



# Center for Grøn Beton

## Holdbarhed Hovedrapport

***Udført af:***

*Marianne Tange Hasholt*

*Teknologisk Institut, Beton, december 2002*

Titel: Holdbarhed  
Hovedrapport

Udført af: Marianne Tange Hasholt

Dato: December 2002

ISBN: 87-7756-696-3

Reproduktion af dele af rapporten er tilladt, hvis kilde angives.

## Indholdsfortegnelse

<b>1. INDLEDNING .....</b>	<b>4</b>
1.1 FORMÅL 4 .....	
1.2 RAPPORTENS OPBYGNING .....	4
<b>2. FORSØGSPROGRAM .....</b>	<b>6</b>
2.1 AFGRÆNSNING .....	6
2.2 RECEPTER .....	6
RECEPTBETEGNELSER .....	6
RECEPTJUSTERINGER .....	7
2.3 PRØVNINGSMETODER OG -OMFANG .....	7
<b>3. FROSTBESTANDIGHED .....</b>	<b>11</b>
3.1 STOR PAKKE .....	11
3.2 UDVIDET PAKKE .....	15
3.3 SAMLEDE ERFARINGER (INCL. DEMONSTRATIONSBRO).....	16
<b>4. CARBONATISERING.....</b>	<b>20</b>
SCENARIO 1 21 .....	
SCENARIO 2 21 .....	
<b>5. CHLORIDINDTRÆNGNING .....</b>	<b>23</b>
<b>6. ALKALI/KISEL-REAKTIVITET .....</b>	<b>26</b>
<b>7. SULFATBESTANDIGHED .....</b>	<b>29</b>
7.1 A-BETON MED RAPIDCEMENT .....	29
7.2 BETON MED SLAMASKE .....	29
<b>8. TYNDSLIBSANALYSE.....</b>	<b>31</b>
<b>9. KONKLUSION.....</b>	<b>32</b>
<b>10. REFERENCER.....</b>	<b>34</b>

## 1. Indledning

Denne rapport indeholder samtlige resultater fra Grøn Beton-projektet, der vedrører de grønne betoners holdbarhed. Det drejer sig både om resultaterne fra de tre prøvningspakker *grundpakken*, *stor pakke* og *udvidet pakke*, hvor holdbarhedsgruppen-gruppen (BK4) har tilrettelagt prøvningen vedrørende holdbarhed, samt resultater opnået i forbindelse med demonstrationsbroprojektet. Desuden er der iværksat en særlig undersøgelse af slamasken, der også indeholder holdbarhedsundersøgelser.

### 1.1 Formål

Det overordnede formål er at undersøge holdbarheden af ressourcebesparende betoner (herefter kaldet *grønne* betoner).

Det er en forudsætning for de grønne betoners anvendelse i praksis, at deres holdbarhed kan dokumenteres på tilfredsstillende måde. Eksisterende prøvningsmetoder og standarder er udarbejdet på baggrund af erfaringer med traditionelle betoner. Derfor er de ikke nødvendigvis fyldestgørende til at dokumentere holdbarheden af beton med en sammensætning, der adskiller sig væsentligt fra "normal"-betonen. Man kan forestille sig, at traditionelle prøvningsmetoder vil diskvalificere grønne betoner, selvom de er holdbare. Men det modsatte kan også gøre sig gældende: at traditionelle prøvningsmetoder ikke afdækker holdbarhedsproblemer, der kun er aktuelle for grønne betoner.

BK4s konkrete strategi er derfor dobbelt. De grønne betoner skal gennemgå traditionel prøvning på samme måde som konventionel beton. Desuden vurderes behovet for supplerende undersøgelser, der enten foretages med nye prøvningsmetoder tilpasset de grønne betoners karakteristika eller med eksisterende metoder, hvor vurderingskriterierne er ændrede i forhold til normal praksis.

### 1.2 Rapportens opbygning

Rapporten er opbygget på følgende måde:

- I kapitel 2 gives et overblik over det samlede prøvningsomfang i grundpakken, stor pakke og udvidet pakke, der er de primære kilder til denne rapport. Der findes desuden en oversigt over de gennemgående recepttyper i prøvningspakkerne, hvis holdbarhed er behandlet i denne rapport.
- Kapitel 3-8 behandler de opnåede resultater på tværs af prøvningspakker, idet hvert kapitel behandler et "klassisk" holdbarhedsområde: frostbestandighed, carbonatisering, chloridindtrængning, alkali/kisel-reaktivitet, sulfatbestandighed og mikrostruktur. I disse kapitler er inddraget resultater fra demonstrationsbroprojektet som supplement til prøvningspakkernes resultater.
- Rapporten afsluttes i kapitel 9 med en kort sammenfatning af erfaringerne med de enkelte betontyper.

I hovedrapporten er det ofte valgt at præsentere resultaterne grafisk, for når der er tale om at sammenligne mange data, er det tit nemmere at illustrere forskelle og ligheder på denne måde. De målinger, der ligger til grund for hovedrapportens grafer, findes i stedet i rapportens bilag.

## 2. Forsøgsprogram

### 2.1 Afgrænsning

De klassiske holdbarhedsproblemer for traditionelle betoner er frostbestandighed, carbonatisering, chloridindtrængning og alkali-kisel-reaktivitet. Fælles for de implicerede nedbrydningsmekanismer er, at de er afhængige af tilstedeværelsen af fugt:

- frostskeer opstår, når vand i betonen fryser.
- carbonatiseringens hastighed er afhængig af den relative fugtighed og forløber hurtigst ved 40-70% relativ fugtighed.
- chloridtransporten er afhængig af vand, idet chloridionerne transporteres i vandig opløsning (ved diffusion eller kapillarsugning).
- ved alkali-kisel-reaktionen dannes en hygroskopisk gel, men kun når den kan tiltrække vand fra omgivelserne, kan der opbygges skadelige tryk i betonen.

Grøn Beton projektet omfatter både P- og A-beton, men på baggrund af ovenstående er det mht. holdbarhed helt fra begyndelsen valgt udelukkende at fokusere på A-beton, dvs. betoner, der kan anvendes i aggressivt miljø, jf. DS 411 /1/. Dette skyldes, at der ikke er fugt til stede i passivt miljø, og der forventes derfor ikke væsentlige holdbarhedsproblemer for de grønne P-beton. En undtagelse er P-beton til fundamenter, der således ikke omfattes af BK4s undersøgelser.

### 2.2 Recepter

I grundpakken blev der afprøvet et stort antal betoner, fx med forskellige doseringer af de aktuelle restprodukter. I denne rapport er kun medtaget de betoner, der efterfølgende blev valgt som de mest lovende, og som derfor gik videre til afprøvning i stor pakke.

#### Receptbetegnelser

Der anvendes følgende receptbetegnelser i rapporten, svarende til receptbetegnelserne i stor og udvidet pakke:

- Aref: Referencebeton, dvs. almindeligt anvendt beton til aggressivt miljø med en karakteristisk styrke på 35 MPa. AR indeholder lavalkali-, sulfatbestandig cement.
- A0: A0 er identisk med AR, bortset fra at cementen er skiftet ud med rapidcement.
- A1: Beton med rapid cement og højt flyveaskeindhold. Flyveasken udgør 40% af den samlede pulvervægt.
- A3: Beton med rapid cement og aske fra forbrænding af spildevandsslam i stedet for traditionel flyveaske fra et kulfyret kraftværk.
- A5: Beton, hvor blandevandet stammer fra betonslam. Betonslammets tørstof erstatter samtidigt en del af betonens sandfraktion.
- A6: Beton, hvor stenmel erstatter sandet helt eller delvist.

A0 er identisk med AR, blot er den lavalkali-, sulfatbestandige cement erstattet med rapid cement. Det er samme cementtype, der anvendes i A1 og A3, så A0 fungerer som en ekstra referencebeton i forhold til disse betoner. Da der er en betragtelig CO<sub>2</sub>-reduktion ved at benytte ny rapid cement i stedet for lavalkali-, sulfatbestandig cement, er A0 imidlertid også en grøn beton.

AR, A0, A1 og A3 er støbt hos Unicon, mens A5 og A6 er støbt hos Sydsten.

### Receptjusteringer

En del af betonerne er blandet både i grundpakken, stor pakke og udvidet pakke. Der er løbende sket forskellige receptjusteringer, bl.a. af følgende grunde:

- Samme recept er støbt på forskellige fabrikker, hvilket har krævet tilpasning til den aktuelle fabriks tilslagsmaterialer.
- Stor pakke viste problemer med at opnå en tilstrækkelig fin luftporestruktur til at sikre A1s (og til dels også A3s) frostbestandighed. Årsagen viste sig at være inkompatibilitet mellem luftindblandingsmidlet og det anvendte superplastificeringsmiddel, hvorfor sidstnævnte blev skiftet ud i Unicons betoner i udvidet pakke og betonerne til demonstrationsbroen.
- I A3 er der brugt tre forskellige slamasker (fra tre forskellige forbrændingsanlæg) i henholdsvis grundpakken, stor pakke og udvidet pakke.
- I A6 var der i grundpakken og stor pakke 50% erstatning af sand med stenmel. Sydsten valgte i udvidet pakke at skifte til 100% stenmel i den fine tilslagsfraktion.

Recepterne fra grundpakken, stor pakke og udvidet pakke er angivet i bilag. I teksten vil de blive benævnt henholdsvis Ax-GP, Ax-SP og Ax-UP, når der er behov for at specificere hvilken prøvningspakke, recepten stammer fra.

I forbindelse med demonstrationsbroprojektet er der taget udgangspunkt i recepterne fra udvidet pakke. Disse recepter benævnes Ax-bro. Særligt for A1 gælder det, at problemer med at styre luftindholdet førte til, at flyveaskeindholdet til støbningen af brodækket blev nedjusteret. Der er derfor både en A1-bro1 og en A1-bro2, svarende til de anvendte recepter henholdsvis før og efter denne justering.

### 2.3 Prøvningsmetoder og -omfang

I A1, A5 og A6 introduceres der ikke som sådan nye materialer i betonen:

- A1 indeholder flyveaske fra kulfyrede værker, et restprodukt, der ikke er nyt i betonsammenhæng. Det nye i A1 er, at flyveasken anvendes i større mængde end almindeligt.
- I A5 anvendes betonslam, der er en opslemning af fine tilslagspartikler og cement, hvor sidstnævnte må forventes at være hydratiseret. Begge dele findes i forvejen i hærdet beton.
- I A6 substitueres en del af sandet med stenmel. Men sand og stenmel er samme materiale, det er primært kornformen og kornstørrelsesfordelingen, der adskiller de to komponenter.

Derfor forventes der ikke nye holdbarhedsproblemer i forhold til de traditionelle holdbarhedsproblemer med frostbestandighed, carbonatisering, chloridindtrængning og alkalisk-reaktivitet.

I A3 erstattes den traditionelle flyveaske med slamaske. Den kemiske sammensætning er angivet i bilag 1. Slamasken overholder kravene for kemisk sammensætning af flyveaske hvad angår indholdet af Cl<sup>-</sup> og glødetab jf. DS/EN 450 /2/. Slamaskens sulfatindhold varierer afhængigt af, hvor asken kommer fra, så den aske, der er anvendt i stor pakke (fra Lynetten) overholder kravene til sulfatindhold jf DS/EN 450, mens slamasken i udvidet pakke (fra Avedøre) ikke gør det.

Der er ikke i DS/EN 450 stillet grænser for indholdet af MgO, TiO<sub>2</sub> og P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, da disse oxider kun findes i helt ukritiske mængder i flyveaske fra kulfyrede værker. MgO kan medvirke ved ekspansive reaktioner, og P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> kan forsinke betonens styrkeudvikling. På cementområdet er der krav til indholdet af MgO, idet det ikke må overstige 5%, se DS/EN 197-1 /3/. Soroka /4/ har angivet 2,5% af cementvægten som vejledende grænser for P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Ved gennemgang af recepten fra stor pakke ses det, at slamasken indeholder 3,0% MgO og 19,6% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Der er således ingen problemer med hensyn til MgO. P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> overskrider den anbefalede grænse for cement, men ved et moderat slamaskeindhold som i recepten for A3 vil P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> udgøre mindre end 2,5% af cementvægten, og indholdet forventes derfor ikke at være problematisk i A-betonen. Det er dog muligt, at det vil være problematisk i P-betonen P3, hvor slamasken udgør en forholdsvis større del af pulveret. Bortset fra den eventuelle langsommere styrkeudvikling, er der ikke umiddelbart noget i den kemiske analyse, der peger på holdbarhedsproblemer ud over dem, der sædvanligvis bør overvejes for traditionelle betoner.

Det vælges derfor i grundpakken, stor pakke og udvidet pakke at tage udgangspunkt i en undersøgelse af de holdbarhedsproblemer, der kendes fra traditionelle betoner. De valgte prøvningsmetoder er vist i Tabel 2.1.

Tabel 2.1: *Prøvningsmetoder anvendt i grundpakke, stor pakke og udvidet pakke.*

Egenskab	Metode	Standard
Frostbestandighed	Luftporestruktur	prEN480-1 1997 /6/
	Ydre afskalning og indre revnedannelse	SS 13 72 44 <sup>1</sup> (Borås-metoden) /5/
Carbonatisering	Carbonatiseringshastighed	NT-BUILD 357 /7/
Chloridindtrængning	Chloriddiffusionskoefficient	CTH-metoden /8/
Kemiske omdannelser	Alkali-reaktivitet	TI-B51 /9/
Mikrostruktur	Tyndslibsanalyse	TI-B5 /10/

1. I forbindelse med dette projekt er metoden anvendt i tre forskellige udgaver, nemlig den originale med saltopløsning som prøvemedium (metode A) og en revideret udgave med hhv. saltvand og ferskvand. Den reviderede udgave adskiller sig fra den originale ved at der ud over afskalning også registreres længdedeformationer og ultralydshastighed.



Ud over den eksperimentelle prøvning foretages en tankemæssig afprøvning af, om de anvendte restprodukter vil kunne påvirke faktorer som fx

- betonens carboniseringspotentiale
- betonens evne til at binde chlorider kemisk

For at tage højde for at de grønne betoners egenskabsudvikling tidsmæssigt kan afvige fra referencebetonernes udvikling, indlægges flere prøvningsterminer for den accelererede frosttest og målingen af chloriddiffusionskoefficient.

Svenske undersøgelser har desuden vist, at carbonisering kan have en betydelig effekt på frostbestandigheden, men denne effekt er ikke entydig: For betoner, hvor binderen udelukkende består af portlandcement, nedsætter carboniseringen afskalningen i accelererede frostforsøg, mens afskalningen øges for betoner med slagge. /11/. Derfor foretages den accelererede frosttest for A1 og A3 både på prøveemner, der saves i tidlig alder, så den saltvands-eksponerede flade har været udsat for atmosfærisk luft, og prøveemner, der først saves kort før prøvens start.

I Tabel 2.2 gives et overblik over prøvningerne i grund-, stor og udvidet pakke. Som det ses, ligger det store prøvningsvolumen i stor pakke. Der blev udført et meget begrænset antal målinger af luftporestruktur, frostbestandighed og chloridmodstand i grundpakken, nærmest som pilotprojekt for at have et grundlag for at planlægge stor pakke. Og så er der ligeledes udført et beskedent antal prøvninger i udvidet pakke som opfølgning på stor pakke i de tilfælde, hvor stor pakkes resultater gav anledning til nye spørgsmål.

Tabel 2.2: Prøvningsomfang i grundpakken (GP), stor pakke (SP) og udvidet pakke (UP).

	AR	A0	A1	A3	A5	A6
prEN480-1 1997	SP	SP	GP/SP/UP	GP/SP/UP	SP	SP
SS 13 72 44						
• original (salt, 28 døgn)			GP/UP	GP/UP		UP
• original, start 56 døgn				UP		
• original, start 84 døgn				UP		
• rev., salt, start 28 døgn	SP	SP	SP	SP	SP	SP
• rev., salt, start 56 døgn	SP	SP	SP	SP	SP	SP
• rev., salt, carboniseret <sup>1</sup>	SP		SP	SP		
• rev., fersk, start 28 døgn	UP		UP	UP		
NT-BUILD 357	SP	SP	SP	SP	SP	SP
CTH-metoden						
• 28 døgn efter støbning	SP	SP	GP/SP	GP/SP	SP	SP
• 3 mdr. efter støbning	SP	SP	SP	SP	SP	SP
• 1 år efter støbning	SP	SP	SP	SP	SP	SP
TI-B 51	SP	SP	SP	SP	SP	SP
TI-B 5	SP	SP	SP	SP	SP	SP

1. De carboniserede prøveemner skæres samtidigt med prøver, der testes efter 28 døgn, men de testes først efter 56 døgn for at se carboniseringens betydning.

I forbindelse med demonstrationsbroprojektet er der for AR, A0 og A1 foretaget prøvning i forbindelse med prøvestøbningen. Dette omfatter bl.a. prøvning af chloridmodstand og frostbestandighed. Der er desuden foretaget en løbende prøvning i forbindelse med produktionen. Da der undervejs viste sig problemer med at styre luftindholdet i A1, findes der for denne beton et større antal målinger af luftporestruktur.

### 3. Frostbestandighed

#### 3.1 Stor pakke

##### *Ydre skader*

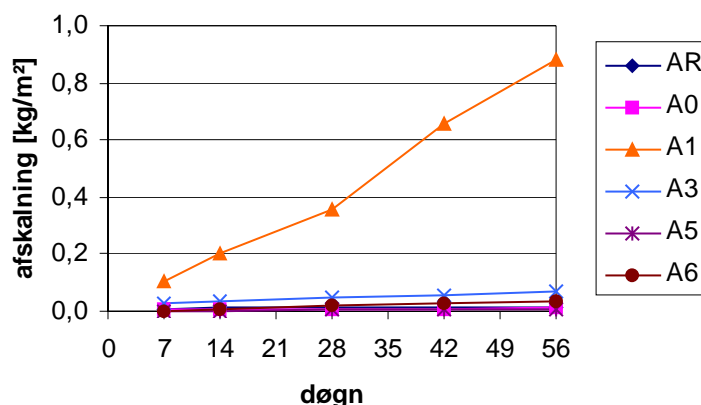
De ydre skader vurderes ved at måle afskalning ved en accelereret frost-tø belastning i henhold til den reviderede SS 13 72 44. I DS 481 /12/ er der angivet følgende acceptkriterier for A-betoner:

- afskalningen efter 56 døgns prøvning er mindre end  $0,2 \text{ kg/m}^2$

eller

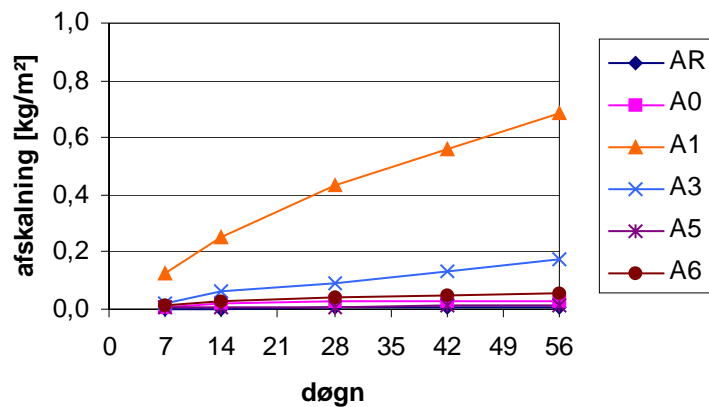
- afskalningen efter 56 døgns prøvning er mindre end  $0,5 \text{ kg/m}^2$ , samtidigt med at forholdet mellem afskalningen ved 56 døgn og ved 28 døgn er mindre end 2

Figur 3.1 viser den målte afskalning, når frost-tø belastningen påbegyndes 31 døgn efter støbning (det starttidspunkt, der er angivet i SS 13 72 44).



Figur 3.1: Afskalning for prøveemner, hvor frost-tø belastningen er påbegyndt 31 døgn efter støbning.

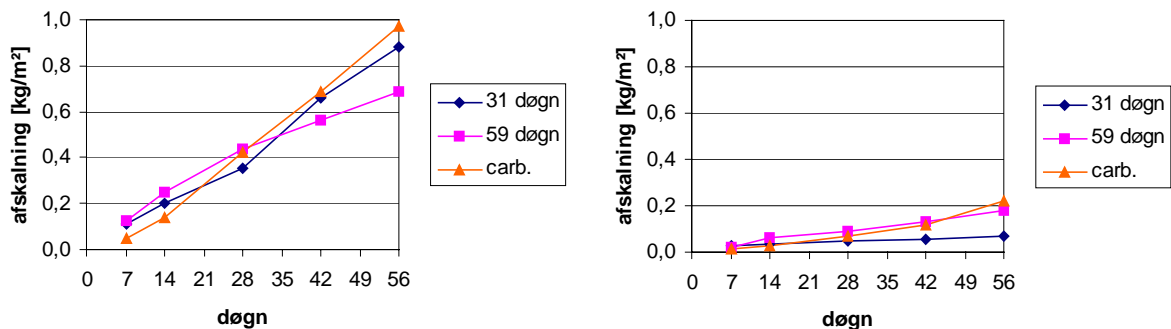
Det ses, at alle betoner undtagen A1 kan opfylde DS 481s acceptkriterier. A1 har et højt flyveaskeindhold, hvilket bl.a. giver en langsommere styrkeudvikling, fordi styrkeudviklingen er afhængig af en puzzolanreaktion, der forløber senere end hovedparten af cementshydratiseringen. Det er derfor rimeligt at antage, at også andre egenskaber som fx frostbestandighed udvikles langsommere for denne beton.



Figur 3.2: Afskalning for prøveemner, der er savet 49 dage efter støbning og hvor frost-tø belastningen er påbegyndt 59 døgn efter støbning.

En sammenligning af Figur 3.1 og Figur 3.2 viser faktisk, at A1s afskalning reduceres, når frost-tø belastningen påbegyndes senere. Forbedringen er dog slet ikke tilstrækkelig til at opfylde DS 481s acceptkriterium.

En sammenligning af Figur 3.1 og Figur 3.2 viser i øvrigt, at A3s afskalning mere end fordobles, når prøveemnerens alder stiger fra 31 døgn til 59 døgn ved testens start. Der kan ikke umiddelbart gives nogen forklaring på den øgede afskalning. Afskalningen har dog en størrelsesorden, så den registrerede øgede afskalning kan skyldes prøveusikkerhed og også efter 59 døgn overholder A3 stadigvæk kravene i DS 481.



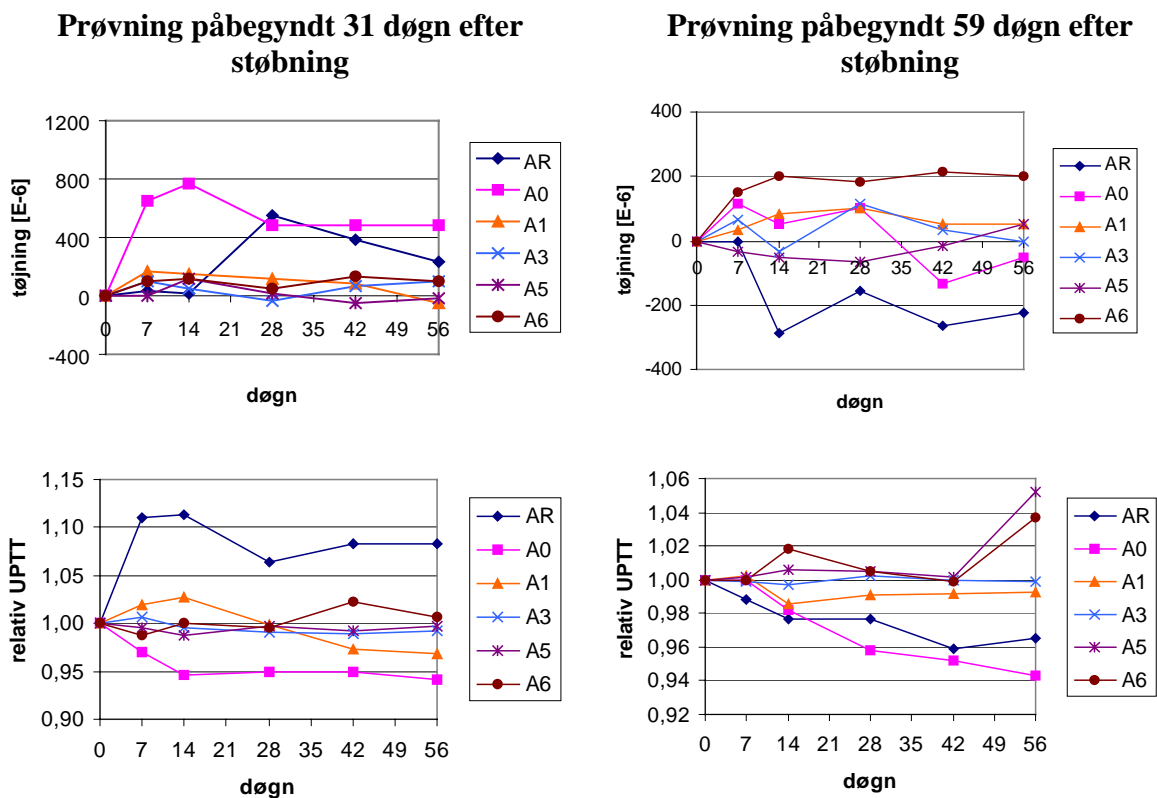
Figur 3.3: Afskalning for A1 (til venstre) og A3 (til højre) efter forskellige hærdebetingelser. For hver recept er der et sæt prøveemner, hvor frost-tø belastningen er påbegyndt efter støbning mens belastningen for de to øvrige sæt er påbegyndt efter 59 døgn. Disse adskiller ved at være savet efter henholdsvis 47 døgn ("59 døgn") og 7 døgn ("carb."), så overfladen på det sidste sæt er carbonatiseret.

I Figur 3.3 sammenlignes resultater for prøveemner med forskellige hærdebetingelser forud for frost-tø belastningen. Carbonatiseringens indflydelse ses ved at sammenligne resultater mærket 59 døgn med resultater mærket carb. Det ses, at carbonatiseringen har en negativ indflydelse på afskalningen for A1. For A3 er de to kurver på samme niveau. Der er dog en tendens til accelereret afskalning for de carbonatiserede prøveemner (forholdet mellem

afskalning efter 56 døgn og 28 døgn er større end 2), og derfor vil de carbonatiserede prøveemner ikke kunne opfylde acceptkriterierne i DS 481.

#### Indre skader

Indre skader i form af revnedannelser kan registreres på flere måder, fx ved blivende længdeændringer eller forøget gennemløbstid for ultralyd. Figur 3.4 viser resultater af længdemålinger og målinger af ultralydstransmissionstid. Målingerne er foretaget på prøveemnerne i den samme accelererede frost-tø test, hvor der blev målt afskalning.



Figur 3.4: Resultater fra længdemålinger og ultralydsmålinger for prøveemner udsat for accelereret frosttest (jf. revideret SS 13 72 44). Bemærk! der er anvendt forskellig inddeling af de lodrette akser for prøvning påbegyndt henholdsvis 31 og 59 døgn efter støbning.

Figur 3.4 tegner et ret diffust billede. Der er ikke registreret markante ændringer i længde- eller ultralydsmålinger, svarende til, at der ikke er opstået indre skader i nogen af betonerne (det diffuse billede optræder derfor pga. prøveusikkerhed). Der er ikke noget, der tyder på, at de grønne betonere er mere sårbare overfor indre skader end referencebetonerne.

#### Luftporestruktur

Betonens luftindhold og luftporestruktur er essentiel for at opnå en god frostbestandighed, og resultaterne af en luftporeanalyse kan derfor give et fingerpeg om en aktuel betons frostbestandighed. I DS 481 er der for A-betonerne både krav til luftindholdets størrelse i den hærtnede beton og til at luften skal være fordelt i passende små luftporer (udtrykt ved afstands faktoren)

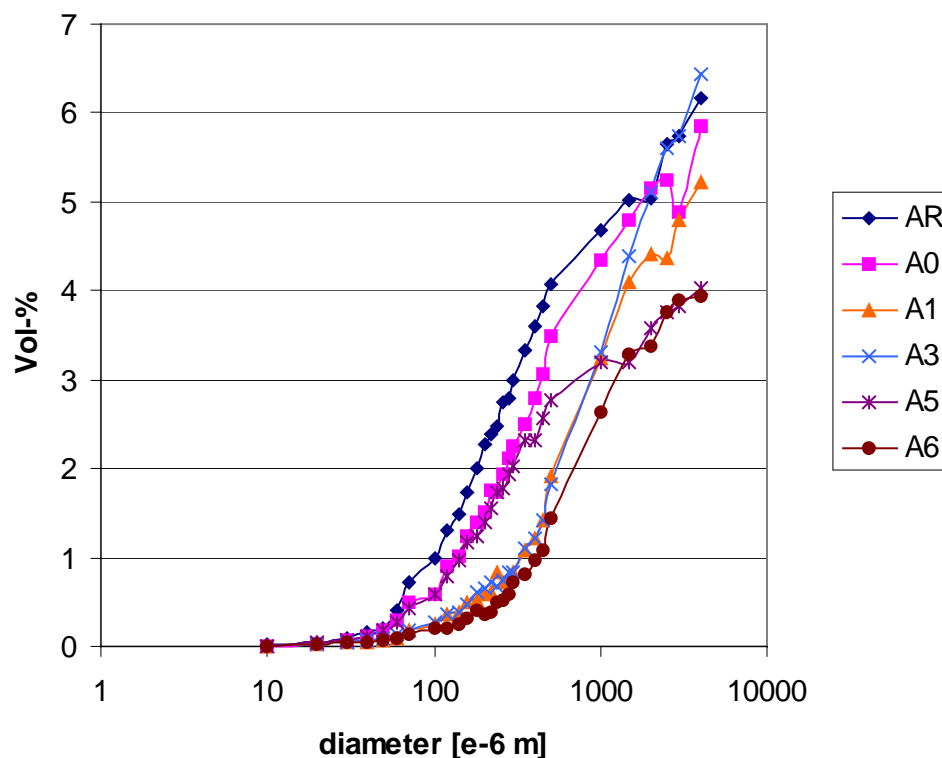
- minimum luft i kitmassen: 10 vol-%
- maksimal afstandsfaktor: 0,20 mm

Nøgletal fra luftporeanalysen er vist i Tabel 3.1, mens luftporestørrelsesfordelingen fremgår af Figur 3.5.

Tabel 3.1: Nøgletal fra luftporeanalyse.

		AR	A0	A1	A3	A5	A6
Luftindhold i hærdnet beton	[vol-%]	6,18	5,86	5,23	6,44	4,04	3,94
Pastaprocent	[vol-%]	26,1	27,0	26,3	25,6	28,2	27,1
Kitmasseluft	[vol-%]	19,1	17,8	16,6	20,1	12,5	12,7
Afstandsfaktor	[mm]	0,13	0,18	0,33	0,30	0,17	0,35
Mikroluftindhold <sup>1</sup>	[vol-%]	3,00	2,25	0,84	0,83	2,03	0,72

1. Mikroluft er defineret som indholdet af luftporer med diametre mindre end 300  $\mu\text{m}$ .



Figur 3.5: Luftporestørrelsesfordeling.

Resultaterne af luftporeanalysen understøtter for fem af de seks betoner observationerne fra måling af afskalning i den accelererede frost-tø test:

- AR og A0 opfylder standardens krav, og de viste også god frostbestandighed.
- A1 har et luftindhold på niveau med referencebetonerne, men da luftporene er grovere (stor afstandsfaktor og lille mikroluftindhold) giver de ikke den samme beskyttelse, og betonen skallede meget.

- A3 har en afstandsfaktor, der kun er lidt mindre end A1 og den er større end standardens krav. Denne beton blev godkendt i frosttesten, men viste sig at være den næstdårligste.
- A5 har et lavt absolut luftindhold sammenlignet med referencebetonerne, men da luften er meget fint fordelt (stort mikroluftindhold), bliver afstandsfaktoren lille, og betonen viste da også ved afskalningsmålingerne at have god frostbestandighed.
- A6 er på papiret med et ringe luftindhold og en høj afstandsfaktor den dårligste beton. Alligevel klarede den sig godt i den accelererede frost-tø test, og kan på det grundlag godkendes i henhold til DS 481.

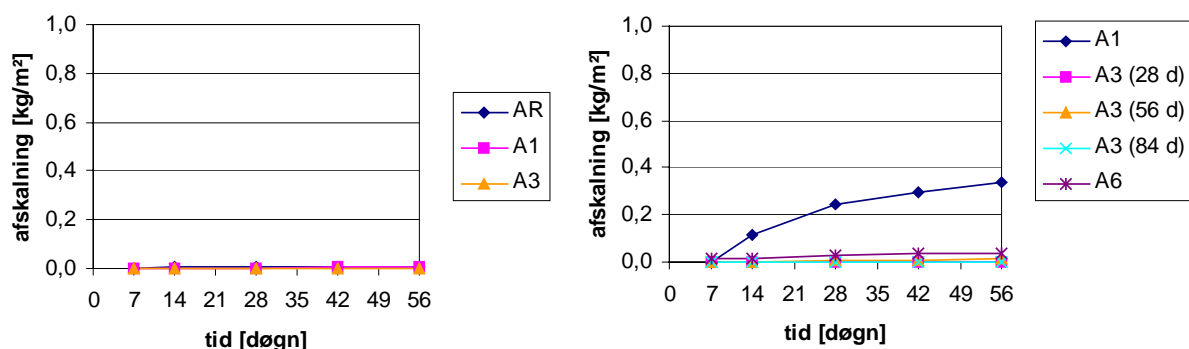
### 3.2 Udvidet pakke

Udvidet pakke har på frostområdet haft karakter af supplement til stor pakke. Dvs. at frostprøvningen er gentaget for de betoner, der

- i stor pakke havde en uacceptabel høj afstandsfaktor, dvs. større end 0,20 mm (dette krav omfatter ikke de svenske betoner A5 og A6)
- i stor pakke havde en afskalning i den accelererede frost/tø-test, der gjorde betonen kassabel
- har været igennem betydelige receptjusteringer mellem stor og udvidet pakke

Det drejer sig således om betonerne A1, A3 og A6. For A3 gælder, at den er testet til tre terminer (28, 56 og 84 døgn efter støbning), da afskalningen i stor pakke var større ved start efter 56 døgn end ved start efter 28 døgn. Der var ganske vist i begge tilfælde tale om små afskalningsmængder (henholdsvis 69 og 176 g/m<sup>2</sup> efter 56 døgn), men det ønskes alligevel dokumenteret, at A3s evne til at modstå frostangreb ikke udvikler sig negativt med tiden. Samtidigt blev det besluttet som en ekstra sikkerhed mod indre frostskeer for A1 og A3 at gennemføre prøvning efter den reviderede SS 13 72 44 med ferskvand på overfladen.

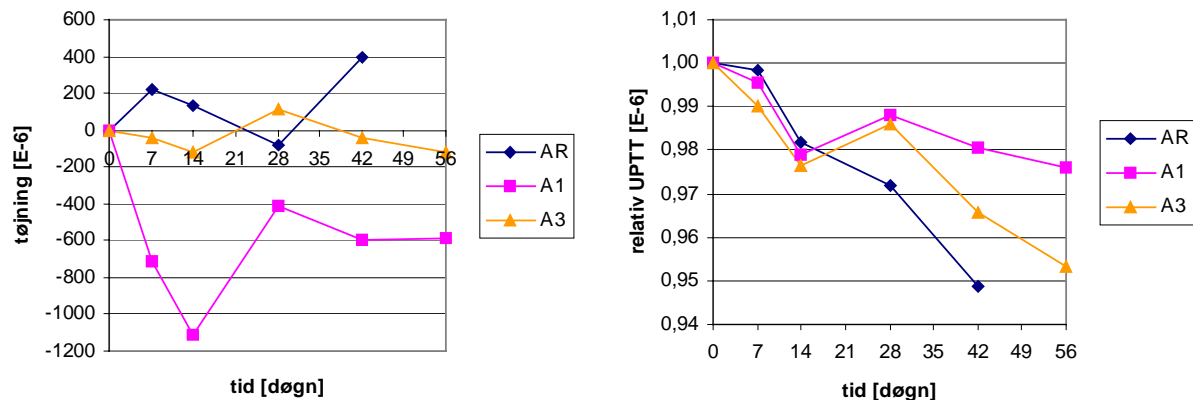
Resultaterne ses i Figur 3.6 og Figur 3.7.



Figur 3.6: Resultater af afskalningsforsøg i udvidet pakke. Venstre: Fersk vand som frysemedium. Højre: 3% NaCl-opløsning som frysemedium.

Det ses af Figur 3.6, at afskalningen ved ferskvand som frysemedium er yderst begrænset. For alle betoner er der tale om samlet afskalning efter 56 døgn på under 0,01 kg/m<sup>2</sup>.

Med saltvand på overfladen ses A1 at kunne opfylde kravene til god frostbestandighed, idet afskalningen efter 56 døgn er mindre end  $0,5 \text{ kg/m}^2$  og  $m_{56}/m_{28}$  er mindre end 2. A3 støbt i udvidet pakke har en *meget god* frostbestandighed, idet der uanset om frostpåvirkningen igangsættes 31, 59 eller 87 døgn efter støbning kun er registreret meget begrænset afskalning. Der ses ikke noget tegn på, at A3s frostbestandighed ændres negativt med tiden. A6 har fortsat en *meget god* frostbestandighed, også selvom indholdet af stenmel i udvidet pakke er øget fra 50% til 100%.



Figur 3.7: Registrering af indre skader. Venstre: Længdeændring. Højre: Ultralydsdmåling.

Med hensyn til de indre skader, er der en del usikkerhed på længde- og ultralydsmålingerne, se Figur 3.7. Det skyldes, at det er små forskelle, der registreres. Indre skader ville give et meget markant udslag. Målingerne for A1 og A3 er på niveau med de tilsvarende målinger for AR, og der er således ikke noget, der tyder på, at de er mere udsatte med hensyn til udvikling af indre skader under frostpåvirkning.

### 3.3 Samlede erfaringer (incl. demonstrationsbro)

I nedenstående Tabel 3.2-Tabel 3.5 sammenholdes målte værdier fra luftporeanalysen og målt afskalning ved accelererede frost/tø-test. Formålet er at sammenligne betoner afprøvet gennem hele Grøn Beton-projektet. Derfor er der kun medtaget resultater for AR, A0, A1 og A3, hvor der er et relativt stort antal gentagelser af målinger. Bemærk! Ved vurdering af afskalningens omfang er der anvendt samme terminologi som i SS 13 72 44 (*meget god, god, acceptabel, ej acceptabel*). Men da DS 481 kræver, at A-beton skal være *god* eller *meget god*, betyder det, at beton, der er vurderet at have et *acceptabelt* afskalningsniveau, ikke er god nok ifølge DS 481.

Tabel 3.2: Luftporeanalyse og målt afskalning for referencebetonen AR.

	Luftporeanalyse, prEN-480-1				Acc. frost/tø-test, SS 13 72 44		Vurdering
	Total	Mikro-luft	Specifik overflade	Afstands-faktor	Afsk. 28 døgn	Afsk. 56 døgn	
	[%]	[%]	$[\text{mm}^{-1}]$	[mm]	$[\text{kg/m}^2]$	$[\text{kg/m}^2]$	
Stor pakke	6,2	3,0	28	0,13	14	14	meget god



Demonstrationsbro							
- prøvestøbning, støbte cyl.	-	-	-	-	0,01	0,01	meget god
- prøvestøbning, borede cyl.	5,8	4,4	42	0,10	0,08	0,08	meget god

Tabel 3.3: *Luftporeanalyse og målt afskalning for beton med rapid cement A0.*

	Luftporeanalyse, prEN-480-1				Acc. frost/tø-test, SS 13 72 44		Vurdering
	Total	Mikro-luft	Specifik overflade	Afstands-faktor	Afsk. 28 døgn	Afsk. 56 døgn	
	[%]	[%]	[mm <sup>-1</sup> ]	[mm]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	
Stor pakke	5,9	2,3	24	0,18	0,00	0,01	meget god
Demonstrationsbro							
- prøvestøbning, støbte cyl.	-	-	-	-	0,01	0,01	meget god
- prøvestøbning, borede cyl.	4,0	2,3	35	0,15	0,07	0,09	meget god

For A1 er der ud over de ordinære prøver i grundpakken osv. også foretaget luftporeanalyse i forbindelse med støbning af beton til bestemmelse af hærdeegenskaber (19.11.2001) og krybeemner (06.02.2002) i udvidet pakke, samt ved støbning af søjle B i demonstrationsbroen (11.01.2002). Disse prøver, der fremgår af Tabel 3.4, er lavet, fordi der i forbindelse med forprøvningen af A1 opstod tvivl om denne betons frostbestandighed.

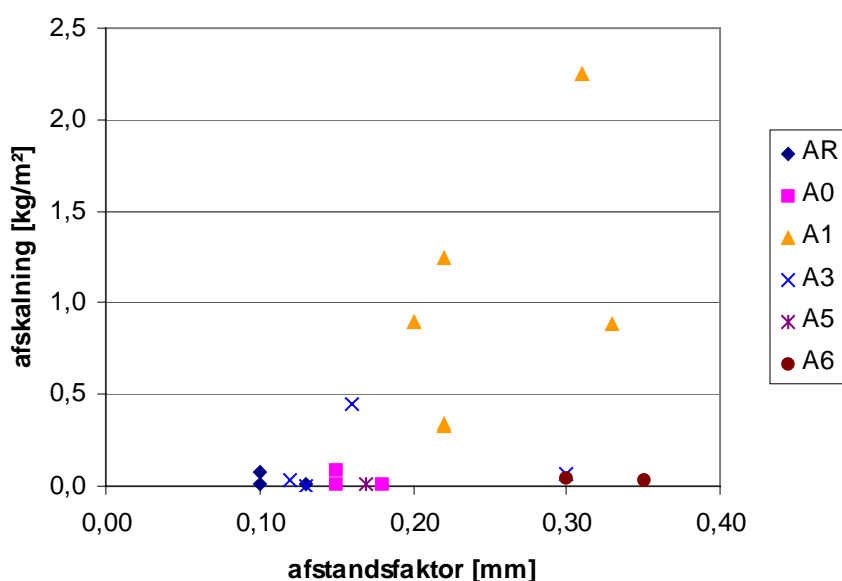
Tabel 3.4: *Luftporeanalyse og målt afskalning for beton med højt flyveaskeindhold A1. For demonstrationsbroen er de viste resultater for A1-bro1 (40% flyveaske), undtagen resultaterne for prøveemner støbt den 06.02.2002, der er for A1-bro2 (35% flyveaske).*

	Luftporeanalyse, prEN-480-1				Acc. frost/tø-test, SS 13 72 44		Vurdering
	Total	Mikro-luft	Specifik overflade	Afstands-faktor	Afsk. 28 døgn	Afsk. 56 døgn	
	[%]	[%]	[mm <sup>-1</sup> ]	[mm]	[kg/m <sup>2</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> ]	
Grundpakke	3,6	1,0	26	0,22	0,64	1,25	ej accept.
	5,4	1,9	24	0,20	0,60	0,90	acceptabel
Stor pakke	5,2	0,8	14	0,33	0,36	0,88	ej accept.
Udvidet pakke	3,4	1,2	25	0,22	0,24	0,34	god
Demonstrationsbro							
- prøvestøbning, støbte cyl.	4,0	1,2	24	0,22	0,28	0,33	god
- prøvestøbning, borede cyl.	3,5	0,9	17	0,31	2,22	2,25	ej accept.
19.11.2001, støbte cylindre	5,3	2,1	24	0,18	-	-	-
11.01.2002 støbte cylindre	5,1	2,4	24	0,19	-	-	-
06.02.2002 støbte cylindre	5,3	3,2	36	0,13	-	-	-

Tabel 3.5: *Luftporeanalyse og målt afskalning for beton med slamaske A3.*

	Luftporeanalyse, prEN-480-1				Acc. frost/tø-test, SS 13 72 44		Vurdering
	Total	Mikro-luft	Specifik overflade	Afstands-faktor	Afsk. 28 døgn	Afsk. 56 døgn	
	[%]	[%]	[mm <sup>-1</sup> ]	[mm]	[g/m <sup>2</sup> ]	[g/m <sup>2</sup> ]	
Grundpakke	6,3	2,8	27	0,16	0,35	0,45	god
Stor pakke	6,4	0,8	13	0,30	0,05	0,07	meget god
Udvidet pakke	7,6	3,5	27	0,13	0,00	0,00	meget god
Demonstrationsbro - prøvestøbning, borede cyl.	7,0	3,7	28	0,12	0,02	0,03	meget god

Figur 3.8 giver et overblik over sammenhængen mellem afstandsfaktor og afskalning efter 56 frost/tø-cykluser, jf. resultaterne i tabellerne ovenfor samt enkelte punkter for A5 og A6. Der er dog to forbehold for afbildningen: Dels er resultaterne fra stor pakke foretaget med den reviderede SS 13 72 44, hvilket betyder, at ca. hver 7. cyklus ”mangler” i forhold til den originale SS 13 72 44, som er benyttet ved øvrige prøvninger. Dels er der i forbindelse med prøvestøbningen ikke lavet luftporeanalyse på støbte cylindre for AR og A0, så her er afskalningsresultaterne afbilledet som funktion af afstandsfaktoren målt på borede cylindre.

Figur 3.8: *Sammenhæng mellem afstandsfaktor og afskalning efter 56 frost/tø-cykluser.*

For A1 svinger afstandsfaktoren i udvidet pakke og demonstrationsbro-projektet mellem 0,13 og 0,31. Resultaterne viser således, at det er svært at styre A1s luftporestruktur, selv når den støbes på samme fabrik med samme materialer hver gang. Det er dog muligt at opnå en luftporestruktur, hvor afstandsfaktoren er mindre end de krævede 0,20 mm.

Figur 3.8 tyder på, at A1 nemmere bliver frostskaadet end de øvrige betoner, forstået på den måde, at selv med samme afstandsfaktor vil A1 have større afskalning end nogen af de andre

betoner. Dette kan dog ikke konkluderes med sikkerhed, i hvert fald ikke, hvis der sammenlignes med de øvrige danske betoner. De øvrige danske betoner, undtagen A3 i stor pakke, har afstandsfaktorer, der er mindre end 0,20 mm, mens alle A1-beton, hvor der er målt afskalning, har afstandsfaktorer større end 0,20 mm. Der er således ikke et område, hvor resultaterne overlapper, og hvor der er direkte mulighed for sammenligning af A1s afskalning og fx ARs afskalning ved identiske afstandsfaktorer.

## 4. Carbonatisering

### *Beregnet carbonatiseringspotentialer*

Ved hydratisering af  $C_3S$  og  $C_2S$  dannes calciumhydroxid. Calciumhydroxid kan derefter reagere med  $SiO_2$  fra flyveaske og mikrosilica i en puzzolanreaktion. Således reduceres betonens indholdet af calciumhydroxid ved puzzolanreaktionen, og dermed forringes carbonatiseringsmodstanden. Det er muligt at give et groft bud på en betons carbonatiseringspotentialer ved først at beregne hvor meget calciumhydroxid, der dannes ved cementens hydratisering, og sammenligne med den mængde, der forbruges ved en omsætning af den puzzolanske tilsætning. Dette regnestykke er udført i Tabel 4.1 for recepter i stor pakke. Der er anvendt følgende beregningsforudsætninger:

- Ved hydratisering af 1 kg  $C_3S$  dannes 0,487 kg calciumhydroxid.
- Ved hydratisering af 1 kg  $C_2S$  dannes 0,215 kg calciumhydroxid.
- Fuldstændig hydratisering kræver, at v/c-forholdet er større end 0,42. Ved lavere v/c-forhold er den maksimale hydratiseringsgrad (v/c)/0,42. Der regnes, som om alle klinkermineraller opnår samme hydratiseringsgrad.
- Dansk flyveaske indeholder 60%  $SiO_2$ , jf. bilag.
- Lynette-slamaske indeholder 28%  $SiO_2$ , jf. bilag.
- Mikrosilica indeholder 95%  $SiO_2$ .
- Ved omdannelse af 1 kg  $SiO_2$  ved puzzolanreaktion forbruges 1,85 kg calciumhydroxid.

Herefter er restindholdet af calciumhydroxid beregnet for to scenarier. De to scenarier er opstillet for at tage højde for den usikkerhed, der er ved at opstille modeller for carbonatiseringen:

1. Cementen hydratiserer fuldstændigt i forhold til, hvad der muligt med det pågældende v/c-forhold.  $SiO_2$  i de puzzolanske tilsætninger omsættes 100% ved puzzolanreaktion
2. Cementen hydratiserer 85% i forhold til, hvad der er muligt ved det aktuelle v/c-forhold.  $SiO_2$  i flyveaske og slammaske omsættes 60% og  $SiO_2$  i mikrosilica omsættes 100% ved puzzolanreaktion.

Tabel 4.1: *Beregning af carbonatiseringspotentialer for recepter fra stor pakke.*

		<b>AR</b>	<b>A0</b>	<b>A1</b>	<b>A3</b>	<b>A5</b>	<b>A6</b>
Cementtype	-	LAS	NRC	NRC	NRC	ANL	ANL
Cementindhold	kg/m <sup>3</sup>	287,6	286,5	188,6	277,0	398,0	397,2
$C_3S$	%	52	53	53	53	57	57
$C_2S$	%	30	24	24	24	22	22
Flyveaske	kg/m <sup>3</sup>	33,7	32,3	137,4	-	-	-
Slamaske	kg/m <sup>3</sup>	-	-	-	34,7	-	-
Mikrosilica	kg/m <sup>3</sup>	17,4	17,0	17,8	17,0	-	-

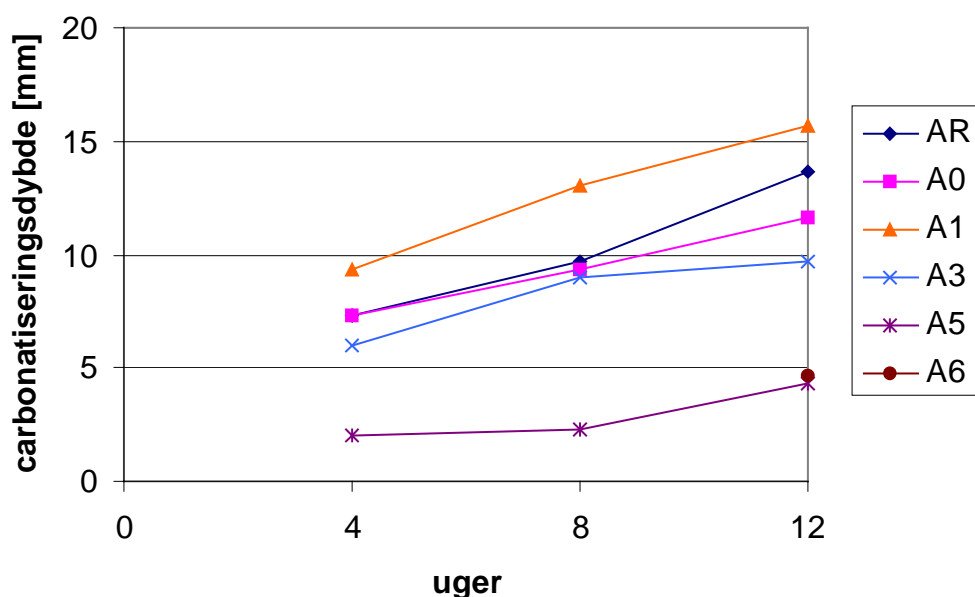
<b>Scenario 1</b>							
Calciumhydroxid dannet ved cementens hydratisering	kg/m <sup>3</sup>	91,4	88,7	58,4	85,8	117,4	114,0
Calciumhydroxid forbrugt ved puzzolanreaktion	kg/m <sup>3</sup>	67,8	65,5	183,1	48,0	0	0
Calciumhydroxid-rest efter puzzolanreaktion	kg/m <sup>3</sup>	23,6	23,2	-124,7 (0)	37,7	117,4	114,0
<b>Scenario 2</b>							
Calciumhydroxid dannet ved cementens hydratisering	kg/m <sup>3</sup>	77,7	75,4	49,6	72,9	99,8	96,9
Calciumhydroxid forbrugt ved puzzolanreaktion	kg/m <sup>3</sup>	52,9	51,2	122,3	40,8	0	0
Calciumhydroxid-rest efter puzzolanreaktion	kg/m <sup>3</sup>	24,8	24,2	-72,7 (0)	32,2	99,8	96,9

Det ses, at der i de to svenske betoner (A5 og A6) er et større indhold af calciumhydroxid pr. m<sup>3</sup> beton, dels fordi cementindholdet er større end i de danske betoner, dels fordi de ikke indeholder puzzolaner, der kan forbruge den dannede calciumhydroxid.

Overslagsberegningen i Tabel 4.1 viser også, at især A1 er følsom overfor carbonatisering, da den indeholder så store mængder puzzolansk materiale i flyveasken, at det potentielt vil kunne forbruge mere end den calciumhydroxid, der dannes ved cementens hydratisering. Således er den beregnede calciumhydroxid-rest i tabellen negativ, selvom resten selvfølgelig aldrig kan blive mindre end 0.

#### Målt carbonatisering

Carbonatiseringen på prøveemner udsat for luft med en forhøjet CO<sub>2</sub>-koncentration (3%), jf. NT-BUILD 357. Resultaterne fremgår af Figur 4.1.

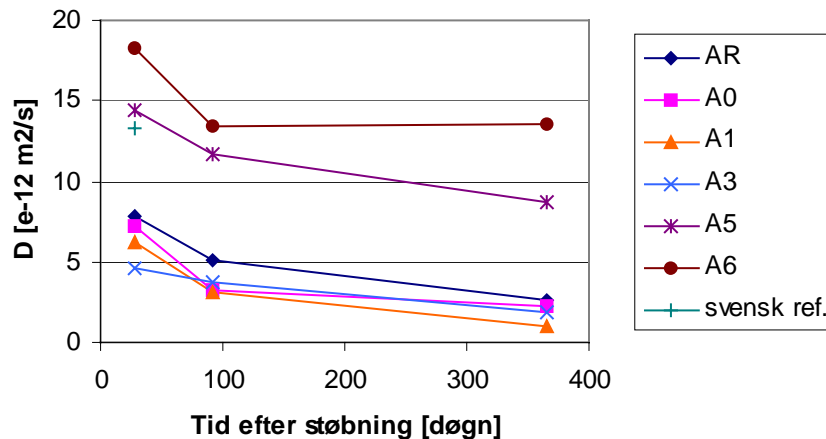


Figur 4.1: Carbonatiseringsdybder målt i henhold til NT-BUILD 357 (beton fra stor pakke).

Figur 4.1 viser, at A1 carboniserer hurtigere end referencebetonerne, carboniseringen af A3 er på niveau med referencebetonerne, mens A5 og A6 har en væsentlig lavere carbonisering (carboniseringsdybden var for A6 0-2 mm til de første to terminer, men fronten var meget diffus og derfor var dybden ikke målbar). Resultaterne støtter konklusionerne af de beregnede carboniseringspotentialer. Dog viser fenolphthalein-prøven, at der for A1 er en høj pH-værdi under det carboniserede område, så i praksis er der stadigvæk calciumhydroxid til stede i betonen.

## 5. Chloridindtrængning

I stor pakke er chloriddiffusionskoefficienten  $D$  målt for alle betoner med CTH-metoden. Målingerne er foretaget til tre forskellige terminer, se Figur 5.1.



Figur 5.1: Chloriddiffusionskoefficienter målt med CTH-metoden henholdsvis 28 døgn, 85 døgn og ca. 1 år efter støbning.

Der findes ikke i de danske standarder (DS 481) krav til betonens modstand mod chloridindtrængning, men CTH-metodens ophavsmand Tang Luping har angivet følgende vejledende værdier for chloriddiffusionskoefficienten målt 28 døgn efter støbning:

- $D < 2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ : *meget god* modstand mod chloridindtrængning
- $D < 8 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ : *god* modstand mod chloridindtrængning
- $D < 16 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ : *moderat* modstand mod chloridindtrængning
- $D > 20 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ : *ikke egnet* i aggressivt miljø

Det ses, at referencebetonen samt A0, A1 og A3 alle kan karakteriseres som havende god chloridmodstand, mens de to svenske betoner (A5 og A6) kun har moderat chloridmodstand. A6 er endda tæt på ikke at være egnet i aggressivt miljø. Den markante forskel mellem de danske og svenske betoner skyldes sandsynligvis i højere grad tre forskelle på traditionel dansk og traditionel svensk betonpraksis, end den skyldes forskelle forårsaget af de anvendte restprodukter:

- Der er forskel på cementernes klinkermineralsammensætning. Klinkermineralet  $C_3A$  kan binde chlorider i Friedels salt. Den svenske cement indeholder kun ca. 2%  $C_3A$ , mens LAS-cementen anvendt i AR indeholder 4% og NRC-cementen i de øvrige recepter indeholder ca. 6%  $C_3A$ .  $C_3A$ s betydning ses af forskellen på chloriddiffusionskoefficienter målt for henholdsvis AR og A0.

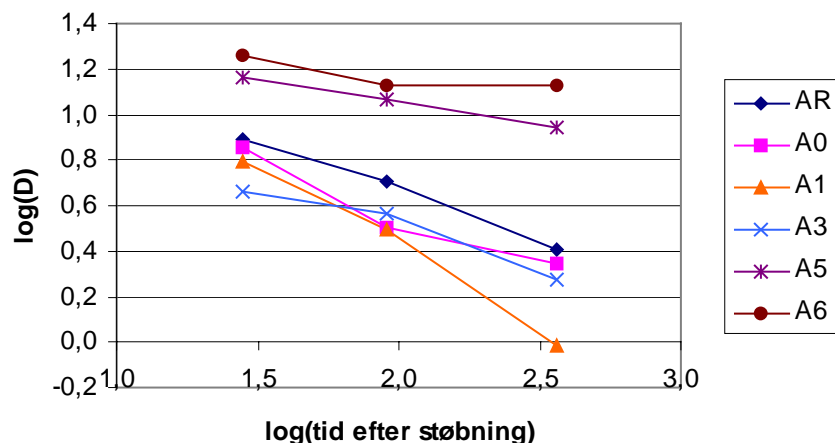
- I AR, A0 og A1 anvendes flyveaske, der er kendt for at have en evne til chloridbinding. Der er ikke flyveaske i de svenske betoner. Det vides ikke i hvor høj grad, slamasken i A3 kan binde chlorider kemisk.
- I de fire danske betoner er der mikrosilica, der giver betonen en meget tæt struktur. Der er ikke mikrosilica i de svenske betoner

At det er forskelle mellem dansk og svensk praksis, der gør sig gældende, understøttes af, at måling af chloriddiffusionskoefficienten på en svensk reference (en beton, Sydsten normalt anvender til aggressivt miljø) også har en diffusionskoefficient, der er højere end koefficienten for de danske betoner.

#### *Diffusionskoefficientens tidsmæssige udvikling*

Det ses af Figur 5.1, at for alle betoner er der forskellig tidsmæssig udvikling. Til den første termin (28 døgn efter støbning) har A3 den laveste chloriddiffusionskoefficient, men til de senere terminer er chloriddiffusionskoefficienterne for A1 den laveste.

I en dobbeltlogaritmisk afbildning bliver  $D$  stort set en lineær funktion af antallet af dage efter støbetidspunktet, se Figur 5.2. Hældningen kan tages som et mål for, hvor hurtigt diffusionskoefficienten aftager. Det ses således, at de svenske betoner A5 og A6 har nogenlunde samme udvikling (samme hældning). De danske betoner AR, A0 og A3 har også sammenlignelige udviklinger, hvor diffusionskoefficienten aftager lidt hurtigere end for de svenske betoner. A1 skiller sig ud med en diffusionskoefficient, der aftager markant hurtigere end nogen af de andre betoner.



Figur 5.2: Chloriddiffusionskoefficienter målt med CTH-metoden henholdsvis 28 døgn, 85 døgn og ca. 1 år efter støbning.

Chloriddiffusionskoefficienten efter et år er et mere korrekt mål for chloridmodstanden i betonens samlede levetid, end en diffusionskoefficient målt efter blot 28 døgn. Men af praktiske grunde er det nødvendigt at kunne måle tidligere end fx et år. Når der så stilles krav til chloriddiffusionskoefficienten målt eksempelvis 28 døgn efter støbning, er det med en forventning om en given tidsmæssig udvikling svarende til "almindelige" A-beton. Hvis den tidsmæssige udvikling er anderledes for nogle af de grønne betoner, bør dette afspejle sig i



kravene stillet til målinger ved 28-døgns terminen. Dette kunne fx udmyntes i mere lempelige krav til diffusionskoefficienten målt ved 28-døgns terminen for beton, der som A1 har et højt flyveaskeindhold.

*Sammenligning af målinger for samme betontype*

Chloridmodstanden, dvs. diffusionskoefficienten, er målt i både grundpakken og stor pakke samt i forbindelse med forprøvning af beton til demonstrationsbroen. Resultaterne er samlet i Tabel 5.1.

Tabel 5.1: *Diffusionskoefficient bestemt vha. CTH-metoden 28 døgn efter støbning. Alle tal er angivet i enheden  $[10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$ .*

	<b>AR</b>	<b>A0</b>	<b>A1</b>	<b>A3</b>
Grundpakken			6,8/6,5 <sup>1</sup>	20,1
Stor pakke	7,8	7,2	6,2	4,6
Forprøvning/bro	6,9	6,0	5,6	3,6

1. Beton med højt flyveaskeindhold blev blandet to gange (kaldet AV4 og AV5), og chloriddiffusionskoefficienten blev målt for begge blandinger. Målingerne er foretaget til afvigende terminer, nemlig henholdsvis 35 og 31 døgn efter støbning.

Det ses, at resultaterne ved forprøvning til demonstrationsbroen er en anelse lavere end i stor pakke, men det ændrer ikke på, at både AR, A0 og A1 kan karakteriseres som betoner med god chloridmodstandsevne, ligesom det ikke ændrer på den indbyrdes placering af betonerne.

Der er noget større forskel mellem målingerne for beton med slammaske, A3, i henholdsvis grundpakken og stor pakke. Det skyldes sandsynligvis, at der har været meget stor forskel på de to typer slammaske, der blev brugt. Asken i grundpakken havde en stor vandabsorption, hvilket gjorde det svært at bestemme den vandmængde, der er til rådighed til cementens hydratisering og dermed det korrekte v/c-forhold. Slamasken i stor pakke ligner i højere grad almindelig flyveaske. Styrkeresultaterne tyder da også på, at der er tale om to vidt forskellige betoner. Således er der i grundpakken målt trykstyrker for A3 på 37 og 43 MPa henholdsvis 28 og 56 døgn efter støbning, hvilket er lavere end grundpakkens referencebeton. I stor pakke er der til samme terminer målt 54 og 64 MPa, hvilket både er højere end styrkerne målt for stor pakkens referencebeton og ca. 20 MPa mere end A3-styrkerne målt i grundpakken. Resultatet fra forprøvning i forbindelse med demonstrationsbroprojektet understøtter, at beton med slammaske har en god chloridmodstandsevne.

## 6. Alkali/kisel-reaktivitet

Der vil potentielt kunne forekomme skadelige alkali/kisel-reaktioner i beton med reaktivt tilslag og alkali, der enten stammer fra betonens delmaterialer eller er trængt ind i betonen på et senere tidspunkt.

I DS 481 er der for beton i aggressivt miljø stillet krav om

- at tilslaget skal være godkendt til denne miljøklasse, hvilket indebærer at det ved laboratorieforsøg er vist, at tilslaget ikke giver anledning til ekspansive reaktioner
- at det ved beregning er eftervist, at betonen på støbetidspunktet højst indeholder  $3,0 \text{ kg/m}^3$  alkali. Ved beregningen skal der benyttes de deklarerede maksimal-værdier. Indholdet af alkali i flyveaske og mikrosilica regnes ikke med, idet disse puzzolaner vides at modvirke udviklingen af alkali/kisel-skader, så denne positive effekt forventes at opveje et evt. alkali-indhold.

I Grøn Beton-projektet overholder tilslaget i alle A-betonerne DS 481s krav og alle betoners alkali-indhold beregnet ifølge DS 481s metode er under  $3,0 \text{ kg/m}^3$ . I Tabel 6.1 er alkali-indholdet beregnet for AR, A0, A1 og A3 jf. recepterne fra stor pakke i bilag 2, idet beregningen ifølge standarden stort set svarer til beregningen af alkali, der stammer fra cementen.

Tabel 6.1: Beregnet alkali-indhold, angivet i  $[\text{kg/m}^3]$ , for de fire betontyper AR, A0, A1 og A3. Indholdet er beregnet både på baggrund af deklarerede og målte værdier.

	Deklareret alkali- indhold	Målt alkali- indhold	AR	A0	A1	A3
Cement						
- LASF	0,3-0,4%	-	1,15			
- rapid	0,5-0,6%	-		1,72	1,13	1,66
Flyveaske	(2,0%)	1,8%	(0,67)/0,61	(0,65)/0,58	(2,75)/2,47	
Slamaske	(3,5%)	3,0%				(1,21)/1,04
Total dekl./målt			(1,82)/1,76	(2,37)/2,30	(3,88)/3,60	(2,88)/2,70

Det er imidlertid ikke givet, at DS 481s retningslinier er fuldstændigt fyldestgørende, når der laves radikale ændringer af binderfasen. I Tabel 6.1 er det forsøgt at medregne alkali, der stammer fra flyveaske og slamaske. Der findes ikke deklarerede maksimal-værdier for disse delmaterialer, så beregningerne er derfor dels udført med en målt værdi, jf. bilag 1, dels med en estimeret deklareret maksimal-værdi, der tager højde for variationer i produktionen.

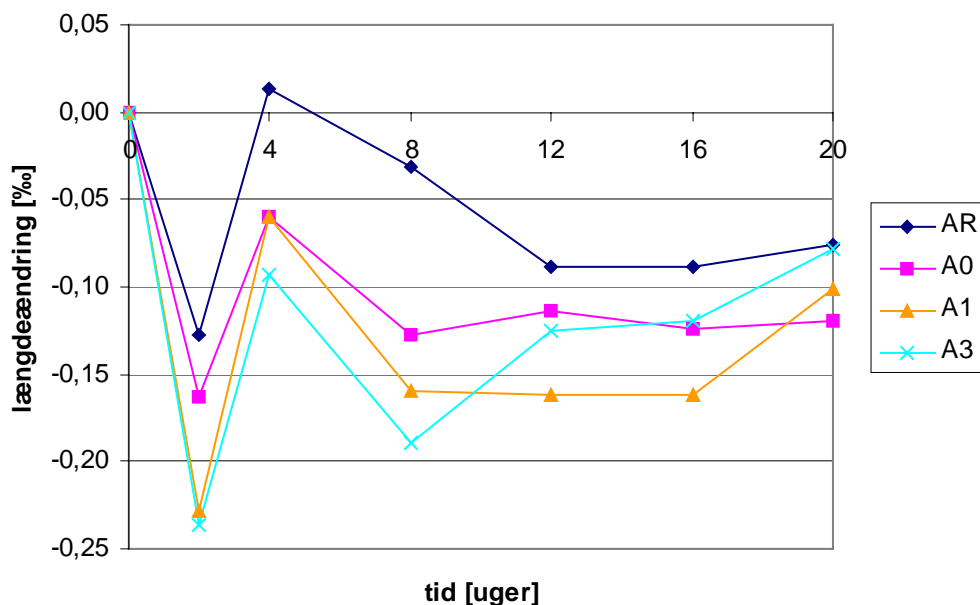
Det ses, at for A1 er alkali-bidraget fra flyveasken ca.  $2\frac{1}{2}$  gange større end bidraget fra cementen, og det samlede alkali-indhold er væsentligt større end  $3,0 \text{ kg/m}^3$ . Når flyveasken udgør 40% af pulvermængden, er man udenfor DS 481s erfaringsområde, og det er således relevant at spørge, om det er tilladeligt at negligere hele flyveaskens alkali-bidrag.

For A3 gælder, at det samlede alkali-indhold nærmer sig  $3,0 \text{ kg/m}^3$ , for selvom indholdet af slamaske er moderat, indeholder slamasken ca. 5 gange så meget alkali pr. kg som cementen. Desuden vides det ikke, om slamasken generelt kan ændre på den måde, alkali-kiselreaktioner forløber i betonen, herunder fremme en eventuel skadesudvikling.

Tilsvarende beregninger er ikke udført for A5 og A6, da der her kun ændres på tilslaget, ikke på binderfasen, og de nye tilslag, betonslam og stensmel, forventes ikke at være reaktive.

Der findes ikke nogen standardiseret metode til at undersøge bindersammensætningens betydning for udvikling af alkali/kisel-skader. Men når det skal eftervises, at sand til betonproduktion ikke giver anledning til skader, er det normalt at bruge en metode, der bygger på måling af mørtelekspansion, fx TI-B 51. Her blandes sandet i en standard-mørtel, hvor mængden af vand, cement og sand er givet, og udstøbes i prismer, der efter ca. 1 måned placeres i en  $50^\circ\text{C}$  varm, mættet NaCl-opløsning. Herefter følges prøveemnernes længdedeformationer over en længere periode, idet ekspansion tolkes som tegn på, at sandet er reaktivt.

I dette projekt er binderens betydning søgt belyst ved forsøg med en modificeret TI-B 51. Prismerne er udstøbt med sand, der på forhånd vides at være reaktivt (True-sand). TI-B 51s mørtelrecept er modificeret, så pulverets volumen er holdt konstant, men i stedet for ren cement er der anvendt pulver med samme procentvise sammensætning som pulveret i de grønne betoner i stor pakke. En måned efter støbning er prøveemnerne blevet målt og herefter overført til  $35^\circ\text{C}$  varmt vand (ingen NaCl). Længdeændringerne fremgår af Figur 6.1.



Figur 6.1: Målte længdeændringer i mørtler med reaktivt sand.

Det ses, at alle de testede mørtler har en negativ længdeudvidelse, dvs. der er en netto kontraktion over 20 uger. Referencemørtlen svarende til ARs bindersammensætning er den mørtel, der trækker sig mindst sammen, men generelt må længdedeformationerne dog siges at være på samme niveau for alle mørtler. Idet ingen mørtler viser tegn på ekspansion, vurderes det, at ingen af de grønne beton-typer vil give anledning til større problemer med alkali/kiselreaktioner end referencebetonen. Det ser således ud til, at kravene i DS 481 er tilstrækkelige, og at det ikke er nødvendigt at medregne alkali-indholdet i puzzolanske tilsætninger, selv ved høje flyveaskeindhold.

## 7. Sulfatbestandighed

Problemet ved sulfatangreb er, at sulfat reagerer med cementens indhold af  $C_3A$ , hvorved der dannes nogle ekspansive reaktionsprodukter. Når sulfat trænger ind fra det omgivende miljø kan det derfor føre til længdedeformationer af betonen. Der findes prøvningsmetoder, hvor betonens bestandighed overfor indtrængende sulfater netop testes ved at registrere betonens længdeændringer. Der findes imidlertid ikke standardiserede prøvningsmetoder til at vurdere betons sulfatbestandighed, hvis sulfaten tilsættes på blandetidspunktet. Her tænkes på sulfat ud over den mængde, der tilsættes i form af gips i cementen.

Normalt anses sulfatbestandigheden for at være sikret, hvis cementens indhold af  $C_3A$  er mindre end 5%.

### 7.1 A-beton med rapidcement

Rapidcementen har et deklareret  $C_3A$ -indhold på 6%, hvilket er lidt højere end grænsen for cement med høj sulfatbestandighed (5%). Beton med rapidcement har derfor kun moderat sulfatbestandighed. Beton indeholder en begrænset mængde sulfat, der stammer fra cementens indhold af gips. Normalt kræves dog et langt større indhold, før der opstår skader, og indtrængende sulfater er derfor en nødvendig betingelse for de skadelige reaktioner.

Sulfatbestandigheden er ikke undersøgt i Grøn Beton-projektet. Producenten af rapidcement – Aalborg Portland – vurderer, at sulfatbestandigheden kun vil være et problem, hvis betonen udsættes for store mængder sulfat fra omgivelserne. Dette vil kun være tilfældet for et begrænset antal konstruktioner i aggressivt og ekstra aggressivt miljø, fx konstruktioner i havvand eller fundamenter i sulfatholdig jord. Dette er betingelser, der kendes på det tidspunkt, hvor bygværket opføres, og som det derfor er muligt at tage højde for.

Der er ikke i DS 481 stillet krav til cementens indhold af  $C_3A$  og dermed for betonens sulfatbestandighed. Det er således muligt at benytte rapidcement i både aggressiv og ekstra aggressiv miljøklasse med det nuværende regelgrundlag. Vejdirektoratet har dog i sin *Vejreglernes Almindelige Arbejdsbeskrivelse for Betonbroer (AAB)* valgt at opretholde et krav om anvendelse af sulfatbestandig cement til alle konstruktioner i de to nævnte miljøklasser.

### 7.2 Beton med slamaske

Sulfat i betonens delmaterialer er selvfølgelig uønsket på lige fod med sulfat, der trænger ind fra det omgivende miljø. Slamaskens indhold af sulfat varierer afhængigt af kilden. Således var indholdet af  $SO_3$  på 0,21% i stor pakke (aske fra Lynetten), mens det var næsten 10 gange så stort, 2,01%, i udvidet pakke og demonstrationsbroen (aske fra Avedøre). I flyveaskestandard DS/EN 450 er der stillet krav om, at flyveaske ikke må indeholde mere end 3,0%  $SO_3$ . Indholdet i slamasken må således umiddelbart vurderes at være uproblematisk.

For A3-beton er der foretaget en mineralogisk undersøgelse på tyndslib for betonen fra stor pakke, hvor prøven er udtaget ca. 1 år efter støbning. I stor pakke blev der støbt nogle klodser på ca. 1 m<sup>3</sup>, der efterfølgende blev opstillet på et udendørs areal på Teknologisk Institut. Den udtagne prøve stammer således fra beton, der har været eksponeret for almindeligt vejrlig, incl. en vintersæson, men som ikke er blevet saltet.

Undersøgelsen viser en beton med nogen ettringit i luftporene, men dog ikke mere, end hvad der ofte ses i konstruktionsbeton, og som må betragtes som værende almindeligt. På det tidspunkt, hvor prøven blev udtaget, var slamaskens sulfater bundet i calcium- og fosfat-faser. Kendskabet til disse faser er ikke særligt stort, og det vides ikke, hvor stabile de er over tid og hvilke faktorer, der kan påvirke de ligevægte, faserne indgår i. I værste fald kan sulfaterne frigives på et senere tidspunkt og reagere med C<sub>3</sub>A til skade for betonen. Dette aspekt bør undersøges nærmere. Hvis det viser sig at være et problem, vil det sandsynligvis kunne forebygges ved at bruge sulfatbestandig cement.

## 8. Tyndslibsanalyse

For alle recepter i stor pakke er der udført tyndslibsanalyse. Resultaterne fremgår af Tabel 8.1.

Tabel 8.1: Resultater af mikroanalyse ved tælling på tyndslib (jf. TI-B5). Betonerne stammer fra stor pakke.

		<b>AR</b>	<b>A0</b>	<b>A1</b>	<b>A3</b>	<b>A5</b>	<b>A6</b>
Pastarevner	[antal/mm <sup>2</sup> ]	0,77 nogle	0,76 nogle	0,40 få	1,33 mange	0,74 nogle	0,36 få
Vedhæftningsrevner og -defekter	[antal/mm <sup>2</sup> ]	0,38 lidt	0,52 nogle	0,24 få	0,76 nogle	0,64 nogle	0,28 få
Pastainhomogenitet	[karakter]	0,2 lidt	0,2 lidt	0,0 ingen	0,0 ingen	0,2 lidt	0,1 lidt
Reaktivitetstegn	[antal]	0 ingen	1 få	0 ingen	0 ingen	0 ingen	0 ingen
Dispergeringsfejl	[karakter]	0,0 ingen	0,0 ingen	0,0 ingen	0,0 ingen	0,0 ingen	0 ingen

Det bemærkes, at A3 har et større antal pastarevner end de øvrige betoner, men både carbonatiserings- og chloridtest viser, at A3 er en tæt beton, så i holdbarhedsmæssig henseende er dette ikke alarmerende.

Der er ingen reaktivitetstegn. Dette er et forventeligt resultat, da alle prøver er udtaget fra støbte cylindre, der ikke har været udsat for et alkaliholdigt miljø. Tyndslibsundersøgelsen understøtter i øvrigt undersøgelsen af alkali-reaktivitet i kapitel 6, der heller ikke tydede på skadelig alkali-reaktivitet.

Når et nyt restprodukt tages i anvendelse, er det en naturlig overvejelse, om dette restprodukt vanskeliggør blanding og udstøbning. I de grønne betoner i dette projekt er der i alle recepter anvendt superplastificering. Dette ser ud til at være en tilstrækkelig forholdsregel. De grønne betoner viser ikke tegn på større problemer med vedhæftningsrevner- og defekter, pastainhomogenitet eller dispergeringsfejl end referencebetonerne.

## 9. Konklusion

I nærværende rapport er der fokuseret på de grønne A-betoner. Det er en bevidst afgrænsning, at P-betoner ikke indgår i undersøgelsen, da de fleste skadesmekanismer fordrer et fugtigt miljø, og det vil der typisk ikke være i det miljø, P-betonerne anvendes i. En undtagelse er P-betoner til fundamenter. Det er således ikke muligt på det nuværende grundlag at afgøre, om de grønne betoner er velegnede til fundamenter.

For de testede betoner er der følgende sammenfattende kommentarer:

### *Referencebetonerne AR og A0*

De to betoner har vist sig at være meget ens på de testede områder: frostbestandighed, carbonatisering, chloridmodstand og alkali-kisel reaktivitet. På alle fire områder viste AR og A0 gode holdbarhedsegenskaber. Dette var forventet for AR, der i forvejen anvendes i aggressiv miljøklasse. Og det var indirekte også forventet for A0, da det på forhånd var vurderet, at det på de testede holdbarhedsområder ikke ville have stor betydning at skifte lavalkali-, sulfatbestandig cement ud med rapid cement.

A0s sulfatbestandighed er ikke testet. Den er givetvis ikke helt så god som ARs, men rapidcement vil kunne anvendes i aggressivt og ekstra aggressivt miljø, hvis der ikke decideret er tale om konstruktioner, der udsættes for stærkt sulfatholdige omgivelser (fx havvand eller mosejord).

### *A1*

Undersøgelser af betonen med højt flyveaskeindhold (40% af pulvermængden) afdækkede flere holdbarhedsproblemer.

I grundpakken og stor pakke (og til dels også senere i projektet) var der problemer med frostbestandigheden. Det er svært at styre A1s luftporestruktur præcist. I blandingerne i grundpakken og stor pakke var luftindholdet på niveau med referencebetonerne, men luftporestrukturen var meget grovere og gav derfor ikke den samme beskyttelse, hvorfor A1 havde en helt uacceptabel høj afskalning i den accelererede frost/tø-test. I udvidet pakke og i demonstrationsbro-projektet blev der skiftet til et andet superplastificeringsmiddel, idet der var mistanke om inkompatibilitet med luftindblandingsmidlet. Her viste betonen god frostbestandighed ved den accelererede frost/tø-test for to ud af tre sæt prøveemner. Målinger af luftporestrukturen viste også, at det er muligt at frembringe en tilstrækkelig fin luftporestruktur (afstandsfaktor ned til 0,13 mm for støbte cylindre), men det kræver en ekstra indsats at justere recepten ind – det er ikke nok blot at gøre, som man plejer at gøre med konventionel beton.

Erfaringerne med A1s frostbestandighed stemmer med erfaringer, der er refereret i litteraturen, fx /13/. De viser, at det i andre undersøgelser er lykkedes at fremstille beton med højt flyveaskeindhold, der er frostbestandig, men at det kræver en tilfredsstillende luftporestruktur. Det kan imidlertid være svært at opnå den ønskede luftporestruktur og forskellige flyveasketyper kan have meget forskellig effekt.



Foruden frostproblematikken viste A1 sig også mere udsat for carbonisering end referencebetonerne. Til gengæld er der målt en god chloridmodstand for A1, der opnås fordi A1 er en tæt beton (på grund af mikrosilicatilsætningen) hvor chloridernes indtrængning ydermere hindres af at de bindes kemisk af flyveasken. Mht. alkali-reaktivitet adskiller A1 sig ikke fra referencebetonen.

### A3

Måling af afskalning i frostforsøg i stor pakke med den reviderede SS 13 72 44 viste, at A3 opfylder DS 481s krav til maksimal afskalning, når frost-tø belastningen påbegyndes 31 døgn efter støbning. At dømme efter afskalningen blev betonen vurderet som *meget god*, men det var bemærkelsesværdigt, at afskalningen blev forøget, når belastningen blev igangsat til et senere tidspunkt. Således opfyldte carboniserede prøveemner, udsat for frost-tø belastning 59 døgn efter støbning, ikke DS 481 krav. Problemer med frostbestandigheden skyldes en forholdsvis grov luftporestruktur. Afstandsfaktoren på 0,30 opfylder således ikke DS 481s krav.

Frostbestandigheden blev også undersøgt i udvidet pakke. Her var luftporestrukturen forbedret væsentligt (afstandsfaktor = 0,13), og frostbestandigheden målt som afskalning var *meget god*. Der var ingen tegn på, at frostbestandigheden forringes med tiden.

Desuden viste A3 carbonisering og alkali-reaktivitet på niveau med referencebetonerne og en chloridmodstand, der er en anelse bedre end referencebetonerne.

Slamaskens sulfatindhold varierer afhængigt af kilden. Sulfatindholdet i de asker, der er anvendt i stor og udvidet pakke samt i demonstrationsbroen opfylder de krav til sulfatindhold, der stilles til konventionel flyveaske. Sulfaten er imidlertid bundet i nogle faser, hvis stabilitet er ukendt. Prøveemner undersøgt et år efter udstøbning viser, at sulfaten stadigvæk er bundet, men det vides ikke, om den kan frigives på et senere tidspunkt. Umiddelbart ser sulfatbestandighed således ikke ud til at være et problem, men emnet bør undersøges nærmere.

### A5

A5 viste god frostbestandighed, betydelig mindre carbonisering end referencebetonerne, men kun en moderat chloridmodstand. Chloridmodstanden skønnes dog at være som for andre svenske A-betoner, og er således ikke påvirket negativt af det anvendte betonslam.

### A6

A6 viste god frostbestandighed målt som afskalning, både med 50% og 100% flyveaske (resultater fra henholdsvis stor og udvidet pakke), til trods for at luftindholdet er moderat og afstandsfaktoren høj. A6s carbonisering er ubetydelig, mens den målte chloriddiffusionskoefficient er høj og på grænsen til at diskvalificere betonen til brug i aggressivt miljø.

## 10. Referencer

- [1] DS 411: Norm for betonkonstruktioner
- [2] DS/EN 450: Flyveaske til beton - Definitioner, krav og kvalitetsstyring
- [3] DS/EN 197-1: Cement – del 1: S sammensætning, specifikation og overensstemmelseskriterier for almindelige cementer
- [4] Soroka, I.: Portland Cement Paste and Concrete, The macmillan Press Ltd. (1979)
- [5] Luping, T.: Modified Slab Test. Test Method for the Freeze-Thaw resistance of Concrete - Scaling and Cracking, SP, Borås (1999)
- [6] prEN 480-1: Admixtures for concrete, mortar and grout - Test methods - Part 11: Determination of air void characteristics in hardened concrete (1997)
- [7] NT-BUILD 357: Concrete, repairing materials and protective coating: Carbonation resistance
- [8] Evaluation of the Rapid Test Methods for Measuring the Chloride Diffusion Coefficients of Concrete. Appendix 1: The CTH Rapid Test, version used in round robin test of the Nordtest project No. 1388-98, SP Rapport 1998:42, SP (1998)
- [9] TI-B51: Sands alkalikiselreaktivitet
- [10] TI-B5: Strukturanalyse i forbindelse med kvalitetskontrol
- [11] Utgenant, P.: Field and laboratory testing of salt-frost resistance of concrete, Proceedings, Nordic Concrete Research Meeting, Iceland, s. 360-362 (1999)
- [12] DS 481: Beton - Materialer
- [13] Malhotra, V.M., og Ramezaniapour, A.A.: Fly ash in concrete, 2. ed., CANMET (1994)