

Korkealujuusbetonien säilyvyys

Heikki Kukko & Kai Tattari

VTT Rakennustekniikka



ISBN 951-38-4517-6
ISSN 1235-1613
Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1995

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde (90) 4561, telekopio 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel (90) 4561, telefax 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 0 4561, telefax +358 0 456 4374

VTT Rakennustekniikka, Rakennusmateriaalit ja -tuotteet sekä puutekniikka, Kemistintie 3, PL 1805,
02044 VTT, puh. vaihde (90) 4561, telekopio (90) 456 7004

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsmaterial och -produkter, träteknik, Kemistvägen 3, PB 1805, 02044 VTT
tel. växel (90) 4561, telefax (90) 456 7004

VTT Building Technology, Building materials and products, wood technology, Kemistintie 3, P.O.Box 1805,
FIN-02044 VTT, Finland, phone internat. +358 0 4561, telefax +358 0 456 7004

Tekninen toimitus Maini Manninen

VTT OFFSETPAINO, ESPOO 1995

Kukko, Heikki & Tattari, Kai. Korkealujuusbetoninsäilyvyys [Durability of high strength concretes]. Espoo 1995. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Julkaisuja - Publikationer 808. 33 s. + liit. 25 s.

UCD 691.32:621.4:620.17

Keywords concrete, durability, testing, high strength concretes, frost resistance, materials, testing, melting

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa selvitettiin kokeellisesti korkealujuusbetonin säilyvyyttä pakkas- ja suolapakkasrasituksessa. Betonin tavoitepuristuslujuus oli 80 MPa ja kokeissa käytettiin erilaisia sideainekoostumuksia. Sementin lisäksi käytettiin silikaa, lentotuhkaa, masuunikuonaa ja erittäin hienoksi jauhattua kvartsia. Tässä koesarjassa tutkittiin 19 erilaista betonia, minkä lisäksi arvioitiin yhdeksän aiemmin testatun betonin tulokset.

Betonimassat suhteitettiin siten, että betoni voitiin tiivistää täryttämällä. Vesi-sideainesuhde vaihteli välillä 0,24 - 0,44 sideaineesta riippuen. Pakkas-suolakoe tehtiin standardin SFS 5449 mukaisesti jäädyttämällä koekappaleet suolaliuoksessa ja sulattamalla ne vedessä 300 koekierroksen ajan. Jäädytys-sulatuskokeessa ilman suolaa koekappaleet jäädytettiin ilmassa ja sulatettiin vedessä standardin SFS 5447 mukaisesti 2 000 kierroksen ajan. Syitä havaittuihin eroihin tutkittiin ohuthieistä saatujen halkeiluindeksien ja vedelläkylästyskokeen avulla.

Koetulosten tilastollisessa analyysissä todettiin, että korkealujuusbetonin säilyvyyttä voidaan parhaiten kuvata kapillaarisuusluvun avulla. Vesi-sideainesuhdetta voidaan myös käyttää säilyvyyden arviointiin. Pakkas-suolakestävyyden kuvaaminen osoittautui helpommaksi kuin jäädytys-sulatuskestävyyden, jonka mittausmenetelmät (ultraäänen nopeus, massamuutos, halkeilu, lujuuden muutos) eivät selkeästi kuvaa vaurioitumisastetta. Tulosten perusteella laskettiin säilyvyysmallit molemmille pakkasrasitustavoille.

Materiaalikohtaisten tulosten lisäksi esitetään ohje pakkasenkestävän korkealujuusbetonin valmistamiseksi. Ohjeessa otetaan huomioon sivutuotteiden ja hienojakoisen fillerin vaikutus pakkasenkestävyyteen.

Kukko, Heikki & Tattari, Kai. Korkealujuusbetoninsäilyvyys [Durability of high strength concretes]. Espoo 1995. Technical Research Centre of Finland, VTT Julkaisuja - Publikationer 808. 33 p. + app. 25 p.

UCD 691.32:621.4:620.17

Keywords concrete, durability, testing, high strength concretes, frost resistance, materials, testing, melting

ABSTRACT

The aim of this study was to elucidate experimentally the frost- and frost-salt durability of high strength concrete. The target compressive strength of the concretes was 80 MPa and various binder combinations were used. Besides Portland cement, silica dust, fly ash, ground blast furnace slag and finely ground quartz were used. 19 different concretes were examined in this tests series, and nine additional concretes from previous tests were evaluated, too.

The mixes were designed for compaction by vibration. The water/binder-ratio varied between 0.24 and 0.44, depending on the binder. The frost-salt tests were made according to the Finnish standard SFS 5449 by freezing the specimens in salt solution and thawing them in water for 300 cycles. In the freezing and thawing test without salt the specimens were frozen in air and thawed in water according to the Finnish standard SFS 5447 for 2,000 cycles. The explanations for observed differences were studied on the basis of cracking indices of thin sections and on the basis of capillary water immersion tests.

A statistical analysis of the results showed that the durability of high strength concrete is best estimated on the basis of capillary factor. The water/binder ratio is also suitable for approximate calculation of durability. The estimation of durability proved to be easier in the frost-salt tests than in the freezing and thawing tests without salt. In the latter the testing methods (ultrasonic pulse velocity, mass change, cracking and change of strength) do not reliably correspond to the degree of frost damage. Durability models were created for both testing modes.

In addition to the results with the various materials, a guide for preparing high strength concrete with excellent durability is presented. In the guide the effects of using by-products and finely ground filler on frost resistance is taken into consideration.

ALKUSANAT

Korkealujuusbetonia, jonka lujuus on 80 - 100 MPa, on tutkittu viime vuosina tiiviisti. Korkea lujuus sinänsä ei kuitenkaan näytä olevan useinkaan painavin syy käyttää korkealujuusbetonia. Tätä kuvaavat vieraskieliset materiaalinimityksetkin: ruotsin "Höggpresterande betong", englannin "High performance concrete", saksan "Hochleistungsbeton" ja ranskan "Béton à hautes performances", joissa ei viitata suureen lujuuteen vaan yleisesti erinomaisiin ominaisuuksiin. Korkealujuusbetonin käytön painopiste on vahvasti siirtymässä korkeista rakennuksista ja hoikista pilareista siltoihin, merirakenteisiin ja muihin hyvää säilyvyyttä ja tiiviyyttä vaativiin kohteisiin.

VTT:n Rakennusmateriaalilaboratoriossa, sittemmin VTT Rakennustekniikassa tutkittiin korkealujuusbetonien pakkas-suolakestävyyttä ja jäädytys-sulatuskestävyyttä. Tutkimuksen lähtökohtana oli aiemmissa kokeissa tehty havainto, jonka mukaan korkealujuusbetonin säilyvyys vaihtelee merkittävästi. Koska yhtenä syynä korkealujuusbetonin valinnalle on usein sen hyvä säilyvyys ja suuri tiiviys, oli tarpeen selvittää säilyvyys-erot.

Hankkeen johtoryhmään kuuluivat tekn. lis. Jorma Virtanen, Finnsementti Oy, puheenjohtaja, dipl.ins. Bo-Erik Eriksson, Finnsementti Oy, dipl.ins. Olli-Pekka Nordlund, TEKES, dipl.ins. Mauno Peltokorpi, Tielaitos, erikoistutkija Anna Kronlöf, VTT ja tutk.prof. Heikki Kukko, VTT, sihteeri.

Tutkimuksen projektipäällikkönä toimi tekn. toht. Heikki Kukko ja tutkijana Kai Tattari. Tutkimuksen rahoittivat TEKES, Partek Sementti Oy (vuodesta 1994 Finnsementti Oy) ja VTT.

Julkaisun alkuosassa esitetään suoritettut tutkimukset tuloksineen sekä yhteenveto pakkas-suola- ja jäädytys-sulatuskestävyyteen vaikuttavista tekijöistä.

Julkaisun lopussa on myös tiivis ohje pakkasenkestävän korkealujuusbetonin valmistamiseksi. Se perustuu aiempaan koemateriaaliin ja tämän projektin tuloksiin.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKUSANAT	5
1 BETONEIDEN SUHTEITUSTIEDOT.....	8
2 BETONIMASSOJEN OMINAISUUDET	10
3 LUJUUDET	11
4 PAKKAS-SUOLAKOKEIDEN TULOKSET	13
5 JÄÄDYTYKSEN-SULATUSKOKEIDEN TULOKSET.....	14
6 OHUTHIEIDEN ANALYSOINTI	16
7 KAPILLAARISEN VEDELLÄKYLLÄSTYSKOKEEN TULOKSET.....	18
8 PAKKAS-SUOLAKESTÄVYYTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT..	20
9 JÄÄDYTYKSEN-SULATUSKESTÄVYYTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	26
10 YHTEENVETO PAKKAS-SUOLA- JA JÄÄDYTYKSEN-SULATUSKESTÄVYYTEEN VAIKUTTAVISTA TEKIJÖISTÄ	29
11 OHJEITA PAKKASENKESTÄVÄN KORKEALUJUUSBETONIN VALMISTAMISEKSI.....	31
12 JATKOTUTKIMUSTARPEET.....	33
STANDARDEJA	34
LIITTEET	
LIITE 1 VALOKUVIA JÄÄDYTYKSEN-SULATUS- JA VERTAILUPALKEISTA VALMISTETUISTA OHUTHIEISTÄ	1/1
LIITE 2 MENETELMÄKUVAUS KAPILLAARISEN VEDELLÄKYLLÄSTYSASTEEN MÄÄRITYKSESTÄ	2/1

1 BETONEIDEN SUHTEITUSTIEDOT

Betoneiden tärkeimmät suhteitustiedot ovat seuraavassa taulukossa 1. Betonit 1 - 19 ovat tässä tutkimuksessa tehtyjä betoneita. Betonit 20 - 28 on tehty aikaisemmissa tutkimuksissa. Tähdellä (*) merkityt sementit ovat Lohja Oy Ab:n ja ilman tähteä olevat Partek Sementti Oy:n valmistamia. Viimeisessä sarakkeessa V/S tarkoittaa vesi-sideainesuhdetta. Lentotuhkan tehokkuuskertoimeksi valittiin 0,30.

Taulukko 1. Betoneiden suhteitukset.

Beto- ni	Sementti- tyyppi	Sement- ti (kg/m ³)	Silika (kg/m ³)	Lento- tuhka (kg/m ³)	Masuu- nikuona (kg/m ³)	Runko- aine (kg/m ³)	Vesi (kg/m ³)	Nestey- tin (kg/m ³)	Huo- koston (kg/m ³)	V/S
1	P40/3 (*)	475,0	25,0	-	-	1761	167,0	15,0	-	0,35
2	P40/3 (*)	475,0	25,0	-	-	1826	142,5	15,0	-	0,30
3	P40/3 (*)	475,0	25,0	-	-	1868	122,2	17,5	-	0,26
4	P40/28SR	475,0	25,0	-	-	1827	145,2	12,5	-	0,31
5	P40/28SR	475,0	25,0	-	-	1883	124,0	12,5	-	0,26
6	P40/28SR	475,0	25,0	-	-	1915	112,2	12,5	-	0,24
7	P40/28SR	500,0	-	-	-	1873	130,7	12,5	-	0,28
8	P40/7	422,5	25,0	175,0	-	1656	148,8	12,5	-	0,31
9	P40/7 (*)	422,4	25,1	175,1	-	1700	132,4	12,5	-	0,28
10	P40/3	300,0	25,0	-	-	2036	121,8	12,1	-	0,40
11	P40/3	300,0	25,0	-	-	2023	126,4	12,5	-	0,41
12	P40/7 (*)	125,0	25,0	-	350,0	1895	109,0	14,3	-	0,23
13	P40/7 (*)	150,0	-	-	350,0	1912	103,6	15,0	-	0,23
14	P40/7 (*)	125,0	-	-	350,0	1896	108,5	14,3	-	0,23
15	P40/3	300,0	25,0	-	-	2023	126,4	12,5	0,75	0,41
16	P40/3	456,4	-	-	-	1743	202,3	-	0,35	0,44
17	P40/28SR	475,0	25,0	-	-	1772	173,3	3,3	-	0,35
18	P40/3	300,0	21,0	-	-	2020	120,0	9,7	-	0,39
19	P40/28SR	300,0	21,0	-	-	2020	120,0	9,7	-	0,39
20	P40/28SR	480,0	29,0	-	-	1850	137,0	12,0	-	0,28
21	P40/7	120,0	30,0	-	350,0	1800	114,0	20,0	-	0,25
22	P40/28SR	300,0	21,0	-	-	2020	120,0	9,7	-	0,39
23	P40/91	450,0	22,5	-	-	1874	122,9	11,7	-	0,27
24	P40/3	500,0	-	-	-	1766	155,0	15,0	-	0,33
25	P40/3	450,0	-	150,0	-	1610	162,0	18,0	-	0,29
26	P40/3	500,0	-	-	-	1783	150,0	-	-	0,32
27	P40/3	470,0	30,0	-	-	1791	142,4	12,5	-	0,30
28	P40/3	350,0	-	-	150,0	1740	167,5	10,0	-	0,35

Nesteyttimenä oli "Scancem SP62" betoneita 15 ja 28 lukuun ottamatta. Betonissa 15 nesteytin oli "Melment L 10/40" ja betonissa 28 "Peramin F". Huokostimena betoneissa 15 ja 16 oli "Parmix L".

Betonissa 10 käytettiin Kemiön kvartsia (0 - 0,2) 3,9 % runkoaineen kokonaispainosta. Betoneissa 11, 15, 18, 19 ja 22 käytettiin Kemiön kvartsia (0 - 0,2) 7,9 % runkoaineen kokonaispainosta.

Betonissa 12 käytetystä masuunikuonasta 70 % oli laatua MK400 ja 30 % laatua MK700. Betoneissa 13, 14 ja 28 käytetty masuunikuona oli laatua MK400. Betonissa 21 käytetystä masuunikuonasta 60 % oli laatua MK400 ja 40 % laatua MK1000.

2 BETONIMASSOJEN OMINAISUUDET

Betonimassojen ominaisuudet ovat taulukossa 2. Viimeisessä sarakkeessa on lisäksi ilmoitettu betonin vesi-sideainesuhde. Painuma määritettiin standardin SFS 5284, muodonmuutos aika standardin SFS 5285 ja ilmapitoisuus standardin SFS 5287 mukaisesti.

Taulukko 2. Betonimassojen ominaisuudet.

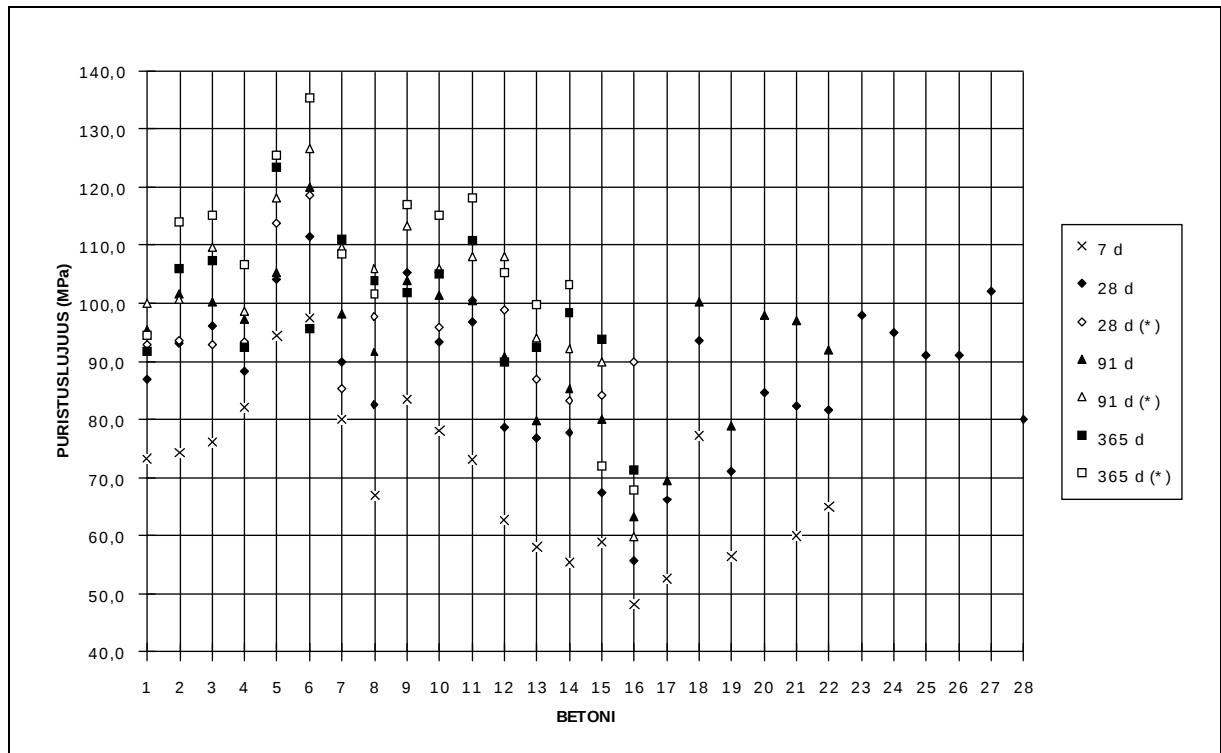
Betoni	Painuma (mm)	Muodonmuutos aika (sVB)	Ilmapitoisuus (%)	Vesi-sideainesuhde
1	155	0,5	0,8	0,35
2	0	8,0	2,1	0,30
3	5	14,0	1,4	0,26
4	170	1,7	0,8	0,31
5	115	4,0	1,2	0,26
6	50	3,9	1,6	0,24
7	90	4,0	1,0	0,28
8	160	0,5	1,8	0,31
9	55	4,2	2,4	0,28
10	170	2,1	2,6	0,40
11	150	2,1	2,6	0,41
12	20	5,7	1,4	0,23
13	125	8,2	2,0	0,23
14	70	7,2	1,2	0,23
15	20	4,9	7,0	0,41
16	55	2,0	5,1	0,44
17	85	1,4	1,5	0,35
18	15	5,1	1,8	0,39
19	230	3,5	1,3	0,39
20	135	3,5	1,6	0,28
21	(*)	(*)	2,2	0,25
22	150	2,9	2,0	0,39
23	110	4,4	1,0	0,27
24	170	< 1	2,7	0,33
25	180	< 1	2,7	0,29
26	170	3,4	1,9	0,32
27	95	2,8	2,8	0,30
28	155	< 1	0,8	0,35

(*) Massa oli niin notkeaa, että notkeusmääritys oli tehtävä leviämäkokeella (SFS 5286). Leviämä oli 655 mm.

3 LUJUUDET

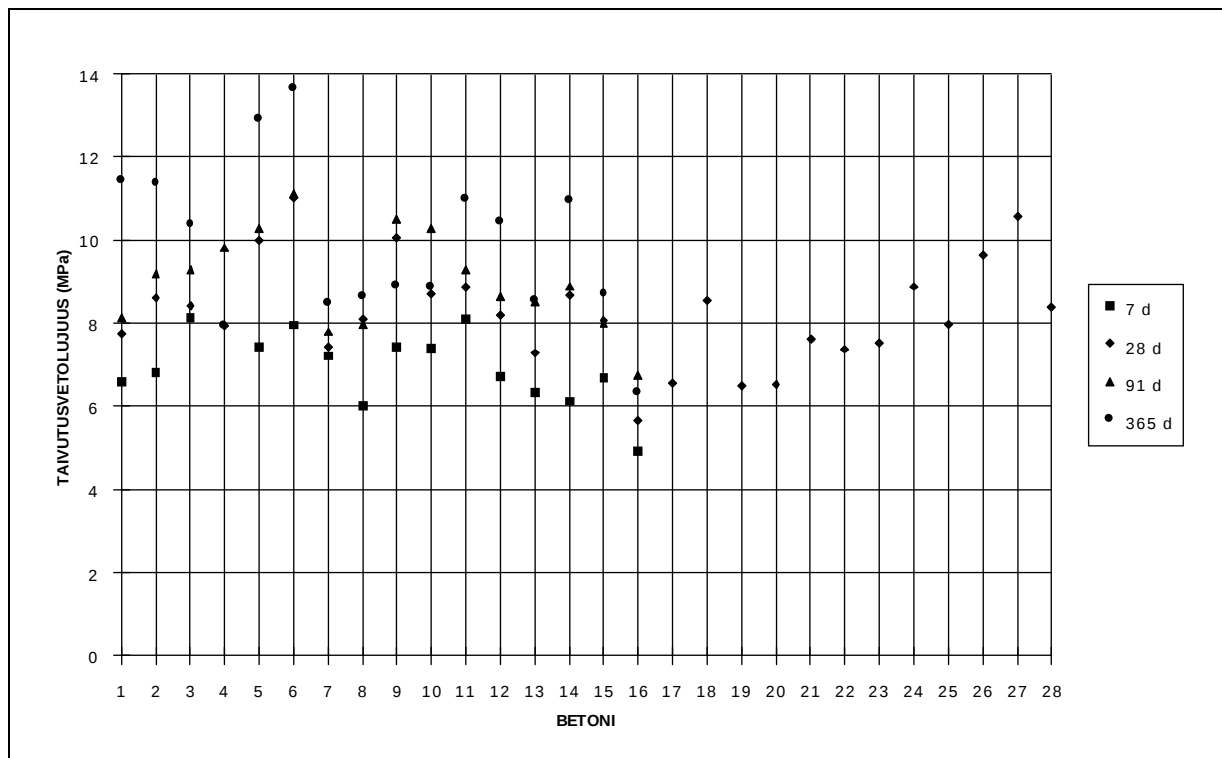
Puristuslujuudet määritettiin 100 x 100 x 100 mm³:n kuutioista standardin SFS 4474 mukaisesti. Taivutusvetolujuudet määritettiin standardin SFS 5444 mukaisesti kahdella viivakuormalla palkeista, joiden mitat olivat 100 x 100 x 500 mm³. Jänneväli oli 300 mm.

Puristuslujuudet ovat kuvassa 1. Ilman merkintöjä olevat lujuudet ovat koekappaleista, joita on säilytetty muottien purkamisen jälkeen 20 °C:n lämpötilassa ja 95 %:n suhteellisessa kosteudessa. Tähdellä (*) merkityt lujuudet ovat koekappaleista, jotka on säilytetty seitsemän vuorokauden iästä lähtien 40 °C:n lämpötilassa ja 95 %:n suhteellisessa kosteudessa.



Kuva 1. Betoneiden puristuslujuudet.

Taivutusvetolujuudet ovat kuvassa 2. Koekappaleita säilytettiin muottien purkamisen jälkeen 20 °C:n lämpötilassa ja 95 %:n suhteellisessa kosteudessa.



Kuva 2. Betoneiden taivutusvetolujuudet.

4 PAKKAS-SUOLAKOKEIDEN TULOKSET

Pakkas-suolakoe tehtiin standardin SFS 5449 mukaisesti. Koekappaleet olivat kokeessa 300 pakkas-suolakierroksen ajan, jolleivät ne hajonneet aikaisemmin. Koetulokset ovat taulukossa 3. Taulukossa olevat viivat (-) tarkoittavat, että koekappaleet on poistettu kokeesta aikaisemmin.

Taulukko 3. Pakkas-suolakokeiden tulokset (SFS 5449).

Betoni	Tilavuudenmuutos (%)							
	10 kierr.	25 kierr.	50 kierr.	100 kierr.	150 kierr.	200 kierr.	250 kierr.	300 kierr.
1	0,1	0,1	2,0	-4,2	-77,7	-	-	-
2	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,3	-0,2
3	0,0	-0,1	-0,4	-0,6	-0,7	-0,7	-0,6	-0,6
4	-0,1	-0,2	-0,5	-0,8	-1,7	-2,8	-3,3	-3,9
5	0,0	0,0	0,2	-0,2	-0,5	-0,9	-1,1	-1,2
6	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,2	-0,5	-0,6	-0,8
7	0,0	-0,6	-1,3	-4,4	-6,7	-9,5	-12,8	-16,6
8	-0,1	-0,3	-0,5	-1,0	-1,3	-2,0	-2,2	-3,1
9	-0,2	-0,4	-0,3	-0,4	-0,8	-1,1	-1,5	-1,6
10	0,1	-0,4	-0,4	-0,7	-1,1	-1,9	-3,0	-4,1
11	-0,2	-0,4	-0,3	-0,4	-0,8	-1,5	-1,8	-3,1
12	0,0	0,0	0,0	-0,2	-0,7	-0,7	-1,0	-0,9
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	-0,2	0,0	-0,1
14	0,0	0,0	-0,1	-0,5	-0,8	-1,1	-1,2	-1,4
15	0,0	0,0	-1,2	-2,9	-4,6	-7,3	-8,8	-11,3
16	0,0	-1,5	-3,8	-9,6	-16,9	-22,7	-27,8	-31,4
17	0,0	-0,1	-0,1	-2,0	-11,7	-43,5	-85,3	-96,8
18	0,0	-0,4	-0,6	-0,5	-0,8	-0,8	-1,7	-3,0
19	0,0	-0,3	-0,5	-0,2	-1,0	-1,5	-3,9	-7,1
20	0,2	0,2	-0,3	0,6	0,7	0,6	0,9	0,6
21	0,1	-0,7	-1,5	-2,0	-1,8	-2,1	-2,2	-2,3
22	-0,1	0,2	0,6	1,0	1,5	-11,2	-	-
23	0,0	0,2	0,2	0,1	-0,1	-0,4	-0,7	-0,9
24	0,0	-0,2	-0,4	-1,9	-4,6	-8,8	-	-
25	-0,4	-1,3	-2,4	-3,7	-6,0	-8,7	-	-
26	0,0	0,1	0,2	0,0	-0,3	-0,7	-1,5	-2,1
27	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1	-0,3	-0,3
28	0,1	-0,6	-3,3	-8,4	-12,5	-20,0	-	-

5 JÄÄDYTYS-SULATUSKOKEIDEN TULOKSET

Jäädytys-sulatuskokeet tehtiin standardin SFS 5447 mukaisesti. Koe-kappaleet olivat 100 x 100 x 500 mm³:n palkkeja. Vertailukappaleina olevia palkkeja säilytettiin vedessä. Jäädytys-sulatus- ja vertailupalkeista määritettiin ultraäänen nopeuksien suhteen neliöt ja suhteelliset massan muutokset. Tulokset esitetään taulukossa 4. Taulukossa olevat viivat (-) tarkoittavat, että koekappaleet on poistettu kokeesta aikaisemmin.

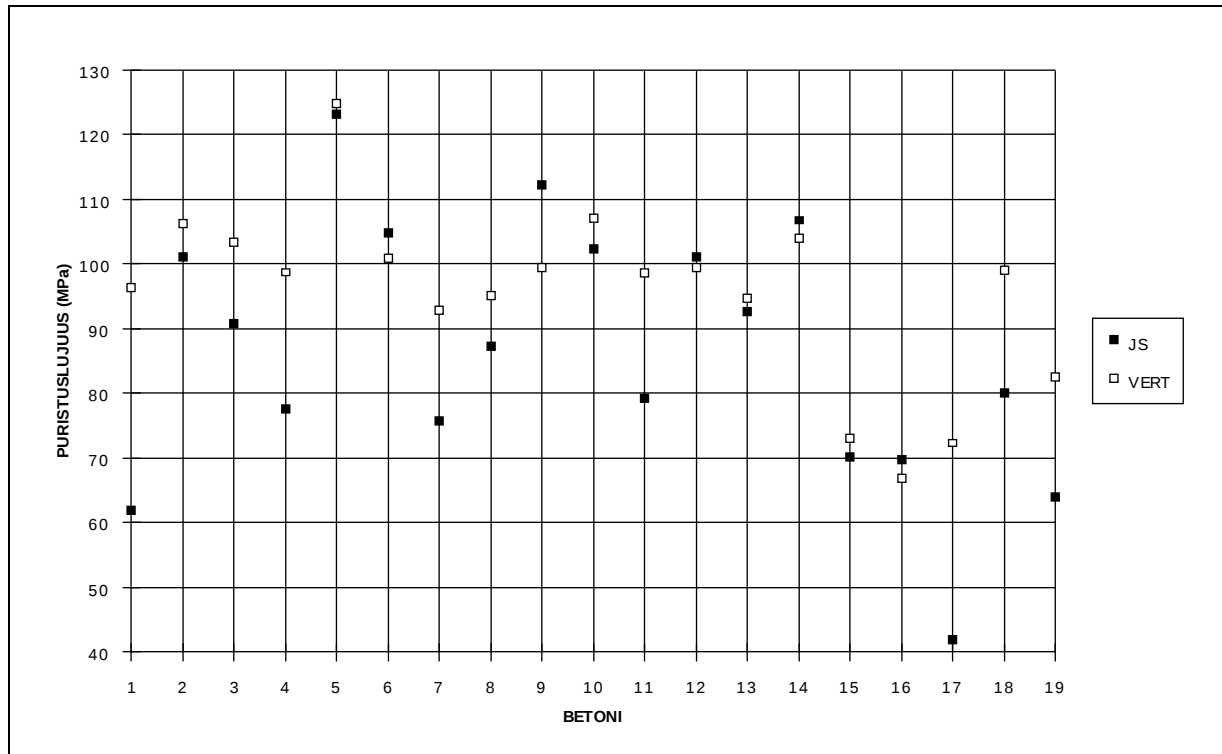
Taulukko 4. Jäädytys-sulatuskokeiden tulokset (SFS 5447).

Betoni	Ultraäänen nopeuksien suhteiden neliöt (v/v_v) ²						Suhteelliset massamuutokset (%)					
	100 kierr.	200 kierr.	500 kierr.	1000 kierr.	1500 kierr.	2000 kierr.	100 kierr.	200 kierr.	500 kierr.	1000 kierr.	1500 kierr.	2000 kierr.
1	0,622	0,285	0,353	0,380	(*)	(*)	0,315	0,697	1,255	1,537	(*)	(*)
2	0,950	0,938	0,931	0,925	0,943	0,971	-0,008	-0,030	-0,122	-0,100	-0,077	0,028
3	0,915	0,925	0,955	0,900	0,933	0,923	-0,037	0,069	-0,304	-0,312	-0,829	-0,869
4	0,918	0,955	0,835	0,656	0,754	0,577	0,021	0,063	0,037	0,352	0,440	0,627
5	0,955	0,979	0,948	0,929	0,697	0,853	0,118	0,259	0,199	0,186	0,828	0,821
6	0,894	0,888	0,923	0,876	0,940	0,498	-0,052	0,046	0,167	0,149	-0,008	0,651
7	0,900	0,954	0,980	0,960	0,912	0,950	0,037	0,031	0,097	-0,010	-0,043	-0,039
8	0,975	0,963	0,950	0,969	0,899	0,837	-0,011	-0,125	-0,087	-0,153	-0,188	0,358
9	0,974	0,962	0,962	0,967	0,990	0,990	-0,097	-0,063	-0,188	-0,160	-0,195	-0,233
10	0,974	0,987	0,974	0,677	0,500	0,220	-0,058	-0,063	-0,116	0,573	1,112	1,410
11	1,000	0,968	0,955	0,882	0,602	0,629	0,051	0,045	-0,027	0,287	0,338	0,207
12	0,980	0,967	1,000	0,967	0,847	0,895	-0,002	0,008	-0,061	-0,074	-0,211	-0,283
13	0,974	0,948	0,935	0,919	0,903	0,828	-0,018	-0,045	-0,123	-0,137	-0,162	-0,292
14	0,936	0,876	0,954	0,935	0,960	0,852	-0,071	-0,074	-0,126	-0,234	-0,295	-0,422
15	0,987	0,975	0,963	0,932	0,875	0,910	-0,152	-0,118	-0,140	-0,154	-0,249	-0,236
16	0,940	0,947	1,000	0,982	0,991	0,867	-0,154	-0,323	-0,188	-0,219	-0,042	0,054
17	0,303	0,249	0,067	-	-	-	0,470	0,706	1,106	-	-	-
18	0,880	0,919	0,540	-	-	-	0,045	0,206	0,834	-	-	-
19	0,908	0,678	0,327	-	-	-	0,000	0,057	0,104	-	-	-
20	0,968	0,847	0,000	-	-	-	-0,047	0,107	-	-	-	-
21	0,940	0,940	0,974	-	-	-	-0,053	-0,016	-0,032	-0,109	-	-
22	0,490	0,106	0,000	(**)	(**)	(**)	0,187	0,238	(**)	(**)	(**)	(**)
23	0,535	0,565	0,692	-	-	-	0,568	0,962	0,977	-	-	-
24	0,938	0,937	0,888	-	-	-	-0,049	0,381	0,065	-	-	-
25	0,925	0,906	0,872	-	-	-	0,163	0,000	0,123	-	-	-
26	0,976	0,910	0,913	-	-	-	-0,079	0,071	-0,055	-	-	-
27	0,966	0,964	0,908	-	-	-	0,000	0,262	0,167	-	-	-
28	0,800	0,819	0,827	-	-	-	0,016	0,041	0,212	-	-	-

(*) Kaksi jäädytys-sulatuskoepalkkia hajosi noin 250 jäädytys-sulatuskierroksen jälkeen, ja koetta jatkettiin 1 000 kierrokseen saakka yhdellä palkilla.

(**) Yksi jäädytys-sulatuskoepalkki poistettiin kokeesta 150 kierroksen jälkeen hajoamisen takia, ja koetta jatkettiin kahdella palkilla.

Betoneista 1 - 16 yhdestä jäädytys-sulatuspalkista (JS) sahattiin 1 000 jäädytys-sulatuskierroksen jälkeen kolme kuutiota (100 mm³) puristuslujuuden määrittämistä varten. Betoneista 17 - 19 puristuslujuudet määritettiin 500 jäädytys-sulatuskierroksen jälkeen. Vedessä säilytetyistä saman ikäisistä vertailupalkeista (VERT) sahattiin kuutiot vastaavasti. Puristuslujuudet ovat kuvassa 3. Betonin 1 jäädytys-sulatuspalkista sahattujen kuutioiden puristuslujuutta arvioitaessa on syytä ottaa huomioon, että rinnakkaispalkit olivat jo täysin hajonneita noin 250 jäädytys-sulatuskierroksen jälkeen.



Kuva 3. Jäädytys-sulatus- ja vertailukappaleiden puristuslujuudet.

6 OHUTHIEIDEN ANALYSOINTI

Betoneiden 1 - 19 jäädytys-sulatuskoepalkeista ja vedessä säilytetyistä vertailupalkeista valmistettiin ohuthieet mikroskooppitutkimuksia varten. Ohuthieiden valmistusta varten tarvittavat betoniviipaleet sahattiin noin 60 millimetrin etäisyydeltä palkkien päästä. Jäädytys-sulatuskoepalkeista etäisyys mitattiin kokeessa pystyssä olleiden palkkien alapinnasta, koska betonin vaurioituminen on alapinnan lähellä todennäköisesti voimakkaampaa kuin ylempänä palkissa. Ohuthieet valmistettiin betoneita 1, 17, 18 ja 19 lukuun ottamatta 1 000 jäädytys-sulatuskierroksen jälkeen. Vertailupalkeista valmistettiin ohuthieet samanaikaisesti. Betonista 1 ohuthieet valmistettiin 249 jäädytys-sulatuskierroksen jälkeen palkkien hajoamisen takia. Betoneista 17, 18 ja 19 ohuthieet valmistettiin 500 jäädytys-sulatuskierroksen jälkeen.

Ohuthieistä määritettiin halkeiluindeksit. Halkeiluindeksi kuvaa halkeamien ja säröjen määrää ja laatua betonissa. Indeksien arvo vaihtelee välillä 0 - 3. Indeksillä 0 tarkoitetaan, että betonissa ei ole halkeamia lainkaan tai niitä on erittäin vähän ja ne ovat pieniä säröjä. Indeksillä 3 tarkoitetaan, että betoni on erittäin voimakkaasti säröillyttä tai halkeillutta tai että halkeamat ovat pitkiä ja leikkaavia. Halkeiluindeksit esitetään taulukossa 5.

Taulukko 5. Jäädytys-sulatus- ja vertailupalkeista valmistetuista ohuthieistä määritetyt halkeiluindeksit.

Betoni	Halkeiluindeksi	
	Jäädytys-sulatus	Vertailu
1	3,0	2,5
2	1,0	1,5
3	1,5	2,0
4	1,5	1,0
5	2,0	0,0
6	3,0	0,5
7	1,5	1,0
8	1,5	0,0
9	0,5	0,5
10	1,0	0,5
11	3,0	0,5
12	2,0	1,0
13	1,0	1,0
14	0,0	0,0
15	0,0	0,0
16	2,5	2,5
17	3,0	1,5
18	3,0	1,0
19	3,0	0,5

Halkeiluindeksien avulla saadaan likimääräinen kuva näytteen halkeilusta. Halkeiluindeksien arvoihin vaikuttavat analyysin tekijän tulkinnot ja ohuthieiden laatu. Varsinkin korkealujuusbetoninäytteisiin saattaa muodostua säröjä betoniviipaleita hiottaessa. Halkeiluindeksit täydentävät kuitenkin muista kokeista saatuja tuloksia epätarkkuudesta huolimatta.

Näytteistä otettiin fluoresenssimikroskoopilla valokuvat, jotka havainnollistavat näytebetoneiden mikrorakennetta, erityisesti betoneiden huokosrakennetta ja halkeilua. Kuvat ovat liitteessä 1. Kuvien suurennus on 34 x, eli valokuvien lyhyt sivu vastaa 2,8 millimetriä näytteessä.

7 KAPILLAARISEN VEDELLÄKYLLÄSTYSKOKEEN TULOKSET

Kapillaarinen vedelläkyllästyskoe tehtiin vertailupalkeista sahatuista kolmesta rinnakkaiskappaleesta. Palkeista sahattujen siivujen paksuus oli noin 20 millimetriä. Siivut sahattiin palkkien päistä ja 10 cm:n etäisyydeltä palkkien päistä. Siivut sahattiin kahdesta eri kohdasta, jotta mahdolliset huokoisuuserojen vaikutukset jäädytys-sulatus- ja pakka-suolakestävyyteen saataisiin selville. Palkkien päistä sahattujen siivujen kapillaarisen vedelläkyllästyskokeen tulokset ovat taulukossa 6. Imeytys tapahtui palkin pään muottipinnasta. Taulukossa 7 esitetään 10 cm:n etäisyydeltä palkkien päistä sahattujen siivujen kapillaarisen vedelläkyllästyskokeen tulokset.

Taulukko 6. Palkkien päistä sahattujen siivujen kapillaarisen vedelläkyllästyskokeen tulokset.

Betoni	Kokonais- huokoisuus (l/m^3)	Suoja- huokos- suhde	Kapillaari- huokos- suhde	Geeli- huokos- suhde	Vedentun- keutumisen vastuskerroin (s/mm^2)	Kapillaari- suusluku ($kg/m^2 \sqrt{s}$)
1	132,6	0,336	0,276	0,388	22,6	0,0077
2	116,0	0,402	0,157	0,441	15,4	0,0046
3	96,9	0,345	0,163	0,492	15,3	0,0040
4	118,1	0,376	0,240	0,384	21,5	0,0061
5	95,4	0,370	0,188	0,442	18,0	0,0042
6	88,0	0,406	0,159	0,435	16,3	0,0035
7	93,0	0,432	0,182	0,386	23,6	0,0035
8	117,2	0,358	0,107	0,535	29,8	0,0023
9	93,7	0,302	0,113	0,585	20,7	0,0023
10	88,0	0,411	0,076	0,513	18,8	0,0015
11	94,2	0,439	0,091	0,470	19,5	0,0019
12	95,8	0,436	0,188	0,375	31,2	0,0032
13	93,0	0,503	0,127	0,370	19,0	0,0027
14	93,6	0,430	0,178	0,392	31,5	0,0030
15	120,9	0,455	0,120	0,425	33,4	0,0025
16	165,7	0,520	0,145	0,335	28,9	0,0045
17	129,3	0,429	0,228	0,343	22,8	0,0062
18	99,9	0,436	0,106	0,458	15,6	0,0027
19	98,8	0,507	0,148	0,345	33,3	0,0025

Taulukko 7. 10 cm:n etäisyydeltä palkkien päistä sahattujen siivujen kapillaarisen vedelläkyllästyskokeen tulokset.

Betoni	Kokonais- huokoisuus (l / m ³)	Suoja- huokos- suhde	Kapillaari- huokos- suhde	Geeli- huokos- suhde	Vedentun- keutumisen vastuskerroin (s / mm ²)	Kapillaari- suusluku (kg / m ² √s)
1	126,7	0,249	0,349	0,402	21,5	0,0095
2	123,3	0,326	0,252	0,422	26,4	0,0061
3	101,2	0,287	0,242	0,471	22,6	0,0052
4	114,2	0,232	0,391	0,377	35,6	0,0075
5	105,4	0,340	0,239	0,421	20,1	0,0056
6	88,7	0,321	0,228	0,451	29,4	0,0037
7	97,1	0,273	0,385	0,342	26,6	0,0072
8	120,2	0,279	0,189	0,532	20,4	0,0050
9	102,4	0,203	0,209	0,588	27,4	0,0041
10	102,3	0,290	0,230	0,481	39,8	0,0037
11	104,2	0,172	0,214	0,614	18,7	0,0052
12	101,1	0,295	0,222	0,484	25,2	0,0045
13	92,9	0,316	0,203	0,481	20,9	0,0041
14	105,0	0,284	0,237	0,478	28,5	0,0047
15	114,3	0,239	0,165	0,596	17,2	0,0045
16	182,0	0,268	0,336	0,396	30,8	0,0110
17	92,5	0,230	0,513	0,257	25,1	0,0095
18	99,4	0,198	0,184	0,618	16,5	0,0045
19	104,9	0,261	0,273	0,466	23,1	0,0060

Menetelmäkuvaus kapillaarisen vedelläkyllästyskokeen suorittamisesta on liitteessä 2.

8 PAKKAS-SUOLAKESTÄVYYTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Pakkas-suolakestävyydelle yritettiin löytää mahdollisimman yksinkertainen, mutta kuitenkin tilastollisesti merkitsevä malli. Tilastollinen analyysi tehtiin SPSS-ohjelmalla. Tilastollisissa analyyseissä tilastolliseksi merkitsevyysrajaksi valittiin 95 %. Kaikkien tässä ja seuraavissa kohdissa esitettävien mallien selitysasteet täyttävät tämän vaatimuksen eli ovat toisin sanoen tilastollisesti merkitseviä. Malleissa esitettävät selittävät muuttujat ja mahdolliset vakiot ovat myös tilastollisesti merkitseviä.

Pakkas-suolakestävyyteen vaikuttavia tekijöitä arvioitiin 300 pakkas-suolakierroksen tulosten perusteella. Ennen 300 pakkas-suolakierroksen saavuttamista hajonneiden koekappaleiden tilavuudenmuutokseksi merkittiin -100 %, jotta kaikki ennen 300 kierrosta hajonneet betonit saatiin mukaan analyysiin. Tällainen tilavuudenmuutos ei kuitenkaan tarkasti ottaen vastaa todellisuutta.

Tilastollinen analyysi aloitettiin korrelaatiokertoimien määrittämisellä. Korrelaatiokertoimet määritettiin seuraaville muuttujille:

- sementtimäärä
- silikamäärä
- lentotuhkamäärä
- kuonamäärä
- runkoainemäärä
- vesimäärä
- tehonotkistinmäärä
- huokoistinmäärä
- vesi-sideainesuhde
- betonimassan painuma
- betonimassan muodonmuutosaika
- betonimassan ilmapitoisuus
- puristuslujuudet (7, 28, 91 ja 365 d)
- taivutusvetolujuudet (7, 28, 91 ja 365 d)
- betonin kokonaishuokoisuus kapillaarisen vedelläkyllästyskokeen perusteella
- betonin suojahuokossuhde kapillaarisen vedelläkyllästyskokeen perusteella
- betonin kapillaarihuokossuhde kapillaarisen vedelläkyllästyskokeen perusteella
- betonin geelihuokossuhde kapillaarisen vedelläkyllästyskokeen perusteella
- betonin vedentunkeutumisen vastuserroin kapillaarisen vedelläkyllästyskokeen perusteella
- betonin kapillaarisuusluku kapillaarisen vedelläkyllästyskokeen perusteella.

Korrelaatioanalyysiin otettiin mukaan 300 kierroksen pakkas-suolakestävyyden itseisarvon neliöjuuri, kuutiojuuri ja kymmenkantainen logaritmi, koska lineaarisella asteikolla pakkas-suolakestävyytulokset ovat jakautuneet melko epätasaisesti. Positiivinen tilavuudenmuutos 300 kierrok-

sen kohdalla merkittiin korrelaatioanalyysissä ja myös kaikissa muissa analyysissä nollassi. Korrelaatiokertoimien perusteella 300 kierroksen pakkas-suolakestävyys itsesarvon neliöjuuri, kuutiojuuri ja kymmenkantainen logaritmi eivät korreloineet voimakkaasti edellä lueteltujen muuttujien kanssa. Voimakkaimmin 300 kierroksen pakkas-suolakestävyys itsesarvon neliöjuuri, kuutiojuuri ja kymmenkantainen logaritmi korreloivat kapillaarihuokossuhteen ja kapillaarisuusluvun kanssa.

Tilastollista analyysiä jatkettiin lineaarisella regressioanalyysillä siten, että selitettävänä muuttujana oli 300 kierroksen pakkas-suolakestävyys itsesarvon neliöjuuri, kuutiojuuri ja kymmenkantainen logaritmi. Selittävät muuttujat portaittaisessa regressioanalyysissä olivat

- sementtimäärä
- silikamäärä
- lentotuhkamäärä
- kuonamäärä
- runkoainemäärä
- vesimäärä
- tehonotkistinmäärä
- huokoistinmäärä
- vesi-sideainesuhde
- betonimassan painuma
- betonimassan muodonmuutos aika
- betonimassan ilmapitoisuus
- puristuslujuudet (7, 28, 91 ja 365 d)
- taivutusvetolujuudet (7, 28, 91 ja 365 d)
- betonin kokonaishuokoisuus kapillaarisen vedelläkyllästyskokeen perusteella
- betonin suojahuokossuhde kapillaarisen vedelläkyllästyskokeen perusteella
- betonin kapillaarihuokossuhde kapillaarisen vedelläkyllästyskokeen perusteella
- betonin geelihuokossuhde kapillaarisen vedelläkyllästyskokeen perusteella
- betonin vedentunkeutumisen vastuskerroin kapillaarisen vedelläkyllästyskokeen perusteella
- betonin kapillaarisuusluku kapillaarisen vedelläkyllästyskokeen perusteella.

Lineaarisella portaittaisella regressioanalyysillä 300 kierroksen pakkas-suolakestävyydelle ei löydetty sellaista mallia, jolla olisi ollut tyydyttävä selitysaste.

Seuraavaksi kokeiltiin tilastollista käyrän sovitus. Selitettävänä muuttujina kokeiltiin samoja muuttujia kuin lineaarisessa regressioanalyysissä. Selittävinä muuttujina olivat korrelaatiokertoimien ja tulosten silmämääräisen tarkastelun perusteella

- betonin kapillaarihuokossuhde kapillaarisen vedelläkyllästyskokeen perusteella
- betonin kapillaarisuusluku kapillaarisen vedelläkyllästyskokeen perusteella

Kapillaarihuokossuhteina ja kapillaarisuuslukuina käytettiin taulukon 7 arvoja.

Selittäviä muuttujia oli vain betoneista 1 - 19, joten betonit 20 - 28 jätettiin pois analyysistä. Mallintamismallissa todettiin lisäksi, että huokoistetut betonit eivät sovi hyvin malliin. Tämän takia myös betonit 15 ja 16 jätettiin pois analyysistä.

Sovitettavat käyrät olivat taulukon 8 mukaisia.

Taulukko 8. Tilastollisessa käyrän sovituksessa käytetyt mallit.

Malli	Yhtälö
Lineaarinen	$Y = b_0 + b_1 t$
Logaritminen	$Y = b_0 + b_1 \ln(t)$
Käänteinen	$Y = b_0 + (b_1 / t)$
Neliöllinen	$Y = b_0 + b_1 t + b_2 t^2$
Kuutiollinen	$Y = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3$
Yhdys	$Y = b_0 (b_1)^t$
Potenssi	$Y = b_0 (t)^{b_1}$
S	$Y = e^{(b_0 + b_1/t)}$
Kasvu	$Y = e^{(b_0 + b_1 t)}$
Eksponentiaalinen	$Y = b_0 e^{b_1 t}$
Logistinen	$Y = 1 / (1/u + b_0 (b_1)^t)$

Paras selitysaste saatiin, kun selitettävänä muuttujana oli 300 pakkas-suolakierroksen tilavuudenmuutoksen itseisarvon neliöjuuri $|y|^{1/2}$ ja selitettävänä muuttujana kapillaarisuusluku x . Parhaaksi malliksi saatiin tällöin 300 kierroksen pakkas-suolakestävyuden neliöjuurta kuvaava kolmannen asteen yhtälö

$$|y|^{1/2} = 47136800 x^3 - 506185 x^2 + 1592 x \quad (1)$$

missä kapillaarisuusluku x :n yksikkönä on $\text{kg} / \text{m}^2 \sqrt{\text{s}}$. Tulos saadaan prosentteina (%). Edellä oleva yhtälö voidaan ilmoittaa muodossa

$$|y| = (47136800 x^3 - 506185 x^2 + 1592 x)^2 \quad (2)$$

jolloin tulokseksi saadaan 300 pakkas-suolakierroksen tilavuudenmuutoksen itseisarvo. Selitystasoksi edellä olevalle yhtälölle saatiin 0,964.

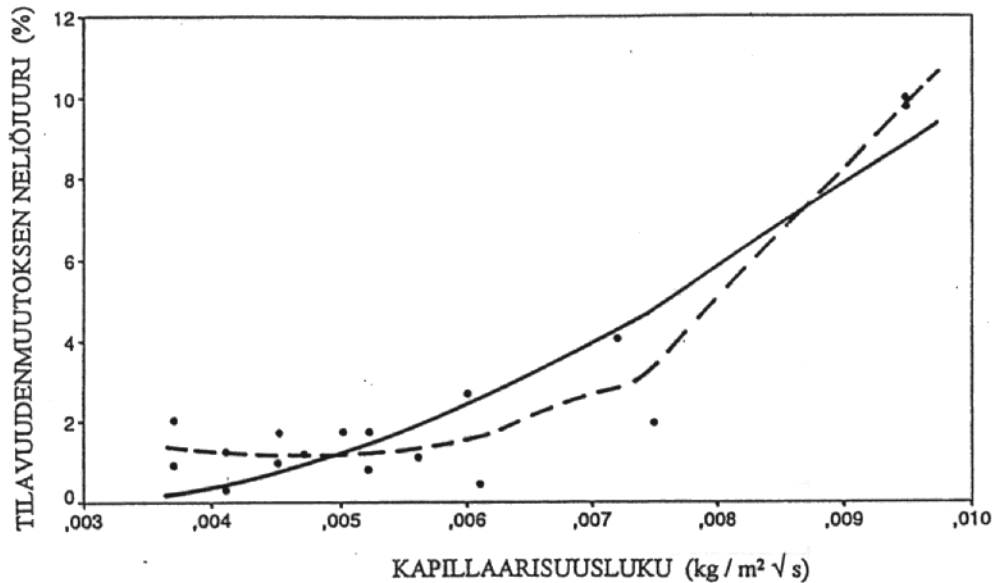
Käytäntöä ajatellen malliksi kannattaa kuitenkin valita 300 kierroksen pakkas-suolakestävyuden neliöjuurta kuvaava toisen asteen yhtälö, koska kolmannen asteen termi ei lisännyt merkittävästi selitystasetta. Lisäksi toisen asteen yhtälö antaa enemmän varman puolella olevan mallin (kuva 4). Yhtälö on

$$|y|^{1/2} = 152258 x^2 - 510 x \quad (3)$$

ja se voidaan ilmoittaa muodossa

$$|y| = (152258 x^2 - 510 x)^2 \quad (4)$$

Selitysteeksi saatiin 0,913.



Kuva 4. Betonien 1 - 14, 17, 18 ja 19 pakkas-suolakestävyyden toisen ja kolmannen asteen mallit kapillaarisuosluvun funktiona. Toisen asteen malli on yhtenäisellä viivalla ja kolmannen asteen malli katkoviivalla.

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää mahdollisimman yksinkertainen malli korkealujuusbetonin pakkas-suolakestävyydelle. Sen takia koeaineistosta valittiin melko yhtenäinen ryhmä betoneita, jotka poikkesivat toisistaan lähinnä vesi-sideainesuhteen ja vesimäärän osalta. Valitut betonit olivat betonit 1 - 6, 17, 20, 23 ja 27. Nämä betonit olivat huokoistamattomia ja niiden sementti- ja silikamäärät olivat likimain samansuuruisia.

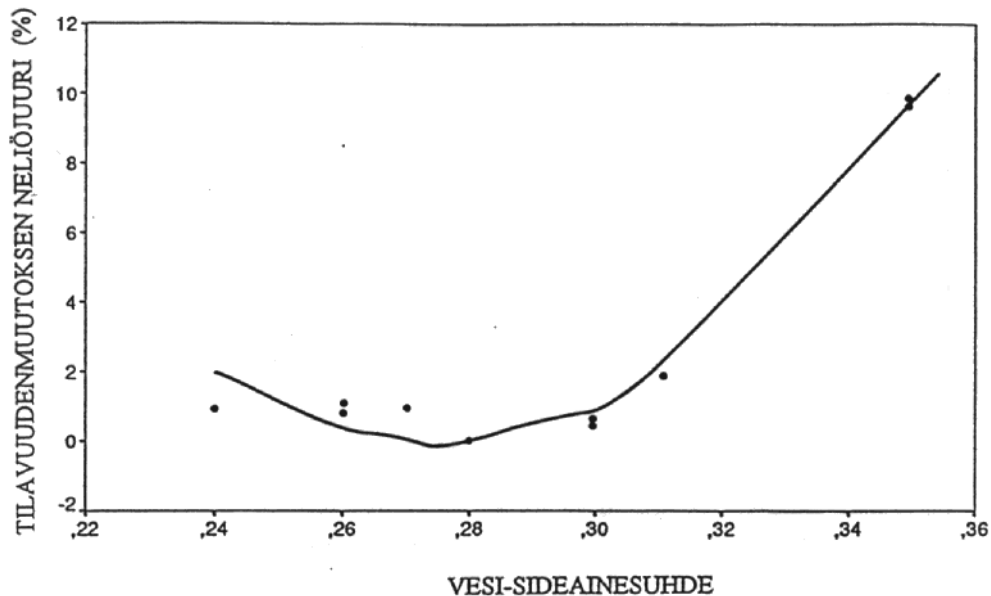
Lineaarisen korrelaatioanalyysin perusteella edellä valitun pakkas-suolakestävyyttä kuvaavan mallin (3) selittävä muuttuja, kapillaarisuusluku, korreloi voimakkaasti vesi-sideainesuhteen ja vesimäärän kanssa. Kapillaarisuusluvun ja vesi-sideainesuhteen välinen korrelaatio oli hieman voimakkaampi kuin kapillaarisuusluvun ja vesimäärän. Lisäksi vesi-sideainesuhde on ehkä hieman informatiivisempi parametri kuin vesimäärä. Edellä oleva malli (3) voidaan ilmoittaa muodossa

$$|y|^{1/2} = 1685 z^2 - 923 z + 126,4 \quad (5)$$

tai toisessa muodossa

$$|y| = (1685 z^2 - 923 z + 126,4)^2 \quad (6)$$

missä z tarkoittaa vesi-sideainesuhdetta. Mallin selitysaste on 0,972. Malli esitetään kuvassa 5.



Kuva 5. Betonien 1 - 6, 17, 20, 23 ja 27 pakkas-suolakestävyiden malli vesi-sideainesuhteen funktiona.

Malli koskee vain kyseessä olevia betoneita. Jos sementti- ja silikamääriä tai silikapitoisuutta muutetaan, mallia ei voida todennäköisesti soveltaa sellaisenaan.

Seuraavassa luvussa käsiteltävästä jäädytys-sulatuskestävyyttä kuvaavasta mallista jätettiin pois huokoistettujen betoneiden lisäksi kvartsia sisältävät betonit. Jos kvartsia sisältävät betonit jätetään pois myös pakkas-suolakestävyttä kuvaavasta mallista, saadaan tilastollisen käyrän sovituksen avulla parhaaksi malliksi yhtälön (1) tilalle yhtälö

$$|y|^{1/2} = 47392453 x^3 - 496317 x^2 + 1478 x \quad (7)$$

joka voidaan ilmoittaa muodossa

$$|y| = (47392453 x^3 - 496317 x^2 + 1478 x)^2 \quad (8)$$

Selitysaste tälle mallille on 0,975.

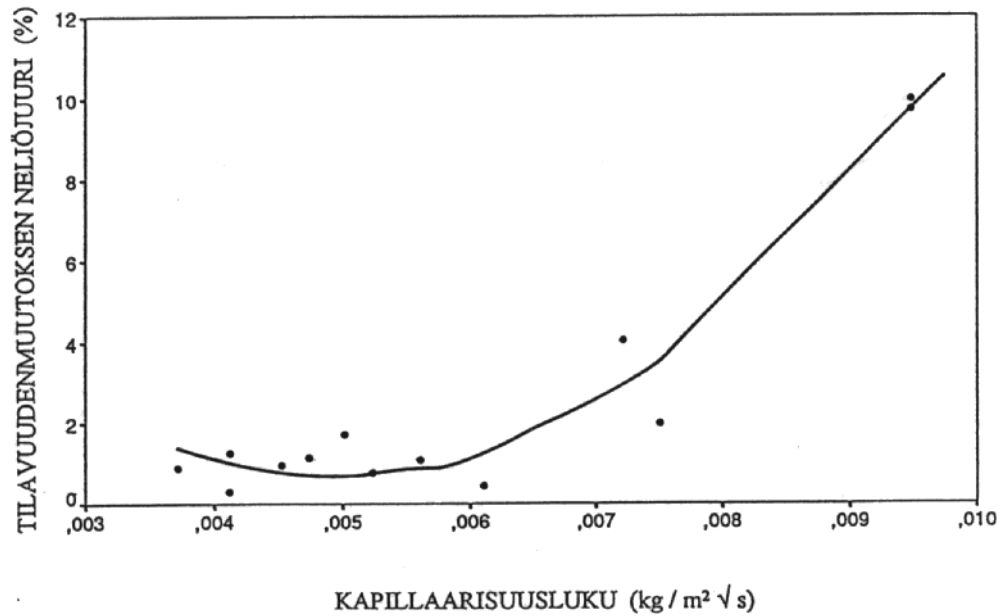
Malliksi valittiin kuitenkin 300 kierroksen pakkas-suolakestävyiden neliöjuurta kuvaava toisen asteen yhtälö, koska kolmannen asteen termi ei lisännyt merkittävästi selitystettä. Yhtälö on

$$|y|^{1/2} = 435698 x^2 - 4306 x + 11,3 \quad (9)$$

ja se voidaan ilmoittaa muodossa

$$|y| = (435698 x^2 - 4306 x + 11,3)^2 \quad (10)$$

Selitysasteeksi saatiin 0,950. Malli esitetään kuvassa 6.



Kuva 6. Betonien 1 - 9, 12, 13, 14 ja 17 pakkas-suolakestävyyden malli kapillaarisuusluvun funktiona.

Yhtälöiden (4) ja (10) selitysasteiden perusteella kvartsia sisältävät betonit 10, 11, 15, 18 ja 19 huonontavat hieman pakkas-suolakestävyyttä kuvaavaa mallia. Ero on kuitenkin melko pieni.

9 JÄÄDYTYKSEN-SULATUSKESTÄVYYTEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Jäädytys-sulatuskestävyyden arviointi oli hankalaa, koska jäädytys-sulatuskokeesta saatavat tulokset eivät välttämättä kuvaa tarkasti ja yksikäsitteisesti betonin vaurioitumista.

Ultraäänien nopeuksien suhteiden neliöt saattavat alentua hetkeksi ja sen jälkeen kasvaa uudestaan. Halkeamien syntyessä ultraäänien nopeus koekappaleessa hidastuu. Kun halkeamat alkavat halkeamien synnyn jälkeen vähitellen täyttymään, ultraääni läpäisee koekappaleen jälleen melko nopeasti. Jos ultraäänien nopeuksien suhteiden neliöiden muutokset peräkkäisillä mittauskerroilla ovat melko vähäisiä, halkeilun syntymistä on vaikea havaita. Tilanne on vielä hankalampi, jos mittaukset tehdään harvoin.

Suhteelliset massamuutokset eivät kuvaa tyydyttävästi halkeilua. Jäädytys-sulatuskokeista saatujen kokemusten perusteella korkealujuusbetonit eivät yleensä murene, vaikka halkeilu olisi runsasta. Suhteellista massamuutosta voidaan kuitenkin pitää kohtuullisen tarkkana halkeilun syntymisajankohdan indikaattorina. Jos suhteellinen massamuutos on hetkellisesti positiivinen, se yleensä tarkoittaa betonin lujuutta selvästi alentavan halkeilun muodostumista. Positiivista suhteellista massamuutosta voi olla vaikea havaita, jollei punnituksia tehdä riittävän lyhyin väliajoin.

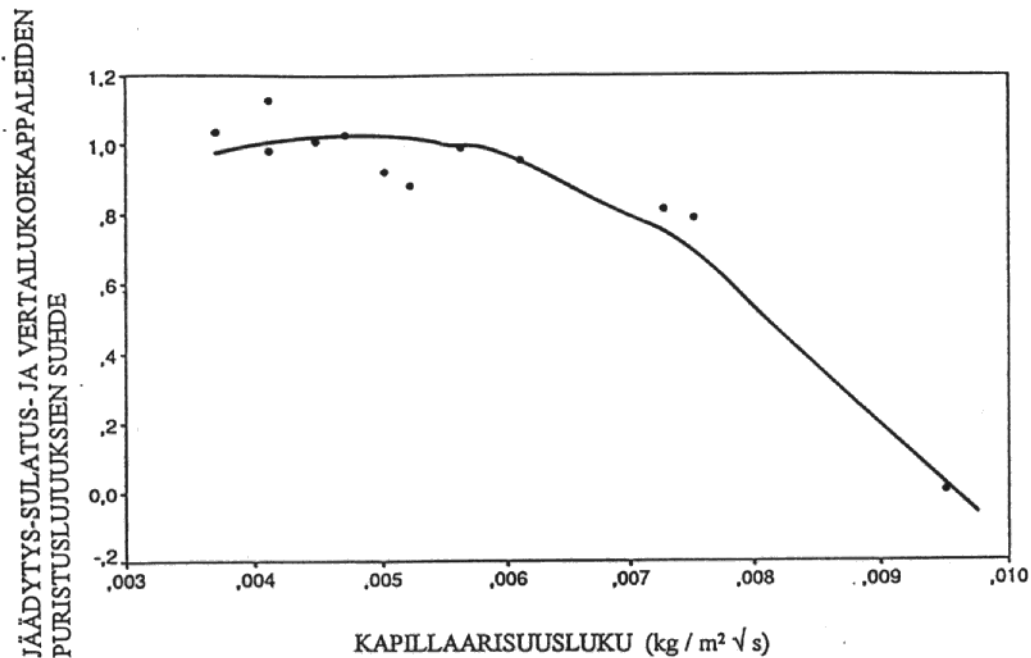
Ultraäänien nopeuksien suhteiden neliöt ja suhteelliset massamuutokset eivät edellä mainituista syistä sovellu tarpeeksi hyvin jäädytys-sulatuskestävyyden mallintamiseen. Sen takia mallin perustaksi valittiin jäädytys-sulatus- ja vertailukoekappaleista määritettyjen puristuslujuuksien suhde 1 000 jäädytys-sulatuskierroksen jälkeen.

Tilastollinen analyysi tehtiin SPSS-ohjelmistolla. Selittäväksi muuttujaksi valittiin ensimmäisenä kapillaarisuusluku taulukosta 7, jotta pakkasuola- ja jäädytys-sulatuskestävyyttä voitaisiin selittää samalla muuttujalla. Lisäksi taulukon 7 kapillaarisuusluvut näyttivät silmämääräisesti arvioiden kuvaavan melko hyvin jäädytys-sulatus- ja vertailukoekappaleista määritettyjen puristuslujuuksien suhdetta. Huokoistettujen (betonit 15 ja 16) ja kvartsia sisältävien (betonit 10, 11, 15, 18 ja 19) betoneiden kapillaarisuusluvut eivät silmämääräisesti arvioiden sopineet malliin ja sen takia nämä betonit jätettiin pois tilastollisesta analyysistä.

Tilastollisen käyrän sovituksen perusteella jäädytys-sulatus- ja vertailukoekappaleista määritettyjen puristuslujuuksien suhteelle saatiin yhtälö

$$j = -44981 x^2 - 430 x \quad (11)$$

missä j on jäädytys-sulatus- ja vertailukoekappaleiden puristuslujuuksien suhde 1 000 jäädytys-sulatuskierroksen jälkeen (kuva 3) ja x taulukon 7 mukainen kapillaarisuusluku. Selityskertoimen mallille on 0,994. Mallintamisvaiheessa selitettävälle muuttujalle j annettiin betoneiden 1 ja 17 tapauksessa arvo 0, koska nämä betonit hajosivat huomattavasti ennen 1000 jäädytys-sulatuskierroksen saavuttamista. Näin mallille saatiin lisäksi lisää varmuutta. Malli esitetään kuvassa 7.

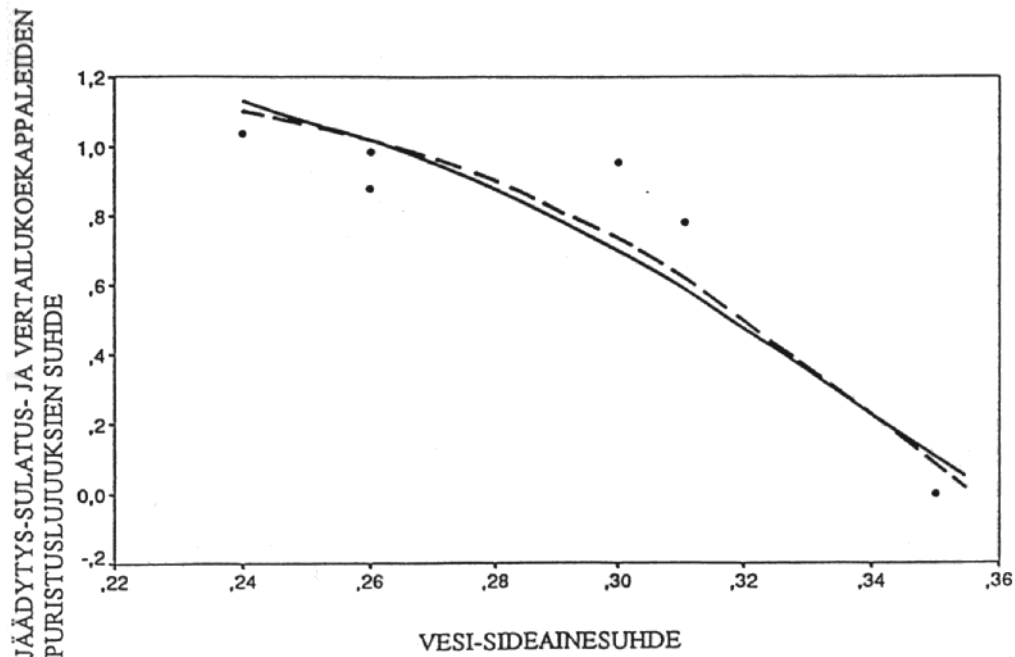


Kuva 7. Betonien 1 - 9, 12, 13, 14 ja 17 jäädytys-sulatuskestävyyden malli kapillaarisuusluvun funktiona.

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää mahdollisimman yksinkertainen malli korkealujuusbetonin jäädytys-sulatuskestävyydelle. Sen takia koe-aineistosta valittiin betonit 1 - 6 ja 17 tarkempaa mallintamista varten. Nämä betonit olivat huokoistamattomia ja niiden sementti- ja silikamäärät olivat likimain samansuuruisia. Betonit ovat samoja kuin pakkas-suolakestävyyden tarkennetussa mallintamisessa käytetyt betonit. Yhtälöä (5) vastaavasti saadaan malliksi

$$j = -40,0 z^2 + 14,3 z \quad (12)$$

missä z tarkoittaa vesi-sideainesuhdetta. Mallin selitysaste on 0,964. Malli esitetään kuvassa 8.



Kuva 8. Betonien 1 - 6 ja 17 jäädytys-sulatuskestävyyden malli vesi-sideainesuhteen funktiona. Toisen asteen malli on yhtenäisellä viivalla ja kolmannen asteen malli katkoviivalla.

Malli koskee vain kyseessä olevia betoneita. Jos sementti- ja silikamääriä tai silikapitoisuutta muutetaan, mallia ei voida todennäköisesti soveltaa sellaisenaan.

10 YHTEENVETO PAKKAS-SUOLA- JA JÄÄDYTYS-SULATUSKESTÄVYYTEEN VAIKUTTAVISTA TEKIJÖISTÄ

Pakkas-suola- ja jäädytys-sulatuskestävyyttä voidaan huokoistettuja ja kvartsia sisältäviä betoneita lukuun ottamatta kuvata malleilla

$$|y| = (435698 x^2 - 4306 x + 11,3)^2 \quad (13)$$

$$j = -44981 x^2 - 430 x \quad (14)$$

missä $|y|$ on 300 pakkas-suolakierroksen aikana tapahtunut tilavuudenmuutoksen itseisarvo prosentteina, j jäädytys-sulatus- ja vertailukoe-kappaleista määritettyjen puristuslujuuksien suhde 1 000 jäädytys-sulatuskierroksen jälkeen ja x kapillaarisuusluku. Kapillaarisuusluku x määritetään jäädytys-sulatuspalkkien vedessä säilytetyistä vertailupalkeista 1 000 jäädytys-sulatuskierroksen saavuttamisen jälkeen. Kapillaarisuusluku määritetään 10 cm:n etäisyydeltä vertailupalkin päästä sahatusta betoniviipaleesta. Kapillaarisuusluvun yksikkönä malleissa on $\text{kg} / \text{m}^2 \sqrt{\text{s}}$.

Mallit ovat tilastollisesti merkitseviä, vaikka koemateriaali on melko suppea. Kvartsia sisältävien betoneiden pakkas-suolakestävyyden arvioimiseen voidaan käyttää yhtälöä (4). Tuloksia ei kuitenkaan voida pitää kovin luotettavina, koska kvartsia sisältäviä betoneita on liian vähän. Jäädytys-sulatuskestävyyttä kuvaaviin malleihin kvartsia sisältävät betonit eivät sopineet.

Kun koebetoneista erotettiin melko yhtenäinen ryhmä tarkennettua analyysiä varten, pakkas-suola- (betonit 1 - 6, 17, 20, 23 ja 27) ja jäädytys-sulatuskestävyys (betonit 1 - 6 ja 17) voitiin ilmoittaa vesi-sideainesuhteen funktiona. Yhtälöt pakkas-suola- ja jäädytys-sulatuskestävyydelle ovat tällöin

$$|y| = (1685 z^2 - 923 z + 126,4)^2 \quad (15)$$

$$j = -40,0 z^2 + 14,3 z \quad (16)$$

missä z tarkoittaa vesi-sideainesuhdetta. Nämä yhtälöt soveltuvat hyvin vain samankaltaisille betoneille. Lentotuhkaa, masuunikuonaa ja ehkä myös kvartsia sisältäville betoneille löydettäisiin todennäköisesti omia vastaavia malleja, jos näitä betoneita olisi enemmän.

Edellä mainitun perusteella kapillaarisuusluku kuvaa melko yleisesti korkealujuusbetonien pakkas-suola- ja jäädytys-sulatuskestävyyttä. Kapillaarisuusluku voidaan kuitenkin ilmoittaa melko yhtenäisissä betoniryhmissä vesi-sideainesuhteen avulla. Betoniryhmien rajan määrittäminen saattaa kuitenkin olla käytännössä hankalaa.

Pakkas-suolakokeiden perusteella suuri vesimäärä heikentää pakkas-suolakestävyyttä. Kvartsia sisältävät betonit eivät myöskään kestäneet erityisen hyvin.

Jäädytys-sulatuskestävyyskokeiden perusteella silikaa sisältävät Pika-sementillä (P40/3) valmistetut betonit eivät kestä hyvin jäädytys-sulatuskokeessa, jos vesi-sideaine on suurempi kuin 0,30. Koebetoneiden perusteella voidaan myös todeta, että karkeimpien sementtien P40/28 SR ja P40/91 kanssa ei pitäisi käyttää silikaa. Silikan käyttö on kuitenkin mahdollista, jos kapillaarisuusluku saadaan suotuisalle alueelle. Lentotuhkaa tai masuunikuonaa sisältävät betonit kestivät parhaiten jäädytys-sulatuskokeessa. Useimmissa lentotuhka- ja masuunikuonabetoneissa oli silikaa ja sementtinä oli betoneita 21 ja 28 lukuunottamatta P40/7. Betoneissa 21 ja 28 sementtinä oli P40/3. Myös nämä betonit kestivät suhteellisen hyvin. Sementtilaatujen vaikutusta jäädytys-sulatuskestävyyteen on kuitenkin vaikea arvioida tämän koemateriaalin perusteella. Huokoistettu betoni 16 alkaa selvästi hajoamaan 1 500 ja 2 000 jäädytys-sulatuskierroksen välillä (taulukko 4). Paras jäädytys-sulatuskestävyys 2 000 jäädytys-sulatuskierroksen jälkeen on lentotuhkabetonilla 9 (taulukko 4 ja kuva 3). Tämä betoni kesti hyvin myös pakkas-suolakokeessa.

Mikrosuhteitettujen eli kvartsia sisältävien betonien jäädytys-sulatuskestävyys kannattaa tässä tutkimuksessa tehtyjen kokeiden perusteella varmistaa huokoistuksella. Tosin kvartsia sisältävässä huokoistetussakin betonissa 15 on 1 000 ja 1 500 jäädytys-sulatuskierroksen kohdalla lieviä säröilyn tai halkeilun merkkejä. Ultraäänien nopeuksien suhteiden neliö alenee 1 000 ja 1 500 kierroksen välillä ja myös jäädytys-sulatus- ja vertailukoekappaleiden puristuslujuuksien perusteella 1 000 jäädytys-sulatuskierroksen kohdalla on merkkejä lievistä säröilyistä tai halkeilusta.

Ohuthieistä määritetyt halkeiluindeksit vastaavat hyvin taulukossa 4 ja kuvassa 3 esitettyjä jäädytys-sulatuskokeesta saatuja tuloksia.

Edellä olevien tulosten perusteella korkealujuusbetoneita ei tarvitse huokoistaa pakkas-suola- tai jäädytys-sulatuskestävyyden takia, jos betonin kapillaarisuusluku on suotuisalla alueella. Kvartsia sisältävien mikrosuhteitettujen betoneiden huokoistaminen on kuitenkin suositeltavaa jäädytys-sulatuskestävyyden kannalta ainakin tässä tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella.

11 OHJEITA PAKKASENKESTÄVÄN KORKEALUJUUSBETONIN VALMISTAMISEKSI

Yleistä

Tämän tutkimuksen tulosten perusteella voidaan korkealujuusbetonin pakkasenkestävyyden todeta olevan yleensä hyvän. Koska korkealujuusbetonin valinnalla pyritään usein erittäin hyvään säänkestoon poikkeuksellisen rasittavissa ympäristöolosuhteissa, on seuraavaan yhteenvetoon koottu käytännönläheisiä ohjeita suhteitusta ja laadunvarmistusta varten. Osa ohjeista perustuu suoraan tämän tutkimuksen tuloksiin, osa käytännön työssä ja laadunvalvonnassa saatuihin kokemuksiin. Ohjeet soveltuvat valettaville massoille. Leikkaustiivistettävät massat, puristustärytetyt tuotteet ja vastaavat jäävät tämän ohjeen ulkopuolelle.

Nämä ohjeet koskevat korkealujuusbetonin valmistusta erittäin ankaariin ympäristöolosuhteisiin. Tyypillisiä tällaisia ovat vaakasuoria tai lähes vaakasuoria pintoja käsittävät rakenneosat ulkona, erityisesti, jos ne joutuvat alttiiksi jäänsulatusaineille, siltojen reunapalkit ja avomerirakenteet. Ohjeet eivät koske tavanomaisia ulkorakenteita, kuten julkisivuja.

Käytännön ohjeet

1. Portlandsementtiä käytettäessä ja myös kohtuullisin silikalisäyksin (noin 5 %:iin asti) on pakkasenkestävyys erittäin hyvä vesi-sementtisuhteen ollessa korkeintaan 0,30 ja massan helposti työstettävää. Käytännössä valmisbetonituotannossa vesi-sideainesuhde 0,28 on hyvä yläraja, koska se sallii nesteytinlisäyksen tarvittaessa vielä valukohteessa. Todellisen vesi-sideainesuhteen tarkka seuranta on oleellinen osa laadunvarmistusta.
2. Vesi-sideainesuhteen kasvaessa välillä 0,30 - 0,35 huokostamattoman betonin pakkasenkestävyys heikkenee jyrkästi, joskin sideaine- ja suhteituskohtaiset erot ovat suuria. Tällä alueella on huokostus tarpeen, jollei ennakkokokein osoiteta, että betoni soveltuu *riittävällä vesi-sideainesuhtemarginaalilla* käytettäväksi ilman huokostusta.
3. Ankarissa ympäristöolosuhteissa vesi-sideainesuhde 0,35 tai suurempi edellyttää saatujen tulosten mukaan huokostusta.
4. Lentotuhkaa käytettäessä voidaan käyttää samoja ohjeita kuin edellä. Vesi-sideainesuhde lasketaan käyttäen lentotuhkalle korkeintaan kerrointa 0,30. Korkealujuuksisen lentotuhkabetonin huokostamista ei suositella huokostuksen vaikean hallittavuuden vuoksi.
5. Masuunikuonaa tai suurta silika-annostusta käytettäessä on riittävän pitkä ja huolellinen jälkihoito tarpeen niin koekappaleille kuin itse rakennettakin valmistettaessa. Näissä tapauksissa suositellaan ennakkokokeiden tekoa siten, että niihin kuuluu koekappaleiden vanhennuskäsittely.
6. Hyvä työstettävyys on tärkeää pakkasenkestävyyden kannalta. Huonosti tiivistynyt betoni ei ole pakkasenkestävää. Suurikaan nesteytinannostus (20 kg/m^3) ei tulosten perusteella huononna pakkasenkestävyyttä.

7. Käytettävissä olevan tulospateriaalin mukaan korkealujuusbetonin (K80 tai yli) huokostaminen ei välttämättä johda hyvään lopputulokseen. On ilmeistä, että käytännössä huokostus on edullinen suunnilleen lujuustasoon K60 - K70 asti.
8. Suojahuokoskoe ei sovellu korkealujuusbetonin pakkasenkestävyyden arviointiin. Portlandsementtibetonilla, mukaan lukien silikalisäys noin 5 %:iin asti, voidaan kapillaarisuuslukua käyttää pakkasenkestävyyden nopeaan arviointiin.
9. Pakkas-suolakestävyys ja jäädytys-sulatuskestävyys ovat eri ominaisuuksia eikä niiden välillä ole vahvaa riippuvuutta. Ennakkokokeiden tulee vastata todellista rasitustyyppiä.
10. Halkeillut betoni ei ole pakkasenkestävää. Koska korkealujuusbetonin vesimäärä on pieni, tulee kiinnittää huomiota erityisesti plastisen halkeilun estämiseen. Tältä kannalta jälkihoidon välitön aloittaminen betonipinnan viimeistelyn jälkeen on välttämätöntä.

12 JATKOTUTKIMUSTARPEET

Koesarjaa tulisi laajentaa siten, että esimerkiksi sementtimäärän ja silika-pitoisuuden vaikutus pakkas-suola- ja jäädytys-sulatuskestävyyteen selviäisi. Koesarjan laajentamisella voitaisiin selvittää, voiko karkeilla sementeillä ja silikalla saavuttaa sellaista huokoisuutta, että kapillaarisuusluku olisi suotuisalla alueella. Mallien tarkentamiseksi tarvittaisiin myös lisää mittaustuloksia. Betoneiden ryhmittely siten, että pakkas-suola- ja jäädytys-sulatuskestävyyttä voitaisiin kuvata vesi-sideainesuhteella, vaatisi huomattavan paljon lisäkokeita.

Kvartsia sisältävien ja huokoistettujen betoneiden pakkas-suola- ja jäädytys-sulatuskestävyyttä ei onnistuttu kuvaamaan kapillaarisuusluvulla. Vaurioitumismekanismien selvittäminen varsinkin mikrosuhteutetuilla kvartsia sisältävillä betoneilla edellyttää jatkotutkimuksia.

Koesarjan laajentamisen lisäksi mallien vastaavuus käytännön kokemusten kanssa tulisi selvittää. Tähän voidaan käyttää hyväksi olemassa olevien korkealujuusbetonirakenteiden säilyvyystietoja tai mahdollisia koerakenteita. Jos tarkoin dokumentoitua tietoa ei ole, korkealujuusbetoneille pitäisi tehdä kenttäkokeita tai valmistaa koerakenteita.

STANDARDEJA

SFS 4474. 1988. Betoni. Puristuslujuus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 4 s.

SFS 5284. 1987. Betonimassa. Notkeus. Painuma. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 2 s.

SFS 5285. 1987. Betonimassa. Notkeus. Muodonmuutosaika (VB-luku). Helsinki. Suomen Standardisoimisliitto. 3 s.

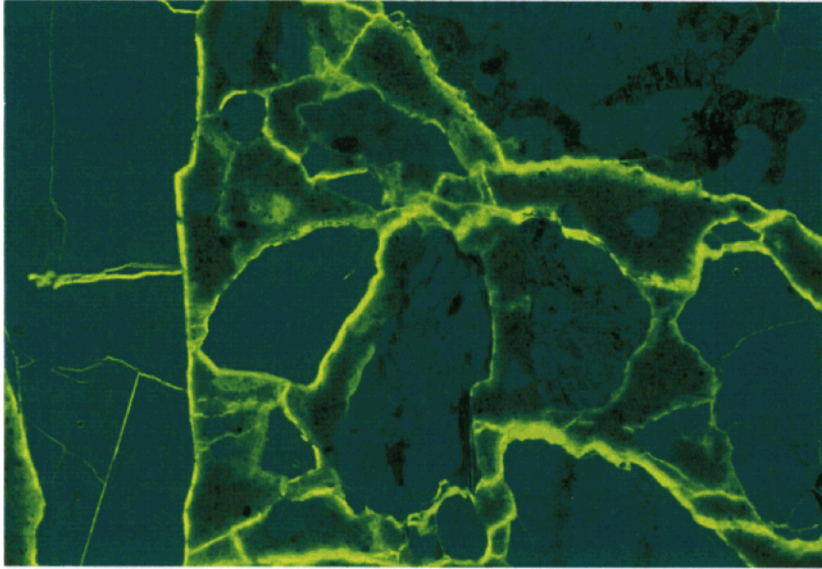
SFS 5287. 1987. Betonimassa. Ilmapitoisuus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 3 s.

SFS 5444. 1988. Betoni. Taivutusvetolujuus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 3 s.

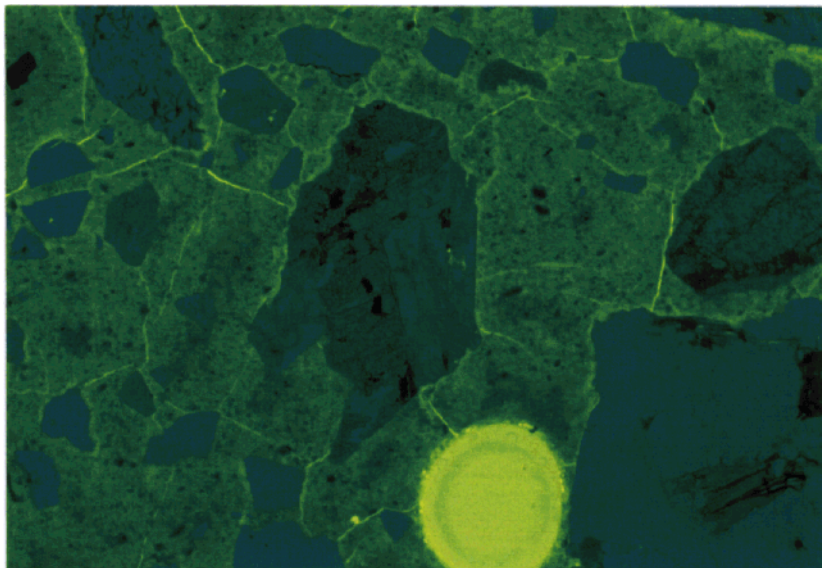
SFS 5447. 1988. Betoni. Säilyvyys. Jäädytys-sulatuskestävyys. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 2 s.

SFS 5449. 1988. Betoni. Säilyvyys. Pakkas-suolakestävyys. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 3 s.

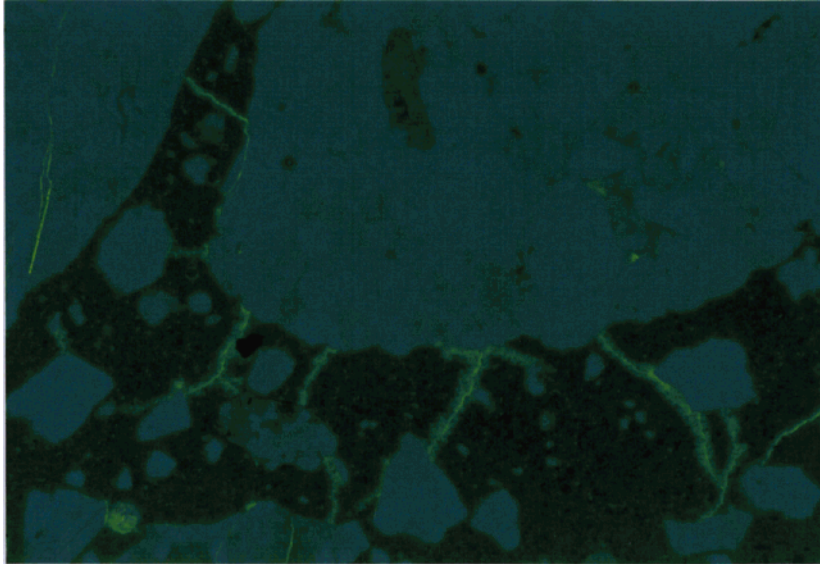
LIITE 1
VALOKUVIA JÄÄDYTYKSEN-SULATUS- JA
VERTAILUPALKEISTA VALMISTETUISTA
OHUTHIEISTÄ



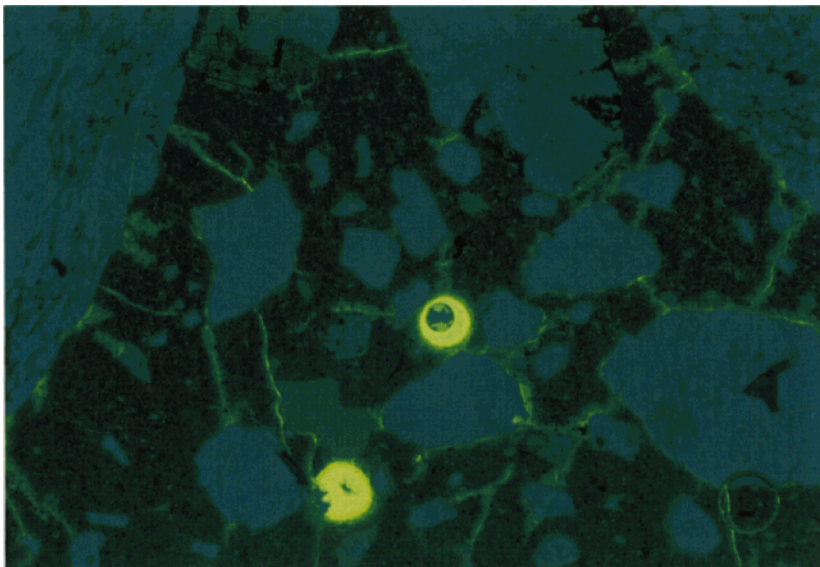
Kuva 1. Valokuva betonin 1 jäädytys-sulatuskoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



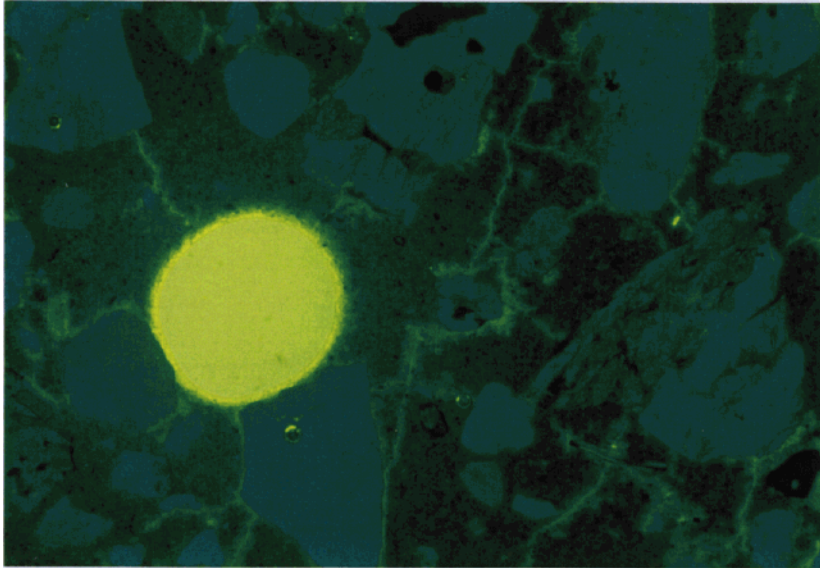
Kuva 2. Valokuva betonin 1 vertailukoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



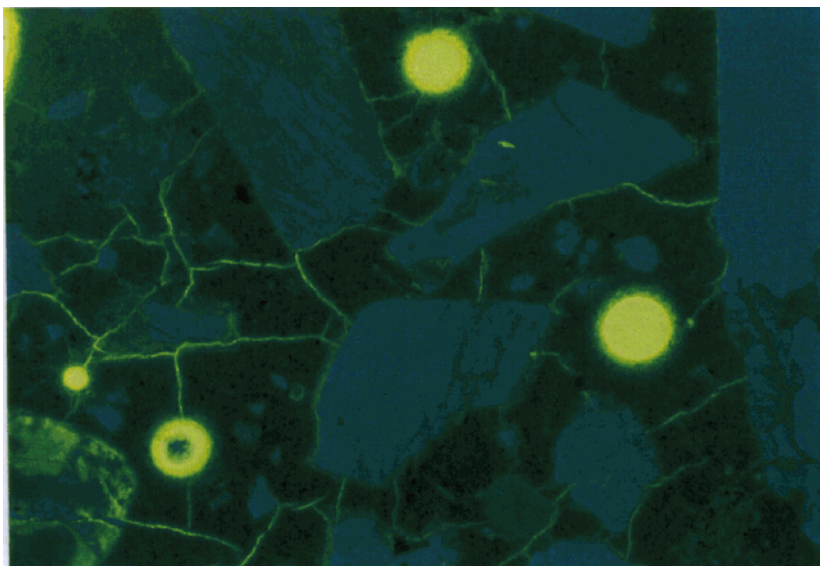
Kuva 3. Valokuva betonin 2 jäädytys-sulatuskoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



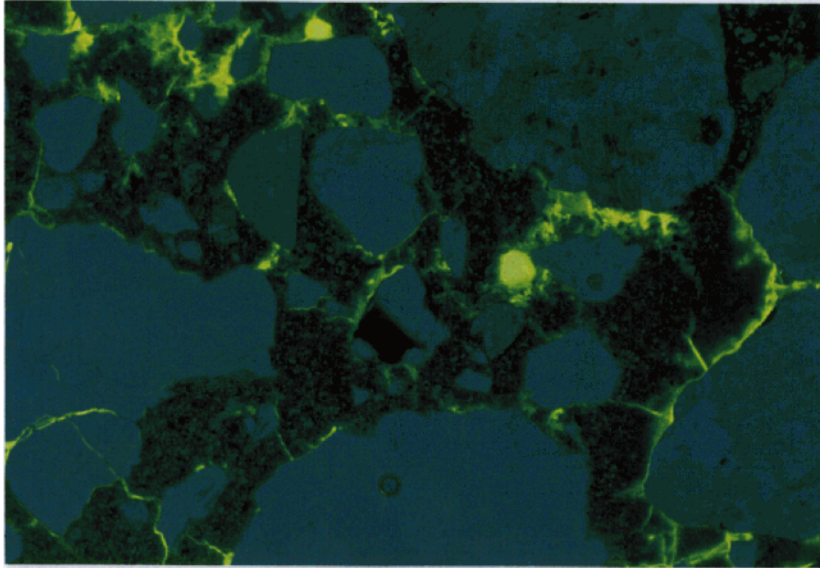
Kuva 4. Valokuva betonin 2 vertailukoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



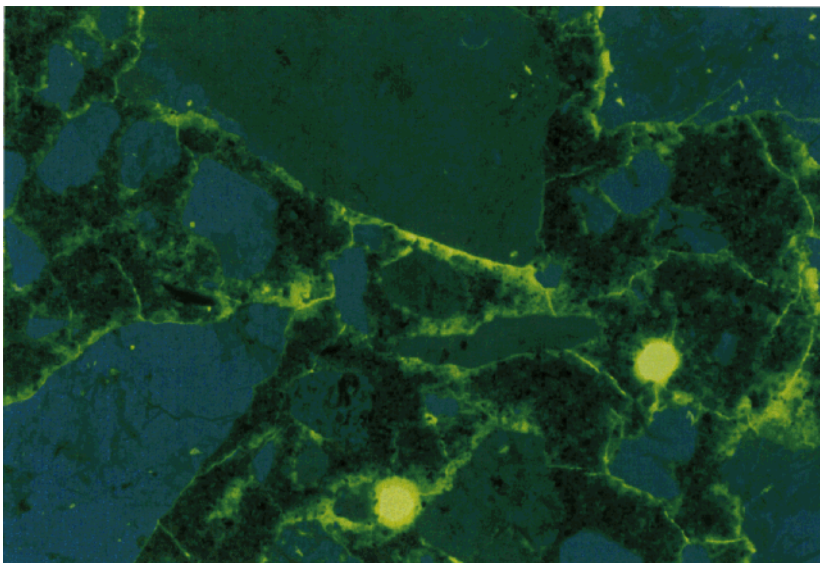
Kuva 5. Valokuva betonin 3 jäädytys-sulatuskoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



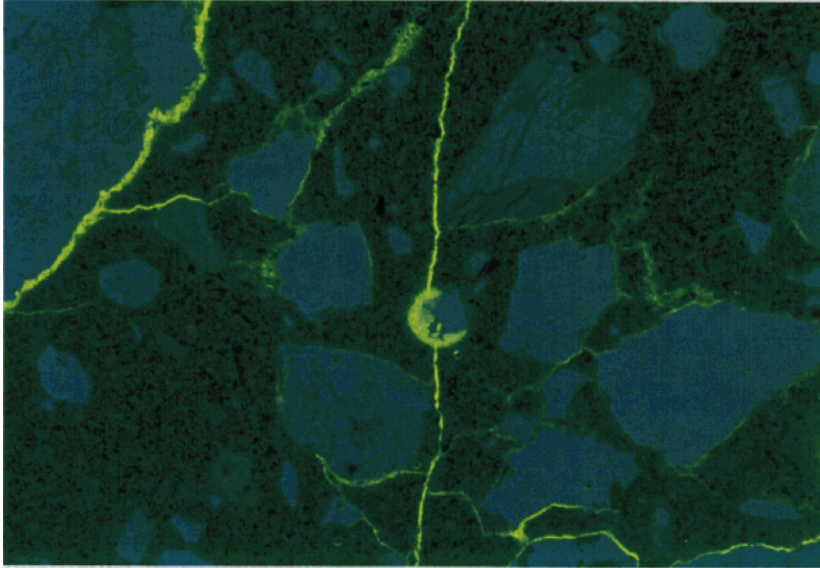
Kuva 6. Valokuva betonin 3 vertailukoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



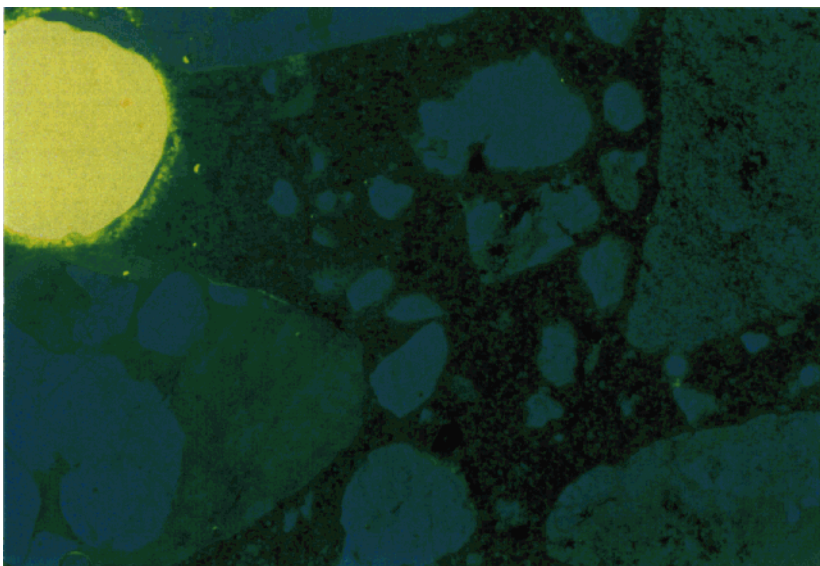
Kuva 7. Valokuva betonin 4 jäädytys-sulatuskoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



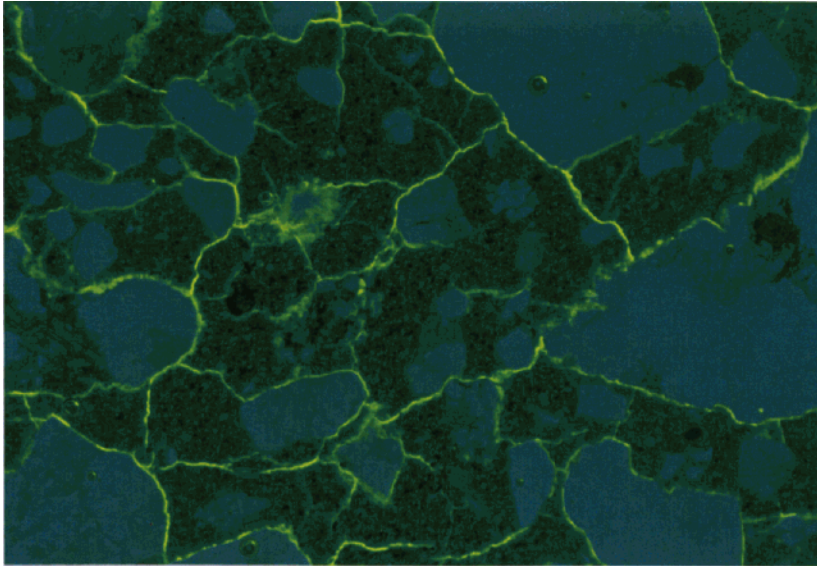
Kuva 8. Valokuva betonin 4 vertailukoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



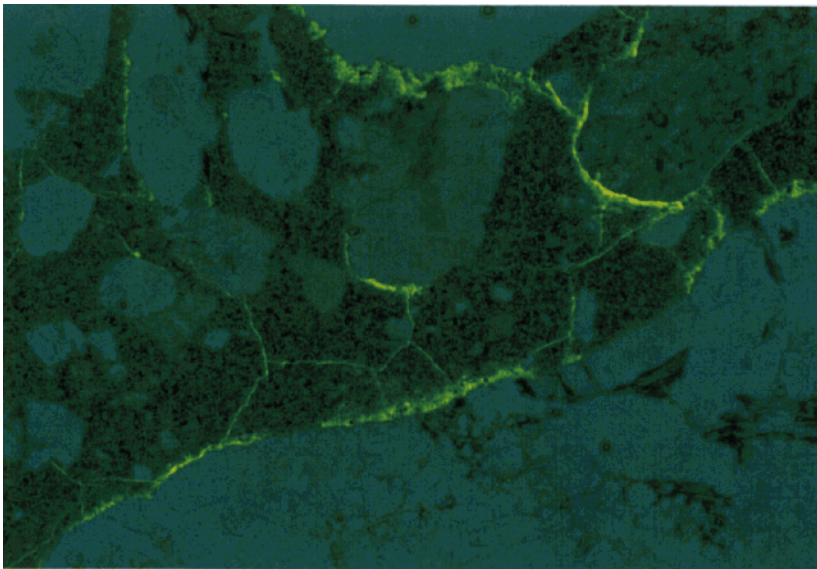
Kuva 9. Valokuva betonin 5 jäädytys-sulatuskoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



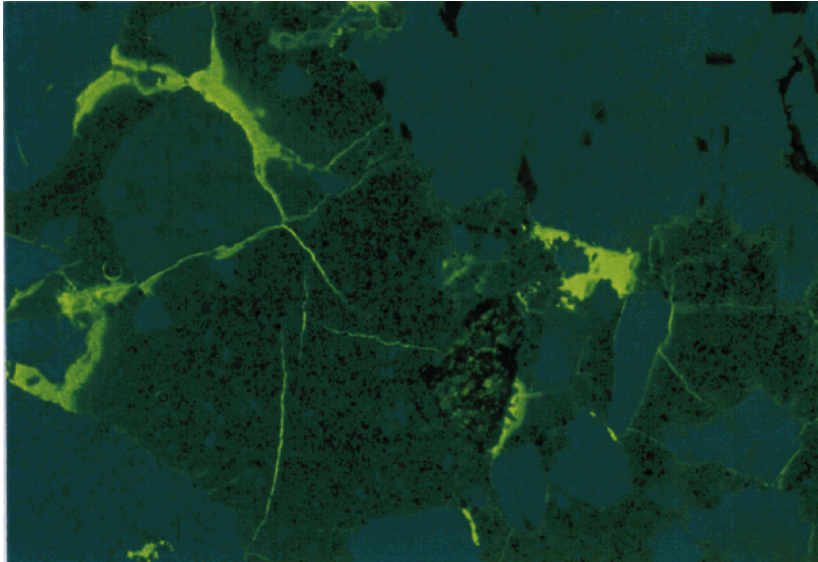
Kuva 10. Valokuva betonin 5 vertailukoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



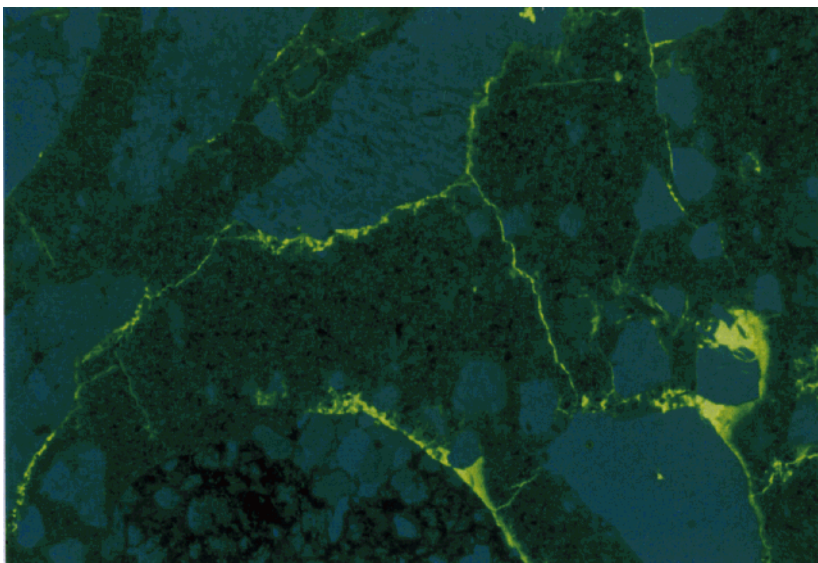
Kuva 11. Valokuva betonin 6 jäädytys-sulatuskoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



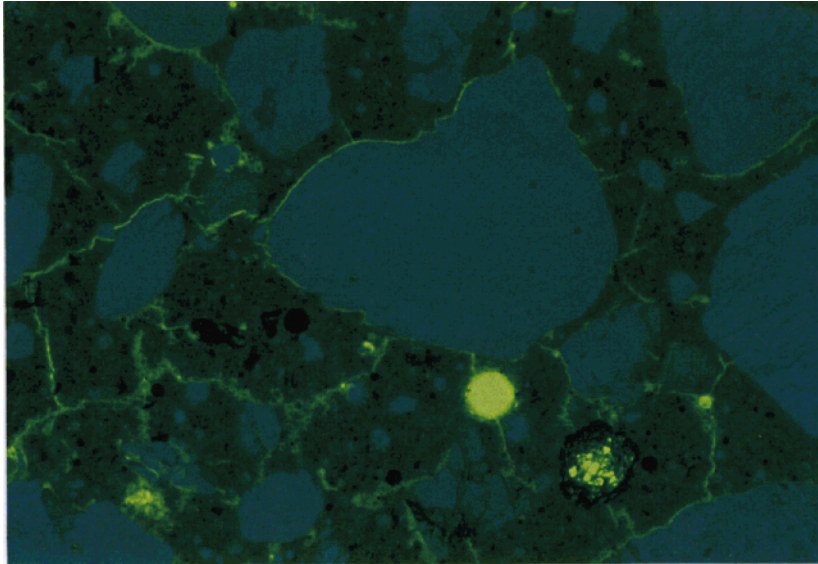
Kuva 12. Valokuva betonin 6 vertailukoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



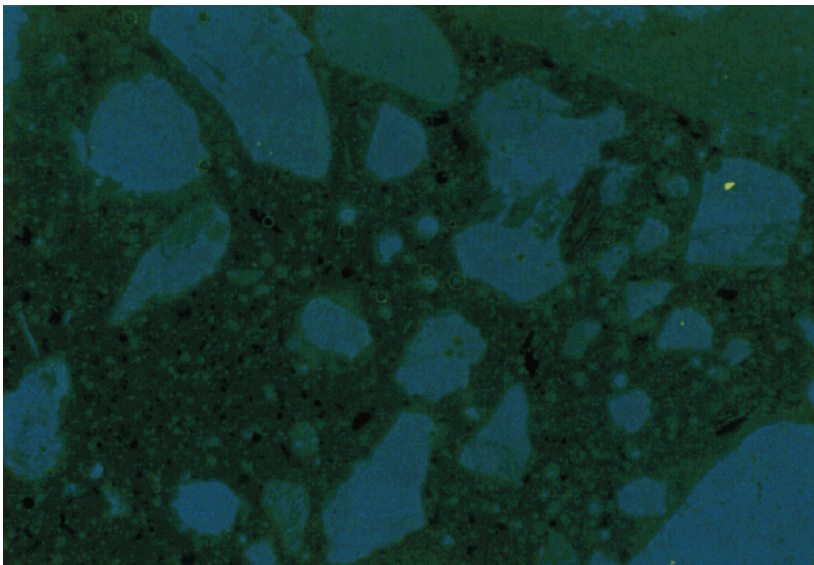
Kuva 13. Valokuva betonin 7 jäädytys-sulatuskoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



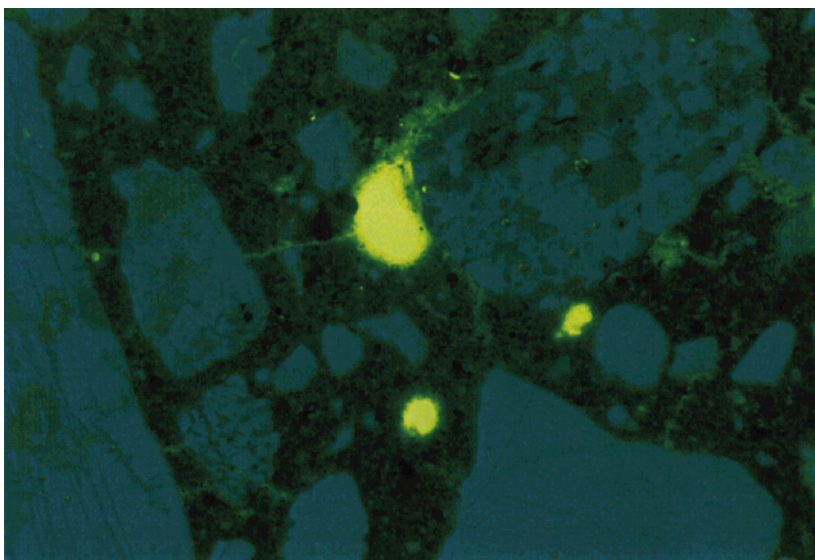
Kuva 14. Valokuva betonin 7 vertailukoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



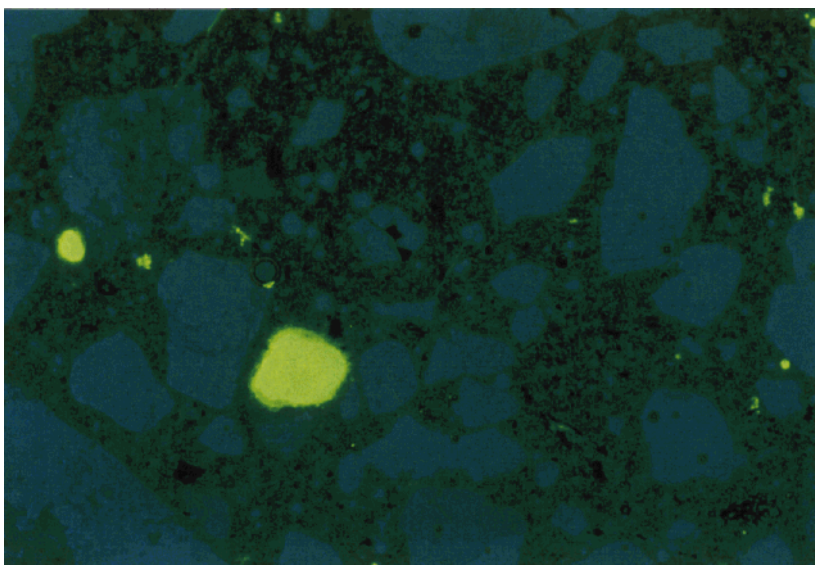
Kuva 15. Valokuva betonin 8 jäädytys-sulatuskoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



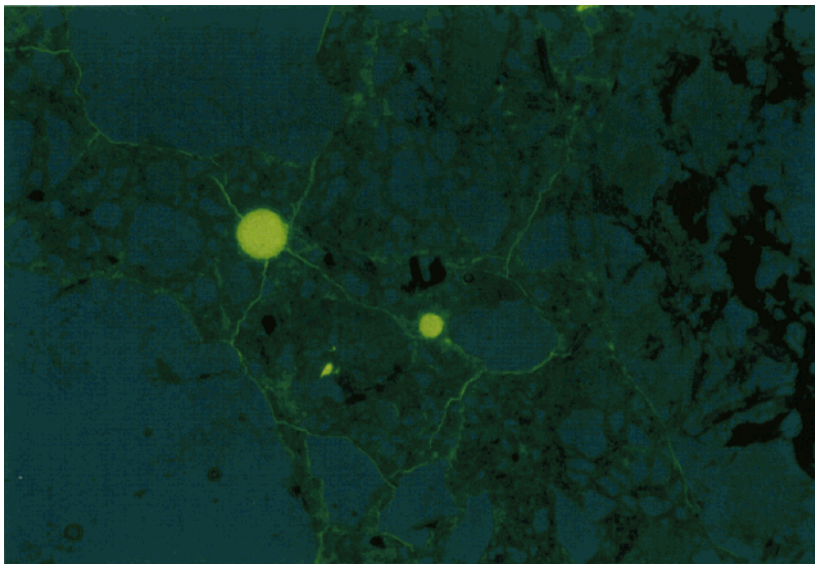
Kuva 16. Valokuva betonin 8 vertailukoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



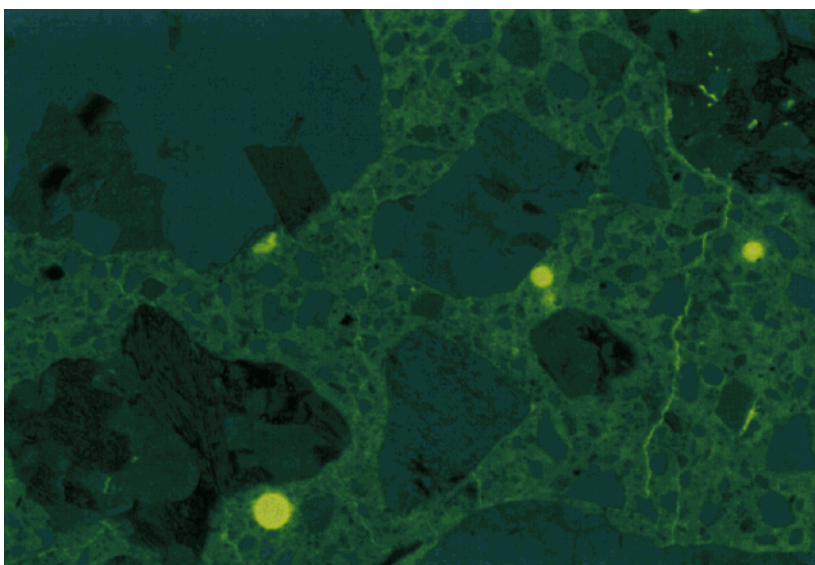
Kuva 17. Valokuva betonin 9 jäädytys-sulatuskoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



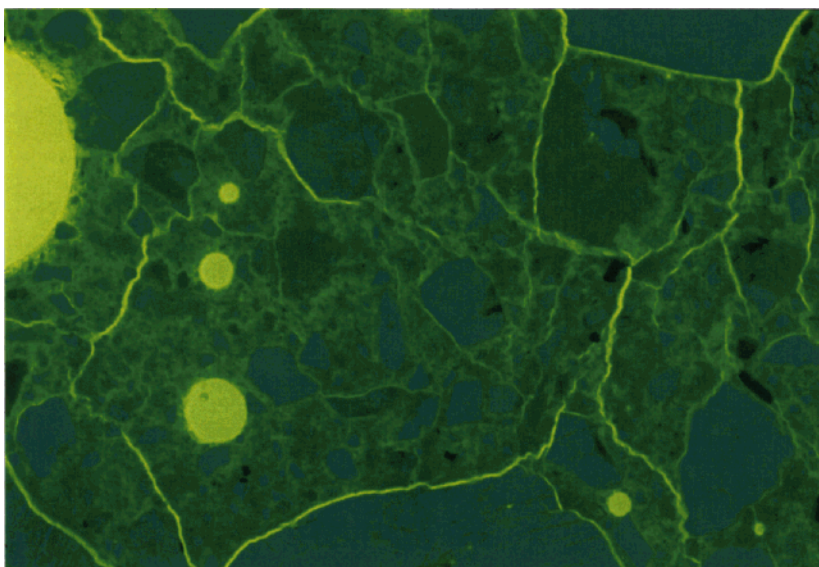
Kuva 18. Valokuva betonin 9 vertailukoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



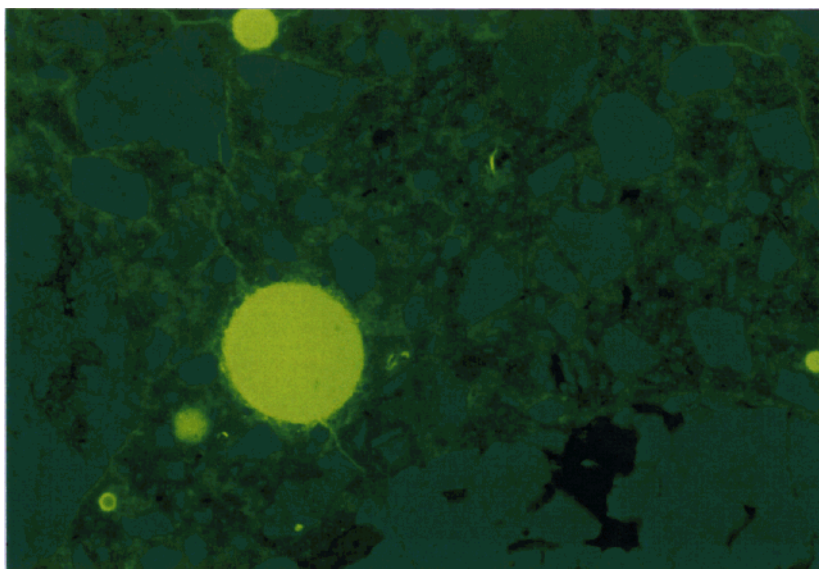
Kuva 19. Valokuva betonin 10 jäädytys-sulatuskoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



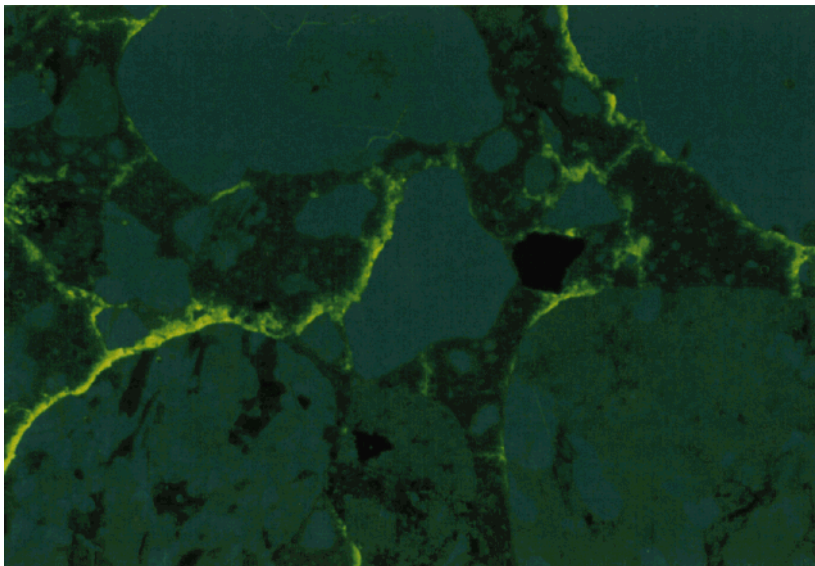
Kuva 20. Valokuva betonin 10 vertailukoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



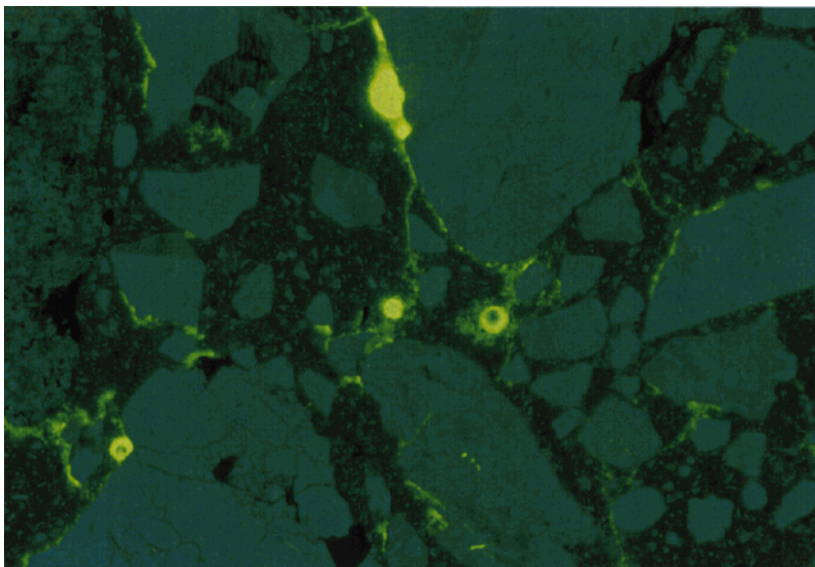
Kuva 21. Valokuva betonin 11 jäädytys-sulatuskoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



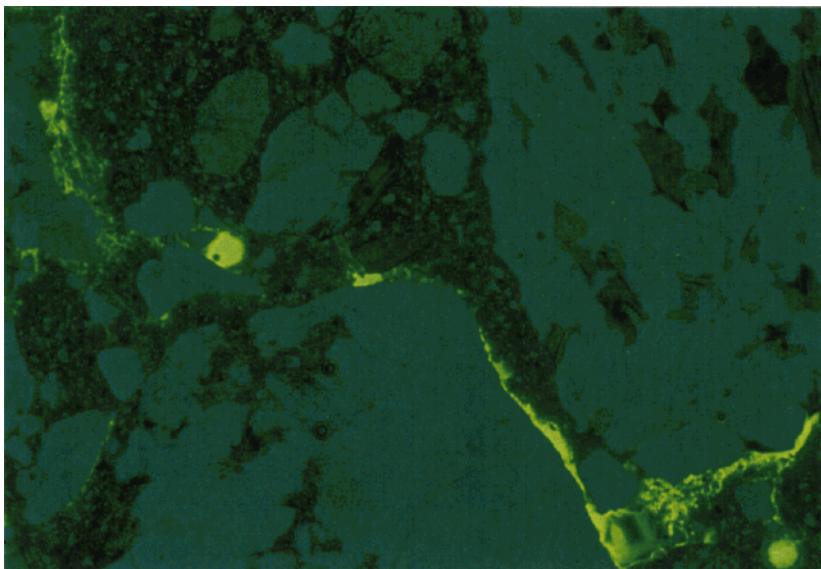
Kuva 22. Valokuva betonin 11 vertailukoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



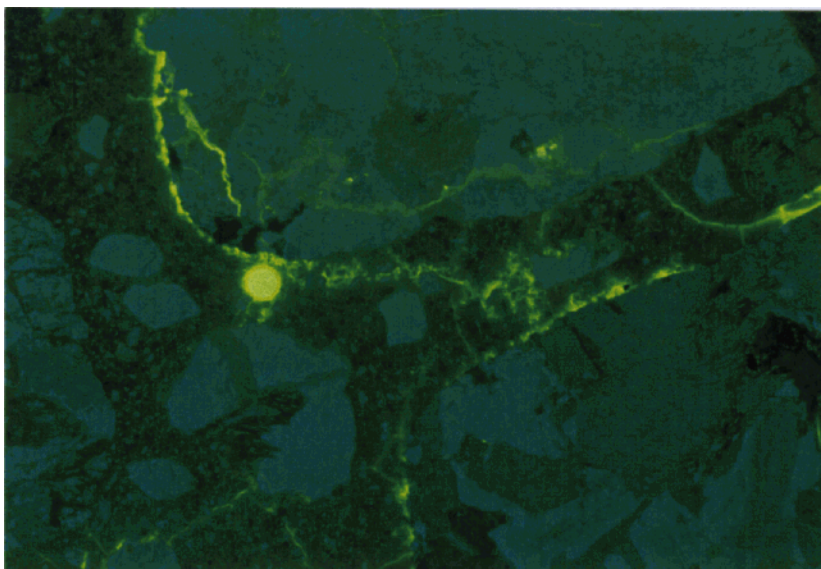
Kuva 23. Valokuva betonin 12 jäädytys-sulatuskoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



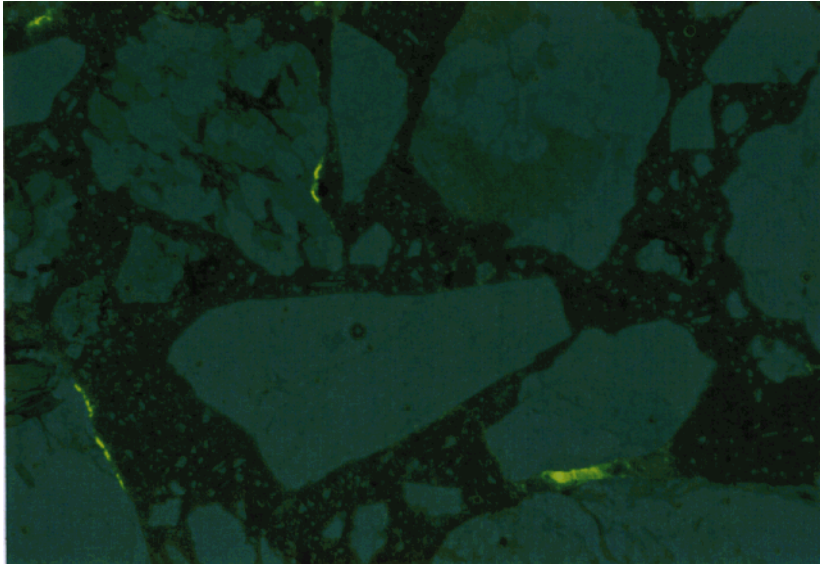
Kuva 24. Valokuva betonin 12 vertailukoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



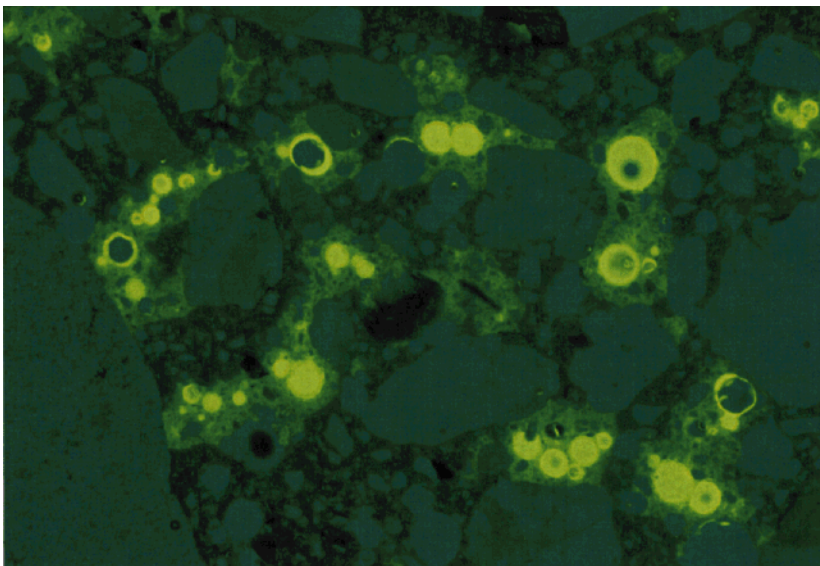
Kuva 25. Valokuva betonin 13 jäädytys-sulatuskoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



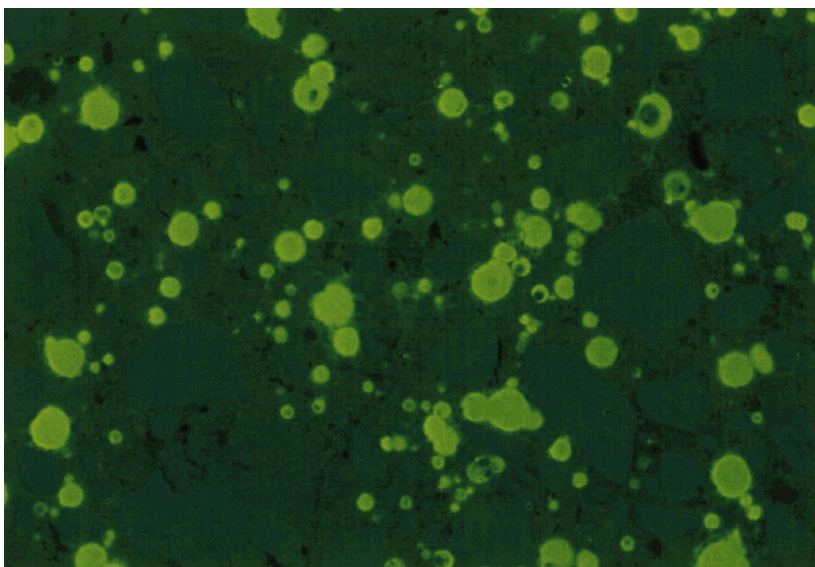
Kuva 26. Valokuva betonin 13 vertailukoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



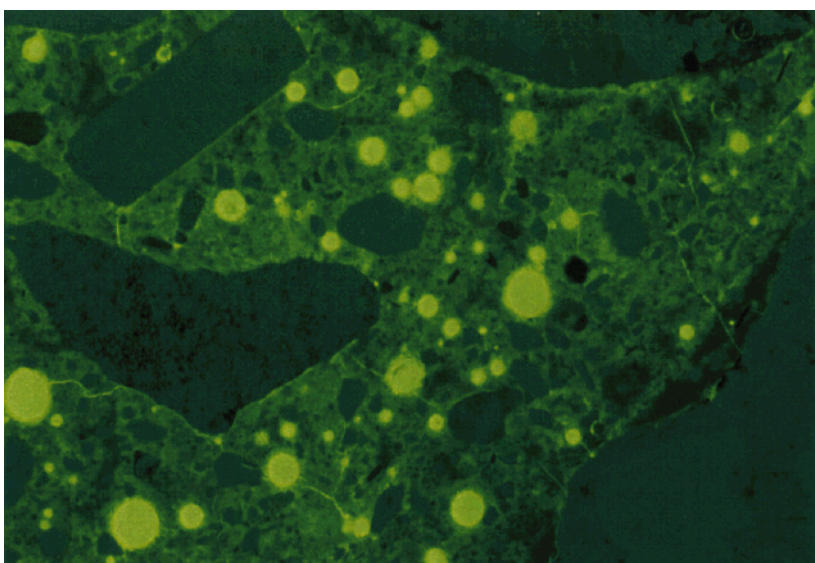
Kuva 27. Valokuva betonin 14 jäädytys-sulatuskoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



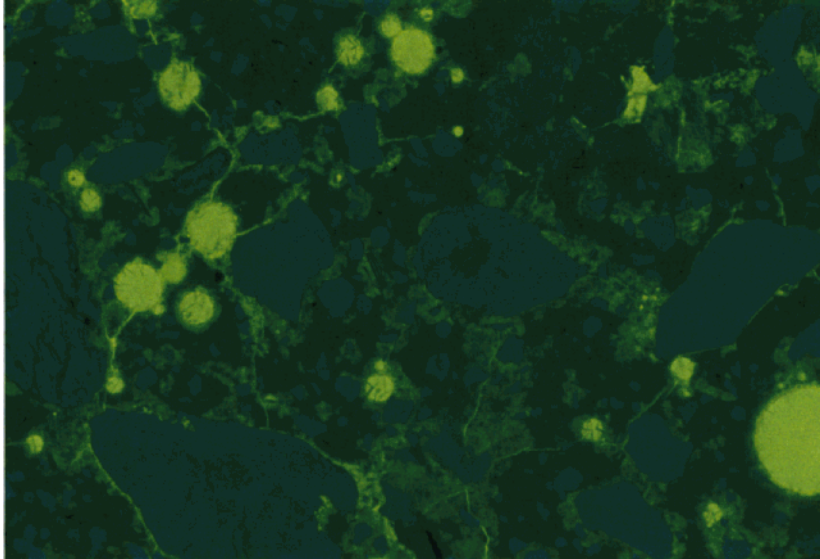
Kuva 28. Valokuva betonin 15 jäädytys-sulatuskoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



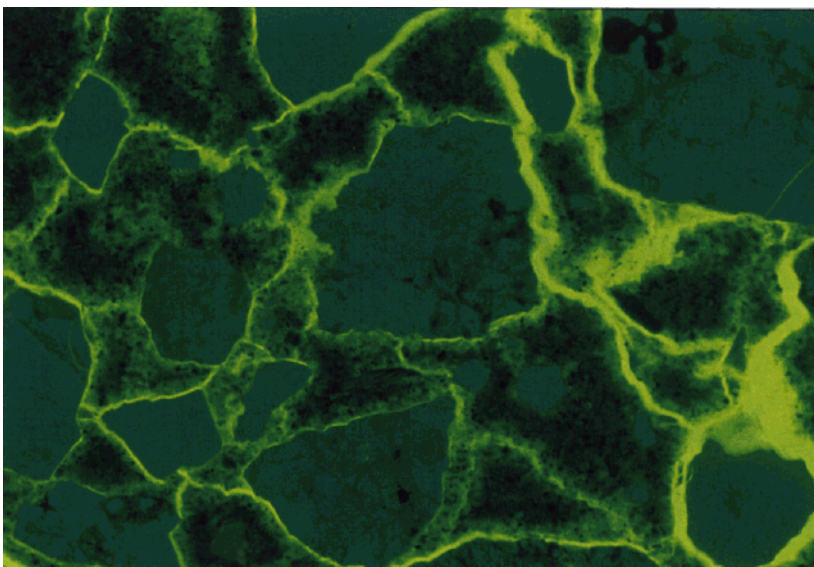
Kuva 29. Valokuva betonin 15 vertailukoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



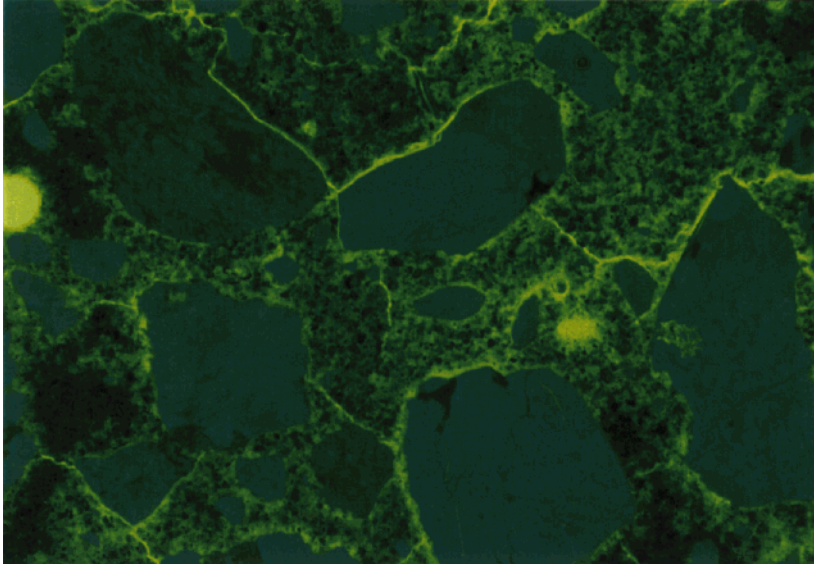
Kuva 30. Valokuva betonin 16 jäädytys-sulatuskoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



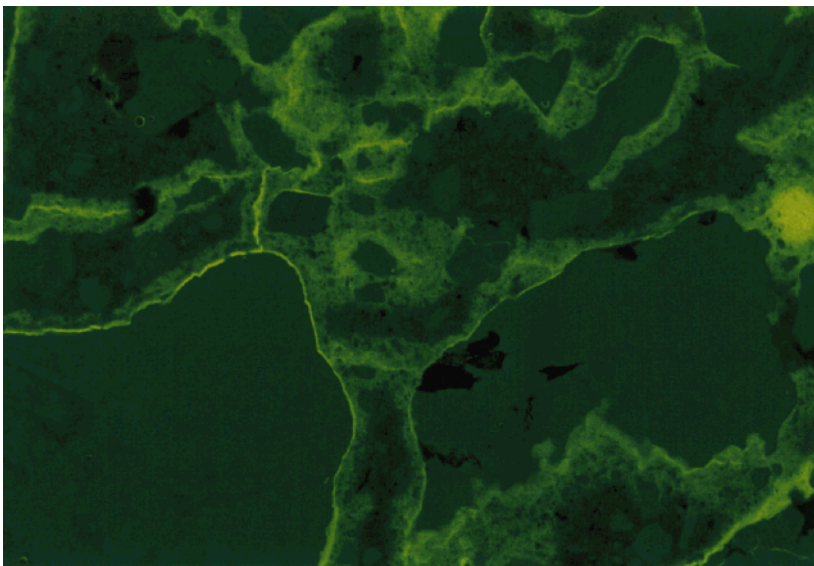
Kuva 31. Valokuva betonin 16 vertailukoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



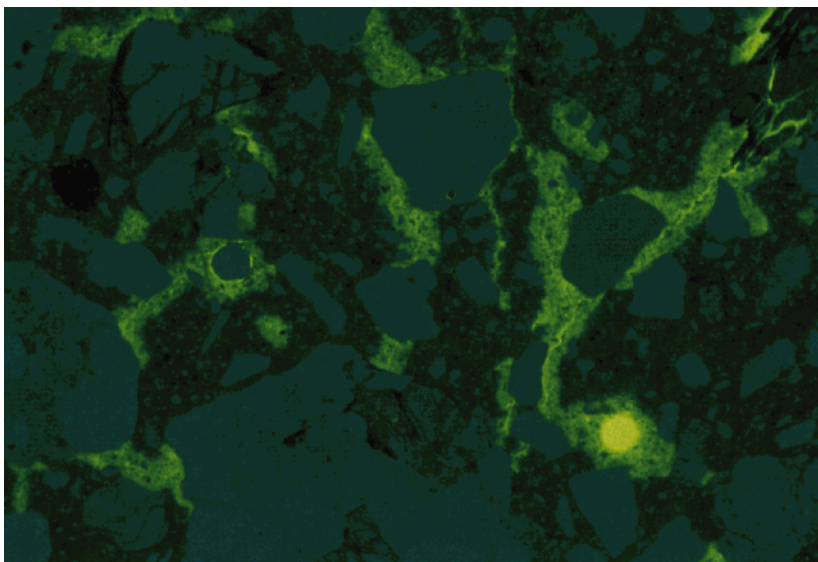
Kuva 32. Valokuva betonin 17 jäädytys-sulatuskoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



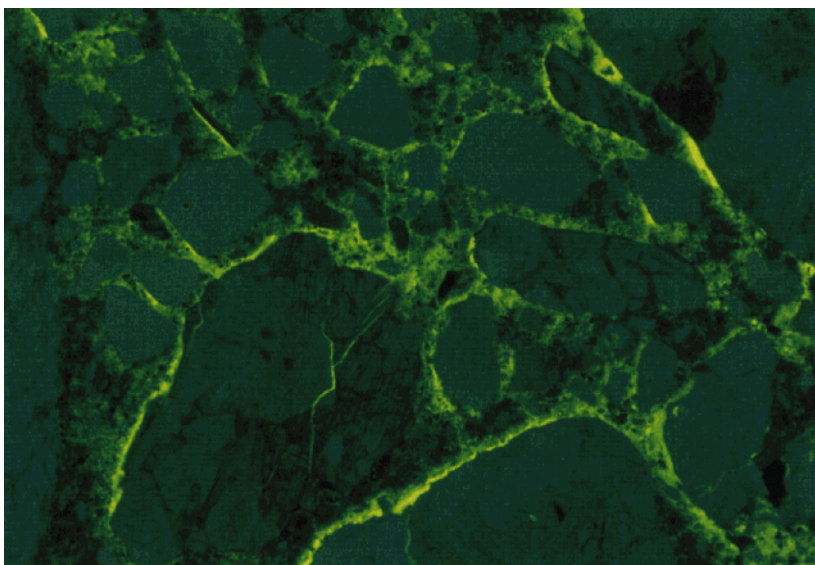
Kuva 33. Valokuva betonin 17 vertailukoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



Kuva 34. Valokuva betonin 18 jäädytys-sulatuskoekappaleesta valmistetusta ohuthieestä.



*Kuva 35. Valokuva betonin 18 vertailukoekappaleesta valmistetusta ohut-
hieestä.*



*Kuva 36. Valokuva betonin 19 vertailukoekappaleesta valmistetusta ohut-
hieestä.*

LIITE 2
MENETELMÄKUVAUS KAPILLAARISEN
VEDELLÄKYLLÄSTYSASTEEN
MÄÄRITYKSESTÄ

BETONI, KAPILLAARISEN VEDELLÄKYLÄSTYSASTEEN MÄÄRITYS

1
SOVELTAMISALA Tässä standardissa esitetään kovettuneen betonin kapillaarisen vedelläkylästysasteen ja kokonaishuokoisuuden määrittäminen.

2
MÄÄRITELMÄT Vedelläkylästysaste ilmoittaa, kuinka suuri osa betonin kokonaishuokostilavuudesta on täyttynyt vedellä.

3
LAITTEET JA TARVIKKEET

Timanttisaha

Timanttisaha, jolla koekappaleet voidaan sahata.

Uuni

Tuuletettu uuni, jossa koekappaleet voidaan kuivattaa noin +50 °C ja +105 °C lämpötilassa.

Eksikaattori

Silikageeliä sisältävä eksikaattori, jossa koekappaleet voidaan jäähdyttää huoneenlämpötilaan.

Vaaka

Vaaka, jolla koekappaleet voidaan punnita vedessä ja ilmassa vähintään 0,2 %:n tarkkuudella.

Allas

Allas, jossa koekappaleita voidaan imeyttää vedellä.

Ritilä

Altaaseen sopiva ruostumaton ritilä, joka voidaan säätää vaakasuoraan asentoon.

Paineastia

Painetta kestävä sylinteri, jossa koekappaleet voidaan painekyllästyttää 15 MPa vedenpaineella.

4
KOEKAPPALEET

4.1
Koekappaleiden mitat

Veden kanssa kosketuksen tulevan pinnan leveyden tulee olla vähintään 3 - 4 kertaa maksimiraekoko.

Koekappaleiden korkeuden tulee olla 25 - 30 mm ja sama kaikille koekappaleille.

4.2

Koekappaleiden lukumäärä

Koekappaleiden lukumäärän tulee olla vähintään kolme.

4.3

Koekappaleiden tunnistaminen

Koekappaleiden tunnukset merkitään koekappaleisiin pysyvällä tavalla.

5

KOEMENETTELY

Koekappaleita kuivatetaan tuuletetussa uunissa, jonka lämpötila on n. +50 °C vähintään 2 d:n ajan.

Koekappaleet jäähdytetään huoneenlämpötilaan ja niitä säilytetään vedelläimeytyksen alkamisajankohtaan eksikaattorissa, jossa on kuivaa silikageeliä.

Koekappaleet punnitaan vähintään 0,2 %:n tarkkuudella.

Koekappaleet asetetaan alapinnastaan kosketukseen veden kanssa ritilän päälle siten, että 1 - 3 mm koekappaleista on vesipinnan alapuolella.

Vesiastia peitetään esim. muovikelmulla siten, että veden haihtuminen on täydellisesti estetty. Vesiastian tulee lisäksi sijaita suhteellisessa kosteudessa 90 - 95 % ja lämpötilassa 20 °C.

Koekappaleet punnitaan vähintään 0,2 %:n tarkkuudella $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 24, 28, 72, 96 jne. tunnin kuluttua imeytyksen alusta. Ennen punnitusta koekappaleiden pohja pyyhitään kostealla, imukykyisellä sienellä.

Kapillaarista imeytystä jatketaan vähintään 14 vuorokautta.

Koekappaleet asetetaan paineastiaan ja painekyllästetään 15 MPa vedenpaineella 24 tunnin ajan.

Välittömästi paineen poiston jälkeen koekappaleet otetaan paineastiasta, pyyhitään irtovedestä kostealla, imukykyisellä sienellä ja punnitaan ilmassa.

Koekappaleet pannaan vähintään vuorokaudeksi vesisäilytykseen, minkä jälkeen ne punnitaan vedessä sekä pyyhitään kostealla, imukykyisellä sienellä ja punnitaan ilmassa.

Koekappaleet kuivatetaan vakiopainoon tuuletetussa uunissa, jonka lämpötila on +105 °C. Kuivatus kestää yleensä vähintään 7 vuorokautta.

Koekappaleet punnitaan ilmassa.

6 LASKELMAT

Koekappaleiden tilavuus (1) lasketaan kaavasta

$$V = Q_{s;a} - Q_{s;w} , \quad (1)$$

jossa $Q_{s;a}$ on vedellä kyllästetyn koekappaleen paino ilmassa vesisäilytyksen jälkeen, kg
 $Q_{s;w}$ vedellä kyllästetyn koekappaleen paino vedessä säilytyksen jälkeen, kg.

Koekappaleiden kokonaishuokostilavuus (1) lasketaan kaavasta

$$V_p = Q_{s;p} - Q_{d;105} , \quad (2)$$

jossa $Q_{s;p}$ on vedellä kyllästetyn koekappaleen paino välittömästi painekyllästyttyksen jälkeen, kg
 $Q_{d;105}$ koekappaleen paino +105 °C uuni-kuivatuksen jälkeen, kg.

Koekappaleiden kokonaishuokoisuus lasketaan kaavasta

$$P = \frac{Q_{d;105}}{V} \cdot 1000, \text{ l/m}^3 . \quad (3)$$

Koekappaleiden tiheys +105 °C:ssa tapahtuneen kuivatuksen jälkeen lasketaan kaavasta

$$\rho = \frac{Q_{d;105}}{V} \cdot 1000, \text{ kg/m}^3 . \quad (4)$$

Kutakin vedenimuaikaa vastaava koekappaleiden vedelläkyllästysaste lasketaan kaavasta

$$S_t = \frac{Q_t - Q_{d;105}}{V_p} , \quad (5)$$

jossa Q_t on koekappaleen paino ajan t kuluttua kapillaarisen vedenimun alkamisajankohdasta, kg.

Lasketaan koekappaleiden yksittäisistä arvoista keskiarvo ja hajonta suureille P , ρ ja S_t .

Haluttaessa voidaan laskea tiettyä vedelläkyllästysastetta vastaava betonin kosteuspitoisuus kaavasta

$$U_t = \frac{S_t \cdot P}{\rho} 100 \% . \quad (6)$$

7

KAPILLAARISEN VEDELLÄKYLLÄSTYSASTEEN MÄÄRITTÄMINEN

Piirretään koordinaatistoon koekappaleiden vedelläkyllästysasteen, S_t , keskiarvo kapillaarisen vedenimuaian neliöjuuren funktiona (kuva 1).

Lasketaan lineaarisella regressiolla koordinaatistoon merkittyjen pisteiden kautta kulkevien kahden suoran yhtälö.

Lasketaan saatujen suorien leikkauspisteinä kapillaarisen vedenimun taitepiste aika, T_{np} , ja kyllästysaste taitepisteessä, S_{np} .

8

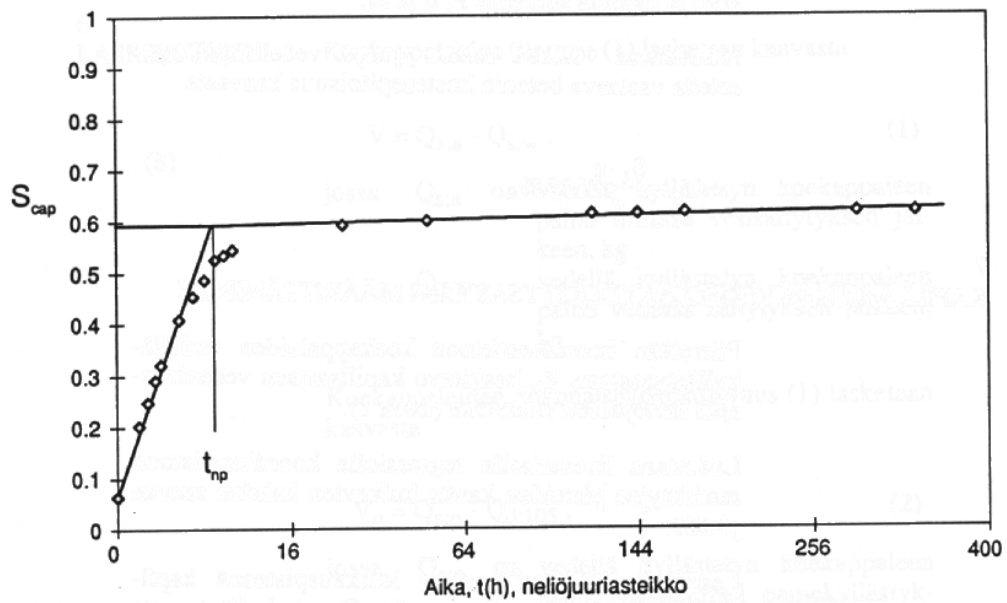
KOETULOSTEN ESITTÄMINEN

Kokeen jälkeen laadittavassa raportissa esitetään:

- koebetonin tunnus, valmistuspäivämäärä ja sen mukainen ikä kokeen alkaessa,
- koebetonin koostumustiedot,
- suoritettut määritykset,
- koekappaleiden muoto ja mitat,
- koetulokset:
 - betonin kokonaishuokoisuus,
 - betonin tiheys kuivana (+105 °C),
 - kuva, jossa esitetään koekappaleiden vedelläkyllästysasteiden keskiarvo ja vedenimuaian neliöjuuren funktiona ja pisten kautta piirretyt regressiosuorat,
 - regressiosuorien yhtälöt,
 - taitepiste aika
 - vedelläkyllästysaste taitepisteessä,
- normaalista poikkeavat havainnot kokeen kestäessä.

Haluttaessa voidaan esittää tiettyjä vedelläkyllästysasteita, S_t , vastaavat kosteuspitoisuudet (esim. kos-

teuspitoisuus, kun $S = 1$ ja kosteuspitoisuus taitepisteessä).



Kuva 1. S_t vedenimuaajan funktiona. Taitepisteabsorption ja -ajan määrittäminen.

JULKAISUN ESITTELYTEKSTI

VTT Tietopalvelu kokoaa VTT:n julkaisu-uutisiin lyhyen esittelytekstin julkaisun kielellä kaikista uusista julkaisuista.

Esittelyteksti julkaistaan myös julkaisun takakannessa, ellei sen sijaan haluta edelleenkin painaa (tutkimusyksikön) uusimpien julkaisujen luetteloa kyseisessä sarjassa. Julkaisuluettelo voidaan painaa takakannen sijasta erikseen julkaisun viimeiseksi sivuksi. Merkitse haluamasi vaihtoehto tai vaihtoehdot.

Takakannessa julkaistaan esittelyteksti ☒ (tutkimusyksikön) julkaisujen luettelo ☐

Viimeisellä sivulla julkaistaan (tutkimusyksikön) uusimpien julkaisujen luettelo ☒
Lomake tai mahdollinen erillinen esittelyteksti lähetetään valmiin käsikirjoituksen mukana.

Sarjanimeke	Sarjanumero	Vuosi	
Tekijät Heikki Kukko & Kai Tattari			
Julkaisun nimi Korkealujuusbetonien säilyvyys			
Sivuja 33	Liitesivuja 25	ISBN	
Esittelyteksti			