



# Center for Grøn Beton

## Udførelse Hovedrapport

***Udført af:***

*Marianne Tange Hasholt  
Anette Berrig*

*Teknologisk Institut, Beton, december 2002*

Titel: Udførelse  
Hovedrapport

Udført af: Marianne Tange Hasholt  
Anette Berrig

Dato: December 2002

ISBN: 87-7756-694-7

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>5</b>
2.1 PRØVNINGSOMFANG.....	5
2.1.1 Grundpakken .....	5
2.1.2 Stor pakke.....	5
2.1.3 Udvidet pakke.....	5
2.1.4 Demonstrationsbro-projektet .....	6
2.2 RECEPTER.....	6
<b>3. BEARBEJDELIGHED .....</b>	<b>8</b>
<b>4. VANDSEPARATION OG HOMOGENITET .....</b>	<b>10</b>
<b>5. LUFTINDHOLD.....</b>	<b>12</b>
5.1 LUFTENS STABILITET OVER TID.....	12
5.2 LUFTPORESTRUKTUR .....	12
5.3 PRODUKTIONSERFARINGER .....	13
5.4 LUFTENS STABILITET AFHÆNGIGT AF VIBRERINGSGRAD.....	14
<b>6. STØBEEGENSKABER .....</b>	<b>16</b>
6.1 BEDØMMELSE AF BETONENS STØBEMÆSSIGE KVALITETER .....	16
6.2 TID TIL GLITNING KAN PÅBEGYNDES .....	16
6.3 FINISH.....	17
6.4 KVALITET AF BETON Udstøbt i lag .....	17
<b>7. AFBINDING.....</b>	<b>19</b>
<b>8. PLASTISK SVIND .....</b>	<b>22</b>
<b>9. HÆRDEEGENSKABER.....</b>	<b>25</b>
9.1 TEMPERATURUDVIKLING.....	25
9.2 SPÆNDINGSUDVIKLING.....	27
<b>10. KONKLUSION.....</b>	<b>28</b>
<b>11. REFERENCER.....</b>	<b>32</b>

# 1. Indledning

Denne rapport indeholder samtlige resultater fra Grøn Beton-projektet, der vedrører de grønne betoners udførelsmæssige egenskaber. Det drejer sig både om resultaterne fra de tre prøvningspakker *grundpakken*, *stor pakke* og *udvidet pakke*, hvor udførelsesgruppen (BK3) har tilrettelagt prøvningen vedrørende udførelse, samt resultater opnået i forbindelse med demonstrationsbroprojektet.

## 1.1 Formål

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

Det er en forudsætning for at kunne anvende de grønne betoner i praksis, at deres udførelsmæssige egenskaber er veldokumenterede, så der kan tages højde for eventuelle forskelle i forhold til traditionel beton. Ved *udførelsmæssige egenskaber* forstås både den friske og den hældende betons egenskaber samt eventuelle særlige krav til udførelsesteknik.

## 1.2 Rapportens opbygning

Rapporten er opbygget på følgende måde:

- I kapitel 2 gives et overblik over prøvningsomfanget i de tre prøvningspakker samt demonstrationsbro-projektet. Der findes desuden en oversigt over de recepter, der indgår i undersøgelserne.
- Kapitel 3-9 behandler de opnåede resultater vedrørende friskbetonegenskaber, støbeegenskaber og hærdeegenskaber.
- Rapporten afsluttes i kapitel 10 med nogle generelle konklusioner samt en kort sammenfatning af erfaringerne med de enkelte betontyper.

## 2. Forsøgsprogram

### 2.1 Prøvningsomfang

#### 2.1.1 Grundpakken

Formålet med grundpakken var at screene et bredt spektrum af grønne betoner for at kunne vælge de mest lovende til videre udvikling og undersøgelser i de følgende prøvningspakker. Derfor har hver beton gennemgået et forholdsvist begrænset forsøgsprogram bestående af simple, standardiserede prøvningsmetoder. Med hensyn til udførelsmæssige egenskaber er der målt:

- sætmål og sætmålsændring (DS 423.12)
- vandseparation (DS 423.18)
- homogenitet, dvs. vægtforskel mellem top og bund af hærdnet betoncylinder (DS 423.35)
- luftindhold og luftindholdsændring (DS 423.15)
- varmeudvikling (DS 423.37)
- afbindingstid (DS 423.17)

#### 2.1.2 Stor pakke

I stor pakke er der udført følgende standardiserede prøvning:

- sætmål og sætmålsændring (DS 423.12)
- luftindhold og luftindholdsændring (DS 423.15)

I stor pakke var det primært beskrivelsen af betonens støbeegenskaber samt vurderingen af samspillet mellem støbeegenskaber og udførelsesteknik, der var i fokus. Der findes ingen standardiserede metoder til en sådan undersøgelse. I stedet er der udført følgende:

- subjektiv vurdering af støbeegenskaber (fx betonens sammenhæng og om den er svær at glitte)
- måling af den krævede vibreringstid for opnåelse af korrekt komprimering af betonen
- måling af tid fra betonen er blandet til den er klar til glitning
- vurdering af finish mod forside
- vurdering af finish af glittet opside
- vurdering af betonens stabilitet ved henholdsvis over- og undervibrering foretaget ved hjælp af undersøgelser af betonens makro- og luftporestruktur
- måling af styrken af støbeskel mellem to lag beton afhængigt af betonens alder ved udstøbning (nederste lag blev udstøbt umiddelbart efter blanding, mens øverste lag blev udstøbt 0, 90 eller 120 minutter efter blanding).

#### 2.1.3 Udvidet pakke

I udvidet pakke er betonernes følsomhed overfor plastisk svind og deraf følgende behov for udtørringsbeskyttelse undersøgt, og der er i den forbindelse udført:

- registrering af plastiske svindrevner vha. måling af poreundertryk
- måling af varmeudvikling (DS 423.37)

Forsøgene er udført på laboratorieblandinger. Selvom der er udført målinger af sætmål og bearbejdelighed, er disse resultater ikke medtaget i denne rapport, da de ikke er direkte sammenlignelige med rapportens øvrige resultater, der er for betoner blandet på fabrik.

Foruden ovenstående undersøgelser, er der for en enkelt beton bestemt alle de egenskaber for den hærdende beton (bl.a. temperaturudvidelseskoefficient og krybning i tidlig alder), der er nødvendige for at kunne simulere temperatur- og spændingsudvikling i den udstøbte beton. Disse parametre er benyttet til at simulere en brodæk-støbning for den pågældende beton.

#### **2.1.4 Demonstrationsbro-projektet**

Forprøvning af recepterne til demonstrationsbroen er stort set opfyldt med gennemførelsen af de tre prøvningspakker i Grøn Beton, og der er med hensyn til udførelsesegenskaber ikke udført supplerende prøvning. Til gengæld findes der fra prøvestøbning og brostøbninger i øvrigt et stort antal målinger af sætmål og luftindhold i den friske beton, der giver en indikation af variationen af betonens egenskaber, når den indgår i almindelig produktion.

## **2.2 Recepter**

I grundpakken blev der afprøvet forskellige restprodukter i både P- og A-betoner. Typisk blev der blandet en referencebeton uden det pågældende restprodukt og dernæst 2-4 betoner med forskellige doseringer af restproduktet. På den baggrund gik den samlede set bedst egnede beton videre til stor pakke.

Ikke alle grundpakkens betoner og deres betegnelser vil blive gennemgået her, da det omfatter et meget stort antal betoner (ca. 35). Efter grundpakken fik de betoner, der gik videre, nye betegnelser. Disse betegnelser er benyttet i Stor pakke og frem til Grøn Beton projektets afslutning, og det er også disse betegnelser, der er anvendt i denne rapport:

- Pref: Referencebeton, dvs. almindeligt anvendt recept til passiv beton med en karakteristisk styrke på 20 MPa.
- P2: Passiv beton, hvor flyveaske udgør 50% og en specialfiller bestående af ovnstøv udgør 10% af pulverbemængden.
- P3: Passiv beton, hvor 50% af flyveasken er erstattet med slammaske fra forbrænding af spildevandsslam.
- P5: Passiv beton, hvor blandevandet stammer fra betonslam. Betonslammets tørstof erstatter en del af sandfraktionen.
- P6: Passiv beton, hvor stenmel fra Dalby erstatter sandet.
- P7: Passiv beton med alternativ flyveaske fra biobrændsel svarende til 30% af pulverbemængden.

Aref: Referencebeton, dvs. almindeligt anvendt beton til aggressiv miljø med en karakteristisk styrke på 35 MPa. Aref er blandet med lavalkali-, sulfatbestandig cement.

- A0: A0 er identisk med Aref, bortset fra at cementen er skiftet ud med en rapidcement.
- A1: A-beton med rapidcement og et højt flyveaskeindhold. Flyveasken udgør 40% af den samlede pulvervægt.
- A3: A-beton med rapidcement og hvor flyveasken er erstattet 100% af slammaske.
- A5: A-beton, hvor blandevandet stammer fra betonslam. Betonslammets tørstof erstatter samtidigt en del af betonens sandfraktion.
- A6: Beton, hvor stenmel fra Hardeberga erstatter 50% af sandfraktionen.. I udvidet pakke blev andelen af stenmel dog ændret, så stenmelet i udvidet pakke fuldstændigt erstatter sandet.

Nogle af betonerne er blandet hos Unicon i Danmark (Pref, P2, P3, P5, Aref, A0, A1, A3), mens resten er blandet hos Sydsten i Sverige (P6, P7, A5 og A6). Da der til alle betoner ud over de respektive restprodukter er anvendt de materialer, der i øvrigt anvendes på fabrikken, betyder det, at der er forskel på cementtype, tilslag og tilsætningsstoffer. Det er derfor ikke i alle tilfælde muligt at sammenligne resultaterne direkte.

### 3. Bearbejdelighed

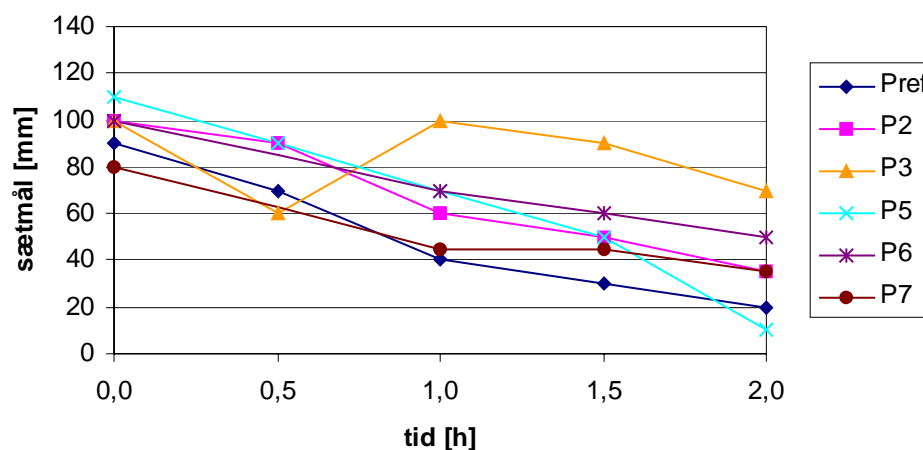
Bearbejdelighed er vel nok den mest iøjnefaldende friskbetonegenskab, og samtidigt er det den væsentligste styringsparameter på betonfabrikken.

I grundpakken, stor pakke og udvidet pakke er der sigtet efter et sætmål umiddelbart efter blanding på  $100 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ . Dette sætmål kan opnås for alle betoner ved at justere mængden af tilsætningsstoffer.

Hvor de danske referencebetoner alene er blandet med plastificeringsmiddel, er det for flertallet af de grønne betoner blandet i Danmark tillige nødvendigt at benytte et superplastificeringsmiddel for at opnå det ønskede sætmål. For de svenske betoner gælder, at hvor udgangsrecepten uden restprodukt indeholder superplastificeringsmiddel, så har det været nødvendigt enten at supplere med plastificeringsmiddel eller at øge doseringen af superplastificering. Således er mængden af tilsætningsstoffer øget i:

- beton med store mængder flyveaske, P2 og A1
- beton med slamaske, P3 og A3
- beton med betonslam, P5 og A5
- beton med stensmel, P6 og A6
- beton med 30% alternativ flyveaske, P7

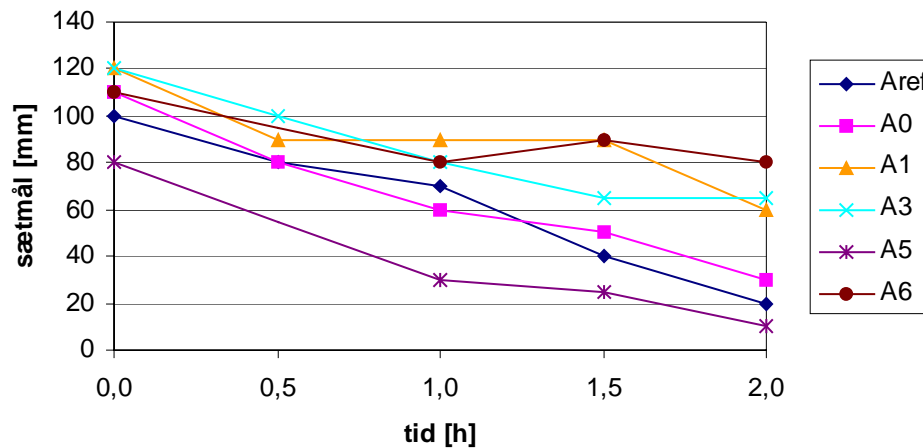
Det er ikke kun vigtigt, hvordan bearbejdeligheden er umiddelbart efter blanding, det er også vigtigt, hvordan bearbejdeligheden ændres som funktion af tid. I stor pakke er bearbejdeligheden målt hver halv time frem til 2 timer efter blanding. Resultaterne fremgår af Figur 1 og Figur 2 for henholdsvis P- og A-betoner.



**Figur 1:** Sætmålstab for P-betoner i stor pakke. Signaturforklaring (Pref, P2 osv.) findes i afsnit 2.2.

Det ses, at de grønne P-betoner har nogenlunde samme forløb som referencebetonen. For P3 (beton med slamaske) falder målingen foretaget en halv time efter blanding dog markant

udenfor det forløb, der ellers er registreret, og hvis man ser bort fra dette ene målepunkt, ser det ud til, at betonen kan holdes levende længere end referencebetonen. Modsat ser beton med betonslam, P5, ud til at miste bearbejdeligheden fuldstændigt mellem 1½ og 2 timer efter blanding.

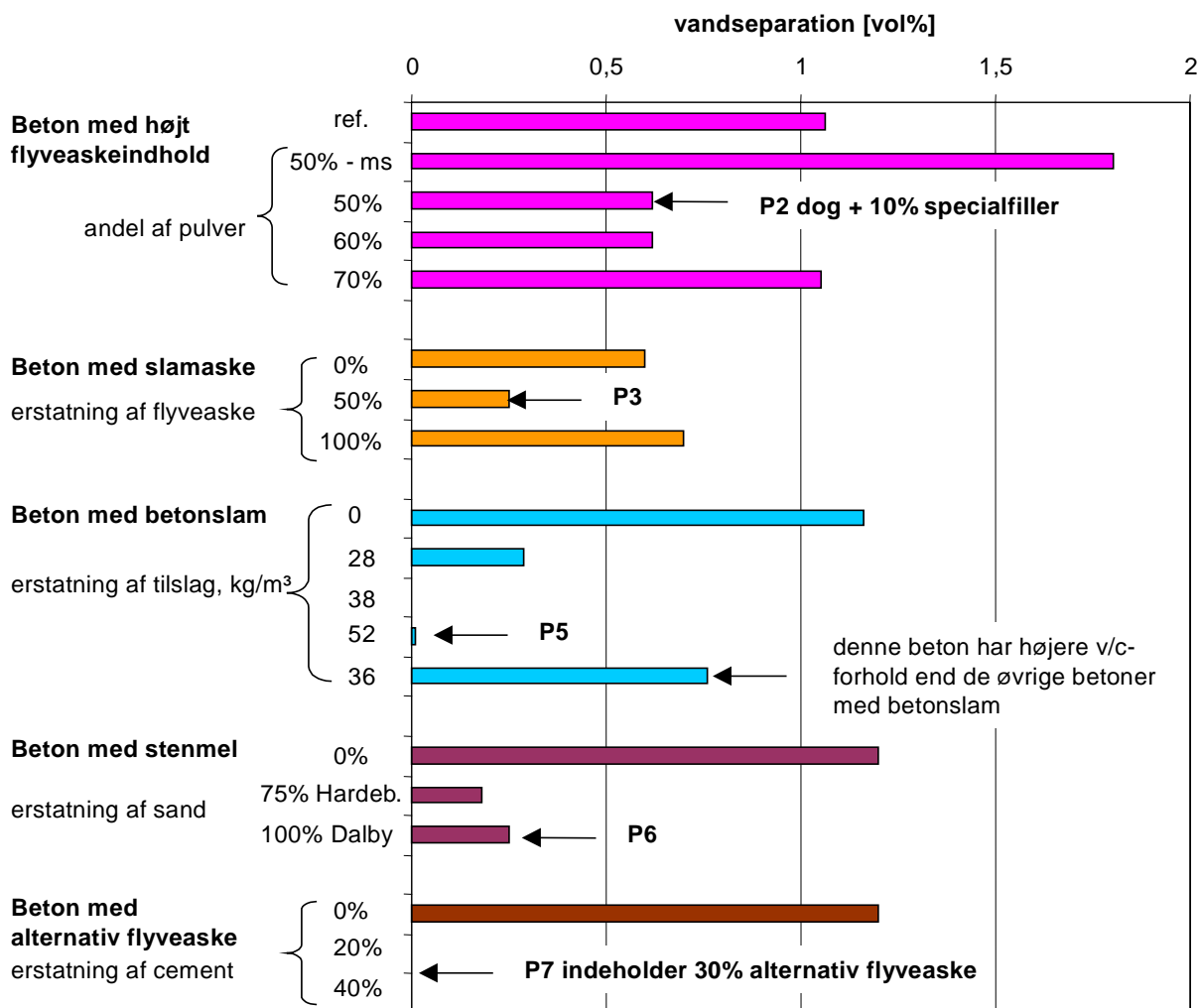


**Figur 2:** Sætmålstab for A-betoner i stor pakke. Signaturforklaring (Aref, A0 osv.) findes i afsnit 2.2.

Billedet for A-betonerne er noget spredt. A1, A3 og A6, der alle er betoner med mere superplast end i udgangsrecepterne uden restprodukter, har et langsommere sætmålstab end referencen. For beton med betonslam, A5, er der et hurtigere tab af bearbejdelighed, til trods for at også denne beton har et forøget indhold af tilsætningsstoffer. Således er sætmålet 1 time efter blanding bare 30 mm, hvilket er mere end en halvering af det oprindelige sætmål. Dette kan betyde, at man ved praktisk brug af betonen vil opleve store sætmålsvariationer ved støbning, hvis tiden fra blanding til anvendelse på byggepladsen blot varierer lidt fra batch til batch.

## 4. Vandseparation og homogenitet

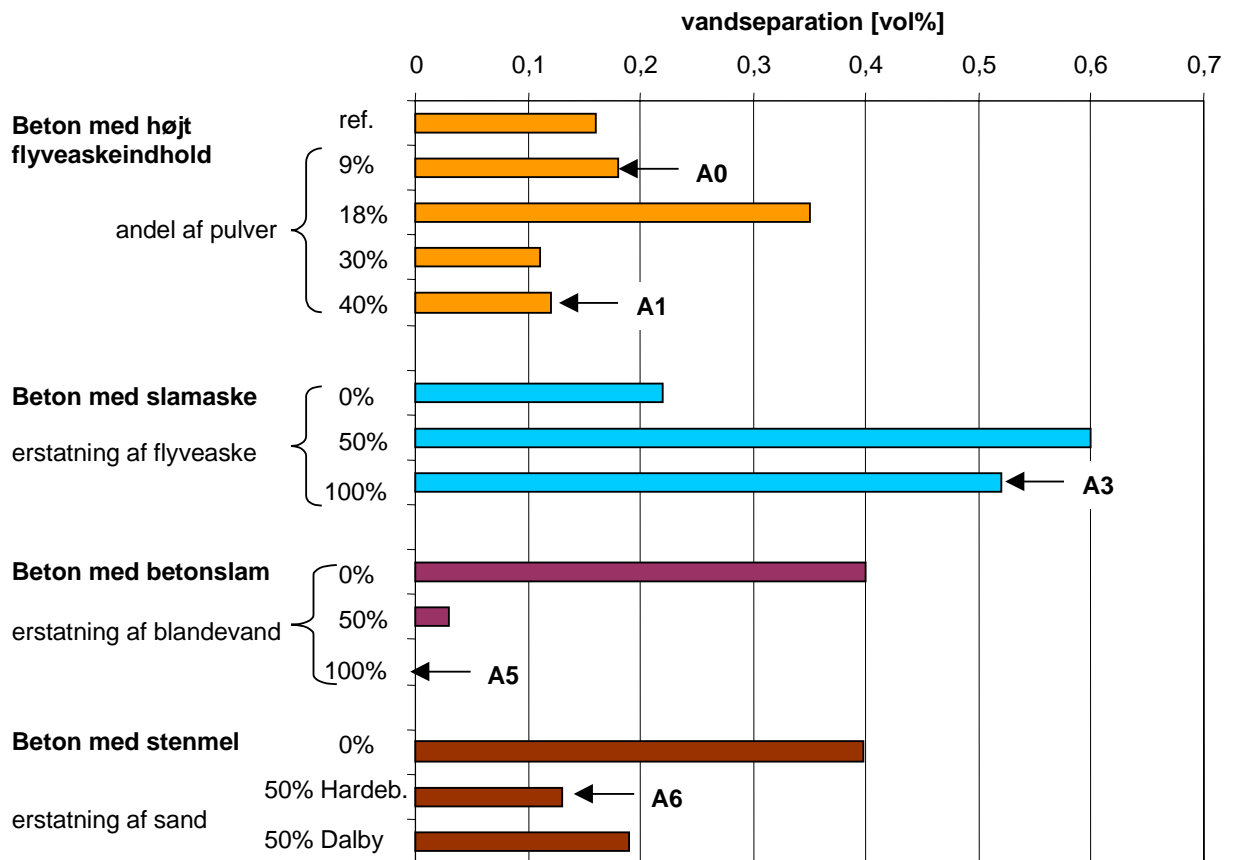
I grundpakken blev der målt vandseparation på samtlige betoner, se Figur 3 og Figur 4.



**Figur 3:** Vandseparation målt for P-betoner.

De danske betoner indeholder som udgangspunkt puzzolaner, dvs. flyveaske og mikrosilica. Det gør de svenske betoner som udgangspunkt ikke, og det viser sig at netop puzzolanerne gøre en stor forskel. I P-beton med et højt indhold af flyveaske stiger vandseparationen, hvis mikrosilicaen fjernes, men er ellers lavere for doseringer af flyveaske op til 60% af pulverbemængden. I beton med alternativ flyveaske, hvor udgangsrecepten ikke indeholder puzzolaner, ses den alternative flyveaske stort set at eliminere vandseparationen (P7).

Tilsætning af betonslam, hvor tørstoffet erstatter en del af tilslaget, øger betonens indhold af finstof, og dette ses også at have en gavnlig effekt (P5). Noget tilsvarende gør sig gældende for beton med stenmel (P6), om end det ikke fuldstændigt eliminerer vandseparationen.



**Figur 4:** Vandseparation målt for A-betoner.

For A-betonerne ses nogle af de samme tendenser som for P-betonerne. Beton med et højt indhold af flyveaske har generelt en lille vandseparation, og betonslam og stenmel reducerer vandseparationen. Cementtypen har tilsyneladende ikke stor betydning for vandseparationen, da den beton, der svarer til A0, stort set har samme vandseparation som referencen.

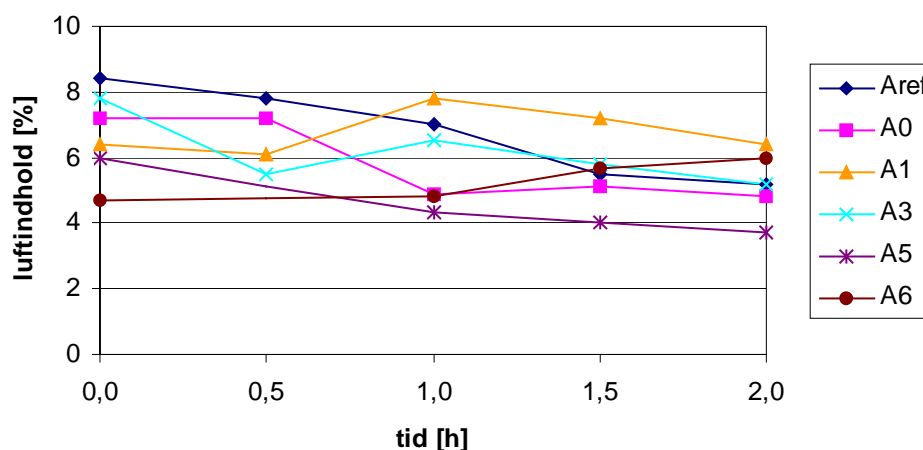
Beton med slamaske har større vandseparation end udgangsrecepten uden slamaske, men der er tilsyneladende ikke nogen entydig sammenhæng med mængden af slamaske. Det vurderes, at dette skyldes den type slamaske, der er benyttet i grundpakken, idet den er betydeligt mere grovkornet end flyveasken. I stor og udvidet pakke er der benyttet en slamaske med samme partikelstørrelse som flyveaske. Der er ikke målt på vandseparation i disse prøvningspakker, men der er på den anden side heller ikke observeret problemer med vandseparation for beton med slamaske.

For de danske betoner er der desuden målt homogenitet i form af vægtforskel mellem top og bund for betoncylindre, der er hærdnet stående. Der er i alle tilfælde tale om små vægtforskelle, så anvendelsen af de grønne restprodukter ser ikke ud til at påvirke betonernes stabilitet.

## 5. Luftindhold

### 5.1 Luftens stabilitet over tid

Betonens luftindhold er en vigtig egenskab af hensyn til betonens senere frostbestandighed, og det er derfor en egenskab, der især er interessant for beton til moderat, aggressivt og ekstra aggressivt miljø. I stor pakke blev de friske betoners luftindhold fulgt de første to timer efter blanding, se Figur 5.

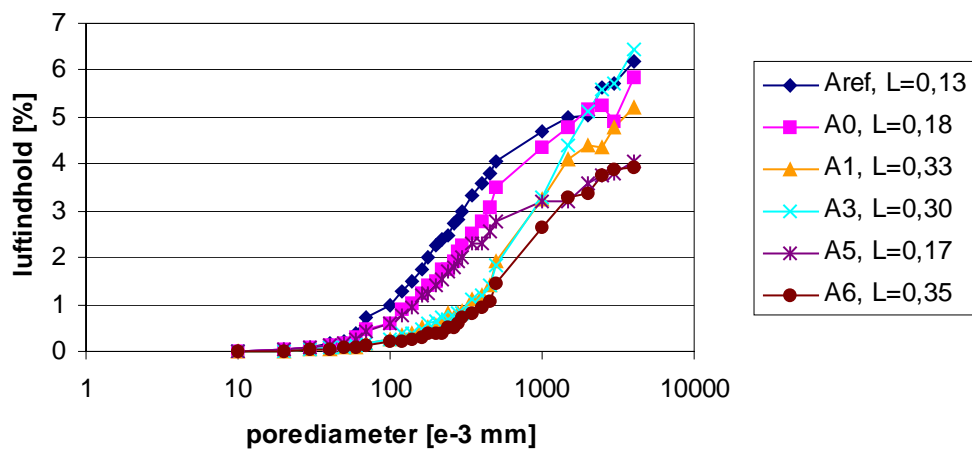


**Figur 5:** A-betonernes friskluftindhold i stor pakke. Signaturforklaring (Aref, A0 osv.) findes i afsnit 2.2.

I de danske betoner blev der tilstræbt et luftindhold på 6-8%, mens der i de svenske betoner A5 og A6 blev sigtet lidt lavere på 4-6% luft umiddelbart efter blanding. Det ses, at en del af betonerne, Aref, A0, A3 og A5 gradvist taber noget af luften, mens A1 og A6 tilsyneladende har en lille tilvækst i luftindhold. Der er dog ikke noget, der tyder på, at nogen af betonerne skulle have tendens til at tabe luften hurtigere end referencebetonen.

### 5.2 Luftporestruktur

I stor pakke blev der ligeledes udført luftporeanalyse for hærdnet beton, se Figur 6.

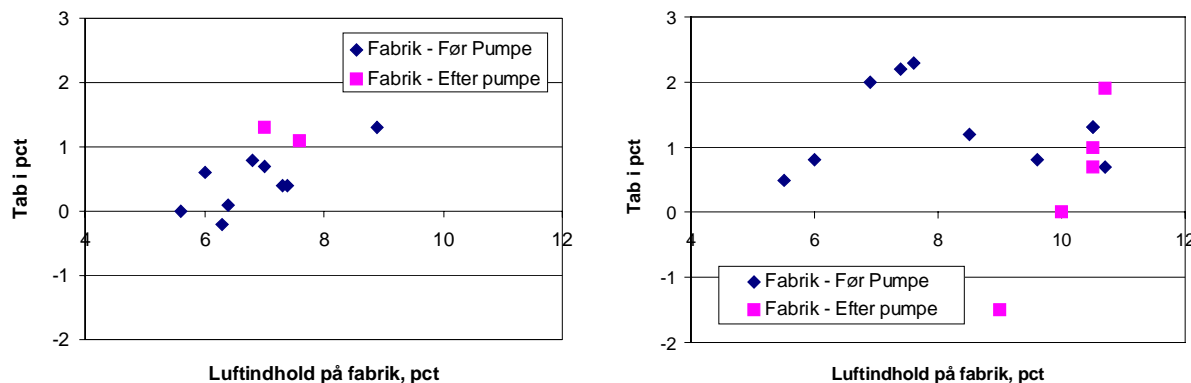


**Figur 6:** A-betonernes luftporefordeling i stor pakke. Signaturforklaring (Aref, A0 osv.) findes i afsnit 2.2.

Det ses, at A1, A3 og A6 har en betydeligere grovere luftporestruktur, hvilket slår igennem på afstandsfaktoren. Således har A1 og A3 en betydeligt større afstandsfaktor end Aref, selvom de tre betoner har næsten samme totale luftindhold. En efterfølgende frost/tø-test i overensstemmelse med SS 13 72 44 viste, at A1 og A3 havde problemer med frostbestandigheden. Forklaringen for netop disse to betoner er sandsynligvis, at de i modsætning til referencebetonen indeholder et superplastificeringsmiddel, der virker luftindblandende, men at der her først og fremmest er tale om indblanding af grov luft. For at kunne opretholde et luftindhold indenfor intervallet 6-8% er der derfor doseret mindre luftindblandingsmiddel, hvorfor der er færre af de helt fine luftporer. Der er efterfølgende foretaget en justering af tilsætningsstoffer ved blanding af A1 og A3 i udvidet pakke, så luftporestrukturen kom på plads.

### 5.3 Produktionserfaringer

I demonstrationsbroprojektet er der doseret lige meget luftindblandingsmiddel i Aref, A0, A1 og A3. Det har betydet en væsentlig forbedring af luftporestrukturen for A1 og A3, men samtidig er luftindholdet i den friske beton steget, så det for nogle blandinger kommer helt op på 10%, se Figur 7.

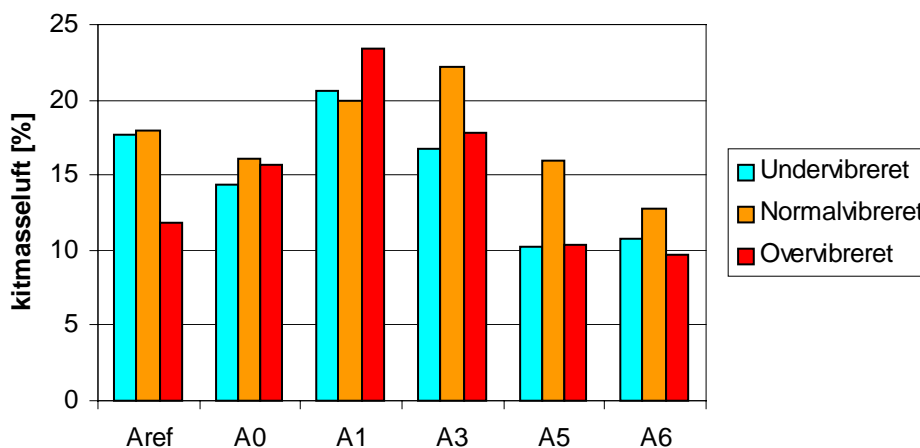


**Figur 7:** Observationer af luftindhold og tab af luftindhold i forbindelse med demonstrationsbro-projektet. De blå punkter angiver differencen mellem luftindhold målt henholdsvis på fabrikken og på byggepladsen, før betonen pumpes. De lyserøde punkter angiver differencen mellem luftindhold målt på fabrikken og på byggepladsen, efter betonen er blevet pumpet. Til venstre: Aref, til højre: A1.

For A1 er der en tendens til et lidt større tab af luft fra fabrik til byggepladsen (målt enten før eller efter pumpen). For Aref er det ca. 25% af blandingerne, der tabere mere end 1% luft fra fabrik til byggeplads. For A1 er det ca. halvdelen af blandingerne. Dette er delvist modstridende med de observationer, der blev gjort i stor pakke, jf. afsnit 5.1.

#### 5.4 Luftens stabilitet afhængigt af vibreringsgrad

I stor pakke blev luftindholdet undersøgt ved henholdsvis normal vibrering samt ved under- og overvibrering. Undersøgelsen blev foretaget ved efter støbningen at måle luftindholdet på udborede kerner, se Figur 8.



**Figur 8:** Kitmasseluft som funktion af vibreringsgrad for A-beton i stor pakke. Signaturforklaring (Aref, A0 osv.) findes i afsnit 2.2.

Resultaterne er udtryk for nogen usikkerhed ved metoden, men det viser også, at der ikke er nogen af de grønne betoner, der er markant mere følsomme for over- eller undervibrering end referencen Aref.

## 6. Støbeegenskaber

Betonens støbeegenskaber dækker ikke over en veldefineret gruppe af egenskaber, der kan måles og vejes. I Grøn Beton projektet er der i stor pakke støbt nogle prøveemner á  $\frac{1}{2}$ -1 m<sup>3</sup>, hvor støbningen kan give et realistisk billede af betonen ved udstøbning af en given konstruktion. I den forbindelse er to erfarne betonarbejdere blevet bedt om at vurdere betonens støbeegenskaber, dvs. hvordan den "er" at arbejde med og hvornår den er "klar" til at blive glittet (håndglittet). Disse vurderinger er suppleret med en vurdering af det færdige prøveemnes finish samt kvalitet af beton udstøbt i lag.

### 6.1 Bedømmelse af betonens støbemæssige kvaliteter

Bedømmelsen af de forskellige betoner har givet anledning til følgende individuelle vurderinger:

Pref: Acceptable støbeegenskaber (pr. definition, da denne beton benyttes som reference for de øvrige P-betoner.

P2: God at arbejde med, men med tendens til bleeding, der besværliggør glittearbejdet.

P3: God at arbejde med, dvs. på niveau med referencen.

P5: God at arbejde med, dvs. på niveau med referencen. Betonen krævede dog lidt længere tid ved hvert vibrator-nedstik.

P6: God at arbejde med, dvs. på niveau med referencen.

P7: Lidt klæbrig, hvilket besværliggjorde glitningen, men ellers i orden.

Aref: Acceptable støbeegenskaber (pr. definition, da denne beton benyttes som reference for de øvrige A-betoner), dog synes betonen at være en anelse klæbrig.

A0: Som Aref, dog også lidt klæbrig.

A1: God at arbejde med.

A3: God at arbejde med.

A5: Betonen krævede lidt længere vibreringstid ved det enkelte vibrator-nedstik. Blev meget hurtig sej at arbejde med. Desuden skilte den ved glitning.

A6: God at arbejde med.

### 6.2 Tid til glitning kan påbegyndes

Der er vurderet følgende tidsrum fra blanding til glitning, se Tabel 1 og Tabel 2:

**Tabel 1:** P-betonernes "glittetid". Signaturforklaring (Pref, P2 osv.) findes i afsnit 2.2.

Beton	Pref	P2	P3	P5	P6	P7
Tid, før beton kan glittes [h]	5,1	5,6	9,4	3,5	5,6	6,4

**Tabel 2:** A-betonernes ”glittetid”. Signaturforklaring (Aref, A0 osv.) findes i afsnit 2.2.

Beton	Aref	A0	A1	A3	A5	A6
Tid, før beton kan glittes [h]	3,9	4,0	4,1	3,8	3,3	4,7

Beton med store mængder flyveaske (A1 og P2) har ”glittetider” på niveau med referencerne. P-beton med slamaske (P3) har en markant forlænget ”glittetid”, hvilket dog ikke går igen for A-beton med slamaske (A3). Betonslam (P5 og A5) forkorter tiden, før betonen kan glittes, mens stempel giver en moderat forlængelse (P6 og A6). Betonen med alternativ flyveaske (P7) har også en lidt længere ”glittetid”. Tiden, før betonen kan glittes, følger i øvrigt nogenlunde det billede, der tegnes for afbindingstiden, se kapitel 7.

### 6.3 Finish

Finish er kun vurderet for de danske betoner, dvs. ikke for P6, P7, A5 og A6.

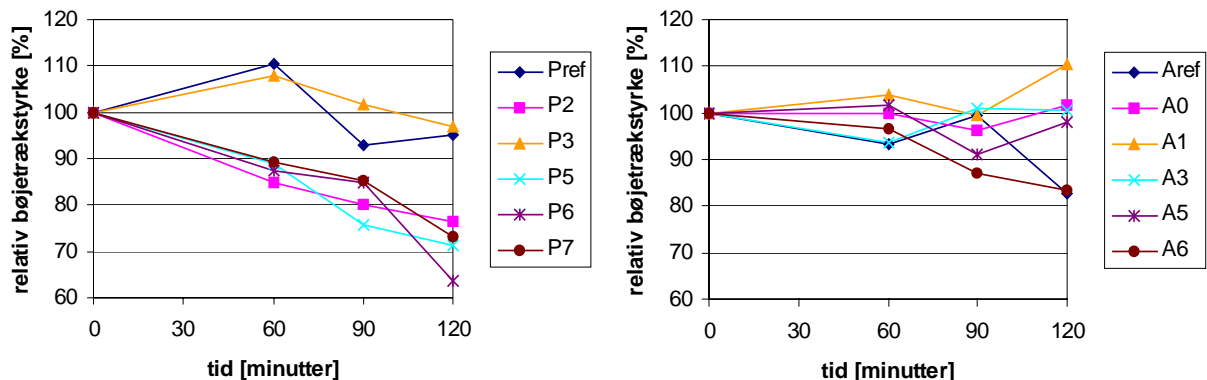
Alle A-betoner havde tendens til ”appelsinhud” på den glittede opside, undtagen A1 med højt flyveaskeindhold. Til gengæld havde P2 med højt flyveaskeindhold og specialfiller som den eneste P-beton tendens til ”appelsinhud”, så det er svært at tilskrive nogle specifikke restprodukter den manglende finish på opsidens. P2 havde nogle få revner i overfladen, der sandsynligvis er fremkommet som trækrevner fra glitteprocessen.

Med hensyn til finish for sider støbt mod form, kan der spores nogen afhængighed af vibreringsgrad. Særligt har A1 et meget stort antal huller forårsaget af luft indesluttet mod formen, når betonen undervibreres. Der er således talt ca. 30 huller pr. m<sup>2</sup> ved undervibrering, mens det er under 10 ved normal- eller overvibrering.

### 6.4 Kvalitet af beton udstøbt i lag

Beton skal indbygges, inden den når en alder på 90 modenhedsminutter, jf. DS 481. Det antages, at beton med mindre modenhed kan integreres med anden frisk beton, uden at der fx opstår skel ved udstøbning af beton i lag. Kun hvis der anvendes en længere periode inden indbygning, skal denne dokumenteres ikke at have nogen negativ effekt på betonens kvalitet.

I stor pakke ønskedes det undersøgt, om de 90 modenhedsminutter også er hensigtsmæssig som vejledende grænse for de grønne betoner. Der findes ikke nogen standardiseret prøvningsmetode til dette. Derfor er der valgt en fremgangsmåde, hvor betonen bliver støbt ud i cylindriske spande (Ø300x400 mm) i to lag for at efterligne en lagvis støbning. Første halvdel af spanden udstøbes umiddelbart efter blanding. Anden halvdel udstøbes 60, 90 eller 120 minutter efter blanding, og de to lag vibreres sammen med stav. Den hærdede cylinder skæres igennem på langs, og bøjetrækstyrken bestemmes for hver af de to halvdele. Denne bøjetrækstyrke sammenlignes med bøjetrækstyrken for beton, der er udstøbt umiddelbart efter blanding uden lag. Resultaterne fremgår af Figur 9.



**Figur 9:** Bøjetrækstyrke som funktion af tid mellem støbning af første og andet lag. P-betoner: til venstre, A-betoner: til højre. Signaturforklaring (Pref, P2 osv.) findes i afsnit 2.2.

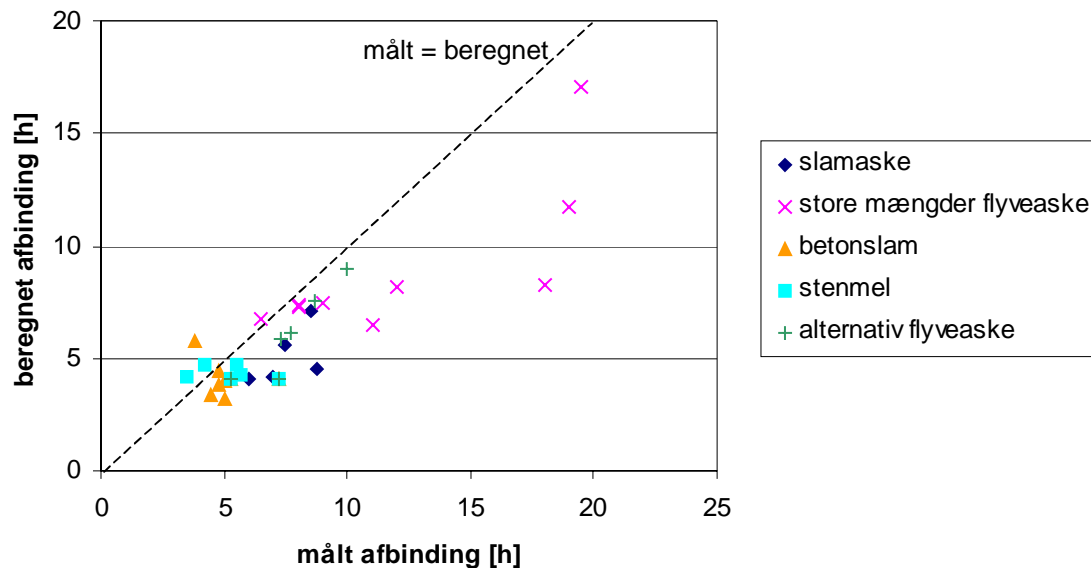
For P-betonerne har Pref og P3 stort set uændret bøjetrækstyrken frem til 2 timer efter blanding, mens de øvrige betoner gradvist taber 15-20% af bøjetrækstyrken frem til 90 minutter efter støbning. Styrketabet fortsætter også i resten af måleperioden, for de fleste P-betoner med nogenlunde samme hastighed, men for P-beton med stenmel (P6) ser styrketabet ud til at accelerere mellem 90 og 120 minutter.

For A-betonerne er ændringerne af bøjetrækstyrke generelt mindre end for P-betonerne. Referencen Aref og beton med stenmel, A6, taber ca. 15% af bøjetrækstyrken i løbet af de 2 timer, forsøget stod på. For beton med stenmel er der tale om et tab, der næsten er proportionalt med tiden efter blanding, mens referencens tab stort set forløber mellem 90 og 120 minutter efter blanding. Samlet ser de grønne A-betoner ud til at være lige så gode eller bedre end Aref.

En interessant iagttagelse ved bøjetræk-forsøgene er, at bruddet i hovedparten af tilfældene ikke sker i laggrænsen, men i den del af betonen, der blev udstøbt umiddelbart efter blanding (spandens bund). Dette er mest udtalt for de prøveemner, hvor bøjetrækstyrken er reduceret i forhold til bøjetrækstyrken af beton udstøbt uden lag. Det tyder på, at det ikke er vedhæftning mellem lagene, der udgør et problem, men at vibratornedstik forstyrrer strukturen af den beton, der allerede er indbygget, og dermed forringer dennes kvalitet.

## 7. Afbinding

I grundpakken blev der målt afbindingstid, både i form af proctormålinger og ved hjælp af måling af varmeudvikling, hvor den beregnede parameter  $\tau_0$  er en indikation af afbindingstiden. Resultaterne fremgår af Figur 10.

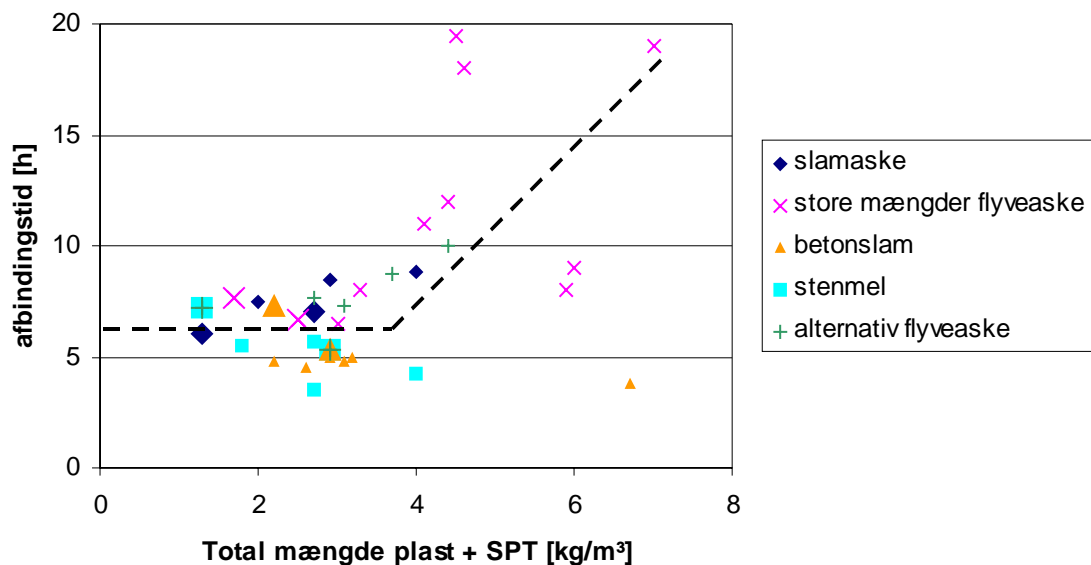


**Figur 10:** Afbindingstid, beregnet på baggrund af varmeudviklingsresultater, som funktion af afbindingstiden målt ved hjælp af proctor.

Det ses, at der tydeligvis er en sammenhæng mellem den målte og den beregnede afbindingstid. Når forholdet mellem de to ikke er 1:1, skyldes det blandt andet, at den beregnede afbindingstid refererer til modenhedstimer ved en temperatur på 20°C, mens den målte afbinding referer til klokketimer. Da betonens udstøbningsstemperatur for de fleste betoner er lavere end 20°C, bliver den målte afbindingstid længere. I praksis er den beregnede afbindingstid et tilstrækkelig nøjagtigt mål for afbindingstiden, når der er tale om *normale* afbindingstider, dvs. afbindingstider op til ca. 10 timer.

Det ses også, at betonens afbindingstid tilsyneladende afhænger kraftigt af anvendelsen af restprodukter. For nogle af flyveaskebetonerne er der målt afbindingstider på op imod 20 timer. Det ser således ud til, at anvendelsen af store mængder flyveaske kraftigt forsinket betonens afbinding. Det samme er tilfældet for beton med slamaske og alternativ flyveaske, dog ikke i nær så udtalt grad. Før restprodukterne tilskrives hele den forlængede afbindingstid, skal det dog nævnes, at de grønne betoner generelt har et højere indhold af tilsætningsstoffer, og at disse er kendt for at kunne virke retarderende.

I Figur 11 er den målte afbindingstid afbilledet som funktion af den samlede mængde af plastificerende og superplastificerende tilsætningsstoffer i den pågældende beton.



**Figur 11:** Afbindingstid (proctormåling) som funktion af mængden af plastificerende og superplastificerende tilsætningsstoffer. I hver serie er referencen fremhævet ved at forstørre symbolet.

Fremgangsmåden i Figur 11 er ret grov, da der er tale om forskellige kommercielle produkter, der både har forskellige aktive stoffer og forskellige koncentrationer. Samtidigt er der ikke taget hensyn til mængden af luftindblandingsmiddel, der også kan spille ind. Ikke desto mindre giver figuren et tydeligt billede af, hvad doseringen af tilsætningsstoffer betyder. Ved en dosering af plastificerende tilsætningsstoffer på op til ca.  $4 \text{ kg/m}^3$  vil dette ikke påvirke afbindingstiden nævneværdigt, mens doseringer på over  $4 \text{ kg/m}^3$  har stor indvirkning på afbindingstiden.

Undtagelsen fra denne regel er beton med betonslam. Betonslammet ser ud til at fremskynde afbindingen, og selvom større mængder betonslam også kræver større mængder tilsætningsstoffer, ser betonslammet ud til at have den største effekt, så alle betoner med betonslam har afbindingstider på under 5 timer.

I Figur 11 er referencebetonerne markeret med forstørrede symboler. Det ses, at referencebetonerne er godt indkørte recepter, der alle har doseringer af plastificerende tilsætningsstoffer under  $4 \text{ kg/m}^3$ . I Grøn Beton projektet er det besluttet at fastholde pastaprocenten i alle betoner, bl.a. for at gøre det nemmere at sammenligne miljøbesparelser. Men det ses, at for de grønne betoner giver dette et noget ulige sammenligningsgrundlag med hensyn til afbindingstid og andre egenskaber, der påvirkes som en bivirkning af tilsætningsstofferne.

Det vurderes, at det sandsynligvis ville have været muligt at fremstille grønne betoner med samme eller kun lidt forlængede afbindingstider, hvis bearbejdigheden i stedet var blevet reguleret vha. pastaprocenten. Selvom en forøgelse af pastaprocenten i princippet øger mængden af cement i betonen og dermed også mængden af  $\text{CO}_2$  forbundet med

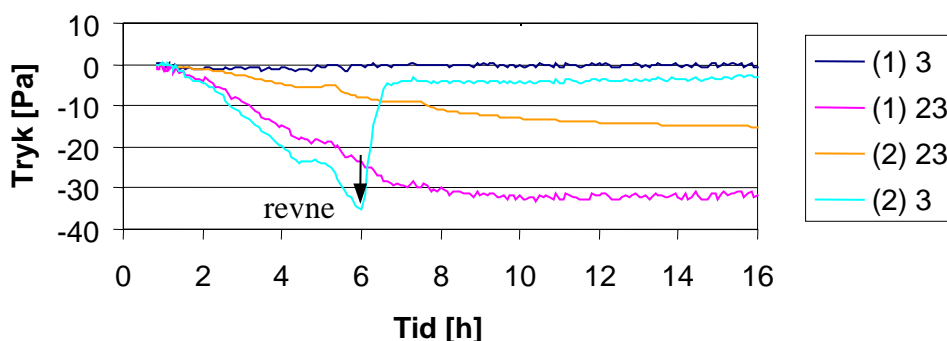
betonproduktion, så vil en beton med store mængder flyveaske og en forøget pastaprocent stadigvæk være meget grønnere end den tilsvarende reference.

## 8. Plastisk svind

Når frisk beton kommer i direkte kontakt med luft med et lavere damptryk end betonen, starter der en udtørring. Det betyder, at den relative fugtighed i betonen falder, og der dannes væskemeniskener i betonens kapillarporer. Så længe betonen er plastisk og stort set uden styrke vil selv svage kræfter forårsaget af overfladespænding i væskemeniskenerne kunne føre til revnedannelse. Denne revnedannelse kaldes også for plastiske svindrevner.

I udvidet pakke blev det undersøgt, om der nemmere opstår plastiske svindrevner i grønne betoner end i konventionelle betoner, og om der derfor er behov for at skærpe kravene til udtøringsbeskyttelse.

Undersøgelserne blev udført ved at påvirke beton i en vindtunnel, hvor klimaforholdene kunne styres (temperatur: 20°C, relativ fugtighed: 50%, vindhastighed: 5 m/s). I hver beton monteredes et antal kunstige kapillarporer, hvor trykket kunne måles. I begyndelsen af udtøringsforløbet faldt trykket i disse porer på grund af overfladespændingens indvirkning, men ved revnedannelse omkring den kunstige kapillarporer, blev trykforskellen i forhold til atmosfæretrykket udlignet. På den måde var det muligt at detektere plastiske svindrevner som pludselige trykændringer, se eksempelet i Figur 12. Samtidigt blev betonens vægt løbende registreret, så den fordampede vandmængde kunne beregnes.



**Figur 12:** Poreundertryk målt for referencebetonen *Pref* (i alt 4 kunstige kapillarporer).

Resultaterne er resumeret i Tabel 3 og Tabel 4.

**Tabel 3:** Sammendrag af resultater fra forsøg med plastisk svind (*P*-betoner).

Signaturforklaring (*Pref*, *P2* osv.) findes i afsnit 2.2.

	<i>Pref</i>	<i>P3</i>	<i>P5</i>	<i>P7</i>
Fordampningshastighed <sup>1</sup> [kg/(m <sup>2</sup> h)]	0,6	0,6	0,6	0,5
Fordampning ved første tegn på revnedannelse [kg/m <sup>2</sup> ]	2,0	0,7	1,7	1,7
Ophør af våd overflade [h]	5	4	5	4-5

1. Forsøgsbetingelserne varierede lidt ved de enkelte forsøg. Her er alle resultater omregnet til følgende betingelser: lufttemperatur 20°C, relativ luftfugtighed 50%, vindhastighed 5 m/s og betontemperatur 15°C. Fordampningshastigheden gælder frem til ophør af våd overflade.

**Table 4:** *Sammendrag af resultater fra forsøg med plastisk svind (A-beton).  
Signaturforklaring (Aref, A0 osv.) findes i afsnit 2.2.*

	Aref	A0	A1	A3	A6
Fordampningshastighed <sup>1</sup> [kg/(m <sup>2</sup> h)]	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7
Fordampning ved første tegn på revnedannelse [kg/m <sup>2</sup> ]	1,5	0,7	- <sup>2</sup>	1,4	0,8
Ophør af våd overflade [h]	3	4	<sup>3</sup>	4	4-5

1. Forsøgsbetingelserne varierede lidt ved de enkelte forsøg. Her er alle resultater omregnet til følgende betingelser: lufttemperatur 20°C, relativ luftfugtighed 50%, vindhastighed 5 m/s og betontemperatur 15°C. Fordampningshastigheden gælder frem til ophør af våd overflade.
2. A1 viste ingen tegn på revnedannelse.
3. På grund af målefejl på vægtregistrering er det ikke muligt at bestemme, hvornår overfladen ophørte med at være våd

Det ses, at P-betonerne har nogenlunde ens fordampningshastighed og overfladen ophører med at være våd på nogenlunde samme tid. Fordampningshastigheden er lidt større for A-betonerne og overfladen bliver hurtigere tør. Desuden er der større indbyrdes forskelle mellem A-betonerne end mellem P-betonerne.

De grønne betoners følsomhed overfor dannelse af plastiske svindrevner er på niveau med referencebetonerne. Grundet stor forsøgsusikkerhed er det svært at differentiere betonerne. Der kan dog bemærkes følgende:

- P3 med slamaske er muligvis mere følsom end Pref. Der opstår kun en enkelt revne, der så til gengæld optræder på et tidligt tidspunkt, hvorfor den fordampede vandmængde ved første tegn på revnedannelse er lille. Der ses imidlertid ikke samme forhold mellem fordampet vandmængde for Aref og A3, der også indeholder slamaske.
- Beton med rapidcement (A0) ser ud til at være mere følsom end beton med lavalkali-, sulfatbestandig cement (Aref).
- A6 med stammel må også forventes at have en forøget risiko for dannelse af plastiske svindrevner i forhold til Aref, idet fordampningen er væsentligt lavere ved første tegn på revnedannelse. Det skyldes muligvis, at stenmelet øger betonens indhold af finstof. Men det kan også skyldes, at denne beton er blandet med den svenske Anlægningscement, dvs. en anden type cement end de øvrige A-betoner.
- A1 med store mængder flyveaske viste ingen tegn på revnedannelse, men var også udsat for et lidt mildere udtørningsforløb end de andre beton. Betonen nåede dog at fordampe mere end 2 kg vand/m<sup>2</sup> før afbinding, altså mere end den vandmængde, der fik Aref til at vise tegn på revner. A1 ser således ud til at være mindre sårbar overfor plastisk svind.

I følge DS 482 afhænger kravene til udtørningsbeskyttelse af, hvor meget flyveaske og mikrosilica, betonen indeholder i forhold til den samlede pulvermængde: jo mere flyveaske og/eller mikrosilica, jo mindre fordampning kan der tillades, før betonen dækkes af eller på anden måde beskyttes mod udtørring. Forsøgene i dette projekt kan ikke understøtte, at flyveaske øger risikoen for plastiske svindrevner, snarere tværtimod, jf. resultater opnået med A1.

I DS 482s krav til udtørningsbeskyttelse tages der ikke hensyn til, om betonen indeholder stenmel. Nærværende resultater tyder på, at kravene på dette punkt bør strammes, eventuelt ved at sidestille stenmelets fillerindhold med puzzolanske tilsætninger.

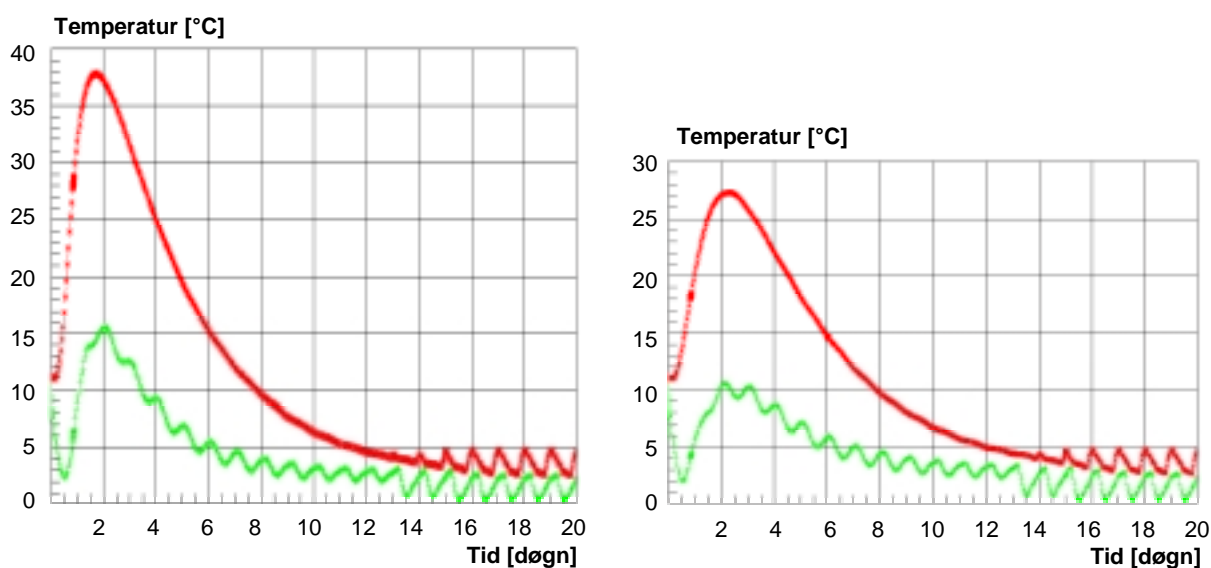
## 9. Hærdeegenskaber

Hærdeegenskaberne vurderes på baggrund af simuleringer med softwaren *4C Temp & Stress*.

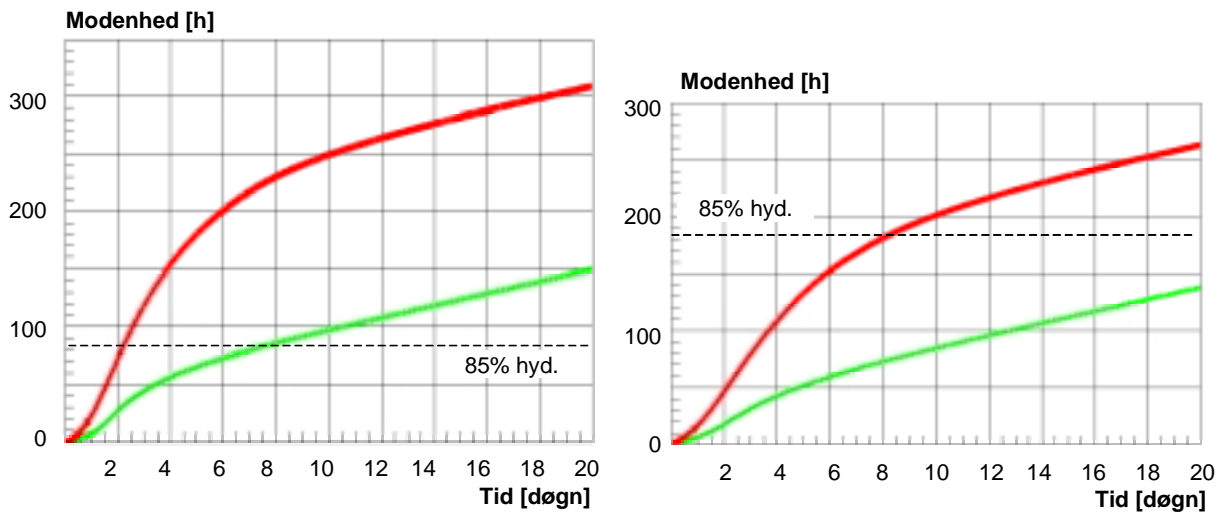
### 9.1 Temperaturudvikling

På baggrund af de målte varmeudviklinger er temperaturudviklingen simuleret for A0 og A1 for en hærdesituation svarende til støbningen af demonstrationsbroen. A0 har en forholdsvis hurtig varmeudvikling, mens A1 har en noget langsommere varmeudvikling, hvorfor dette må forventes at være to ydersituationer, hvor hovedparten af de øvrige danske betoner vil placere sig imellem.

Den simulerede brostøbning er en vinterstøbning, hvor lufttemperaturen i hele simuleringstiden svinger mellem 0 og 5°C, og hvor der afformes efter 13 døgn (samme afformningstidspunkt som for demonstrationsbroen). Resultaterne ses i Figur 13 og Figur 14.



**Figur 13:** Simuleret temperaturudvikling i brodæk støbt med A0 (til venstre) og A1 (til højre). Den røde kurve svarer til brodækkets centertemperatur, mens den grønne kurve beskriver temperaturen i kantbjælkens overflade.



**Figur 14:** Simuleret modenhedsudvikling i brodæk støbt med A0 (til venstre) og A1 (til højre). Den røde kurve svarer til modenheden i brodækkets midte, mens den grønne kurve beskriver kantbjælkens modenhed.

Ved vinterstøbningen slår A1s langsomme varmeudvikling dobbelt igennem. A0s hurtige varmeudvikling sætter en kædereaktion i gang: varmeudviklingen får temperaturen til at stige, hvilket øger reaktionshastigheden, så der udvikles mere varme. Således når broens centertemperatur ved støbning med A0 op på 38°C, mens kantbjælkens maksimumtemperatur når op på ca. 15°C. Med A1s langsomme varmeudvikling, når centertemperaturen kun op på 27°C og temperaturen i kantbjælken når op på 10°C. Som tommelfingerregel fordobles reaktionshastigheden, når temperaturen stiger 10°C, og derfor betyder disse temperaturforskelle meget for modenhedstilvæksten. Det ses da også i Figur 14, at A1s modenhed sakter bagefter A0 i de første døgn efter støbning.

I DS 482 er krav til varighed af udtørningsbeskyttelse angivet i forhold til betonens hydratiseringsgrad, udtrykt på basis af betonens adiabatisk varmeudvikling. Udtørningsbeskyttelsen må således for beton i miljøklasse A først fjernes, når betonens hydratiseringsgrad overstiger 85%. De målte varmeudviklinger i Grøn Beton-projektet har vist, at det svarer til 87 modenhedstimer for A0 og 187 modenhedstimer for A1 (disse grænser er indtegnet med stiplede linier i Figur 14). Kombinationen af, at A1 skal opnå en større modenhed og at modenhedsudviklingen samtidigt er langsomme, betyder, at kantbjælken ved de simulerede temperaturforhold kræver mere end 20 døgns udtørningsbeskyttelse, mens afdækningen for A0-kantbjælken kan fjernes efter blot 8 døgn.

I øvrigt bør det bemærkes, at det i DS 482s vejledningstekst er angivet, at for A-beton med ækvivalent v/c-forhold i intervallet 0,40-0,45 kan kravet om en hydratiseringsgrad på 85% anses for opfyldt, når betonens modenhed overstiger 120 timer. En sådan vejledningstekst, der kan benyttes, når der ikke foreligger en måling af varmeudvikling, bør være på den sikre side. Det er den imidlertid ikke, hvis der benyttes beton med store mængder flyveaske. A1 kræver en modenhed på 187 timer, før hydratiseringsgraden på 85% er opnået, dvs. ca. 50% længere tid målt som modenhed end anført i vejledningsteksten.

## 9.2 Spændingsudvikling

For A1 er der i udvidet pakke foretaget en kortlægning af udviklingen af mekaniske egenskaber i tidlig alder, så det også er muligt at simulere spændingsopbygningen i en given konstruktion, når temperaturudviklingen er kendt. Det drejer sig om følgende egenskaber:

- trykstyrke
- spaltetrækstyrke
- E-modul
- autogent svind
- krybning
- temperaturudvidelse

På den baggrund er spændingerne simuleret for A1 i samme brostøbning, som temperaturforløbet er simuleret. Dette viser, at der ikke opstår kritiske spændinger, dvs. at trækspændingerne ikke overstiger betonens trækstyrke.

Med hensyn til spændingsopbygning er A1s langsomme varmeudvikling en fordel, da der således ikke opstår så store temperaturforskelle i konstruktionen. På Figur 13 ses den største temperaturdifference at være 16-17°C. Dette maksimum indtræffer, når centertemperaturen er på sit højeste. I A0 opstår der en temperaturforskel på ca. 22°C, og denne beton må derfor formodes at have større risiko for at udvikle termorevner.

Iflg. DS 482s vejledningstekst kan skader normalt undgås, når forskellen mellem et konstruktionstværsnits middeltemperatur og overfladetemperatur ikke overstiger 15°C. En efterfølgende beregning af tværsnittets middeltemperatur viste, at ved støbning med A0 når tværsnittets middeltameperatur op på 28°C. De største forskelle mellem middeltemperatur og overfladetemperatur er på 13-14°C. Vejrliget skal således ikke ændre sig ret meget i forhold til det simulerede, før det bliver nødvendigt med særlige foranstaltninger ved støbning for at undgå termorevner.

## 10. Konklusion

Det er generelt muligt at producere grønne betoner med gode udførelsesmæssige egenskaber. Dog skal man være opmærksom på, at hvis man styrer betonens bearbejdelighed udelukkende ved hjælp af tilsætningsstoffer, risikerer man at resultatet bliver en beton med et højt indhold af tilsætningsstoffer, der kan have en række negative bivirkninger:

- betonen opfattes som klistret
- forlænget arbejdstid
- forlænget afbindingstid
- forsinket udvikling af styrke mm.

Det kræver derfor et seriøst stykke arbejde at indkøre en grøn recept, hvor der er balance mellem de opnåede udførelsesmæssige egenskaber. Det kan være nødvendigt at kaste mange bolde op i luften og således variere på en lang række parametre (indhold af tilsætningsstoffer, pastaprocent, indhold af det pågældende restprodukt mm.). De afprøvede grønne recepter er ikke kørt fuldstændigt ind, og derfor er det en skrap prøve, når de sammenlignes med referencerecepter, der er justeret på baggrund af mange års erfaringer og derfor må betragtes som det optimale kompromis.

Nedenfor er kommentarerne delt på de forskellige grønne tiltag.

*A-beton med rapidcement i stedet for lavalkali-, sulfatbestandig cement (støbt hos Unicon)*

Med hensyn til udførelsesmæssige egenskaber spiller cementtypen ikke den store rolle. Således er Aref og A0 meget ens med hensyn til sætmål og sætmålstab, luftindhold og luftindholdstab samt separation. Erfarne betonarbejdere vurderede, at de var stort set ens at støbe med, og de blev lige hurtigt klar til glitning. A0 binder dog af lidt tidligere end Aref, og A0 har også den hurtigste varmeudvikling.

Resultaterne af registrering af plastiske svindrevner tyder på, at beton med rapidcement er mere følsom overfor udtørring end beton med lavalkali-, sulfatbestandig cement, selvom det ikke umiddelbart har været muligt at finde en forklaring på dette.

*Beton med store mængder flyveaske og eventuelt også specialfiller*

A-betonen A1 har et flyveaskeindhold på 40% af pulvervægten. P-betonen indeholder 50% flyveaske samt en specialfiller af ovnstøv fra cementproduktion, der udgør 10% af pulvervægten.

Beton med store mængder flyveaske krævede en øget dosering af plastificerende og superplastificerende tilsætningsstoffer for at opnå den ønskede bearbejdelighed. Ved arbejdet med demonstrationsbroen kunne det desuden konstateres, at A1-betonen er mere følsom overfor ændringer i flyveasken end traditionel A-beton, og at det derfor kræver øget kontrol for at opnå den tilsligtede bearbejdelighed og det ønskede luftindhold. Når først betonen er justeret ind til den aktuelle sending flyveaske, er der imidlertid ikke større variation end ved

produktion af anden beton, men der skal tages højde for, at A1-betonen under transport taber lidt mere luft end Aref og A0.

A1 blev betegnet som en beton, der var god at arbejde med. For P2 så mængden af flyveaske kombineret med et stort indhold af tilsætningsstoffer imidlertid ud til at have overskredet en kritisk grænse. Betonen havde i stor pakke tendens til bleeding og den var svær at glitte. På P2s glittede overflade kunne der konstateres et antal revner, der sandsynligvis er fremkommet som trækrevner under glitteprocessen. A1s finish viste sig følsom overfor vibreringsgrad, idet der ved undervibrering var en del indesluttet luft mod formsiden.

For nogle af betonerne med store mængder flyveaske (især i grundpakken) er der konstateret meget lange afbindingstider (op mod 20 timer), hvilket i langt de fleste tilfælde er helt uacceptabelt. De lange afbindingstider skyldes i hvert fald delvist de store mængder af tilsætningsstoffer. I udvidet pakke er A1s afbindingstid, beregnet på baggrund af målt varmeudvikling, fundet at være 8,0 timer, mens afbindingstiden var 6,3 og 5,3 timer for henholdsvis Aref og A0. Varmeudviklingen viser også, at A1 har en langsommere hydratisering. Dette har både fordele og ulemper. Ved en simulering af en brostøbning under vintervejrlig ses det, at A1 har mindre risiko for dannelse af termorevner end fx A0, fordi der ikke opstår så store temperaturforskelle i tværsnittet. Men det tæller på minussiden, at betonen kræver meget lang tid til at opnå en hydratiseringsgrad på 85%, hvor udtørningsbeskyttelsen kan fjernes.

Ved forsøg med plastisk svind viste A1 som den eneste beton ikke tegn på revner, mens der blev registreret revner i både Aref og A0. Det ser således ikke ud til, at de store mængder flyveaske øger betonens behov for udtørningsbeskyttelse, selvom det ellers er et anerkendt princip i DS 482, at øgede mængder af puzzolaner kræver hurtigere udtørningsbeskyttelse.

#### *Beton med slammaske (støbt hos Unicon)*

Betegnelsen "slammaske" dækker ikke over et ensartet restprodukt, men derimod over et produkt, der afhænger af det enkelte rensningsanlæg, dvs. både sammensætningen af slammet og forbrændingsteknikken. I grundpakken blev der afprøvet en ret grovkornet type slammaske. I stor og udvidet pakke blev der anvendt slammaske med partikelstørrelser, der kan sammenlignes med traditionel flyveaske. De følgende konklusioner gælder slammasken fra stor og udvidet pakke, idet det af såvel udførelsesmæssige som andre praktiske grunde må anbefales at benytte denne asketype.

Slammasken kræver, at doseringen af plastificerings- og superplastificeringsmidler øges for at opnå samme bearbejdighed som beton med almindelig flyveaske. Herefter har både P- og A-beton med slammaske, P3 og A3, friskbetonegenskaber, der meget minder om de respektive referencebetoner. Begge betoner blev også vurderet at have fine støbeegenskaber. Det tager dog længere tid, før P3 er klar til at blive glittet, ligesom P3 også har en markant forlænget afbindingstid målt ved varmeudvikling (10,2 timer mod Prefs 5,7 timer). A3s afbindingstid er ligeledes forlænget, men ikke nær så meget (8,1 timer mod Arefs 6,3 og A0s 5,3 timer). En del af denne forlængelse kan givetvis tilskrives tilsætningsstofferne.

I stor pakke blev der for A3 konstateret et større tab af luft i den friske beton end for referencebetonen, men samtidigt var der også benyttet mindre luftindblandingsmiddel. I

udvidet pakke indeholdt A3 mere luftindblandingsmiddel end i stor pakke (men stadigvæk mindre end i Aref). Her var A3s lufttabet på niveau med Aref, men A3 havde et højere totalt luftindhold. Dette skyldes sandsynligvis, at superplastificeringsmidlet i beton med slamaske fremmer indblanding af grove luftporer. Derfor er man nød til at acceptere et højere totalt luftindhold efter blanding, hvis man benytter den mængde luftindblandingsmiddel, der er nødvendigt for at sikre betonens indhold af fine luftporer, der er afgørende for betonens frostbestandighed.

Med hensyn til plastisk svind viste P3 tegn på revnedannelse forholdsvis kort tid efter at den blev eksponeret for udtørring, mens A3 viste tegn på revnedannelse senere end både Aref og A0. Det er således svært at udtale sig kategorisk om slamaskens betydning for udviklingen af plastiske svindrevner.

*Beton med betonslam (P-beton støbt hos Unicon, A-beton støbt hos Sydsten)*

Med hensyn til bearbejdelighed og afbinding kan der drages de samme konklusioner for P- og A-beton, hvor blandevandet stammer fra betonslam og hvor betonslammets tørstofindhold samtidigt erstatter en del af betonsandet. Betonslammet nødvendiggør øgede doseringer af plastificerende og superplastificerende tilsætningsstoffer for at opnå den ønskede bearbejdelighed efter blanding. Bearbejdeligheden tabes imidlertid forholdsvis hurtigt. Således er sætmålet for A5 mere end halveret 1 time efter blanding, og P5 mister stort set bearbejdeligheden helt efter 1½ time. Afbindingstiden for beton med betonslam er kortere end for de respektive referencebetoner, og tiden indtil betonen er klar til at blive glittet er også forkortet.

Luftindholdet i den friske A-beton med betonslam er ikke særligt højt (ca. 6%), men luftindholdet ser ud til at være meget stabilt. Selvom luftindholdet i den hærdnede beton tilsvarende ikke er særligt højt (ca. 4%) er der mange fine luftporer, så betonen alligevel har en luftporestruktur, der beskytter betonen mod udvikling af frostskader.

Bortset fra, at betonen hurtigt blev sej at arbejde med, blev beton med betonslam vurderet at have fine støbeegenskaber. Dog krævede A5 lidt længere vibreringstid ved de enkelte vibrator-nedstik, og den skilte ved glitning. Betonslam ser ellers ud til at begrænse vandseparationen og gøre betonen mere stabil.

Udviklingen af plastiske svindrevner er kun undersøgt for P-beton med betonslam, og her ser betonen ud til opføre sig som referencebetonen.

*Beton med stenmel (støbt hos Sydsten)*

I Grøn Beton-projektet er der afprøvet både P- og A-beton med stenmel, hvor stenmelet erstatter sandfraktionen helt eller delvist. I begge typer betoner kræves, at tilsætningen af plastificerende stoffer øges, hvis der ønskes samme bearbejdelighed som for beton uden stenmel.

Den øgede mængde af tilsætningsstoffer ser på den ene side ud til at holde betonen "levende" længere, idet sætmålstabet for især A-betonen A6 er langsommere end for projektets øvrige betoner. Men på den anden side er der alligevel noget, der tyder på, at betonen kræver en hurtigere indbygning. Der er således udført forsøg, hvor betonen er udstøbt i lag, hvor beton

til begge lag er blandet samtidigt, men hvor der er gået henholdsvis 60, 90 eller 120 minutter mellem udstøbningen af lagene. Disse forsøg viser, at for både P- og A-beton er beton med stenmel blandt de betoner, der taber mest af bøjtrækstyrken som funktion af tiden mellem udstøbningen af lagene. Tabet er især stort, hvis der går mere end 90 minutter mellem udstøbningen af de to lag. Mængden af tilsætningsstoffer ser ikke ud til at påvirke betonens afbindingstid.

Den friske beton med stenmel er generelt vurderet som værende god at arbejde med. Vandseparationen er mindre end for beton uden stenmel. Det skal dog bemærkes, at der sammenlignes med beton, der hverken indeholder flyveaske eller mikrosilica, og at virkningen af stenmelet nok ville være mindre markant, hvis den aktuelle reference havde indeholdt puzzolaner.

Ifølge dansk fremgangsmåde benyttes indholdet af flyveaske og mikrosilica som pejlemærke for, hvor følsom betonen må forventes at være overfor plastisk svind. I pastafasen i A6 er cementen det eneste pulver, og der stilles derfor i DS 482 forholdsvist lempelige krav til udtørningsbeskyttelse. Det har imidlertid kunnet konstateres, at A6 er mindst lige så følsom overfor plastisk svind som traditionel dansk A-beton med både flyveaske og mikrosilica, og at DS 482s krav til udtørningsbeskyttelse for beton med stenmel er utilstrækkelige. Det ser ud til, at stenmelet øger betonens behov for udtørningsbeskyttelse, men det bør dog bemærkes, at A6 også er den eneste beton, der er støbt med den svenske Anlægningscement, og derfor kan behovet for udtørningsbeskyttelse alternativt skyldes cementtypen.

#### *Beton med alternativ flyveaske (P-beton støbt hos Sydsten)*

I P7 er 30% af cementen erstattet med alternativ flyveaske fra forbrænding af biomasse i stedet for kul. Betonen kræver en øget dosering af plastificering og/eller superplastificering for at opnå samme bearbejdelighed som beton uden flyveaske. Flyveasken ser ud til at reducere betonens vandseparation, men til gengæld bliver betonen en anelse klæbrig og derfor lidt mere besværlig at arbejde med, når den skal glittes.

Afbindingstiden er forlænget i forhold til beton uden flyveaske. Det er dog sandsynligt, at en væsentlig del af denne forlængelse skal tilskrives den forøgede mængde tilsætningsstoffer, der virker retarderende.

P7s følsomhed overfor plastiske svindrevner er på niveau med P-referencen, der indeholder konventionel flyveaske og mikrosilica. P7s behov for udtørningsbeskyttelse er derfor også nogenlunde det samme.

## 11. Referencer

Denne rapport bygger på resultater fra følgende rapporter:

- [1] ”Statusrapport til seminar i Grøn Beton d. 9.-10. dec. 1999”. Center for Grøn Beton, Aalborg-Portland A/S, December 1999.
- [2] ”Grundpakke rapportering. Beton med store mængder flyveaske”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, Januar 2001.
- [3] ”Grundpakke rapportering. Beton med betonindustriens egne restprodukter - Sydsten”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, Januar 2001.
- [4] ”Grundpakke rapportering. Beton med uorganiske restprodukter. Slamaske og alternativ flyveaske”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, Januar 2001.
- [5] ”Rapportering. BK3 – Udførelse – Stor pakke. Statusrapport”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, Januar 2001.
- [6] ”Udførelse. Varmeudvikling og plastisk svind”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, September 2002.
- [7] ”Udførelse. Hærdesimuleringer for Demobro”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [8] ”Demobro”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.