	0,000377
	3	3,614	169,7	1121,696	0,000312
	Keskiarvo			1388,403	0,000386
Lempore 8T + 16B/1	Esikastelu	3,6	>30		
	1	3,602	222,8	851,5251	0,000237
	2	3,601	276	687,1997	0,000191
	3	3,608	326,7	581,6829	0,000162
	Keskiarvo			706,8026	0,000196
Lempore 8T + 16B/2	Esikastelu	3,6	>30		
	1	3,598	284	667,2856	0,000185
	2	3,608	437,5	434,3676	0,000121
	3	3,591	529,9	356,9361	9,91E-05
	Keskiarvo			486,1964	0,000135

EN 12697-19 (porapalat)

EN 12697-40		Permeability m/s			
Massa	Näyte ID	I	II	III	IV
Lempore 16B	8	0,00384	0,00349	0,00315	
	13	0,00298	0,00293	0,00321	
	18	0,00225	0,00222	0,00233	0,00246
Lempore 8P	1	0,00266	0,00214	0,00225	
	2	0,00272	0,00306	0,00304	
	25	0,00244	0,00228	0,00256	
Lempore 8T	4	0,00275	0,00270	0,00270	
	17	0,00209	0,00198	0,00188	
	23	0,00238	0,00212	0,00191	

Liite 3. LB-massoissa käytettyjen kiviainesten laadunvalvontaraportit [Rudus Oy 2012]



Rudus

LAATUSELOSTE - Yhteenveto



Toimipiste: LÄYLIÄINEN

Myyntikäyttötarkoitus: Betoni

Tuotantopaikka: LÄYLIÄINEN

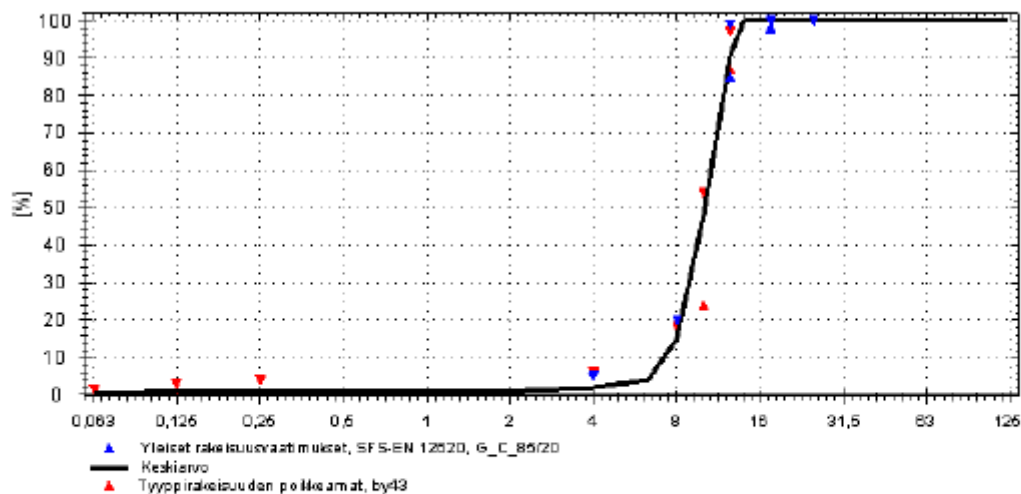
Näytetyyppi: TUOTANTO Pvm: 07.01.2013 - 01.03.2013

1/1

Tekninen nimi: SrM 8/12 LÄYLIÄINEN (8/12 SEPELI BET)

	K.arvo	K.hajonta	Min.	Max.		K.arvo	K.hajonta	Min.	Max.
Hienoainespitoisuus	0.9	0.2	0.5	1.2	Raemuoto	7	1	5	8
Rakaisuus	Hyv. 27/29				H-luku	323.4	8.0	312.0	345.0

Seula [mm]	Läpäisy [%]				Lukumäärä: 29
	K.arvo	K.hajonta	Min.	Max.	
0,063	0,5	0,2	0,2	0,9	
0,125	1	0	0	1	
0,25	1	0	1	2	
0,5	1	0	1	2	
1	1	1	1	2	
2	1	1	1	3	
4	2	1	1	3	
6,3	4	2	1	8	
8	15	7	6	40	
10	48	8	35	65	
12,5	91	3	83	95	
14	100	0	99	100	
16	100	0	100	100	
20	100	0	100	100	
25	100	0	100	100	
31,5	100	0	100	100	
40	100	0	100	100	
63	100	0	100	100	



Rudus

LAATUSELOSTE - Yhteenveto



Toimipiste: ASTRAKAN

Myyntikäyttötarkoitus: BET/VALMISBETONI

Tuotantopaikka: ASTRAKAN

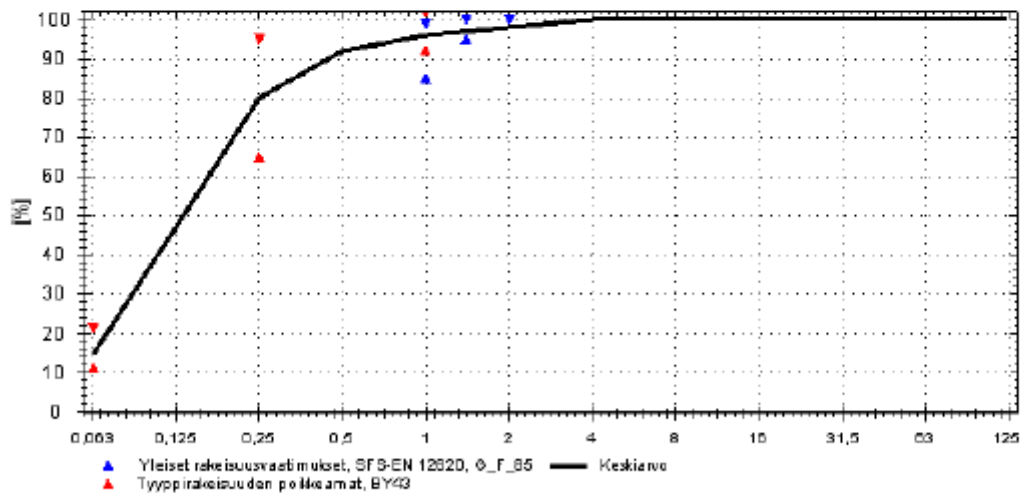
Näytetyyppi: TUOTANTO Pvm: 21.08.2012 - 19.10.2012

1/1

Tekninen nimi: SSR 0/1 ASTRAKAN (FILLERI)

	K.arvo	K.hajonta	Min.	Max.		K.arvo	K.hajonta	Min.	Max.
Natriumhydroksidilike	Hyv. 39/39				Lietekoe	6.1	1.4	4.4	11.7
Rakaisuus	Hyv. 37/39				H-luku	915.3	23.5	868.0	971.0

Seula [mm]	Läpäisy [%]				Lukumäärä: 39
	K.arvo	K.hajonta	Min.	Max.	
0,063	14,8	3,9	7,5	22,7	
0,125	48	9	32	75	
0,25	80	7	65	97	
0,5	92	4	81	99	
1	96	2	89	100	
2	98	1	94	100	
4	100	0	98	100	
5,6	100	0	100	100	
8	100	0	100	100	
11,2	100	0	100	100	
16	100	0	100	100	
22,4	100	0	100	100	
31,5	100	0	100	100	
45	100	0	100	100	
56	100	0	100	100	
63	100	0	100	100	
90	100	0	100	100	
125	100	0	100	100	



Rudus

LAATUSELOSTE - Yhteenveto



Toimipiste: KARHI

Myyntikäyttötarkoitus: LAASTI/MUURAUS

Tuotantopaikka: KARHI

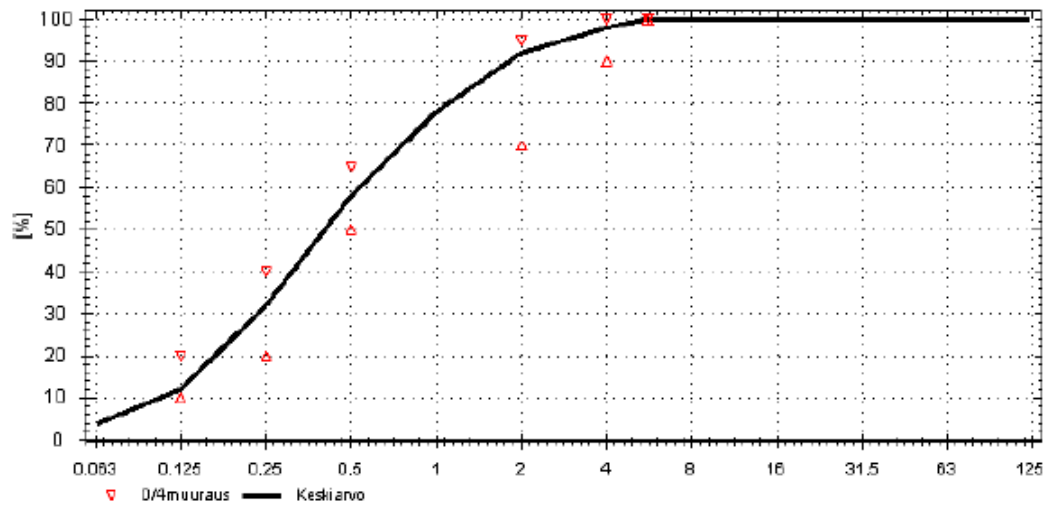
Näytetyyppi: TUOTANTO Pvm: 08.11.2012 - 21.12.2012

1/1

Tekninen nimi: SSr 0/4 KARHI (MUURAUSHIEKKA 0/4)

	K.arvo	K.hajonta	Min.	Max.		K.arvo	K.hajonta	Min.	Max.
Natriumhydroksidikoe	Hyv. 20/20				Lietekoe	3.2	1.0	1.9	5.7
Rakeisuus	Hyv. 18/20								

Seula [mm]	Läpäisy [%]				Lukumäärä: 20
	K.arvo	K.hajonta	Min.	Max.	
0,063	3,7	0,7	2,3	5,0	
0,125	12	2	7	15	
0,25	32	5	22	41	
0,5	58	7	41	67	
1	78	7	62	86	
2	92	3	86	96	
4	98	1	97	100	
5,6	100	0	100	100	
8	100	0	100	100	
11,2	100	0	100	100	
16	100	0	100	100	
22,4	100	0	100	100	
31,5	100	0	100	100	
45	100	0	100	100	
56	100	0	100	100	
63	100	0	100	100	
90	100	0	100	100	
125	100	0	100	100	



Liite 4. Sementtien tuote-esitteet. [Finnsementti 2014]

<h2 style="margin: 0;">Plussementti</h2> <p style="margin: 0;">NORMAALISTI KOVETTUVA PORTLANDSEOSSEMENTTI CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N</p>	<p style="margin: 0;">SEMENTIT</p> <p style="margin: 0;">HEINÄKUU 2013 </p>
--	--

Sementti täyttää standardin SFS-EN 197-1: 2011 vaatimukset ja on CE-merkitty.

EY-vaatimustenmukaisuustodistuksen numero on
 Paraisten Plussementti 0416-CPD-5483
 Lappeenrannan Plussementti 0416-CPD-5482

Sementin ja klinkkerin ominaisuuksien tyypillisiä arvoja:

Sementin ominaisuuksia	Tulokset	Standardin (SFS-EN 197-1) vaatimus
Lujuus 1d	10...14 MPa	ei vaatimusta
Lujuus 2d	21...26 MPa	>= 10 MPa
Lujuus 7d	34...39 MPa	ei vaatimusta
Lujuus 28d	46...52 MPa	>= 42,5 MPa ja <= 62,5 MPa
Sitoutumisajan alku	150...210	>= 60 min
Tilavuuden pysyvyys	0...1,5 mm	ei vaatimusta
Hienous (Blaine)	420...470 m ² /kg	ei vaatimusta
Hehkutushäviö	-	ei vaatimusta
Liukenematon jäännös	-	ei vaatimusta
SO ₃	3,0...3,3 %	<= 3,5 %
Kloridipitoisuus	<= 0,08%	<= 0,10 %
Cr ₆₊	0...2 mg/kg	<= 2 mg/kg


Klinkkerin tyypillinen kemiallinen koostumus	%	Standardin (SFS-EN 197-1) vaatimus
CaO	63...65 %	
SiO ₂	20...22%	
Al ₂ O ₃	4,0...5,4 %	
Fe ₂ O ₃	2,8...3,3 %	
MgO	2,5...3,2 %	
C ₃ A		ei vaatimusta

Sementin sisältämät seosaineet	%	Standardin (SFS-EN 197-1) vaatimus
Yhteensä	21...35 %	>= 21 % ja <= 35 %
Kalkkikivi	6...15 %	
Masuunikuona	15...25%	


FINNSEMENTTI

Finnsementti Oy • 21600 Parainen • Puh. 0201 206 200 • Fax 0201 206 311

www.finnsementti.fi

<h2 style="margin: 0;">Pikasementti</h2> <p style="margin: 0;">Erittäin nopeasti kovettuva portlandsementti</p> <p style="margin: 0;">CEM I 52,5 R</p>	<p style="text-align: center; margin: 0;">Sementit</p> <p style="text-align: center; margin: 0;">HEINÄKUU 2013</p> 
--	--

Sementti täyttää standardin SFS-EN 197-1: 2011 vaatimukset ja on CE-merkitty.

EY-vaatimustenmukaisuustodistuksen numero on

Paraisten Pikasementti	0413-CPD-4676
Lappeenranta Pikasementti	0410-CPD-4078

Sementin ja klinkkerin ominaisuuksien tyyppisiä arvoja:

Sementin ominaisuuksia	Tulokset	Standardin (SFS-EN 197-1) vaatimus
Lujuus 1d	28...32 MPa	ei vaatmusta
Lujuus 2d	41...46 MPa	>= 30,0 MPa
Lujuus 7d	48...60 MPa	ei vaatmusta
Lujuus 28c	57...68 MPa	>= 52,5 MPa
Sitoutumisajan alku	120...180 min	>= 15 min
Tilavuuden pysyvyys	0...2,0 mm	<= 10 mm
Hienous (Blaine)	510...600 m ² /kg	ei vaatmusta
Hehkutushäviö	1,8...3,0 %	<= 5,0 %
Lukenematon jaannos	0,3...0,9 %	<= 5,0 %
SO ₃	3,6...3,0 %	<= 4,0 %
Kloridipitoisuus	<= 0,08%	<= 0,10 %
C-6+	0...2 mg/kg	<= 2 mg/kg

Klinkkerin tyyppinen kemiallinen koostumus	%	Standardin (SFS-EN 197-1) vaatimus
CaO	63...65 %	
SiO ₂	20...22 %	
Al ₂ O ₃	4,0...5,4 %	
Fe ₂ O ₃	2,6...3,3 %	
MgO	2,5...3,2 %	
C3A		ei vaatmusta

Sementin sisältämät seosaineet	%	Standardin (SFS-EN 197-1) vaatimus
Yhteensä	0...5 %	<= 5 %
Kalkkikivi	0...5 %	
Masuunikuona	-	



FINNSEMENTTI

Finnsementti Oy • 21600 Parainen • Puh. 0201 206 200 • Fax 0201 206 311

www.finnsementti.fi

SR-sementti

sulfaatinkestävä sementti

CEM I 42,5 N - SR3

SEMENTIT

HEINÄKUU 2013



Sementti täyttää standardin SFS-EN 197-1: 2011 vaatimukset ja on CE-merkitty.

EY-vaatimustenmukaisuustodistuksen numero on Lappeenrannan SR-sementti 0416-CPD-4679

Sementin ja klinkkerin ominaisuuksien tyypillisiä arvoja:

Sementin ominaisuuksia	Tulokset	Standardin (SFS-EN 197-1) vaatimus
Lujuus 1d	13...16 MPa	ei vaatimusta
Lujuus 2d	26...30 MPa	>= 10 MPa
Lujuus 7d	43...48 MPa	ei vaatimusta
Lujuus 28d	54...59 MPa	>= 42,5 MPa ja <= 62,5 MPa
Sitoutumisajan alku	160...200 min	>= 60 min
Tilavuuden pysyvyys	0...3,5 mm	<= 10 mm
Hienous (Blaine)	380...410 m ² /kg	ei vaatimusta
Hehkutushäviö	1,9...3,6 %	<= 5,0 %
Liukenematon jäännös	0,3...0,6 %	<= 5,0 %
SO ₃	2,5...2,9 %	<= 3,0 %
Kloridipitoisuus	<= 0,08 %	<= 0,10 %
Cr ₆₊	0...2 mg/kg	<= 2 mg/kg

Klinkkerin tyypillinen kemiallinen koostumus	%	Standardin (SFS-EN 197-1) vaatimus
CaO	64...66 %	
SiO ₂	20...22 %	
Al ₂ O ₃	3,1...3,6 %	
Fe ₂ O ₃	3,4...4,5 %	
MgO	2,5...3,5 %	
C ₃ A	<= 3,0 %	<= 3,0 %

Sementin sisältämät seosaineet	%	Standardin (SFS-EN 197-1) vaatimus
Yhteensä	0...5 %	<= 5%
Kalkkikivi	0...5 %	
Masuunikuona	-	





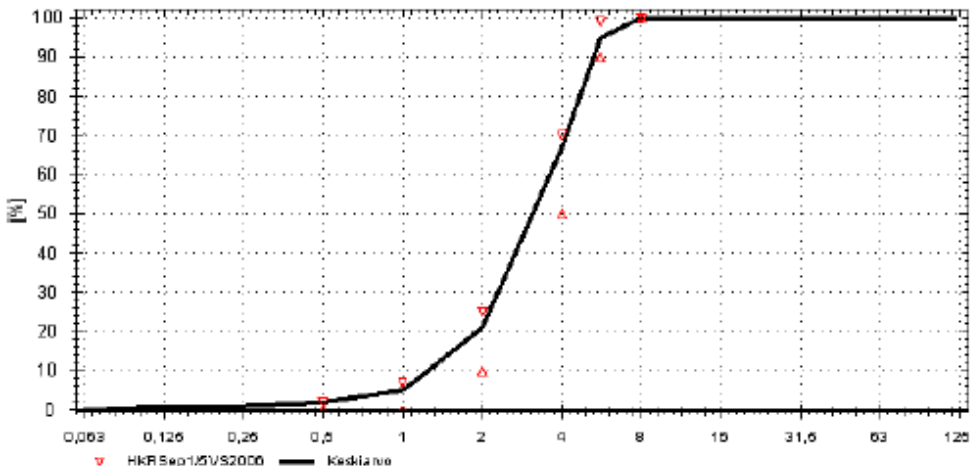
FINNSEMENTTI

Finnsementti Oy • 21600 Parainen • Puh. 0201 206 200 • Fax 0201 206 311

www.finnsementti.fi

Liite 5. Vedenläpäisevyysskoekiden kiviainesten laatuselosteet [Rudus Oy 2012]

		LAATUSELOSTE - Yhteenveto					
Toimipiste:	KARHI	Myyntikäyttötarkoitus:		SIT/YLEIS/HIEKOITUS			
Tuotantopaikka:	KARHI	Näytetyyppi:		TUOTANTO	Pvm: 09.11.2012 - 23.11.2012	1/1	
Tekninen nimi:	SrS 1/5 KARHI (HIEKOITUSSEPELI VESISEULOTTU 1/5)						
Hienoainespitoisuus	K.arvo 0.5	K.hajonta 0.2	Min. 0.3	Max. 0.6	Rakaisuus	K.arvo Hyv. 8/8	Min. Max.
Seula [mm]	Läpäisy [%]				Lukumäärä: 8		
	K.arvo	K.hajonta	Min.	Max.			
0,063	0,2	0,1	0,0	0,4			
0,125	1	0	0	1			
0,25	1	0	0	1			
0,5	2	1	1	2			
1	5	2	1	7			
2	21	5	10	25			
4	67	5	55	70			
5,6	94	2	90	96			
8	100	0	100	100			
11,2	100	0	100	100			
16	100	0	100	100			
22,4	100	0	100	100			
31,5	100	0	100	100			
45	100	0	100	100			
56	100	0	100	100			
63	100	0	100	100			
90	100	0	100	100			
125	100	0	100	100			



▼ HKR Sep12/VS2000 — Keskilämsä

Laborantti: kts. näytteenottoraportti

Näytteenottaja: kts. testausraportti

RUDUS OY

Allekirjoitus:

Aika ja paikka:

Rudus

LAATUSELOSTE Yhteenveto



Toimipiste: MÄNTYMÄKI

Myyntikäyttötarkoitus: SIT/TALO/SALAOJA

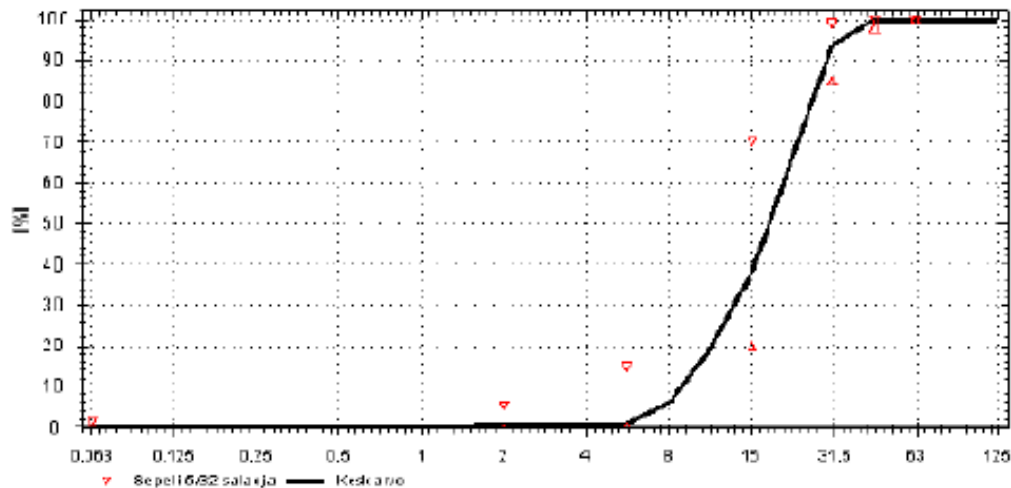
Tuotantopaikka: MÄNTYMÄKI

Näytetyyppi: TUOTANTO Pvm: 31.01.2012 - 08.02.2012

1/1

Tekninen nimi: KaS 5/32 MÄNTYMÄKI (SEPELI 5/32)

Rakeisuus	Karvo	K.hajonta	Min.	Max.	Karvo	K.hajonta	Min.	Max.
	Hyv. 3/3							
Seula [mm]	Läpäisy [%]							
	Karvo	K.hajonta	Min.	Max.	Lukumäärä: 3			
0,090	0,2	0,0	0,2	0,2				
0,125	0	0	0	0				
0,25	0	0	0	1				
0,5	0	0	0	1				
1	1	0	0	1				
2	1	0	1	1				
4	1	0	1	1				
6,0	1	0	1	2				
8	7	1	5	7				
11,2	19	3	17	22				
16	38	4	34	42				
22,4	68	6	62	74				
31,5	94	2	93	97				
45	100	0	100	100				
56	100	0	100	100				
63	100	0	100	100				
80	100	0	100	100				
125	100	0	100	100				



Laborantti: kts. näytteenotto- ja raportti

Näytteenottaja: kts. testausraportti

RUDUS OY

Allekirjoitus:

Aika ja paikka:

Rudus

LAATUSELOSTE - Yhteenveto



Toimipiste: HAARUMÄKI

Myyntikäyttötarkoitus: Raidesepeleli

Tuotantopaikka: HAARUMÄKI

Näytetyyppi: TUOTANTO

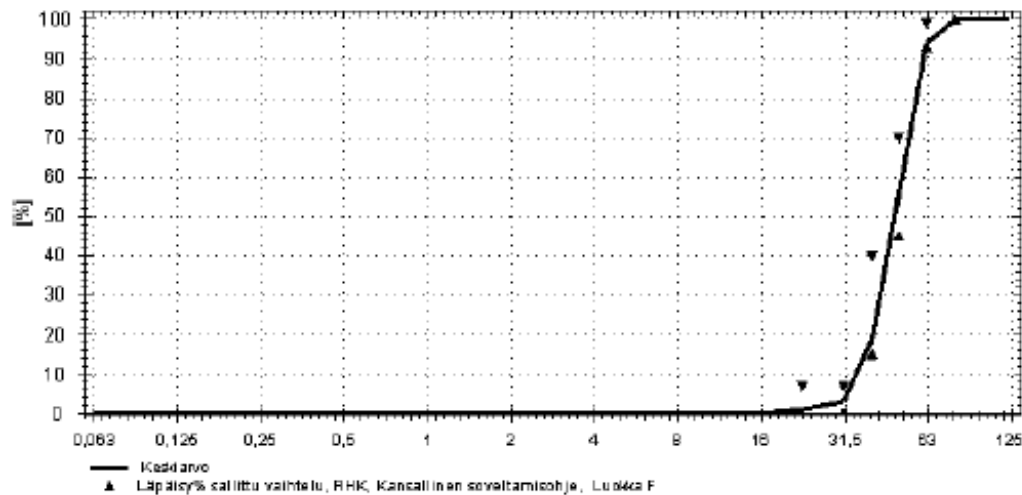
Pvm: 11.07.2013 - 09.08.2013

1/1

Tekninen nimi: KaM 32/63 HAARUMÄKI (32/63 RAIDESEPELI R1/R2)

	K.arvo	K.hajonta	Min.	Max.		K.arvo	K.hajonta	Min.	Max.
Hienoainespitoisuus	0.2	0.1	0.1	0.3	Raemuoto	12	2	9	16
Rakaisuus	Hyv. 20/20								

Seula [mm]	Läpäisy [%]				Lukumäärä: 20
	K.arvo	K.hajonta	Min.	Max.	
0,063	0,0	0,0	0,0	0,1	
0,125	0	0	0	0	
0,25	0	0	0	0	
0,5	0	0	0	0	
1	0	0	0	0	
2	0	0	0	0	
4	0	0	0	0	
5,6	0	0	0	0	
8	0	0	0	0	
11,2	0	0	0	1	
16	0	0	0	1	
22,4	1	1	0	3	
31,5	3	2	1	7	
40	19	4	15	29	
50	56	6	45	70	
63	95	1	93	96	
80	100	0	100	100	



Laborantti: kts. näytteenottoraportti

Näytteenottaja: kts. testausraportti

RUDUS OY

Allekirjoitus:

Aika ja paikka:

Liite 6. Betonimurskeen suoritustasoilmoitus

Rudus

SUORITUSTASOILMOITUS

Nro. 130624-6106-3002

1. Tuotteen tunniste: *Betonimurske M2 0/45, Länsisalmi*
2. Eränumero: *130624-6106-3002*
3. Rakennustuotteen käyttötarkoitus: *Murske kantavaan ja jakavaan kerrokseen*
4. Valmistajan nimi ja osoite: *Rudus Oy, PL 49, 00441 HELSINKI*
6. Rakennustuotteen suoritustason pysyvyyden arviointi ja varmennusjärjestelmä: *Järjestelmä 4*
9. Ilmoitettut suoritustasot

Perusominaisuudet	Suoritustaso	Yhdenmukaistetut tekniset eritelmit
Raekoko	0/45	SFS-EN 13242:2008
Rakeisuusluokka	GA85	
Raemuoto	FI20	
Hienoainespitoisuus	f _r	
Kiintotiheys	2.25 – 2.80 Mg/m ³	
Hiekkaekvivalentti	NPD	
Metyleenisini	NPD	
Iskunkestävyys	NPD	
Uusiokiviaineksen osa-aineiden luokittelu	R _C 80 R _{CUG} 80 R _b 10- X ₁ -	
Happoliukoiset sulfaatit	AS _{NR}	
Kokonaisrikki	S _{NR}	
Vedenimeytyminen	NPD	
Radioaktiivinen säteily	I ₁ < 1	
Muut vaaralliset aineet	NR	
Jäädytys-sulatuskestävyys	NPD	
Sonnenbrand kestävyys	NPD	

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

Valmistajan puolesta allekirjoittanut:



Jani Piiksemä
24.6.2013 Helsinki

Liite 7. Menetelmä A. Jääditys sulatus vedessä. Yksittäisten koe-kappaleiden tulokset

J.-s. kierrosta	RDM _{UPTT} (jääditys-sulatus vedessä)						RDM _{UPTT} (säilytys vedessä)					
	PC3-a/j.-s. vedessä	PC3-b/j.-s. vedessä	PC3-c/j.-s. vedessä	PC3-d/j.-s. vedessä	PC3 j.-s. vedessä keskiarvo (UPTT)	PC3 j.-s. vedessä keski-hajonta	PC3-a/ref vedessä	PC3-b/ref vedessä	PC3-c/ref vedessä	PC3-d/ref vedessä	PC3 vedessä keskiarvo (UPTT)	PC3 vedessä keski-hajonta
0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
7	1,00	1,02	0,83	1,08	0,98	0,11	1,05	1,03	1,16	0,96	1,05	0,08
14	0,83	0,76	0,54	0,60	0,68	0,14	1,09	1,04	1,14	0,95	1,06	0,08
28	0,91	Ei voitu mitata, kappaleet menettivät koossapysyvyytensä					1,05	1,05	1,26	1,00	1,09	0,12
42	0,88						1,12	1,10	1,25	1,10	1,14	0,07
56	0,91						(uusintakäyttöön, j.-s. muovissa)					

J.-s. kierrosta	RDM _{FF} (jääditys-sulatus vedessä)						RDM _{FF} (säilytys vedessä)					
	PC3-a/j.-s. vedessä	PC3-b/j.-s. vedessä	PC3-c/j.-s. vedessä	PC3-d/j.-s. vedessä	PC3 j.-s. vedessä keskiarvo (FF)	PC3 j.-s. vedessä keski-hajonta	PC3-a/ref vedessä	PC3-b/ref vedessä	PC3-c/ref vedessä	PC3-d/ref vedessä	PC3 vedessä keskiarvo (FF)	PC3 vedessä keski-hajonta
0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
7	0,96	0,86	0,78	0,86	0,87	0,07	1,08	1,06	1,06	1,06	1,07	0,01
14	0,91	0,52	0,21	0,66	0,58	0,29	1,07	1,09	1,09	1,10	1,09	0,49
28	0,78	Ei voitu mitata, kappaleet menettivät koossapysyvyytensä					1,10	1,12	1,13	1,11	1,12	0,01
42	0,70						1,13	1,15	1,15	1,15	1,15	0,01
56	0,56						(uusintakäyttöön, j.-s. muovissa)					

J.-s. kierrosta	Massa [g] (jääditys-sulatus vedessä)				Massa [g] (vedessä)			
	PC3-a/j.-s. vedessä	PC3-b/j.-s. vedessä	PC3-c/j.-s. vedessä	PC3-d/j.-s. vedessä	PC3-a/ref vedessä	PC3-b/ref vedessä	PC3-c/ref vedessä	PC3-d/ref vedessä
-3	2513,8	2167,0	2086,0	2137,3	2244,3	2129,1	2260,4	2114,3
0	2560,9	2213,4	2124,9	2180,7	2291,8	2173,5	2301,9	2160,3
7	2573,2	2223,2	2139,5	2187,4	2301,2	2180,5	2311,0	2162,0
14	2575,8	2202,8	2127,3	2190,5	2303,6	2182,7	2312,2	2162,8
28	2576,4	Ei voitu mitata, kappaleet menettivät koossapysyvyytensä			2306,1	2188,3	2320,0	2171,3
42	2550,0				2308,1	2189,5	2320,6	2175,2
56	2550,6				(uusintakäyttöön, j.-s. muovissa)			

J.-s. kierrosta	Suhteellinen massa [-] (jääditys-sulatus vedessä)						Suhteellinen massa [-] (säilytys vedessä)					
	PC3-a/j.-s. vedessä	PC3-b/j.-s. vedessä	PC3-c/j.-s. vedessä	PC3-d/j.-s. vedessä	PC3 j.-s. vedessä keskiarvo	PC3 j.-s. vedessä keski-hajonta	PC3-a/ref vedessä	PC3-b/ref vedessä	PC3-c/ref vedessä	PC3-d/ref vedessä	PC3 vedessä keskiarvo	PC3 vedessä keski-hajonta
-3	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
0	1,0187	1,0214	1,0186	1,0203	1,0198	0,001	1,0212	1,0209	1,0184	1,0218	1,0205	0,0015
7	1,0236	1,0259	1,0256	1,0234	1,0247	0,001	1,0254	1,0241	1,0224	1,0226	1,0236	0,0014
14	1,0247	1,0165	1,0198	1,0249	1,0215	0,004	1,0264	1,0252	1,0229	1,0229	1,0244	0,0017
28	1,02	Ei voitu mitata, kappaleet menettivät koossapysyvyytensä					1,0275	1,0278	1,0264	1,0270	1,0272	0,0006
42	1,01						1,0284	1,0284	1,0266	1,0288	1,0281	0,0010
56	1,01						(uusintakäyttöön, j.-s. muovissa)					

J.-s. kierrosta	RDM _{UPTT} (jäädytys-sulatus vedessä)						RDM _{UPTT} (säilytys vedessä)					
	PC4-a/j.-s. vedessä	PC4-b/j.-s. vedessä	PC4-c/j.-s. vedessä	PC4-d/j.-s. vedessä	PC4 j.-s. vedessä keskiarvo (UPTT)	PC4 j.-s. vedessä keski- hajonta	PC4-a/ref vedessä	PC4-b/ref vedessä	PC4-c/ref vedessä	PC4-d/ref vedessä	PC4 vedessä keskiarvo (UPTT)	PC4 vedessä keski- hajonta
0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
7	0,72	0,68	0,84	0,93	0,79	0,11	1,04	1,06	1,05	1,04	1,05	0,01
14	0,77	0,76	0,66	0,91	0,78	0,10	1,02	1,02	0,99	1,06	1,02	0,03
28	0,57	0,34	0,33	0,67	0,48	0,17	1,05	1,02	1,04	1,07	1,05	0,02
42				0,40			1,01	1,07	1,04	1,06	1,05	0,03
56							1,04	1,12	1,01	1,05	1,06	0,05

J.-s. kierrosta	RDM _{FF} (jäädytys-sulatus vedessä)						RDM _{FF} (säilytys vedessä)					
	PC4-a/j.-s. vedessä	PC4-b/j.-s. vedessä	PC4-c/j.-s. vedessä	PC4-d/j.-s. vedessä	PC4 j.-s. vedessä keskiarvo (FF)	PC4 j.-s. vedessä keski- hajonta	PC4-a/ref vedessä	PC4-b/ref vedessä	PC4-c/ref vedessä	PC4-d/ref vedessä	PC4 vedessä keskiarvo (FF)	PC4 vedessä keski- hajonta
0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
7	0,78	0,72	0,70	0,84	0,76	0,06	1,02	1,01	1,02	1,02	1,02	0,01
14	0,84	0,59	0,49	0,70	0,66	0,15	1,04	1,03	1,05	1,03	1,04	0,01
28	0,22	0,1	0,13	0,39	0,21	0,13	1,05	1,05	1,08	1,05	1,06	0,02
42				0,04			1,06	1,05	1,09	1,06	1,07	0,02
56							1,08	1,07	1,11	1,07	1,08	0,02

J.-s. kierrosta	Massa [g] (jäädytys-sulatus vedessä)				Massa [g] (vedessä)			
	PC4-a/j.-s. vedessä	PC4-b/j.-s. vedessä	PC4-c/j.-s. vedessä	PC4-d/j.-s. vedessä	PC4-a/ref vedessä	PC4-b/ref vedessä	PC4-c/ref vedessä	PC4-d/ref vedessä
-3	2097,4	2122,0	2079,5	2169,9	2093,3	2113,8	2178,7	2160,3
0	2115,1	2134,7	2088,3	2183,3	2111,7	2128,3	2195,5	2176,6
7	2107,0	2127,4	2084,8	2176,5	2117,0	2133,7	2204,9	2182,3
14	2110,2	2126,7	2088,4	2181,8	2110,4	2126,3	2199,3	2176,3
28	2108,0	2126,80	2078,50	2188,90	2113,8	2128,5	2205,2	2179,3
42			1873,90	2189,30	2132,5	2146,8	2220,5	2191,3
56				1462,50	2128,9	2145,6	2220,1	2194,4

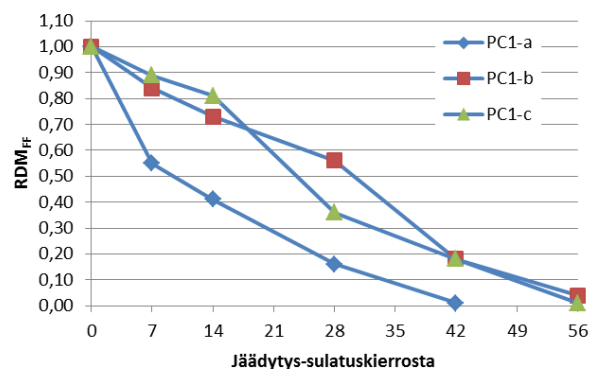
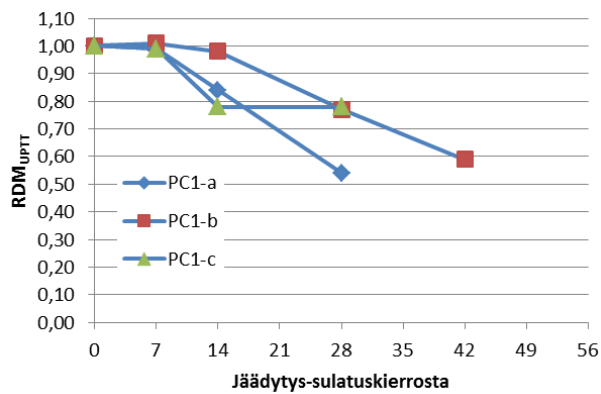
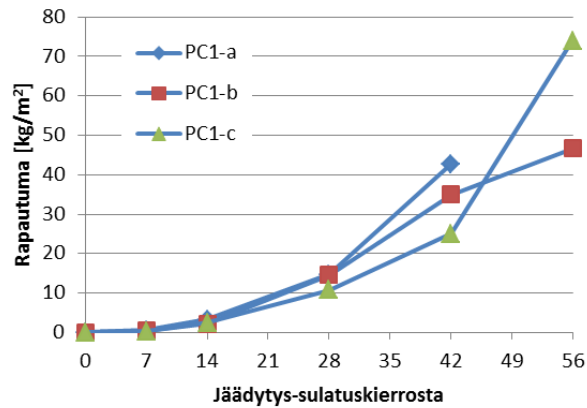
J.-s. kierrosta	Suhteellinen massa [-] (jäädytys-sulatus vedessä)						Suhteellinen massa [-] (vedessä)					
	PC4-a/j.-s. vedessä	PC4-b/j.-s. vedessä	PC4-c/j.-s. vedessä	PC4-d/j.-s. vedessä	PC4 j.-s. vedessä keskiarvo	PC4 j.-s. vedessä keski- hajonta	PC4-a/ref vedessä	PC4-b/ref vedessä	PC4-c/ref vedessä	PC4-d/ref vedessä	PC4 vedessä keskiarvo	PC4 vedessä keski- hajonta
-3	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
0	1,0084	1,0060	1,0042	1,0062	1,0062	0,002	1,0088	1,0069	1,0077	1,0075	1,0077	0,0008
7	1,0046	1,0025	1,0025	1,0030	1,0032	0,001	1,0113	1,0094	1,0120	1,0102	1,0107	0,0012
14	1,0061	1,0022	1,0043	1,0055	1,0045	0,002	1,0082	1,0059	1,0095	1,0074	1,0077	0,0015
28	1,01	1,0023	0,9995	1,0088	1,0039	0,004	1,0098	1,0070	1,0122	1,0088	1,0094	0,0022
42			0,9011	1,0089			1,0187	1,0156	1,0192	1,0143	1,0170	0,0024
56				0,6740			1,0170	1,0150	1,0190	1,0158	1,0167	0,0017

Liite 8. Menetelmä B. Pakkas-suolakoe. Yksittäisten koekappaleiden tulokset

J.-s. kierrosta	Rapautuma [kg/m ²]			PC1 keskiarvo	PC1 keski- hajonta
	PC1-a	PC1-b	PC1-c		
0	0	0	0	0	0
7	0,541	0,458	0,360	0,453	0,091
14	3,321	2,236	2,423	2,660	0,580
28	14,662	14,574	10,744	13,327	2,237
42	42,771	34,934	25,028	34,244	8,892
56		46,643	73,922		

J.-s. kierrosta	RDM _{UPPT} (pakkas-suolakoe) PC1				
	PC1-a	PC1-b	PC1-c	PC1 keskiarvo	PC1 keski- hajonta
0	1	1	1	1	0
7	0,99	1,01	0,99	1,00	0,01
14	0,84	0,98	0,78	0,87	0,10
28	0,54	0,77	0,78	0,70	0,14
42		0,59			
56					

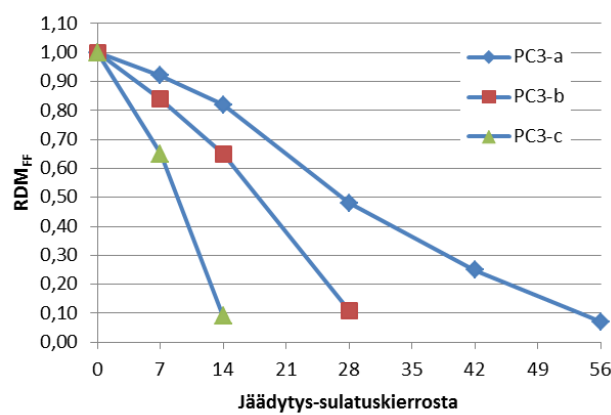
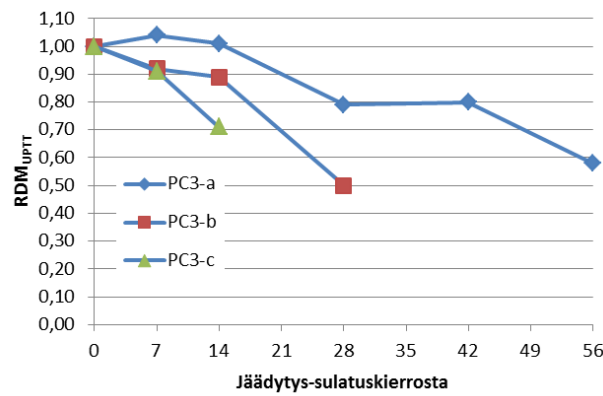
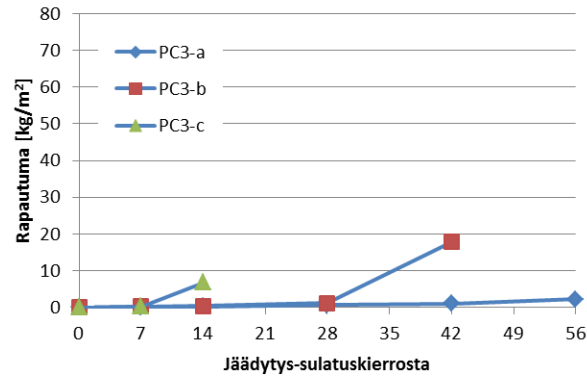
J.-s. kierrosta	RDM _{FF} (pakkas-suolakoe) PC1				
	PC1-a	PC1-b	PC1-c	PC1 keskiarvo	PC1 keski- hajonta
0	1	1	1	1	0
7	0,55	0,84	0,89	0,76	0,18
14	0,41	0,73	0,81	0,65	0,21
28	0,16	0,56	0,36	0,36	0,20
42	0,01	0,18	0,18	0,10	0,10
56		0,04	0,01		



Rapautuma [kg/m ²]						
J.-s. kierrosta	PC3-a	PC3-b	PC3-c	PC3 keskiarvo	PC3 keskihajonta	
0	0	0	0	0	0	0
7	0,107	0,196	0,274	0,192	0,084	
14	0,268	0,418	6,787	2,491	3,721	
28	0,701	1,183				
42	1,054	17,783				
56	2,265					

RDM _{UPPT} (pakkas-suolakoe) PC3						
J.-s. kierrosta	PC3-a	PC3-b	PC3-c	PC3 keskiarvo	PC3 keskihajonta	
0	1	1	1	1	0	
7	1,040	0,920	0,910	0,957	0,072	
14	1,010	0,890	0,710	0,870	0,151	
28	0,790	0,500				
42	0,800					
56	0,580					

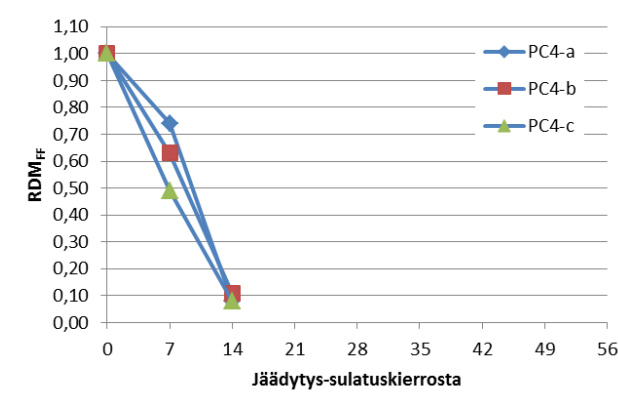
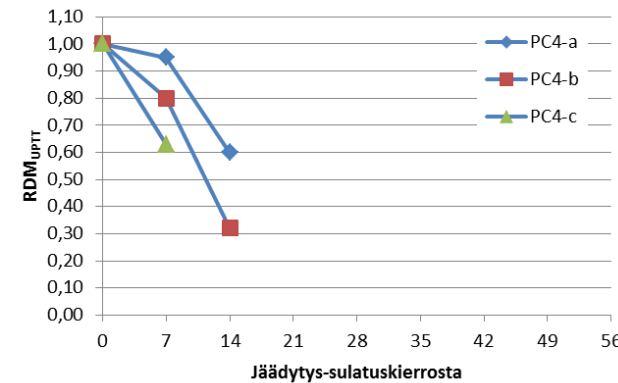
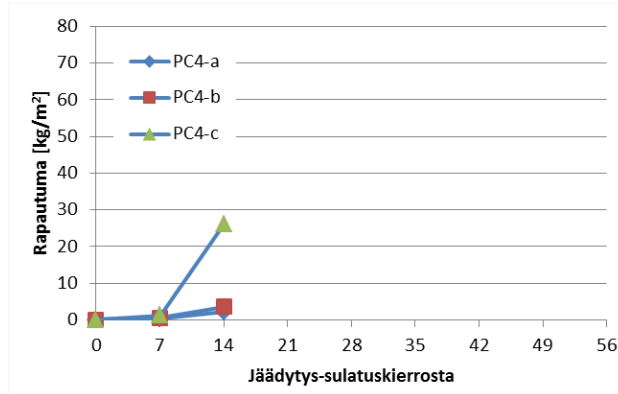
RDM _{FF} (pakkas-suolakoe) PC3						
J.-s. kierrosta	PC3-a	PC3-b	PC3-c	PC3 keskiarvo	PC3 keskihajonta	
0	1	1	1	1	0	
7	0,920	0,840	0,650	0,803	0,139	
14	0,820	0,650	0,090	0,520	0,382	
28	0,480	0,110				
42	0,250					
56	0,070					



Rapautuma [kg/m ²]					
J.-s. kierrosta	PC4-a	PC4-b	PC4-c	PC4 keskiarvo	PC4 keskihajonta
0	0	0	0	0	0
7	0,384	0,627	1,255	0,755	0,449
14	2,175	3,645	26,000	10,607	13,351
28		>10			
42					
56					

RDM _{UPTT} (pakkas-suolakoe) PC4					
J.-s. kierrosta	PC4-a	PC4-b	PC4-c	PC4 keskiarvo	PC4 keskihajonta
0	1	1	1	1	0
7	0,950	0,800	0,630	0,793	0,160
14	0,600	0,320		0,460	0,198
28					
42					
56					

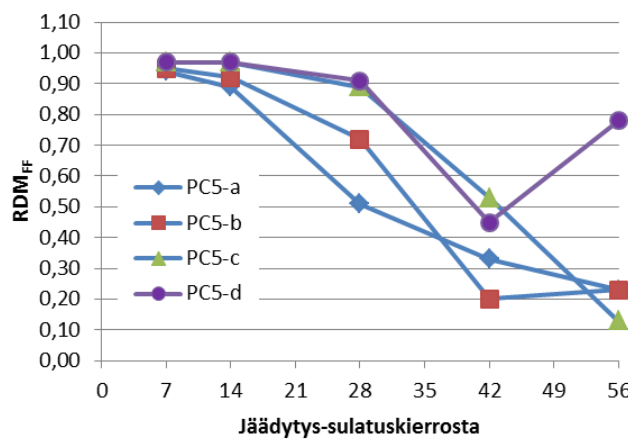
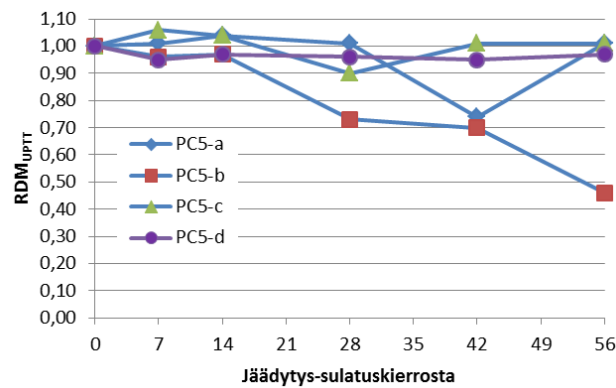
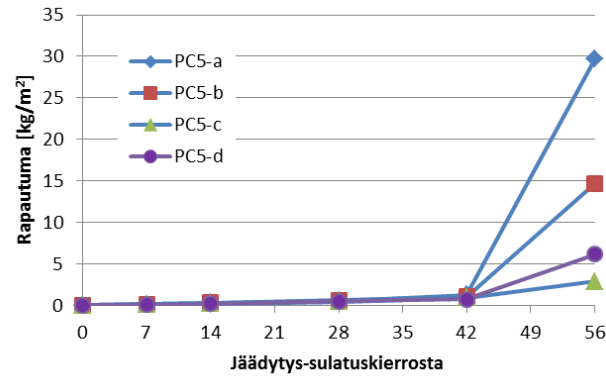
RDM _{FF} (pakkas-suolakoe) PC4					
J.-s. kierrosta	PC4-a	PC4-b	PC4-c	PC4 ka.	PC4 stdev
0	1	1	1	1	0
7	0,740	0,630	0,490	0,620	0,125
14	0,080	0,110	0,080	0,090	0,017
28					
42					
56					



J.-s. kierrosta	Rapautuma [kg/m ²]				PC5 keskiarvo	PC5 keski- hajonta
	PC5-a	PC5-b	PC5-c	PC5-d		
0	0	0	0	0	1	0
7	0,128	0,132	0,069	0,069	0,100	0,035
14	0,301	0,295	0,198	0,206	0,250	0,056
28	0,561	0,590	0,443	0,499	0,523	0,066
42	1,256	1,006	0,901	0,733	0,974	0,219
56	29,736	14,685	2,868	6,178	13,367	11,994

J.-s. kierrosta	RDM _{upTT} (pakkas-suolakoe) PC5					PC5 keskiarvo	PC5 keski- hajonta
	PC5-a	PC5-b	PC5-c	PC5-d			
0	1	1	1	1	1	0	
7	1,01	0,96	1,06	0,95	1,00	0,05	
14	1,04	0,97	1,04	0,97	1,01	0,04	
28	1,01	0,73	0,90	0,96	0,90	0,12	
42	0,74	0,70	1,01	0,95	0,85	0,15	
56	1,01	0,46	1,01	0,97	0,86	0,27	

J.-s. kierrosta	RDM _{FF} (pakkas-suolakoe) PC5					PC5 keskiarvo	PC5 keski- hajonta
	PC5-a	PC5-b	PC5-c	PC5-d			
1	1	1	1	1	1,00	0,00	
7,00	0,94	0,95	0,97	0,97	0,96	0,02	
14,00	0,89	0,92	0,97	0,97	0,94	0,04	
28,00	0,51	0,72	0,89	0,91	0,76	0,19	
42,00	0,33	0,20	0,53	0,45	0,38	0,14	
56,00	0,23	0,23	0,13	0,78	0,34	0,30	



Liite 9. Menetelmä C. Jäädytys-sulatus muovissa (50 d vesi-imeytyksen jälkeen)

Yksittäisten koekappaleiden tulokset

RDM _{UPTT} (jäädytys-sulatus muovissa)						
J.-s. kierrosta	PC3-a/j.-s. muovissa	PC3-b/j.-s. muovissa	PC3-c/j.-s. muovissa	PC3-d/j.-s. muovissa	PC3/j.-s. muovissa keskiarvo (UPTT)	PC3/j.-s. muovissa keski-hajonta
0	1	1	1	1	1	0
7	0,92	0,78	0,96	0,98	0,91	0,09
14	0,94	1,02	1,02	1,01	1,00	0,04
28	0,97	0,83	1,03	0,98	0,95	0,09
42	0,92	0,85	1,00	0,84	0,90	0,07
56	0,98	0,77	1,04	0,84	0,91	0,12

RDM _{FF} (jäädytys-sulatus muovissa)						
J.-s. kierrosta	PC3-a/j.-s. muovissa	PC3-b/j.-s. muovissa	PC3-c/j.-s. muovissa	PC3-d/j.-s. muovissa	PC3/j.-s. muovissa keskiarvo (FF)	PC3/j.-s. muovissa keski-hajonta
0	1	1	1	1	1	0
7	0,92	0,90	0,91	0,90	0,91	0,01
14	0,92	0,90	0,91	0,90	0,91	0,01
28	0,91	0,87	0,88	0,87	0,88	0,02
42	0,90	0,85	0,87	0,87	0,87	0,02
56	0,90	0,84	0,85	0,84	0,86	0,03

Massa [g] (jäädytys-sulatus muovissa)				
J.-s. kierrosta	PC3-a/j.-s. muovissa	PC3-b/j.-s. muovissa	PC3-c/j.-s. muovissa	PC3-d/j.-s. muovissa
-3	2244,3	2129,1	2260,4	2114,3
0	2295,0	2180,2	2310,7	2164,2
7	2292,8	2172,1	2303,9	2158,6
14	2284,6	2170,5	2305,8	2155,8
28	2285,9	2176,3	2303,2	2155,6
42	2281,2	2176,5	2302,5	2157,8
56	2279,9	2175,9	2304,1	2162,8

Suhteellinen massa [-] (jäädytys-sulatus muovissa)						
J.-s. kierrosta	PC3-a/j.-s. muovissa	PC3-b/j.-s. muovissa	PC3-c/j.-s. muovissa	PC3-d/j.-s. muovissa	PC3/j.-s. muovissa keskiarvo	PC3/j.-s. muovissa keski-hajonta
-3	1	1	1	1	1	0
0	1,0226	1,0240	1,0223	1,0236	1,0231	0,0008
7	1,0216	1,0202	1,0192	1,0210	1,0205	0,0010
14	1,0180	1,0194	1,0201	1,0196	1,0193	0,0009
28	1,0185	1,0222	1,0189	1,0195	1,0198	0,0016
42	1,0164	1,0223	1,0186	1,0206	1,0195	0,0025
56	1,0159	1,0220	1,0193	1,0229	1,0200	0,0032

