

# VÄHÄHIILIPÄÄSTÖINEN SÄÄNKESTÄVÄ BETONI

TEKIJÄ: Olli-Pekka Kokkonen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Olli-Pekka Kokkonen	
Työn nimi Vähähiilipäästöinen säänkestävä betoni	
Päiväys 10.5.2013	Sivumäärä/Liitteet 27/20
Ohjaaja(t) Lehtori Matti Mikkonen, Pt. tuntiopettaja Juha Pakarinen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Rudus Oy / Laatupäällikkö Rauno Luhio	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia vähähiilipäästöisen säänkestävän betonin ominaisuuksia, jotta tuotetta voidaan markkinoida asiakkaille. Työlle oli tarvetta, koska Rudus Oy ei ollut perusteellisesti tutkinut vihreää säänkestävää betonia Väli-Suomen alueella. Työn tarkoituksena oli selvittää täyttääkö tutkittava betoni Suomen betoninormeissa ja standardeissa asetetut pakkasenkestävyyden vaatimukset ja verrata vähähiilipäästöisen betonin ominaisuuksia perinteiseen säänkestävään betoniin.</p> <p>Työssä tutustuttiin Suomessa betonin valmistamista ohjaaviin betoninormeihin sekä SFS-standardeihin, joiden pohjalta luotiin neljä erilaista suhteitusta, joissa hiilijalanjälkeä pienennettiin korvaamalla sementtiä masuunikuonalla. Suhteitusten pohjana käytettiin vertailtavan säänkestävän betonin reseptiä, johon pyrittiin tekemään mahdollisimman vähän muutoksia. Jokaisesta suhteitusreseptistä valmistettiin betonimassaa tutkimuksia varten Ruduksen Kuopion valmisbetoniasemalla. Betonia analysoitiin tuoreena massana ja betonista myös valettiin koekappaleita puristuslujuus- ja ohuthiekokeisiin. Betonikokeet suoritettiin aikataulun mukaisesti ja tämän jälkeen tutkimustuloksia vertailtiin normaalisti suhteitetun betonin tuloksiin.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena tutkitun vähähiilipäästöisen säänkestävän betonin todettiin täyttävän pakkasenkestävyysvaatimukset ja betonille saatiin laadittua neljä erilaista toimivaa suhteitusta. Betonin lujuudenkehitys oli paljon ennustettua parempaa ja nimellislujuus täyttyi jo 28 vuorokauden iässä. Työssä saatiin myös selvitettyä miten erilaisten tutkimustapojen käyttö vaikuttaa saatuihin tuloksiin. Tuloksien voidaan katsoa olleen hyödyllisiä, sillä vastaavaa tutkimusta ei ollut aikaisemmin tehty ja työlle asetetut tavoitteet saatiin täytettyä.</p>	
Avainsanat Vähähiilipäästöinen, säänkestävä, vihreä, betoni	
Julkinen, Suhteitustietojen osalta luottamuksellinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme In Construction Engineering			
Author(s) Olli-Pekka Kokkonen			
Title of Thesis Weather Resistant Low-Carbon Concrete			
Date	10 May 2013	Pages/Appendices	27/20
Supervisor(s) Mr Matti Mikkonen, Lecturer and Mr Juha Pakarinen, lecturer			
Client Organisation /Partners Rudus Oy / Mr Rauno Luhio, Quality Manager			
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to investigate properties of weather resistant low-carbon concrete so it can be produced for customers. The work was commissioned by Rudus Oy and there was a need for this kind of research since Rudus Oy had not conducted such extensive research about low-carbon concretes. The qualities of low-carbon concrete were analysed by comparing the properties to traditional weather resistant concrete.</p> <p>The research was carried out in the concrete plant of Rudus in Kuopio Finland. First four different proportioning were created by following the Finnish concrete standards. Carbon emission of the concrete was reduced by replacing the cement with blast-furnace cinder. In this research fresh concrete was studied and all the properties were written down. After the fresh concrete was approved to be suitable the concrete was furthermore studied by casting multiple test samples for compressive strength and air-void tests. Determination of the air-void method was used to define the weather resistance of the concrete.</p> <p>As a result of this study low-carbon concrete was stated weather resistant and four different proportioning for weather resistant low-carbon concrete were generated. Development of strength for concrete which contains considerably blast-furnace cinder was noted to be much faster than predicted.</p>			
Keywords Low-carbon, concrete, weather resistant			
Partly confidential			

## ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö tehtiin Rudus Oy:lle vihreän betonin käytöstä säänkestävissä rakenteissa. Haluan kiittää ohjaajaani lehtori Matti Mikkosta, Rudus Oy:n Väli-Suomen yksikön laatupäällikkö Rauno Luhiota ja laborantti Timo Pohjolaista opinnäytetyön aiheesta ja ohjaamisesta. Kiitokseni ansaitsee myös laboratorion työnjohtaja Rauli Laine avusta AVA-kokeiden suorittamisessa.

Kuopiossa 3.5.2013

Olli-Pekka Kokkonen

# SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	7
1.1	Työn tausta ja tavoitteet .....	7
1.2	Rudus Oy .....	7
2	VIHREÄ BETONI .....	8
2.1	Perustiedot .....	8
2.2	Vihreän betonin ominaisuudet .....	8
2.3	Sementin hiilikuorma .....	9
2.4	Masuunikuona .....	9
2.4.1	Masuunikuonan ominaisuudet betonin seosaineena .....	9
2.4.2	Masuunikuonan käyttö normien mukaan .....	10
3	SÄÄNKESTÄVÄ BETONI .....	12
3.1	Pakkasrasitus .....	12
3.2	Rasitusluokat .....	12
3.3	Säänkestävälle betonille asetetut vaatimukset .....	13
3.3.1	Pakkasenkestävyysvaatimukset .....	13
3.3.2	Ilmamäärävaatimukset .....	14
4	BETONIKOKEET .....	15
4.1	Betonin suhteitus .....	15
4.1.1	Suhteitusvaatimukset normien mukaan .....	15
4.1.2	Suhteituksessa käytetyt raaka-aineet .....	16
4.2	Kokeiden suoritus .....	16
4.3	Tuoreen massan ominaisuudet .....	16
5	HIILIDIOKSIDIKUORMALASKENTA .....	18
6	TULOKSET JA VERTAILU .....	19
6.1	Puristuslujuustulokset .....	19
6.2	Ohuthietulokset .....	21
6.3	AVA-analyysi .....	22
7	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	25
	LÄHTEET .....	27

## LIITTEET

Liite 1 Ava-analyysi VS1

Liite 2 Ava-analyysi VS2

Liite 3 Ava-analyysi VS3

Liite 4 Ava-analyysi VS4

Liite 5 Ohuthietutkimusraportti

Liite 6 Ohuthietutkimus VS1

Liite 7 Ohuthietutkimus VS4

Liite 8 Puristuslujuustulokset

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta ja tavoitteet

Opinnäytetyön aiheen sain kesällä 2012 Rudus Oy:n yksikön laatupäälliköltä. Sain aiheen keväällä 2012, kun Rudus Oy toi markkinoille vähähiilipäästöiset eli vihreät betonituotteet.

Vihreässä betonissa suurin osa sementistä korvataan masuunikuonalla tai lentotuhkalla. Tällä tavoin betonin hiilidioksidijalanjälki pienenee, sillä suurin osa betonin hiilidioksidikuormasta syntyy sementin valmistusprosessissa. Työn tavoitteena on tehdä tutkimus, jonka jälkeen vähähiilipäästöisiä säänkestäviä betoneita voidaan markkinoida asiakkaille. Vihreän betonin ominaisuuksia verrataan kokonaisideainemäärältään, rasisluokaltaan ja puristuslujuusvaatimukseltaan vastaavaan normaalisti suhteitettuun säänkestävään betoniin. Työn tuloksena saadaan määritettyä täyttääkö vihreä betoni standardeissa asetetut vaatimukset säänkestävyyden osalta. Lisäksi tarkoituksena on selvittää paras mahdollinen sideainesuhde masuunikuonalle ja sementille ja tutkia miten suuri kuonan sideainesuus vaikuttaa betonin ominaisuuksiin.

Tutkimuksessa vihreälle betonille laaditaan neljä suhteitusta, jotka ovat keskenään identtisiä lukuun ottamatta masuunikuonan ja sementin sideaineosuuksien vaihtelua. Opinnäytetyö tehdään tutkimalla tuoreen vihreän betonimassan ominaisuuksia ja valamalla koekappaleita puristuslujuus- ja ohut-hiekokeisiin. Betonista tehdään myös laattakoe, mutta kokeen pitkäkestoisuuden takia sitä ei käsitellä tässä työssä vaan tulokset jäävät yrityksen käyttöön.

Opinnäytetyössä käytetään lähteenä Rudus Oy:n sisäistä materiaalia sekä keskusteluja yrityksen henkilöstön kanssa.

## 1.2 Rudus Oy

Rudus Oy:n historia yltää vuoteen 1897 asti, jolloin Lohjan Kalkkitehdas Osakeyhtiö perustettiin. Nykyiseen muotoon yhtiön nimi muutettiin tammikuussa 2008. Rudus Oy:n toimialoihin kuuluu valmisbetoni, betonituotteet, kiviaines, murskausurakointi ja kierrätys. Toimintaa yrityksellä on Suomessa, Venäjällä ja Baltian maissa. Vuonna 2012 Rudus-konsernin liikevaihto oli 340 miljoonaa euroa ja yritys työllisti noin 1 100 henkilöä. Rudus Oy:llä on yli 60 valmisbetonitehdasta ympäri Suomea ja yritys on yksi maan suurimmista infrarakentajista. Vuodesta 1999 lähtien Rudus on kuulunut irlantilaiseen CRH pl -konserniin, joka toimii yhteensä 36 maassa. (Ruduksen www-sivut.)

## 2 VIHREÄ BETONI

### 2.1 Perustiedot

Vihreä betoni eli vähähiilipäästöinen betoni on betonilaatu, jonka tuottamisessa valitaan hiilidioksidipäästöjä vähentäviä ratkaisuja, pyrkien täten merkittävästi parantamaan betonin ympäristöystävällisyyttä. Tärkeimmät keinot hiilipäästöjen pienentämiseen ovat materiaalivalinnat, raaka-aineiden kuljetusmatkojen minimointi ja valmistustekniikka. Betonivalmistajan kannalta suurin vähennys hiilikuormaan saadaan vähentämällä puhtaan Portlandsementin käyttöä, sillä perinteisen betonin sisällyttämisestä hiilidioksidikuormasta jopa 90 % tulee sementistä. (Vihreät betonit 2011, 1.)

Portlandsementti CEM I:n sijasta voidaan käyttää valmista seossementtiä, kuten Plussementtiä (CEM II/B-M 42.5 N) tai Yleissementtiä (CEM II/A-M 42.5 N), joiden sementtipitoisuus on 5–15 % pienempi kuin Portlandsementillä. Kaikkein tehokkain keino pienentää betonin hiilikuormaa on korvata sementtiä seosaineilla, kuten masuunikuonalla tai lentotuhkalla ja joissakin tapauksissa myös silikalalla. Saatavuuden takia lentotuhkaa käytetään pääasiassa Etelä-Suomessa, kun taas masuunikuonaa käytetään Länsi- ja Keski-Suomessa. Silika on kallis seosaine, jota käytetään pieniä määriä esimerkiksi kemiallisesti kestävässä betoneissa. Koska eri alueilla on käytössä eri raaka-aineet, joudutaan vihreän betonin ominaisuuksia tutkimaan kullakin alueella erikseen. (Vihreät betonit 2011, 1.)

Tämän opinnäytetyön kirjoittamisen aikaan Rudus Oy:n Kuopion valmisbetoniasemalla sideaineina olivat käytössä yleissementti ja masuunikuona. Tästä syystä tässä opinnäytetyössä keskitytään näihin kahteen materiaaliin.

### 2.2 Vihreän betonin ominaisuudet

Vihreällä betonilla on normaalisti suhteitettua rakennebetoniin verrattuna niin positiivisia kuin negatiivisia ominaisuuksia. Betonin lopulliset ominaisuudet määräytyvät rakennuskohteen, sideainemäärien ja ympäristöolosuhteiden, kuten lämpötilan mukaan. Yleisesti vihreän betonin hyviä ominaisuuksia ovat (Vihreät betonit 2011, 3):

- vähäinen lämmönkehitys rakenteessa
- hyvä pumpattavuus ja hierrettävyys
- pitkä työstöaika
- ympäristöystävällisyys.



Suuri hienoainesmäärä parantaa huomattavasti betonimassan työstettävyyttä ja pumpattavuutta. Vähäinen sementin sideaineisuus madaltaa hydraatiolämpöä ja hidastaa lujuudenkehitystä, josta voi olla myös haittaa. Vihreän betonin huonoja ominaisuuksia ovat (Vihreät betonit 2011, 3):

- betonivalun lämmitystarve kylmällä säällä
- hidas sitoutuminen
- pitkä jälkihoito- ja muotipurkuaika.

### 2.3 Sementin hiilikuorma

Sementti on hydraulinen sideaine, joka kovettuu reagoidessaan veden kanssa. Sementin pääraaka-aineena käytetään kalkkikiveä, josta saadaan kalsiumkarbonaattia ( $\text{CaCO}_3$ ). Lisäksi sementin valmistamiseen tarvitaan piioksidia ( $\text{SiO}_2$ ), rautaoksidia ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) ja alumiinioksidia ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Kalkkikivi ja muut raaka-aineet murskataan hienoksi jauheeksi, jonka jälkeen raakajauhe poltetaan kiertouunissa portlandklinkkeriksi. Sementin ominaisuuksia voidaan muuttaa säätämällä mm. klinkkerin koostumusta, sementin jauhatushienoutta ja käytettävien seosaineiden suhteita. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 39–40.)

Merkittävin ympäristökuorma sementtituotannossa on hiilidioksidi. Hiilidioksidia syntyy sementin raaka-aineen kalkkikiven poltosta ja polttoaineesta, jota tarvitaan polttouunien ja kuljetuskaluston voimanlähteenä. Finnsementti Oy:n mukaan vuonna 2011 yhden Portlandsementtitonnin tuottamisessa vapautui noin 700 kg hiilidioksidia. (Ympäristöraportti 2012, 12.)

### 2.4 Masuunikuona

Masuunikuonajauhetta saadaan jauhamalla raakaraudan valmistusprosessissa syntyvää granuloitua masuunikuonaa. Masuunikuonajauhe on piilevästi hydraulinen sideaine, jonka ominaisuudet heräävät sementin ja veden reagoidessa syntyvän kalsiumhydroksidin vaikutuksesta. Masuunikuonan reaktiivisuus määräytyy kuonan rakeiden hienoudesta ja lasimaisuusasteesta (Finnsementti). Koska masuunikuona on terästeollisuuden sivutuote, sen käyttäminen betonin sideaineena lisää hiilidioksidikuormaa vain kuljetuksista aiheutuvien päästöjen verran.

#### 2.4.1 Masuunikuonan ominaisuudet betonin seosaineena

Masuunikuonan käyttö betonissa hidastaa lujuudenkehitystä, minkä takia varhaislujuus on selvästi alhaisempi kuin perinteisellä betonilla. Toisaalta kuonalla lujuudenkehitys jatkuu pidempään kuin sementillä, jonka takia vihreiden betoneiden laadunarvosteluikä nä käytetään 91 vuorokautta, normaalin 28 vuorokauden sijasta. Masuunikuonajauhe vähentää betonimassan vedentarvetta, jonka ansiosta betoni on notkeampaa. Masuunikuona vähentää myös betonin hydratoitumislämpöä huomattavasti, minkä ansiosta se soveltuu erittäin hyvin massiivirakenteiden valuihin. Lisäksi kuonan käyttö hidastaa kloriditunkeumaa ja parantaa kemiallista kestävyyttä. Tästä johtuen betoni, jonka masuunikuonapitoisuus kokonaissideainemäärästä ylittää 70 % luokitellaan sulfaatinkestäväksi.

Ei-toivottuna ominaisuutena masuunikuona lisää betonin virumaa lievästi. (Suomen Betoniyhdistys 2004, 60.)



Kuva 1: Halkaistu vihreä betoni koekappale.

Kuva Olli-Pekka Kokkonen

Runsas masuunikuonan käyttö betonissa voi joskus aiheuttaa sinertävää värisävyä betonipinnalle, joka useimmiten ajan kuluessa vähitellen katoaa. Masuunikuonan käyttö yleensä värjää kovettuneen betonin sisuksen hyvin tummaksi, kuten kuvasta 1 käy ilmi. Tämä ei kuitenkaan näy betonin ulkopuolisista pinnoista. (Vihreät betonit 2011, 5)

#### 2.4.2 Masuunikuonan käyttö normien mukaan

Uusimpien voimassaolevien betoninormien mukaan masuunikuonan seosainekertoimena voidaan käyttää k-arvoa 1,0 rasisluokissa X0, XC1, XF1 JA XF3. Muissa rasisluokissa seosainekertoimelle käytetään arvoa 0,8 (SFS 7022 2011, 3.). Masuunikuonan suurin sallittu seosainelisäys rasisluokassa XF3 saadaan betoninormien mukaan laskettua kaavasta (Suomen Betoniyhdistys 2011, 104).

$$\frac{(100 - k_{ss} - 0,25k_s) - 2,22 \text{ lt} - 9,0 \text{ sil}}{0,25}$$

(1)

jossa,

kss	on sementin sisältämien kaikkien seosaineiden summa [%]
ks	on sementin sisältämä kuona [%]
lt	on sementin sisältämän ja lisätyn lentotuhkan yhteismäärä [%]
sil	on sementin sisältämän ja lisätyn silikan yhteismäärä [%].

Tässä opinnäytetyössä käytettiin Finnsementti Oy:n Lappeenrannan tehtaan yleissementtiä (CEM II/A-M 42.5 N). Finnsementin laatuinformaation mukaan käytetty yleissementti sisälsi 5 prosenttiyksikköä masuunikuonaa. Sementti ei sisällä muita seosaineita, eikä niitä lisätty betoniin. Täten masuunikuonan suurimmaksi seosainelisäysprosentiksi saadaan.

$$\frac{(100-5-0,25*5)}{0,25} = 375 \% \quad (2)$$

Vastaavasti masuunikuonan suurimmaksi sallituksi kokonaissideaineosuudeksi saadaan.

$$\frac{375}{375+100} = 78,9 \% \quad (3)$$

## 3 SÄÄNKESTÄVÄ BETONI

### 3.1 Pakkasrasitus

Säänkestävä betoni tarkoittaa säärasitukselle alttiina olevaa betonituotetta. Suurinta rasitusta betonille ulko-olosuhteissa aiheuttaa toistava jäätyminen ja sulaminen. Lämpötilan laskiessa miinuksen puolelle betoniin imeytynyt vesi jäätyy ja vaurioittaa betonia laajetessaan. Pakkasrasituksen vakaavuus määräytyy sen mukaan, miten märkää betoni on jäätymishetkellä. Tästä syystä vaakasuuntaiset rakenteet ovat paljon herkempiä pakkasvaurioille kuin pystysuuntaiset rakenteet. Rakenteiden kestävyyttä voidaan parantaa suunnittelemalla niin, ettei vesi tai lumi kerry rakenteen pinnalle, eikä viistosade tai tuuli pääse kastelemaan pystypintoja (Kuosa 2000, 2).

Vesi imeytyy betoniin sementtikiven kapillaarihuokosten kautta. Mitä enemmän kapillaarihuokosia on ja mitä yhtenäisempi kapillaariverkosto, sitä nopeammin vesi imeytyy betoniin. Pientämällä betonin vesisementtisuhdetta betonista tulee tiiviimpää, jolloin kapillaarihuokosten määrä pienenee. Samalla kun vesisementtisuhde pienenee, betonin lujuus kasvaa. Luja betoni kestää pakkasrasituksen aiheuttamia vauriota paremmin, muttei kuitenkaan estä vaurioiden syntymistä. Betonin huokostamisella on myös haittapuoli, sillä betonin sisältämän kokonaisilmamäärän kasvaessa 1 prosenttiyksiköllä betonin lujuus laskee noin 5 %. Erityisesti suuret tiivistyshuokokset laskevat betonin puristuslujuutta. (Kuosa 2000, 3.)

### 3.2 Rasitusluokat

Säänkestävän betonin kohtaama rasitus vaihtelee betonirakenteen sijoittamispaikan mukaan. Tästä johtuen säärasitukselle alttiit betonit on luokiteltu neljään eri XF-rasitusluokkaan. Rasituksen vakauteen vaikuttaa vedelle kyllästymisaste, rakenteen suunta joko pysty- tai vaakarakenne, merivedestä aiheutuvat kloridit ja jäänsulatusaineiden käyttö. Tässä opinnäytetyössä tutkittava betoni on suhteitettu kestävään jäädytys-sulatusrasitusta, jotka määritellään seuraavasti (Suomen Betoniyhdistys 2011, 89–90.):

- XF1: Kohtalainen vedelle kyllästyminen, pystysuorat betonipinnat
- XF2: Kohtalainen vedelle kyllästyminen ja jäänsulatusaineet, pystysuorat betonipinnat
- XF3: Suuri vedelle kyllästyminen, vaakasuorat betonipinnat
- XF4: Suuri vedelle kyllästyminen ja jäänsulatusaineet tai merivesi, vaakasuorat betonipinnat.

Talonrakentamisessa käytetään yleensä betonia, joka täyttää rasitusluokan XF1 tai XF3. Nämä betonit soveltuvat mm. julkisivuihin, sokkeleihin, parvekkeisiin ja sillan rakenteisiin joihin ei kohdistu suolarasitusta. Rasitusluokat XF2 ja XF4 kestävät myös tiesuolan aiheuttamaa rasitusta ja soveltuvat näin siltojen kansilaattoihin ja reunapalkkeihin ja pysäköintihallien rakenteisiin. Viimeiseksi mainituissa rasitusluokissa betonille asetetaan yleensä myös pakkasenkestävyysluokka eli P-luku vaatimus (Suomen Betoniyhdistys 2011, 89–90).

### 3.3 Säänkestävälle betonille asetetut vaatimukset

Betonille asetetut vaatimukset on otettu uusimmista käytössä olevista Suomen Betoniyhdistyksen betoninormeista ja Suomen Standardisoimisliiton SFS-standardeista.

#### 3.3.1 Pakkaskestävyysvaatimukset

Taulukko 1: Kovettuneen betonin pakkaskestävyys vaatimukset  
(Suomen Betoniyhdistys)

Suunniteltu käyttöikä [a]	Rasitusluokka	1		2			3	
		Huokosjako VTT TEST-R003-00- 2010 mukaan <sup>1)</sup>		Jäädytys-sulatuskoe, SFS 5447 <sup>3)</sup>			Laattakoe CEN/TR 15177 luokissa XF1 ja XF3 <sup>4)</sup> , CEN/TS 12390-9 luokissa XF2 ja XF4, jälkimmäisessä väliaine 3 % NaCl-liuos	
		Enimmäisarvo [mm]		Sykliä lukumäärä	Taivutus- tai halkaisu- vetolujuuksien suhde [%]	Suhteellinen dynaaminen kimmokerroin Y [%]	Rapauma m [g/m <sup>2</sup> ]	Suhteellinen dynaaminen kimmokerroin Y [%]
w/c > 0,40	w/c ≤ 0,40							
50	XF1	0,27	0,27	100	≥ 67	≥ 75	m <sub>56</sub> ≤ 500	Y <sub>56</sub> ≥ 67
	XF2	0,25	0,30	-	-	-	m <sub>56</sub> ≤ 400	-
	XF3	0,23	0,23	300	≥ 67	≥ 75	m <sub>56</sub> ≤ 200	Y <sub>56</sub> ≥ 75
	XF4	0,25	0,30	-	-	-	m <sub>56</sub> ≤ 200	-
100	XF1	0,25	0,25	300	≥ 67	≥ 75	m <sub>56</sub> ≤ 200	Y <sub>56</sub> ≥ 75
	XF2 <sup>2)</sup>			-	-	-		-
	XF3	0,22	0,22	-	-	-	m <sub>56</sub> ≤ 100	Y <sub>56</sub> ≥ 85
	XF4 <sup>2)</sup>			-	-	-		-

<sup>1)</sup> Huokosjako voidaan selvittää hyväksytyssä testauslaitoksessa ohut- tai pintahieestä myös muulla soveltuvalla menetelmällä, jonka korrelaatio suhteessa referenssimenetelmään on todettu testauslaitosten välisellä tasokokeella.

<sup>2)</sup> InfraRYL 2006 kohdan 42020.1.2 mukaiset vaatimukset

<sup>3)</sup> Vaatimuksen tulee täyttää joko lujuuden tai kimmokertoimen osalta.

<sup>4)</sup> Vaatimusten tulee täytyä sekä kimmokertoimen että pinnan rapauman osalta.

Suomessa betonin pakkaskestävyys voidaan todeta kolmella menetelmällä, joko huokosjaon määrittämisellä, jäädytys-sulatuskokeella tai laattakokeella. Kunkin menetelmän raja-arvot on luetteloitu taulukkoon 1. Jotta betoni voidaan luokitella pakkaskestäväksi riittää, että se täyttää vaatimukset yhdessä edellä mainitussa menetelmässä. Betonivalmistaja saa itse valita käytettävän menetelmän. Pakkaskestävyyden vaatimukseen vaikuttaa betonin suunnittelukäyttöikä, rasitusluokka ja vesisementtisuhde. Tässä opinnäytetyössä betonin pakkaskestävyys on tutkittu käyttämällä huokosjako-menetelmää. (Suomen Betoniyhdistys 2011, 240.)

### 3.3.2 Ilmamäärävaatimukset

Taulukko 2: Tiivistettävän betonin vähimmäisilmamäärät rasitusluokissa XF1 ja XF3 (Suomen Betoniyhdistys)

Rasitusluokka	Betonin sallittu ilmamäärä [%]		
	D = 8 mm	D = 12 mm	D ≥ 16 mm
XF1	4,5	4,0	3,5
XF3	5,0	4,5	4,0

Betonin vähimmäisilmamäärävaatimukseen vaikuttaa betonille asetettu rasitusluokka ja kiviaineksen ylänimellisraja D. Taulukossa 2 on ilmoitettu tuotannon vähimmäisilmamäärät Betoninormit 2012 BY50:n mukaan. Kiviaineksen ylänimellisrajan kasvaessa ilmamäärävaatimus vastaavasti pienenee. Lisäksi XF3-luokassa vaatimus on suurempi, vakavamman pakkasrasituksen takia. Rasitusluokissa XF2 ja XF4 vähimmäisilmamäärälle ei ole asetettu kiinteää arvoa vaan se määritellään P-luku ohjeiden mukaan. (Suomen Betoniyhdistys 2011, 110.)

## 4 BETONIKOKEET

### 4.1 Betonin suhteitus

Vihreän betonin suhteituksen pohjana käytettiin ominaisuuksiltaan vastaavan perinteisen säänkestävän betonin ja vihreän betonin ennakkokokeen suhteituksia. Betonireseptit laadittiin seuraamalla betoninormeissa ja SFS-standardeissa asetettuja suhteitusvaatimuksia ja reseptit tehtiin käyttämällä Ruduksen Kuopion valmishetoniaseman suhteituskonetta. Vihreitä betoneita tehtiin neljällä eri suhteituksella, joiden masuunikuonan sideaineosuudet olivat 60, 65, 70 ja 75 %. Kuonaosuudet valittiin sillä perusteella, että ne kattavat mahdollisimman laajan alueen ja täten saadaan konkreettista tietoa miten kuonaosuuden kasvattaminen vaikuttaa tuoreen betonin sekä lopputuotteen ominaisuuksiin.

#### 4.1.1 Suhteitusvaatimukset normien mukaan

Taulukko 3: Sallitut sementin ja seosaineet eri rasitusluokissa (Suomen Betoniyhdistys)

	Rasitusluokat																	
	Ei korroosion tai rasituksen vaaraa	Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio				Kloridien aiheuttama korroosio			Jäätymis-sulamis-rasitus				Aggressiivinen kemiallinen rasitus					
						Merivesi		Kloridit muusta kuin merivedestä										
	X0	XC 1	XC 2	XC3	XC 4	XS1	XS 2	XS 3	XD 1	XD 2	XD 3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
Sallitut sementtityypit	Ei säilyvyyden aiheuttamia rajoituksia. Kaikki standardin SFS-EN 197-1 mukaiset sementit ovat sallittuja.			II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V	II/A-S II/B-S II/A-D II/A-V II/B-V
Seosainekertoimet:																		
Silika w/c ≤ 0,45	2,00			2,00			2,00			2,00		2,00	2,00	2,00	2,00			2,00
w/c > 0,45	1,00			1,00			1,00			1,00		1,00	1,00	1,00	1,00			1,00
Lentotuhka <sup>4)</sup>	1,00			0,40			0,40			0,40		1,00	0,40	1,00	0,40			0,40
Masuunikuona	1,00			0,80			1,00			1,00		1,00	0,80	1,00	0,80			0,80 (1,00)
Esimerkkejä sallituista seosaineiden enimmäisliäyksistä %-osuuksina sementin CEM I painosta <sup>5)</sup>																		
Seosaine:	X0	XC 1	XC 2	XC3	XC 4	XS1	XS 2	XS 3	XD 1	XD 2	XD 3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
Silika	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	21	21
Lentotuhka	100	100	45	45	30	45	30	45	30	45	30	45	30	45	30	45	21	21
Masuunikuona	1900	1900	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375	100	375	100	375	21	21

1) Sulfaattipitoisessa ympäristössä käytetään joko SFS-EN 197-1 kohdan O.2 mukaista sulfaattikestävää sementtiä tai sideaineen tulee sisältää masuunikuonaa vähintään 70 % sideaineen kokonaismäärästä

2) Suunnittelija valitsee käytettävän sideaineen valitsevan kemiallisen rasituksen mukaan.

3) Kaikkikiivijauheen osuus enintään 15 %

4) Lentotuhkan aktiivisuuskertoimen arvona pidetään 0 siltä osin, kun tuhkan ja sementin paino-osuuksien suhde ylittää arvon 0,33 rasitusluokissa X0, XC 1, XF1 ja XF3 lukuun ottamatta. Käytettäessä lujuusluokan 32,5 sementtiä lentotuhkan aktiivisuuskertoimen arvona pidetään 0,20 rasitusluokissa XC2, XC3, XC4, XF2, XF4, XS-, XD- ja XA-luokissa siltä osin, kun tuhkan ja sementin paino-osuuksien suhde alittaa arvon 0,33. Muutoin aktiivisuuskertoimen arvona pidetään näissä luokissa 0.

5) Kaikki sallittujen sementtien ja seosaineiden yhdistelmät ovat sallittuja, kunhan seoksen koostumus täyttää sallittujen sementtien koostumukselle standardissa SFS-EN 197-1 asetetut vaatimukset.

Tässä opinnäytetyössä tutkittavan betonin lujuusluokaksi valittiin Eurokoodin mukainen C30/37 ja rasitusluokaksi säänkestävissä rakenteissa yleisesti käytettävä XF3. Notkeusluokaksi päätettiin S2 ja kiviaineksen maksimiraekooksi 16 mm, lisäksi betoni suhteitettiin täyttämään vaatimukset 100 vuoden suunnittelukäyttöäille. SFS-standardien mukaan kyseessä olevan betonin vähimmäissideainemäärän tulee olla  $300 \text{ kg/m}^3$ , vesi-sementtisuhde enintään 0,50 ja tavoite ilmamäärän 5,5 %, jotta betonin täyttää sille asetetut vaatimukset. Taulukon 3 mukaan masuunikuonan seosaineker- toimena voidaan käyttää arvoa 1,0 lisäksi masuunikuonan enimmäisliäyukseksi prosenttiosuuksina

sementin CEM I painosta 375 %, mikä täsmää kohdassa 2.3.2 betoninormeista lasketun arvon kanssa. (SFS 7022 2011, 4–5.)

#### 4.1.2 Suhteituksessa käytetyt raaka-aineet

Rasitusluokan mukaan masuunikuonan seosainekertoimeksi määräytyi 1,0 joten kokonaissideainemäärä oli täsmälleen sama kuin vertailubetonissa. Reseptien suhteitus perustettiin aiemmin tehdyn ennakkokokeen pohjalle. Kunkin kokeen jälkeen suhteituksia hienosäädettiin lisäaineiden osalta, jotta betonin ominaisuudet saataisiin lähemmäksi haluttua tasoa.

Sideaineina suhteituksessa käytettiin Finnsementti Oy:n yleissementtiä (CEM II/A-M 42.5 N) sekä masuunikuonajauhetta. Kiviaineksena betonissa käytettiin soramurskettä 12-16 mm (SrS 12/16), kalliiosepiä 6-12 mm (KaS 6/12), Soramurskaa 0-8 mm (SrM 0/8) ja fillerihiekkaa 0-2 mm. Lisäaineena käytettiin Ilma-Parmix huokostinta ja Glenium SKY 600 notkistinta. Tarkat suhteitustiedot kullekin betonireseptille on raportoitu luottamukselliseen osioon.

#### 4.2 Kokeiden suoritus

Kokeet aloitettiin suhteituksella, jossa masuunikuonan sideaineisuus oli 60 %. Betoni valmistettiin Kuopion valmisbetoniaseman sekoittajalla ja kokeet tehtiin 2 m<sup>3</sup>:n annoksista, jotta betonimassan tasalaatuisuus saatiin varmistettua. Suuremmissa annoksissa annosteluvirhemarginaali automatiikan suorittamassa raaka-aineiden punnituksessa pienenee, jolloin betonimassan raaka-aineiden annostelu on mahdollisimman lähellä tavoitetta. Laboratoriossa betonimassasta mitattiin ensin lämpötila ja painuma. Tämän jälkeen massaa analysoitiin AVA-kokeella (air void analyzer), jolla pystytään määrittämään huokoisjako tuoreesta betonista. Lopuksi betonista valmistettiin neljä halkaisijaltaan 150 mm lieriökoe kappaletta ja kolme 150x150x150 mm<sup>3</sup> kuutiokappaletta. Lieriökappaleista tehtiin 7, 28 ja 91 vuorokauden puristuslujuuskappaleet ja yksi kappale huokosjakokokeeseen, kun taas kuutiokappaleet valmistettiin pakkasrapautumista tutkivaa laattakoetta varten.

Betonikokeet tehtiin Kuopion valmisbetoniasemalla 30.–31.1.2013. Koekappaleet purettiin noin 2 vuorokautta valun jälkeen vihreän betonin hitaan alkulujuudenkehityksen vuoksi. Tämän jälkeen kappaleet siirrettiin vesikaappiin, jossa oli tasainen +20 °C:n lämpötila ja 100 % suhteellinen kosteus, mikä on ideaalinen olosuhde betonin lujuudenkehityksen kannalta. Kappaleita säilytettiin vesikaapissa siihen asti kunnes ne koeistettiin tai lähetettiin jatkotutkimuksiin.

#### 4.3 Tuoreen massan ominaisuudet

Annosteluraportteja tutkimalla huomattiin, että automatiikan suorittamassa annostelussa oli tapahtunut 0-8 mm kiviaineksen punnituksessa häiriö, jonka seurauksena sitä annosteltiin useita satoja kiloja, eli lähes 20 prosenttia yli tavoitteen. Hieno kiviaines sisältää noin 5 prosenttiyksikköä vettä, jonka takia tavoiteltu kokonaisvesimäärä ja vesi-sementtisuhteet ylittyivät. Sama annosteluvirhe toistui tasaisesti jokaisessa kokeessa, joten betonimassat pysyivät kuitenkin vertailukelpoisina keskenään.



Taulukko 4: Tuoreiden betonimassojen ominaisuudet

Valupäivä	Tunnus	Kuonaosuus	Painuma (mm)	Lämpötila (°C)	Mitattu ilmamäärä	Ilmamäärä (AVA-koe)
30.1.2013	VS-1	60 %	125	15	3,8 %	4,0 %
31.1.2013	VS-2	65 %	120	13	4,4 %	6,6 %
31.1.2013	VS-3	70 %	140	12	5,0 %	9,6 %
31.1.2013	VS-4	75 %	123	15	4,8 %	6,8 %

Standardissa SFS-EN 12350-2 määritetty painumaluokka S2 täyttyy, kun tuore betonimassa painuu kokoon 50–90 mm painumakartiolla mitattuna. Jokaisessa tehdyssä kokeessa tavoiteltu painuma ylittyi. Tätä osittain selittää masuunikuonan vedentarvetta vähentävä ominaisuus ja toisaalta koe-massoissa ylittynyt tavoitevesimäärä. Betonimassojen tavoitelämpötila oli 15 °C.

Ilmamäärät massoissa saatiin mittaamalla ilmamäärämittarilla ja lisäksi AVA-kokeen analyysistä. Ensimmäisen kokeen jälkeen reseptin huokostinmäärää nostettiin jotta ilmamäärä saatiin lähemmäksi tavoiteltua 5,5 prosenttiyksikköä. Betoninormeissa määritetty 4,0 prosenttiyksikön vähimmäisilmamäärä, alittui ainoastaan ensimmäisessä kokeessa. (Suomen Betoniyhdistys 2011, 110.)

Tuoreen massan työstettävyyks oli erittäin hyvää luokkaa kullakin reseptillä, täysin verrattavissa vertailubetoniin. Masuunikuona selvästi notkistaa betonia ja lisäksi pidentää työstämisaikaa huomattavasti. Tärytetyn massan yläpintaan kertyvää sementtigelä ei myöskään muodostunut normaalia enempää.

## 5 HIILIDIOKSIDIKUORMALASKENTA

Betonin valmistaja voi merkittävästi vähentää betonin sisältämää hiilidioksidikuormaa mm. seuraavilla menetelmillä (Vihreät betonit 2011, 1.):

- käyttämällä mahdollisimman vähän puhdasta sementtiä
  - käyttämällä seossementtejä (esim. yleissementtiä tai plussementtiä)
  - korvaamalla sementtiä seosaineilla mahdollisimman paljon
- pienentämällä betonin sisältämää kokonaisvettä käyttämällä notkistinta
- käyttämällä kierrätettyä kiviainesta
- käyttämällä mahdollisimman alhaista lujuusluokkaa
- minimoimalla raaka-aineiden ja betonin kuljetusmatkat.

Opinnäytetyön betoneissa ei ollut mahdollista käyttää kierrätettyä kiviainesta, eikä kuljetusmatkoihin voitu vaikuttaa. Hiilijalanjälkeä pienennettiin käyttämällä mahdollisimman vähän sementtiä, notkistinta ja alhaista lujuusluokkaa.

Opinnäytetyössä laadittujen neljän reseptin hiilidioksidikuormia vertailtiin samat lujuus- ja rasitusluokkavaatimukset täyttävään normaalisti suhteitettuun säänkestävään betoniin. Vertailubetonin sisältämä 5 prosenttiyksikköä masuunikuonaa selittyy Yleissementin sisältämästä masuunikuonasta, muita seosaineita suhteituksessa ei ole. Lisäksi kunkin taulukossa 5 esitetyn betonireseptin kokonaissideainemäärä on täsmälleen sama.

Taulukko 5: Betoneiden hiilidioksidikuormien vertailu

Resepti	Kuonaosuus	CO <sub>2</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	CO <sub>2</sub> osuus vertailusuhteitukseen verrattuna
Vertailubetoni SK C30/37	5 %	279,7	100 %
VS-1 C30/37	60 %	132,0	47 %
VS-2 C30/37	65 %	118,6	42 %
VS-3 C30/37	70 %	103,2	37 %
VS-4 C30/37	75 %	89,9	32 %

Taulukoidut arvot ovat resepteistä laskettuja teoreettisia hiilidioksidimääriä, jonka verran kukin betonimassa sisältää kuutiometriä betonia kohden. Luvut puhuvat puolestaan, tutkitut vihreät betonit sisältävät 53–68 % vähemmän hiilidioksidia kuin vertailubetoni, mikä on huomattava säästö ympäristön kannalta ajatellen.

## 6 TULOKSET JA VERTAILU

### 6.1 Puristuslujuustulokset

Ruduksen Kuopion betoniasemalla vihreän betonin puristuslujuus on määritetty 91 vuorokauden tuloksella masuunikuonan hitaan lujuudenkehittymisen takia. Normaalisti suhteitettujen vertailubetoneiden puristuslujuutta tutkitaan 7 vrk:n ennakkokokeella ja lopullinen lujuus määritetään 28 vuorokauden iässä. Opinnäytetyössä tutkittavien betoneiden vertailu toteutetaan samassa lujuudenkehitysvaiheessa kuin vertailubetoneillakin konkreettisemmän tuloksen saamiseksi, mutta vertailuarvoa 91 vuorokauden puristuslujuustuloksille ei ole. Yksityiskohtaiset puristuslujuustulokset on raportoitu liitteessä 8.



Kuva 2: Puristuskoeistettu betonikappale.

Kuva Olli-Pekka Kokkonen

Koekappaleet koeistettiin Ruduksen Kuopion laboratoriossa kalibroidulla puristimella. Koekappaleet otettiin kuivumaan vuorokausi ennen koeistamista ja kappaleiden puristuspinnat tasattiin käyttämällä rikkiseosmenetelmää. Menetelmässä koekappaleen molemmat päät pinnoitetaan rikkipinnoiteseoksella laskemalla koekappale ohjuren avulla pystysuorassa kulmassa levyn päälle sulatettuun rikkiseokseen. Pinnoituksen jälkeen varmistetaan, että rikkipinnoite on tarttunut koekappalee-

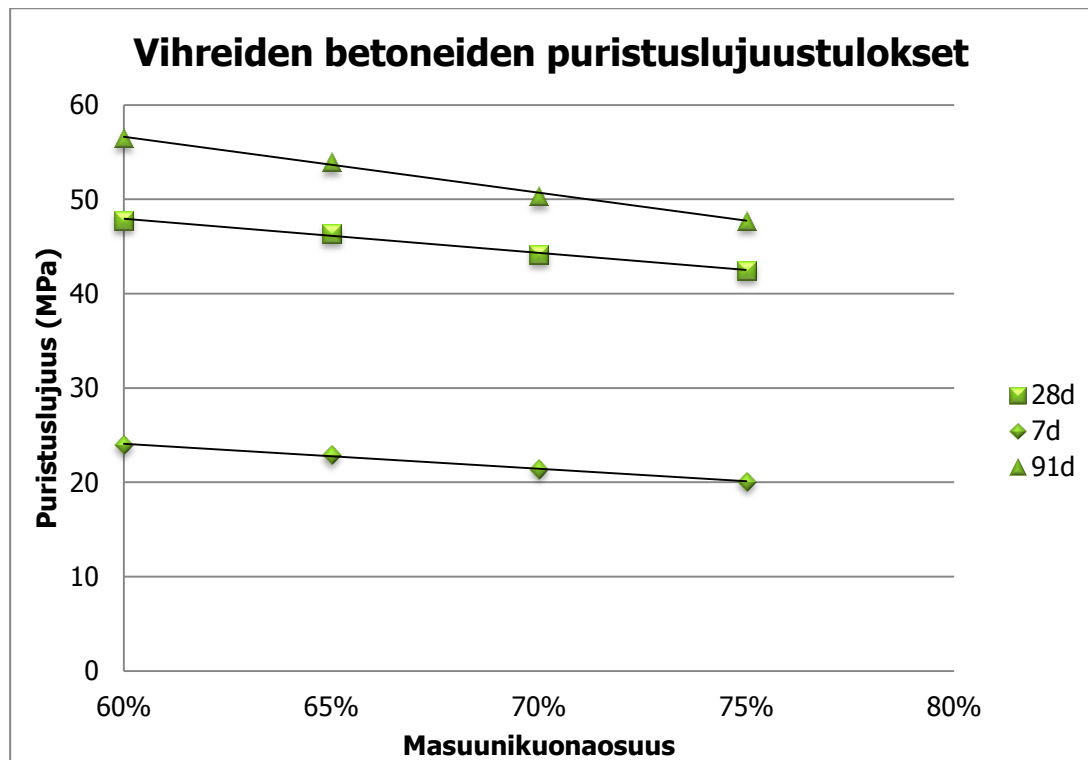
seen, pinnoitekerros on yhtenäinen ja pinnoitetut päät ovat suoria. Puristustestaus voidaan suorittaa kun pinnoite on kovettunut 30 minuuttia (SFS-EN 12390-3 2009, 15). Pinnoittamalla koekappaleet saadaan tasalaatuisempi tulos eliminoimalla mahdolliset pintojen epätasaisuudesta aiheutuvat heitot puristuslujuudessa.

Kuva 2 osoittaa että puristettu koekappale on murtunut hyväksyttävällä tavalla. Murtuma on tapahtunut läpi koekappaleen, puristuspinnat ovat olleet tasaiset, eikä massa ole erottunut kappaleen ylä- tai alapäässä. Myöskään suuria tiivistyshuokosia koekappaleen pinnoilla ei näy. Tämän perusteella voi arvioida koekappaleen valun onnistuneen hyvin.

Taulukko 6: Vihreän betonin ja vertailubetonin puristuslujuustulokset

Vihreät betonit				7d	28d	91d		Toteutunut
Valupäivä	Tunnus	Lujuusluokka	Kuonaosuus	Lujuus (MPa)	Lujuus (MPa)	Lujuus (MPa)	Tiheys (kg/dm <sup>3</sup> )	v/s
30.1.2013	VS-1	C30/37	60 %	24,0	47,8	56,5	2,41	0,54
31.1.2013	VS-2	C30/37	65 %	22,9	46,4	54,0	2,38	0,52
31.1.2013	VS-3	C30/37	70 %	21,4	44,2	50,4	2,37	0,52
31.1.2013	VS-4	C30/37	75 %	20,1	42,5	47,8	2,33	0,53
Vertailu betonit				7d		28d		Toteutunut
Valupäivä	Tunnus	Lujuusluokka	Kuonaosuus	Lujuus (MPa)	Tiheys (kg/dm <sup>3</sup> )	Lujuus (MPa)	Tiheys (kg/dm <sup>3</sup> )	v/s
20.11.2012	1262	C32/40	10 %	31,3	2,33	46,0	2,36	0,48
7.11.2012	1250	C32/40	10 %	33,2	2,33	47,0	2,34	0,48
31.10.2012	1244	C32/40	0 %	33,7	2,37	45,7	2,39	0,51
11.11.2011	1722	C28/35	0 %	31,5	2,35	42,3	2,35	0,49

Taulukkoon 6 on raportoitu tutkittujen vihreiden betoneiden ja vertailubetoneiden tiheydet ja puristuslujuudet 7, 28 ja vihreillä betoneilla lisäksi 91 vuorokauden iässä. Vertailubetoneina on käytetty Ruduksen Kuopion valmisbetonitehtaalla tehtyjä koekappaleita säänkestävistä betoneista, joiden kiivainneksen yläraja ja rasitusluokka ovat vastaavanlaiset kuin tutkituissa betoneissa. Koska euronormin mukaisesta C30/37 lujuusluokasta ei ollut saatavilla vertailukappaleita, niiden lujuusluokka on vanhan K-lujuuden mukainen 35 tai 40 MPa. Kappaleet ovat kuitenkin hyvin vertailukelpoisia, sillä niiden kokonaissideainemäärä on lähes sama kuin vihreissä betoneissa. Vertailubetoneiden mitatut ilmamäärät vaihtelivat välillä 5,2–5,5 prosenttiyksikköä, joka myös on vertailukelpoinen arvo. Tutkittujen betoneiden lieriölujuudet on muunnettu vastaamaan 150 mm:n kuutiolujuutta käyttämällä Suomen Betoniyhdistyksen Betonitekniiikan oppikirja 2004 BY201 -käsikirjan muunto-ohjetta. Betoni-koekappaleiden tiheys on laskettu kappaleiden tilavuudesta ja massasta.



Kuvio 1: Masaunikuonan vaikutus betonin puristuslujuuteen

Kuvioon 1 piirretyt puristuslujuustulokset osoittavat kuinka vihreillä betoneilla lujuus laskee lähes lineaarisesti sitä mukaa kun masaunikuonan sideaineosuus kasvaa. Vastaavasti betonin tiheys pienenee, sillä masaunikuona on sementtiä kevyempää. 7 vuorokauden iässä vihreiden betoneiden keskiarvolujuus on 10,33 MPa pienempi kuin vertailubetoneilla. Kuitenkin 28 vuorokauden iässä eroa oli vain 0,02 MPa vertailubetoneiden eduksi, mikä on paljon ennustettua parempi lujuustaso. Lisäksi on huomionarvoista, että VS-1 koekappaleen puristuslujuus 28 vuorokauden iässä on suurempi kuin yhdelläkään vertailukappaleella.

## 6.2 Ohuthietulokset

Betonin ohuthietutkimukset teetettiin Savonia AMK:n Rakennusalan tutkimus- ja yrityspalvelulla, VTT TES R003-00-2010 menetelmän mukaan pientahieestä. Koetuslaitos antoi luvan julkaista tutkimuksen yksityiskohtaiset tiedot, jotka on raportoitu liitteissä 5–7. Kokeessa saadaan selville kovettuneen betonin suojahuokosten ominaispinta-ala, kokonaisilmamäärä ja suojahuokosten keskimääräinen huokosjako. Tutkimukseen lähetettiin pienimmällä ja suurimmalla masaunikuonamäärällä tehdyt kappaleet VS-1 ja VS-4, joiden tuloksia verrataan vertailubetoniin. Ohuthietutkimuksen tulokset on raportoitu taulukkoon 7.

Taulukko 7: Ohuthietutkimukset

Tunnus	Kuonaosuus	Mitattu ilmamäärä	Kokonaisilmamäärä	Suojahuokosten ominaispinta-ala (mm <sup>-1</sup> )	Suojahuokosten huokosjako (mm)
VS-1	60 %	3,8 %	3,5 %	46,23	0,13
VS-4	75 %	4,8 %	4,9 %	37,15	0,14
1722 OH	0 %	5,2 %	4,7 %	38,37	0,13

Suomen betoniyhdistyksen mukaan tutkittavan betonin suojahuokosten huokosjaon enimmäisarvoksi määräytyy 0,22 mm, joka selviää taulukosta 1. Arvolla kuvataan suojahuokosten välistä keskimääräistä etäisyyttä ja tulos 0,13 mm on erittäin hyvä tulos. Vaatimusta huokosten ominaispinta-alalle ei ole, mutta arvoa joka on suurempi kuin 30 mm<sup>-1</sup> voidaan pitää hyvänä tuloksena. Pintahietutkimuksessa saadaan selville myös kovettuneen betonimassan sisältämä kokonaisilmamäärä. Arvot ovat hyvin lähellä tuoreista massoista mitattuja arvoja, vihreissä betoneissa eroa on ollut enimmillään vain 0,3 %. Standardeissa asetettu vähimmäisilmamäärävaatimus 4,0 prosenttiyksikköä betonin tilavuudesta alittuu tässäkin tutkimuksessa vain koekappaleessa VS-1. (SFS 7022 2011, 5–10.)

### 6.3 AVA-analyysi

AVA-analyysi eli Air Void Analyzer on menetelmä jolla voidaan tutkia tuoreen betonimassan ilmahuokosanalyysi. Betonimassasta otetaan 20 millilitran näyte, joka sekoitetaan AVA-laitteen pohjalla olevaan viskositeettinesteeseen, johon massan sisältämät ilmahuokokset irtaantuvat. Ilmahuokokset siirtyvät hiljalleen viskositeettinesteen yläpuoliseen vesipatsaaseen. Vesipatsaan yläpinnassa sijaitseva lautanen kerää ilmahuokokset ja mittaa ilmakuplien tuottaman nosteen, josta laitteisto analysoi suojahuokosten kokojakauman. AVA-tuloksia ei voida suoraan verrata kovettuneesta betonista saatuihin ohuthietuloksiin. Pienet ilmahuokokset voivat yhdistyä suuremmiksi huokosiksi ja suuret saattavat poistua massasta kokonaan. Lisäksi eroja analyysitapojen välillä aiheuttaa erilaiset mittaus- ja laskentatavat (Kuosa 2000, 6–7).



Kuva 3: AVA-laitteisto. Kuva Olli-Pekka Kokkonen

AVA-analyysi tehtiin jokaiselle tutkitulle vihreälle betonimassalle käyttämällä Rudus Oy:n laitteistoa. Vertailubetonille ei ole saatavilla tuloksia AVA-analyysistä, sillä tuloksia käytettiin betonin suhteituksen hienosäätämiseen kokeiden edetessä. AVA-tuloksia kuitenkin voidaan verrata ohuthietutkimuksen tuloksiin. Kuvassa 3 on esitetty käynnissäoleva AVA-analyysi, jossa betoni on sekoitettu laitteen pohjalla olevaan viskositeettinesteeseen.

Taulukko 8: AVA-analyysin tulokset

Tunnus	Kuonaisuus	Mitattu ilmamäärä (%)	AVA ilmamäärä (%)	Sementtilaasti <6 mm (%)	Sementti pasta (%)	Suojahuokosten ominaispinta-ala (mm <sup>-1</sup> )	Suojahuokosten huokosjako (mm)
VS-1	60 %	3,8	4,0	80,3	30,5	33,3	0,169
VS-2	65 %	4,4	6,6	79,9	31,1	33,1	0,136
VS-3	70 %	5,0	9,6	79,7	29,8	31,2	0,099
VS-4	75 %	4,8	6,8	79,7	30,6	36,9	0,120

AVA-analyysi antaa arvot suojahuokosten ominaispinta-alalle ja huokosjolle kuten ohuthietutkimuskin. Lisäksi koe analysoi sementtilaastin ja pastan prosentuaaliset osuudet massasta. AVA-kokeet tehtiin betonimassasta välittömästi massan valmistuksen jälkeen. AVA-analyysia varten betonimassaa vibrattiin 150x150x150 mm kuutioon, josta 20 ml näyte otettiin. Taulukossa 8 ilmoitettu *mitattu ilmamäärä* on mitattu kalibroidulla ilmamäärämittarilla, kun taas *AVA ilmamäärä* tarkoittaa AVA-

laitteiston analysoimaa kokonaisilmamäärää. Juuri ilmamäärissä onkin suuria eroja mittaustapojen välillä, eräänä syynä todennäköisesti on suurimpien ilmahuokosten massasta poistuminen.

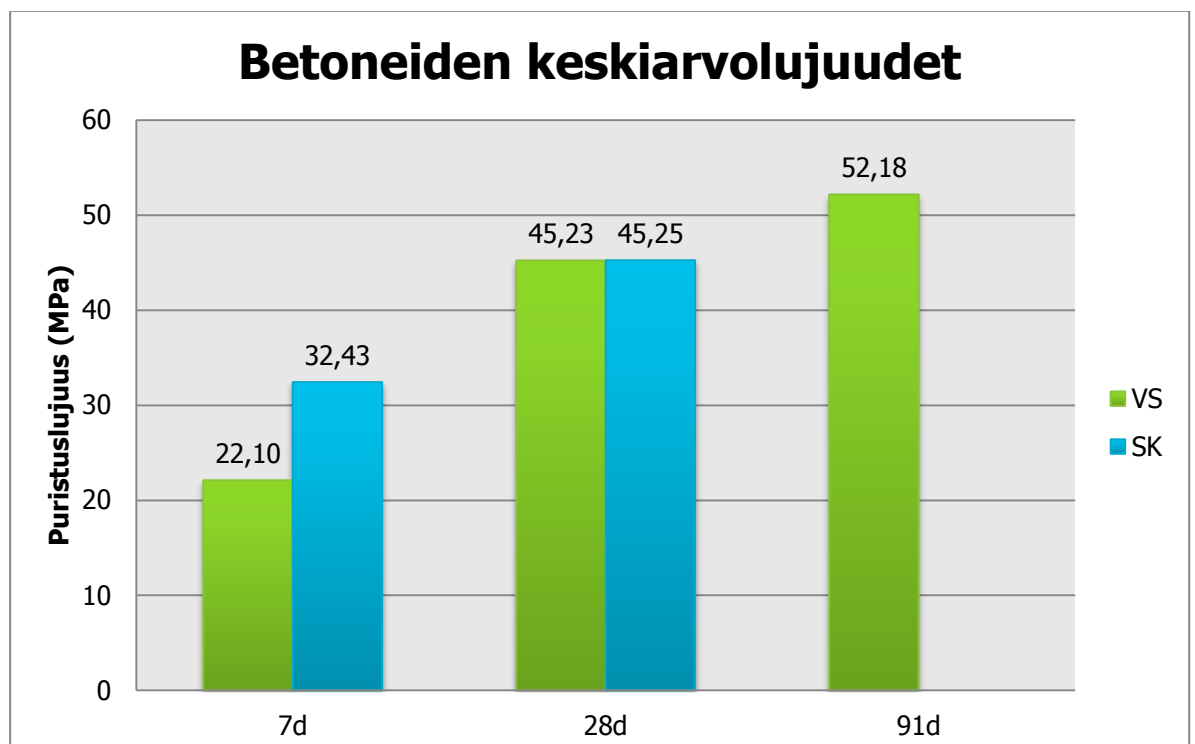
Myös AVA-laitteistolla analysoidut suojahuokosjakotulokset täyttävät pakkaskestävyyden vaatimukset. Lisäksi tulokset olivat hyvin samankaltaisia kuin kohdassa 6.2 käsitellyt kovettuneen betonin ohuthietulokset. Eroa tutkimustapojen välillä oli koekappaleella VS-1 0,2 mm ja koekappaleella VS-4 0,2 mm.



## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia vähähiilipäästöisen säänkestävän ominaisuuksia ja verrata niitä nykyisin käytössä olevan säänkestävän betonin ominaisuuksiin. Vihreästä betonista valettiin koekappaleita erilaisia tutkimuksia varten ja myös tuoreen betonimassan ominaisuuksia analysoitiin.

Vihreä betoni suhteitettiin vastaamaan normaalia säänkestävää betonia mahdollisimman suurella tarkkuudella. Kokonaissideainemäärä pysyi täsmälleen samana, sillä uusimpien normien mukaan rasitusluokassa XF3 masuunikuonalla voidaan käyttää aktiivisuuskerrointa 1,0. Tutkitussa neljässä reseptissä masuunikuonaa käytettiin 60–75 % kokonaissideaineesta. Vihreän betonin suhteituksessa käytettiin samaa kiviainesjakaumaa kuin vertailubetonissa, kokonaisvesimäärää ja lisäaineiden annostelua täytyi hienosäätää. Vihreästä betonista tutkittiin puristuslujuutta ja säänkestävyys määritettiin huokosjako-menetelmällä. Tuoreen betonimassan suojahuokosjako tutkittiin myös AVA-analyysillä.



Kuvio 2: Vähähiilipäästöisen ja vertailtavan betonin keskimääräinen puristuslujuus

VS on vähähiilipäästöinen säänkestävä betoni

SK on normaalisti suhteitettu säänkestävä betoni

Betonit suhteitettiin C30/37 lujuusluokkaan ja koekappaleiden puristuslujuus koeistettiin 7, 28 ja 91 vuorokauden iässä, joiden keskiarvot on esitetty kuviossa 2. Odotusten mukaisesti suuri masuunikuonan sideaineisuus hidasti betoneiden alkulujuuden kehitystä ja 7 vuorokauden iässä vihreät betonit olivat keskimäärin saavuttaneet 60 % nimellislujuudestaan 22,1 MPa:n lujuudella, mutta tulos jäi jälkeen noin 10 MPa vertailu betonien lujuudesta. 28 vuorokauden puristuslujuuskokeessa

vihreiden betoneiden lujuus oli kehittynyt paljon ennustettua paremmin ja keskiarvolujuudeksi saatiin 43,2 MPa, joka on lähes täsmälleen sama kuin normaalisti suhteitetulla säänkestävällä betonilla ja 8,2 MPa yli nimellislujuuden. Lopulliseen 91 vuorokauden koetusikään mennessä betonien lujuus kehittyi vielä 7 MPa lisää antaen keskilujuudeksi 52,2 MPa. Puristuslujuuden osalta vihreät betonit täyttivät vaatimukset reilusti.

Betoneiden suojahuokosten huokosjako tutkittiin jokaisesta massasta AVA-analyysillä ja kovettuneesta betonista teetätettiin kaksi tutkimusta. Jokainen AVA-mittaus ja ohuthiekoe alitti reilusti tutkittavalle betonille normeissa määritellyn huokosjaon yläarvon 0,22 mm. Erot huokosjakotuloksissa kahden analyysitavan välillä olivat hyvin pienet. Eroa syntyy kun huokosjakoa tutkitaan tuoreesta massasta ja kovettuneesta betonista. Tulosten perusteella tutkittu betoni voidaan luokitellaan pakkasen kestäväksi 100 vuoden suunnittelukäyttöiällä. Ruotsissa betonin tutkimuslaitoksessa suoritettava laattakoe menetelmän CEN/TS 12390-9 mukaan tulee osoittamaan betonin pakkas-suolarasituskestävyyden. Valitettavasti aikataulusyistä tutkimuksen tulokset eivät kerinneet tähän opinnäytetyöhön.

Kokonaisuudessaan opinnäytetyössä tehty tutkimus oli onnistunut ja työlle asetetut tavoitteet saatiin täytettyä. Vähähiilipäästöinen säänkestävä betoni osoittautui ominaisuuksiltaan erittäin hyväksi betonilaaduksi, joka on täysin kilpailukykyinen nykyisten säänkestävien betonilaatujen kanssa. Vähähiilipäästöisten säänkestävien betoneiden tutkimista kannattaa jatkaa, jotta betonin ilmamäärä saadaan lähemmäksi tavoitetta ja saadaan varmistettua että tavoitevesimäärällä betonimassan notkeus täyttää painumaluokan vaatimuksen.

## LÄHTEET

Finnsementti. Tuotteet. Seosaineet. Masuunikuonajauhe KJ400. [viitattu 3.3.2013]. Saatavissa: <http://www.finnsementti.fi/>

Kuosa, H. 2000. *Betonin pakkakestävyyden varmistaminen – osa 1* [verkkodokumentti]. Betoniteollisuus ry. [viitattu 15.4.2012]. Saatavissa: [http://www.betoni.com/Download/21781/BL\\_2000\\_2\\_s30\\_36.pdf](http://www.betoni.com/Download/21781/BL_2000_2_s30_36.pdf)

Rudus Oy:n www-sivut. [viitattu 2.5.2013]. Saatavissa: [www.rudus.fi](http://www.rudus.fi)

SFS-EN 12350-2 2009. *Tuoreen betonin testaus. Osa 2: Painuma*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS RY.

SFS-EN 12390-3 2009. *Kovettuneen betonin testaus. Osa 3: Koekappaleiden puristuslujuus*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS RY.

SFS 7022 2011. *Betoni. Standardin SFS-EN 206-1 käyttö Suomessa*. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS RY.

Suomen Betoniyhdistys. 2004. *Betoniteknikan oppikirja 2004 By 201*. 5. uudistettu painos. Helsinki: Suomen Betonitieto.

Suomen Betoniyhdistys. 2011. *Betoninormit 2012 By 50*. 1. painos. Helsinki: BY-Koulutus Oy.

Vihreät Betonit. 2011. Rudus. [viitattu 13.2.2013]. Rudus intranet. Dokumentti yrityksen hallussa.

*Ympäristöraportti 2012*. [verkkodokumentti]. Finnsementti [viitattu 26.2.2012]. Saatavissa: <http://www.pinta.fi/asiakkaat/finnsementti/ymparistoraportti2012/files/assets/downloads/publication.pdf>

LIITTEET

Liite 1 Ava-analyysi VS1

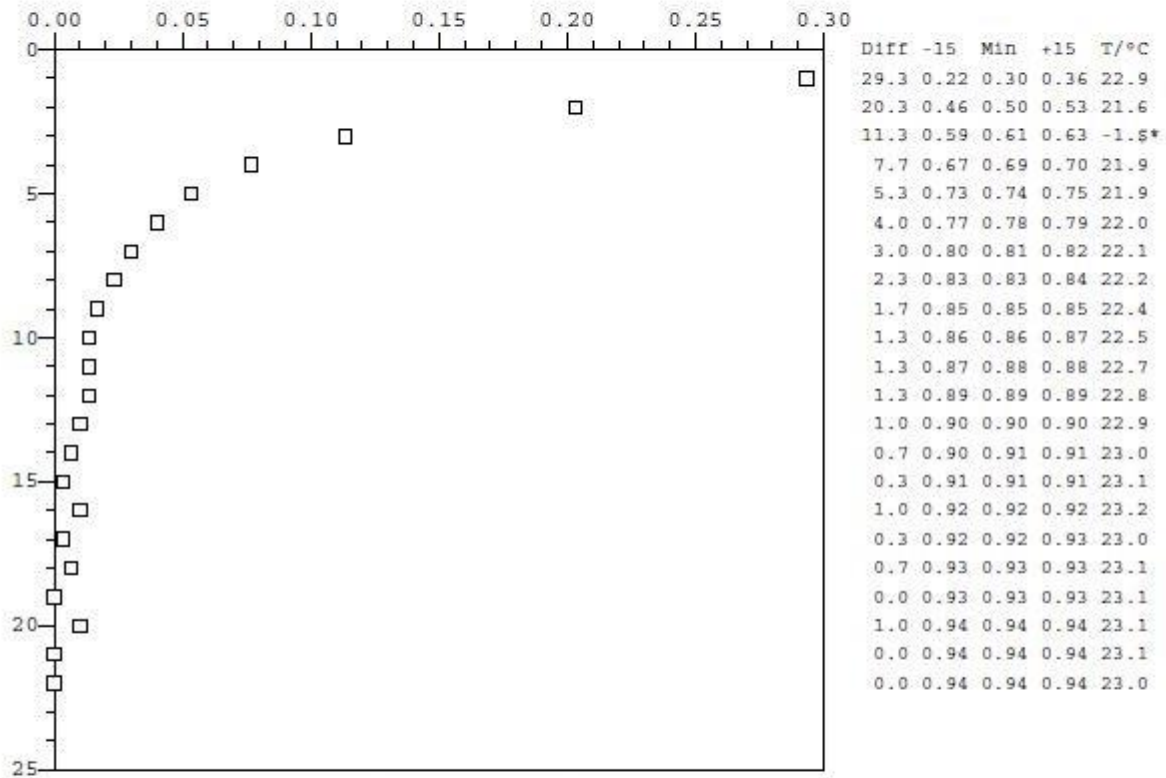
### DBT - Air Void Analyzer Series 2/2.0 rudus

#### Measurement of 2013-01-30 15:31

Sampler : RLa  
 Ordered by : Kuopio  
 Sample location: VS 1  
 Case number : 30.1.12  
 Sample number : 1  
 Mortar <6mm : 80.3 %  
 Expected air % : 5.0 %  
 Paste : 30.5 %  
 Sample volume : 20.0 cm<sup>3</sup>

#### Analysis

Start:0.00g +5sec:0.00g +30sec:0.15g Temp:20.6°C



#### Results (adjusted to correlate with ASTM C457)

Chord length : < 2mm < 0.35mm  
 Air-% concrete : 4.0 % 3.2 %  
 Air-% paste : 13.0 % 10.3 %  
 Air-% putty : 11.5 % 9.1 %  
 Specific surface : 33.3 mm<sup>-1</sup>  
 Spacing factor : 0.169 mm

\*NOTE: Temperature out of range 21.0-25.0°C. The measurement must be repeated.

#### Comments

> Mitattu ilma 4%  
 > Lämpö 15 C  
 > Painuma 12  
 > Masuunikuona 60%

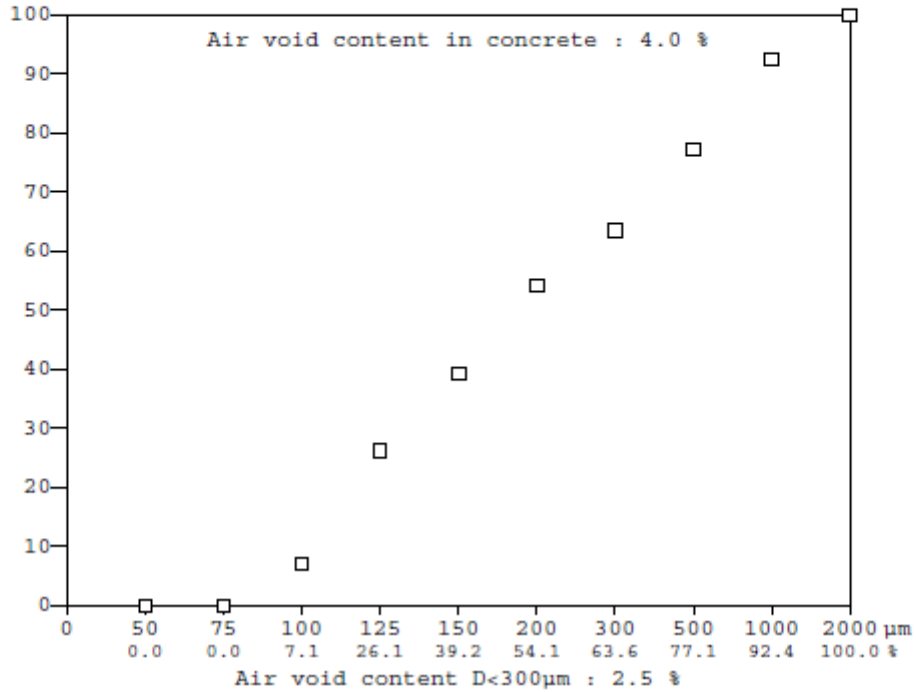
Sign: \_\_\_\_\_

**DBT - Air Void Analyzer Series 2/2.0**  
**rudus**

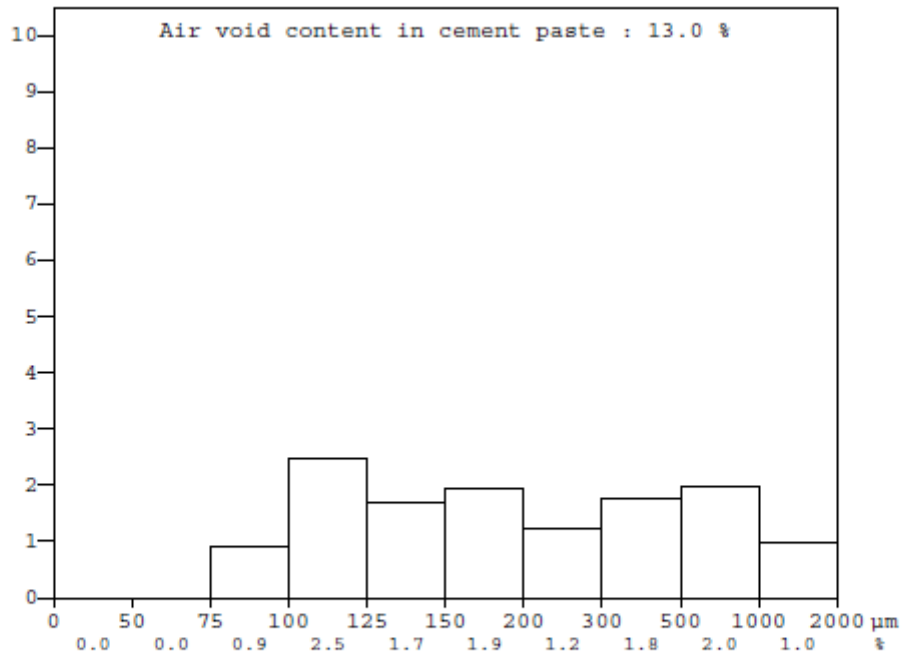
**Measurement of 2013-01-30 15:31**

Case number : 30.1.12  
 Sample number : 1

**Distribution of air void content for voids < 2mm (%)**



**Distribution of air void content in cement paste for voids < 2mm (%)**



Liite 2 Ava-analyysi VS2

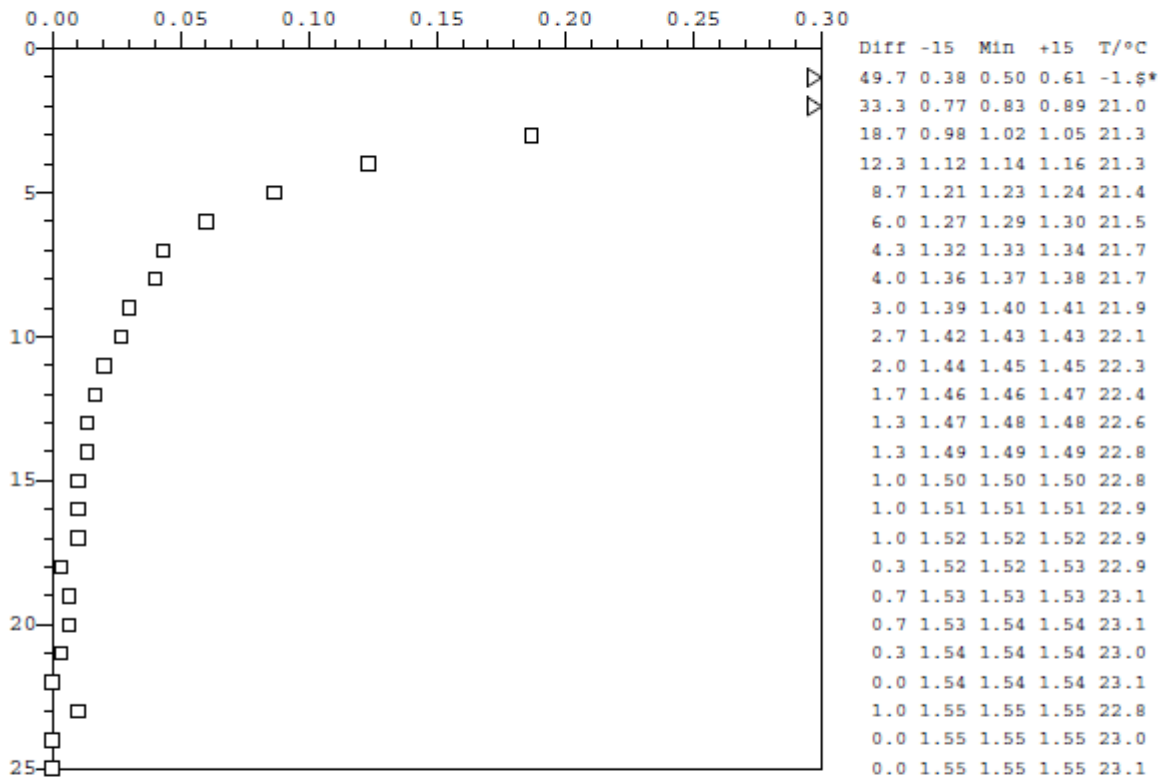
**DBT - Air Void Analyzer Series 2/2.0  
rudus**

**Measurement of 2013-01-31 08:57**

Sampler : R1a  
 Ordered by : Kuopio  
 Sample location: VS 2  
 Case number : 31.1.13  
 Sample number : 2  
 Mortar <6mm : 79.9 %  
 Expected air % : 5.0 %  
 Paste : 31.1 %  
 Sample volume : 20.0 cm<sup>3</sup>

**Analysis**

Start:0.00g +5sec:0.00g +30sec:0.26g Temp:21.9°C



**Results (adjusted to correlate with ASTM C457)**

Chord length : < 2mm < 0.35mm  
 Air-% concrete : 6.6 % 5.2 %  
 Air-% paste : 21.6 % 17.0 %  
 Air-% putty : 17.8 % 14.0 %  
 Specific surface : 33.1 mm<sup>-1</sup>  
 Spacing factor : 0.136 mm

\*NOTE: Temperature out of range 21.0-25.0°C. The measurement must be repeated.

**Comments**

- > Mitattu ilma 4.4
- > Lämpö 13 C
- > Painuma 12
- > Masuunikuona 65&

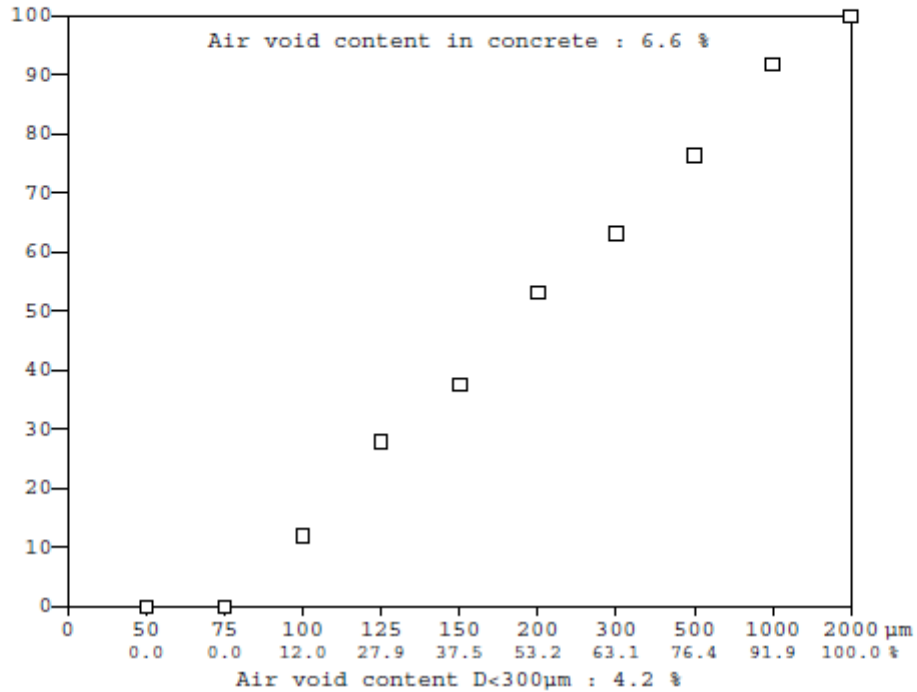
Sign: \_\_\_\_\_

**DBT - Air Void Analyzer Series 2/2.0**  
**rudus**

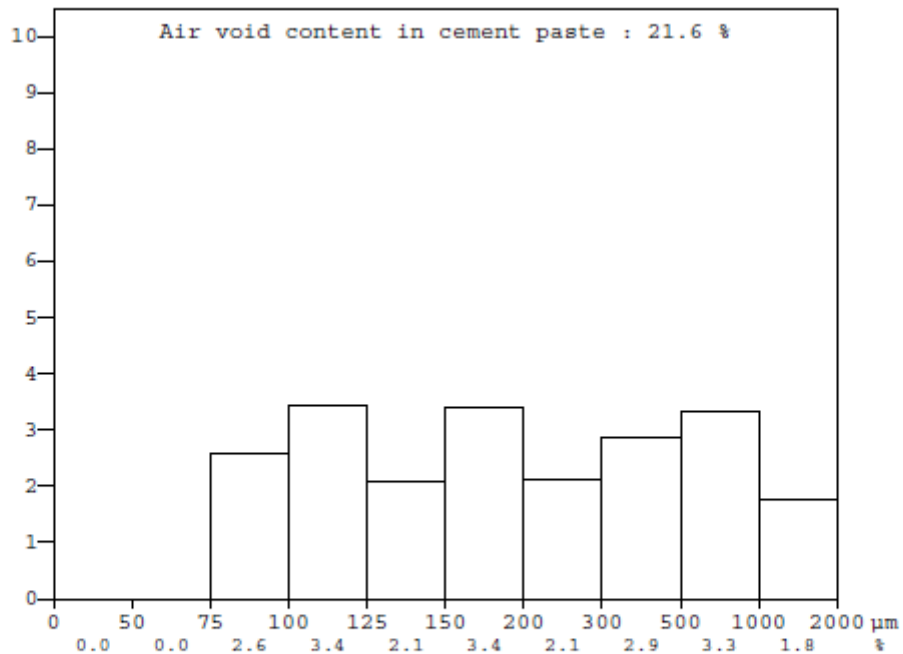
**Measurement of 2013-01-31 08:57**

Case number : 31.1.13  
 Sample number : 2

**Distribution of air void content for voids < 2mm (%)**



**Distribution of air void content in cement paste for voids < 2mm (%)**



Liite 3 Ava-analyysi VS3

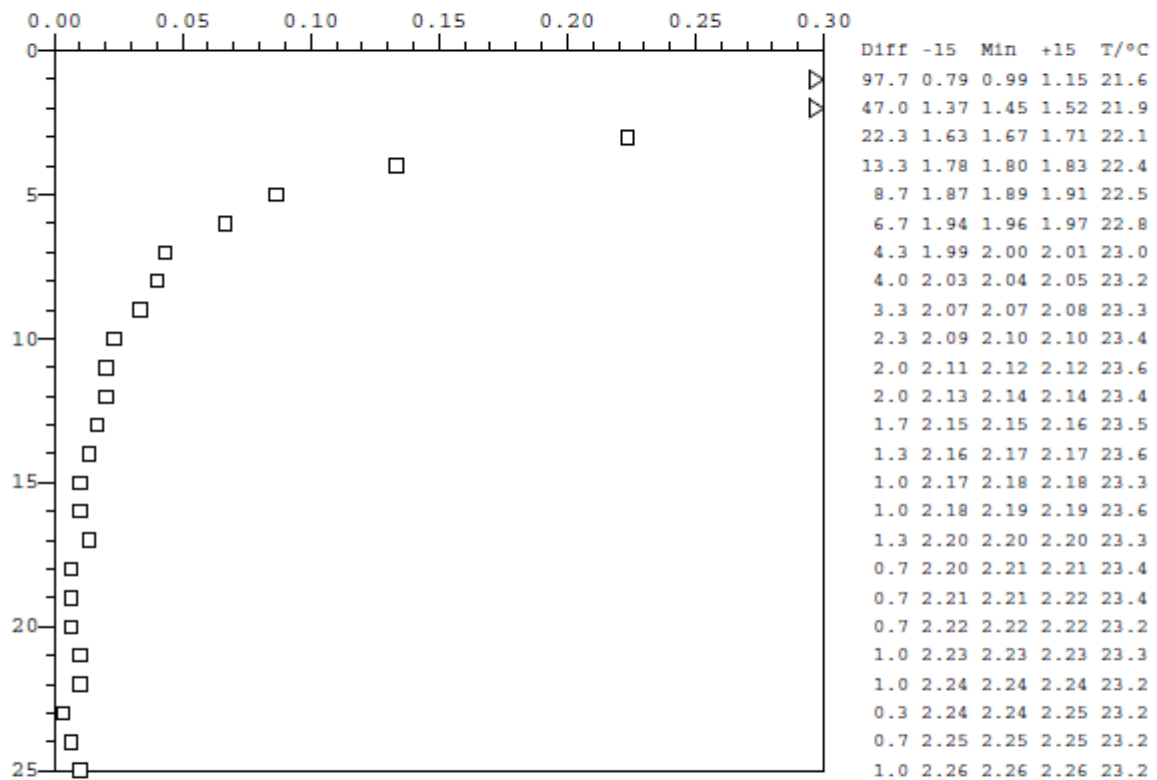
### DBT - Air Void Analyzer Series 2/2.0 rudus

#### Measurement of 2013-01-31 10:21

Sampler : R1a  
 Ordered by : Kuopio  
 Sample location: VS3  
 Case number : 31.1.13  
 Sample number : 3  
 Mortar <6mm : 79.7 %  
 Expected air % : 5.0 %  
 Paste : 29.8 %  
 Sample volume : 20.0 cm<sup>3</sup>

#### Analysis

Start:0.00g +5sec:0.02g +30sec:0.55g Temp:23.4°C



#### Results (adjusted to correlate with ASTM C457)

Chord length : < 2mm < 0.35mm  
 Air-% concrete : 9.6 % 6.7 %  
 Air-% paste : 33.9 % 23.8 %  
 Air-% putty : 25.3 % 17.8 %  
 Specific surface : 31.2 mm<sup>-1</sup>  
 Spacing factor : 0.099 mm

#### Comments

> Mitattu ilma 5.0%  
 > Lämpö 12 C  
 > Painuma 14  
 > Masuunikuona 70%

Sign: \_\_\_\_\_



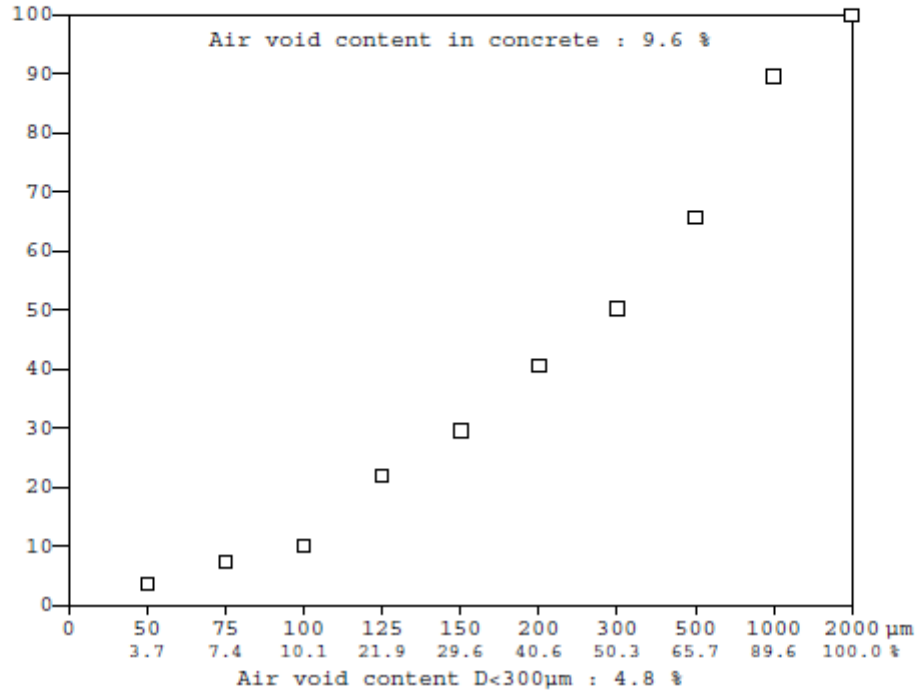
**DBT - Air Void Analyzer Series 2/2.0**  
**rudus**

**Measurement of 2013-01-31 10:21**

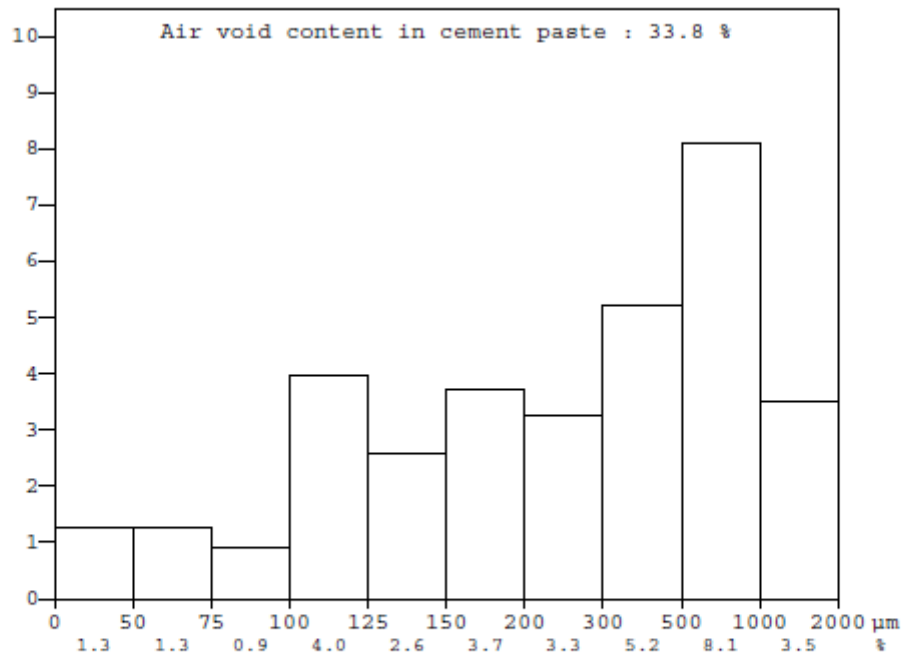
Case number : 31.1.13

Sample number : 3

**Distribution of air void content for voids < 2mm (%)**



**Distribution of air void content in cement paste for voids < 2mm (%)**



Liite 4 Ava-analyysi VS4

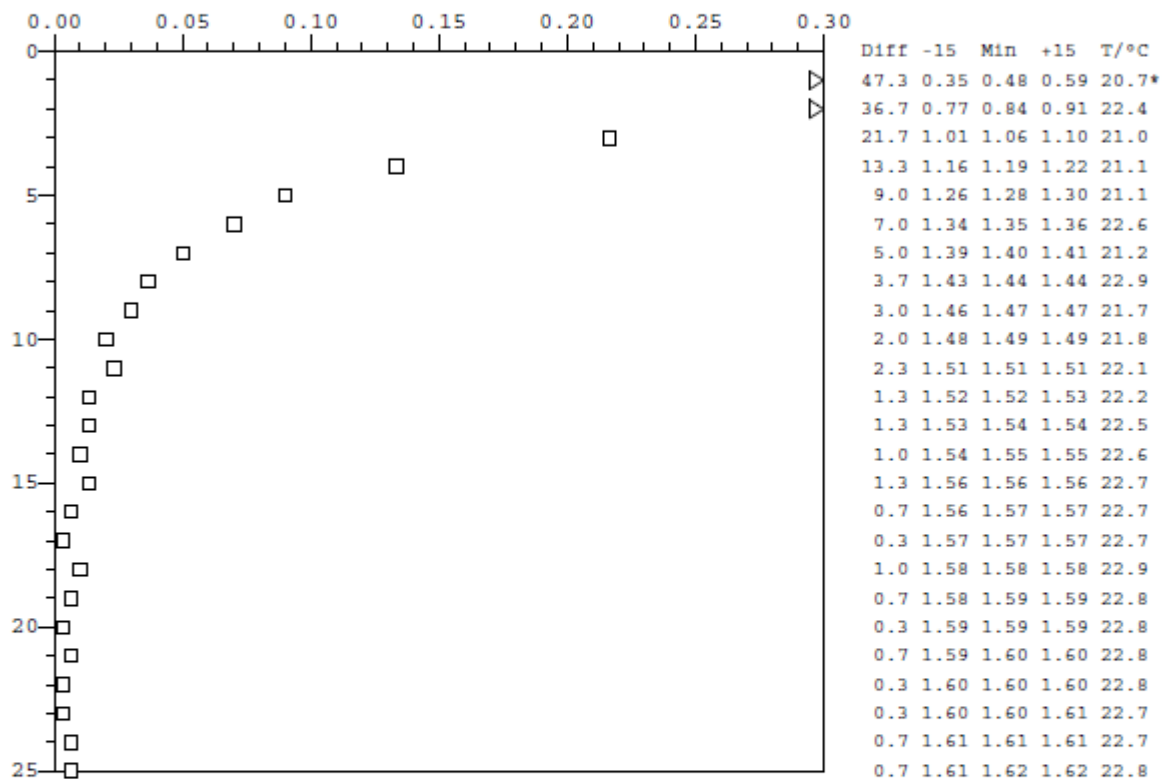
### DBT - Air Void Analyzer Series 2/2.0 rudus

#### Measurement of 2013-01-31 13:06

Sampler : R1a  
 Ordered by : Kuopio  
 Sample location: VS4  
 Case number : 31.1.13  
 Sample number : 4  
 Mortar <6mm : 79.7 %  
 Expected air % : 5.0 %  
 Paste : 30.6 %  
 Sample volume : 20.0 cm<sup>3</sup>

#### Analysis

Start:0.00g +5sec:0.04g +30sec:0.24g Temp:19.8°C



#### Results (adjusted to correlate with ASTM C457)

Chord length : < 2mm < 0.35mm  
 Air-% concrete : 6.8 % 5.6 %  
 Air-% paste : 22.6 % 18.6 %  
 Air-% putty : 18.4 % 15.1 %  
 Specific surface : 36.8 mm<sup>-1</sup>  
 Spacing factor : 0.120 mm

\*NOTE: Temperature out of range 21.0-25.0°C. The measurement must be repeated.

#### Comments

> Mitattu ilma 4.8 %  
 > Lämpö 15 C  
 > Painuma 12  
 > Masuunikuona 75 %

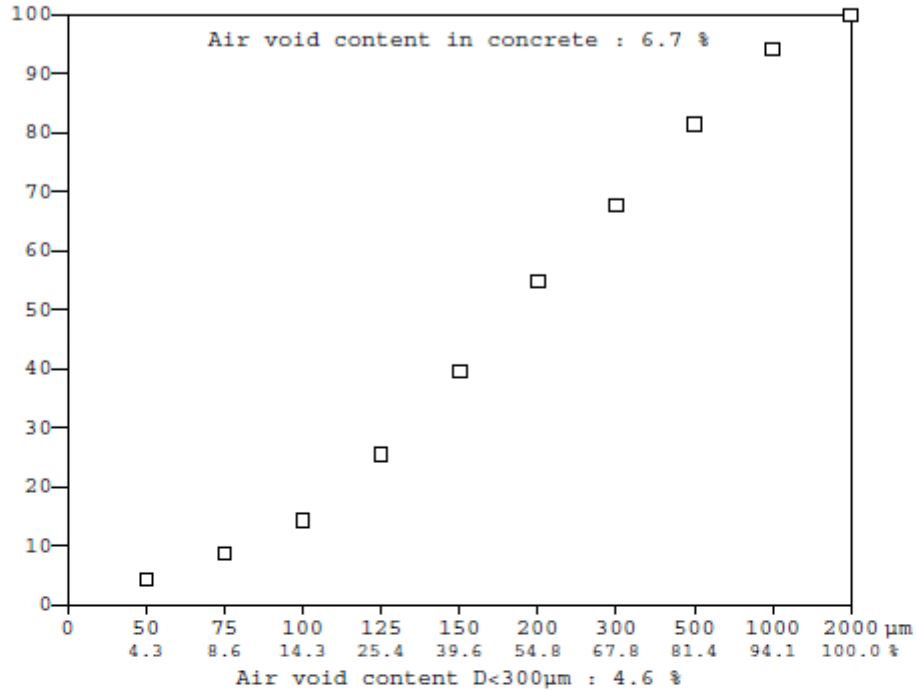
Sign: \_\_\_\_\_

**DBT - Air Void Analyzer Series 2/2.0**  
**rusus**

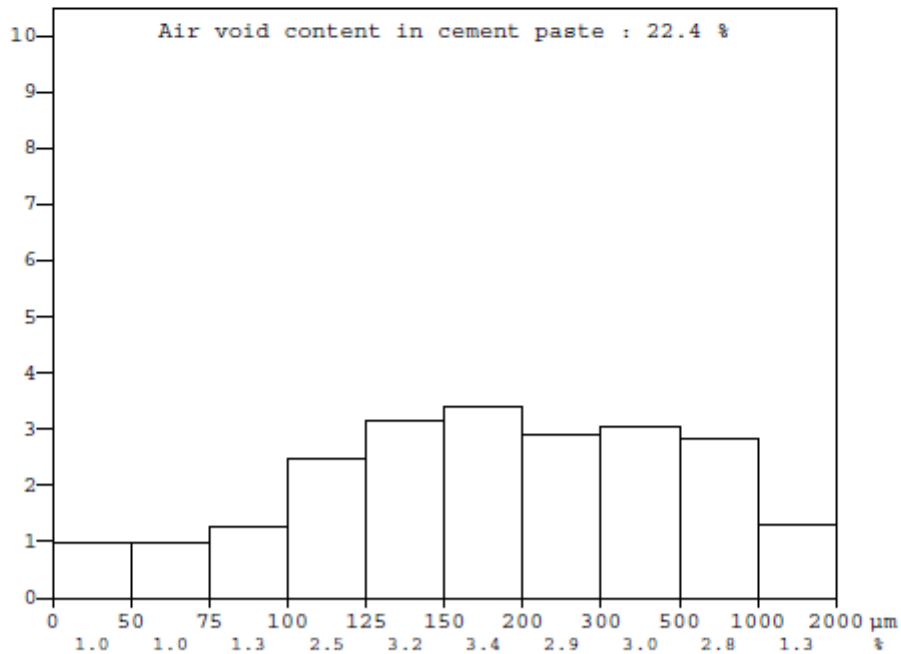
**Measurement of 2013-01-31 13:06**

Case number : 31.1.13  
 Sample number : 4

**Distribution of air void content for voids < 2mm (%)**



**Distribution of air void content in cement paste for voids < 2mm (%)**



## Liite 5 Ohutietutkimusraportti



TILAAJAN ILMOITTAMAT TIEDOT				TULOKSET			
Koekappaleen tunnus	Valmistuspäivä	Lujuus- ja rakenneluokka	Ikä d	Kokonaisiälmäärä/ %	Suojahuokosten ominaispinta-ala/ mm <sup>-1</sup>	Suojahuokosten huokosjako/ mm	Lite n:o
60-OH	30.1.2013	K37-1	43	3,5	46,23	0,13	1
75-OH	31.1.2013	K37-1	46	4,9	37,15	0,14	2

TESTAUSSELOSTUS N:o 13098-099

Tilaja  
Rudus Oy  
Ostoreskontra  
PL 49  
00441 HELSINKI

Tilaus  
5.3.2013

Näytteenottoaika Opinnäytetyötutkimus Olli-Pekka Kokkonen

Betonikoekappaleet 2 kpl 150 mm:n lieriötä

Testaus Ilmahuokosparametrien määrittäminen ASTM C 457, menettely A:n ja VTT TEST R003-00-2010:n mukaan pintahiestä.  
Poikkeama VTT TEST R003-00-2010:sta: Suojahuokosten koko 0,020-0,800 mm:n sijasta 0,020-1,000 mm. Tasokokeen perusteella poikkeamalla ei ole tuloksiin merkitystä (Tutkimusselostus Nro VTT-R-07545-12)

JAKELU KUOPIO 18.3.2013  
1 kpl tilaaja

**Savonia-ammattikorkeakoulu**  
**Rakennusalan tutkimus- ja yrityspalvelut**  
**Koetuslaitos**

*Arto Puurula*  
Arto Puurula, koetuslaitoksen esimies

*Martti Niskanen*  
Martti Niskanen, test.ins.

Tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain koetuslaitoksen antaman kirjallisen luvan perusteella.

**Savonia-ammattikorkeakoulu**  
Rakennusalan tutkimus- ja yrityspalvelut, koetuslaitos  
PL 88 (Opistotie 2) 70101 Kuopio  
Puh. 0447856273, s-posti: etunimi.sukunimi@savonia.fi

[www.savonia-amk.fi](http://www.savonia-amk.fi)

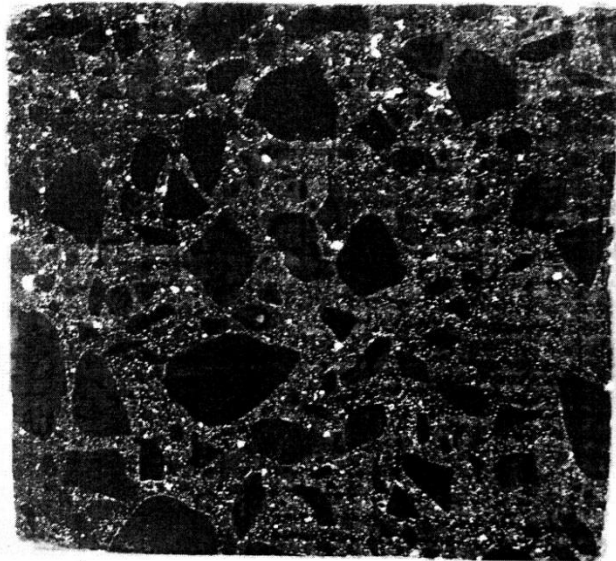
TEST.SEL.N:o 13098-099  
Liite 1

---

## Ilmahuokosanalyysi kovettuneesta betonista

ASTM C 457, menettely A:n mukaisesti

---



Koekappale:	60-OH	Päiväys:	14/03/2013
Projekti nro:	Opinnäytetyö Olli-Pekka Kokkonen	Tekijä:	MN
Toimeksiantaja:	Rudus Oy Kuopio	Kynnysarvo:	170
Tiedostonimi:	C:\RapidAir\Reports\MN330.xls		

Testauslaboratorio: Savonia-amk, Tekniikka

Koekappale: 60-OH

Koekappaleen koko (mm x mm):	100 x 100	Mittauspituus (mm):	2413.7
Pastapitoisuus (%):	30.40	Mitattu pinta-ala (mm x mm):	80 x 80

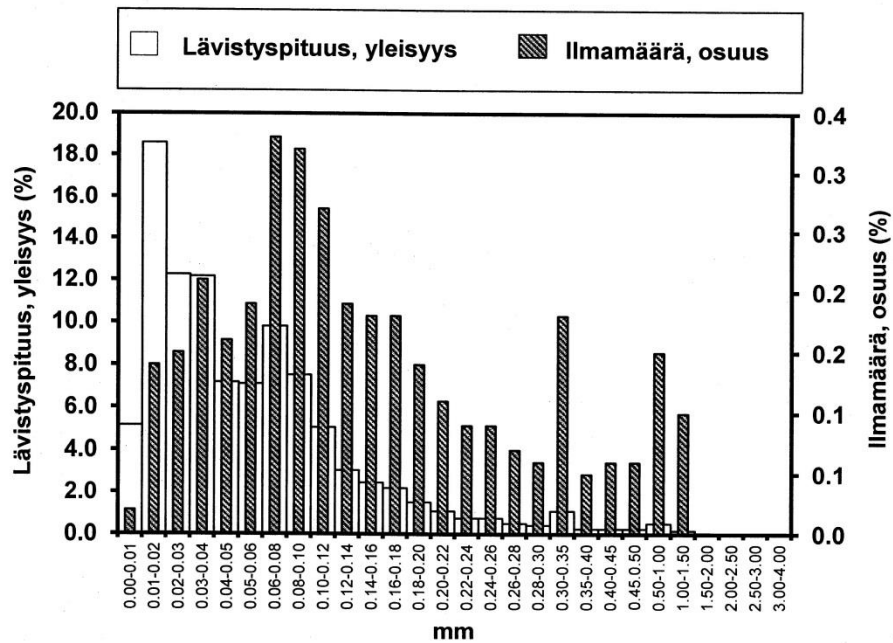
### Lävistyspituusjakaumataulukko

Luokka nro	Lävistyspituus (micron)	Kpl / luokka	%-osuus	Ilmamäärä / luokka	Kumulatiivinen ilmamäärä
1	0-10	61	5.15	0.020	0.020
2	10-20	220	18.57	0.140	0.160
3	20-30	145	12.24	0.150	0.310
4	30-40	144	12.15	0.210	0.510
5	40-50	85	7.17	0.160	0.670
6	50-60	84	7.09	0.190	0.860
7	60-80	116	9.79	0.330	1.190
8	80-100	89	7.51	0.320	1.510
9	100-120	60	5.06	0.270	1.790
10	120-140	36	3.04	0.190	1.980
11	140-160	29	2.45	0.180	2.160
12	160-180	26	2.19	0.180	2.340
13	180-200	18	1.52	0.140	2.480
14	200-220	13	1.10	0.110	2.600
15	220-240	9	0.76	0.090	2.680
16	240-260	9	0.76	0.090	2.780
17	260-280	6	0.51	0.070	2.840
18	280-300	5	0.42	0.060	2.910
19	300-350	13	1.10	0.180	3.080
20	350-400	3	0.25	0.050	3.130
21	400-450	3	0.25	0.060	3.180
22	450-500	3	0.25	0.060	3.240
23	500-1000	6	0.51	0.150	3.260
24	1000-1500	2	0.17	0.100	3.490
25	1500-2000	0	0.00	0.000	3.490
26	2000-2500	0	0.00	0.000	3.490
27	2500-3000	0	0.00	0.000	3.490
28	3000-4000	0	0.00	0.000	3.490

Ilmamäärä (%):	3.49
Ominaispinta-ala (mm <sup>-1</sup> ):	56.22
Huokosjako (mm):	0.106
Huokostiheys (mm <sup>-1</sup> ):	0.491
Keskimääräinen lävistyspituus (mm):	0.071
Pasta-ilma-suhde:	8.71

Koekappale: 60-OH

3/4



Ilmahuokosparametrit	Lävistys < 0.5 mm	Lävistys < 1.0 mm	Yhteensä
Huokosten lukumäärä	1177	1183	1185
% kokonaismäärästä	99.3	99.8	100
Mitattujen huokosten pituus (mm)	78.19	81.86	84.31
% kokonaispituudesta	92.7	97.1	100
Ilmamäärä (%)	3.24	3.39	3.49
Keskimääräinen lävistyspituus (mm)	0.066	0.069	0.071
Pasta-ilma-suhde	9.38	8.97	8.71
Ominaispinta-ala (mm <sup>-1</sup> )	60.21	57.81	56.22
Huokostiheys (mm <sup>-1</sup> )	0.488	0.490	0.491
Huokosjako (mm)	0.102	0.105	0.106

## Huomautuksia:

Pastapitoisuus laskettu

pistelaskumenetelmällä:

YES

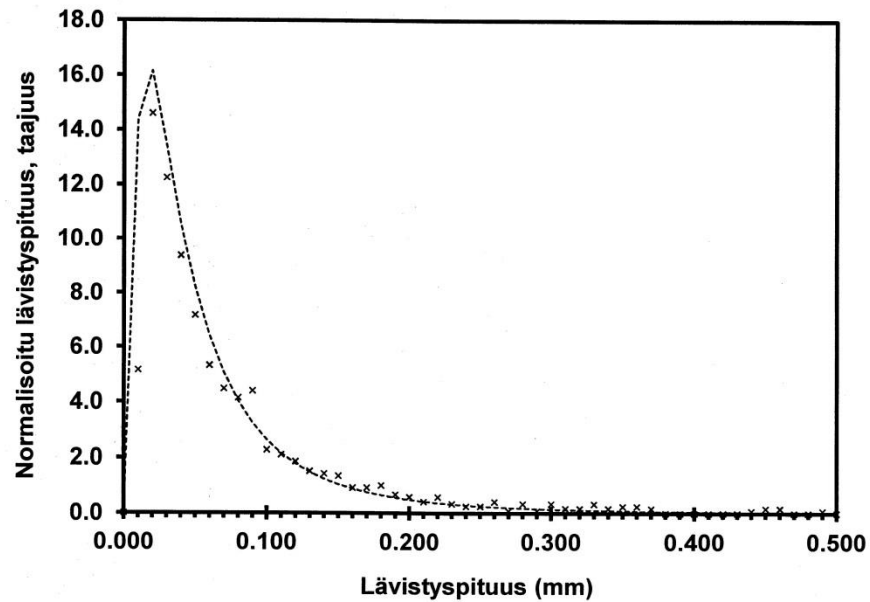
Pistelaskun tiedosto:

C:\RapidAir\Reports\pc289.csv

Koekappale: 60-OH

4/4

### Log-normal-jakautuma



Huokosjakoparametrit	''	mm
Mallin mukaan useimmin havaittu lävistyspituus	0.00065	0.0164
Keskimääräinen lävistyspituus	0.00280	0.0710
Hajonnan leveys ja vääristymä	0.002	9.440E-01
Neliöityjen virheiden summa	329	

Reference: Roberts, L.R. & Scheiner, P. 1981. Microprocessor-based Linear Traverse Apparatus for Air-Void Distribution Analysis. In: Proc. 3th ICMA, Texas, pp. 211-227

Huomautuksia:



Koekappale: 60-OH

Koekappaleen koko (mm x mm):	100 x 100	Mittauspituus (mm):	2413.7
Pastapitoisuus (%):	30.40	Mitattu pinta-ala (mm x mm):	80 x 80

### Lävistyspituusjakaumataulukko

Luokka nro	Lävistyspituus (micron)	Kpl / luokka	%-osuus	Ilmamäärä / luokka	Kumulatiivinen ilmamäärä
1	0-10	61	5.15	0.020	0.020
2	10-20	220	18.57	0.140	0.160
3	20-30	145	12.24	0.150	0.310
4	30-40	144	12.15	0.210	0.510
5	40-50	85	7.17	0.160	0.670
6	50-60	84	7.09	0.190	0.860
7	60-80	116	9.79	0.330	1.190
8	80-100	89	7.51	0.320	1.510
9	100-120	60	5.06	0.270	1.790
10	120-140	36	3.04	0.190	1.980
11	140-160	29	2.45	0.180	2.160
12	160-180	26	2.19	0.180	2.340
13	180-200	18	1.52	0.140	2.480
14	200-220	13	1.10	0.110	2.600
15	220-240	9	0.76	0.090	2.680
16	240-260	9	0.76	0.090	2.780
17	260-280	6	0.51	0.070	2.840
18	280-300	5	0.42	0.060	2.910
19	300-350	13	1.10	0.180	3.080
20	350-400	3	0.25	0.050	3.130
21	400-450	3	0.25	0.060	3.180
22	450-500	3	0.25	0.060	3.240
23	500-1000	6	0.51	0.150	3.260
24	1000-1500	2	0.17	0.100	3.490
25	1500-2000	0	0.00	0.000	3.490
26	2000-2500	0	0.00	0.000	3.490
27	2500-3000	0	0.00	0.000	3.490
28	3000-4000	0	0.00	0.000	3.490

**Vain lävistyspituudet 20-1000 micronia on laskennassa mukana!**

Ilmamäärä (%):	3.23
Ominaispinta-ala (mm <sup>-1</sup> ):	46.23
Huokosjako (mm):	0.134
Huokostiheys (mm <sup>-1</sup> ):	0.374
Keskimääräinen lävistyspituus (mm):	0.087
Pasta-ilma-suhde:	9.41

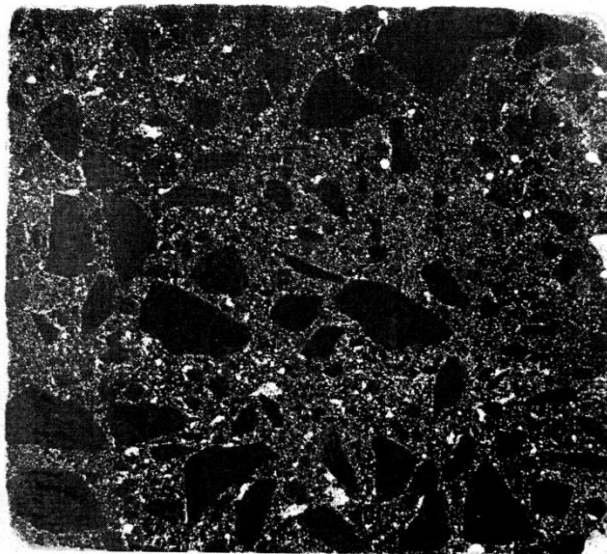
TEST.SEL.N:o 13098-099  
Liite 2

---

## Ilmahuokosanalyysi kovettuneesta betonista

ASTM C 457, menettely A:n mukaisesti

---



Koekappale:	75-OH	Päiväys:	18/03/2013
Projekti nro:	Opinnäytetyö Olli-Pekka Kokkonen	Tekijä:	MN
Toimeksiantaja:	Rudus Oy Kuopio	Kynnysarvo:	170
Tiedostonimi:	C:\RapidAir\Reports\MN331.xls		

Testauslaboratorio: Savonia-amk, Tekniikka

---

Koekappale: 75-OH

Koekappaleen koko (mm x mm):	100 x 100	Mittauspituus (mm):	2413.7
Pastapitoisuus (%):	30.80	Mitattu pinta-ala (mm x mm):	80 x 80

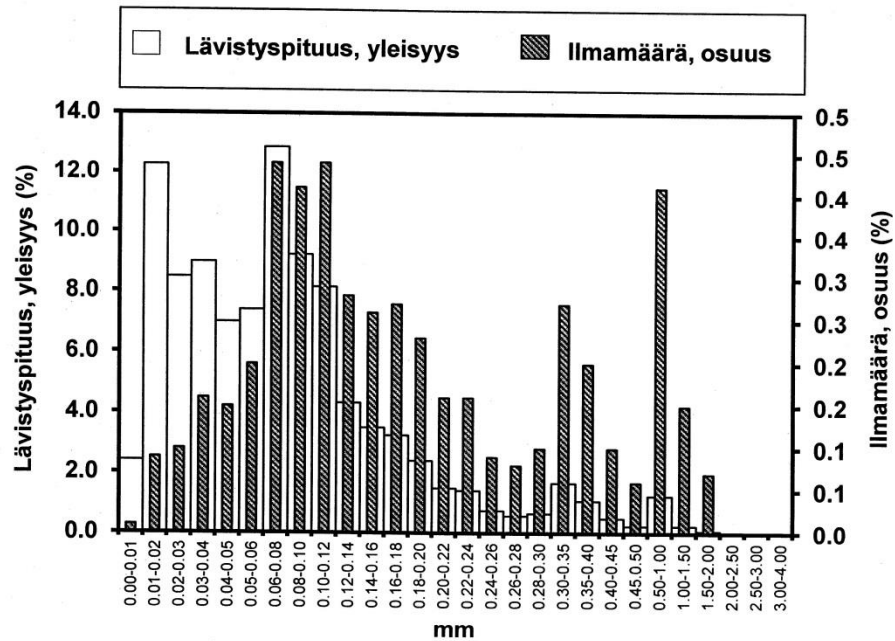
### Lävistyspituusjakaumataulukko

Luokka nro	Lävistyspituus (micron)	Kpl / luokka	%-osuus	Ilmamäärä / luokka	Kumulatiivinen ilmamäärä
1	0-10	29	2.40	0.010	0.010
2	10-20	148	12.27	0.090	0.110
3	20-30	102	8.46	0.100	0.210
4	30-40	108	8.96	0.160	0.370
5	40-50	84	6.97	0.150	0.520
6	50-60	89	7.38	0.200	0.720
7	60-80	155	12.85	0.440	1.160
8	80-100	111	9.20	0.410	1.570
9	100-120	98	8.13	0.440	2.010
10	120-140	52	4.31	0.280	2.290
11	140-160	42	3.48	0.260	2.550
12	160-180	39	3.23	0.270	2.830
13	180-200	29	2.40	0.230	3.060
14	200-220	18	1.49	0.160	3.210
15	220-240	17	1.41	0.160	3.370
16	240-260	9	0.75	0.090	3.470
17	260-280	7	0.58	0.080	3.540
18	280-300	8	0.66	0.100	3.640
19	300-350	20	1.66	0.270	3.910
20	350-400	13	1.08	0.200	4.100
21	400-450	6	0.50	0.100	4.210
22	450-500	3	0.25	0.060	4.270
23	500-1000	15	1.24	0.410	4.350
24	1000-1500	3	0.25	0.150	4.820
25	1500-2000	1	0.08	0.070	4.890
26	2000-2500	0	0.00	0.000	4.890
27	2500-3000	0	0.00	0.000	4.890
28	3000-4000	0	0.00	0.000	4.890

Ilmamäärä (%):	4.89
Ominaispinta-ala (mm <sup>-1</sup> ):	40.88
Huokosjako (mm):	0.126
Huokostiheys (mm <sup>-1</sup> ):	0.500
Keskimääräinen lävistyspituus (mm):	0.098
Pasta-ilma-suhde:	6.30

Koekappale: 75-OH

3/4



Ilmahuokosparametrit	Lävistys < 0.5 mm	Lävistys < 1.0 mm	Yhteensä
Huokosten lukumäärä	1187	1202	1206
% kokonaisuudesta	98.4	99.7	100
Mitattujen huokosten pituus (mm)	102.98	112.92	118.02
% kokonaispituudesta	87.3	95.7	100
Ilmamäärä (%)	4.27	4.68	4.89
Keskimääräinen lävistyspituus (mm)	0.087	0.094	0.098
Pasta-ilma-suhde	7.21	6.58	6.30
Ominaispinta-ala (mm <sup>-1</sup> )	46.10	42.58	40.88
Huokostiheys (mm <sup>-1</sup> )	0.492	0.498	0.500
Huokosjako (mm)	0.119	0.123	0.126

Huomautuksia:

Pastapitoisuus laskettu

pistelaskumenetelmällä:

YES

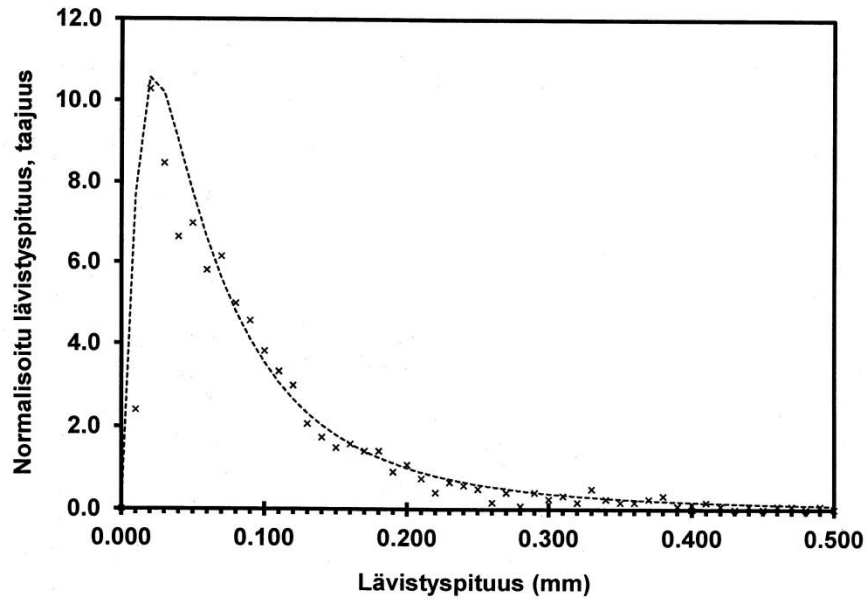
Pistelaskun tiedosto:

C:\RapidAir\Reports\pc290.csv

Koekappale: 75-OH

4/4

### Log-normal-jakautuma



Huokosjakoparametrit	''	mm
Mallin mukaan useimmin havaittu lävistyspituus	0.00088	0.0224
Keskimääräinen lävistyspituus	0.00390	0.0980
Hajonnan leveys ja vääristymä	0.002	1.008E+00
Neliöityjen virheiden summa	244	

Reference: Roberts, L.R. & Scheiner, P. 1981. Microprocessor-based Linear Traverse Apparatus for Air-Void Distribution Analysis. In: Proc. 3th ICMA, Texas, pp. 211-227

Huomautuksia:

Sivu 2 extra

Koekappale: 75-OH

Koekappaleen koko (mm x mm):	100 x 100	Mittauspituus (mm):	2413.7
Pastapitoisuus (%):	30.80	Mitattu pinta-ala (mm x mm):	80 x 80

### Lävistyspituusjakaumataulukko

Luokka nro	Lävistyspituus (micron)	Kpl / luokka	%-osuus	Ilmamäärä / luokka	Kumulatiivinen ilmamäärä
1	0-10	29	2.40	0.010	0.010
2	10-20	148	12.27	0.090	0.110
3	20-30	102	8.46	0.100	0.210
4	30-40	108	8.96	0.160	0.370
5	40-50	84	6.97	0.150	0.520
6	50-60	89	7.38	0.200	0.720
7	60-80	155	12.85	0.440	1.160
8	80-100	111	9.20	0.410	1.570
9	100-120	98	8.13	0.440	2.010
10	120-140	52	4.31	0.280	2.290
11	140-160	42	3.48	0.260	2.550
12	160-180	39	3.23	0.270	2.830
13	180-200	29	2.40	0.230	3.060
14	200-220	18	1.49	0.160	3.210
15	220-240	17	1.41	0.160	3.370
16	240-260	9	0.75	0.090	3.470
17	260-280	7	0.58	0.080	3.540
18	280-300	8	0.66	0.100	3.640
19	300-350	20	1.66	0.270	3.910
20	350-400	13	1.08	0.200	4.100
21	400-450	6	0.50	0.100	4.210
22	450-500	3	0.25	0.060	4.270
23	500-1000	15	1.24	0.410	4.350
24	1000-1500	3	0.25	0.150	4.820
25	1500-2000	1	0.08	0.070	4.890
26	2000-2500	0	0.00	0.000	4.890
27	2500-3000	0	0.00	0.000	4.890
28	3000-4000	0	0.00	0.000	4.890

**Vain lävistyspituudet 20-1000 micronia on laskennassa mukana!**

Ilmamäärä (%):	4.57
Ominaispinta-ala (mm <sup>-1</sup> ):	37.15
Huokosjako (mm):	0.143
Huokostiheys (mm <sup>-1</sup> ):	0.425
Keskimääräinen lävistyspituus (mm):	0.108
Pasta-ilma-suhde:	6.74

## Liite 8 Puristuslujuustulokset

Koeistus päivä	Koeistus ikä	Koekappaleen tunnus	Paino (g)	Lujuus (Mpa)	Tiheys (kg/dm <sup>3</sup> )	Muunnettu lieriölujuus (Mpa)
6.2.2013	7d	60-3	12750	19,2	<b>2,41</b>	<b>24,0</b>
7.2.2013	7d	65-3	12610	18,3	<b>2,38</b>	<b>22,9</b>
	7d	70-3	12530	17,1	<b>2,37</b>	<b>21,4</b>
	7d	75-3	12460	16,1	<b>2,35</b>	<b>20,1</b>
28.2.2013	29d	60-2	12780	37,8	<b>2,41</b>	<b>47,8</b>
	28d	65-2	12600	36,4	<b>2,38</b>	<b>46,4</b>
	28d	70-2	12530	34,5	<b>2,37</b>	<b>44,2</b>
	28d	75-2	12380	33,5	<b>2,34</b>	<b>42,5</b>
2.5.2013	92d	60-1	12780	46,5	<b>2,41</b>	<b>56,5</b>
	91d	65-1	12610	44,0	<b>2,38</b>	<b>54,0</b>
	91d	70-1	12530	40,4	<b>2,37</b>	<b>50,4</b>
	91d	75-1	12350	37,8	<b>2,33</b>	<b>47,8</b>