

VKU-KUONABETONIN PAKKASRASITUSKOKEET

Tuukka Kuru

Opinnäytetyö

Kone- ja tuotantotekniikka

Tuotantotekniikan koulutusohjelma

Insinööri AMK

VUOSI 2018

Tekniikan ala
Kone -ja tuotantotekniikka
Insinööri

Tekijä	Tuukka Kuru	Vuosi	2018
Ohjaaja(t)	FM Jouko Karinen		
Toimeksiantaja	Tapojärvi Oy		
Työn nimi	VKU-kuonabetonin pakkasrasituskokeet		
Sivu- ja liitesivumäärä	63 + 3		

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin valokaariuunin sivutuotteena muodostuvan kuonan käyttöä betonin raaka-aineena ja erityisesti kyseisten kuonabetonilaatujen pakkaskestävyyttä. Tutkittavat betonilaadut pohjautuvat Tapojärvi Oy:n omiin kuonabetoniresepteihin, jonka lisäksi tutkimuksessa on mukana yksi markkinoilla jo valmiiksi esiintyvä betonilaatu.

Kyseiset testikappaleet testattiin Rovaniemen Arctic Powerin tiloissa standardin CEN/TS 12390-9 mukaisessa pakkasrapautumakokeessa. Testin perusteella havaittiin, että VKU-pohjaisista betonilaaduista pintakäsittelemätön laatu kesti kaikista huonoimmin siihen kohdistuvaa pakkasrasitusta, silikapohjainen kuonabetonilaatu taas selvästi parhaiten. Tuloksista oli pääteltävissä, että kuonabetonien lisäaineilla ja pintakäsittelyillä on suuri vaikutus niiden pakkaskestävyyteen.

Kuonabetoneilla voidaan vähentää luonnonkiven käyttöä, sillä ne käyttävät runkoaineena luonnonkiven sijasta teollisuuden sivutuotteena muodostuvaa kuonaa. Jotta kyseisiä kuonalaatuja voitaisiin käyttää luonnonkivipohjaisten betonien korvaajina, niiden tulee kestää luonnonolosuhteiden aiheuttamia rasituksia. Tehtyjen testien perusteella on todettavissa, että kuonabetonilaadut voivat kestää pakkasrasitusta luonnonkivipohjaisia betonilaatuja paremmin ja toimia tältä osin niiden uskottavina korvaajina.

Avainsanat

Tapojärvi, kuonabetoni, pakkasrapautuma

Technology, Communication and Transport
Mechanical and Production Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Tuukka Kuru	Year	2018
Supervisor	Jouko Karinen, MSc		
Commissioned by	Tapojärvi Oy		
Subject of thesis	Frost resistance experiments on electric arc furnace slag concretes		
Number of pages	63 + 3		

This thesis studies the usage of electric arc furnace slag as raw material for concrete and especially the frost resistance of such slag concretes. The concrete types researched are based on Tapojärvi Oy's slag concrete recipes. The study also includes one slag concrete type that is already available on the market.

A frost degradation test according to CEN/TS 12390-9 standard was performed on the slag concrete types in Arctic Power's temperature room in Rovaniemi. The test results showed that the concretes based on slag from an electric arc furnace that did not have a finish layer were the least durable against frost degradation. Silica-based slag concrete was the most durable. Based on these results, it can be deduced that additives and finish have a large effect on the frost resistance of slag concretes.

Slag concretes can be used as a substitute for natural stone, for they use industrial side products as an aggregate instead of natural stone. To utilize slag as a replacement for natural stone, they must be able to endure the strain of different weather conditions.

Based on the experiments made for this thesis, it can be stated that slag concretes can withstand sub-zero conditions better than concrete made from natural stone and thus can act as a credible replacement.

Key words: Tapojärvi, slag concrete, frost degradation

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	YHTEISTYÖYRITYKSET	9
2.1	Tapojärvi Oy	9
2.2	Outokumpu Oyj.....	10
2.3	Arctic Power.....	11
3	TORNION FERROKROMITEHTAAN JA TERÄSSULATON TUOTANTOPROSESSI.....	13
3.1	Ferrokromitehdas.....	14
3.2	Tornion terästehtaan valokaariuuni.....	14
3.3	Terässulaton myöhemmät työvaiheet	16
4	BETONI	17
4.1	Betonin ominaisuudet	18
4.2	Seos- ja lisäaineet	21
5	KUONABETONI.....	23
6	PAKKASRAPAUTUMA.....	25
6.1	Standardi CEN/TS 12390-9	26
6.2	Laattatesti	27
6.3	Kuutiotesti.....	31
7	TESTATTAVAT BETONILAADUT	36
7.1	S-100.....	36
7.2	VKU-kuonapohjainen betoni	37
7.3	Impregnoitu VKU-betonilaatu.....	38
7.4	Silika	39
8	PAKKASRAPAUTUMAKOKEET	41
8.1	Pakkasrapautumakokeen alkuvalmistelu	41
8.2	Mittaukset	46
8.3	Huomioita mittausten aikana.....	49
9	MITTAUSTEN TULOKSET	51
9.1	Silika	51

9.2	Käsitlemätön OB.....	52
9.3	Impregnoitu OB	54
9.4	S-100	55
9.5	Kajaanin mittaustulokset.....	56
10	TULOSTEN YHTEENVETO.....	57
11	JATKOKEHITTELY JA TUOTTEISTAMINEN.....	59
	LÄHTEET.....	62
	LIITTEET	64

ALKUSANAT

Haluan kiittää vanhempiani, jotka tuellaan ja läsnäolollaan mahdollistivat tämän opinnäytetyön valmistumisen. Haluan myös kiittää toimeksiantajaani mielenkiintoisesta aiheesta ja työtä ohjannutta Jouko Karista, jota ilman työ olisi ollut mahdotonta toteuttaa.

31.1.2018

Tuukka Kuru, Rovaniemi

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön toimeksianto tuli Tapojärvi Oy:ltä, ja sen tarkoitus on selvittää yrityksen kehittämien VKU-betonilaatujen kestävyyttä pakkausrapautumakokeen muodostamissa olosuhteissa. Yrityksen toiminta Outokummun terästehtaalla keskittyy erityisesti terässulaton eri työvaiheiden muodostaman kuonan käsittelyyn ja kyseisen kuonan jatkojalostukseen.

Toimeksiannon tehtävänä oli selvittää Outokummun terästehtaan valokaariuunien muodostaman kuonan toimivuutta eri betonilaatujen runkoaineena ja näiden betonilaatujen myöhempiä tuotteistamismahdollisuuksia. VKU-kuonan käyttäminen betonien runkoaineena vähentää luonnonkivipohjaisten runkoaineiden käyttöä.

Riikka Salmela on opinnäytetyössään (2017) käsitellyt kyseisten betonilaatujen kovuusmittauksia, siinä missä tämä opinnäytetyö käsittelee kyseisten laatujen pakkausrapautumaa. Pakkausrapautuma tarkoittaa betonin pinnan taipumusta hilseillä kosteuden ja jäätyksen seurauksena, mikä heikentää betonin käyttökelpoisuutta kosteissa ja suurissa lämpötilaeroja sisältävissä olosuhteissa.

Tapojärvi Oy tekee tällä hetkellä yhteistyötä Lapin yliopiston teollisten muotoilijoiden kanssa VKU-betonilaatujen tulevasta tuotteistamisesta. Yksi mahdollisista käyttökohteista on moottoriteiden varrelle pystytettävät meluvallit, jotka ehkäisevät moottoriliikenteen aiheuttamaa melua. Jotta Tapojärven kehittämiä betonilaa- tuja voitaisiin soveltaa ulkoilmassa esiintyvissä rakenteissa, niiden tulee omata tarpeeksi korkea pakkaskestävyys.

Pakkausrapautumaa mitataan standardoiduilla testeillä, jotka mallintavat sulamisen ja jäätyksen kaltaista sykliä 56 päivän ajan, minkä aikana betonilaaduista irtoava rapautuma punnitaan ja verrataan sen määrää aiemmin betonilaaduille määriteltyihin laatuvaatimuksiin. Kyseinen tutkimus suoritetaan tämän opinnäytetyön osalta kahdessa eri muodossa, joissa testistandardin CEN/TS 12390-9 mukainen laattatesti suoritetaan Arctic Powerin tiloissa Rovaniemellä ja vaihtoehtoinen kuutiotesti Kajaanin ammattikorkeakoulun betonilaboratoriossa.

Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää VKU-pohjaisten betonilaatujen kykyä kestää testiolosuhteiden aiheuttamia rasituksia ja verrata näitä saatuja arvoja markkinoilla jo valmiiksi esiintyviin luonnonkivipohjaisiin betonilaatuihin. Saaduilla mittaustuloksilla voidaan selvittää mm. sitä, voiko Tapojärven kuonapohjaisesti betonilaaduista kehittää luonnonkivipohjaisten betonilaatujen korvaajia ulkoilmarakentamisessa.

2 YHTEISTYÖYRITYKSET

2.1 Tapojärvi Oy

Tapojärvi Oy on suomalainen kaivosalan ja teollisuuden monitoimiyhtiö, jonka alaisuudessa palvelee tällä hetkellä noin 450 työntekijää. Tapojärvi perustettiin Esko Tapojärven toimesta vuonna 1955, jolloin se toimi vielä kuljetusalan yrityksenä. Yrityksen ensimmäinen laajentuminen kaivosteollisuuteen tapahtui vuonna 1972, jolloin Tapojärven kuljetuskalustoa tarvittiin Kolarissa sijainneen Rautuvaaran rautakaivoksen tarpeisiin. Vuonna 1995 yritys muutettiin osakeyhtiöksi ja vuonna 2000 yhtiön nimi muutettiin aiemmasta Maansiirtoliike Tapojärvestä nykyiseksi Tapojärvi Oy:ksi. (Tapojärvi 2017.)

Vuodesta 1988 lähtien Tapojärvi on toiminut Torniossa sijaitsevan Outokummun terästehtaan urakoitsijana. Outokummulle yritys tarjoaa lukuisia eri palveluita, joihin lukeutuvat esimerkiksi jaloteräs- ja ferrokromikuonan rikastus, kierrätettyjen eristystiilien murskaaminen ja jauhatus, tulenkestävien massojen valmistus, etuja jälkimurskaus, autogeenimurskaus, mobiiliseulonta, okto-tuotteiden lastaus ja purkaminen sekä kierrätysteräksen kuljetus. Tapojärvi käsittelee nykyään useita Tornion terästehtaan tuotannossa muodostuvia kuonalaatuja, etsien niille uusia käyttökohteita. (Tapojärvi 2017.)

Vuonna 2010 valmistunut rikastamo on mahdollistanut terästuotannossa muodostuvan kuonan tehokkaan erottelun ja kuonassa esiintyvien arvokkaiden raaka-aineiden, kuten kromin ja nikkelin, palauttamista osaksi terästehtaan tuotantoprosessia. Jäljelle jäävä kuona-ainetta käytetään erityisesti maanrakennuksessa, jossa kyseisen kuonamateriaalin käyttö vähentää tarvetta luonnonkivipohjaisten tuotteiden käytölle. Rikastamo (Kuva 1) sovelletaan tällä hetkellä niin ferrokromitehtaan kuin terässulaton tuottaman kuonan prosessointiin. Rikastamon avulla yritys vähentää vuosittain noin 500 000 tonnin edestä loppusijoitettavaa jätettä. (Tapojärvi 2017.)



Kuva 1 Tapojärven rikastuslaitos Torniossa (Tapojärvi 2017)

2.2 Outokumpu Oyj

Outokumpu on kansainvälinen ruostumattomaan teräksen tuotantoon erikoistunut yhtiö, jonka alaisuudessa työskentelee 10 977 henkilöä 30 valtiossa. Yhtiön liikevaihto oli vuonna 2016 5,96 miljardia euroa. Outokummun maailmanlaajuinen tuotantokapasiteetti oli vuonna 2016 3,1 miljoonaa tonnia raakaterästä, josta Tornion terästehtaan osuus oli noin puolet. Outokumpu on tällä hetkellä yksi maailman suurimmista ruostumattomaan teräkseen erikoistuneista teräsyhtiöistä. (Outokumpu 2017)

Outokummun tarina sai alkunsa vuonna 1910, kun Kuusjärveltä löydettiin suuri kupariesiintymä. Kuparintuotantoon erikoistunut yritys nousi 1930-luvulla yhdeksi Euroopan suurimmista kuparintuottajista. Samoihin aikoihin Outokummusta tehtiin osakeyhtiö, jonka suurin yksittäinen omistaja oli Suomen valtio. Seuraavina vuosikymmeninä yhtiö laajensi toimintaansa myös muihin metalleihin, kuten nikkelin ja kromin tuotantoon. Kyseiset raaka-aineet ovat ruostumattoman teräksen tuotannon osalta välttämättömiä. (Outokumpu 2017)

Vuonna 1976 Tornion tehtaalla sulatettiin ensimmäinen erä terästä. Perustamishetkellään tehdas oli maailman ainoa teräksen tuotantolaitos, joka kykeni hyödyntämään omaa kromikaivosta ja tuottamaan itse tarvitsemansa ferrokromin. Tuotannon alkamista seuraavina vuosina tehtaan tuotantokapasiteetti oli 50 000 tonnia terästä, mutta tuotantovolyymi kasvoi nopeasti. (Outokumpu 2017)

Nykyään Torniossa sijaitseva terästehdas on maailman integroiduin ruostumattoman teräksen tuotantolaitos. Austeniittisiin ja ferriittisiin teräslaatuihin keskittyvä tehdas työllistää noin 2150 työntekijää, jonka lisäksi sen alaisuudessa työskentelee päivittäin noin 300 urakoitsijayritysten ja muiden yhteistyökumppaneiden työntekijöitä. (Outokumpu 2017)

2.3 Arctic Power

Opinnäytetyössä käytettyjen betonilaatujen laattatesti suoritettiin Lapin ammattikorkeakoulu Oy:n alaisuudessa toimivan Arctic Powerin tiloissa. Arctic Powerin tarina sai alkunsa vuonna 1998, kun Rovaniemen ammattikorkeakoulu toteutti useita rakenteiden ja materiaalien pakkaskestävyyteen liittyviä kokeita. Ajatus itsenäisestä testiyksiköstä konkretisoitui vuonna 2003, jolloin testilaboratorio ja testausalue valmistuivat. Rovaniemen ammattikorkeakoulun lisäksi laboratorion palveluita hyödyntää nykyinen BRP Finland, joka on käyttänyt Arctic Powerin testitiloja lukuisissa moottorikelkkoihin liittyvissä projekteissa. (Arctic Power 2016.)

Moottorikelkkojen lisäksi laboratorio alkoi laajentamaan toimintaansa erityisesti pohjoisen infrastruktuuriin ja rakenteiden kylmäkestävyyteen, minkä ansiosta sen asiakaskunta laajentui moottorikelkkarakentamisen ulkopuolelle. Vuodesta 2012 eteenpäin Arctic Powerin toiminta on laajentunut yksittäisestä laboratoriosta kylmätestauspalveluiden keskittymäksi, jonka pohjoinen sijainti ja laaja palvelutarjonta on mahdollistanut laajan joukon erilaisia asiakkaita. (Arctic Power 2016)

Arctic Powerin palveluihin sisältyy myös olosuhdehuone (Kuva 2), jonka lämpötilaa ja ilmankosteutta voidaan kontrolloida standardin CEN/TS 12390-9:n vaatimalla tavalla. Olosuhdehuoneen koko 2*2,3*4 m ja sen lämpötila-alue on mahdollista säätää +70 ja -50 celsiusasteen välille. (Arctic Power 2016)



Kuva 2 Testikappaleet olosuhdekammiossa

Olosuhdekammion lämpökäyrää ohjataan erillisellä tietokoneohjelmalla, joka kykenee aikamääreiden ja lämpötilojen raja-arvojen ollessa selvillä ylläpitämään itsenäisesti standardin vaatimaa lämpötilavaihtelua. Olosuhdekammion tarkoituksena on simuloida ulkoilmassa esiintyviä ääriolosuhteita, jonka vuoksi sen lämpöalue on laaja.

3 TORNION FERROKROMITEHTAAN JA TERÄSSULATON TUOTANTOPROSESSI

Outokummun Tornion terästehtas on erikoistunut ruostumattomien teräslaatuja valmistukseen, ja se on tuotantokapasiteetiltaan yksi maailman suurimpia keskittettyjä ruostumattoman teräksen tuotantolaitoksia. Ruostumattomaksi teräkseksi kutsutaan sen kaltaisia teräslaatuja, joiden sisältämä korkea kromipitoisuus (>10 %) ehkäisee niiden altistumista ilman ja kosteuden aiheuttamalle korroosiolle. Austeniittisten kromiteräslaatuja tärkeimmät yksittäiset raaka-aineet ovat rauta, kromi ja nikkeli.

Tornion terästehtaan tuotantoprosessi alkaa Kemissä sijaitsevasta Elijärven kromikaivoksesta, jossa tuotetaan Tornion terästehtaan tarvitsema kromi. Tämän jälkeen tuotantoprosessi jatkuu Torniossa, jossa sijaitsevat ferrokromitehtas, terässulatto, kuumavalssaamo ja kylmävalssaamo. Tuotantoprosessi kantaa koko valmiin tuotteen elinkaaren ajan, sillä prosessi sisältää niin tuotannossa käytettävän kromin louhimisen, teräsainesten jalostamisen, kuin myös lopullisen tuotteen valmistuksen. Lopullinen tuote on vähähiilinen, rakenteeltaan luja ja hyvän korroosionkestävyyden omaava teräsnauha (Kuva 3).



Kuva 3 Outokummun Tornion tehtaan tuotantoprosessin valmis tuote, teräsnauharulla (Lapin Kansa 2016)

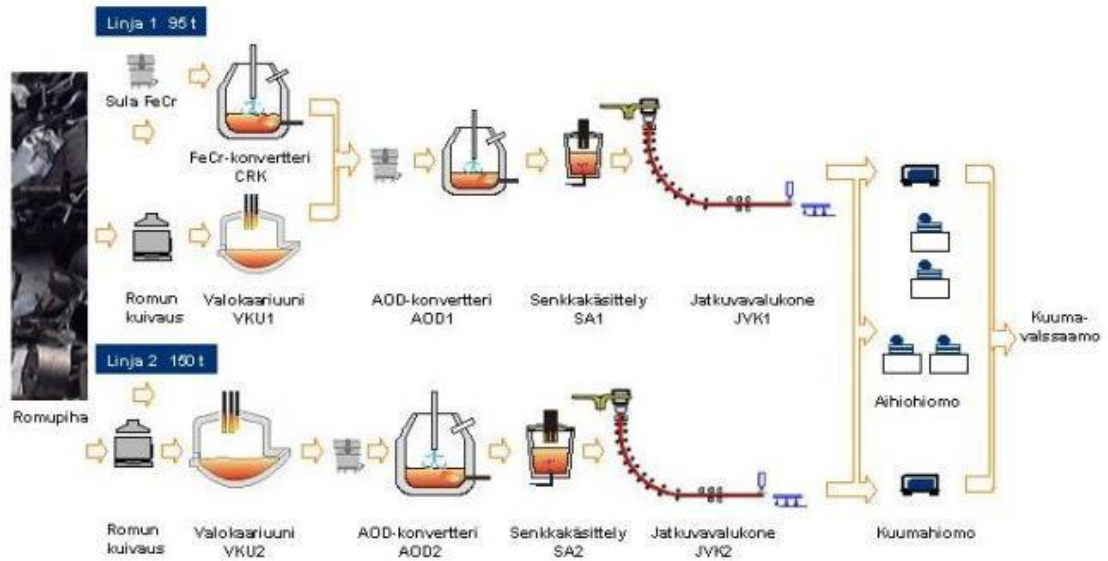
3.1 Ferrokromitehdas

Elijärven kaivokselta saapuva hienorikaste kuljetetaan Torniossa sijaitsevaan ferrokromitehtaaseen, joka muuttaa kromirikasteesta terässulaton tarvitsemaa ferrokromia. Ensiksi hienorikaste sekoitetaan pelletointirummussa kaksin ja bentoniitin kanssa, minkä jälkeen prosessista muotoutuneet pelletit siirretään erilliseen sintrausuuniin. (Outokumpu 2013)

Sintrauksen jälkeen kromipelletit siirretään sulatusuuneihin, joihin panostetaan pellettien lisäksi kvartsiittia, koksia ja palarikastetta. Sulatuksen jälkeen ferrokromi lasketaan senkkaan ja kuljetetaan terässulaton käyttöön. Sulan ferrokromin pinnalle muodostuva kuonakerros käsitellään Tapojärvi Oy:n ferrokromikuonarikastamossa, josta saatu ferrokromi palautetaan takaisin osaksi tuotantoketjua. (Outokumpu 2013; Tapojärvi 2017)

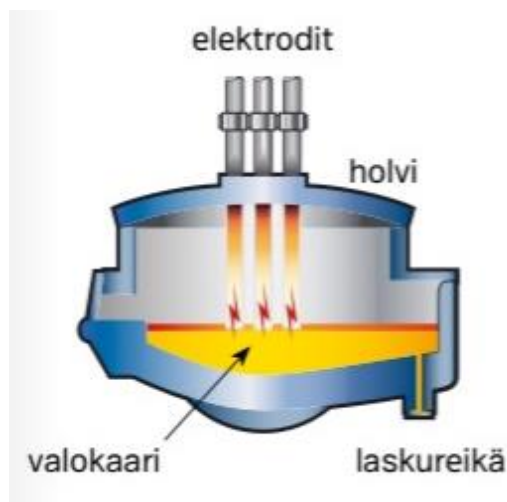
3.2 Tornion terästehtaan valokaariuuni

Tuotantoprosessin (Kuva 4) seuraava vaihe tapahtuu terässulaton valokaariuunissa, jossa pääasiallisena raaka-aineena käytettävä kierrätysteräs sulatetaan suuressa padassa, johon lisätään halutun teräslaadun vaatimat seosaineet (Kuva 5). Valokaariuuni muistuttaa toimintaperiaatteeltaan hitsauspuikkoa, jossa elektrodien välille muodostunutta valokaarta käytetään teräsromun ja seosaineiden sulattamiseen. Sähkövirta ohjataan kolmeen grafiittielektrodiin, joiden välille muodostuvalla valokaarella saadaan aikaiseksi teräksen sulamiseen vaadittava yli 1520 °C:n lämpötila. Tonnin teräsromuerän sulattaminen vaatii noin 440 kWh energiaa. (Frant 2011,6)



Kuva 4 Terässulaton prosessikaavio (Ahava 2014)

Sulatuksen aikana padan pinnalle muodostuva kuonakerros ohjataan ferrokromikuonan tavoin Tapojärven rikastuslaitokseen, jonka erittelemä kiviaines toimii tämän opinnäytetyön aiheena olevien koekappaleiden raaka-aineena. Valokaariuunin muodostama kuona sisältää vaihtelevissa määrin kalkkia, piioksidia, alumiinioksidia, titaanidioksidia, kromioksidia, rautaoksidia ja mangaanioksidia. (Salmela 2016, 21; Tapojärvi 2017)



Kuva 5 Valokaariuunin toiminta pelkistettynä (Metallinjalostajat ry 2014)

Kuonakerroksen poistamisen jälkeen valokaariuunin sulattamaan teräsainekseen sekoitetaan ferrokromisulaa, minkä jälkeen senkka ohjataan AOD-konvertteriin mellotusta varten.

3.3 Terässulaton myöhemmät työvaiheet

AOD-konvertterissa sulaan terässeokseen ohjataan happea, minkä avulla sulasta saadaan poistettua teräksen rakennetta haurastuttava hiili. AOD-käsittelyn jälkeen sula siirtyy senkka-asemalle, jossa sulaan lisätään teräksen rakennetta parantavia seosaineita, kuten titaania. Tämän jälkeen sulaa kantava senkka tuodaan jatkovalukoneelle, jonka alas vievää ramppia pitkin sula jäähtyy ja saa aihiomaisen muodon. Aihiot leikataan polttoleikkauskoneella (Kuva 6) noin 24 m:n pituisiksi kappaleiksi, jotka siirtyvät pintahiomisen jälkeen kuumavalssaukseen. Terässulatto koostuu kahdesta erillisestä tuotantolinjasta, joiden yhteenlaskettu tuotantokapasiteetti on noin 1,65 miljoonaa tonnia vuodessa. (Outokumpu 2016)



Kuva 6 Polttoleikattu aihio terässulattolla (MTV 2010)

Kuumavalssauksessa teräsaihiot saavat nauhamaisen muodon, joka mahdollistaa niiden jatkokäsittelyn kylmävalssaamalla. Kuumavalssauksen jälkeen kuumat nauharullat siirtyvät kylmävalssaamolle, jossa valmis tuote saa lopullisen nauhamaisen muotonsa. (Outokumpu 2013)

4 BETONI

Betoni on keinotekoisesti tuotettu kiviaines, jota käytetään pääosin rakennusteollisuuden tarpeisiin. Betonin rakenne muodostuu sementin, veden ja kiviaineksen yhdistelmästä, johon voidaan lisätä tarpeen vaatiessa betonin ominaisuutta muokkaavia seosaineita. Betonia valmistetaan maailmanlaajuisesta arviolta 25 miljardia tonnia vuodessa ja tällä hetkellä se toimii rakennusteollisuuden tärkeimpänä yksittäisenä raaka-aineena. Betonintuotanto muodostaa tällä hetkellä noin 10 % maailman hiilidioksidipäästöistä. (Olivier 2015, 3; Robbie 2017)

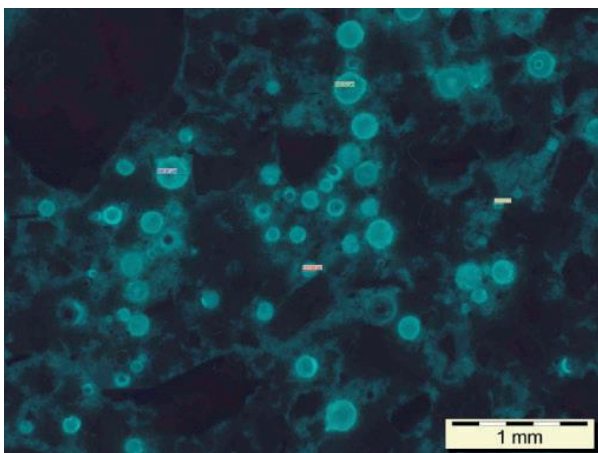
Betonia, tai siihen verrattavia materiaaleja on hyödynnetty rakentamisessa vuosituhansien ajan. Veden ja kalkin reagoimista hyödynnettiin jo kauan ennen ajanlaskun alkua, jolloin näiden kahden aineen aikaan saamaa reaktiota hyödynnettiin talojen seinien ja perusteiden rakentamisessa. Betonin tärkein aineisosa on sementti, joka toimii betonin sidosaineena. Sementti on pääosin kalkkikivestä valmistettu raaka-aine, joka veden kanssa reagoidessaan aiheuttaa hydrataatioksi kutsutun ilmiön. Hydrataatiossa sementtijauhe muodostaa piin, alumiinin ja hapen yhdisteitä, jotka kuivuessaan kovettuvat ja sitovat muut betonin ainesosat kiven kaltaiseksi lujaksi kokonaisuudeksi. Reagoidessaan veden kanssa sementti jäykistyy noin 1-6 tunnin ajan, minkä jälkeen se alkaa kovettumaan. Koostumuksesta ja seosaineista riippuen kovettuminen voi viedä useita viikkoja, jopa kuukausia. Kovettumista edeltävää koostumusta kutsutaan sementtiliimaksi. (Tiehallinto 2007, 20-24)

Nykyisin maailman käytetyin sementtilaatu on portlandsementti, joka on saanut nimensä sen samankaltaisuudesta Portlandin kiven kanssa, joka on väriltään valkoharmaata kalkkikiveä. EN 197-1 -standardin mukaan portlandsementti on portlandklinkkeristä ja vedestä muodostuva sidosaine, minkä koostumuksesta vähintään kaksi kolmasosaa muodostuu kalsiumsilikaatista. Klinkkeri on portlandsementin valmistuksessa käytetty ainesosa, joka koostuu kalkkikivestä muodostuvan kalsiumkarbonaatin ja muiden seosaineiden yhdistelmästä. Näitä muita sidosaineita ovat muun muassa rauta, pii, alumiini, happi ja kalsium. Sementin sisältämien ainesosien ansiosta se kestää hyvin kosteutta. (European Standard 2000)

Kun sementti, vesi ja runkoaineena toimiva kiviaines sulautuvat toisiinsa, muodostuu betonia. Betonin koostumuksesta noin 60-85 % muodostuu runkoaineesta, joka koostuu yleensä moreenista, harjusorasta tai murskaamalla valmistetusta kiviaineksesta. Kuonabetoneilla tarkoitetaan niitä betonilaatuja, joissa seosaineena käytetään luonnonkiven sijasta teollisuuden sivutuotteena muodostuvaa kuonaa. (Tiehallinto 2007, 19)

4.1 Betonin ominaisuudet

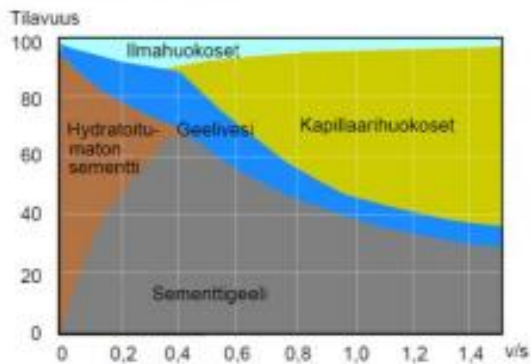
Betoni on ominaisuuksiltaan luja, ja soveltuu sen johdosta hyvin rakennusteollisuuden käyttöön. Betoni on kuitenkin altis kosteuden, suolan ja jäätyksen aiheuttamalle korroosiolle, johtuen sen huokoisesta rakenteesta. Pakkausrapautuma tarkoittaa betonin taipumusta hilseillä sulamisen ja jäätyksen välisinä ajanjaksoina, sillä jäätyksen aikana betonin huokosiin (Kuva 7) kertyneen veden tilavuus kasvaa noin 9 % ja aiheuttaa betonin pintakerroksen hilseilyä. Mikäli betonin huokosiin varastoituneen veden jäätymisreaktion aiheuttama tilavuudenkasvu ei pääse vapaasti tapahtumaan tai sen muodostama paine ylittää betonin vetolujuuden, betoniin muodostuu pakkasvaurioita. Betonin lujuus tarkoittaa betonirakenteen kykyä kestää siihen kohdistuvaa painetta ilman murtumista. (Tiehallinto 2007)



Kuva 7 Runsas suojahuokostus betonin rakenteessa (Tiehallinto 2007)

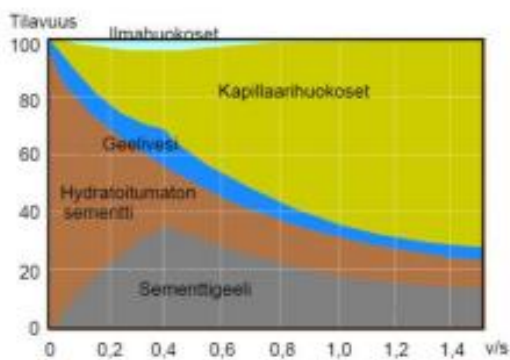
Pakkasvaurioita edistää ympäristön kloridipitoisuus. Kloridisuolat edistävät kosteuden imeytymistä alhaisissa lämpötiloissa, minkä lisäksi ne kasvattavat jäätympainetta entisestään. Betonin pakkaskestävyyden kannalta tärkein yksittäinen ominaisuus on betonin huokoisuus, joka vaikuttaa veden jäätyksen aiheuttamaan paineeseen ja betonin rakenteeseen sitoutuneen kosteuden jäätymsaltiltiuteen. Betonin hydrataatioasteella (Kuva 8) on suuri vaikutus betonin pakkaskestävyyteen, sillä alhaisella hydrataatioasteella kapillaarihuokosten osuus rakenteessa kasvaa (Kuva 9). (Tiehallinto 2007)

Hydrataatioaste 100 %



Kuva 8 Betonin huokoisuuden kehittyminen, kun hydrataatioaste on 100 % (Aalto 2015)

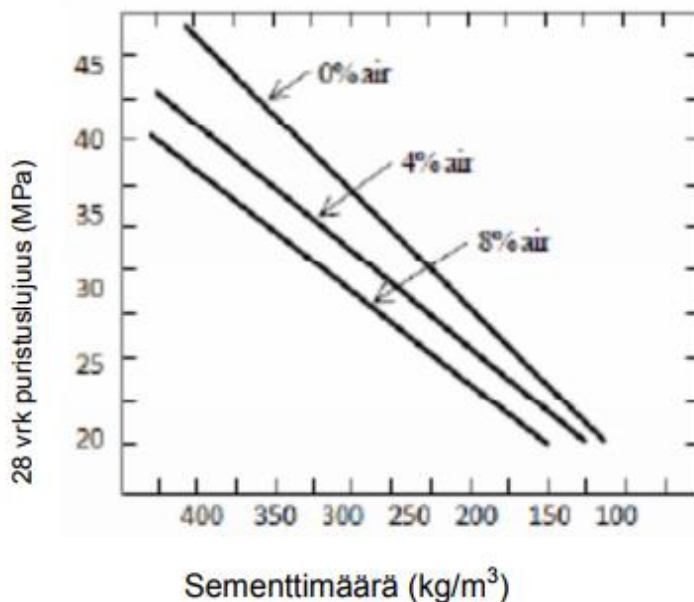
Hydrataatioaste 50 %



Kuva 9 Betonin huokoisuuden kehittyminen, kun hydrataatioaste on 50 % (Aalto 2015)

Kapilaarihuokosten muodostuminen on betonin kestävyiden kannalta ongelmallista, sillä niihin kerääntynyt vesi jäätyy 0 °C alapuolella. Kapilaarihuokosten muodostuminen on riippuvainen betonin vesi/sementti-suhteesta, joka tarkoittaa betonissa esiintyvän sementin ja veden painojen suhdetta toisiinsa. Korkea v/s-suhde tekee betonista helposti työstettävää, mutta heikentää sen lujuutta. Kapilaarihuokosten korkea pitoisuus lisää betonin läpäisevyyttä, joka heikentää betonin kykyä vastustaa siihen kohdistuvaa pakkasrasitusta. Betonirakenteen sisältämät muut huokokset, kuten sementtigeeli, eivät ole betonin kestävyiden kannalta oleellisia, sillä niiden pieni huokoskoko estää niihin kertyneen kosteuden pakkaslaajentumisen. (Tiehallinto 2007)

Betonin pakkaskestävyyttä voidaan parantaa myös suojahuokosten avulla, jotka sitovat betonin rakenteeseen enemmän happea. Vinsolhartsii- tai tensidipohjaisten huokostimien avulla betonin rakenteeseen voidaan muodostaa ilmahuokosia, joihin jäätyneen veden muodostama paine pääsee purkautumaan rikkomatta betonin rakennetta. Huokostimien käyttö heikentää betonin vetolujuutta siten, että ilmamäärän noustessa prosentoin, betoni menettää noin 5 prosenttia vetolujuudestaan (Kuva 10). (Tepponen 2014, 3)



Kuva 10 Ilmamäärän vaikutus vetolujuuteen (Tepponen 2014)

Betonin ominaisuudet muuttuvat ikääntymisen seurauksena. Kapilaarihuokosten määrä kasvaa, joka lisää betonin pakkausrapautumaa. Ikääntymisen aiheuttamien rakennemuutosten vuoksi betonirakenteille annetaan arvioitu käyttöikä, joka voi vaihdella 50 vuodesta useisiin satoihin vuosiin. Betoni altistuu pakkausrapautumisen lisäksi myös muunlaiselle kulumiselle, kuten esimerkiksi veden virtauksen aiheuttamalle eroosiolle (Kuva 11). (Tiehallinto 2007)



Kuva 11 Veden virtauksen aiheuttama eroosio betonirakenteessa (Silko 2007)

4.2 Seos- ja lisäaineet

Betonin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa erillisten seosaineiden avulla. Niillä voidaan vaikuttaa betonin pakkaskestävyyteen, työstettävyyteen, lujuuteen ja ulkonäköön. Seosaineilla voidaan myös vähentää betonin valmistuksen aiheuttamaa ympäristörasitusta, mikäli niillä pystytään korvaamaan portlandsementin ja luonnonkiven käyttöä. Veden, sementin ja luonnonkiven lisäksi betonin valmistuksessa voidaan käyttää esimerkiksi hidastimia, huokostimia, kiihdyttimiä ja notkistimia. (Finnsementti 2017)

Hidastimet ovat lisäaineita, jotka viivästyttävät sementin lujittumista ja mahdollistavat pidemmän työaajan. Hidastimien käyttö mahdollistaa pitkät kuljetusmatkat, eikä niiden käyttö vaikuta betonin loppulujuuteen. Hidastimia käytetään yleisesti lämpimissä olosuhteissa, jossa betonin nopeutettu kuivuminen heikentää sen työstettävyyttä. Esimerkkinä markkinoilla esiintyvistä hidastimista toimii Lentan 77. (Semptu 2017)

Huokostimet ovat lisäaineita, jotka laskevat betoniveden pintajännitystä ja vaikuttavat betonin sisäisten huokosten muodostumiseen. Huokostinta käytetään erityisesti pakkaskestävyyttä vaativissa betonilaaduissa, sillä sen käytöllä voidaan sitoa betonin rakenteeseen lisää ilmahuokosia pakkaslaajentumisen varalta. (Semtu 2017)

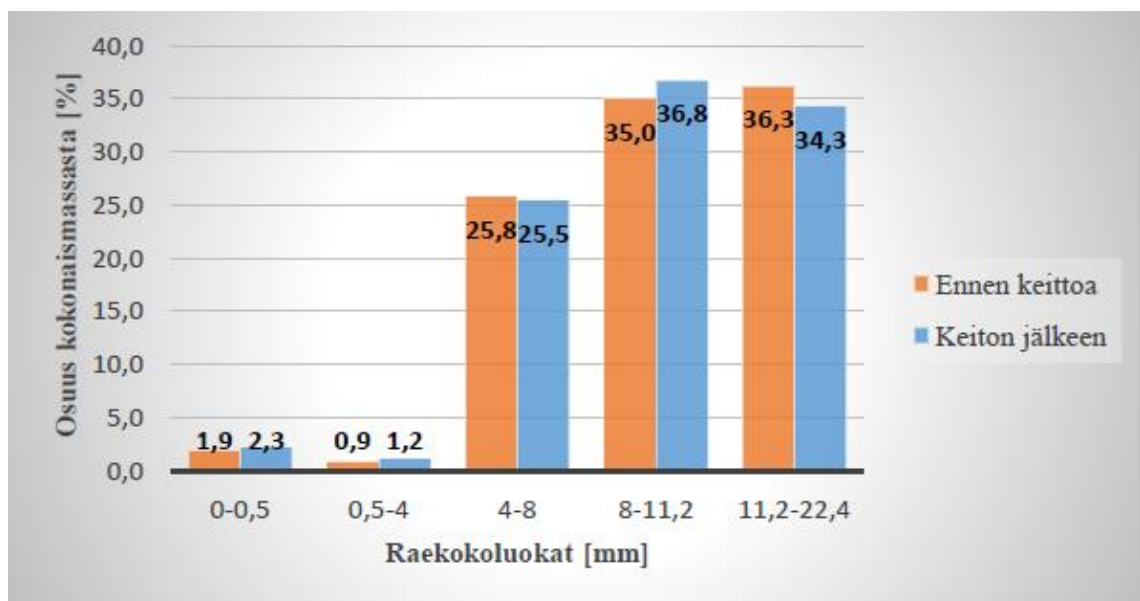
Kiihdyttimillä tarkoitetaan lisäaineita, joilla nopeutetaan betonin lujittumisreaktiota. Kiihdyttimiä käytetään erityisesti kylmissä oloiloissa, jossa betonin lujittuminen olisi muuten hidasta. (Semtu 2017)

Notkistimilla tarkoitetaan lisäaineita, jotka vähentävät veden käyttöä betonin valmistuksessa, varmistaen samalla suuremman lujuuden. Notkistimet ovat yleensä polykarboksylaatteja, eli vesiliukoisia polymeereja. (Semtu 2017)

5 KUONABETONI

Kuonabetoniksi kutsutaan sen kaltaista betonilaatua, jonka runkoaineena käytetään luonnonkiven sijasta teollisuusprosesseista muodostuvia kuonapohjaisia kiiviaineita. Kuonabetonilaatujen tehtävä on toimia runkoaineenaan luonnonkiveä käyttävien betonilaatujen ympäristöystävällisempänä korvikkeena. (Kostamo 2017)

Opinnäytetyön perustana toimivat kuonabetonilaadut on valmistettu Kajaanin ammattikorkeakoulussa projektitutkijana työskentelevän Minna Sarkkisen kehittämän reseptin mukaisesti Tapojärven omassa betonivalmistusyksikössä. Betonin runkoaineena toimii 0/32 mm VKU-kuona, joka on seulottu 10 mm ja 20 mm seulaverkolla (Kuva 12). Runkoaineena toimiva kuona on noin puoli vuotta vanhaa, ulkona varastoitua kuonaa. Kuonan tarpeeksi pitkälle edennyt vanhentuminen on testattu siten, että kuonaa on keitetty kattilassa 10 min ajan. Mikäli kuona ei hajoa keitettäessä, se on tarpeeksi vanhentunutta runkoaineeksi. (Kostamo 2017)



Kuva 12 Annaleena Kostamon suorittamien tutkimusten mukaisesti kuonan rae-
koko pienenee keitettäessä (Kostamo 2017)

Kostamon tuottama raportti (6.2.2017) sisältää tiedot kymmenestä betonivalusta, joiden avulla pyrittiin löytämään VKU-betonilaaduille optimaalinen sekoitussuhde niin pakkaskestävyyden kuin murtolujuuden näkökulmasta. Vesi/sementti-suhteen tulisi näiden ominaisuuksien näkökulmasta pysyä mahdollisimman pienenä ja lisäaineiden sekoitussuhteen mahdollisimman tasapainoisena.

Ensimmäinen valu epäonnistui liian vähäisen vesimäärän vuoksi, joka teki betonista vaikeasti työstettävää. Toisessa valussa veden määrää nostettiin kuudella kilolla, joka paransi betonin työstettävyyttä, mutta sisälsi liikaa ilmaa (18-19 %).

Kahdeksannen valureseptin sisäinen ilmamäärä oli 10 %, joka ylitti tavoitteena olleen 5-8 % rajan. Lopullista reseptiä muutettiin siten, että notkistimen ja huokostimen määrää kasvatettiin, jolloin ilmamäärä saatiin laskettua halutulle tasolle. Parannetun reseptin ansiosta ilmamäärä saatiin laskettua halutulle tasolle. Parannellusta reseptistä käytetään tässä opinnäytetyössä nimitystä 0B.

6 PAKKASRAPAUTUMA

Pakkasrapautumalla tarkoitetaan betonin pintakerroksesta irtoavaa hilsettä, joka on irronnut betonin muusta rakenteesta. Pakkasrapautuman muodostuminen edellyttää betonin pintakerrokseen kertyneen veden pakkaslaajentumista. (Tiehallinto 2007, 5)

Betonin pakkasrapautuman testaamiseen on kehitetty lukuisia standardoituja testejä. Tässä opinnäytetyössä käytetyt testimetodit noudattavat CEN/TS 12390-9-standardia, jota käytetään betonin pintarapautuman mittaamisessa. Rovaniemellä suoritettut testit noudattavat standardin osiota 5, jota kutsutaan laattatestiksi. Kajaanissa suoritettut testit on toteutettu kohdan 6 mukaisesti, jota kutsutaan kuutiotestiksi. Molemmissa testeissä on käytetty yhtäläistä koesarjaa, joka koostuu neljästä toisistaan poikkeavasta betonilaadusta.

Standardin mukaan betonien pintarapautumaa voidaan testata joko kloridipitoisella nesteellä tai akkuvedellä. Testin tarkoituksena on nopeuttaa betonin kokemaa rasiusta toistuvien sulamis- ja jäätymissykliden avulla, jolloin betonin rakenteeseen kertynyt nesteen koostumus vaihtelee jäätyneen ja nestemäisen muodon välillä. Jäätymissyklin aikana betonin huokosiin kertyneen veden tilavuus kasvaa, minkä vuoksi betonin pinta alkaa hilseilemään.

Betonin pakkaskestävyys perustuu siihen, kuinka hyvin betonin rakenne kykenee mukautumaan sen huokosiin kertyneen veden tilavuuden muutoksiin. Huonon pakkaskestävyyden omaavassa betonilaadussa jäätyneen veden aikaansaama paine ei pääse purkautumaan vapaasti rakenteen sisällä, jolloin paine kohdistuu itse rakenteeseen. Veden pakkaslaajentumisen aiheuttaman paineen ylittäessä betonin murtolujuuden, sen pinta alkaa hilseilemään, joka edistää veden tunkeutumista entistä syvemmälle.

Betonin pakkaskestävyys tulee ottaa huomioon kaikissa betonirakenteissa, jotka sijaitsevat suojattujen sisätilojen ulkopuolella. Betonirakenteiden kulumisen kannalta ympäristössä esiintyvillä klorideilla ja vedellä on merkittävä vaikutus, sillä ne kiihdyttävät betonin luonnollista kulumista. Betonirakenteille annetaan laadusta riippuen toisistaan poikkeavia käyttöikä. Normaaleille betonirakenteille arvioitu käyttöikä on 50 vuotta ja arvoraakennuksille noin 100 vuotta. Betonin käyttöikä ja sen pakkaskestävyyteen vaikuttavat betoniin lujuusluokka, vesi/sementti-suhde, sementtityyppi, betonin lisäaineistus, tarvittavat lisärakenteet ja ympäristön olosuhteet.

6.1 Standardi CEN/TS 12390-9

Standardi sisältää kaksi testimetodia, joista molempia on sovellettu opinnäytetyössä. Standardin tarkoituksena on asettaa betonin pakkasrapautuman tutkimiselle selvät rajat, joka mahdollistaa testin toistettavuuden. Rovaniemellä suoritettua testiä kutsutaan laattatestiksi (*slab test*) ja Kajaanissa suoritettua testiä kuutiotestiksi (*cube test*). Molemmissa testeissä käytetyt betonilaadut on tuotettu Kajaanin betonilaboratoriossa kevään 2017 aikana.

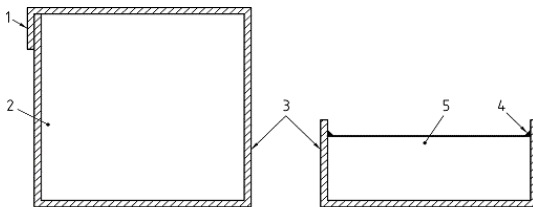
Varsinainen testi alkaa betoninäytteiden valmistuksella, jotka tulee valmistaa standardin CEN/TS 12390-2 mukaisesti. Valamisen jälkeen betoni leikataan 150*150*150 mm:n kokoiseksi kuutioksi, joiden annetaan kuivua vuorokauden ajan 20 ± 2 °C:n lämpötilassa (Kuva 13). Tämän jälkeen kuutiot upotetaan (20 ± 2) °C:n veteen, jossa ne pysyvät seuraavan 7 vuorokauden ajan. Sitten kuutiot nostetaan kuivumaan 27 päivän ajaksi erilliseen kuivaustilaan, jonka ilmankosteuden tulee pysyä välillä 60-70 % ja jonka sisäisen ilmavirran tulee olla 0,1 m/s alapuolella. Kuvaushuoneen lämpötilan tulee olla 20 ± 2 °C koko kuivumisen vaatiman ajan. (CEN/TS 12390-9 2006)



Kuva 13 Valmiit betonikuutiot kuivumisen jälkeen

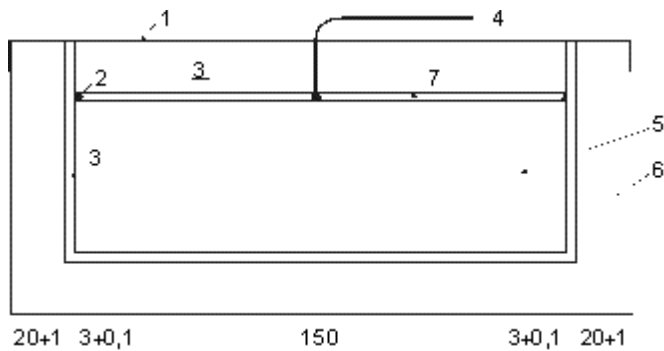
6.2 Laattatesti

Testikuutioiden valmistumisen jälkeen betonikuutiot tulee leikata 50 mm:n paksuiksi laatoiksi siten, että pakkasrapautumatestille altistettu pinta ei sisällä betonin ulkopintaa. Betonikuutiot leikattiin Rovaniemellä sijaitsevassa betonilaboratoriossa, joissa betonilaattojen paksuudeksi saatiin 50 ± 2 mm. Tämän jälkeen betonilaatat asetetaan erillisiin lasikuitukappaleista valmistettuihin muotteihin, jotka ympäröivät testikappaletta kaikilta sivuilta. Lasikuidun ja kuution välissä on kumitiivisteet, jotka estävät veden karkaamisen muotista (Kuva 14).



Kuva 14 Betonilaatta ympäröidään kumitiivisteillä (CEN/TS 12390-9 2006)

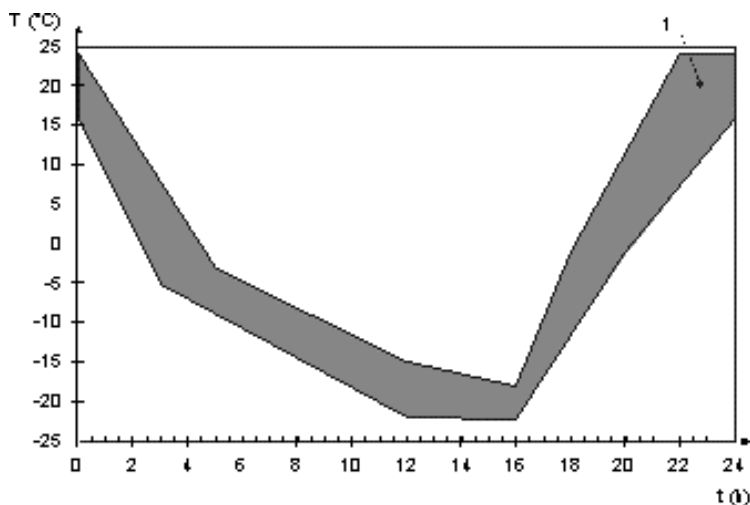
Betonilaattojen yksi sivu jää avoimeksi, jota kutsutaan testipinnaksi. Betonikuution päälle laitetaan muottiin asettamisen jälkeen 3 mm paksu nestekerros, joka voi olla joko 3 %-vahvuista suolavettä tai de-ionisoitua akkuvettä. Tässä opinnäytetyössä käytetty neste on akkuvettä.



Kuva 15 Testikappaleen valmis muoto (CEN/TS 12390-9 2006)

Testikappaleen lopullinen muoto on seuraava. 150*150*50 mm:n kokoisen laatan reunoilla on kumitiivisteet, jotka sijaitsevat muotin ja betonilaatan välissä. Muotin reunat ovat hieman korkeammalla kuin betonilaatan testipinta, minkä päälle kaadetaan standardin vaatima 3 mm:n nestekerros. Betonikappaleen pinnalla on lämpöanturi, joka seuraa betonin pinnalla tapahtuvaa lämpötilan muutosta (Kuva 15). Oikea nestemäärä on välttämätön halutun lämpökäyrän saamiseksi.

Kun betonilaatat on asetettu muotteihin ja niiden päälle on mitattu 3 mm:n nestekerros, sen testipinta päällystetään muovilla veden haihtumisen estämiseksi. Valmiit testikappaleet altistetaan tämän jälkeen pakkasrasituskammion kehittämille jäätymis/sulamissykleille, joita tehdään 56 päivän ajan. Testikammion sykli tulee noudattaa kuvan 16 mukaista lämpökäyrää, jossa ylempi jana kuvastaa sallitun lämpötilan ylärajaa ja alempi jana sallittua alarajaa (Taulukko 1). Yhden vuorokauden aikana kuutioiden testipinnan lämpötilan tulisi siten vaihdella seuraavan lämpökäyrän mukaisesti.



Kuva 16 Standardin mukainen lämpökäyrä (CEN/TS 12390-9 2006)

Testipinnan lämpötilan tulee vuorokauden mittaisessa syklissä olla vähintään 7 tuntia nollan celsiusasteen yläpuolella, muttei yhdeksää tuntia enempää. Lämpötila ei myöskään saa missään testin vaiheessa laskea -27 °C :n alapuolelle. Testiastian päälle asetettu muovikalvo tulee sijaita vähintään 15 mm testipinnan yläpuolella.

Taulukko 1 Sallittu yläraja ja alaraja ajan funktiona (CEN/TS 12390-9 2006)

Table 1 — Points specifying the shaded area in Figure 4

upper limit		lower limit	
t in h	T in °C	t in h	T in °C
0	+ 24,0	0	+ 16,0
5	- 3,0	3	- 5,0
12	- 15,0	12	- 22,0
16	- 18,0	16	- 22,0
18	- 1,0	20	- 1,0
22	+ 24,0	24	+ 16,0

Testisyklin aikana testikappaleille suoritetaan viisi punnitusta, joiden tulee tapahtua 7 ± 1 , 14 ± 1 , 28 ± 1 , 42 ± 1 ja 56 . syklin jälkeen. Punnituksen aikana testikappaleet poistetaan jäädytyskammiosta ja niiden pinnalla oleva vesi ja rapautuma kaadetaan erilliselle suodatinpaperille. Betonikappaleiden pintaa harjataan metallisella harjalla ja kostutetaan erillisellä suihkepullolla irtoavan materiaalin keräämiseksi. Tämän jälkeen suodatinpaperit kuivataan kahden tunnin ajan kuivatusuunissa $110 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilassa, jolloin jäljelle jää punnittavissa oleva rapautuma.

Kaava 1 Rapautuman kumulatiivisen massan laskukaava

$$m_{s,n} = m_{s,before} + (m_{v+s(+f)} - m_{v(+f)})$$

missä

$m_{s,n}$	on	rapautuman kokonaispaino (g)
$m_{s,before}$	on	rapautuman paino aiemmalla punnituskerralla (g)
$m_{v+s(+f)}$	on	suodatinpaperin paino rapautuman kanssa
$m_{v(+f)}$	on	suodatinpaperin kuivapaino

$m_{s,n}$ tarkoittaa kuivatun rapautuman kokonaispainoa. Testin kokonaistulos saadaan siten, että aiempaan mitattuun rapautumaan ($m_{s,before}$) lisätään rapautuman sisältävän suodatinpaperin paino josta on vähennetty suodatinpaperin kuivapaino. Käytännössä suodatinpaperit punnitaan siis ennen rapautuman keräämistä ja uudelleen sen jälkeen, kun näytteet ovat kuivuneet kahden tunnin ajan 110 -asteisessä lämpötilassa. Rapautuman kokonaispaino saadaan poistamalla uunin kuivaaman suodatinpaperin painosta sen aiemmin mitattu kuivapaino.

Kaava 2 Loppuraporttia varten tulokset esitetään seuraavan kaavan avulla

$$S_n = \frac{m_{s,n}}{A} \cdot 10^3$$

missä

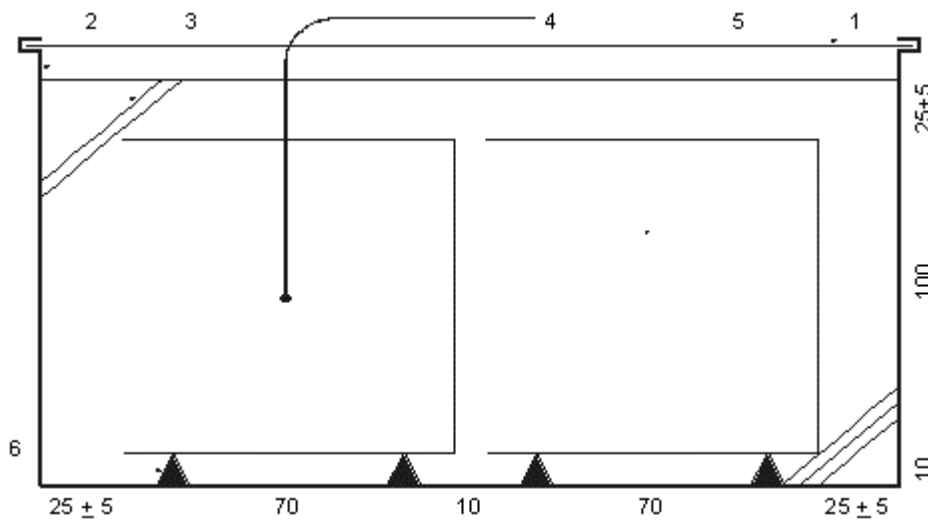
S_n	on	rapautuman paino suhteutettuna testipintaan (g/m^2)
$m_{s,n}$	on	rapautuman kokonaispaino (g)
A	on	testipinnan suuruus (mm^2)

S_n viittaa rapautuman kokonaispainoon suhteutettuna testikappaleen pinta-alaan jokaisen testisyklin jälkeen. $M_{s,n}$ on rapautuman kokonaispaino ja A testipinnan suuruus ennen näytteen liimausta. Viimeinen kertolasku muuttaa rapautuman muotoon g/m^2 , jota voidaan verrata muihin betonilaatuihin. Kyseinen laskutoimitus tehdään jokaisen mittauksen jälkeen.

Lopullisessa raportissa tulee selvittää testattavien betonilaatujen ominaisuudet, testikappaleiden alkuperä, testin aikana mitatut lämpökäyrät, rapautuman kumulatiivinen kokonaispaino sekä testin aikana havaitut erilliset huomiot, kuten halkeamat, testikappaleissa esiintyvät nestevuodot ja testiympäristössä tapahtuneet lämpötilapoikkeamat.

6.3 Kuutiotesti

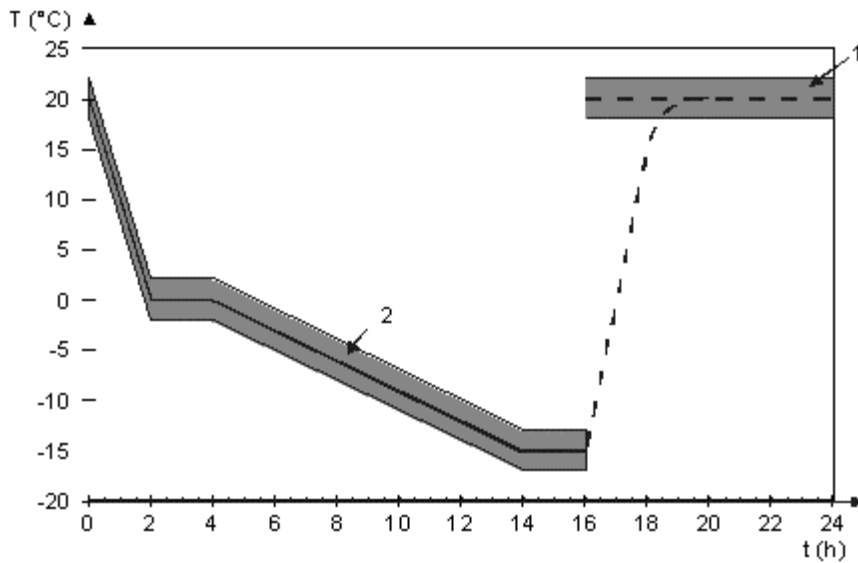
Pakkasrasitustesti voidaan tehdä standardin mukaisesti myös vaihtoehtoisella tavalla, jota kutsutaan kuutiotestiksi. Kuutiotestissä betonin testikappaleet altistuvat samoilla tavoin 56 sykliä kestäviin testiolosuhteisiin, mutta toisin kuin laattatestissä, testattavat betonikappaleet ovat kokonaisia. Testikuutiot valmistellaan samoilla tavoin kuin laattatestissä. Valmistumisen ja tarvittavien alkukäsittelyiden jälkeen kuutiot asetetaan erillisiin säiliöihin (Kuva 17), jotka on valmistettu joko messingistä tai ruostumattomasta teräksestä. Säiliöiden mitat tulee olla leveydeltään 120 ± 15 mm, pituudeltaan 260 ± 15 mm ja korkeudeltaan 150 ± 15 mm.



Kuva 17 Kuutiotestin testisäiliö (CEN/TS 12390-9 2006)

Testisäiliön yläpuolelle asetun lämpöanturin (4) tarkoituksena on seurata sulamis/jäätymissyklin etenemistä, kuva 18. Lämpöanturin tarkkuus tulee olla 0,5 Kelvin-astetta. Testi aloitetaan siten, että säiliöön asetettavat testikuutiot ovat ensin seitsemän vuorokauden ajan veden alla, joka ehkäisee niiden ennenaikaista kuivumista. Tämän jälkeen kuutiot nostetaan kuivumaan 20 vuorokauden ajaksi olosuhteisiin, joissa vallitsee aiemmin mainittu 20 ± 2 °C:n lämpötila. 27 päivän jälkeen ennen pakkasrapautumakokeen alkamista kuutiot punnitaan yhden gramman tarkkuudella, minkä jälkeen kuutiot asetetaan laatikoihin siten, että niiden väliin jää 10 mm:n tila. Tämän jälkeen säiliöt täytetään joko kloridipitoisella nesteellä tai akkuedellä siten, että nesteen pinta jää 25 ± 5 mm betonipinnan yläpuolelle.

Ensimmäisen testivuorokauden jälkeen kuutiot punnitaan niihin kerääntyneet jään punnitsemiseksi. Tämän jälkeen testisäiliöt altistetaan laattatestin tavoin pidemmäksi aikaa testikammion muodostamille olosuhteille. On suotavaa, että laatikoiden paikkaa ja suuntaa vaihdetaan viikon välein testikammion sisällä. Betonin pintalämpötilan tulee noudattaa mahdollisimman tarkasti sallittuja raja-arvoja (Taulukko 2).



Kuva 18 Standardin mukainen lämpökäyrä (CEN/TS 12390-9 2006)

Vaaka-akseli tarkoittaa vuorokauden tunteja ja pystyakseli betonin pinnalta mitattua lämpötilaa (Kuva 18). Lämpötilakäyrää tulee lukea niin, että jäätyminen tapahtuu ensimmäisen 16 tunnin aikana, jonka jälkeen testikammio suorittaa nopean lämpötilan noston takaisin huoneenlämpöön.

Taulukko 2 Sallittujen lämpötilojen ylä- ja alarajat (CEN/TS 12390-9 2006)

Table 2 — Points specifying the shaded area in Figure 7

t in h	T in °C		
	Upper limit	Nominal value	lower limit
0	+ 22,0	+ 20,0	+ 18,0
2	+ 2,0	0,0	- 2,0
4	+ 2,0	0,0	- 2,0
14	- 13,0	- 15,0	- 17,0
16	- 13,0	- 15,0	- 17,0

Kappaleille suoritetaan kokeen aikana yhteensä viisi erillistä mittausta, jotka suoritetaan 7 ± 1 , 14 ± 1 , 28 ± 1 , 42 ± 1 ja 56 . jäätymis/sulamis-syklin jälkeen. Kyseisinä vuorokausina testikappaleille tulee suorittaa seuraavat toimenpiteet:

1. Betonikappaleiden pinnalle muodostuneet visuaaliset virheet, kuten halkeamat, havainnoidaan, sekä tarkastetaan koekappaleiden ympärillä olevien muottien kunto.
2. Testikappaleiden harjataan metalliharjalla siten, että jo valmiiksi irtoamaisiltaan olevat rapautuman kappaleet irtoavat betonin pinnasta. Säiliöiden sisällä oleva vesi kaadetaan suodattimen läpi, jotta siihen kerääntynyt rapautuma saadaan punnituksi. Tämän jälkeen säiliöt täytetään uudella nesteellä.
3. Säiliöön, betonikappaleen pintaan ja veteen kerääntynyt rapautuma kerätään erillisille suodatinpapereille, joita kuivataan kahden tunnin ajan 110 ± 10 °C:n lämpötilassa. Irronneen betonimassan kokonaispaino ilmoitetaan 0,1 g tarkkuudella.

Tulokset esitetään seuraavalla kaavalla:

Kaava 3 Viimeisen testikerran aikana suoritettava laskutoimitus

$$m_{s,n} = m_{s,before} + m_{c+f+b}$$

missä

$m_{s,n}$ on rapautuman kumulatiivinen kokonaispaino (g)

$m_{s,before}$ on rapautuman kokonaispaino aiemmalta mittauskerralta (g)

m_{c+f+b} on rapautuman kokonaispaino viimeisimmältä mittauskerralta (g)

$M_{s,n}$ tarkoittaa kumulatiivista rapautuman kokonaispainoa testisykliä aikana. $m_{s,before}$ aiemmasta mittauksesta saadun rapautuman kokonaispainoa ja m_{c+f+b} viimeisimmän punnituskerran aikana mitattua rapautumaa.

Tämän lisäksi kuutioista tulee mitata niihin kertynyt kosteus seuraavalla kaavalla:

Kaava 4 Betonikuutioiden kosteuden mittaaminen

$$L = \frac{m_{28d} - m_{27d}}{m_{27d}} \cdot 100$$

missä

L	on	kappaleisiin kertyneen nesteen paino (g)
m_{28d}	on	nestellä kyllästytetyn kuution paino ajassa 28 d (g)
m_{27d}	on	kuivan betonikuution paino ennen testin alkamista (g)

Tulos ilmoitetaan 0,1 % tarkkuudella.

Jokaisen punnituskerran jälkeen tulee myös laskea jokaisen neljän testikuution massahäviö P, joka lasketaan seuraavalla kaavalla:

Kaava 5 Testikuutioiden massahäviö

$$P = \frac{m_{s,n}}{m_o} \cdot 100 \%$$

missä

P	on	kappaleiden kokonaismassahäviö (g)
$m_{s,n}$	on	testikuutioista irronneen rapautuman paino (g)
m_o	on	kuutioiden aloituspaino ennen testin alkamista (g)

56. syklin jälkeen kyseisten tietojen avulla voidaan osoittaa toisistaan poikkeavien betonilaatujen kykyä vastustaa niihin kohdistuvaa pakkasrasitusta.

Lopullisessa raportissa tulee esiintyä samat tiedot kuin laattatestissä.

7 TESTATTAVAT BETONILAADUT

Tässä pakkasrapautumatestissä on sovellettu neljää toisistaan poikkeavaa betonilaatua (Taulukko 3). Neljästä betonilaadusta yksi edustaa luonnonkivipohjaista kaupanlaatua, joka edustaa kuonabetonilaatujen tämän hetkistä kilpailijaa. Kolme muuta betonilaatua ovat Tapojärven omia betonireseptejä, jotka sisältävät yhden peruslaadun ja sen kaksi variaatiota. Kolmesta kuonabetonilaadusta yksi on pintakäsittelemätön VKU-pohjainen kuonabetoni, yksi on kyseisen betonilaadun impregnointiaineella pintakäsitelty variaatio ja yksi on piioksidipohjainen kuonabetonilaatu. Pakkasrapautumakokeessa käytetyt testikappaleet on tuotettu Minna Sarkkisen johdolla Kajaanin ammattikorkeakoulun tiloissa.

Taulukko 3 Olosuhdekammiossa testattavat betonilaadut

Laadun nimi	Selitys
S-100	Kaupan laatu
Silika	Piioksidipohjainen kuonabetoni
OB	VKU-kuonabetoni
Impregnoitu	Pintakäsitelty VKU-betoni

7.1 S-100



Kuva 19 Testissä käytetty kaupan laatu S-100

Testissä käytetty S-100 (Kuva 19) on pakkasenkestävä yleisbetoni, jonka puristuslujuus on Kajaanin ammattikorkeakoulussa tehtyjen mittausten perusteella 12,5 MPa/m² kohden 28 vuorokautta valamisen jälkeen. Betonin runkoaineena

toimii 0 – 10 mm:n kokoinen luonnonhiekkä ja sideaineena kierrätyssementti. Betonin tiheys on 2074 kg/m³ ja sen sisältämä ilmamäärä on 14 %. Testissä S-100-laatuun viitataan numeroilla 4.1 ja 4.2.

7.2 VKU-kuonapohjainen betoni

Tapojärven oma VKU-pohjainen betonilaatu pohjautuu Annaleena Kostamon raportissa mainittuun reseptiin, joka kehitetty Kajaanin ammattikorkeakoulun projektitutkija Minna Sarkkisen tuottaman kuonabetoninreseptin pohjalta.

VKU-pohjainen kuona muodostaa noin 72 paino-% betonin koostumuksesta. Tämän lisäksi betonissa on käytetty lisäaineina Vario-Parmixin notkistinta ja Ma-peairin huokostinta. Betonin v/s-suhde on 0,56 ja sen sisältämä ilmamäärä on 5,8 %.

VKU-betonin resepti pohjautuu Tapojärven vuonna 2016 kesällä suoritettuihin valusarjoihin, joilla pyrittiin löytämään VKU-pohjaiselle kuonabetonilaadulle optimaalista reseptiä. Minna Sarkkisen kehittämien reseptien erot perustuvat erityisesti niiden sisältämän veden, notkistimen ja huokoistimen määrään.

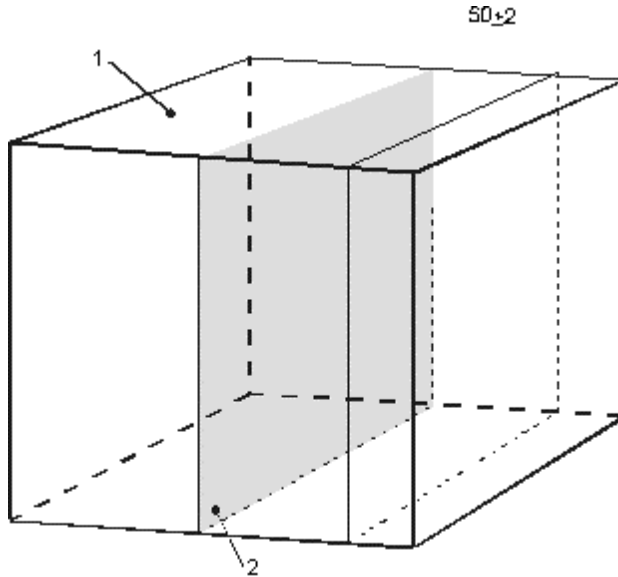
Valusarjoissa käytettiin kahta toisistaan poikkeavaa pääreseptiä, joihin tehtiin valujen välissä tarvittavia muutoksia. Vuoden 2016 valuista kaksi ensimmäistä valua tuotettiin reseptillä 1, jotka paljastuivat sekä betonin työstettävyyden, että betonin sisältämän ilmamäärän suhteen sopimattomiksi. Reseptillä 2 suoritetuista valuista kahdeksas soveltui parhaiten jatkokäsittelyyn.

Kahdeksannen betonivalun sisältämä ilmamäärä oli 10 %, joka oli jonkin verran korkeampi mitä tavoitteena ollut 5-8 %. Opinnäytetyössä käytetty kuonabetonilaatu 0B eroaa kahdeksannen valukerran reseptistä erityisesti notkistimen ja huokostimen määrän osalta, joiden määrää on kasvatettu alkuperäisreseptistä.

Betonilaadun 0B sisältämä ilmamäärä on 5,8 %, joka vastaa valukokeiden alkuperäistä tavoitetta. Betonin tiheys 28 vrk valamisen jälkeen on 2546 kg/m^3 ja sen mitattu puristuslujuus $37,7 \text{ MPa/m}^2$. Tapojärven VKU-pohjainen betonilaatu on siten murtolujuudeltaan suurempi ja ilmamäärältään pienempi mitä markkinoilla esiintyvä S-100. VKU-pohjaiseen betonilaatuun viitataan olosuhdetestin tuloksissa numeroilla 2.1 ja 2.2.

7.3 Impregnoitu VKU-betonilaatu

Pakkasrapautumakokeiden kolmas laatu on koostumukseltaan sama kuin 0B:ssä, mutta sen pinta on käsitelty StoCryl HG 200 -impregnointigeelillä. Impregnointigeelit ovat betoniteollisuudessa käytettäviä tuotteita, jotka muodostavat betoniin vettä hylkivän pinnan. Impregnointikerros hylkii veden ja sulatussuolojen kiinnittymistä betonin pintarakenteeseen, edistämällä sen käyttöikä.

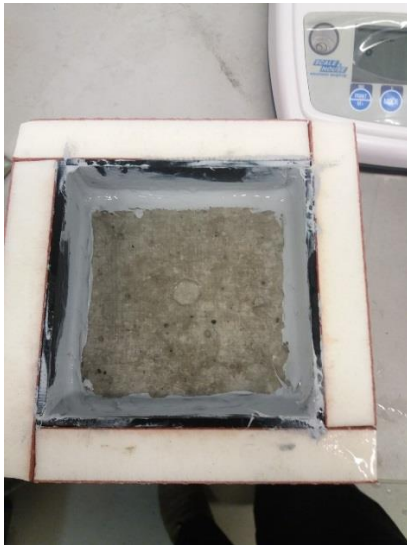


Kuva 20 Betonikuutiosta leikattava testipinta (CEN/TS 12390-9 2006)

Impregnointiaineella käsiteltyä pintaa tutkitaan siten, että toisin kuin muissa testattavissa betonilaaduissa, impregnoitu testipinta otetaan kuution ulkopinnasta,

eikä harmaalla värjätystä sisäpinnasta (Kuva 20) (Kuva 21). Stocryl HG200 -impregointiaineen alin käyttölämpötila on +5 °C, joten se ei tarjoa täyttä suojaa pakkasen aiheuttamille vaurioille. (StoCretec 2016)

Vettä hylkivien ominaisuuksien perusteella impregointigeelillä käsiteltyjen betonikappaleiden tulisi kestää käsittelemättömiä kappaleita paremmin olosuhdekammion aiheuttamia olosuhteita, sillä geelikerros vähentää veden kertymistä betonin pintakerrokseen.



Kuva 21 Impregnoitun testikappaleen ulkopinta

7.4 Silika

Silika eli piioksidi on piin ja hapen yhdistelmä, jota voidaan hyödyntää betonin seosaineena. Silikajauheen partikkelikoko on betonin partikkelikoko pienempi, jonka lisäksi se reagoi voimakkaasti betonin hydrataatioprosessin aikana muodostuvan kalsiumhydroksidin kanssa. Silikalla on betonin tiivyyttä parantavia ominaisuuksia, minkä vuoksi sen käytöllä voidaan kasvattaa betonilaadun lujuutta ja sen kemiallista kestävyyttä.

Piiksidipohjainen betoniresepti perustuu Tapojärven ja Minna Sarkkisen tekemiin tutkimuksiin. Piioksidia sisältävän betonilaadun runkoaineena toimii muiden kahden muun Tapojärven betonilaadun tavoin VKU-kuona.

Pioksidia sisältävän betonilaadun ilmamäärä on 5,5 %, tiheys 2423 kg/m^3 ja v/s-suhde 0,45. Kyseisen laadun v/s-suhde ja ilmamäärä ovat matalampia kuin muilla testattavilla laaduilla, minkä vuoksi sen pakkaskestävyys muita betonilaatuja korkeampi.

8 PAKKASRAPAUTUMAKOKEET

8.1 Pakkasrapautumakokeen alkuvalmistelu

Testikappaleet valmistettiin vuoden 2017 kevään aikana Kajaanin ammattikorkeakoulun betonilaboratoriossa. Testikappaleet toimitettiin huhtikuussa puolesavälissä Lapin ammattikorkeakoululle, kun testikappaleille oltiin toteutettu vaadittu alkukäsittely. Alkuperäisen suunnitelman mukaisesti betonikappaleet olisi tutkittu Kemin tekniikan kampuksen suolasumutuskammiossa, joka osoittautui puutteelliseksi haluttujen testitulosten saamiseksi. Suolasumutuskammion sijasta laattatestissä käytetyt kappaleet siirrettiin Rovaniemelle Arctic Powerin laboratorioon, jossa ne valmistettiin laattatestin vaatimusten mukaisesti. Kuutiot olivat kooltaan 100*100*100 mm.

Kajaanissa valmistetut testikuutiot leikattiin Rovaniemellä siten, että niiden paksuudeksi jäi 50 ± 2 mm (Kuva 22). Testikappaleiden leikkauksessa testipinta luotiin kappaleen sisäpinnalta kaikissa muissa paitsi impregnoituissa betonilaa-
duissa, joissa testipinnaksi valikoitui kappaleen ulkopinta.

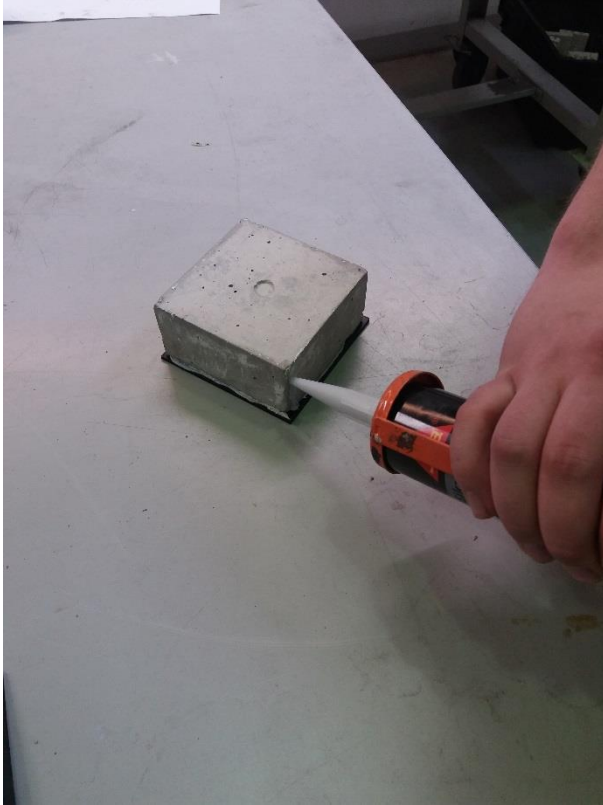


Kuva 22 Betonikappaleiden sahausta standardin vaatimaan mittaan



Kuva 23 Testikappaleiden paksuuden tarkistus

Valmiit betonikappaleet olivat suuruudeltaan 100*100*50 mm (Kuva 23). Kappaleiden leikkaamisen jälkeen betonit asetettiin erillisiin testimuotteihin, joiden tarkoituksena on estää testipinnan päällä olevan nesteen karkaaminen sulamis-jäätymissykliä aikana. Testikappaleiden ympärille asetettiin ensimmäisenä $3\pm 0,5$ mm paksuisista kumikappaleista muodostettu suojapinta, joka asetettiin betonikappaleiden ympärille Sikaflex-221-liimamassan avulla (Kuva 24).



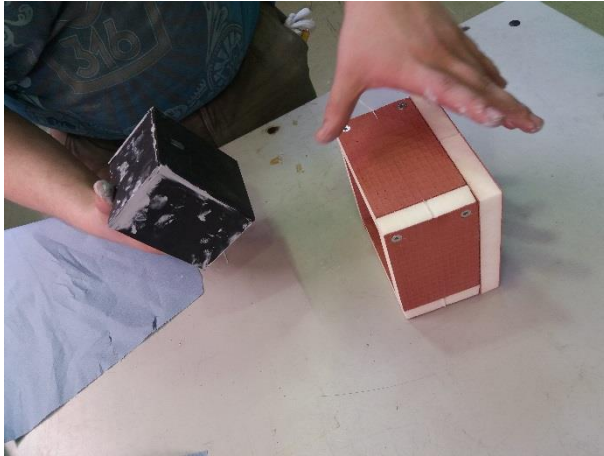
Kuva 24 Betonikappaleen sivujen liimaamista kumieristystä varten

Kumilevyn kappaleet on mitoitettu siten, että niiden reuna nousee betonikappaleen testipinnan yläpuolelle. Kumitiivisteiden tarkoituksena on estää betonin pinnalla olevan akkuveden vuotaminen kokeen sulamis- ja jäätymissykylien aikana (Kuva 25).



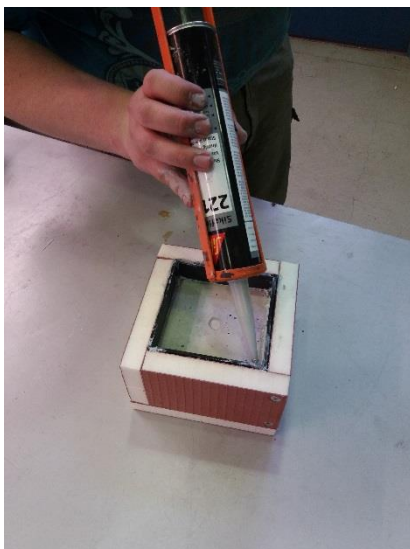
Kuva 25 Kumitiivistelevyjien asettamista paikalleen

Kumilevyjen liimaamisen jälkeen betonikuutiot asetetaan muotteihin, jotka on valmistettu Finnfoamin eristelevystä (Kuva 26).



Kuva 26 Betonikappaleiden asettamista muotteihin

Eristelevymuotteihin asetetut betonikappaleet tiivistetään sikaflexin massalla tiiveyden varmistamiseksi (Kuva 27) (Kuva 28). Mahdollisten nestevuotojen estäminen on pakkasrapautumakokeen onnistumisen näkökulmasta tärkeää, sillä nestehäviöt vaikuttavat kappaleiden testipintojen lämpötilaan.



Kuva 27 Liimamassalla suoritettu lopputiivistys

Eristelevymuotteihin asettamisen jälkeen kuutioiden testipinnalle lasketaan 3 mm paksu nestekerros, minkä tehtävä on simuloida testin aikana nesteen tunkeutumista betonin pintarakenteisiin. Nestepinnan asettamisen jälkeen testikuution päälle asetetaan polyeteenimuovikalvo, joka estää nesteen haihtumisen kuution pinnalta (Kuva 29). Muovikalvoon tehdään pieni reikä, jota pitkin betonin testipinnalle asetetaan pinnan lämpötilaa mittaava dataloggeri.



Kuva 28 Nesteen lisäämistä odottavat testiaihiot



Kuva 29 Valmiita testikappaleita

Kesän aikana tuotetut ensimmäiset eristelevyvuotit eivät soveltuneet käytettäväksi olosuhdekammiossa, sillä ne eivät pitäneet nestettä sisällään. Eristelevykappaleet oltiin ensimmäisessä valmistuserässä leikattu mattoveitsellä, jolloin niiden pinnasta tuli sen verran epätasaisia, etteivät vuotit olleet vesitiiviitä (Kuva 30).



Kuva 30 Ensimmäisen koesarjaan kuuluvien eristelevypalasiin leikkaamista

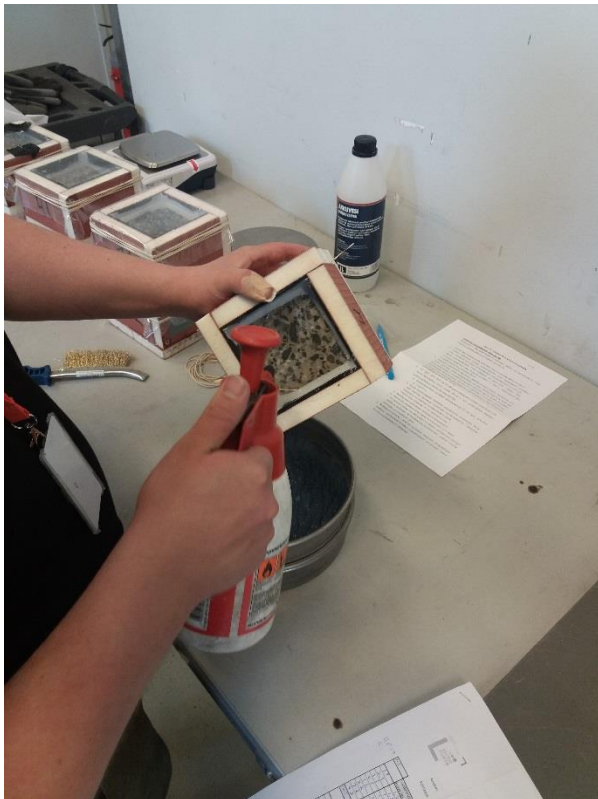
Uusiin eristelevyaihioihin soveltuvat palaset leikattiin vesileikkurilla, jolloin leikkujäljestä tuli tasainen. Uusista kappaleista tuotetut vuotit osoittautuivat vesitiiviiksi ja kokeeseen sopivaksi.

8.2 Mittaukset

Ensimmäinen mittauskerta suoritettiin 15.8, jolloin testin alkamisesta oli kulunut 7 vuorokautta. Punnituksen ajaksi testikappaleet poistetaan olosuhdehuoneesta, minkä jälkeen niiden pinnasta irronnut rapautuma punnittiin vaa'alla, jonka tarkkuus on $\pm 0,05$ g. Testiaihoiden muovikalvo poistettiin, minkä jälkeen kuutioiden päällä oleva vesi kaadetaan aiemmin punnitun suodatinpaperin läpi (Kuva 31). Tämän jälkeen kuution pintaa harjataan messinkiharjalla siten, että jokaiseen kappaleeseen kohdistuu kaksi edestakaista harjausta. Harjauksen jälkeen testipintaa suihkutetaan vedellä, jotta rapautuma irtoaisi betonin pinnasta (Kuva 32).



Kuva 31 Pinnasta irronneen aineksen valuttamista suodatinpaperille



Kuva 32 Betonin testipinnan puhdistusta

Suodatinpaperit punnittiin kuivina ennen kuution pinnalla olevan veden ja rapautuman poistamista. Tämän jälkeen suodatinpaperit asetettiin seulaverkolle, jonka läpi kaadettiin betonikappaleiden pinnalle kertynyt rapautuma ja vesi. Kosteat suodatinpaperit ja sihdit siirrettiin tämän jälkeen kuivatusuuniin, jossa niitä kuivatettiin kahden tunnin ajan 110 °C lämpötilassa (Kuva 33). Betonikappaleista irtoavan rapautuman kokonaispaino on laskettavissa siten, että uunissa kuivatun suodatinpaperin massaa verrattiin suodatinpaperin painoon ennen testikappaleiden harjaamista.

Kaikissa punnituksissa käytettiin digitaalista tarkkuusvaakaa, jonka tarkkuus oli $\pm 0,05$ g. Kuivien suodatinpapereiden punnituksessa paperin asennolla ja huoneessa esiintyvällä ilmavirralla oli jonkin verran vaikutusta lopulliseen mittaustulokseen. Joissain tilanteissa kuiva suodatinpaperi sijoittui painoltaan niin tarkasti kahden mittauspisteen väliin, ettei vaaka kyennyt antamaan lopullista tulosta. Kyseisissä tilanteissa paperin painoksi määriteltiin se luku, joka esiintyi vaa'an näytössä kymmenen sekunnin mittaamisen jälkeen. Tämä painon heittelyn vuoksi rapautuman painoksi on mahdollista tulla myös negatiivinen luku, mikäli betonista irronneen rapautuman määrä on vähäinen.



Kuva 33 Uuniin siirrettäviä suodatinpapereita

Mittauksissa käytetyt seulaverkot lainattiin Lapin ammattikorkeakoululta. Seulat numeroitiin siten, että pienin silmäkoko vastasi pienintä numeroa testikappaleissa (Taulukko 4). Seulojen silmäkoon poikkeaminen johtui käytetystä seulasarjasta, jossa jokaisen seulan silmäkoko erosi toisistaan.

Taulukko 4 Testikappaleiden numerointi

Laatu	Numerointi	Silmäkoko (mm)
Silika	1.1	0,063
Silika	1.2	0,125
Käsittelemätön OB	2.1	0,25
Käsittelemätön OB	2.2	0,5
Impregnoitu OB	3.1	1
Impregnoitu OB	3.2	2
S-100	4.1	4
S-100	4.2	8

8.3 Huomioita mittausten aikana

Mittauksia suoritettiin yhteensä viisi kertaa seuraavina päivinä: 15.8., 22.8., 6.9., 19.9. ja 4.10. Ensimmäisellä mittauskerralla havaittiin impregnointiaineen muodostaman geelipinnan irtoaminen testikappaleen pinnasta, joka kasvatti irronneen massan painoa. Harjauksen seurauksena betonirapautuman mukana irtosi myös pieniä palasia eristelevyä, joiden kokonaismassa oli kuitenkin käytetyn vaa'an tarkkuuden ulkopuolella. Ensimmäisen mittauksen aikana havaittiin myös, että suodatinpaperin ja seulan läpi kulkeutui jonkin verran hienojakoista pölyä, joka oli nähtävissä suodattimen alaisessa vesikulhossa (Kuva 34).



Kuva 33 Hienojakoista pölyä vesikulhossa

Toisen mittauskerran (22.8.) aikana havaittiin testipinnan päällä olevan vesikerroksen paksuuden heittelyä, minkä vuoksi kaikki testikuutiot eivät pysyneet lämpökäyrän määräämissä rajoissa. Testikappaleiden päälle laitettava akkuvesikerros mitoitettiin alkuun 3 mm paksun prikan avulla, joka oli mittatarkkuudeltaan välttävä. Toisen mittauskerran jälkeen akkuveden pinnan standardin vaatima paksuus varmistettiin siten, että jokaiseen kuutioon laskettiin 30 ± 4 g akkuvettä, joka perustui laskutoimitukseen $100*100*3$ mm. Seuraavien mittausten aikana kuutiot pysyivät lämpökäyrän antamissa rajoissa.

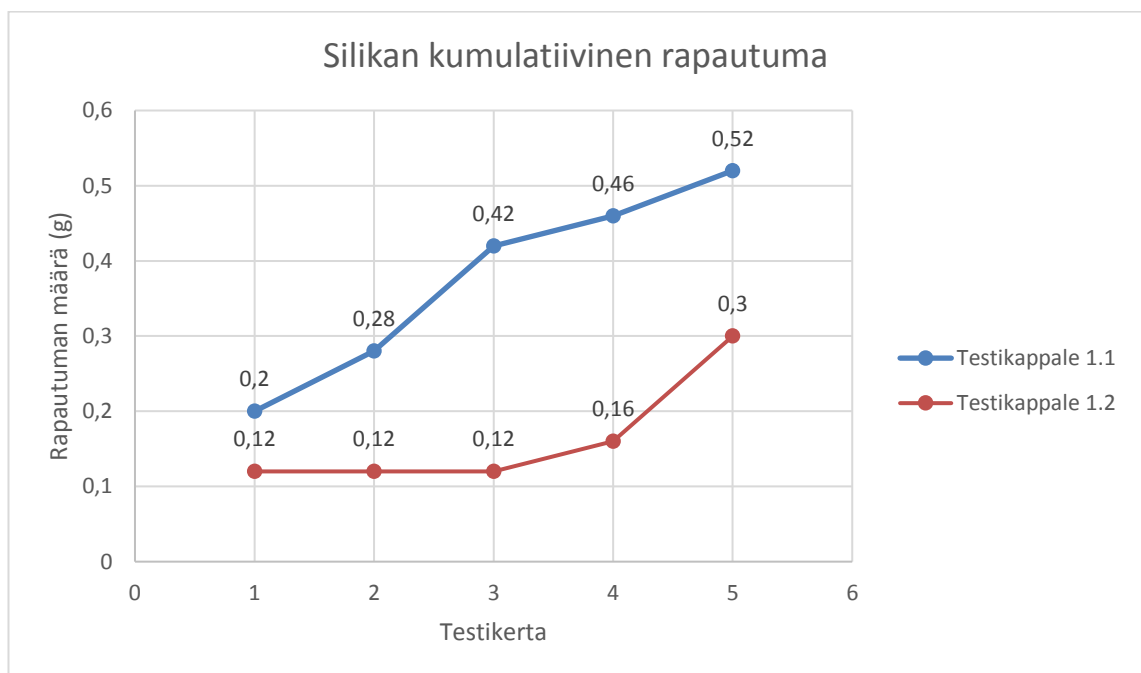
Seuraavissa mittauksessa (6.9., 19.9., 4.10.) havaittiin impregnoitun testikappaleen 3.2 vuotavan. Kyseisen valumisen vuoksi kyseisestä testikappaleesta saatuja tuloksia ei voida pitää luotettavina, sillä sen lopullinen rapautuma oli vain 42 % testikappaleen 3.1 rapautumasta. Muiden kappaleiden osalta vastaavia ongelmia ei esiintynyt, ja nestemäärän tarkemman annostelun jälkeen kyseiset testikappaleet pysyivät lämpökäyrän määräämissä rajoissa.

9 MITTAUSTEN TULOKSET

56:n testisyklin jälkeen betonilaatujen rapautumiskokeen tulokset olivat seuraavat:

9.1 Silika

Testikappaleen 1.1 kokonaisrapautuma oli 0,52 g ja testikappaleen 1.2 kokonaisrapautuma 0,30 g (Kuvio 1) (Taulukko 5).



Kuvio 1 Silikapohjaisten testikappaleiden kumulatiivinen rapautuma

Silikapohjaisissa testikappaleissa pakkasrapautumista tapahtui muita testilaatuja vähemmän. Tuloserot testikappaleiden välillä ovat vähäisiä (0,22 g), mikä johtuu todennäköisemmin eroista vesipinnoitteen paksuudessa ja testikappaleiden tiiviydessä.

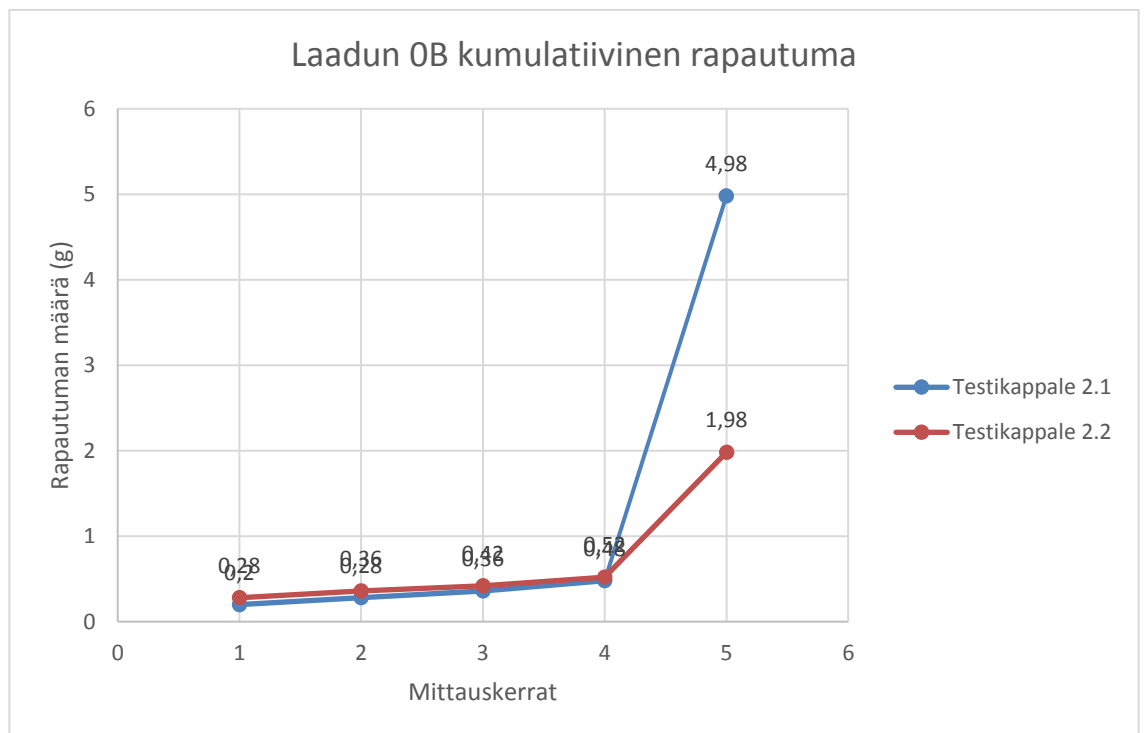
Testikappaleelle 1.1 kokonaisrapautumaksi saatiin 52 g/m² ja testikappaleelle 1.2 30 g/m².

Taulukko 5 Silika-laadun punnitustulokset grammoissa

Silika	1	2
Testikerta 1	0,20	0,12
Testikerta 2	0,08	0
Testikerta 3	0,14	0
Testikerta 4	0,04	0,04
Testikerta 5	0,06	0,14
Yhteensä (g)	0,52	0,3

9.2 Käsittelemätön OB

Testatuista betonilaaduista pintakäsittelemätön OB kesti huonoimmin pakkasra-
situsta. Testikappaleiden kumulatiivinen rapautuma pysyi neljanteen mittausker-
taan asti hyvin yhtenevänä, kunnes viimeisellä mittausjaksolla molempien kuuti-
oiden testipinnasta lohkesi suuri määrä betonia (Kuva 35) (Kuvio 2).



Kuvio 2 OB testikappaleiden kumulatiivinen rapautuma

Testikappaleesta 2.1 viimeisellä mittausjaksolla irronnut rapautuma oli 4,5 g ja testikappaleen 2.2 rapautuma 1,46 g (Taulukko 6). Viimeisen mittausjakson aikana irronnut rapautuma jätti testipinnan epätasaisen kraatterimaiseksi. Testikappaleen 2.1 kokonaisrapautuma oli 498 g/m² ja testikappaleen 2.2 198 g/m².



Kuva 35 Viimeisen mittausjakson aikana irronnutta pakkasrapautumaa

Taulukko 6 Laadun 0B punnitustulokset grammoissa

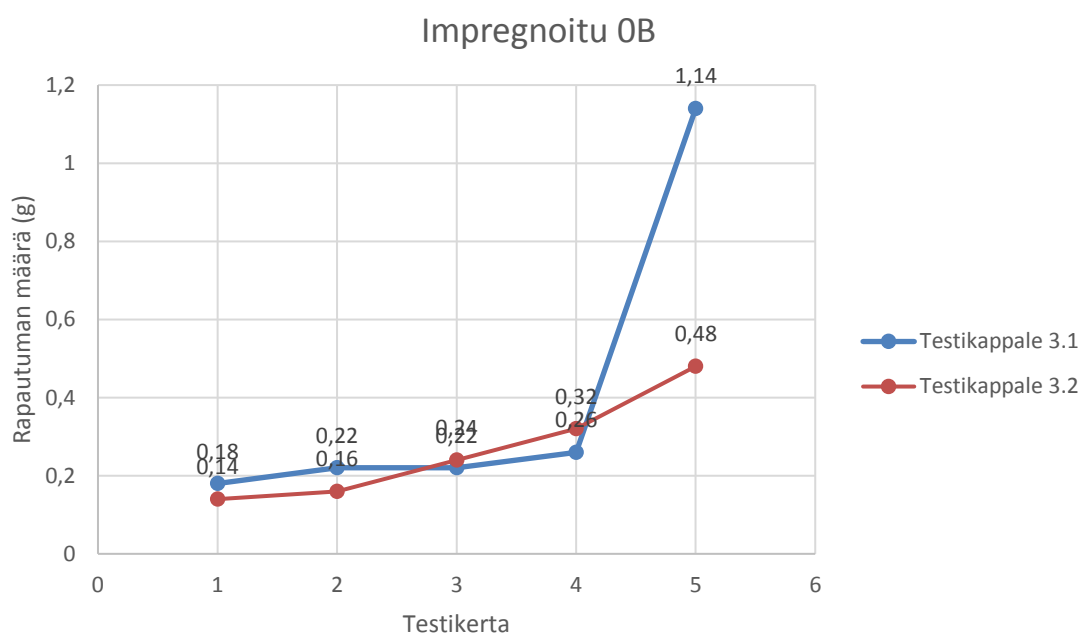
Laatu 0B	1	2
Mittauskerta 1	0,20	0,28
Mittauskerta 2	0,08	0,08
Mittauskerta 3	0,08	0,06
Mittauskerta 4	0,12	0,10
Mittauskerta 5	4,50	1,46
yhteensä (g)	4,98	1,98

Suuri suhteellinen ero viimeisen mittausvälin aikana irronneen rapautuman painossa ei todennäköisesti johdu testiolosuhteista, sillä aiempien testivälien aikana tulokset olivat hyvin yhteneväiset, eikä lämpökäyrissä ollut havaittavissa suurta poikkeavuutta. Ero johtuukin todennäköisesti eroista betonin koostumuksessa.

9.3 Impregnoitu OB

Impregnoitu OB kesti pintakäsittelymättömää OB laatua paremmin pakkasrasitusta. Rapauman määrä oli ensimmäisestä mittauskerrasta lähtien pienempi mitä käsittelemättömällä laadulla (Laatu OB:llä 0,20 - 0,28 g, impregnoitulla 0,14 – 0,18 g) ja pieneni entisestään ensimmäisen mittausvälin jälkeen. Yhden mittausvälin aikana kappaleen 3.1 rapautuman määrä on ollut niin pieni, että tulos on jäänyt negatiiviseksi (-0,1 g), johtuen suodatinpaperin punnituksessa esiintyneistä mit-tavirheestä (Kuvio 3). Kuvaajassa kyseiselle virheelliselle kolmannen testikerran tulokselle on annettu arvo 0, sillä suodatinpaperin paino ei voi vähentyä kuivaamisen aikana.

Kolmannen testikerran (6.9) jälkeen havaittiin, että testikappale 3.2 ei pitänyt vettä sisällään. Testikappaleessa esiintyvän vuodon takia mittaustulokset eivät ole kappaleen 3.2 kohdalla tarkkoja, sillä neste ei ole päässyt vaikuttamaan kappaleeseen standardin vaatimalla tavalla. Tämän vuoksi kokonaisrapautuman määrä jää kappaleessa 3.2 pienemmäksi kuin kappaleessa 3.1.



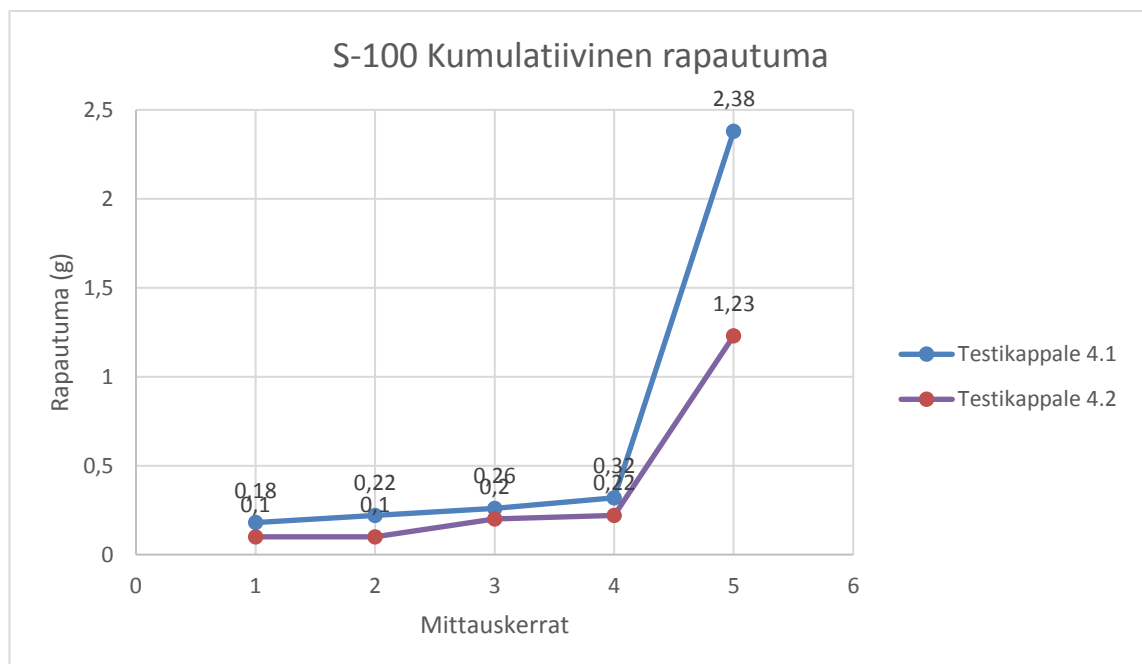
Kuvio 3 Impregnoitujen testikappaleiden kumulatiivinen rapautuma

Impregnoidun laadun kokonaisrapautuma oli testikappaleelle 3.1 114 g/m² ja testikappaleelle 3.2 48 g/m².

9.4 S-100

S-100 tehtävä oli toimia pakkasrapautumatestissä VKU-betonilaatujen pääasiallisena vertailukohtana, sillä se edustaa markkinoilla yleisesti käytettyjä betonilaita. Kyseisen laadun pakkasrapautumatestien tulokset ovat myöhemmän tuoteistamisvaiheen kannalta tärkeitä, sillä niiden perusteella on mahdollista todeta, onko VKU-pohjaiset betonilaadut sopivia luonnonkivipohjaisten betonien korvauksia erityisesti ulkoilmaolosuhteissa, jossa pakkasrapautuminen ja muu kuluminen vaikuttaa voimakkaasti betonirakenteen kestävyys.

OB-laadun ja impregnoidun laadun tavoin myös S-100-laadun voimakkain rapautumisvaihe ajoittui viimeiselle testijaksolle, jolloin tapahtui 86,5 % ja 82,1 % kyseisten betonikappaleiden kokonaisrapautumisesta (Kuvio 4). S-100 kokonaisrapautuma oli kappaleelle 4.1 238 g/m² ja kappaleelle 4.2 123 g/m².



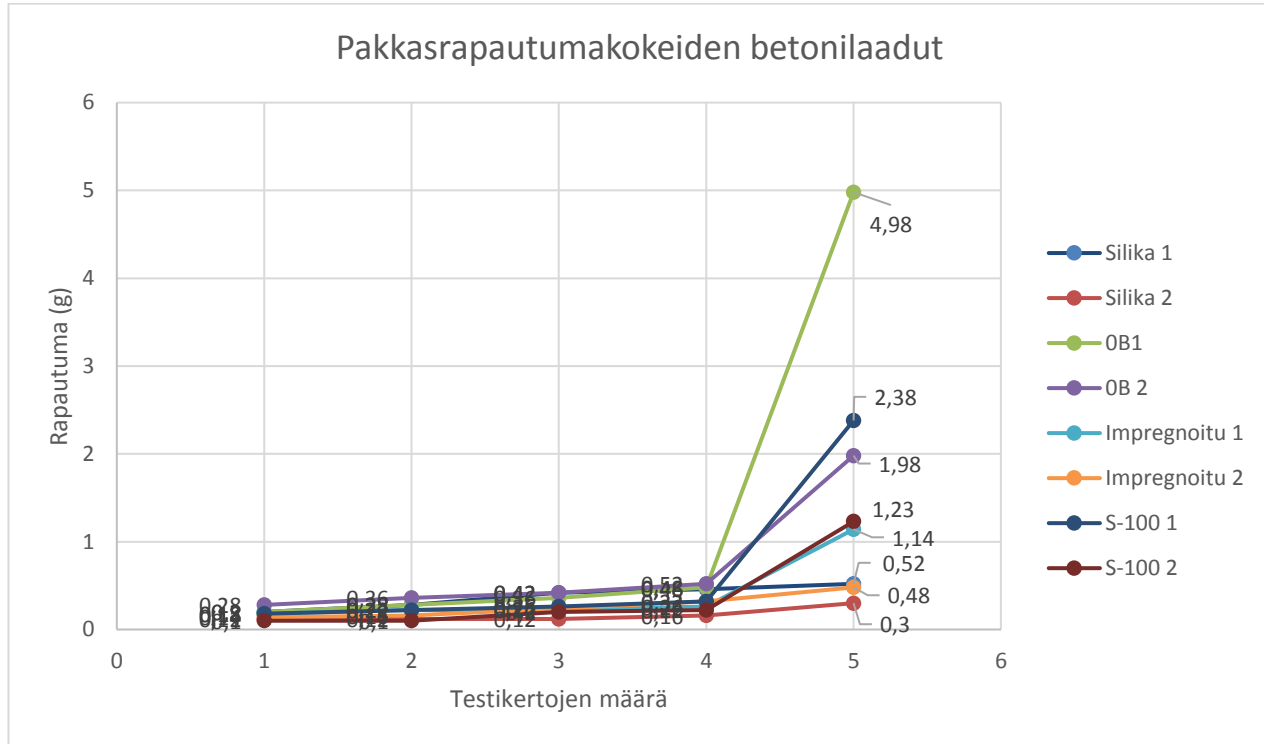
Kuvio 4 S-100 testikappaleiden kumulatiivinen rapautuma

9.5 Kajaanin mittaustulokset

Kuutiotesti suoritettiin Kajaanissa kolmen toisistaan poikkeavan laadun välillä. Impregnoidun, silikan ja kaupan laadun testitulokset olivat seuraavat: S-100 hajoa oli niin suurta 30 syklin jälkeen, ettei täsmällistä tulosta saatu aikaiseksi. impregnoidun OB:n rapautuma oli 3345 g/m^2 ja silikapohjaisen laadun 1188 g/m^2 . Molemmissa testeissä silikan pakkasrapautuma oli muita laatuja pienempi. S-100 laadun ennen aikainen murentuminen esti vertailujen tekemisen VKU-pohjaisten betonilaatujen kanssa.

10 TULOSTEN YHTEENVETO

Kuviossa 5 näkyy opinnäytetyössä tutkittujen betonilaatujen mittaustulokset:



Kuvio 5 Pakkasrapautumakokeiden lopulliset tulokset

Silika-laatua lukuun ottamatta kaikissa muissa laaduissa tapahtui neljännen ja viidennen mittauskerran välissä suuri hyppäys rapautuman kokonaismäärässä (Kuvio 5). VKU-kuonapohjainen OB:n rapautuminen oli kaikista suurinta, sen jälkeen kaupan laadulla ja kolmanneksi impregnoidulla kuonabetonilla. Silikapohjaisella betonilaadulla rapautuma oli kaikista vähäisintä (Taulukko 7) (Taulukko 8).

Taulukko 7 Testilaatujen kokonaisrapautuma (g/m^2)

Betonilaatu	Kokonaisrapautuma (g/m^2)
Silika T1	52 g/m^2
Silika T2	30 g/m^2
OB T1	498 g/m^2
OB T2	198 g/m^2
Impregnoitu T1	114 g/m^2
Impregnoitu T2	48 g/m^2
S-100 T1	238 g/m^2
S-100 T2	123 g/m^2

Taulukko 8 Testattavien betonilaatujen kumulatiivinen rapautuma (g)

Silika 1	Kumulatiivinen
Testikerta 1	0,20
Testikerta 2	0,28
Testikerta 3	0,42
Testikerta 4	0,46
Testikerta 5	0,52
Silika 2	Kumulatiivinen
Testikerta 1	0,12
Testikerta 2	0,12
Testikerta 3	0,12
Testikerta 4	0,16
Testikerta 5	0,30

OB 1	Kumulatiivinen
Testikerta 1	0,20
Testikerta 2	0,28
Testikerta 3	0,36
Testikerta 4	0,48
Testikerta 5	4,98
OB2	Kumulatiivinen
Testikerta 1	0,28
Testikerta 2	0,36
Testikerta 3	0,42
Testikerta 4	0,52
Testikerta 5	1,98

Impregnoitu 1	Kumulatiivinen
Testikerta 1	0,18
Testikerta 2	0,22
Testikerta 3	0,22
Testikerta 4	0,26
Testikerta 5	1,14
Impregnoitu 2	Kumulatiivinen
Testikerta 1	0,14
Testikerta 2	0,16
Testikerta 3	0,24
Testikerta 4	0,32
Testikerta 5	0,48

S-100 1	Kumulatiivinen
Testikerta 1	0,18
Testikerta 2	0,22
Testikerta 3	0,26
Testikerta 4	0,32
Testikerta 5	2,38
S-100 2	Kumulatiivinen
Testikerta 1	0,10
Testikerta 2	0,10
Testikerta 3	0,20
Testikerta 4	0,22
Testikerta 5	1,23

11 JATKOKEHITTELY JA TUOTTEISTAMINEN

Olosuhdekammiossa tutkitut betonilaadut erosivat selvästi toisistaan ominaisuuksiensa perusteella. Luonnonkivipohjaisten betonilaatujen mahdolliseksi korvaajiksi suunnitellut kuonabetonilaadut kestivät pakkasrasitusta toisistaan poikkeavin tavoin. Yksi Tapojärven kuonabetonilaaduista kesti kaupan laatua selvästi huonommin pakkasrasitusta (0B), yksi laadusta osoittautui kaupan laatua hieman kestävämmäksi (Impregnoitu 0B) ja yksi laadusta (silika) selvästi kaupan laatua kestävämmäksi.

Yksi Tapojärven kuonabetonilaatujen tuotteistamiskohteista oli moottoriteiden varrelle pystytettävät meluvallit, joiden kehittelyyn liittyvää yhteistyötä Tapojärvi toteutti Lapin yliopiston teollisten muotoilijoiden kanssa. Kuonabetonipohjaisia rakennelmia on tarkoitus pystyttää Suomen lisäksi myös esimerkiksi Välimeren alueelle, jossa altistuminen merivedelle kuluttaa betonin pintarakennetta.

Tuloksista voidaan päätellä, ettei alkuperäinen kuonabetonilaatu 0B ole suolapakkaskestävyydeltään sen markkinoilla esiintyvää kilpailijaa (S-100) parempi. Pintakäsittelemättömän 0B:n suuri rapauma (498 g/m^2) tekee siitä heikosti soveltuvan niihin olosuhteisiin, jossa betoni joutuu kosteuden ja pakkasen vaikutuksen alaiseksi. Impregnoitun laadun pakkaskestävyys (rapautuman määrä 114 g/m^2) oli pintakäsittelemättömästä 0B-betonilaatua selvästi korkeampi, joten se soveltuu ominaisuuksiensa puolesta paremmin aiemmin mainittuun käyttökohteeseen.

Pakkaskestävyydessään (rapautuman määrä 42 g/m^2) silikapohjainen laatu oli molemmissa testeissä ylivoimainen muihin testilaatuihin verrattuna, jonka vuoksi sitä voidaan pitää pakkasolosuhteisiin erityisen hyvin soveltuvana betonilaatuna. Taloudellisuuden näkökulmasta mikrosilikaa sisältävä kuonabetoni on kustannuksiltaan muita kuonabetonilaatuja hieman kalliimpi, mikä johtuu mikrosilikaa muita betonin seosaineita korkeammasta hinnasta (150 dollaria / tonni). Betonilaadun kokonaiskustannusten näkökulmasta mikrosilikan hinta ei ole kuitenkaan merkittävä, sillä se käsittää vain 0,75 % betonin kokonaispainosta. Tonnin betonierässä materiaalikustannusten lisäys olisi 1,13 dollaria. (Alibaba 2017)

Kajaanissa suoritettut kuutiotestit erosivat numeraalisesti laattatestin tuloksista, johtuen erilaisesta testimetodista. Testin lopputuloksista on kuitenkin havaittavissa sama järjestys mitä Rovaniemellä suoritetuissa laattatesteissä, silikapohjainen betonilaatu osoittautui laatua 0B selvästi kestävämmäksi olosuhdekammion muodostamisessa olosuhteissa. S-100-laatuiset kuutiot eivät kestäneet Kajaanin kuutiotestiä loppuun asti, minkä vuoksi niiden pakkaskestävyys ei ole tarkasti määriteltävissä. (Kajaanin kuutiotesteissä impregnoitun laadun 0B rapautuma oli 3345 g/m^2 ja silikapohjaisen laadun 1188 g/m^2)

Tuloksista voidaan siis todeta, että kuonapohjaiset betonilaadut voivat kestää markkinoilla esiintyviä betonilaatuja paremmin suurten lämpötilamuutosten ja kosteuden aiheuttamia rasituksia. Saatujen tulosten perusteella erityisesti impregnoitun ja silipohjaisten betonien jatkokehittäminen on suotavaa, sillä ne soveltuvat ainakin pakkaskestävyytensä perusteella luonnonkivipohjaisten betonilaatujen korvaajiksi.

12 POHDINTA

Opinnäytetyö tarjosi mielenkiintoisen mahdollisuuden tutustua betoninvalmistukseen ja teollisuuden oheistuotteiden jatkojalostukseen. Olen aiemmin työskennellyt Outokummun terässulatolla, minkä vuoksi Tapojärven toimeksiantoa voidaan pitää aiempaa työkokemusta täydentävänä asiana. Opinnäytetyö synnytti tarkkojen testistandardien osalta myös haasteita, sillä sen tulisi vastata niin toimeksiantajan, koulun kuin myös opiskelijan tarpeisiin. Opinnäytetyön tekeminen aloitettiin tosiasiallisesti keväällä 2017, jolloin valmistettiin pakkasrapautumakoikeissa käytettävät testikappaleet ja saavutettiin yhteisymmärrys halutuista testimeteodeista.

Kevään aikana käytyjen palaverien perusteella alkuperäistä testisarjaa muutettiin omasta toiveestani siten, että yksi kuonabetonilaatu korvattiin kaupan laadulla S-100, joka edusti markkinoilla jo valmiiksi myytäviä luonnonkivipohjaisia betonilaa- tuja. Tämä muutos teki toimeksiannosta entistä mielenkiintoisemman, sillä nyt Tapojärven valmistamia betonilaa- tuja vertailtiin sen markkinoilla esiintyvään kil- pailijaan. Pitkän suunnitteluprosessin jälkeiset pakkasrasituskokeet onnistuivat todella hyvin. Arctic Powerin henkilökunta tarjoama apu oli testien onnistumisen kannalta äärimmäisen tärkeää, sillä he suorittivat rapautuman punnitukset edel- tävänä päivänä antamieni ohjeiden perusteella. Tämä helpotti suuresti omaa jak- samistani, sillä olin rakennustyömaalla kesätyöntekijänä.

Annettu toimeksianto oli laajuudeltaan sopiva opinnäytetyön aiheeksi. Kahden toisistaan poikkeavan testimetodin johdosta se olisi voinut olla myös pitempi, ellei peräti kahden erillisen raportin arvoinen kokonaisuus. Kajaanissa suoritettut kuu- tiotestit järjestettiin Minna Sarkkisen ohjauksessa, enkä siten ollut niitä itse to- teuttamassa. Tämän johdosta Kajaanissa suoritettut testit jäivät tässä opinnäyte- työssä turhan pieneen rooliin. Lukuisista muuttujista huolimatta yhteistyötahojen välinen tiedonkulku oli ongelmaton ja työ eteni ilman suurempia viivästyksiä.

LÄHTEET

Aalto yliopisto. 2015. Betonin rakenne ja ominaisuudet 1

Arctic Power 2016. Arctic Powerin tarina. Viitattu 05.12.2017 <https://www.arcticpower.fi/arctic-power/arctic-powerin-tarina/>

European Standard. 2000. Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.

Finnsementti 2017. Yrityksen verkkosivu. <http://www.finnsementti.fi/index.php?id=1>

Frant A. 2011. VKU2:n kalkin injektointilinjan tarkoituksenmukaisuuden tarkastelu. Konetekniikan koulutusohjelma. Kemi-Tornion Amk. Opinnäytetyö

Kostamo A. 6.2.2017. VKU-kuonabetoniblokit. Tapojärvi Oy. Tutkimusraportti

Lapin Kansa 2.10.2016. Pääkirjoitus. <https://www.lapinkansa.fi/paakirjoitukset/joko-nyt-outokumpu-15716932/>

Metallinjalostajat ry 2014. Teräskirja 9.painos. http://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/teraskirja_flip/mobile/index.html#p=2

Olivier 2015. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. Trends in global CO² emissions. Vuosiraportti

Outokumpu Oyj 2013. Tuotantoprosessi Torniossa ja Kemin kaivoksella. http://www.outokumpu.com/sitecollectiondocuments/tornio_animaatio_printtiversio.pdf

Outokumpu Oyj 2017. Yrityksen kotisivut. Viitattu 05.12.2017. <http://www.outokumpu.com/fi/yritys/Sivut/default.aspx>

Robbie M. A. 2017. Global CO2 emissions from cement production. Earth Syst. Sci. Data Discuss. Vuosiraportti

Salmela R. 2016. Kuonapohjaisen maabetonireseptiikan kehittäminen. Lapin Amk. Opinnäytetyö

Sarkkinen M. 2017. Suolapakkas.xlsx. Betonilaatujen reseptit.

StoCretec. 2016. StoCryl HG 200. Tekninen tietolehti

Suomen standardisoimisliitto SFS 2006-08-21 CEN tekninen spesifikaatio CEN/TS 12390-9

Tapojärvi. 2017. Tapojärvi Oy Historia. Viitattu 5.12.2017.<http://www.tapojarvi.com/>

Tepponen P. 2014. Betonin huokostus. Semtu Oy.

Tiehallinto. 2007. Tiehallinto. Siltojen SILKO korjaus: Betonirakenteet. Betoni sil-lankorjausmateriaalina. Yleiset laatuvaatimukset.

Verkkokauppa Alibaba. Viitattu 23.12.2017. "Price for micro silica for portland cement/volcanic ash".

World Business Council for Sustainable Development. The Cement Sustainability Initiative. 2009. Recycling Concrete. Vuosiraportti

LIITTEET

Liite 1. Punnituspöytäkirja

Liite 1 1(2)

**PUNNITUSPÖYTÄ-
KIRJA**

Lapin ammattikorkeakoulu
Arctic Power
Innokaari 10
96930 ROVANIEMI

Asiakas: Juha Koski-
nen Tapo-
järvi
Oy

Mittaaja: Tuukka Kuru

7+-1				
	suodatin- paperi kuiva (g)	paperi+näyte 2h (g)	Huom.	erotus (g)
15.8.				
1.1	1,20	1,40		0,20
1.2	1,22	1,34		0,12
2.1	1,24	1,44		0,20
2.2	1,24	1,52		0,28
3.1	1,22	1,40		0,18
3.2	1,26	1,40		0,14
4.1	1,22	1,40		0,18
4.2	1,26	1,36		0,10
14+-1				
	suodatin- paperi kuiva (g)	paperi+näyte 2h (g)	Huom.	erotus (g)
22.8.				
1.1	1,36	1,44		0,08
1.2	1,50	1,50		0,00
2.1	1,34	1,42		0,08
2.2	1,44	1,52		0,08
3.1	1,50	1,54		0,04
3.2	1,44	1,46		0,02
4.1	1,40	1,44		0,04
4.2	1,56	1,56		0,00

Liite 1 2(2)

28+-1				
	suodatin- paperi kuiva (g)	paperi+näyte 2h (g)	Huom.	erotus (g)
6.9.				
1.1	1,36	1,50		0,14
1.2	1,34	1,34		0,00
2.1	1,38	1,46		0,08
2.2	1,42	1,48		0,06
3.1	1,50	1,40		-0,10 (= 0 g)
3.2	1,44	1,52		0,08
4.1	1,40	1,44		0,04
4.2	1,36	1,46		0,10

42+-1				
	suodatin- paperi kuiva (g)	paperi+näyte 2h (g)	Huom.	erotus (g)
19.9.				
1.1	1,52	1,56		0,04
1.2	1,78	1,82		0,04
2.1	1,54	1,66		0,12
2.2	1,52	1,62		0,10
3.1	1,62	1,66		0,04
3.2	1,54	1,62		0,08
4.1	1,58	1,64		0,06
4.2	1,60	1,62		0,02
56				
	suodatin- paperi kuiva (g)	paperi+näyte 2h (g)	Huom.	erotus (g)
4.10.				
1.1	1,58	1,64		0,06
1.2	1,58	1,72		0,14
2.1	1,58	6,08		4,50
2.2	1,54	3,00		1,46
3.1	1,56	2,44		0,88
3.2	1,54	1,70		0,16
4.1	1,56	3,62		2,06
4.2	1,58	2,68		1,10