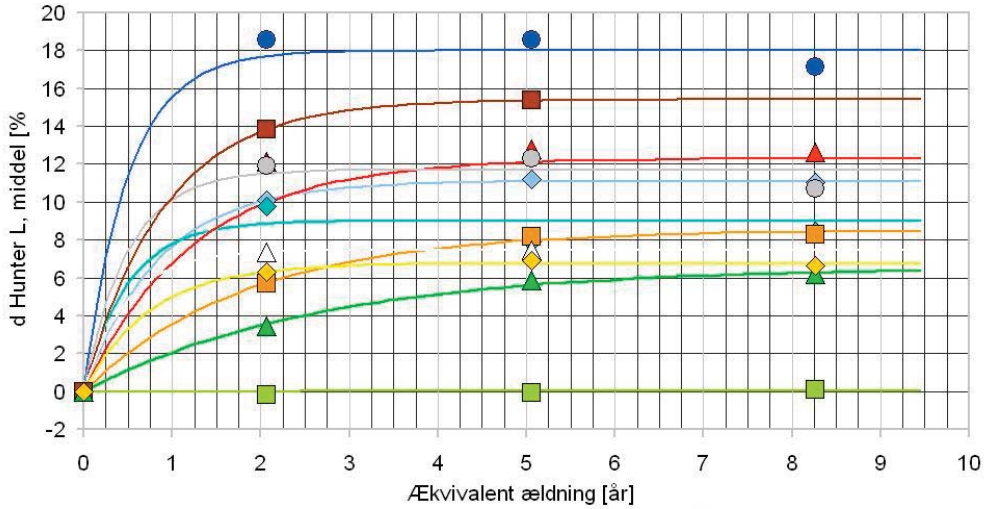
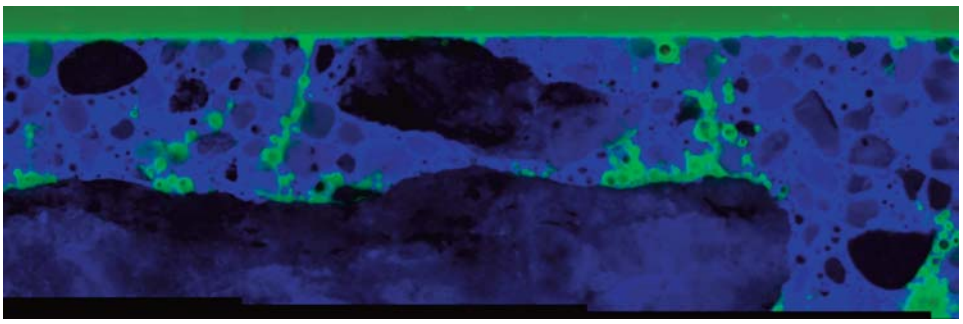
HVID BETONS ÆSTETISKE HOLDBARHED





Tetina Rix
10. semester, afgangsprojekt
Aalborg Universitet, december 2008

Hvid betons æstetiske holdbarhed

Tetina Rix

Aalborg Universitet 2008

Hvid betons æstetiske holdbarhed

Civilingeniørstudiet i Bygge- og Anlægskonstruktioner, afgangsprojekt, Aalborg Universitet

I dag eksisterer et begrænset kendskab til hvid betons æstetiske holdbarhed. Forskellige projekter er sat i værk for at opnå større kendskab til dette - et af disse projekter er *Whiadur*, som dette projekt udspringer af. I *Whiadur* er der blandt andet udviklet en klimakarrusel, der gør det muligt at accelerere æstetisk ældning af betonoverflader.

Både form, placering, detaljering og overfladestruktur har betydning for en betonoverflades æstetiske holdbarhed, og i nærværende projekt er betonoverfladens mikrostruktur og tætheds betydning for den æstetiske holdbarhed undersøgt. Til dette er anvendt friskstøbte prøveemner samt æstetisk accelererede prøveemner. På disse prøveemner er bestemt porøsitet, kapillaritetstal samt vandpermeabilitet og overfladeruheden er vurderet. Resultater fra disse metoder er sammenlignet med farvemålinger i forventningen om at kunne forudsige den hvide betons æstetiske holdbarhed.

På baggrund af forsøgsresultaterne har det ikke været muligt at give en entydig konklusion på betonoverfladens mikrostruktur og tætheds betydning for den æstetiske holdbarhed. Der er dog tendens til, at farveændringer vil være mere tydelige, hvis betonen har et højt kapillaritetstal eller en ru overflade.

Aesthetic durability of white concrete

M.Sc. in Structural and Civil Engineering, final thesis, Aalborg University

Today a very limited knowledge of the aesthetic durability of white concrete exists. Different projects have started in order to achieve better knowledge of this - one of them is *Whiadur*, which initiated this project. In *Whiadur* an instrument making it possible to accelerate aesthetic ageing was invented.

Shape, placing, detailing and surface structure affects the aesthetic durability of a concrete surface, and in this project it has been investigated what influence the microstructure and impermeability of the concrete have. To do this freshly cast specimens and aesthetic accelerated specimens have been used. On these specimens the porosity, capillarity and water permeability is measured and the roughness of the surface is evaluated. Results from these tests have then been compared with color measurements in order to be able to predict the aesthetic durability of white concrete.

The results from the experimental investigation do not give a unique conclusion on how the microstructure and impermeability of the concrete affects on the aesthetic durability. However, changes in color tend to be more visible if the concrete has high capillarity or a rough surface.

Hvid betons æstetiske holdbarhed
Tetina Rix

Oplag: 4
1. udgave, 2008

© 2008

Tryk: Toptryk Grafisk
Skrift: Palatino sat med LaTeX

10. semesters projekt udført ved Aalborg Universitet i perioden 1. juni 2005 til 2. december 2008 under vejledning af lektor Eigil V. Sørensen, Aalborg Universitet, Institut for Byggeri og Anlæg.

Rapporten må ikke offentliggøres, udlånes eller gengives uden tilladelse fra forfatteren. Rapporten kan uden tilladelse benyttes internt på Aalborg Universitet.

Tetina Rix
Kastanie Allé 6, 3
6400 Sønderborg
Tlf.: 98 14 78 72
e-post: tetina.rix@gmail.com

Forord

Denne rapport er det skriftlige arbejde af et afgangsprojekt skrevet under temaet "Avanceret betonteknologi" på B-sektorens 10. semester inden for specialiseringen Bygge- og anlægskonstruktioner.

Rapporten er samlet i ét bind, der består af hovedrapport og appendix. Hovedrapporten indeholder teorier, forudsætninger, metoder, resultater samt diskussion af de opnåede resultater. I appendix findes teori samt datablade for de indgående bestanddele. Endvidere er der udarbejdet en CD-rom, der indeholder projektet i pdf-format, billeder samt forsøgsdata.

Figurer og tabeller er nummereret fortløbende i hovedrapporten samt under hvert appendix. Kildehenvisninger er angivet som [Forfatter, årstal, sidetal], der henviser til litteraturlisten bagest i hovedrapporten. Henvisningerne er både til bøger og web-adresser.

Jeg vil gerne benytte lejligheden til at takke lektor Eigil V. Sørensen, ingeniørassistent Nicholas Flint samt M. Sc. Ph. D. Tommy Bæk Hansen, Aalborg Portland for godt samarbejde.

Aalborg Universitet 2. december 2008

Tetina Rix

Nomenklatur

Nedenstående liste angiver de i denne rapport anvendte symboler.

Symboler

α	hydratiseringsgrad
	krumning
η	vand dynamiske viskositet
ρ	densitet
ρ_c	densitet for cement
ρ_w	densitet for vand
τ_e	tidskonstant
A	påvirket areal
B	areal af stempel
C_{cp}	permeabilitetskoefficient for beton
L	afstand mellem prøvelegemes endepunkter
	længde af flux
L_1	længde af overfladekontur
M	molar masse
	modenhed
	modstandstal
P	tryk
Q	varmemængde
Q	opsuget vandmængde
Q_∞	varmemængde ved uendelig modenhed
	varmemængde ved fuldstændig reaktion af cement
S	volumenandel af mikrosilika
S_{vac}	vacuumvandmætningsgrad
V	volumen
V_c	volumenandel af uhydratiseret cement
V_g	volumenandel af gelvand
V_h	volumenandel af gelfaststof
V_k	volumenandel af kapillarvand
V_l	volumenandel af luft i kapillarporer
$V_å$	volumen af åbne kapillarporer
b	volumenandel af cementpasta
d_{max}	største stenstørrelse
k	kapilaritetstal
m	masse
	masse af vandmættet prøvelegeme

m_0	masse af udtørret prøvelegeme
m_{ov}	masse af trykvandmættet prøvelegeme over vand
m_u	masse af trykvandmættet prøvelegeme under vand
n	stofmængde
p	udgangsporøsitet
p_l	lukket porøsitet
p_{tot}	totalporøsitet
$p_{å}$	åben porøsitet
q	flux
q_1 og q_2	aflæsninger af mikrometerskrue
t	opsugningstid
	tid mellem q_1 og q_2
v/c-forhold	masseforhold mellem vand og cement
z	afstand fra fugtfront til sugende betonflade

Indholdsfortegnelse

1 Indledning **3**

1.1 Hvid beton og æstetisk holdbarhed . . . 3

1.2 Bevaring af æstetisk udtryk . . . 6

2 Projektbeskrivelse **7**

2.1 Projektoplæg . . . 7

2.2 Problemformulering . . . 10

2.3 Løsningsstrategi . . . 10

3 Porøsitetsmåling **13**

3.1 Formål . . . 13

3.2 Teori og forudsætninger . . . 13

3.3 Tildannelse af prøvelegemer . . . 14

3.4 Fremgangsmåde . . . 15

3.5 Resultater . . . 16

3.6 Fejlkilder og usikkerheder . . . 21

3.7 Sammenligning med farvemålinger . . . 22

3.8 Sammenfatning . . . 23

4 Kapillarsugning **25**

4.1 Formål . . . 25

4.2 Teori og forudsætninger . . . 25

4.3 Opfugtning af prøvelegeme . . . 26

4.4 Opsugning fra tragt . . . 29

4.5 Sammenligning af metoder og resultater . . . 32

4.6 Fejlkilder og usikkerheder . . . 33

4.7 Sammenligning med farvemålinger . . . 33

4.8 Sammenfatning . . . 35

5 Mikroskopi på planslib **37**

5.1 Teori og forudsætninger 37

5.2 Tildannelse af prøvelegemer 37

5.3 Forsøgsbeskrivelse 39

5.4 Resultater og analyse af disse 39

5.5 Fejlkilder og usikkerheder 42

5.6 Sammenligning med farvemålinger 42

5.7 Sammenfatning 44

6 Vandpermeabilitetstest **45**

6.1 Forsøgsbeskrivelse 45

6.2 Teori og forudsætninger 46

6.3 Resultater og vurdering af disse 46

6.4 Sammenfatning 47

7 Konklusion **49**

7.1 Porøsitet 49

7.2 Kapillaritet 49

7.3 Mikroskopi på planslib 50

7.4 Vandpermeabilitet 50

7.5 Sammenfatning 50

7.6 Fejlkilder og usikkerheder 50

7.7 Videre undersøgelser 50

Litteraturliste **53**

Appendix 57

A Prøveemnernes sammensætning og fremstilling **59**

B Strukturudvikling **65**

C Datablade **73**

Kapitel 1

Indledning

Beton er i dag det mest anvendte byggemateriale og udmærker sig især med sin høje trykstyrke og formbarhed. Af sikkerhedsmæssige årsager er bæreevne og holdbarhed af betonkonstruktioner naturligvis af primær vigtighed, men også udseendet har betydning. For hvide betonoverflader har udseendet særlig stor betydning, da tilsnavsning her er særligt tydelig og ødelæggende for æstetikken.

1.1 Hvid beton og æstetisk holdbarhed

Siden starten af 1930'erne er der i Danmark blevet fremstillet hvid cement, og Danmark har gennem de seneste to årtier markeret sig som verdens største eksportør, og siden 2004 også som verdens største producent af hvid cement [Aalborg Portland].

I dag finder beton produceret med hvid cement, fremover kaldt hvid beton, anvendelse mange steder, og mange arkitekter viser stor interesse for at anvende produktet. Typisk vælges beton, når der er tale om en stor, ensartet, synlig overflade ved den forventning, at betonen er uforanderlig, og ser ud som friskstøbt i hele sin levetid. Det sker dog ofte, at der vælges en traditionel grå beton frem for den hvide, dels på grund af pris, og dels da der er en ringe tiltro til den hvide betons æstetiske holdbarhed, der her er defineret som *betonens evne til at fastholde et givet udtryk over tid*. Det æstetiske udtryk afhænger meget af klimatiske forhold, og især i fugtige klimaer er en dårlig æstetisk holdbarhed mere reglen end undtagelsen, hvilket har efterladt indtryk af, at hvid beton har en meget ringe æstetisk holdbarhed [Aalborg White, 2004, s. 3].

Sammen med snavs og begroning, der typisk fremkommer som følge af regnvejr, hører uensartethed til de problemer, der kun giver æstetiske problemer og ikke tekniske. Fænomener som frost/tø påvirkninger, erosion samt revnedannelse er også kun sjældne problemer i teknisk forstand, men kan gøre, at en konstruktion forholdsvis hurtigt kommer til at fremstå gammel.

Ved opførelse af konstruktioner, hvor den æstetiske holdbarhed er væsentlig, er der især tre trin, der skal tages i betragtning. Disse har indflydelse på hinanden, men kan alligevel opdeles:

- Generel form og placering
- Detaljering
- Overfladestruktur

Det første trin relaterer sig til eksempelvis vind- og skyggeforhold samt vegetation, andet trin til farvning fra andre materialer, mønstre fra afstrømning af regnvand og endelig relaterer tredje trin sig til eksempelvis overfladens permeabilitet og naturlige evne til at skjule eller fremhæve mindre farvevariationer.

På nuværende tidspunkt eksisterer et begrænset kendskab til hvid betons æstetiske holdbarhed, men det er af stor interesse på sigt at kunne vejlede og tilføre viden om dette, hvorfor Aalborg Portland er igang med et omfattende projekt, *Whiadur*.

1.1.1 Whiadur

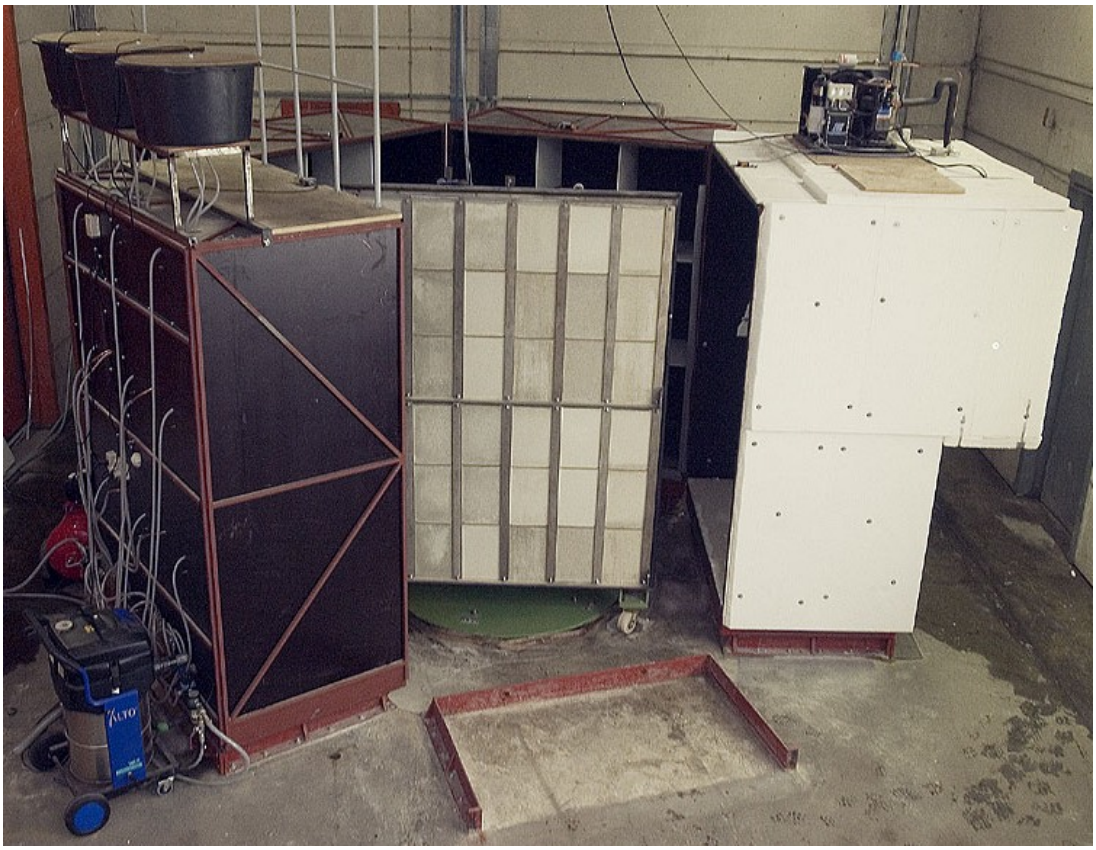
Whiadur er en omfattende undersøgelse af problematikken omkring hvid betons æstetiske holdbarhed. I projektets første år er der blandt andet udviklet en klimakarrusel, der kan efterligne naturens påvirkning af en betonoverflade og en automatisk farvemåler til betonoverflader.

Klimakarrusel - 3AD

Klimakarrusellen har et "prøveareal" på $1,75 \times 2,25\,\mathrm{m}^2$, hvilket er optimeret efter 6×6 fliser af $250 \times 350\,\mathrm{mm}$. Fliserne roterer mellem de fire kamre i klimakarrusellen, hvor de er 6 timer i hvert kammer:

- Ensidig frostpåvirkning ved -20°C. Nedkølingen tager højst 45 min.
- Svag vandtåge på hele overfladen (ca. 600 $^{\mathrm{l}}/_{\mathrm{m}^2\cdot\mathrm{cyklus}}$).
- Ultraviolet belysning og temperatur på +35°C. Opvarmningen tager højst 30 min.
- Støv med fint kvartssand, $d_{max} = 0,25\,\mathrm{mm}$ (ca. 2 $^{\mathrm{kg}}/_{\mathrm{m}^2\cdot\mathrm{cyklus}}$).

Den æstetiske ældning af betonoverfladen accelereres omtrent 16 gange, så en måned i klimakarrusellen svarer til lidt over et år i naturen. Klimakarrusellen ses på figur 1.1.



Figur 1.1: *Klimakarrusel udviklet i forbindelse med Whiadur (foto anvendt med tilladelse fra Aalborg Portland A/S).*

Frostpåvirkningen udsætter overfladen for den hårdeste påvirkning, hvorefter den bliver udsat for en vandtåge, der efterligner en del af den tilsnavsning, der sker i naturen. Skiftene mellem frost og varme er også hård, og ved varmepåvirkningen efterlignes solen ved hjælp af ultraviolet belysning. Afslutningsvis udsættes betonoverfladen for erosion ved støv af fint kvartssand.

Farvemåler

På en 250 × 350 mm betonoverflade måler farvemåleren farven 96 steder. Farven måles som *Hunter L*, *Hunter a* og *Hunter b*, der henholdsvis er refleksionen eller sort/hvid-balancen, rød/grøn-balancen samt gul/blå-balancen. I dette projekt fokuseres alene på *Hunter L*, da det er det mest relevante for hvid beton. *Hunter L* måles på en skala fra 0 (sort) til 100 (hvid). I området fra 75 til 85, hvilket er det typiske niveau for hvide betonoverflader, kan en forskel på 1 registreres af det trænede øje [Hansen, 2004, s. 6]. Farvemåleren er afbildet på figur 1.2.

Figur 1.2: *Farvemåler udviklet i forbindelse med Whiadur (foto anvendt med tilladelse fra Aalborg Portland A/S).*

Konklusion

Aalborg Portland har i løbet af projektets første år konkluderet, at alle betonoverflader ældes, men at ældningshastigheden er forskellig. De eksperimentelle undersøgelser har vist, at afsyrede, frilagte og hydrofoberede overflader ældes langsomst, mens glatstøbte overflader med lave v/c-forhold ældes hurtigst.

Konklusionen fra [Hansen, 2004] er, at typen af tilslag, v/c-forholdet og formens type antages at have en signifikant indflydelse på betonens farve. Plastificering, finish, lagringstemperatur samt indhold af det hvide farvepigment TiO_2 er antaget at have en moderat indflydelse, mens indhold af mikrosilika, blandetid, formolie og lagringstid tilskrives en mindre indflydelse.

1.1.2 Den synlige betonoverflade

Et andet projekt omhandlende beton og æstetik er *Den synlige betonoverflade*, der i modsætning til *Whiadur* ikke kun behandler hvide betonoverflader. Projektet er en logisk efterfølger til *Whiadur*, idet det har til formål at skabe en dialog i byggebranchen om betons udseende. De emner, der bliver behandlet er eksempelvis design, i sammenhængen form/tekstur/detaljer, betydningen af lokaltopografi og begroning, hvilket har til formål at give beton en selvstændig æstetisk kvalitet, der skal opnås gennem styring af betons udseende og æstetiske egenskaber.

Teknologisk Institut er koordinator på projektet, der startede i januar 2005 og er afsluttet ved udgangen af 2007. Deltagerne i projektet er producenter, betonbrugere og arkitekter og resultaterne formidles gennem en web-portal (www.synligbeton.dk).

1.2 Bevaring af æstetisk udtryk

På baggrund af de to nævnte projekter, *Whiadur* og *Den synlige betonoverflade*, er det tydeligt, at den eksisterende viden om hvid betons æstetiske holdbarhed er forholdsvis begrænset. Det er i denne forbindelse meget interessant at udvikle nogle analysemetoder eller værktøjer, der kan forklare ændringen i udseendet og endnu bedre - hvis det på baggrund af relativt enkle undersøgelser bliver muligt at forudsige en given betonoverflades ældning.

Kapitel 2

Projektbeskrivelse

Dette kapitel indeholder en beskrivelse af de nuværende resultater fra *Whiadur*, der danner oplægget til projektet. Herefter er problemformulering og løsningsstrategi for projektet præsenteret. Rådata er vedlagt på CD-rom.

2.1 Projektoplæg

I forbindelse med *Whiadur* er støbt betonfliser, fremover kaldt prøveemner, der har fået forskellige former for overfladebehandling eller er blevet tilsat farvepigment eller mikrosilika. Disse prøveemner er kort listet i tabel 2.1.

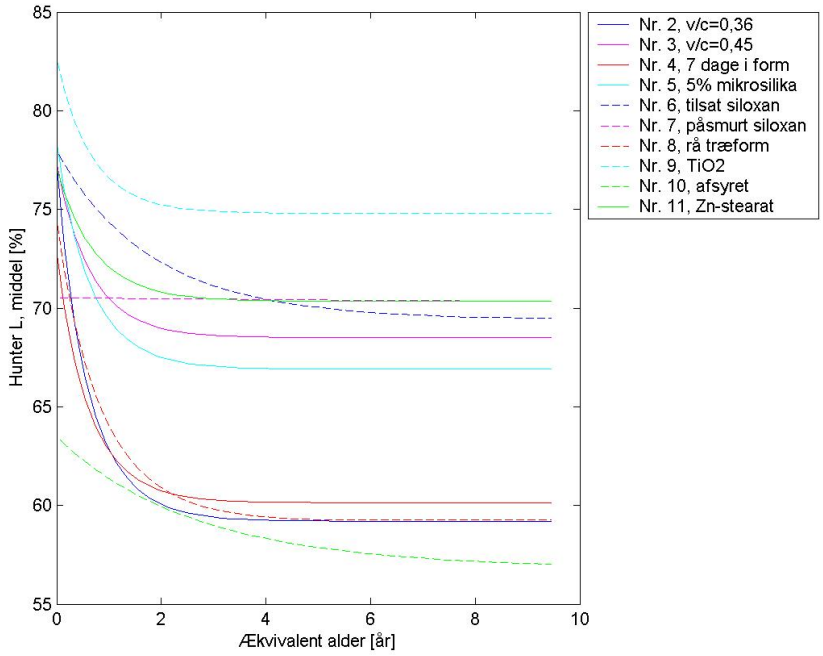
Tabel 2.1: *Prøveemner fra Whiadur.*

Nr.	Betegnelse	v/c
2	Reference	0,36
3	Højt v/c-forhold	0,45
4	Lagret syv dage i form	0,36
5	Tilsat 5% mikrosilika (af cementvægten)	0,36
6 og 7	Hydrofoberet ved hjælp af siloxan	0,36
8	Lagret i rå træform	0,36
9	Tilsat hvidt farvepigment (TiO_2)	0,36
10	Afsyret med saltsyre	0,36
11	Hydrofoberet ved tilsætning af zinkstearat	0,36

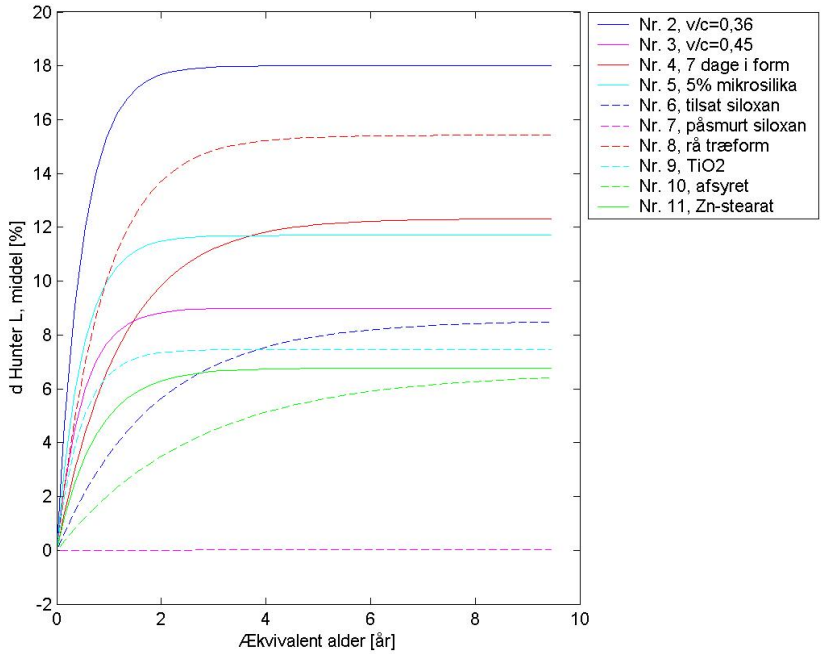
Prøveemnet med nr. 1 er ikke medtaget i dette projekt, da tilslaget i dette prøveemne er forskelligt fra de øvrige prøveemner. Således fokuseres i dette projekt ikke på tilslagets indflydelse, men ændringer i hærdeforhold, overfladebehandlinger og tilsætninger.

Prøveemnerne er støbt og leveret af Aalborg Portland. Deres sammensætning og fremstilling fremgår af appendix A. Der er udstøbt prøveemner til to forskellige former for eksponering. Den ene er æstetisk accelereret ældning i klimakarrusel, jf. kapitel 1 og den anden er ældning i fri natur. I dette projekt er alene medtaget æstetisk accelererede prøveemner. Ved hjælp af farvemåleren, ligeledes beskrevet i kapitel 1, måles farven i form af *Hunter L*, eller rettere glansen/refleksionsevnen på en skala, hvor 100 er hvid og 0 er sort.

Overfladestrukturen i prøveemnerne udvikles i løbet af de første 28 døgn, hvor der løbende måles farve på dem. Initialfarven er således sat til farven efter 28 døgn. Efter æstetisk accelereret ældning i klimakarrusel er prøvemnerne blevet farvemålt, og farveudviklingen samt farveændringen i forhold til initialfarven er afbildet, jf. figur 2.1 og figur 2.2.



Figur 2.1: *Farveudvikling over tid.*



Figur 2.2: *Farveændring som følge af accelereret æstetisk ældning i forhold til initialfarve.*

Det fremgår af figur 2.2, at der er variationer på, hvor hurtigt farven bliver konstant samt det niveau, hvor dette opnås.

Ved at kunne forklare disse resultater teoretisk, vil det være muligt at opnå en viden, der kan benyttes til at forudsige hvid betons æstetiske holdbarhed og ældningshastighed, der defineres som ændringen af betonoverfladens udseende pr. tidsenhed.

I tabel 2.2 er værdierne for farvemålingerne listet.

Tabel 2.2: *Resultat af farvemålinger.*

Nr	Betegnelse	v/c	*Hunter* $L_{initial}$	*Hunter* $L_{9,2år}$	Δ*Hunter L*
2	Reference	0,36	76,9	58,9	18,0
3	Højt v/c	0,45	77,9	68,9	9,0
4	Lagret syv dage i form	0,36	72,6	60,2	12,4
5	Tilsat 5% mikrosilika (af cementvægten)	0,36	79,5	67,7	11,8
6	Hydrofoberet ved tilsat siloxan	0,36	78,2	69,7	8,5
7	Hydrofoberet ved påført siloxan	0,36	70,6	70,5	0,1
8	Lagret i rå træform	0,36	74,6	59,1	15,5
9	Tilsat hvidt farvepigment (TiO_2)	0,36	82,7	75,2	7,5
10	Afsyret med saltsyre	0,36	63,5	57,3	6,2
11	Hydrofoberet ved tilsætning af zinkstearat	0,36	77,4	70,5	6,9

Sorteret efter den procentvise ændring i forhold til initialfarven kan følgende opskrives:

1. Nr. 2, reference (23,4%)
2. Nr. 8, rå træform (20,8%)
3. Nr. 4, lagret syv dage i form (17,1%)
4. Nr. 5, tilsat 5% mikrosilika (14,8%)
5. Nr. 3, højt v/c (11,6%)
6. Nr. 6, tilsat siloxan (10,9%)
7. Nr. 10, afsyret (9,8%)
8. Nr. 9, tilsat TiO_2 (9,1%)
9. Nr. 11, tilsat Zn-stearat (8,9%)
10. Nr. 7, påført siloxan (0,1%)

Da referencen opnår den største procentvise ændring ses, at uanset hvilken af de benyttede behandlinger, der bruges, så mindskes farveændringen. Endvidere ses også af resultaterne, at ændringer i formtype og lagringstid ikke giver nær så god en virkning som tilsætning af eller behandling med hydrofoberende produkter.

Kommentarer af de forskellige prøveemner i forhold til referencen:

- Nr. 3, højt v/c. En mere permeabel beton, og sandsynligvis også mere porøs som følge af v/c-forholdet.
- Nr. 4, lagret syv dage i form. Har som følge af den udskudte afformning været beskyttet i længere tid.
- Nr. 5, tilsat 5% mikrosilika. Betonen er tilsat et puzzolan, der har filleregenskaber og dermed giver en tætnende effekt. Desuden opnås en forøget vandtæthed og en reduceret permeabilitet.
- Nr. 6, tilsat siloxan. De tilsatte siliciumforbindelser ændrer overfladespændingen i porerne, så betonen bliver vandskyende.
- Nr. 7, påført siloxan. Som nævnt ovenfor bliver betonen mere vandskyende. Ved påføring er kun den yderste del af betonen vandskyende.
- Nr. 8, rå træform. Overfladen er med tydelige aftryk af den rå træform. Meget ru overflade.
- Nr. 9, tilsat TiO_2. Farvepigmentet fremhæver betonens hvide farve, og har desuden fillereffekt.
- Nr. 10, afsyret. Ru overflade som følge af afsyring med saltsyre. Tilslaget, der ikke er hvidt, er delvist blotlagt.
- Nr. 11, tilsat Zn-stearat. Stearater har en hydrofob ende, der vender ind i betonens porer og dermed virker vandskyende.

Jo lavere et v/c-forhold en beton har, desto tættere er mikrostrukturen, og desto lavere er porøsiteten og permeabiliteten. Dette har sandsynligvis en betydning for betonoverfladens æstetiske holdbarhed, der dog også kan påvirkes af overfladebehandlinger og mineralske tilsætninger.

2.2 Problemformulering

En betonoverflades farve er opfattelsen af det lys, der reflekteres fra den faste del af overfladen. Det vil sige de plane delflader, der hovedsageligt er parallelle med overfladen og de dele af porevæggen, der eksponeres. Betonens mikrostruktur har direkte betydning for ind- og udstrømning af vand, der har indflydelse på erosionen af overfladen, og porøsiteten er bestemmende for den faste andel af overfladen samt antallet er porer, og derfor formodes det, at porøsitet og porestørrelsesfordeling har en væsentlig indflydelse på betonoverfladens farveændring.

Sammenkædning af betonens struktur med farvemålingerne er interessant, da det kan gøre det muligt at forudsige betonens æstetiske holdbarhed. Dette leder frem til det initierende problem:

Hvilken betydning har betonoverfladens mikrostruktur og tæthed på den æstetiske holdbarhed?

2.2.1 Problemafgrænsning

Af de tre tidligere fremhævede punkter, jf. kapitel 1, der er vigtige ved opførelse af konstruktioner, hvor den æstetiske holdbarhed er væsentlig, fokuserer dette projekt alene på overfladestrukturens betydning, samt betonens egenskaber i overfladen, da de til rådighed værende prøveemner alene kan anvendes til dette formål.

2.3 Løsningsstrategi

Til rådighed for projektet er både æstetisk accelereret ældede prøveemner (fremover kaldt gamle) og friskstøbte prøveemner (fremover kaldt nye). De gamle prøveemner er støbt i december 2004, hvorefter de har været i klimakarrusellen ad flere gange, så deres ækvivalente alder er 9,2 år. De nye prøveemner er alle støbt i juli 2005 og anvendt som referencer. Alle prøveemnerne har dimensionerne 70 mm × 250 mm × 350 mm.

Det er valgt at benytte nedenstående eksperimentelle metoder til at belyse, hvilke faktorer, der har indflydelse på den æstetiske holdbarhed:

- Porøsitetsbestemmelse
- Kapillarsugning (to metoder)
- Mikroskopi på planslib
- Vandpermeabilitetstest

For alle metoderne gælder det, at det alene er egenskaberne i overfladen, der ønskes belyst. Der søges kendskab til størrelse og fordeling af den åbne porøsitet, kapillaritetstallet, vandpermeabiliteten, overfladeruheden samt strukturen i overfladen. I de respektive afsnit er metoderne og deres resultater mere detaljeret beskrevet.

Da ikke alle metoderne er interessante for alle prøveemner, er der udført analyser efter tabel 2.3.

Tabel 2.3: *Udførte analyser.*

Prøveemne nr.	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Porøsitetsbestemmelse	x	x	x	x				x		x
Kapillarsugning med klods	x	x	x	x				x		x
Kapillarsugning med tragt	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Mikroskopi på planslib	x	x	x	x			x			
Vandpermeabilitetstest	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Som udgangspunkt skal alle analyser gennemføres for alle prøveemner, hvilket vil være meget ressourcekrævende. Til forsøgene med porøsitetsbestemmelse og kapillarsugningsforsøg er det valgt at benytte nr. 11 (tilsat zinkstearat) som repræsentant for de hydrofoberende tilsætningsstoffer, da det jævnfør tidligere sås, at zinkstearat har en større positiv virkning på farveændringen end siloxan (nr. 6 og 7). Både nr. 8 (rå træform) og nr. 10 (afsyret) fravælges ligeledes, da forskellen hos dem ligger i overfladens beskaffenhed, der ikke vurderes at have signifikant betydning for hverken porøsitet eller kapillaritetstal.

Til mikroskopi på planslib er fravalgt nr. 6, nr. 7 og nr. 11, da de hydrofoberende egenskaber ikke vurderes at påvirke overfladens beskaffenhed. Ligeledes er nr. 9 fravalgt, da det hvide farvepigment heller ikke har indflydelse på overfladen. Afsyret overflade (nr. 10) har naturligvis en overflade, der er anderledes end de øvrige, men det er vurderet, at analyse af nr. 8 (rå træform) vil give mere anvendelige resultater, da ændringen af overfladens beskaffenhed er meget udtalt.

Ved kapillarsugningsforsøget med tragt og vandpermeabilitetstesten er valgt alle prøveemner, dels for at sammenligne med resultaterne fra de første forsøg, og dels for at analysere betydningen af siloxan og afsyret overflade.

Kapitel 3

Porøsitetsmåling

En af de egenskaber, der formodes at påvirke den æstetiske holdbarhed, er porøsiteten. Beton er et porøst materiale og karakteriseres blandt andet ved porøsiteten. Porøsiteten fortæller alene noget om det samlede indhold af porer i betonen, og ikke om deres størrelse eller fordeling.

3.1 Formål

Formålet er at bestemme porøsiteten, men idet kun egenskaber i overfladen er interessante, udtages prøvelegemer fra det yderste lag og omtrent midt på prøveemnerne. Kun overfladen er interessant, da æstetikken alene henledes til den synlige del og dermed kun det yderste lag. Følgende prøveemner er valgt, jf. kapitel 2.

- Nr. 2: Reference med v/c=0,36
- Nr. 3: v/c=0,45
- Nr. 4: Lagret syv dage i form, v/c=0,36
- Nr. 5: Tilsat 5% mikrosilika (af cementvægten), v/p=0,36
- Nr. 9: Tilsat hvidt farvepigment, TiO_2, v/c=0,36
- Nr. 11: Hydrofoberet ved tilsætning af zinkstearat, v/c=0,36

3.2 Teori og forudsætninger

Hærdnet beton består af sten og sand kittet sammen af cementpasta, som har porøsiteter af varierende størrelse. Med tiden forandres porefordelingen og totalporøsiteten som følge af den fortsatte hydratisering, og ved betonens overflade kan en mekanisme som karbonatisering ligeledes ændre disse forhold.

Porøsitet er defineret som forholdet mellem porevolumen og totalvolumen, og afhængig af de betragtede porer tales om forskellige former for porøsitet. I dette projekt er kun den åbne porøsitet, $p_{å}$, bestående af porer med forbindelse til prøveemnets overflade, relevant.

Princippet for bestemmelsen af porøsitet er opsugnig ved hjælp af *veje-dyppe-veje-metoden* samt kendskab til prøvelegemernes størrelse. *Veje-dyppe-veje-metoden* er særligt egnet til faste materialer og bygger på *Archimedes lov*, der lyder, at et legeme nedsænket i en væske taber lige så meget i vægt som den fortrængte væskemængde vejer.

Den åbne porøsitet, $p_å$ kan bestemmes efter (3.1).

$$p_å = \frac{V_å}{V} = \frac{(m_{ov} - m_0)/\rho_w}{(m_{ov} - m_u)/\rho_w} \tag{3.1}$$

Her er

m_0	masse af udtørret prøvelegeme [g]
m_u	masse af trykvandmættet prøvelegeme under vand [g]
m_{ov}	masse af trykvandmættet prøvelegeme over vand [g]
ρ_w	vands densitet [g/cm^3]

For at vurdere hvor stor en vandmængde, prøvelegemerne kan opsuge ved 1 bar, bestemmes vacuum-vandmætningsgraden, S_{vac}, der bestemmes efter (3.2).

$$S_{vac} = \frac{(m - m_0)/\rho_w}{(m_{ov} - m_0)/\rho_w} \tag{3.2}$$

Her er

m	masse af vandmættet prøvelegeme [g]

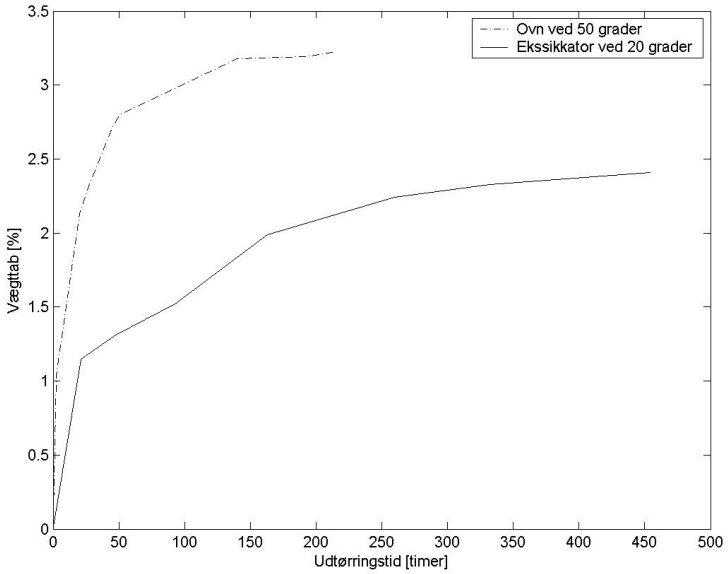
Det forventes, at porøsiteten i de nye prøveemner er højere end i de gamle prøveemner, da der sker en løbende strukturudvikling.

3.3 Tildannelse af prøvelegemer

Prøvelegemerne er som nævnt udtaget på en måde, så der er så meget overflade som muligt med. Desuden er der taget hensyn til, at de også skal benyttes ved bestemmelse af kapillaritetstal, jf. kapitel 4. Dimensionerne på prøvelegemerne er $10 \times 50 \times 50\,\text{mm}^3$, og de er udsavet af midten af prøveemnets overside.

Efter udsavning er prøvelegemerne udtørret ved 50°C i ventileret ovn, da der her ikke er risiko for uhensigtsmæssige strukturomlejringer i forhold til udtørring ved 105°C [Herholdt et al, 1985, s. 631]. Når vægtkonstans er opnået, er de herefter nedkølet til stuetemperatur i ekssikkator med silikagel, hvorefter alle sider, pånær oversiden, er påført et tyndt lag epoxy (sidstnævnte af hensyn til forsøgene med kapillar opsugning).

En anden metode til udtørring, end udtørring i ventileret ovn, er at benytte en ekssikkator under vacuum med eksempelvis silikagel som udtørringsmiddel. Denne metode blev indledningsvis benyttet, men fravalgt, da den er meget tidskrævende. For at sammenligne udtørringstiden er de to udtørringsforløb optegnet, jf. figur 3.1.



Figur 3.1: *Udtørring af prøvelegeme ved henholdsvis 50°C i ovn og under vacuum ved stuetemperatur i ekssikkator.*

Idet det antages at laboratorieklimaet er 20°C og 60%RF, svarer det til, at udtørringen i den ventilerede ovn er udført ved 11%RF, jf. (3.3).

$$\text{RF}= \frac{p}{p_m} = \frac{0{,}60 \cdot 2338{,}8\,\text{Pa}}{12344\,\text{Pa}} = 11\% \tag{3.3}$$

Her er

RF	relativ fugtighed [%]
p	aktuelt partialtryk [Pa] ved 20°C
p_m	mætningsdamptryk [Pa] ved 50°C

Udtørring i ekssikkator over silikagel ved stuetemperatur svarer til 40%RF. Forskellen i udtørringsforløbet, jf. figur 3.1, ligger i, at der ved 50°C fordampes en større del af gelvandet end ved 20°C - af denne årsag kan det ikke forventes, at de to metoder giver den samme slutværdi. Som følge af forskellen i RF kan luften i ekssikkatorer ikke optage en lige så stor fugtmængde som i den ventilerede ovn, hvorfor en ligevægtstilstand vil indstille sig på et højere niveau - forudsat samme udgangsfugtindhold.

3.4 Fremgangsmåde

De udtørrede prøvelegemer vejes, hvorefter de nedsænkes i vand til fuldstændig vandmætning. Når den kapillare opsugning er tilendebragt, trykvandmættes prøverne. Dette sker ved at nedsænke dem i vand, der udsættes for et tryk på 150 bar. Ved højt tryk presses vand helt ind i porerne, og vægten af de vandmættede prøvelegemer kan bestemmes henholdsvis over og under vand.

Ved forsøget registreres samhørende værdier af vægt (opsuget vandmængde) og tid. Ved registreringen af vægt tages prøvelegemerne op af vandbadet, aftørres og vejes. Denne aftørring kan være forbundet med en vis usikkerhed, hvorfor størrelsesordenen af denne er fastlagt. To forskellige prøvelegemer er optaget, aftørret og vejet 10 umiddelbart på hinanden følgende gange. I tabel 3.1 er angivet resultaterne af disse vejninger.

Tabel 3.1: *Usikkerhed på aftørring af prøvelegemer.*

	Prøvelegeme 1	Prøvelegeme 2
Middelværdi	84,016 g	73,416 g
Standardafvigelse	0,0035 g	0,0036 g

Det ses, at metoden giver begrænsede usikkerheder - ved bestemmelsen af porøsiteten giver en forskel på 0,03 g giver en ændring i $p_å$ på 0,1 procentpoint.

Under forsøget er observeret, at epoxyen på bagsiden af prøvelegemet løsner sig, da det optagne vand strømmer gennem prøvelegemet. Herved kan prøvelegemernes vægt være forhøjet, da det alene er overfladen, der aftørres. For at vurdere om epoxyen har optaget vand, udtages prøver til udtørring. Resultaterne fremgår af tabel 3.2.

Tabel 3.2: *Vandindhold i epoxy.*

	Udtørret i ovn ved 50°C	Udtørret i ekssikkator
Startvægt	54,984 g	54,063 g
Slutvægt	54,827 g	53,790 g
Vandindhold	0,3 vægt%	0,5 vægt%

Det ses, at den mængde vand, der optages, er forsvindende lille, hvorfor usikkerheden er vurderet negligeabel.

3.5 Resultater

Det er valgt at medtage de resultater, der skal bruges til at beregne $p_å$. Alle beregninger fremgår af den vedlagte CD-rom. Resultaterne fra henholdsvis de nye og gamle prøveemner er adskilt.

Ved nummereringen af prøvelegemerne henviser første tal til nummeret på det oprindelige prøveemne. Herefter er angivet et K, der henviser til, at de er anvendt til kapillarsugningsforsøg; og dermed også porøsitetsbestemmelse. Da der er lavet tre bestemmelser på hvert prøvelegeme, er angivet numre fra 1 til 3, og til sidst et N eller et G, der henviser til, om der er tale om et nyt prøveemne eller et gammelt prøveemne. "2-K1N" henviser således til et nyt prøvelegeme af prøveemne nr. 2 (reference), prøvelegeme til kapillarsugningsforsøg, første prøve.

3.5.1 Eksperimentelt bestemte værdier

Nye prøveemner

I tabel 3.3 og tabel 3.4 er angivet resultaterne af porøsitetsmålingerne for de nye prøveemner.

Tabel 3.3: *Porøsitetsmåling på nye prøveemner (prøveemnerne 2, 3 og 4).*

	2-K1N	2-K2N	2-K3N	3-K1N	3-K2N	3-K3N	4-K1N	4-K2N	4-K3N
m_{ov} [g]	68,617	66,235	64,617	63,739	56,394	51,384	60,487	63,78	64,161
m_u [g]	41,991	40,486	39,584	37,442	33,081	30,09	36,828	38,935	39,296
m_0 [g]	66,227	63,81	62,426	60,848	53,873	49,124	58,29	61,588	61,863
$p_å$ [%]	8,98	9,42	8,75	10,99	10,81	10,61	9,29	8,82	9,24

Tabel 3.4: *Porøsitetsmåling på nye prøveemner (prøveemnerne 5, 9 og 11).*

	5-K1N	5-K2N	5-K3N	9-K1N	9-K2N	9-K3N	11-K1N	11-K2N	11-K3N
m_{ov} [g]	62,913	69,589	51,761	67,099	65,123	70,358	65,244	63,84	65,657
m_u [g]	36,881	40,765	30,968	39,267	37,922	41,32	38,328	37,671	39,153
m_0 [g]	60,032	66,16	49,353	63,757	61,733	66,881	62,744	61,323	63,334
$p_å$ [%]	11,07	11,90	11,58	12,01	12,46	11,97	9,29	9,62	8,76

Gamle prøveemner

I tabel 3.5 og tabel 3.6 er angivet resultaterne af porøsitetsmålingerne for de gamle prøveemner.

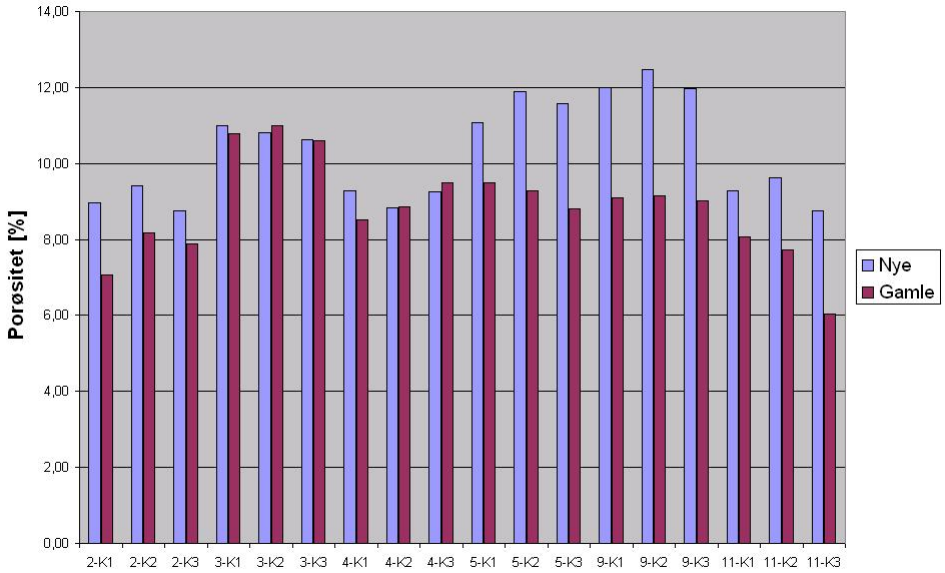
Tabel 3.5: *Porøsitetsmåling på gamle prøveemner (prøveemnerne 2, 3 og 4).*

	2-K1G	2-K2G	2-K3G	3-K1G	3-K2G	3-K3G	4-K1G	4-K2G	4-K3G
m_{ov} [g]	71,786	73,567	73,118	65,741	68,23	70,784	66,395	67,83	69,514
m_u [g]	42,576	43,791	43,214	38,468	39,996	41,91	39,243	39,928	40,861
m_0 [g]	69,721	71,137	70,759	62,801	65,129	67,725	64,084	65,356	66,793
$p_å$[%]	7,07	8,16	7,89	10,78	10,98	10,59	8,51	8,87	9,50

Tabel 3.6: *Porøsitetsmåling på gamle prøveemner (prøveemnerne 5, 9 og 11).*

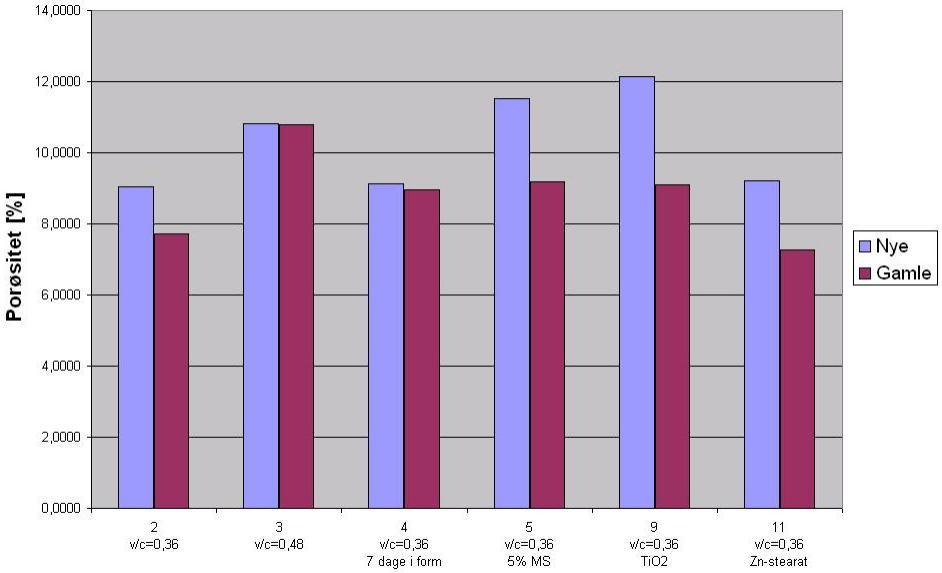
	5-K1G	5-K2G	5-K3G	9-K1G	9-K2G	9-K3G	11-K1G	11-K2G	11-K3G
m_{ov} [g]	69,514	74,286	72,462	74,338	82,817	80,991	85,099	71,549	72,478
m_u [g]	43,758	42,493	43,701	48,882	47,961	50,564	42,216	42,513	44,141
m_0 [g]	71,387	69,684	71,643	79,73	77,968	81,984	69,185	70,161	72,89
$p_å$ [%]	9,50	9,27	8,80	9,10	9,15	9,02	8,06	7,73	6,04

Resultaterne fra forsøgene er afbildet i figur 3.2.



Figur 3.2: *Resultater af porøsitetsbestemmelse.*

Det ses på figuren, at de nye prøveemner generelt har de højeste porøsiteter, og hvor det ikke er tilfældet, er forskellen meget lille. For at overskueliggøre analyserne er den gennemsnitlige porøsitet for hvert prøveemne bestemt og afbildet i figur 3.3. Resultaterne fremgår af tabel 3.7.



Figur 3.3: *Resultater af porøsitetsbestemmelse - gennemsnitlig.*

Tabel 3.7: *Gennemsnitlige værdier for porøsitet.*

Prøveemne	Nr. 2		Nr. 3		Nr. 4		Nr. 5		Nr. 9		Nr. 11	
	Nye	Gamle	Nye	Gamle	Nye	Gamle	Nye	Gamle	Nye	Gamle	Nye	Gamle
p_d [%]	9,05	7,71	10,81	10,79	9,12	8,96	11,51	9,19	12,15	9,09	9,22	7,28
Standard afv. [-]	0,34	0,57	0,19	0,19	0,26	0,50	0,42	0,36	0,27	0,07	0,43	1,09

Som forventet er porøsiteten i de nye prøveemner højere end i de gamle, hvilket stemmer godt overens med den fortsatte strukturudvikling.

Efter 9 års ækvivalent æstetisk ældning observeres det største fald i porøsitet ved nr. 5 og nr. 9. Dette stemmer overens med, at både mikrosilika og TiO_2 over tid bidrager til en tættere struktur.

3.5.2 Teoretiske værdier

Porøsiteten kan bestemmes teoretisk på baggrund af *Powers'* fasemodel. I appendix A er fremstillingen af prøveemnerne beskrevet, og det fremgår, at de efter afformning er lagret i laboratorieklima ved 20±1°C og 55±5% RF. Da prøveemnerne er udsat for udtørring umiddelbart efter afformning, bestemmes hydratiseringsgraden på afformningstidspunktet, hvilket er på den sikre side, da det er muligt, at modenheden er højere end svarende til afformningstidspunktet. Endvidere er dette valgt, da indflydelsen fra den accelererede æstetiske ældning på modenheden ikke er kendt.

Hydratiseringsgraden bestemmes på baggrund af cementens varmeudviklingsforløb og kendskabet til v/c-forhold, idet der er en lineær sammenhæng mellem hydratiseringsgrad og varmeudvikling.

Cementens varmeudvikling kan måles ved adiabatisk kalorimetri og er udtrykt ved:

$$Q = Q_\infty \cdot \exp\left(-\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^\alpha\right) \tag{3.4}$$

Her er

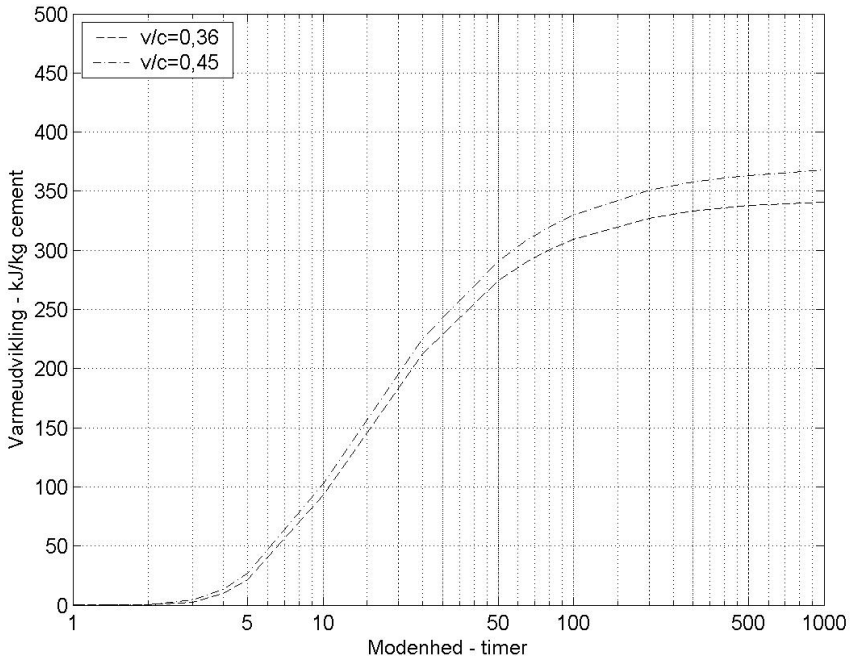
Q	Varmemængde [kJ/kg cement]
Q_∞	Varmemængde ved uendelig modenhed [kJ/kg cement]
τ_e	Tidskonstant [timer]
M	Modenhed [timer]
α	Krumning [-], voksende værdier gør kurven mere krum og stejl

Parameterne Q_∞, τ_e og α er angivet i [Dansk Beton nr. 1, 2005], og det skal bemærkes, at de er bestemt for v/c=0,46. Disse værdier skal derfor korrigeres, da varmeudviklingen afhænger delvist af v/c-forholdet, og at det også påvirkes af puzzolaner og tilsætningsstoffer. Udtrykket er korrigeret efter [Sørensen, 1981, s. 6-7]. De korrigerede udtryk er angivet i (3.5) og (3.6).

$$Q(M)_{v/c=0,36} = 344 \cdot \exp\left(-\left(\frac{12,8}{M}\right)^{1,09}\right) \tag{3.5}$$

$$Q(M)_{v/c=0,45} = 372 \cdot \exp\left(-\left(\frac{14,2}{M}\right)^{1,03}\right) \tag{3.6}$$

I figur 3.4 er forløbene optegnet.



Figur 3.4: *Varmeudviklingsforløbet i hvid cement.*

Hydratiseringsgraden til en given modenhed, M kan bestemmes efter (3.7).

$$\alpha(M) = \frac{Q(M)}{Q_\infty} \tag{3.7}$$

Her er

$Q(M)$	Varmemængde ved modenhed M [kJ/kg cement]
Q_∞	Varmemængde ved fuldstændig reaktion af cement [kJ/kg cement]

Q_∞ bestemmes på baggrund af cementens kemiske sammensætning, jf. A og de enkelte klinkermineralers hydratiseringsvarme [Herholdt et al, 1985, s. 359].

Med kendskab til hydratiseringsgraden kan den åbne porøsitet, $p_{å,\,teori}$ til sidst bestemmes efter *Powers'* fasemodel. Resultaterne fremgår af tabel 3.8. Det skal bemærkes, at *Power's* fasemodel kun gælder for pastafasen, hvorfor der er taget hensyn til pastaindholdet, der udgør 28% af betonen. Ved udtørringen ved 50°C og 11%RF er en del af gelvandet fordampet. Denne andel bestemmes jf. (3.8).

$$\text{Andel af fordampet gelvand} = 1 - \frac{\text{Hygroskopisk bundet vand i pasta}}{\text{Gelvand}} \tag{3.8}$$

Det hygroskopisk bundne vand udgør jf. [Herholdt et al, 1985, s. 171] 0,029 $^{\text{kg vand}}/_{\text{kg cement}}$, hvilket med cementindholdet på 455 $^{\text{kg}}/_{\text{m}^3}$ giver 13,195 kg. Gelvandet bestemmes efter enten (B.9) eller (B.19).

Prøveemnerne er efter afformning ikke påført hærdemembran eller hærdet i hærdekar, hvilket åbner mulighed for udtørring af overfladen, hvorved der er en risiko for, at hydratiseringen i overfladen standser. Af denne grund er porøsiteten på afformningstidpunktet bestemt, jf. 3.8, hvilket er beregnet efter *Power's* fasemodel. Det skal bemærkes, at der ved konstruktion af *Power's* diagram kun tages hensyn til v/c-forhold og indholdet af mikrosilika. Indflydelse på porøsiteten hidrørende fra farvepigment og zinkstearat er ikke medtaget.

Tabel 3.8: *Hydratiseringsgrader og porøsitet.*

	v/c=0,36, u. MS	v/c=0,36, m. MS	v/c=0,36, u. MS	v/c=0,45, u. MS
M [timer]	24	24	168	24
$\alpha(M)$ [-]	0,50	0,50	0,77	0,50
$p_{å,teori,pasta}$ [%]	32	33	21	40
$p_{å,teori}$ [%]	10,60	11,00	8,42	12,60

3.5.3 Sammenligning af eksperimentelle og teoretiske værdier

I tabel 3.9 er angivet resultaterne fra bestemmelse af porøsiteten samt den teoretisk bestemte.

Tabel 3.9: *Resultater af porøsitetsbestemmelse. Alle tal er angivet i %.*

	Teoretisk	Nye	Gamle
Nr. 2	10,60	9,05	7,71
Nr. 3	12,60	10,81	10,79
Nr. 4	8,42	9,12	8,96
Nr. 5	11,00	11,51	9,19
Nr. 9	10,60	12,15	9,09
Nr. 11	10,60	9,22	7,28

Som følge af det høje v/c-forhold bør nr. 3 have den højeste porøsitet. Dette ses tydeligt ved de gamle prøveemner, men knapt så tydeligt hos de nye. Endvidere bør nr. 5 som følge af indholdet af mikrosilika have en højere porøsitet end referencen, hvilket synes at stemme fint overens med resultaterne. *Power's* fasemodel tager ikke hensyn til indhold af farvepigment og zinkstearat, hvorfor den teoretiske porøsitet på denne baggrund er som referencen. På baggrund af resultaterne ser dette ud til at stemme godt overens for nr. 11 med zinkstearat, der eksperimentelt har næsten identiske porøsiteter som referencen. Farvepigmentet i nr. 9 synes på baggrund af resultaterne at virke som mikrosilika ved at give højere porøsiteter.

Den ekstra lagring som nr. 4 har fået i forhold til de øvrige, synes ikke i væsentlig grad at påvirke porøsiteten, da ændringen i forhold til referencen er begrænset.

Ved at sammenholde resultaterne fra de eksperimentelle undersøgelser med de teoretisk bestemte ses, at der i nogle tilfælde er en relativt stor afvigelse mellem resultaterne, jf. tabel 3.10.

Tabel 3.10: *Afvigelser på eksperimentel porøsitet i forhold til teoretisk porøsitet.*

	Nr.2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5	Nr. 9	Nr. 11
Nye prøvelegemer [%]	14,6	14,2	8,3	4,6	14,6	13,0
Gamle prøvelegemer [%]	27,2	14,4	6,4	16,5	14,2	31,3

Den teoretisk bestemte porøsitet omfatter alle luft- og kapillarporer - både med og uden forbindelse til overfladen samt en del af gelporøsiteten. Porøsiteten bestemt ved forsøgene omfatter kun den åbne porøsitet, der er porer med forbindelse til overfladen. Som følge af udtørringen omfatter den åbne porøsitet også en del af gelporøsiteten. Da der eksisterer porer uden forbindelse til overfladen, er det forventet, at den eksperimentelt bestemte porøsitet er lavere end den teoretiske.

Endvidere tager *Power's* fasemodel ikke hensyn til randeffekter som vægeffekt for tilslagsmaterialer. Med dette menes det fænomen, hvor pastaandelen i kanten af prøveemnerne er større end inde i prøveemnet. Prøvelegemerne til forsøget er udsavet af overfladen af prøveemnet, hvorfor der forventes en større

pastaandel end gennemsnitligt for hele prøveemne. Dette medfører, at den eksperimentelt bestemte porøstitet kan afvige fra den teoretisk bestemte porøsitet, der er beregnet ved hjælp af *Power's* fasemodel og en gennemsnitlig pastaandel for den givne beton.

Afvigelserne i forhold til referencen er ligeledes interessante, og fremgår af tabel 3.11.

Tabel 3.11: *Afvigelser på eksperimentel porøsitet i forhold til referencen.*

	Nr.2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5	Nr. 9	Nr. 11
Nye prøvelegemer [%]	-	19	0,8	27	34	2
Gamle prøvelegemer [%]	-	40	16	19	18	6

Det ses, at tilsætning af zinkstearat giver den mindste afvigelse i forhold til referencen, hvilket stemmer godt overens med, at zinkstearat er en overfladebehandling, der ingen indflydelse har på strukturen og dermed porøsiteten.

Som forventet har nr. 3 en stor afvigelse, hvilket begrundes med, at v/c-forholdet er anderledes. Ved de gamle prøveemner synes det at være underordnet om der sker ændringer i lagringstid eller tilsættes mikrosilika eller farvepigment.

Ved de nye prøveemner er der tilnærmelsesvis ingen forskel på referencen og den ekstra lagrede. Det synes derfor at kunne konkluderes, at den ekstra lagring ingen betydning har for porøsiteten. Stor afvigelse er der især ved tilsætning af mikrosilika og farvepigment, hvilket også kan være begrundet med, at indflydelsen på porøsiteten først kommer ved senere terminer.

3.5.4 Vacuumvandmætningsgrad

Prøvelegemerne er som nævnt også trykvandmættet, hvilket gør det muligt at bestemme vacuumvandmætningsgraden, S_{vac}, der fortæller, hvor stor en del af porerne, der er vandfyldte ved et tryk på ca. 1 bar i forhold til trykmætningen ved 150 bar:

$$S_{vac} = \frac{(m - m_0)/\rho_w}{(m_{ov} - m_0)/\rho_w} \tag{3.9}$$

Mætningsgraderne fremgår af tabel 3.12 og 3.13.

Tabel 3.12: *Mætningsgrader for nye prøvelegemer.*

	2N	3N	4N	5N	9N	11N
S_{vac} [-]	0,82	0,74	0,79	0,77	0,67	0,73

Tabel 3.13: *Mætningsgrader for gamle prøvelegemer.*

	2G	3G	4G	5G	9G	11G
S_{vac} [-]	0,60	0,57	0,68	0,62	0,66	0,46

For de nye prøveemner er mætningsgraderne højere end for de gamle prøveemmer, hvilket stemmer overens med, at porøsiteten hos de nye prøveemner er højere, hvilket letter den kapillære opsugning af vand.

3.6 Fejlkilder og usikkerheder

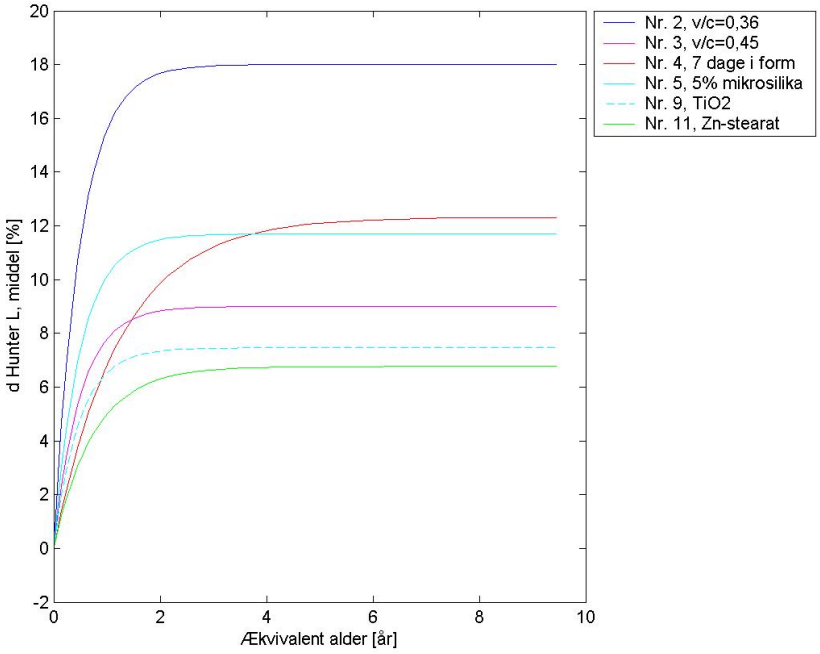
Ved forsøg, hvor betons evne til at opsuge vand ønskes bestemt, bør tværmålet af prøvelegemerne være tre til fire gange største stenstørrelse, d_{max} og højden mindst 30 mm [Teknologisk, 1983, s. 3]. Prøveemnernes største stenstørrelse er 16 mm, hvilket betyder, at tværmålet på 50 mm er tilstrækkeligt,

men tykkelsen på 10 mm burde være tredoblet. Ved bestemmelse af porøsitet er metoden i [Teknologisk, 1983] dog ikke anvendt. I den metode placeres prøvelegemerne, så alene underkanten er i kontakt med vand, mens prøvelegemerne i dette projekt har været helt nedsunket i vand, men dog påført epoxy, så opsugning alene var muligt fra oversiden.

3.7 Sammenligning med farvemålinger

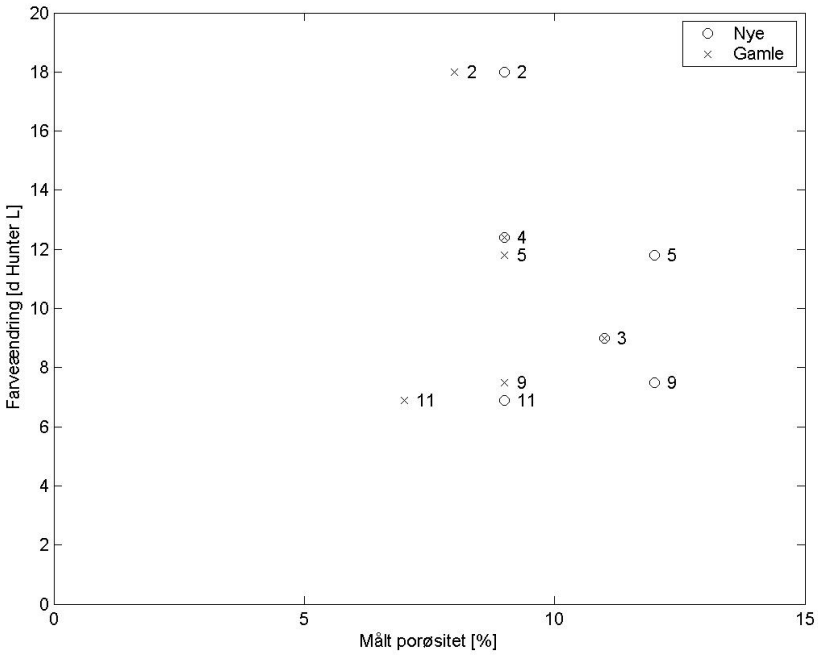
Som følge af den tættere mikrostruktur er betoner med lavt v/c-forhold mørkere end dem med højt v/c-forhold. Årsagen er, at den øgede porøsitet ved høje v/c-forhold gør cementpastaen mere "gennemsigtig", hvilket øger den mængde lys, der absorberes af tilslaget. Da farven måles som refleksionen fra faste partikler, vil farven dermed have højere *Hunter L*-værdier ved øget porøsitet [Hansen, 2004, s. 18]. Dette ses at være i fin overensstemmelse med målingerne på prøveemner, jf. figur 2.1.

Resultaterne af porøsitetsbestemmelsen skal sammenholdes med farvemålingerne, der for de benyttede prøveemner fremgår af figur 3.5.



Figur 3.5: *Farvemålinger for prøvelegemer benyttet til porøsitetsbestemmelse.*

I figur 3.6 er farveændringerne som funktion af porøsiteten afbildet.



Figur 3.6: *Sammenhæng mellem porøsitet og farveændringer.*

Som forventet ses det, at de gamle prøveemner har en lavere eller identisk porøsitet end de nye, men derudover ses ingen tydelig sammenhæng mellem porøsitet og farveændring.

Som følge af den tættere mikrostruktur er betoner med lavt v/c-forhold mørkere end dem med højt v/c-forhold. Årsagen er, at den øgede porøsitet ved høje v/c-forhold gør cementpastaen mere gennemsigtig, hvilket øger den mængde lys, der absorberes af tilslaget. Da farven måles som refleksionen fra faste partikler, vil farven dermed have højere *Hunter L*-værdier ved øget porøsitet [Hansen, 2004, s. 18].

3.8 Sammenfatning

Porøsiteterne blev sammenlignet i forhold til referencen, og her blev fundet, at zinkstearat havde den mindste indflydelse på porøsiteten. Den største indflydelse på porøsiteten stammer fra øgning af v/c-forhold og tilsætning af farvepigment.

Ved at sammenligne de eksperimentelt bestemte porøsiteter og farvemålingerne blev ingen tydelig sammenhæng fundet udover, at porøsiteten for gamle som forventet var lavere end for de nye.

Kapitel 4

Kapillarsugning

Når et porøst materiale kommer i kontakt med vand sker en fugttransport. Denne fugttransport kan enten være stationær eller ikke-stationær. Fugttransporten siges at være stationær, når den transporterede vandmængde er konstant og fugtfordelingen i materialet ikke forandres over tid. Ved en ikke-stationær transport ændres fugtstrøm og vandindhold hele tiden - eksempler herpå er udtørring, opfugtning og kapillarsugning.

4.1 Formål

Formålet er at bestemme prøveemnernes evne til at opsuge vand og dermed få en idé om, hvor tæt strukturen i dem er. Dette er gjort ved bestemmelse af kapillaritetstallet ved hjælp af to forskellige eksperimentelle metoder:

- Opfugtning af prøvelegeme
- Opsugning fra tragt

På baggrund af resultaterne fra de to eksperimentelle metoder er kapillaritetstallene for de enkelte prøveemner bestemt. Kapillaritetstallet er et mål for, hvor stor en fugtmængde et materiale kan optage pr. areal pr. tid.

Opfugtning af prøvelegeme er alene udført på prøveemnerne 2, 3, 4, 5, 9 og 11, mens alle prøveemnerne er benyttet ved opsugning fra tragt. Valget af betragtede prøveemner fremgår af kapitel 2.

4.2 Teori og forudsætninger

Kapillarsugning skyldes, at vand væder beton. Herved dannes en menisk, som trækker vandet ind i betonens porer.

Det teoretiske udtryk for kapillaritetstallet, k_{teori} kan opstilles [Herholdt et al, 1985, s. 203].

Den opsugede vandmængde, Q_{pore} i kg pr. m^2 af kapillarrørets tværsnit.

$$Q_{pore} = \rho_w \cdot z \tag{4.1}$$

Her er

ρ_w vands densitet [kg/m^3]
z afstand fra fugtfront til den sugende betonflade [m]

z udtrykt som funktion af sugetiden

$$z = \sqrt{\frac{r \cdot \sigma \cdot \cos(\theta)}{2 \cdot \eta}} \cdot \sqrt{t} = \sqrt{\frac{1}{M}} \cdot \sqrt{t} \tag{4.2}$$

Her er

r	radius i kapillarpore [m]
η	vands dynamiske viskositet [Ns/m²]
M	modstandstal [s/m²]

Q_pore udtrykkes herved

$$Q_{pore} = \rho_w \cdot \sqrt{frac1M} \cdot \sqrt{t} \tag{4.3}$$

For en enkelt kapillarpore haves:

$$k = \frac{\rho_w}{\sqrt{M}} \tag{4.4}$$

Her er

k	kapillaritetstal [kg/m²· $\sqrt{s}$]

I et materiale er det kun de åbne porer, der suger vand. Volumenandelen af disse porer benævnes $p_å$. Udtrykket for materialets kapillaritetstal bliver således:

$$k = \frac{p_å \cdot \rho_w}{\sqrt{M}} \tag{4.5}$$

Den opsugede vandmængde pr. m^2 betonoverflade kan derfor udtrykkes:

$$Q_{beton} = Q_{pore} \cdot p_å = \rho_w \cdot \sqrt{frac1M} \cdot \sqrt{t} \cdot p_å = k \cdot \sqrt{t} \tag{4.6}$$

I ligevægtsforhold aftager kapillaritetstallet over tid. Hverken modstandstallet eller kapillaritetstallet er kortlagt særlig godt for beton, så teoretisk bestemmelse af kapillaritetstallet er forbundet med store usikkerheder. Kapillaritetstallet for cementpasta med v/c=0,40 i ligevægtsfugtighed ved ca. 50% RF er $\simeq 0,05$ kg/m²· $\sqrt{s}$ [Herholdt et al, 1985, s. 202]. For at bestemme den tilsvarende værdi for beton multipliceres med pastaandelen. Formlerne passer rimelig godt for indtrængning af vand de første ca. 10 mm [Herholdt et al, 1985, s. 203], men skal ved større stighøjder erstattes af et diffusionsudtryk.

Som følge af usikkerheden på modstandstallet er det valgt ikke at bestemme det teoretiske kapillaritetstal.

Et højt v/c-forhold og en lav hydratiseringsgrad giver en stor sammenhængende porøsitet, hvilket åbner mulighed for transport af store mængder fugt, da mængden af kapillarporer har den største betydning for fugttransporten gennem cementpastaen. I zonen umiddelbart mellem cementpasta og tilslag er der normalt mere porøst som følge af bleeding eller revnedannelse - her kan der således også være tendens til stor vandtransport.

4.3 Opfugtning af prøvelegeme

Ved den første metode til bestemmelse af kapillaritetstal startes med at nedsænke et fuldstændigt udtørret prøvelegeme i vand.

4.3.1 Tildannelse af prøvelegemer

Ved forsøget ønskes egenskaberne i prøvelegemernes overflade bestemt, da kun overfladen er interessant i relation til æstetik og æstetisk holdbarhed. Prøvelegemernes dimensioner er valgt på baggrund af ønsket om stor overflade tillige med en størrelse, der inden for rimelig tid kan udtørres. Overfladen er 50×50 mm og tykkelsen 10 mm.

Prøvelegemerne udsaves af midterzonen af prøveemnerne, hvorefter de placeres i en ventileret ovn, hvor temperaturen er 50°C. Her udtørres de til vægtkonstans (ændring højst 0,1 vægt% i løbet af fire timer) [Teknologisk, 1983, s. 3]. Normalt udtørres i ovn ved 105°C, men i dette tilfælde er 50°C valgt, da en øget temperatur har indvirkning på strukturen i betonen, hvilket er meget uhensigtsmæssigt, da det netop er overfladestrukturen, der analyseres. Ved 50°C sker en langsom og meget svag omlejring, der ikke har nogen betydning - en omlejring, der havde været langt mere udtalt ved 105°C [Herholdt et al, 1985, s. 631].

Når prøvelegemerne er helt udtørrede, lægges de til afkøling ved stuetemperatur i ekssikkatorer med silikagel som udtørringsmiddel, da det herved undgås, at de optager fugt fra luften. Efter nedkøling påføres de et tyndt lag epoxy på kanterne og bunden, så der kun er mulighed for indtrængning af vand fra oversiden, jf. figur 4.1. Dette er gjort for at etablere en endimensional vandindtrængning.

Figur 4.1: *Prøvelegemer til forsøg med opfugtning af prøvelegeme.*

4.3.2 Fremgangsmåde

De tørre prøvelegemer nedsænkes i demineraliseret vand. Med mellemrum tages de op og aftørres, hvorefter samhørende værdier af vægt og opsugningstid registreres.

4.3.3 Resultater

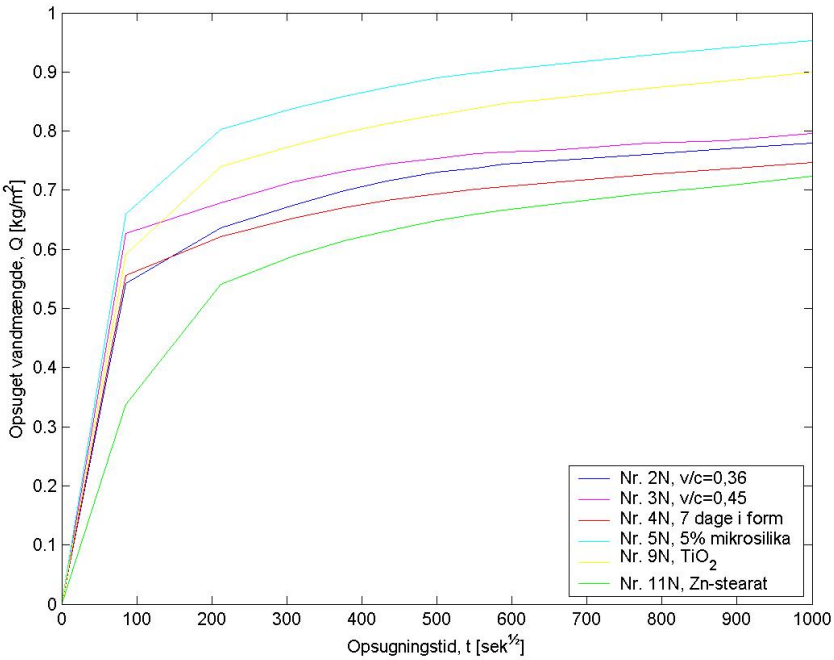
På en afbilding af opsuget vandmængde, Q [kg/m^2] som funktion af kvadratroden af opsugningstiden, $\sqrt{t}$ [$\sqrt{s}$] kan kapillaritetstallet bestemmes som hældningen på det rette stykke af den fremkomne kurve, jf. (4.6).

En "opfugtningskurve" består normalt af et retlinet stykke og et kurvet stykke. Det retlinede forløb på kurven gælder typisk de første tre timer. Da der ikke eksisterer måledata for mere end hver anden time i begyndelsen, vil det eneste punkt på det retlinede forløb således være første målepunkt. I dette tilfælde bestemmes kapillaritetstallet som hældningen på den rette linie, der kan indlægges mellem origo og det første målepunkt.

I alle tilfælde er benyttet middelværdier (data for tre prøvelegemer). Data for alle prøvelegemer er vedlagt på CD-rom.

Nye prøveemner

På figur 4.2 ses opsugningsforløbet for de nye prøveemner. Kapillaritetstallene fremgår af tabel 4.1.



Figur 4.2: *Opsuget vandmængde som funktion af opsugningstid - nye prøvelegemer.*

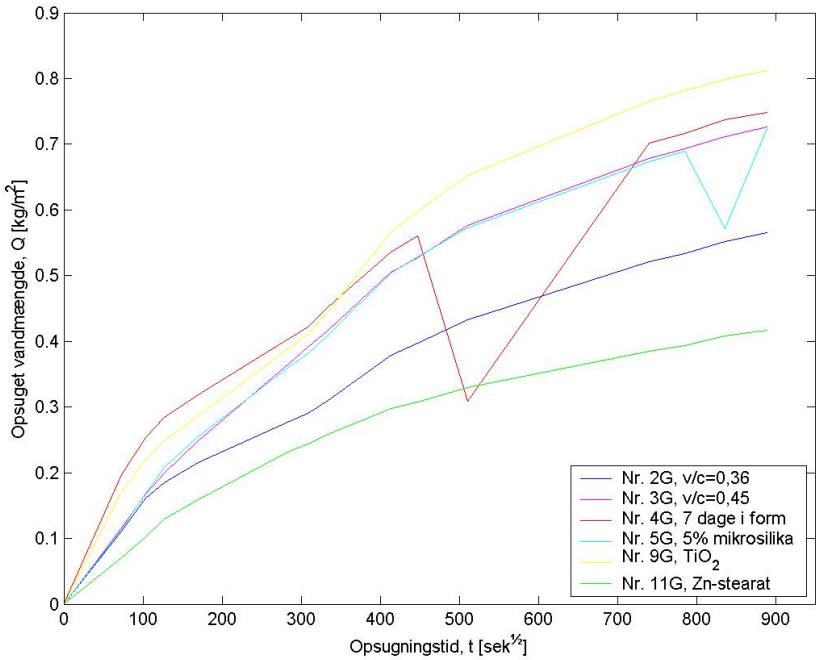
Det ses på figur 4.2, at den største vandmængde opsuges de første 200 $\sqrt{sek}$ (ca. 11 timer).

Tabel 4.1: *Kapillaritetstal for nye prøvelegemer.*

	2N	3N	4N	5N	9N	11N
k_{eksp} $[\frac{kg}{m^2 \cdot \sqrt{s}}]$	0,0064	0,0074	0,0066	0,0078	0,0070	0,0040

Gamle prøveemner

På figur 4.3 ses opsugningsforløbet for de nye prøveemner. Kapillaritetstallene fremgår af tabel 4.2.



Figur 4.3: *Opsuget vandmængde som funktion af opsugningstid - gamle prøvelegemer.*

I forhold til de nye prøvelegemer, så opnår den opsugede vandmængde for de gamle prøvelegemer ikke et niveau, hvor der sker minimal ændring. De to hak i figur 4.3 skyldes, at der i to tilfælde skete en reduktion i vægten for det pågældende prøvelegeme, hvilket kan være sket som følge af usikkerhed ved aftørring og dermed fejl ved vejning.

Tabel 4.2: *Kapillaritetstal for gamle prøvelegemer.*

	2G	3G	4G	5G	9G	11G
k_{eksp} $[\frac{kg}{m^2 \cdot \sqrt{s}}]$	0,0015	0,0016	0,0027	0,0015	0,0023	0,0010

4.4 Opsugning fra tragt

Den anden metode til bestemmelse af kapillaritetstal går ud på at lade prøveemnet opsuge vand fra en tragt placeret på det.

4.4.1 Tildannelse af prøvelegemer

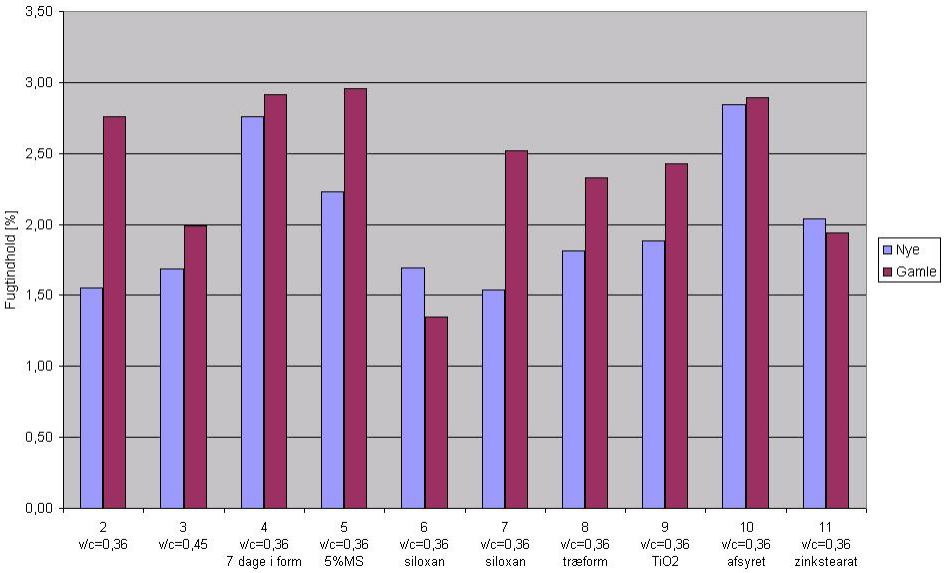
Der fremstilles ikke særlige prøvelegemer, da forsøgene udføres direkte på prøveemnet.

4.4.2 Fremgangsmåde

En glastragt og et glaspipetterør med en inddeling på 0,1 ml smeltes sammen, så de udgør en art kop. Denne kop monteres på prøveemnerne ved hjælp af epoxy, jf. figur 4.4. Herefter smøres et tyndt lag klar lak rundt om tragten for at undgå fordampning fra overfladen.

Figur 4.4: *Forsøgsopstilling til opsugning fra tragt.*

Prøveemnerne er ved forsøgets start konditioneret ved stuetemperatur og ca. 50% RF. Fugtindholdet ved forsøgets start er bestemt ved at hakke et stykke beton af og derefter udtørre det ved 105°C, jf. figur 4.5.



Figur 4.5: *Fugtindhold i prøveemner.*

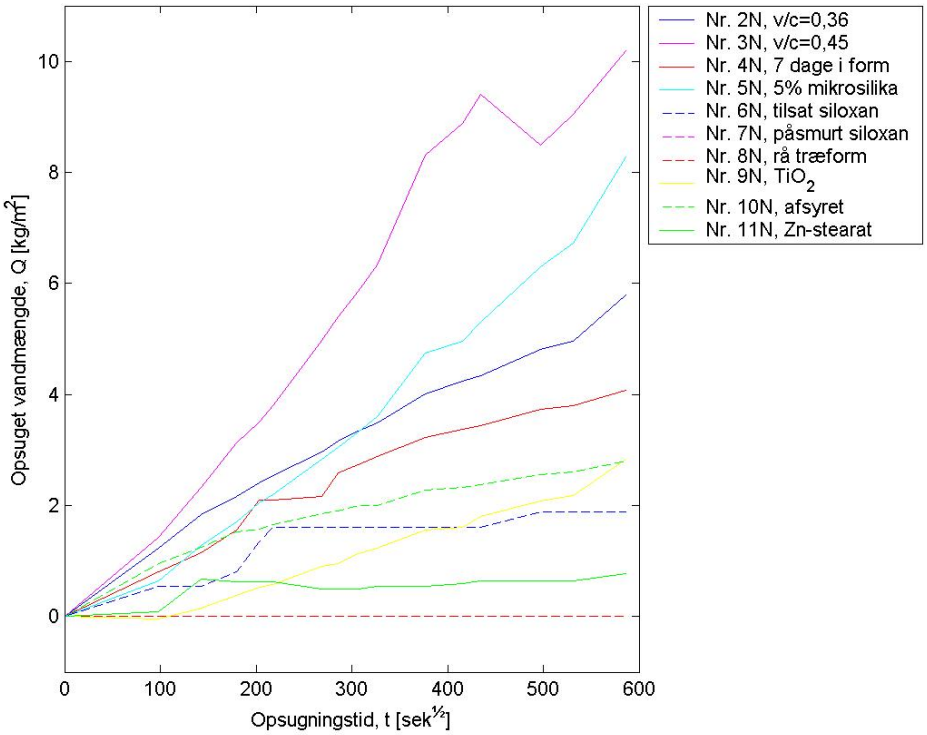
Ved forsøgets start fyldes pipetterøret med demineraliseret vand, hvorefter samhørende værdier af tid og opsuget vandmængde (aflæst på pipetterør) registreres.

4.4.3 Resultater

I figuren er benyttet middelværdier (data for tre prøvesteder). Data for alle prøveemner er vedlagt på CD-rom. Som i afsnit 4.3 er kapillaritetstallet bestemt som hældningen på den rette linie, der indlægges mellem origo og første målepunkt.

Nye prøveemner

På figur 4.6 ses opsugningsforløbet for de nye prøveemner. Kapillaritetstallene fremgår af tabel 4.3.



Figur 4.6: *Opsuget vandmængde som funktion af opsugningstid - nye prøveemner.*

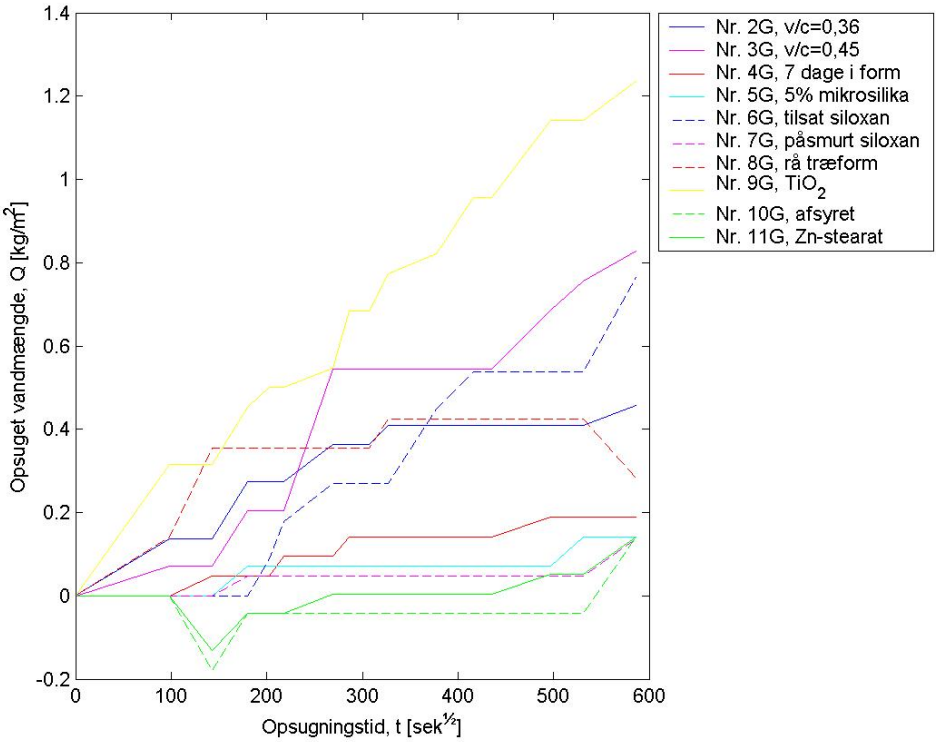
Tabel 4.3: *Kapillaritetstal for nye prøveemner.*

	2N	3N	4N	5N	6N	7N	8N	9N	10N	11N
$k_{eksp,tragt}$ [$\frac{kg}{m^2 \cdot \sqrt{s}}$]	0,0125	0,0101	0,0082	0,0072	0,0055	-	-	-0,0004	0,0098	0,0009

Årsagen til, at kapillaritetstallet for 9N er negativt er, at det er bestemt som hældningen mellem origo og første målepunkt, hvortil der ikke er sket en opsugning, hvilket er en fejl. Ved fyldning af pipetterøret løber vandet ned langs rørets kant og efter henstand vil vandet ende i bunden, hvorfor der kan være usikkerhed mellem første og anden aflæsning. I praksis er det ikke muligt at opnå negative kapillaritetstal.

Gamle prøveemner

På figur 4.7 ses opsugningsforløbet for de nye prøveemner. Kapillaritetstallene fremgår af tabel 4.4.



Figur 4.7: *Opsuget vandmængde som funktion af opsugningstid - gamle prøveemner.*

Tabel 4.4: *Kapillaritetstal for gamle prøveemner.*

	2G	3G	4G	5G	6G	7G	8G	9G	10G	11G
$k_{eksp,tragt}$ $[\frac{kg}{m^2 \cdot \sqrt{s}}]$	0,0014	0,0007	-	-	-	-	0,0014	0,0032	-	-

4.5 Sammenligning af metoder og resultater

Bestemmelsen af kapillaritetstallet er sket ved hjælp af to forskellige metoder og på to forskellige typer prøvelegemer. En væsentlig forskel mellem de to prøvelegemer er deres fugtindhold. Hvor prøvelegemerne til klodsforsøget var fuldstændigt udtørrede, og altså havde et fugtindhold omkring 0%, havde prøveemnerne anvendt til tragtforsøget et fugtindhold på ca. 2%.

Dette har betydning for kapillaritetstallene, da de fuldstændigt udtørrede prøvelegemer naturligt nok kan optage en større vandmængde til at begynde med. Kapillaritetstallene er bestemt på baggrund af kurvens forløb i starten, hvorfor dette har stor betydning for resultaterne. Resultaterne fra den første metode burde derfor give anledning til højere kapillaritetstal end tragtforsøgene, hvilket stemmer overens i halvdelen af tilfældene. Desuden er det forventet, at kapillaritetstallene for de nye prøveemner er højere end de for gamle, da disse har opnået en mere tæt struktur, hvilket vanskeliggør indtrængningen af vand.

Resultaterne fra begge metoder er angivet i tabel 4.5 og tabel 4.6.

Tabel 4.5: *Sammenligning af kapillaritetstal for nye prøvelegemer.*

Prøve nr.	2N	3N	4N	5N	6N	7N	8N	9N	10N	11N
$k_{eksp,klods}$ $[kg/m^2 \cdot \sqrt{s}]$	0,0064	0,0074	0,0066	0,0078	-	-	-	0,0070	-	0,0040
$k_{eksp,tragt}$ $[kg/m^2 \cdot \sqrt{s}]$	0,0125	0,0101	0,0082	0,0072	0,0055	-	-	-0,0004	0,0098	0,0009

Tabel 4.6: *Sammenligning af kapillaritetstal for gamle prøvelegemer.*

Prøve nr.	2G	3G	4G	5G	6G	7G	8G	9G	10G	11G
$k_{eksp,klods}$ [kg/m$^2 \cdot \sqrt{s}$]	0,0015	0,0016	0,0027	0,0015	-	-	-	0,0023	-	0,0010
$k_{eksp,tragt}$ [kg/m$^2 \cdot \sqrt{s}$]	0,0014	0,0007	-	-	-	-	0,0014	0,0032	-	-

Det fremgår tydeligt, at kapillaritetstallene for de gamle prøveemner er lavere end for de nye som følge af strukturudviklingen.

For at vurdere de forskellige behandlinger og tilsætningers indflydelse på kapillaritetstallet er afvigelserne i forhold til referencen bestemt, jf. tabel 4.7 og tabel 4.8.

Tabel 4.7: *Afvigelser på kapillaritetstal i forhold til reference på nye prøveemner.*

	2N	3N	4N	5N	6N	7N	8N	9N	10N	11N
Klodsforsøg [%]	-	16	3	22	-	-	-	9	-	38
Tragtforsøg [%]	-	19	34	42	56	-	-	97	22	93

Tabel 4.8: *Afvigelser på kapillaritetstal i forhold til reference på gamle prøveemner.*

	2G	3G	4G	5G	6G	7G	8G	9G	10G	11G
Klodsforsøg [%]	-	7	80	0	-	-	-	53	-	33
Tragtforsøg [%]	-	50	-	-	-	-	0	29	-	-

På baggrund af tabel 4.7 og tabel 4.8 kan der ikke drages en konklusion om, hvilken behandling eller tilsætning, der har betydning for kapillaritetstallet. Årsagen hertil er de meget store forskelle i resultaterne mellem metoderne, men også mellem nye og gamle prøvelegemer analyseret efter samme metode.

4.6 Fejlkilder og usikkerheder

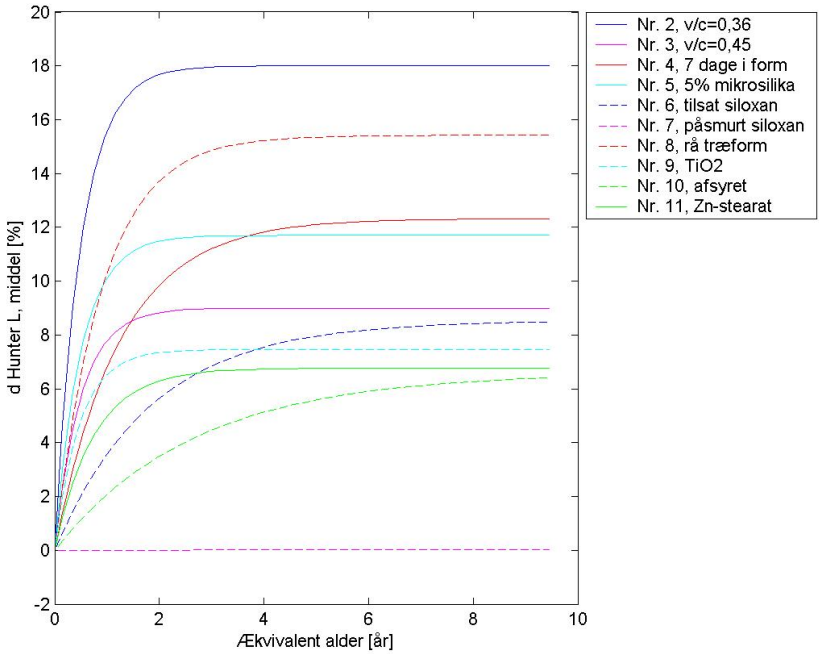
Ideelt ville opfugtningsforløbet resultere i en kurve startende med et retlinet stykke, som efterhånden flader ud. Kapillaritetstallet bestemmes som hældningen på det første rette stykke, hvorfor opfugtningsforløbet i starten er meget væsentligt, da det her sker hurtigst. Ved begge metoder er første registrering af opfugtning sket efter ca. to timer, hvilket er sent. Det havde været mere hensigtsmæssigt, hvis registreringerne i starten af forsøget havde været hyppigere. Da der således er usikkerhed omkring fastlæggelsen af det rette stykke, er kapillaritetstallet bestemt som hældningen på linien indlagt mellem origo og første målepunkt. Havde der været flere registreringer i starten af forløbet, ville kapillaritetstallet have været højere som følge af en stejlere kurve.

Fejlkilder og usikkerheder vedrørende prøvelegemer til klodsforsøget fremgår af kapitel 3, da de samme prøvelegemer er anvendt.

Tragtene til tragtforsøget er monteret på prøveemner ved hjælp af epoxy. Opsugningsfladen er regnet som arealet af denne tragt, men epoxyen har reelt gjort arealet lidt mindre, da den har siddet på et stykke af tragtens inderside også. Selve aflæsningen af pipetterørene sker med en nøjagtighed på 0,1 ml; pipetterørene er ikke beskyttet mod fordampning.

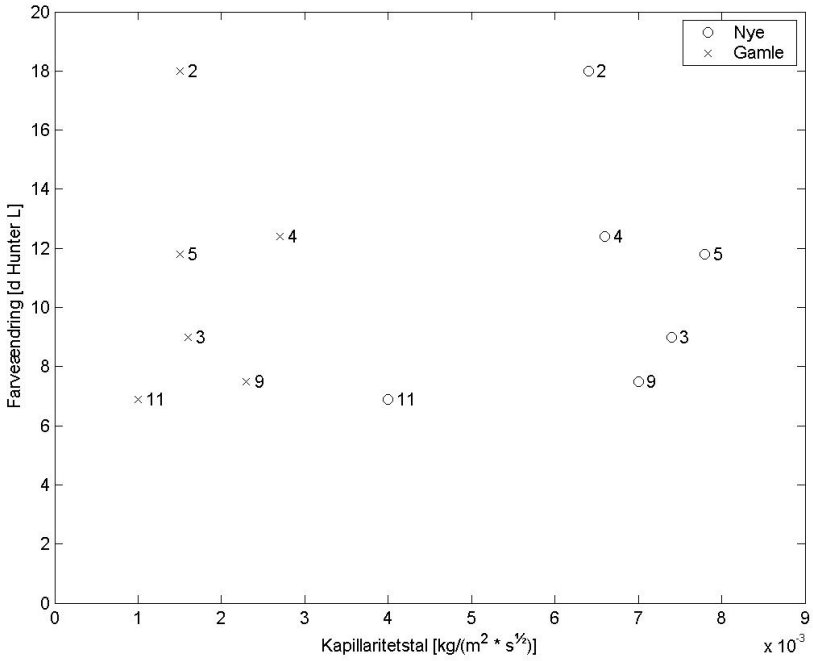
4.7 Sammenligning med farvemålinger

Resultaterne af bestemmelsen af kapillaritetstal skal sammenholdes med farvemålinger, der for de benyttede prøveemner fremgår af figur 4.8.



Figur 4.8: *Farveændringsmålinger for prøveemner anvendt til kapillaritetsforsøg.*

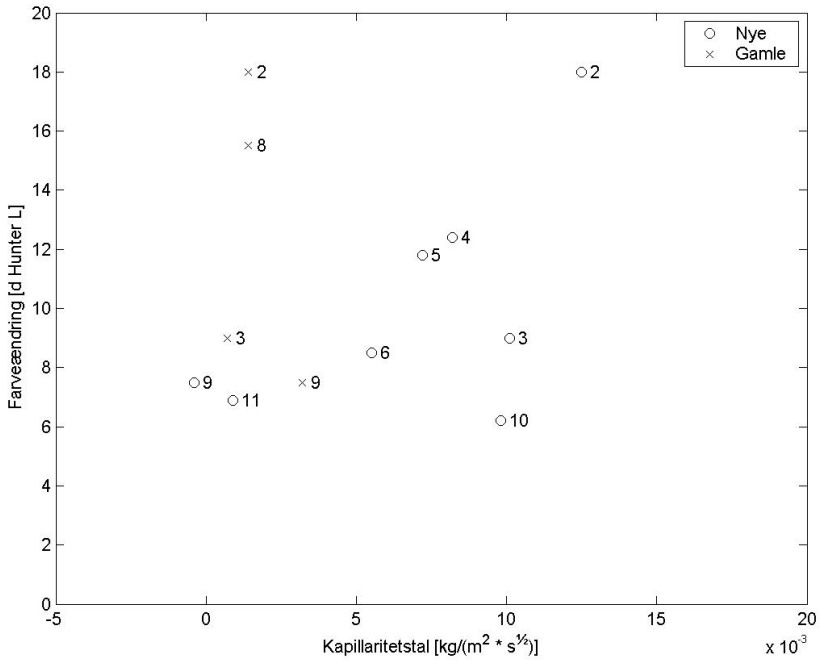
I figur 4.9 er farveændringerne som funktion af kapillaritetstallene bestemt ved klodsforsøget afbildet.



Figur 4.9: *Sammenhæng mellem kapillaritetstal og farvemålinger for klodsforsøget.*

Det fremgår tydeligt af figur 4.9, at kapillaritetstallet for de nye prøveemner er større end for de gamle, hvilket stemmer overens med den løbende strukturudvikling. Mellem kapillaritetstal og farveændring ses ingen tydelig sammenhæng.

I figur 4.10 er farveændringerne som funktion af kapillaritetstallene bestemt ved tragtforsøget afbildet.



Figur 4.10: *Sammenhæng mellem kapillartitetstal og farvemålinger for tragtforsøget.*

Det fremgår tydeligt af figur 4.10, at kapillaritetstallet for de nye prøveemner er større end for de gamle, hvilket stemmer overens med den løbende strukturudvikling. Mellem kapillaritetstal og farveændring ses en vis sammenhæng. Tilsyneladende medfører et øget kapillaritetstal en øget farveændring.

4.8 Sammenfatning

Kapillaritetstallet blev bestemt ved hjælp af to forskellige metoder. Det har ikke været muligt at opnå ens resultater for de to metoder, og det bør bemærkes, at der har været store usikkerheder forbundet med bestemmelsen på grund af manglende observationer fra forsøgets første timer.

Ved klodsforsøget fandtes ingen sammenhæng mellem kapillaritetstal og farveændring, men ved tragtforsøget var en vis sammenhæng, der viste, at et øget kapillaritetstal medførte en øget farveændring.

Afvigelserne i forhold til referencen var store, og det var ikke muligt at konkludere, om en bestemt tilsætning eller behandling havde indflydelse på farveændringen, da de to metoder gav modstridende resultater.

Kapitel 5

Mikroskopi på planslib

En måde at analysere mikrostrukturen i beton er at benytte mikroskopi på planslib. Planslibet er relativt enkelt at fremstille, og anvendes fortrinsvis til at studere tilslagsmængde og -art samt til at kortlægge revner og huller.

I dette projekt benyttes planslib til at vurdere betonoverfladens beskaffenhed og betonens struktur, hvilket sammenholdes med farvemålinger.

5.1 Teori og forudsætninger

Formålet med at lave mikroskopi på planslib er at fastlægge, hvor ru betonens overflade er. Der eksisterer på nuværende tidspunkt ingen metode til at fastlægge ruheden af en betonoverflade, så i dette projekt er det valgt at fastlægge overfladeruheden på baggrund af forholdet mellem længden af overfladekonturen og afstanden mellem endepunkterne af den betragtede overfladestrækning.

Den indre stabilitet af beton, der indbefatter pastarevner, porøse zoner omkring tilslag, poreagglomerater og andre revner, fastlægges på baggrund af mikroskopi på planslib og analyse i henhold til DS 423.41: Betonprøvning - Hærdnet beton - indre stabilitet. Standarden er dog henvendt til planslib af prøvelegemer på 100×200 mm. Med inspiration fra DS 423.41:2002 vurderes strukturen i prøvelegemerne visuelt, idet der lægges særlig vægt på fordeling af luftporer og antallet af revner.

5.2 Tildannelse af prøvelegemer

Prøvelegemerne fremstilles i henhold til DS 423.39:2002, idet der dog tages hensyn til de mindre dimensioner.

Af prøveemnerne udsaves, med en vandafkølet sav med diamantklinge, prøvelegemer på 10×35 mm og en tykkelse på 10 mm. Efter udsavning tørres prøvelegemerne i ventileret ovn ved 50°C, hvorefter de indstøbes i fluorescerende epoxy under vacuum, jf. figur 5.1.

(a) *Prøvelegemer under epoxystøbning.* (b) *Prøvelegemer efter epoxystøbning.*

Figur 5.1: *Fremstilling af planslib.*

Efter indstøbningen i fluorescerende epoxy hærder prøvelegemerne i 24 timer inden de afformes og slibes til en planhed på 3 μm. Til dette benyttes en STRUERS Abramin slibe- og poleringsmaskine, jf. figur 5.2.

Figur 5.2: *STRUERS Abramin slibe- og poleringsmaskine.*

Slibningen sker i følgende overordnede trin:

1. Plan tilslibning (PG): Undersiden og dernæst overfladen af prøven slibes plan, uanset tidligere udseende og behandling.
2. Fin tilslibning (FG): Overfladen slibes, så små deformationer kan fjernes ved polering.
3. Diamantpolering (DP): Hurtig materialefjernelse og størst planhed opnås med diamant som slibemiddel.

En oversigt over selve slibeproceduren fremgår af tabel 5.1.

Tabel 5.1: *Slibeprocedure.*

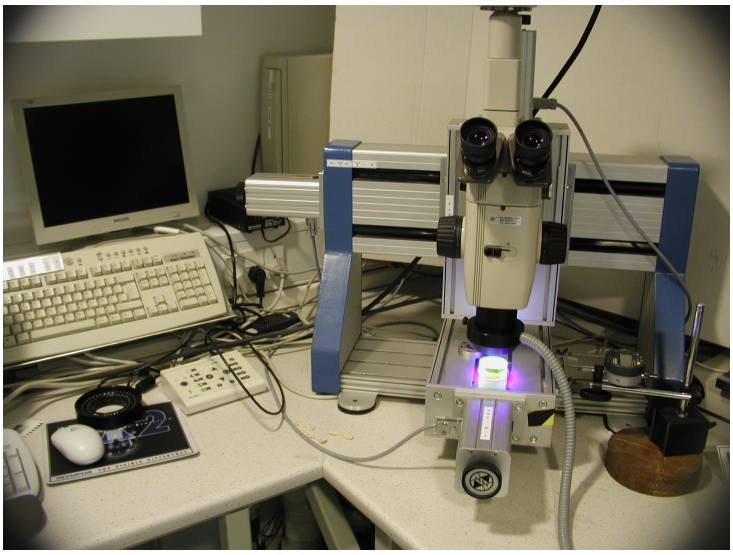
Trin	PG	PG	FG	DP1	DP2	DP3
Overfladeplanhed	80 μm	120 μm	220 μm	9 μm	6 μm	3 μm
Lubrikant	vand	vand	vand	sprit	sprit	sprit
Omdrejninger [rpm]	300	300	300	300	300	300
Kraft [N]	150	150	150	150	150	150

For at vurdere om en given planhed er opnået, undersøges prøvelegemerne med en kraftig lup. For at planheden er tilfredsstillende opnået, må der ikke være slibespor og overfladen skal synes "tåget". Når den pågældende overfladeplanhed er opnået, rengøres prøvelegemerne og slibningen gentages med den følgende planhed. Typisk slibes et til to minutter i hvert step.

Efter slibningen rengøres prøvelegemerne i sæbevand og lægges i vandbad med ultralyd for at fjerne de sidste rester af slibestøv. Herefter tørres de og er klar til brug.

5.3 Forsøgsbeskrivelse

Prøvelegemerne undersøges ved hjælp af et stereomikroskop af typen Nikon SMZ-U, zoom 1:10 med digitalkamera Olympus DP70, der er tilsluttet pc med programmet *analySIS*. Opstillingen ses på figur 5.3.



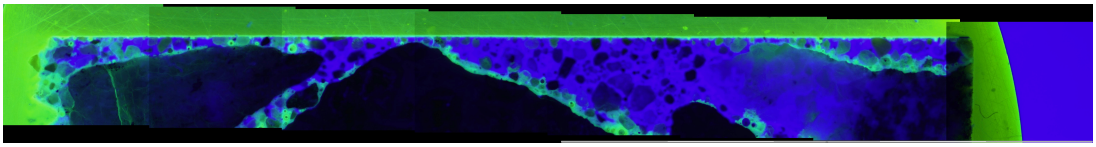
Figur 5.3: *Stereomikroskop med digitalkamera tilsluttet pc.*

Mikroskopet indstilles til forstørrelse 1,5× og UV-belysning tilsluttes. UV-belysningen exciterer de fluorescerende planslib, hvorved luftporer og revner fremtræder tydeligt som lyse på mørk baggrund. UV-belysningen sker ringformet, hvorved ensartet eksponering opnås. Prøven placeres og fotografering starter fra øverste venstre hjørne og mod højre. Efter hvert foto flyttes prøven 5 mm ved hjælp af et computerstyret krydsbord. Når hele overfladen er affotograferet, sammensættes billederne til ét med det installerede billedbehandlingsprogram.

Billedbehandling sker i programmet *analySIS*, og resultaterne fremgår af næste afsnit.

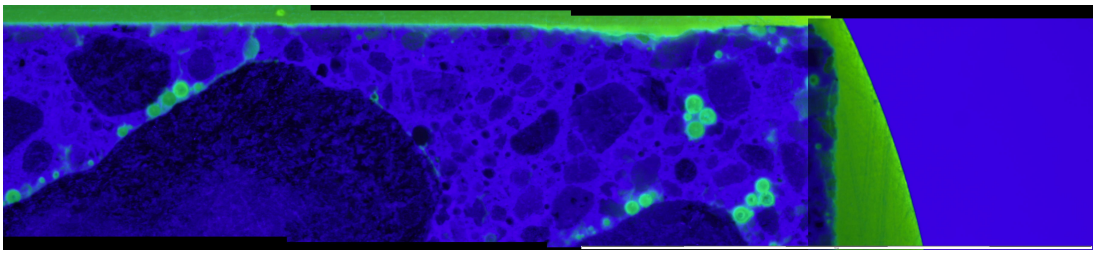
5.4 Resultater og analyse af disse

Billederne af de fluorescensimprægnerede planslib er illustreret i figur 5.4 til figur 5.13. Billederne viser udsnit af de yderste 10 mm af prøveemnerne, og er derfor ikke et repræsentativt udsnit af hele prøveemnet. Dette er ikke vurderet som en problem, da det er overfladekonturen, der er belyst.



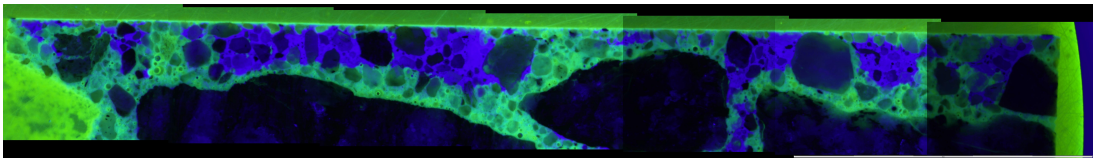
Figur 5.4: *Fluorescensimprægneret planslib af prøvelegeme 2N (reference). Længde af prøvelegemet er 35 mm.*

På figur 5.4 ses det, at der omkring tilslaget er store porøse zoner. Porøsiteten er placeret umiddelbart i kontaktfladen mellem det største af tilslaget og cementpastaen.



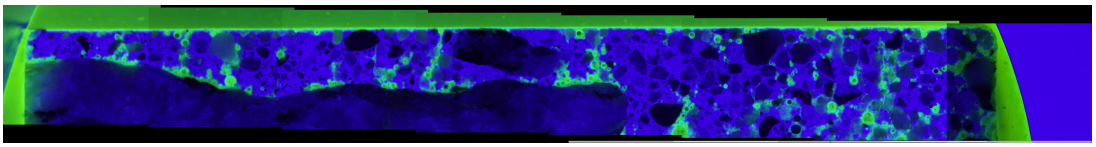
Figur 5.5: *Fluorescensimprægneret planslib af prøvelegeme 2G (reference). Længde af prøvelegemet er 16 mm.*

På figur 5.5 er kun få luftporer i betonen. Disse er, pånær ganske få, ligeledes placeret omkring tilslaget.



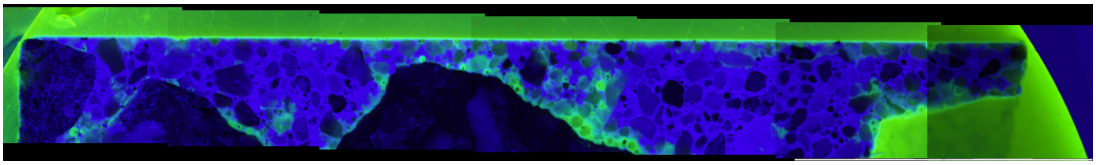
Figur 5.6: *Fluorescensimprægneret planslib af prøvelegeme 3N (v/c=0,45). Længde af prøvelegemet er 35 mm.*

På figur 5.6 ses i højere grad end i figur 5.4 meget store porøse zoner omkring tilslaget.



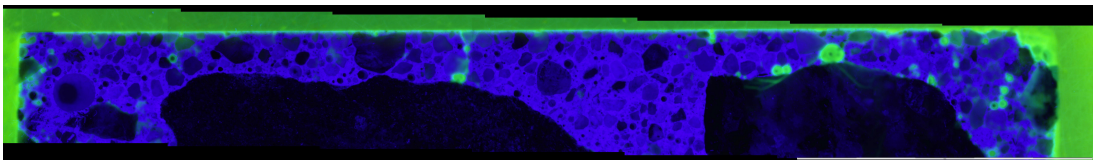
Figur 5.7: *Fluorescensimprægneret planslib af prøvelegeme 3G (v/c=0,45). Længde af prøvelegemet er 37 mm.*

På figur 5.7 er der som i figur 5.6 mange luftporer, men de er her mere jævnt fordelt i betonen. Der ses endvidere revner i betonen.



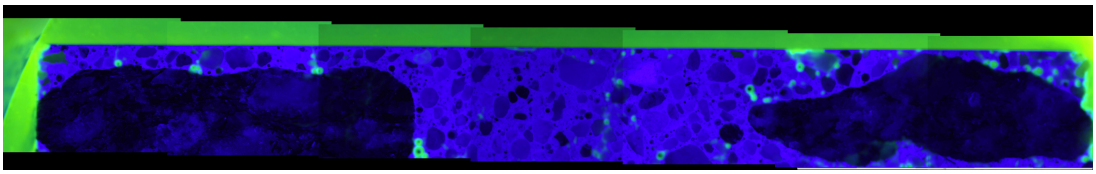
Figur 5.8: *Fluorescensimprægneret planslib af prøvelegeme 4N (lagret syv dage i form). Længde af prøvelegemet er 34 mm.*

På figur 5.8 er der kun ved stenen i midten en plamage af luftporer.



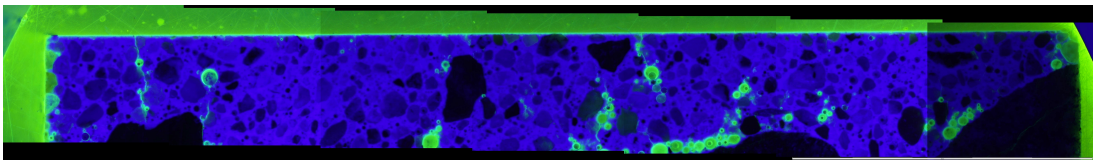
Figur 5.9: *Fluorescensimprægneret planslib af prøvelegeme 4G (lagret syv dage i form). Længde af prøvelegemet er 34 mm.*

På figur 5.9 ses ingen nævneværdige områder med luftporer, men det bemærkes, at der er en revne i betonen.



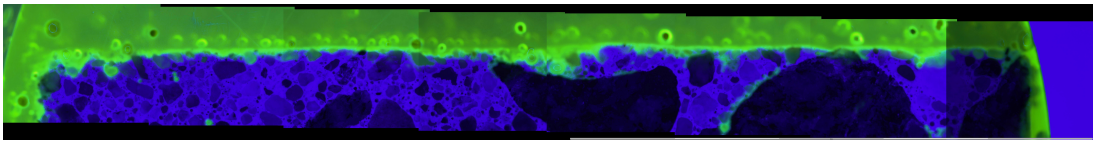
Figur 5.10: *Fluorescensimprægneret planslib af prøvelegeme 5N (tilsat 5% mikrosilika). Længde af prøvelegemet er 35 mm.*

På figur 5.10 er der kun nogle få luftporer.



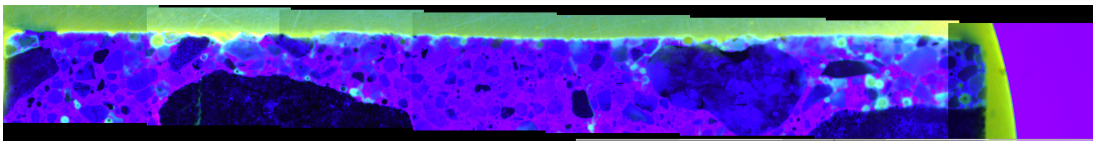
Figur 5.11: *Fluorescensimprægneret planslib af prøvelegeme 5G (tilsat 5% mikrosilika). Længde af prøvelegemet er 34 mm.*

Placeringen af luftporerne er til højre i figur 5.11, mens der til venstre og midt i figuren ses enkelte revner, der både har udspring i overfladen, men også en enkelt internt i prøvelegemet.



Figur 5.12: *Fluorescensimprægneret planslib af prøvelegeme 8N (rå træform). Længde af prøvelegemet er 33 mm.*

Årsagen til, at der er mange bobler i epoxyen omkring oversiden af prøvelegemet i figur 5.12 er, at epoxyen ikke nåede at koge ordentlig af inden hærdning. Det ses tydeligt, at overfladen er mere ujævn end de øvrige, hvilket begrundes med, at prøveemnet er lagret i rå træform.



Figur 5.13: *Fluorescensimprægneret planslib af prøvelegeme 8G (rå træform). Længde af prøvelegemet er 37 mm.*

Som i figur 5.12 ses det også i figur 5.13, at overfladekonturen er meget ujævn. I figur 5.13 er der flere luftporer og revner i betonen end i figur 5.12.

For at bestemme betonoverfladernes beskaffenhed er ruheden bestemt. Dette er gjort ved at måle længden af overfladekonturen og sætte den i forhold til afstanden mellem endepunkterne af den betragtede strækning. For lettere at kunne skelne mellem beton og epoxy er betragtet et billede i gråskala. Fremgangsmåden lyder:

- Billede loades i *analySIS*.
- Ens skygge på hele billedet ved hjælp af funktionen "Define shading correction".
- Billedet ændres til gråskala ved hjælp af funktionen "Separate colors".
- Måling af overfladekonturen ved opmålingsfunktionen i *analySIS*.

Idet L angiver afstanden mellem prøvelegemets endepunkter og L_1 angiver længden af overfladekonturen angives ruheden ved, hvor meget L_1 er større end L. Tallene fremgår af tabel 5.2 og tabel 5.3.

Tabel 5.2: *Overfladelængde på nye prøvelegemer.*

Prøve nr.	2N	3N	4N	5N	8N
L [μm]	34591	34846	33916	34636	33114
L_1 [μm]	38801	36133	36371	35034	40082
Øgning	12%	4%	7%	1%	21%

Tabel 5.3: *Overfladelængde på gamle prøvelegemer.*

Prøve nr.	2G	3G	4G	5G	8G
L [μm]	16323	36877	33623	34088	37046
L_1 [μm]	19099	41294	35922	35223	42416
Øgning	17%	12%	7%	3%	15%

Ved de nye prøveemner ses det tydeligt, at referencen (nr. 2) og nr. 8 (lagret i rå træform) skiller sig væsentligt ud. Som det fremgik af figur 5.12 var epoxyen ikke kogt ordentligt af, hvorfor der er store samlinger af luftbobler på prøvelegemets overside. Det forventes ikke, at øgningen ved nr. 8 vil være mindre end referencen, men blot ikke så meget større. Tilsyneladende giver både øgning af v/c-forhold, øget lagringstid og tilsætning af mikrosilika en mindre ru overflade.

Hos de gamle prøveemner ses samme tendens, men ikke så signifikant som ved de nye prøveemner. Tilsyneladende gælder det for de gamle prøveemner, at lagring i rå træform også giver mindre ru overflade.

5.5 Fejlkilder og usikkerheder

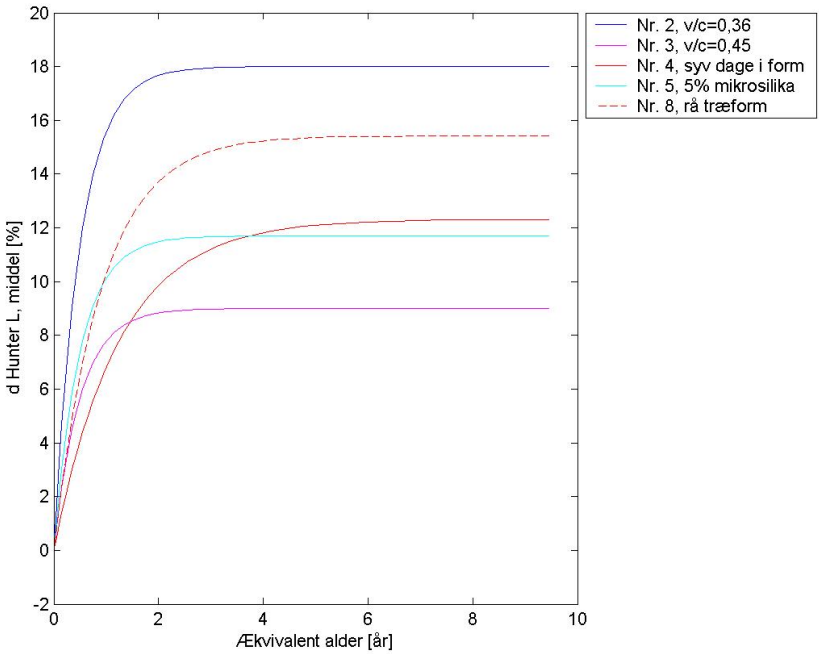
Den indre stabilitet fastlægges på baggrund af lysintensiteten fra de fluorescensimprægnerede planslib. Ved fremstillingen af prøvelegemerne er koncentrationen af det fluorescerende farvestof derfor af stor vigtighed, da det influerer på den reflekterede lysmængde. Farvestoffet tilsættes manuelt til epoxyen, og der er ved fremstillingen lavet flere portioner fluorescerende epoxy. Der er støbt fire planslib ad gangen, og derfor er denne usikkerhed vurderet negligeabel.

Selve støbningen af planslibene sker under vacuum, og her er det vigtigt, at epoxyen får lov at koge af inden vacuumet frakobles, da der ellers opstår uhensigtsmæssige luftbobler i epoxyen - som det ses på figur 5.12. Overfladekonturen er derfor vanskelig at bestemme på dette planslib, da overgangen mellem epoxy og beton er svær at vurdere.

Overfladens ruhed er vurderet på baggrund af forholdet mellem afstanden mellem prøvelegemets endepunkter og overfladelængden. Er forholdet højt er det således tegn på, at overfladen er meget ujævn. Umiddelbart er det dog ikke muligt at afgøre om årsagen hertil er mange små fordybninger eller få store. Dette kunne eksempelvis forsøges tilnærmet ved hjælp af en harmonisk svingning, hvor amplituden og perioden så kunne afgøre noget om ruheden. En klar definition af ruhed er her nødvendig for at kunne give et entydigt svar.

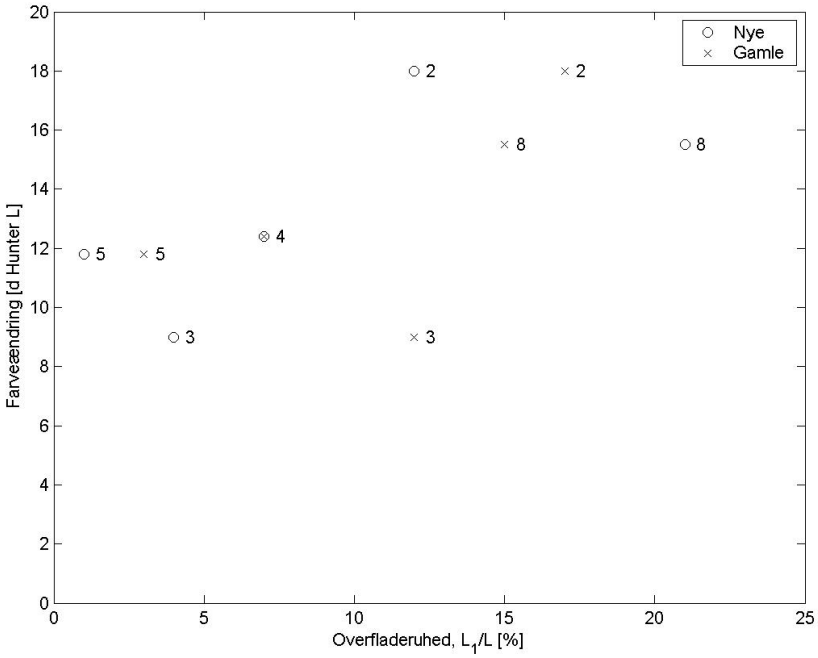
5.6 Sammenligning med farvemålinger

Resultaterne af mikroskopien på planslibene skal sammenholdes med farvemålingerne, der for de benyttede prøveemner fremgår af figur 5.14.



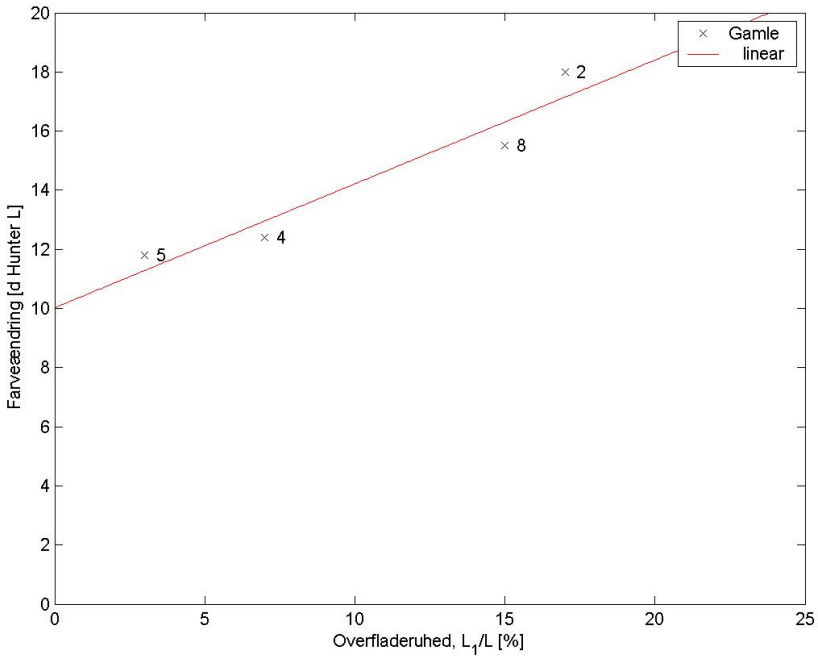
Figur 5.14: *Farveændringsmålinger på prøveemner benyttet til planslib.*

I figur 5.15 ses farvemålingerne som funktion af overfladeruheden.



Figur 5.15: *Sammenhæng mellem overfladeruhed og farvemålinger.*

Ved de nye prøveemner ses der ingen tydelig sammenhæng, men for de gamle er der tilsyneladende en sammenhæng, hvis der ses bort fra nr. 3, der har et andet v/c-forhold end de øvrige. Den bedste rette linie er indlagt mellem de øvrige punkter, jf. figur 5.16.



Figur 5.16: *Bedste lineære sammenhæng mellem farveændring og overfladeruhed.*

Forskriften for den indlagte rette linie lyder:

$$d\ Hunter\ L = 0,42 \cdot \frac{L_1}{L} + 10 \tag{5.1}$$

Her er

$d\ Hunter\ L$	Farveændring [d Hunter L]
$\frac{L_1}{L}$	Overfladeruhed [%]

r^2 for den lineære sammenhæng er 0,92.

5.7 Sammenfatning

Overfladenkonturen er vurderet, da den formodes at have indflydelse på farveændringen. En ru overflade vil være lettere modtagelig over for snavs, og samtidig vil der være en forskel i lysrefleksionen fra overfladen.

For at vurdere overfladekonturen blev fremstillet fluorescensimprægnerede planslib, der blev analyseret i mikroskop. Måden at fastlægge ruheden er selvvalgt, da der i dag ikke eksisterer en metode til bestemmelse af dette.

Ved at sammenligne overfladeruheden og farvemålingerne blev ingen tydelig sammenhæng fundet ved de nye prøveemner, men en lille sammenhæng ved de gamle prøveemner, hvis v/c-forholdet holdes konstant.

Kapitel 6

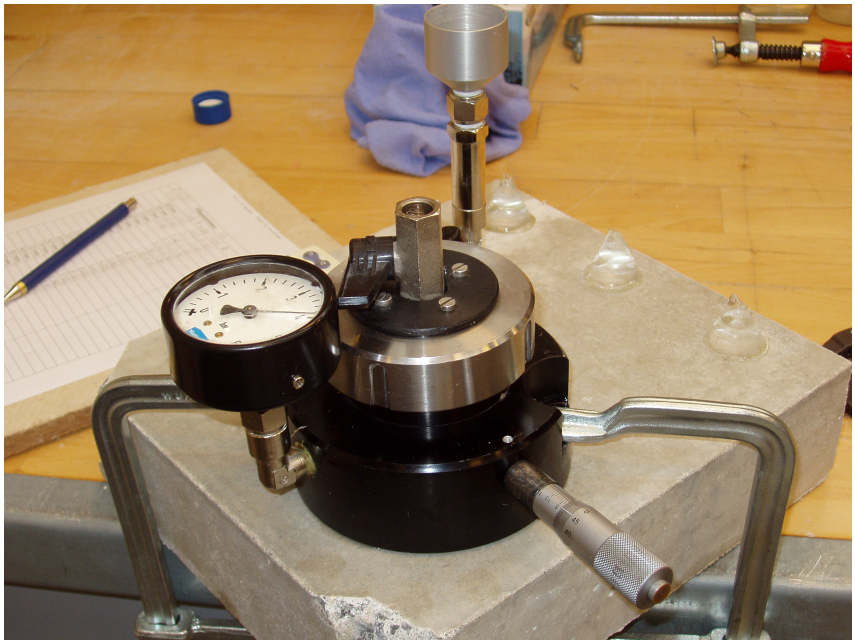
Vandpermeabilitetstest

Når vand strømmer gennem beton kan permeabilitetskoefficienten for gennemstrømningen bestemmes. Permeabilitetskoefficienten er et udtryk for, hvor meget vand, der ved et givet tryk kan presses gennem betonen over tid.

Vandpermeabilitetstest er på den måde endnu en metode, jf. kapitel 4, til at fastlægge betonens evne til at transportere fugt. Af denne årsag er det således muligt at sammenligne resultaterne indbyrdes mellem de forskellige forsøg.

6.1 Forsøgsbeskrivelse

Forsøget udføres ved hjælp af en Water Permeability tester fra Germann Instruments, jf. figur 6.1.



Figur 6.1: *Water Permeability tester fra Germann Instruments.*

Apparatet fastgøres på prøveemnerne med to skruetvinger, hvorefter kammeret fyldes med kogt, afkølet vand (for at undgå luft i vandet). Mikrometerskruen nulstilles, og der sættes tryk på vandet ved at skrue øverst på apparatet. Forsøget udføres ved et tryk på 0-6 bar. Trykket i kammeret opretholdes ved at skrue på mikrometerskruen og samhørende værdier af tid og vandvolumen registreres.

6.2 Teori og forudsætninger

Apparatet til bestemmelse af vandpermeabiliteten (Germann Water Permeability test), jf. figur 6.1 er vedlagt en beskrivelse af, hvorledes permeabilitetskoefficienten bestemmes:

Vandtrykket påvirker et areal af prøvelegemet på 3018 mm^2, hvilket svarer til en diameter på apparatet på 62 mm. Stemplet, der drives af mikrometerskruen, har et areal på 78,6 mm^2, hvilket svarer til, at det vandvolumen, der presses ind i betonen ved en drejning på mikrometerskruen svarende til 1 mm er 78,6 mm^3.

Heraf kan volumenstrømmen (fluxen) af vandet bestemmes efter (6.1):

$$q = \frac{B \cdot (q_1 - q_2) \cdot \rho_w}{A \cdot t} \tag{6.1}$$

Her er

q	flux [$^{kg}/_{sek \cdot m^2}$]
ρ_w	vands densitet [1000 $^{kg}/_{m^3}$]
A	påvirket areal [$3,018 \cdot 10^{-3}$ m^2]
B	areal af stempel [$7,86 \cdot 10^{-3}$ m^2]
q_1 og q_2	aflæsninger på mikrometerskrue før og efter [m]
t	tiden mellem q_1 og q_2 [sek]

Permeabilitetskoefficient kan herefter bestemmes på baggrund af *d'Arcys lov* (6.2):

$$q = b \cdot C_{cp} \cdot \frac{\triangle P}{L} \tag{6.2}$$

Her er

q	flux [$^{kg}/_{sek \cdot m^2}$]
b	cementpastaens volumenandel [-]
C_{cp}	betonens permeabilitetskoefficient [$^{kg}/_{Pa \cdot m \cdot sek}$]
$\triangle P$	trykforskel svarende til det valgte tryk (1 bar=100000 Pa) [Pa]
L	fluxens længde [m]

I (6.2) er det implicit forudsat, at cementpastaen er helt vandmættet, da *d'Arcys lov* ellers ikke gælder. Endvidere er forudsætningen for udtrykkene en én-dimensional strømning, hvor det i virkeligheden er en to-dimensional strømning, hvilket er en væsentlig fejlkilde.

Permeabiliteten vokser markant med v/c-forhold, hvilket hænger sammen med, at de gennemgående kapillarporers mængde og størrelse forøges ved voksende v/c-forhold. Endvidere vides også fra forsøg, at permeabiliteten vokser med voksende stenstørrelse, hvilket skyldes, at vandet primært trænger frem langs kontaktfladen mellem sten og cementpasta, og mængden af sammenhængende kontaktfladeareal vokser med stenstørrelsen [Herholdt et al, 1985, s. 185].

6.3 Resultater og vurdering af disse

Resultaterne er vedlagt på CD-rom.

Umiddelbart er det iøjnefaldende, at forsøgene ikke er gennemført ved identisk tryk på de enkelte prøveemner. Det er endog sket, at forsøget er udført ved tre forskellige tryk på det samme prøveemne. Årsagen til, at forsøgene ikke er udført ved identiske tryk er, at valget af tryk gøres på den baggrund, at det skal være muligt at nå at presse vand gennem prøvelegemet og samtidig nå at aflæse vandmængden. Hvis trykket således er meget højt, vil dette gå så stærkt, at det ikke er muligt at nå at aflæse de tilsvarende tal. Hvis trykket vælges for lavt vil forsøget så gå meget langsomt. Dette rejste en mistanke om, at forsøgene ikke var reproducerbare, hvorfor det blev forsøgt at teste samme sted flere gange. Det blev fundet, at dels var fluxen forskellig, men det tryk, hvor forsøget lod sig udføre kunne heller ikke holdes fast. På denne baggrund blev forsøgene stoppet inden alle prøveemnerne var testet.

6.4 Sammenfatning

Resultaterne fra disse forsøg er ikke anvendt i projektet, da det blev fundet, at forsøgsresultaterne ikke var mulige at reproducere, og det vil sige gav ikke-identiske resultater ved to umiddelbart på hinanden følgende forsøg. For at sammenligne resultaterne fra forsøgene ville det være hensigtsmæssigt, at alle forsøgene var gennemført ved det samme tryk, hvilket viste sig ikke at være muligt. I stedet ville det så være at foretrække, at forsøg udført på samme prøveemne blev udført ved identisk tryk, hvilket heller ikke viste sig muligt. På denne baggrund blev det konkluderet, at forsøgene ikke var reproducerbare.

Den væsentligste fejl ved forsøgets udførelse var, at prøveemnerne ikke på forhånd var blevet fuldstændigt vandmættede, hvilket er en forudsætning for at anvende *d'Arcys lov*. Forinden havde de været benyttet til kapillarsugningsforsøg, jf. kapitel 4, hvor de skulle være tørre; og efter disse forsøg blev de anbragt i vandbad omkring 48 timer forud for vandpermeabilitetsforsøgene. Dette er ikke tilstrækkeligt til fuldstændig vandmætning, hvilket er den primære årsag til den store variation i forsøgsresultaterne.

Da en bestemmelse af permeabilitetskoefficienten er meget relevant anbefales det at gentage forsøget med vandmættede prøveemner.

Kapitel 7

Konklusion

Målet med dette projekt var at vurdere betonoverfladens mikrostruktur og tætheds betydning for den æstetiske holdbarhed. Dette er gjort på baggrund af farvemålinger og resultater fra forskellige eksperimentelle metoder foretaget på ikke-eksponerede prøveemner og på prøveemner, der er eksponeret i et kunstigt klima svarende til 9,2 år udendørs i typisk dansk klima.

De benyttede betonprøveemner var sammensat af identiske delmaterialer og typisk med et v/c-forhold på 0,36. Forskelle i mikrostruktur og tæthed er opnået ved tilsætning af forskellige stoffer, overfladebehandling eller forskelle i lagringsforhold.

Der blev udvalgt fire metoder til analyse af betonoverfladens mikrostruktur og tæthed:

- Porøsitetsbestemmelse
- Kapillaritetsbestemmelse (to metoder)
- Mikroskopi på planslib
- Bestemmelse af vandpermeabilitet

7.1 Porøsitet

Prøveemnernes porøsitet blev bestemt ved at trykvandmætte de udtørrede prøveemner. Den eksperimentelt bestemte porøsitet blev herefter sammenlignet med en teoretisk bestemt på baggrund af *Powers'* fasemodel. Afvigelserne mellem de eksperimentelt bestemte og teoretisk bestemte værdier var i nogle tilfælde relativt store.

Som ventet havde de gamle prøveemner en lavere eller identisk porøsitet end de nye, men ved sammenligning med farvemålingerne var det ikke muligt at finde en sammenhæng.

7.2 Kapillaritet

Kapillaritetstallet blev bestemt ved to forskellige metoder. Ved den første metode blev fuldstændigt udtørrede prøvelegemer opfugtet, og en opfugtningskurve blev optegnet. Kapillaritetstallet blev herefter bestemt på baggrund af denne kurve. Ved den anden metode blev glastragte monteret på overfladen af prøveemnerne. Disse blev fyldt med vand, og opsugningen begyndte.

Resultaterne fra de to metoder er blevet sammenlignet, og det blev fundet, at der var store forskelle mellem de to metoder. En vigtig årsag til de store forskelle er, at der for forsøgenes første timer manglede observationer.

Forsøget med opfugtning af prøvelegemer viste ingen sammenhæng mellem kapillaritetstal og farvemålinger. Ved forsøget med tragte blev en vis sammenhæng observeret. Denne viste, at et øget kapillaritetstal medførte en øget farveændring.

7.3 Mikroskopi på planslib

Ved hjælp af mikroskopi på planslib og en selvvalgt metode, hvor overfladeruheden blev bestemt som forholdet mellem længden af overfladekonturen og afstanden mellem endefladerne, blev overfladeruheen bestemt.

Der var nogen sammenhæng mellem overfladeruheden på de nye prøveemner og farveændringerne, men hos de gamle prøveemner var der tilsyneladende kun en sammenhæng, hvis v/c-forholdet blev holdt konstant.

7.4 Vandpermeabilitet

Formålet med bestemmelse af vandpermeabiliteten var at bestemme permeabilitetskoefficienten for betonen. Permeabilitetskoefficienten er, som kapillaritetstallet, en måde at belyse betonens evne til at transportere fugt. Desværre viste det sig, at disse forsøg ikke var reproducerbare, hvorfor de er udeladt af videre analyse. Årsagen hertil var, at for at opnå korrekte resultater ved metoden, skulle prøveemnerne være fuldstændigt vandmættede, men da de samme prøveemner forinden var anvendt til bestemmelse af kapillaritetstal, hvor fuldstændig udtørring var påkrævet, var de ikke tilstrækkeligt vandmættede.

7.5 Sammenfatning

Formålet med dette projekt var at analysere, hvilken betydning betonoverfladens mikrostruktur og tæthed har på den æstetiske holdbarhed.

Ved de eksperimentelle metoder var vægten lagt på, at resultaterne skulle give information om betonens mikrostruktur og tæthed - med særlig fokus på modstandsdygtigheden over for vandtransport.

Analyse af forsøgsresultaterne gav ingen klar og entydig sammenhæng mellem farveændringerne og de belyste materialeparametre. Der var dog et enkelt tilfælde, hvor der kan siges at være en tilnærmelsesvis lineær sammenhæng - ved overfladeruhed bestemt på planslib (gamle prøveemner).

7.6 Fejlkilder og usikkerheder

- Overfladeteksturen udvikles i løbet af 28 døgn, hvor der løbende måles farve. Initialfarven er således farven efter 28 døgn. De nye prøveemner er hele tiden opbevaret i laboratorieklima med en temperatur på 20±1°C og 55±5% RF. Normalt konditioneres de ældede prøveemner en uge i laboratoriet inden der farvemåles. Dette blev ikke nået i dette tilfælde, hvorfor farvemålingerne ved sidste måling kan være behæftet med en vis usikkerhed.
- Der er tale om to uafhængige sæt prøveemner. De er støbt efter samme recept og procedure for at gøre dem så ensartede som muligt, men der kan alligevel være forskelle.
- Alle prøvelegemer er udsavet af overfladen af prøveemnerne, og pastakoncentrationen i overfladen er typisk høj som følge af vægeffekten, og sandsynligvis også varierende over det valgte udsnit.

7.7 Videre undersøgelser

De eksperimentelle undersøgelser har lagt høj vægt på analyse af betonernes struktur. Det havde været en fordel, hvis strukturen havde været analyseret i mindre skala. Dette kunne eksempelvis have været

gjort ved hjælp af lavtemperaturmikrokalorimetri, der havde muliggjort bestemmelse af størrelsen såvel som mængden af porerne i betonen. Disse resultater ville kunne sammenlignes med resultaterne fra mikroskopien på planslib, men især resultaterne fra porøsitetsbestemmelsen. På denne baggrund ville det være muligt ikke alene at afgøre, om porøsiteten havde indflydelse på farveændringen, men også størrelsen og fordelingen af porernes betydning.

Litteraturliste

[Aalborg Portland] Hjemmeside
www.aalborg-portland.dk

[Aalborg White, 2004] Aalborg White
Aesthetic durability of white concrete structures
Aalborg Portland, 2004

[Den synlige betonoverflade] Hjemmeside
www.synligbeton.dk

[DS 423.39:2002] DS 423.39: Betonprøvning - Hærdnet beton - Fremstilling af fluorescensimprægnerede planslib
Dansk Standard, 2002

[DS 423.41:2002] DS 423.41: Betonprøvning - Hærdnet beton - Indre stabilitet
Dansk Standard, 2002

[Dansk Beton nr. 1, 2005] Dansk Beton
Medlemsblad Dansk Betonforening

[Freiesleben, 1978] P. Freiesleben-Hansen
Hærdeteknologi 1, Portlandcement
Aalborg Portland og BKF-centralen, 1978
ID-nr: X150012895

[Hansen, 1995] P. Freiesleben-Hansen
Materialefysik for bygningsingeniører - beregningsgrundlag
Statens Byggeforskningsinstitut, 1995
ISBN: 87-563-0864-7

[Hansen, 2004] Tommy Bæk Hansen
Colour measurement of white concrete
Aalborg White, 2004

[Herholdt et al, 1985] A. D. Herholdt, C. F. P. Justesen, P. Nepper-Christensen, A. Nielsen
Betonbogen
Aalborg Portland, CtO, 1985
ISBN: 87-980916-0-8

[Hjorth, 1982] Lars Hjorth
Beton Teknik: Mikrosilika og beton
CtO, 1982

[Nielsen et al, 1998] Martin Kirk Nielsen, Brian Dürr Pedersen og Jacob Thrysøe
Udtørringsforløb i hærdnende beton
10. semesters afgangsprojekt, 1998

[Sørensen, 1981] Eigil V. Sørensen
Beton Teknik: Betons hærdevarme
CtO, 1981

[Teknologisk, 1983] TI-B 25 (83), Prøvningsmetode, Bestemmelse af kapillær vandmætningsgrad
Teknologisk Institut, 1983

Appendix

Appendix A

Prøveemnernes sammensætning og fremstilling

A.1 Delmaterialer

Databladene for cement og tilsætningsstoffer er vedlagt i appendix C.

A.1.1 Cement

Ved fremstillingen af prøveemnerne er anvendt hvid portlandcement, hvis kemiske sammensætning fremgår af tabel A.1.

Tabel A.1: *Kemisk sammensætning af hvid portlandcement.*

Klinkermineral	Indhold
C_3S	64%
C_2S	23%
C_3A	4%
C_4AF	1%

Hvid cement har et lavt indhold af klinkermineralet C_4AF, der giver cements normale grå farve på grund af jernforbindelserne. Indholdet af de styrkegivende klinkermineraler C_3S og C_2S er højt, hvorved hvid cement typisk har højere slutstyrke sammenlignet med traditionel grå portlandcement. Endvidere er hvid cement sulfatbestandig og har et lavt alkaliindhold. [Herholdt et al, 1985, s. 285]

A.1.2 Mikrosilika

Mikrosilika er et biprodukt ved produktionen af siliciummetal og ferrosilicium i elektriske ovne. Den kemiske sammensætning af mikrosilika fremgår af tabel A.2.

Tabel A.2: *Kemisk sammensætning af mikrosilika.*

Bestanddel	Indhold
SiO_2	94-98%
Fe_2O_3	0-0,5%
CaO	0-0,3%
MgO	0-1%
SO_3	0-0,3%

I gennemsnit er mikrosilikapartikler omtrent 100 gange mindre end cementkorn, og består typisk af kuglerunde partikler overvejende af amorf kisel. Mikrosilika reagerer med $Ca(OH)_2$ og danner calciumsilikathydrater, og virker derfor tætnende på betonens struktur, hvorved permeabiliteten reduceres, porestrukturen gøres finere og slutstyrken øges. I sig selv har mikrosilika ikke bindemiddelegenskaber. [Herholdt et al, 1985, s. 296]

A.1.3 Plastificering og superplastificering

Betons styrke afhænger af v/c-forholdet, hvorfor det er af interesse af holde det lavt for at opnå en høj slutstyrke. Når vandindholdet sænkes, bliver bearbejdeligheden forringet, hvilket kan afhjælpes ved at tilsætte plastificering og/eller superplastificering. Anvendelse af plastificeringsmidler gør det muligt at sænke vandindholdet uden at forringe bearbejdeligheden, da disse virker dispergerende på finstofindholdet.

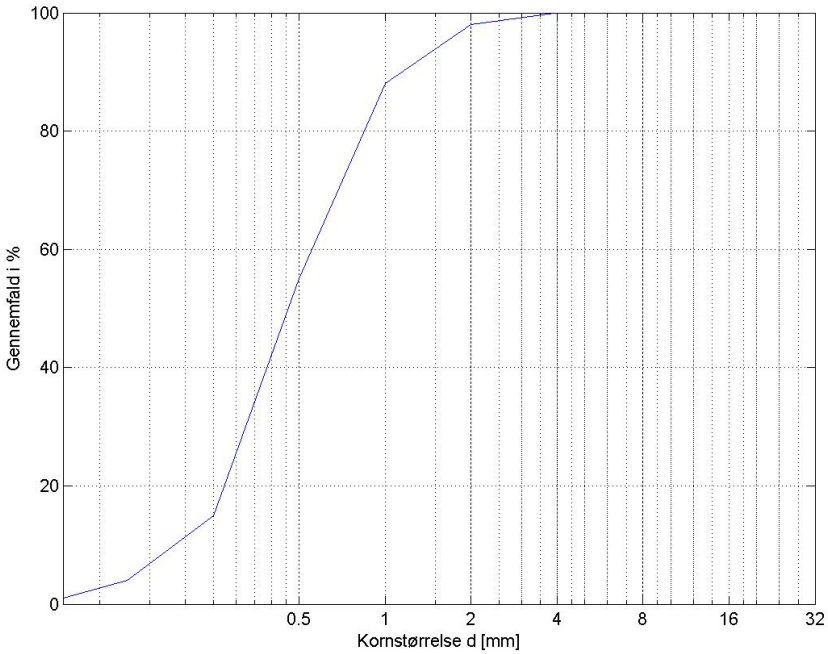
Ved tilsætning af plastificeringsmidler adsorberes disse på cementkornene, som bliver elektrisk ladede som følge af den elektrostatiske virkning. Den elektriske ladning bevirker, at cementkornene vil frastøde hinanden og derved opretholdes bearbejdeligheden. Superplastificering giver desuden sterisk effekt, der bidrager yderligere til forbedring af bearbejdeligheden.

A.1.4 Luftindblanding

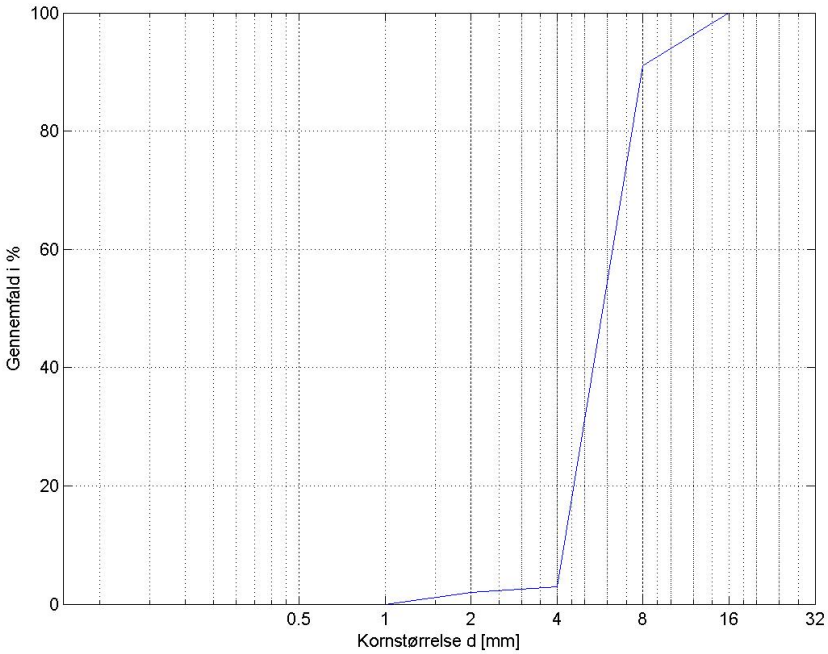
For at opnå et tilstrækkeligt luftindhold tilsættes luftindblandingsmiddel, der bibringer den hærdnende beton en mikroluftporestruktur. Luftindblandingsmidlet reagerer på grænsefladerne mellem cement, sand, sten, mikrosilika og blandevandet, hvor der udvikles mikroskopiske luftbobler, der som plastificeringsmidler har en dispergerende effekt og øger frostbestandigheden.

A.1.5 Tilslag

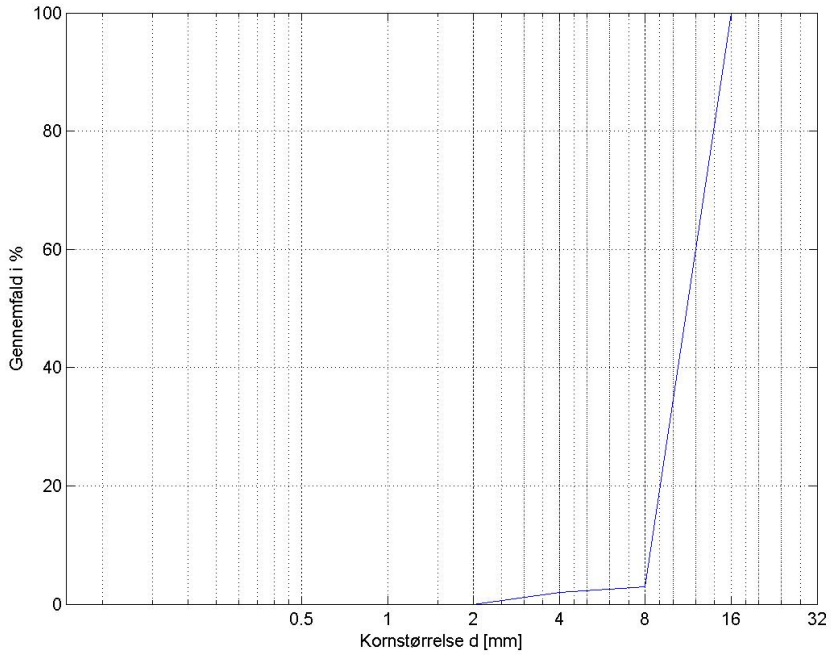
Som tilslag er anvendt Nr. Halne sand og Vikans Kross skærver. Kornkurver for de tre anvendte typer fremgår af figur A.1, figur A.2 og figur A.3.



Figur A.1: *Kornkurve for Nr. Halne sand 0-2 mm.*



Figur A.2: *Kornkurve for Vikans Kross 4-8 mm.*



Figur A.3: *Kornkurve for Vikans Kross 8-16 mm.*

A.1.6 Andre tilsætninger

Foruden de nævnte bestanddele er nogle af prøveemnerne tilsat eller behandlet med andre midler. Disse er angivet i tabel A.3.

Tabel A.3: *Andre behandlinger af prøveemner.*

	Tilsætning	Overfladebehandling
TiO_2	X	
Siloxan	X	X
Zn-stearat	X	

Titanhvid, TiO_2 er et hvidt farvepigmentpulver, der foruden at farve betonen medvirker til tætning af strukturen på grund af fillereffekten. Der er benyttet en blanding af rutil TiO_2, der er krystallinsk og anatas TiO_2, der er amorf, i vægtforholdet 30:70.

Siloxan og zinkstearat er begge stoffer, der har en hydrofoberende virkning. Siloxan virker hydrofoberende, da det består af silicium-forbindelser, der ændrer overfladespændingen og dermed kontaktvinklen. Stearater virker hydrofoberende, da de har en lang hydrofob ende, der vender ind i porerne og dermed gør vandtransport gennem porerne vanskelig.

A.2 Fremstilling af prøveemnerne

I dette afsnit beskrives selve fremstillingen af prøveemnerne, der er udført af Aalborg Portland A/S.

A.2.1 Recepter

Størrelse på de anvendte blandinger er 33-34 l. Mængderne i tabel A.4 er angivet i kilo til denne mængde for tørre materialer.

Tabel A.4: *Recepter for prøveemner. Mængder i kg.*

	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5	Nr. 6	Nr. 7	Nr. 8	Nr. 9	Nr. 10	Nr. 11
Hvid cement	13,650	11,655	13,650	12,985	13,650	13,650	13,650	12,968	13,650	13,650
Mikrosilika	-	-	-	0,700	-	-	-	-	-	
TiO_2 - anatas	-	-	-	-	-	-	-	0,478	-	-
TiO_2 - rutil	-	-	-	-	-	-	-	0,205	-	-
Zn-stearat	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,082
Siloxan	-	-	-	-	0,082	påsmurt	-	-	-	-
Sand 0-2 mm	23,584	23,899	23,584	23,513	23,584	23,584	23,584	23,584	23,584	23,548
Skærver 4-8 mm	8,324	8,437	8,324	8,288	8,324	8,324	8,324	8,324	8,324	8,324
Skærver 8-16 mm	31,568	31,984	31,568	31,462	31,568	31,568	31,568	31,568	31,568	31,531
Vand	4,950	5,296	4,950	4,950	4,950	4,950	4,950	4,950	4,950	4,950
Plastificering	0,069	0,035	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069
Superplastificering	0,069	0,000	0,083	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	0,041
Luftindblanding	0,006	0,007	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,024

A.2.2 Blande- og udstøbningsprocedure

I tabel A.5 er angivet den anvendte blandeprocedure.

Tabel A.5: *Blandesekvens.*

Handling	Varighed
Tørblanding	60 sek
Vandtilsætning	30 sek
Blanding med vand (incl. plastificering og luft)	120 sek
Pause	60 sek
Efterblanding	60 sek

Af hver blanding er udstøbt fire prøveemner med dimensionerne 70 mm × 250 mm × 350 mm. Under vibrering opfyldes formene i løbet af 60 sekunder. Alle prøveemner er afformet efter nøjagtig 24 timer i form, hvis ikke andet er angivet, hvorefter de er placeret i laboratorieklima (20±1°C, 55±5% RF) for konditionering til ens fugtniveau i overfladen.

A.2.3 Overfladebehandling

Zinkstearat er et pulver, der gør betonoverfladen hydrofob og hæmmer vandindtrængning i kapillarporerne uden at forhindre fordampning.

Siloxan er som zinkstearat en overfladebehandling, der gør overfladen hydrofob; blot mere effektiv. Siloxanen er tilsat i en 50:50 suspension, der både kan tilsættes betonblandingen og påføres eksternt. På overfladen er siloxan mere robust en Zn-stearat, idet det ikke nedbrydes så meget af UV-lys.

Af øvrige behandlinger er nogle af prøveemnerne afsyret i saltsyreopløsning, hvilket er sket ved at prøveemnet er dyppet i en 30% saltsyreopløsning.

Efter afformning og inden cementen er bundet af, er beton meget sårbar overfor udtørring. Tidlig udtørring vil give anledning til plastisk svind og revnedannelse, hvilket imidlertid kan forebygges ved at tildække den nystøbte beton. Dette kan i praksis gøres ved eksempelvis at benytte et hærdekar eller tildække med plastfolie. Det er dog ikke altid muligt at benytte hærdekar eller tildækning med plastfolie, hvorfor en såkaldt curing compound kan benyttes. Curing compound er en beskyttende film, der sprøjtes på overfladen efter afformning. Alle prøveemnerne er lagret et døgn i form inden afformning, men en enkelt er lagret en uge inden afforming. Efter afformning er der ikke anvendt hverken curing compound eller hærdning i vand, hvilket er gjort med henblik på at efterligne worst case for en in situ-støbt konstruktion.

Appendix B

Strukturudvikling

I dette appendix redegøres for klinkermineralernes reaktionsforløb efter vandtilsætning og cementpastaens strukturudvikling under hærdeprocessen.

Der er benyttet cementkemiske betegnelser i henhold til tabel B.1.

Tabel B.1: *Cementkemiske betegnelser.*

Oxid	Kemisk sammensætning	Symbol
Calciumoxid	CaO	C
Siliciumoxid	SiO_2	S
Aluminiumoxid	Al_2O_3	A
Jernoxid	Fe_2O_3	F
Svovloxid	SO_3	$\bar{S}$
Vand	H_2O	H
Calciumhydroxid	$Ca(OH)_2$	

B.1 Hydratisering

Når klinkermineralerne reagerer med den tilsatte vandmængde dannes hydrater, som giver cementpastaen bindemiddelegenskaber. Dette afsnit er skrevet på baggrund af [Herholdt et al, 1985].

B.1.1 Silikatholdige klinkermineraler, C_3S og C_2S

De to vigtigste klinkermineraler i portlandcement er tricalciumsilikat, C_3S og dicalciumsilikat, C_2S, der tilsammen udgør omkring 75% af cementen. Ved reaktion med vand dannes calciumsilikathydratgel (CSH), der er den væsentligste styrkegivende komponent i hærdnet cementpasta og som samtidig er det stof, der giver cementpastaen bindemiddelegenskaber. Hydratiseringen af de to klinkermineraler kan tilnærmet siges at følge reaktionerne:

$$2\ C_3S + 6\ H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3\ CH \qquad 2\ C_2S + 4\ H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH \tag{B.1}$$

Reaktionen med C_3S sker hurtigt i forhold til reaktionen med C_2S, hvorfor C_3S har stor betydning for den tidlige styrkeudvikling og C_2S for de sene styrker. Hvid cement har et meget højt indhold af C_3S og C_2S, og udvikler derfor både høj tidlig og høj sen styrke. Det dannede CH er med til at give en høj pH-værdi i porevæsken, hvilket giver en basisk jernoxidfilm på eventuelt armeringsjern, så det beskyttes mod korrosion. Endvidere kan CH reagere med puzzolan (se afsnit B.1.4) og danne CSH.

B.1.2 Tricalciumaluminat, C_3A

Reaktionen mellem C_3A og vand sker næsten momentant. For at forsinke denne reaktion, så hurtig afbinding undgås, tilsættes portlandcement gips. På denne måde sker der således flere reaktioner, men bruttoreaktionen kan idealiseret skrives:

$$C_3A + 6\ H \rightarrow C_3AH_6 \tag{B.2}$$

Når C_3A tilsættes gips udfældes der hurtigt efter vandtilsætning ettringit på C_3A-kornenes overflade, hvilket sinker hydratiseringen i nogen tid, hvorefter ettringitten reagerer med den uomsatte mængde C_3A og danner monosulfat.

B.1.3 Tetracalciumaluminatferrit, C_4AF

Som det eneste er klinkermineralet C_4AF ikke hvidt, hvorfor indholdet er meget lavt i hvid cement. Som i C_3A sker der ved C_4AFs hydratisering flere reaktioner, hvor bruttoreaktionen kan skrives:

$$C_4AF + 2\ CH + 10\ H \rightarrow C_3AH_6 + C_3FH_6 \tag{B.3}$$

B.1.4 Puzzolanreaktioner

Et puzzolan er et kiselholdigt materiale, der ikke i sig selv er et hydraulisk bindemiddel, men som ved reaktion med calciumhydroxid danner produkter med bindemiddelegenskaber [Herholdt et al, 1985, s. 294]. De mest benyttede puzzolaner i Danmark er flyveaske og mikrosilika.

Typisk anvendes mikrosilika for at opnå større styrke og tæthed i beton. Aktivitetsfaktoren for 28 døgns trykstyrken er for mikrosilika mellem 3 og 5, hvilket betyder, at 1 kg mikrosilika kan substituere 3-5 kg cement. Ved tilsætning af mikrosilikapartikler, der i gennemsnit er 100 gange mindre end cementkorn, opnås en fillereffekt, da mikrosilikapartiklerne udfylder hulrummene mellem cementkornene, og cementpastaen dermed bliver meget tæt. Puzzolanreaktionen kan skrives:

$$2\ S + 3\ CH \rightarrow C_3S_2H_3 \tag{B.4}$$

Under hydratiseringen giver mikrosilika den fysiske effekt, at cementens hydratisering accelereres, hvilket menes at stamme fra, at mikrosilikapartiklerne fungerer som kim for vækst af hydratiseringsprodukterne [Hjorth, 1982, s. 4].

B.2 Strukturudvikling i cementpastaen

Dette afsnit er skrevet på baggrund af [Freiesleben, 1978, s. 39-41].

Strukturudviklingen i cementpasta sker i fire trin:

1. Initial reaktion
2. Induktionsperiode
3. Accelerationsperiode
4. Retardationsperiode

B.2.1 Initial reaktion

Umiddelbart efter vandtilsætning reagerer klinkermineralerne med blandevandet og danner calciumsilikathydrater. Disse reaktioner er exoterme, og det væsentligste bidrag til varmeudviklingen stammer fra reaktionen mellem C_3A og gips, der fører til udfældning af ettringit på overfladen af C_3A-kornene. Den udfældede ettringit undertrykker herefter den videre reaktion. Varigheden af den initiale reaktion er typisk 10-20 minutter.

B.2.2 Induktionsperiode

Reaktionen mellem C_3A og gips er stadig undertrykt, og hydratiseringen af C_3S og C_2S sker endnu langsomt. Udfældningen af calciumsilikathydrater er endnu meget sparsom. Under denne periode sker en vis størkning, men den egentlige hærdning er ikke begyndt. Varigheden af induktionsperioden er 2-4 timer.

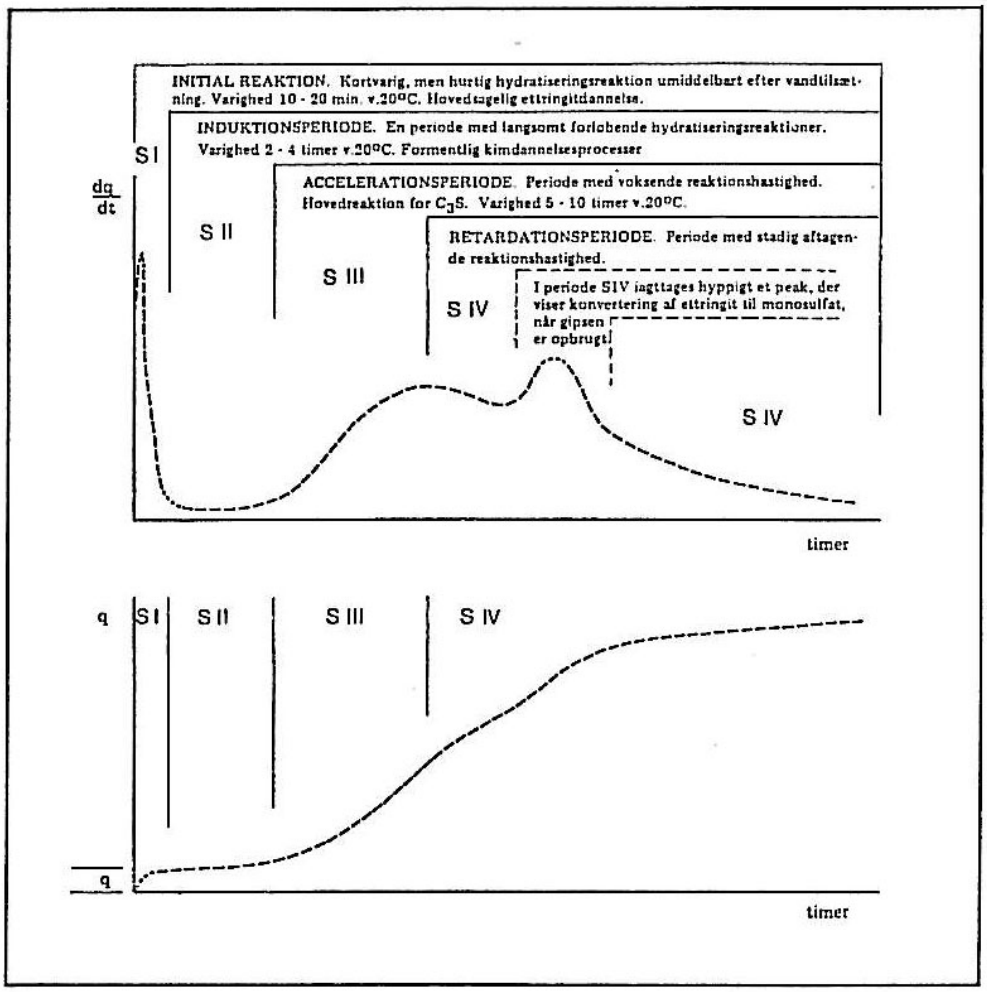
B.2.3 Accelerationsperiode

Efter induktionsperioden øges reaktionshastigheden gradvist, når ettringitlaget opløses. Hovedreaktionen, hydratiseringen af C_3S, begynder, cementpastaen afbinder og den egentlige styrkeudvikling begynder. Varigheden af accelerationsperioden er 5-10 timer.

B.2.4 Retardationsperiode

Under hydratiseringen af C_3S udfældes de dannede hydrater på cementkornenes overflade. Voluminet af disse hydrater er større end de oprindelige klinkermineraler, hvilket bevirker, at der sker en gradvis udfyldning af hulrummene mellem partiklerne. Når denne udfyldning finder sted, undertrykkes hydratiseringsprocesserne mere og mere, og reaktionshastigheden aftager atter.

De nævnte trin er illustreret på figur B.1.



Figur B.1: *Strukturudvikling i hærdnende cementpasta [Freiesleben, 1978].*

Strukturudviklingen under hydratisering illustreres bedst ved hjælp af *Powers'* fasemodel.

B.3 *Powers'* fasemodel

I projektet er benyttet betoner både med og uden mikrosilika, hvorfor fasemodellen opstilles for begge disse tilfælde.

Powers' fasemodel beskriver den volumenmæssige sammensætning af cementpasta som funktion af hydratiseringsgraden, α. De to indgående variable er defineret:

$$\text{Udgangsporsitet}, p = \frac{\text{porevolumen}}{\text{totalvolumen}} = \frac{\rho_c \cdot (v/c)}{\rho_w + \rho_c \cdot (v/c)} = \frac{(v/c)}{\rho_w/\rho_c + (v/c)} \tag{B.5}$$

$$\text{Faststofvolumen}, (1\text{-}p) = \frac{\text{faststofvolumen}}{\text{totalvolumen}} = \frac{\rho_w}{\rho_w + \rho_c \cdot (v/c)} \tag{B.6}$$

Her er

v/c	masseforhold mellem vand og cement [kg/kg]
p	udgangsporøsitet [-]
ρ_w	vands densitet [kg/m³]
ρ_c	cements densitet [kg/m³]

B.3.1 *Powers'* fasemodel for et lukket system uden mikrosilika

Dette afsnit bygger på [Freiesleben, 1978].

Volumen af uhydratiseret cement, V_c

Volumenandelen af den uhydratiserede cement er lig faststofvoluminet og aftager proportionalt med hydratiseringsgraden, α.

$$V_c = (1 - p)(1 - \alpha) \tag{B.7}$$

Volumen af gelfaststof, V_h

Udtrykket for voluminet af gelfaststof er bestemt af den mængde vand, der bindes kemisk under hydratiseringen. Det kemisk bundne vand udgør 25 vægt% af cementen. Samtidig reduceres det kemisk bundne vand med 25 vol% ved det svind, der finder sted under hydratiseringen. Udtrykket for gelfaststofmængden bliver

$$\begin{aligned} V_h &= (1 - p)\alpha + (1 - 0,25) \cdot 0,25 \cdot \rho_c(1 - p)\alpha/\rho_w \\ &= 1,6(1 - p)\alpha \end{aligned} \tag{B.8}$$

Volumen af gelvand, V_g

Mængden af gelvand er proportional med mængden af kemisk bundet vand.

$$\begin{aligned} V_g &= 0,75 \cdot 0,25 \cdot \rho_c(1\text{-}p)\alpha \\ &= 0,6(1\text{-}p)\alpha \end{aligned} \tag{B.9}$$

Volumen af kapillarvand, V_k

Det initiale volumen af kapillarvand er definitionsmæssigt identisk med porøsiteten, p. Ved hydratisering mindskes mængden af kapillarvand, da det kemisk bundne vand og gelvandet afgår. Volumenandelen er da

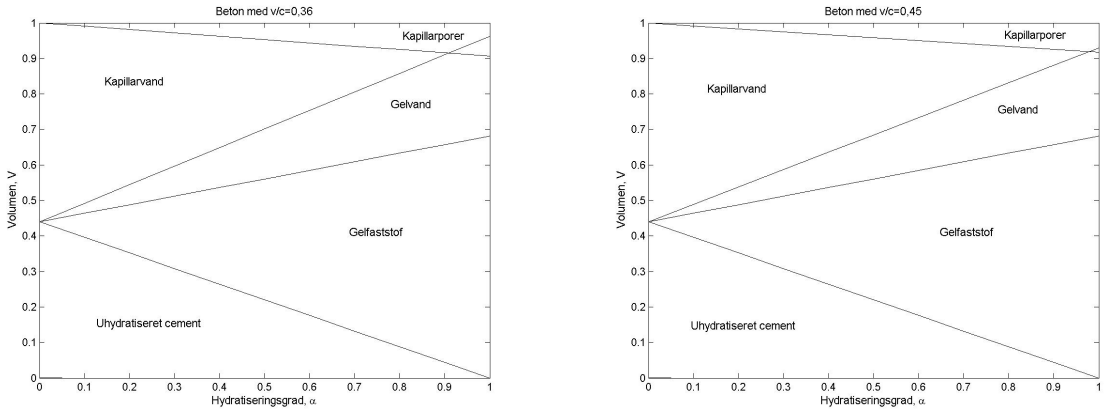
$$\begin{aligned} V_k &= p - 0,25 \cdot \rho_c(1-p) \cdot \frac{\alpha}{\rho_w} - 0,6(1-p)\alpha \\ &= p - 1,4(1-p)\alpha \end{aligned} \tag{B.10}$$

Luft i kapillarporer, V_l

Volumenandelen af kapillarporer bestemmes ud fra svindet af det kemiske bundne vand.

$$\begin{aligned} V_l &= 0,25 \cdot 0,25 \cdot \rho_c(1-p)\alpha \\ &= 0,2(1-p)\alpha \end{aligned} \tag{B.11}$$

De analytiske udtryk er illustreret grafisk på figur B.2. Udtrykkene er afbildet for betoner med v/c=0,36 og v/c=0,45.



(a) *Beton med v/c=0,36.*

(b) *Beton med v/c=0,45.*

Figur B.2: *Powers' fasemodel for to forskellige betoner.*

I figur B.2(b) ses det, at der ved fuldstændig hydratisering stadig er frit vand i betonen i modsætning til i figur B.2(a), hvor kapillarvandet er opbrugt ved $\alpha \simeq 0,90$. Dette betyder, at der for v/c=0,36 ikke er tilstrækkeligt kapillarvand til stede til, at al cementen kan hydratisere, og den uhydratiserede cementmængde virker derfor som en art tilslag.

B.3.2 *Powers'* fasemodel for et lukket system med mikrosilika

Dette afsnit bygger på [Nielsen et al, 1998]. Materialedata er hentet i [Freiesleben, 1995].

Volumen af uhydratiseret cement og mikrosilika, V_c og V_s

Når der i en cementpasta er tilsat mikrosilika korrigeres (B.7) med den andel af voluminet, der udgøres af mikrosilika. Udtrykkene for cement og mikrosilika defineres hver for sig.

$$V_c = (1-p)(1-\alpha)(1-S) \tag{B.12}$$

$$V_s = (1-p)(1-\alpha)S \tag{B.13}$$

Her er

S mikrosilikaens volumenandel af pulveret [-]

Volumen af gelfaststof, V_h

Gelfaststofmængden ændres ved tilsætning af mikrosilika, da puzzolanreaktionen, jf. (B.4), forbruger CH. Puzzolanreaktionen antages at være neutral med hensyn til kemisk binding af vand. Værdierne i tabel B.2 anvendes til bestemmelse af den dannede mængde gelfaststof.

Tabel B.2: *Materialedata for komponenter i puzzolanreaktion.*

Komponent	CH	S	$C_3S_2H_3$
Molar masse, M [g/mol]	74,09	60,08	342,22
Densitet, ρ [g/ml]	2,23	2,20	2,62

Mængden af dannet gelfaststof bestemmes støkiometrisk ved (B.4):

$$\begin{aligned} & n_S \cdot M_S + n_{CH} \cdot M_{CH} \rightarrow n_{C_3S_2H_3} \cdot M_{C_3S_2H_3} \\ & \Downarrow \\ & 120,16\,\text{g} + 222,27\,\text{g} \rightarrow 342,22\,\text{g} \end{aligned} \tag{B.14}$$

Ved at anvende densiteterne fra tabel B.2 opskrives udtrykket på volumenbasis:

$$\begin{aligned} & \frac{m_S}{\rho_S} + \frac{m_{CH}}{\rho_{CH}} \rightarrow \frac{m_{C_3S_2H_3}}{\rho_{C_3S_2H_3}} \\ & \Downarrow \\ & 54,62\,\text{ml} + 99,67\,\text{ml} \rightarrow 130,63\,\text{ml} \end{aligned} \tag{B.15}$$

På baggrund af (B.15) bestemmes volumenfraktionen af det dannede gelfaststof og andelen af CH ved puzzolanreaktionen:

$$V_{h,\,S} = \frac{130,62}{54,62} \cdot S(1-p)\alpha = 2,39 \cdot S(1-p)\alpha \tag{B.16}$$

$$V_{h,\,CH} = \frac{99,67}{54,62} \cdot S(1-p)\alpha = 1,82 \cdot S(1-p)\alpha \tag{B.17}$$

Her er

$V_{h,\,S}$ dannet gelfaststof fra puzzolanreaktion
$V_{h,\,CH}$ andel af CH i gelfaststof ved puzzolanreaktion

Gelfaststofandelen i et system med mikrosilika kan nu opskrives som en subtraktion af ovenstående:

$$\begin{aligned} V_h &= (1,6(1-S) + (2,39 - 1,82)S)(1-p)\alpha \\ &= (1,6 - 1,03S)(1-p)\alpha \end{aligned} \tag{B.18}$$

Volumen af gelvand, V_g

Ved tilsætning af mikrosilika til cementpasta øges mængden af gelvand som følge af forøgelsen af mængden af kolloid calciumsilikathydratgel, der bevirker øget mængde af adsorberet vand. Der adsorberes 0,5 g gelvand pr. gram mikrosilika, hvorved mængden af gelvand kan opskrives:

$$V_g = (0,6 + 0,5S)(1-p)\alpha \tag{B.19}$$

Volumen af kapillarvand, V_k

Når hydratiseringen starter, er mængden af kapillarvand lig porøsiteten, men denne mængde reduceres under hydratiseringen efterhånden som det kemisk bundne vand og gelvandet fragår. Mængden af kapillarvand bestemmes af:

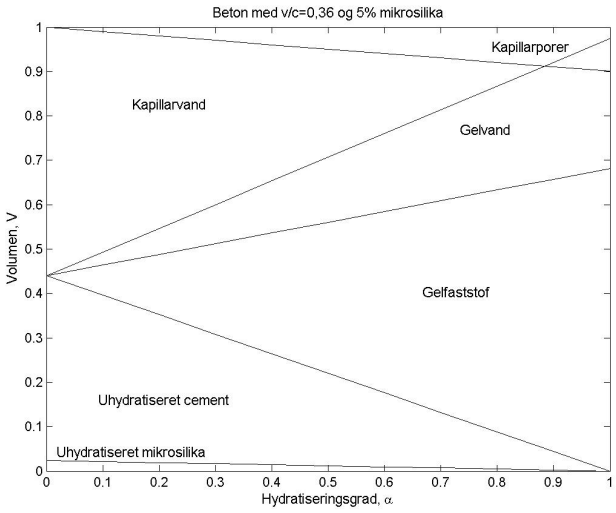
$$\begin{aligned} V_k &= p - 0,25\rho_c(1-p)(1-S) \cdot \frac{\alpha}{\rho_w} - (0,6 + 0,5S)(1-p)\alpha \\ &= p - (1,39 - 0,29S)(1-p)\alpha \end{aligned} \tag{B.20}$$

Luft i kapillarporer, V_l

Det kemiske svind ved puzzolanreaktionen ses af (B.14) og (B.15) at være 19,70 ml/100 g reageret mikrosilika. Der er set bort fra CHs bidrag til dannelsen af kapillarporer, da det indgår i cementreaktionen. Porevoluminet fra det kemiske svind fra puzzolanreaktionen, $V_{l,kem}$ og det samlede porevolumen, V_l bliver således:

$$\begin{aligned} V_{l,kem} &= \frac{19,70}{54,62\frac{100}{120,16}} S(1-p)\alpha \\ &= 0,43S(1-p)\alpha \\ &\Downarrow \\ V_l &= (0,2(1-S)+0,43S)(1-p)\alpha \\ &= (0,2+0,23S)(1-p)\alpha \end{aligned} \tag{B.21}$$

I figur B.3 er de analytiske udtryk illustreret svarende til en beton med v/c=0,36 og 5% mikrosilika.



Figur B.3: *Powers' fasemodel for beton med v/c=0,36 og 5% mikrosilika.*

På figur B.3 ses det, at hydratiseringsgraden, α er mindre end 1. Tilsætningen af mikrosilika bevirker et øget vandbehov som følge af partikelstørrelsen, hvilket giver en lavere hydratiseringsgrad end for en tilsvarende beton uden tilsætning af mikrosilika.

Appendix C

Datablade

I dette appendix er vedlagt datablade på den anvendte cement, samt de anvendte tilsætningsstoffer.

C.1 Cement

AALBORG WHITE

AALBORG WHITE®

DEKLARATION

Maj 2007

Erstatter august 2005

Gældende deklaration kan downloades fra www.aalborg-portland.dk

BVC har, som notificeret organ, certificeret overensstemmelse med kravene i den harmoniserede standard DS/EN 197-1:2001 samt med det af Aalborg Portland deklarerede maksimale indhold af chlorid, og dermed givet adkomst til CE-mærkning. BVC har endvidere certificeret overensstemmelse med klassifikationskravene i DS/INF 135:2005.

AALBORG WHITE® cement
Portlandcement CEM I 52,5 R (HS/EA/≤ 2)
Certifikat: 1035-CPD-700541

Aalborg Portland er desuden systemcertificeret efter DS/EN ISO 9001:2000 serien hos BVC. Certificeringens gyldighed kan verificeres på: www.BVQI.dk.

Denne deklaration omfatter de egenskaber, hvortil der stilles krav i den harmoniserede cementstandard DS/EN 197-1 samt i DS/INF 135 suppleret med 1-døgnsstyrke, 7-døgnsstyrke, refleksion og absolut densitet. For hver egenskab er angivet et variationsområde, som er fastlagt således, at sandsynligheden for, at en værdi falder udenfor, er mindre end 5 %.

CE

1035

Aalborg Portland A/S
Rørdalsvej 44
DK 9100 Aalborg
Danmark

1035-CPD-700541

EN 197-1
CEM I 52,5 R

Chloridindhold højst
0,02 masse-%

Egenskaber	Deklarerede værdier	Krav i DS/EN 197-1/ DS/INF 135
1-døgnsstyrke	18 - 24 MPa	Ingen
2-døgnsstyrke	34 - 42 MPa	≥ 30 MPa
7-døgnsstyrke	55 - 67 MPa	Ingen
28-døgnsstyrke	70 - 79 MPa	≥ 52,5 MPa
Begyndende afbinding	85 - 130 min	≥ 45 min
Ekspansion	0 - 2 mm	≤ 10 mm
Glødetab	0 - 1,0 %	≤ 5,0 %
Uopløselig rest	0 - 0,3 %	≤ 5,0 %
Sulfat som SO_3	1,8 - 2,3 %	≤ 4,0 %
Chlorid	0 - 0,02 %	≤ 0,10 %
C_3A	4 - 5 %	≤ 5 %
Alkaliindhold	0,2 - 0,3 %	≤ 0,4 %
Vandopløseligt chromat	0 - 2 mg/kg	≤ 2 mg/kg
Refleksion (DIN 5033)	85,0 - 89,5 %	Ingen
Absolut densitet	3120 - 3180 kg/m³	Ingen

Tlf. 98 16 77 77 • Fax 98 10 11 86 • www.aalborg-portland.dk

Figur C.1: *Datablad for hvid portlandcement.*

C.2 Plastificering

FOSROC constructive solutions

Deklarationsblad 1-05
2005-01-11
Erst. 2004-01-16

Conplast 212

Vandreducerende plastificeringsmiddel til beton og mørtel

Anvendelsesområde

Conplast 212 forbedrer blandevandets effekt i betonblandinger. Produktet kan benyttes for at opnå større bearbejdelighed uden tab af styrke, eller forøget styrke uden tab af bearbejdelighed.

Generelle egenskaber

Aktive komponenter	: Lignosulfonat
Farve	: Mørk brunlig
Homogenitet	: Homogen ved den anbefalede opbevaring
Frysepunkt	: Ca. -3°C
Normale bivirkninger	: Virker let luftindførende
Bivirkninger ved overdosering	: Vil give retardering og forøget bearbejdelighed

Beskrivelse

Conplast 212 er fremstillet af udvalgte, stabiliserede, sukkerreducerede lignosulfonater og leveres som en mørk brunlig væske.
Conplast 212 tilsættes blandevandet for at opnå optimal effekt. Herved opnås en bedre fordeling af cementpartiklerne og dermed en mere effektiv hydratiseringsproces. En effekt, der kan udnyttes til forøget bearbejdelighed, forøget styrke - eller reduktion af cementindholdet i betonen.

Brug af **Conplast 212** kan give en vandreduktion på 10-15 %.

På baggrund af den kemiske sammensætning vurderes det, at produktet ikke har nogen korrosionsfremmende virkning på stål, der er indstøbt i beton.
Krav til korrosionsadfærd er overholdt iht. DIN V 18998, "Beurteilung des Korrosionsverhaltens von Zusatsmitteln nach Normen der Relhe DIN EN 934".

EC certificering og CE-mærkning

Conplast 212 er omfattet af EC certifikat nr. 1073-CDP-119, udstedt af Dancert med registreringsnummer 119/1.

CE

1073

Fosroc A/S
Industriparken 27
Skodborg
DK-6630 Rødding

05

1073-CDP-119/1

EN 934-2

Conplast 212

Vandreducerende/plastificerende tilsætningsstof til beton
EN 934-2:T2

Max. chloridindhold: 0.05 % af massen
Max. alkaliindhold: 0.50 % af massen

Indhold af farlige stoffer: Ingen

Dosering

Dosering

Som standard dosering anbefales 0.3 - 0.6 vægt-% af cementen. Indeholder betonen puzzolaner (flyveaske, silica) øges doseringen til 0.5 - 0.8 vægt-% af cement + puzzolan. Endelig dosering fastlægges ved forsøg med den aktuelle betonblanding.

Den udmålte mængde **Conplast 212** tilsættes sammen med blandevandet.

Overdosering

En dobbelt dosering af den anbefalede mængde resulterer i en længere afbindingstid, men vil ikke have mærkbar indflydelse på slutstyrken.

Deklarerede egenskaber

Egenskab	Værdi	Metode
Densitet ved +20°C	1.170 ± 0.020 kg/ltr.	DS/ISO 758
Tørstofindhold	36.0 ± 1.5 %	ASTM C 494 - 86 [1]
Ækvivalent Na_2O	< 0.50 %	EN 480-12
Vandopløselig chlorid (Cl-)	< 0.05 %	EN 480-10
Total chlorid (Cl-)	< 0.50 %	EN/ISO 1158
pH-værdi	4.0 ± 1.0	ISO 4316

[1] Alternativ metode i forhold til EN 480-8 jf. DS/EN 934-2, Tabel 1, Note c.

side 1 af 2

Figur C.2: *Datablad for Conplast 212, s. 1.*

Conplast 212

Opbevaring

Holdbarhed

Minimum holdbar i 12 måneder ved temperaturer på +2°C til +30°C. Har disse temperaturer været overskredet, så kontakt **Fosroc A/S**. Har produktet været udsat for frost, kan det optøs, men skal omrøres grundigt før brug.

Oplagring

Det anbefales, at produktet installeres i tank med periodevis omrøring.

Emballage

Conplast 212 leveres i 6 kg og 30 kg dunke, 245 kg tromler samt i tankleverancer.

Forholdsregler

Sikkerhedsdatablad kan rekvireres.

Producent og forhandler

Fosroc A/S
Industriparken 27, Skodborg
DK-6630 Rødding
Tlf. +45 74 84 88 84
Fax. +45 74 84 88 33

Forbehold

De tekniske informationer og arbejdsanvisninger er afgivet af Fosroc A/S med det formål at hjælpe brugeren til at få det bedst mulige og mest økonomiske resultat. Vore anvisninger er baseret på mange års erfaring samt på vor nuværende viden. Da arbejdsforhold hos brugeren ligger uden for vor kontrol, kan vi ikke påtage os et ansvar for de resultater, som en bruger måtte opnå ved anvendelsen af produktet. Det påhviler altid brugeren at foretage de i hans tilfælde nødvendige forholdsregler for at efterleve gældende regler. Opstår der tvivl om produktets egenskaber eller anvendelse, skal Fosroc A/S straks kontaktes. I øvrigt henvises til vore generelle salgs- og leveringsbetingelser.

Fosroc A/S

Industriparken 27, Skodborg
DK-6630 Rødding

www.fosroc.com

telefon: +45 74 84 88 84
fax: +45 74 84 88 33
e-mail: fosrocdk@fosroc.com

side 2 af 2

Figur C.3: *Datablad for Conplast 212, s. 2.*

C.3 Superplastificering

FOSROC constructive solutions

Deklarationsblad 1-10
2005-01-11
Erst. 2004-01-16

Peramin F

Superplastificerende tilsætningsmiddel til beton og mørtel

Anvendelsesområde

Peramin F anvendes ved produktion af normal beton, flydebeton og højstyrkebeton.

Generelle egenskaber

Aktive komponenter	: Melaminharts
Farve	: Klar
Homogenitet	: Homogen ved den anbefalede opbevaring
Frysepunkt	: 0°C
Normale bivirkninger	: Ingen
Bivirkninger ved overdosering	: Retarderer afbinding og forøger risikoen for afblanding

Beskrivelse

Peramin F er et melaminbaseret betontilsætningsmiddel med en meget kraftig plastificerende effekt. Leveres som klar væske.

Peramin F dispergerer cement, puzzolan og filler med en kraftig vandreduktion til følge. En effekt, der kan udnyttes til forøget bearbejdelighed, forøget styrke eller til reduktion af cementindholdet.

Brug af **Peramin F** kan give en vandreduktion på 15-20 %.

På baggrund af den kemiske sammensætning vurderes det, at produktet ikke har nogen korrosionsfremmende virkning på stål, der er indstøbt i beton.

EC certificering og CE-mærkning

Peramin F er omfattet af EC certifikat nr. 1073-CDP-119/, udstedt af Dancert med registeringsnummer 119/3.

CE

1073

Fosroc A/S
Industriparken 27
Skodborg
DK-6630 Rødding

05

1073-CDP-119/3

EN 934-2

Peramin F

Stærkt vandreducerende/plastificerende tilsætningsstof til beton
EN 934-2:T3.1/3.2

Max. chloridindhold: 0.05 % af massen
Max. alkaliindhold: 5.00 % af massen

Indhold af farlige stoffer: Ingen

Dosering

Dosering

Peramin F har et bredt anvendelsesområde, så doseringen kan varieres mellem 0.6 - 2.0 vægt-% af cement + puzzolan. Ved fremstilling af normal beton er retningslinierne for dosering ca. 0.9 vægt-%, for flydebeton ca. 1.3 vægt-%.

Endelig dosering fastlægges ved forsøg med den aktuelle betonblanding.

Den bedste effekt opnås ved tilsætning af **Peramin F** umiddelbart efter blandingen af de øvrige materialer. Ved elementproduktion kan det være en fordel at tilsætte **Peramin F** så tidligt som muligt.

Deklarerede egenskaber

Egenskab	Værdi	Metode
Densitet ved +20°C	1.210 ± 0.020 kg/ltr.	DS/ISO 758
Tørstofindhold	34.0 ± 1.5 %	ASTM C 494 - 86 [1]
Ækvivalent Na_2O	< 5.00 %	EN 480-12
Vandopløselig chlorid (Cl^-)	< 0.05 %	EN 480-10
Total chlorid (Cl^-)	< 0.50 %	EN/ISO 1158
pH-værdi [2]	10.5 ± 1.5	ISO 4316

[1] Alternativ metode i forhold til EN 480-8 jf. DS/EN 934-2, Tabel 1, Note c.

[2] Ved længere tids opbevaring vil pH-værdien ændre sig i nedadgående retning.

side 1 af 2

Figur C.4: *Datablad for Peramin F, s. 1.*

Peramin F

Overdosering
En dobbelt dosering af den anbefalede mængde vil give en retardering af afbindingen, ved flydebeton kan det endvidere give afblanding.

Opbevaring

Holdbarhed
Minimum holdbar i 12 måneder ved temperaturer på +2°C til +30°C. Har disse temperaturer været overskredet, så kontakt **Fosroc A/S**. Har produktet været udsat for frost, kan det optøs, men skal omrøres grundigt før brug.

Oplagring
Peramin F bør opbevares i lukket plasttank, da jern kan misfarve produktet.
Det anbefales, at produktet installeres i tank med periodevis omrøring.

Emballage
Peramin F leveres i 6 kg og 30 kg dunke, 245 kg tromler samt i tankleverancer.

Forholdsregler
Sikkerhedsdatablad kan rekvireres.

Producent
Perstorp Chemitec
Perstorp AB
S-28480 Perstorp

Forhandler
Fosroc A/S
Industriparken 27, Skodborg
DK-6630 Rødding
Tlf. +45 74 84 88 84
Fax. +45 74 84 88 33

Forbehold
De tekniske informationer og arbejdsanvisninger er afgivet af Fosroc A/S med det formål at hjælpe brugeren til at få det bedst mulige og mest økonomiske resultat. Vore anvisninger er baseret på mange års erfaring samt på vor nuværende viden. Da arbejdsforhold hos brugeren ligger uden for vor kontrol, kan vi ikke påtage os et ansvar for de resultater, som en bruger måtte opnå ved anvendelsen af produktet. Det påhviler altid brugeren at foretage de i hans tilfælde nødvendige forholdsregler for at efterleve gældende regler. Opstår der tvivl om produktets egenskaber eller anvendelse, skal Fosroc A/S straks kontaktes. I øvrigt henvises til vore generelle salgs- og leveringsbetingelser.

Fosroc A/S

Industriparken 27, Skodborg
DK-6630 Rødding

www.fosroc.com

telefon: +45 74 84 88 84
fax: +45 74 84 88 33
e-mail: fosrocdk@fosroc.com

side 2 af 2

Figur C.5: *Datablad for Peramin F, s. 2.*

C.4 Luftindblanding

FOSROC constructive solutions

Deklarationsblad 1-20
2005-01-11
Erst. 2004-03-26

Conplast 316 AEA

Luftindblandingsmiddel til beton og mørtel

Anvendelsesområde

Conplast 316 AEA er et koncentreret og kraftigt virkende luftindblandingsmiddel beregnet til beton tilsat flyveaske, mikrosilica eller med indhold af tilslag med meget filler, som vil nedsætte normale produkters effekt.

Generelle egenskaber

Aktive komponenter	: Vinsol resin og tensid
Farve	: Mørk brunlig
Homogenitet	: Homogen ved den anbefalede opbevaring
Frysepunkt	: 0°C
Normale bivirkninger	: Virker plastificerende
Bivirkninger ved overdosering	: Giver styrketab pga. større luftindhold

Beskrivelse

Conplast 316 AEA er fremstillet til brug i forbindelse med alle typer portland cementer og leveres som en mørk, brunlig væske.

Conplast 316 AEA reagerer på grænsefladerne mellem cement - sand - sten - mineralske tilslag og blandevandet. Der udvikles mikroskopiske luftbobler, som fordeles ligeligt i betonen.

Luftindholdet er stabilt under transport i rotérvogne.

På baggrund af den kemiske sammensætning vurderes det, at produktet ikke har nogen korrosionsfremmende virkning på stål, der er indstøbt i beton.
Krav til korrosionsadfærd er overholdt iht. DIN V 18998, "Beurteilung des Korrosionsverhaltens von Zusatsmitteln nach Normen der Relhe DIN EN 934".

EC certificering og CE-mærkning

Conplast 316 AEA er omfattet af EC certifikat nr. 1073-CDP-119, udstedt af Dancert med registreringsnummer 119/7.

CE

1073

FOSROC **Fosroc A/S**
Industriparken 27
Skodborg
DK-6630 Rødding

05

1073-CDP-119/7

EN 934-2

Conplast 316 AEA

Luftindblandende tilsætningsstof
til beton
EN 934-2:T5

Max. chloridindhold: 0.02 % af massen
Max. alkaliindhold: 1.50 % af massen

Indhold af farlige stoffer: Ingen

Dosering

For at opnå et luftindhold på 4-6 %	Dosering i vægt-% af cement + puzzolan
normal beton	0.025 - 0.075

Dosering
Endelig dosering fastlægges ved forsøg med den aktuelle betonblanding.

Den udmålte mængde **Conplast 316 AEA** tilsættes sammen med blandevandet.

Deklarerede egenskaber

Egenskab	Værdi	Metode
Densitet ved +20°C	1.020 ± 0.010 kg/ltr.	DS/ISO 758
Tørstofindhold	10.5 ± 1.0 %	ASTM C 494 - 86 [1]
Ækvivalent Na_2O	< 1.50 %	EN 480-12
Vandopløselig chlorid (Cl^-)	< 0.02 %	EN 480-10
Total chlorid (Cl^-)	< 0.20 %	EN/ISO 1158
pH-værdi [2]	10.0 ± 1.5	ISO 4316

[1] Alternativ metode i forhold til EN 480-8 jf. DS/EN 934-2, Tabel 1, Note c.

[2] Ved længere tids opbevaring vil pH-værdien ændre sig i nedadgående retning.

side 1 af 2

Figur C.6: *Datablad for Conplast 316 AEA, s. 1.*

Conplast 316 AEA

Overdosering
En dobbelt dosering af den anbefalede mængde vil give et væsentligt højere luftindhold og dermed en reduktion af styrken. Afbindingstiden kan desuden blive forlænget.

Opbevaring

Holdbarhed
Minimum holdbar i 12 måneder ved temperaturer på +2°C til +30°C. Har disse temperaturer været overskredet, så kontakt **Fosroc A/S**. Har produktet været udsat for frost, kan det optøs, men skal omrøres grundigt før brug.

Oplagring
Det anbefales, at produktet installeres i tank med periodevis omrøring.

Emballage
Conplast 316 AEA leveres i 25 kg dunke, 210 kg tromler samt i 1000 kg containere.

Forholdsregler
Sikkerhedsdatablad kan rekvireres.

Producent og forhandler
Fosroc A/S
Industriparken 27, Skodborg
DK-6630 Rødding
Tlf. +45 74 84 88 84
Fax. +45 74 84 88 33

Forbehold
De tekniske informationer og arbejdsanvisninger er afgivet af Fosroc A/S med det formål at hjælpe brugeren til at få det bedst mulige og mest økonomiske resultat. Vore anvisninger er baseret på mange års erfaring samt på vor nuværende viden. Da arbejdsforhold hos brugeren ligger uden for vor kontrol, kan vi ikke påtage os et ansvar for de resultater, som en bruger måtte opnå ved anvendelsen af produktet. Det påhviler altid brugeren at foretage de i hans tilfælde nødvendige forholdsregler for at efterleve gældende regler. Opstår der tvivl om produktets egenskaber eller anvendelse, skal Fosroc A/S straks kontaktes. I øvrigt henvises til vore generelle salgs- og leveringsbetingelser.

Fosroc A/S

Industriparken 27, Skodborg
DK-6630 Rødding

www.fosroc.com

telefon: +45 74 84 88 84
fax: +45 74 84 88 33
e-mail: fosrocdk@fosroc.com

side 2 af 2

Figur C.7: *Datablad for Conplast 316 AEA, s. 2.*