



Center for Grøn Beton

Beton med reducerede CO₂-emissioner

Udført af:

Marianne Tange Hasholt

Dorthe Mathiesen

Teknologisk Institut, Beton, december 2002

Titel: Beton med reducerede CO₂-emissioner

Udført af: Marianne Tange Hasholt
Dorthe Mathiesen

Dato: December 2002

ISBN: 87-7756-687-4

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

Indholdsfortegnelse

1. INDLEDNING	4
2. RECEPTER	5
2.1 P-BETONER	5
2.2 A-BETONER	6
3. MEKANISKE EGENSKABER	8
3.1 STYRKE OG STIVHED	8
3.2 KRYBNING	11
3.3 SEMI-FULDSKALA FORSØG MED SØJLER OG BJÆLKER	11
4. BRAND	13
4.1 MEKANISKE EGENSKABER UNDER BRAND	13
4.2 EKSPLOSIV AFSKALNING	13
5. UDFØRELSE	14
5.1 PRODUKTIONSEGENSKABER	14
5.2 HÆRDEEGENSKABER	16
6. HOLDBARHED	20
6.1 BETON MED RAPIDCEMENT I STEDET FOR LAVALKALI-, SULFATBESTANDIG CEMENT	20
6.2 BETON MED STORE MÆNGDER FLYVEASKE	20
7. KONKLUSION	22
7.1 BETON MED RAPIDCEMENT I STEDET FOR LAVALKALI-, SULFATBESTANDIG CEMENT	22
7.2 BETON MED STORE MÆNGDER FLYVEASKE	22
8. REFERENCER	24
APPENDIX 1: RECEPTER	25
P-BETONER	25
A-BETONER	27
APPENDIX 2: PRØVNINGSOVERSIGT	29
P-BETONER	29
A-BETONER	31

1. Indledning

Grøn Beton-projektet har en overordnet målsætning om at udvikle ny viden om miljøvenlige betontyper og at finde løsninger, så disse betontyper kan anvendes i praksis. Ved udvikling af nye betontyper er *grøn* beton defineret som beton, der opfylder mindst ét af følgende miljømål:

- at reducere CO₂-emissionerne med 30%
- at nyttiggøre restprodukter som tilslag svarende til 20% af betonens samlede vægt
- at genanvende betonindustriens egne restprodukter, der ellers skulle have været deponeret
- at introducere nye restprodukter, der ikke tidligere er anvendt til betonproduktion
- at reducere forbrug af ikke-fornyelige brændsler i cementproduktionen med 10%

I Grøn Beton-projektet er der arbejdet med to strategier for at opnå det førstnævnte miljømål:

- Cementen giver det største enkeltbidrag til CO₂-emissioner i forbindelse med betonproduktion. Derfor er det forsøgt at reducere CO₂-emissionerne ved at minimere betons klinkerindhold, hvilket konkret er opnået ved at substituere cement med flyveaske i større mængder end normalt.
- Energiforbruget ved cementproduktion er meget afhængigt af hvilken type cement, der er tale om. Derfor er det forsøgt at reducere CO₂-emissionerne forbundet med produktion af beton til aggressivt miljø ved at erstatte lavalkali-, sulfatbestandig cement med rapidcement, der kan fremstilles med et væsentligt lavere energiforbrug.

Formålet med denne rapport er primært at sammenfatte de konkrete resultater og erfaringer, der er opnået for beton med store mængder flyveaske i løbet af Grøn Beton-projektet. Hvor det er relevant, vil cementtypens betydning også blive behandlet.

2. Recepter

Materialeudviklingen i Grøn Beton-projektet er gennemført i tre prøvningsfaser, kaldet *grundpakken* (GP), *stor pakke* (SP) og *udvidet pakke* (UP). Desuden er nogle udvalgte betontyper afprøvet i en demonstrationsbro. Recepterne er blevet justeret forud for hver prøvningspakke. De løbende ændringer afspejler således de overvejelser, der er gjort for at optimere betonene. De fuldstændige recepter er angivet i appendix 1. Nedenfor redegøres kun for de enkelte betoners karakteristika.

Den flyveaske, der er anvendt til beton med store mængder flyveaske, er konventionel flyveaske fra et kulfyret værk. Asken opfylder kravene til flyveaske til betonproduktion jf. DS/EN 450.

2.1 P-betoner

I grundpakken blev P-recepterne udarbejdet på baggrund af en referencerecept fra Unicons fabrik i Horsens, der også er den fabrik, hvor de grønne betoner er blandet. Recepterne er beskrevet i Tabel 1. Til sammenligning har referencebetonen et flyveaskeindhold på 24% og et mikrosilicaindhold på 6%.

Grundpakken blev reelt udført i to trin: Først blev der udført forsøg med forskellige indhold af flyveaske og mikrosilica (PV1-4) og siden blev der på baggrund af disse forsøg også udført forsøg med tilsætning af en specialfiller bestående af ovnstøv fra hvid og grå cementproduktion (PV5). Specialfilleren er således et restprodukt. Specialfilleren har et højt alkaliindhold og forventes derfor at fremme flyveaskens puzzolanreaktion.

Tabel 1: P-beton med store mængder flyveaske i grundpakken (procentsatser henviser til andel af pulver).

Betegnelse	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5
Beskrivelse	50% flyveaske 0% mikrosilica	50% flyveaske 6% mikrosilica	60% flyveaske 6% mikrosilica	70% flyveaske 6% mikrosilica	50% flyveaske 6% mikrosilica 10% spec. filler

I forhold til referencerecepten har de grønne betoner:

- fastholdt ækvivalent v/c-forhold, hvor flyveasken medregnes med aktivitetsfaktoren 0,5 (specialfilleren i PV5 medregnes ikke)
- fastholdt pastavolumen
- samme tilslagssammensætning

Stor pakke

Både PV1 og PV2 havde lavere styrke end referencebetonen, hvilket dog primært kan tilskrives, at disse to betoner blev blandet med højere v/c-forhold, fordi tilslagernes fugtindhold var større end forventet. PV3s styrke efter 56 døgn var på ca. 80% af referencebetonens styrke, mens PV4s styrke efter 56 døgn var mindre end halvdelen af referencebetonen.

Dette tyder på, at grænsen for flyveasketilsætning er nået omkring 60%, herefter fører øget flyveaskedosering til væsentlige styrkereduktioner.

PV5 med et samlet indhold af flyveaske og specialfiller på 60% havde fine styrker på højde med referencebetonen. Derfor blev denne beton valgt til stor pakke, idet den havde det bedste forhold mellem egenskaber og miljøbesparelser. I stor pakke er denne beton betegnet P2. P2 er blandet hos Unicon i Nr. Sundby.

Udvidet pakke

Der er ikke valgt nogen passiv beton med store mængder flyveaske til udvidet pakke.

2.2 A-betoner

De indledende recepter til grundpakken blev ligesom for P-betonernes vedkommende udarbejdet på baggrund af en referencerecept fra Unicons fabrik i Horsens. I de aggressive betoner blev der udelukkende eksperimenteret med flyveaskeindholdet, mens mikrosilicaindholdet blev fastholdt. Specialfilleren blev ikke introduceret i de grønne A-betoner, da det høje alkali-indhold er u hensigtsmæssigt i beton til aggressivt miljø. Til gengæld blev cementtypen udskiftet, så alle de grønne betoner er blandet med rapidcement i stedet for lavalkali-, sulfatbestandig cement. Grundpakkens A-recepter fremgår af Tabel 2. Der er anvendt samme fremgangsmåde ved proportionering som ved P-betonerne, dvs. fastholdt v/c-forhold, pastavolumen og tilslagssammensætning i forhold til referencebetonen.

Tabel 2: A-beton med store mængder flyveaske i grundpakken.

Betegnelse	AV1	AV2	AV3	AV4	AV5
Beskrivelse	9% flyveaske rapidcement	18% flyveaske rapidcement	30% flyveaske rapidcement	40% flyveaske rapidcement	40% flyveaske rapidcement

AV1 er både en grøn beton, men det er også en ekstra referencebeton, idet det eneste, der adskiller den fra referencen, er cementtypen. Ved at sammenligne de øvrige betoner med henholdsvis referencen og AV1 er det muligt at se, hvor meget henholdsvis cementtype og flyveaskeindhold betyder.

AV5 er i princippet identisk med AV4, men da AV4 havde problemer med at overholde krav til luftporestrukturen, blev blandingen gentaget med en øget dosering af luftindblandingsmiddel.

Stor pakke

Alle betonerne nævnt i Tabel 2 havde styrker på niveau med referencebetonen, når der vha. Bolomeys formel korrigeres til samme v/c-forhold, idet referencebetonen endte med at have et v/c-forhold på 0,37, mens de grønne betoners v/c-forhold er på 0,41-0,42. Hvis styrkeresultaterne betragtes isoleret, ser det således ikke ud til, at grænsen for optimal flyveasketilsætning er nået med de 40% af pulvermængden. Det viste sig imidlertid sværere at styre friskbetonegenskaber så som bearbejdighed og luftindhold, jo højere flyveaskeindholdet var. Derfor er det ikke praktisk muligt at øge doseringen af flyveaske yderligere.

I stor pakke kaldes beton med højt flyveaskeindhold *A1*. *A1* har lige som *AV4* og *AV5* et flyveaskeindhold på 40% af pulvermængden, men der er arbejdet yderligere med at opnå en god luftporestruktur. Desuden indgår en beton svarende til *AV1* i stor pakke, dvs. en beton, hvor det kun er cementtypen, der adskiller den fra referencen. I stor pakke kaldes denne beton *A0*. Både *A0* og *A1* er i stor pakke blandet hos Unicon i Nr. Sundby.

Udvidet pakke

Både *A0* og *A1* gik videre fra stor pakke til udvidet pakke, hvor de blev justeret til Unicons fabrik i Horsens.

Demonstrationsbro-projektet

Både *A0* og *A1* blev valgt til demonstrationsbro-projektet, hvor betonerne blev produceret hos Unicon i Horsens. Selvom problemerne med luft i beton med store mængder flyveaske så ud til at være løst i udvidet pakke, viste de sig på ny ved de første støbninger i demonstrationsbroprojektet. Derfor blev *A1* justeret midt i bro-projektet. Ved denne justering blev flyveaskeindholdet sænket til 35%.

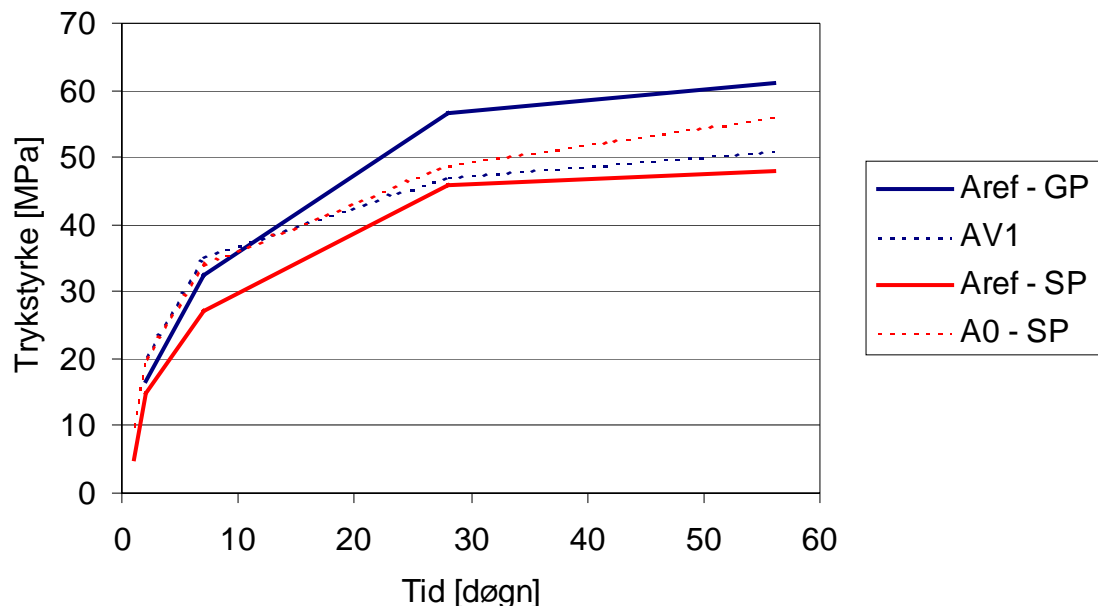
3. Mekaniske egenskaber

3.1 Styrke og stivhed

Der er målt trykstyrkeudvikling i alle tre prøvningspakker.

Cementtypens betydning

Betydningen af at skifte cement ses ved at sammenligne henholdsvis grundpakkens A-referencen med AV1 og stor pakkens A-referencen med A0, se Figur 1.



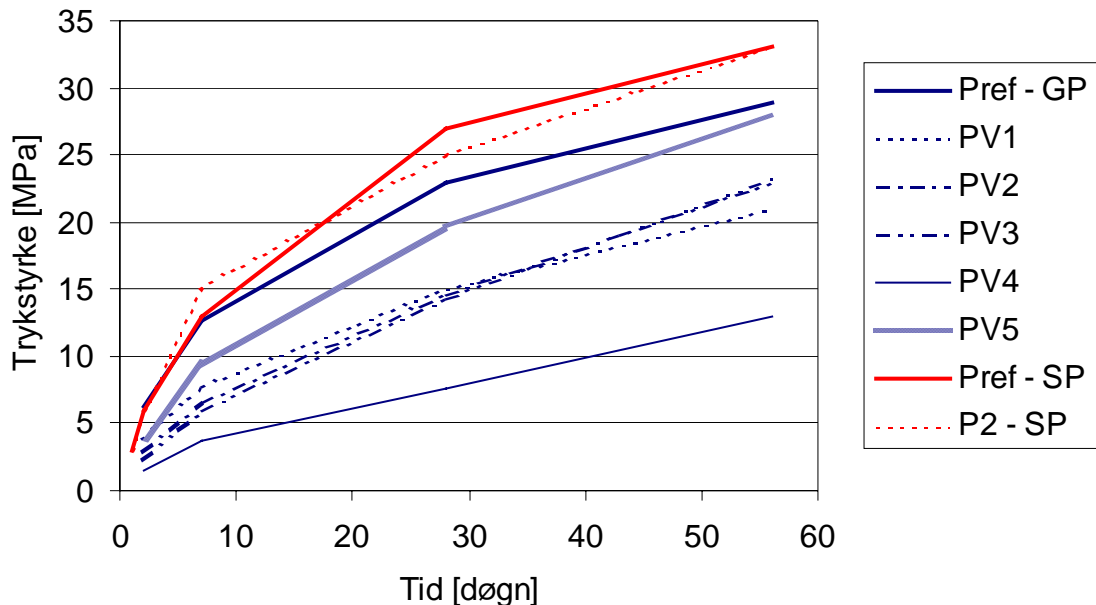
Figur 1: Styrkeudvikling for betoner med henholdsvis lavalkali-, sulfatbestandig cement og rapidcement.

Lavalkali-, sulfatbestandig cement har betegnelsen CEM I 42,5, mens rapidcement har betegnelsen CEM I 52,5. Når lavalkali-, sulfatbestandig cement substitueres kg til kg med rapidcement, må det således forventes, at betonens styrke øges, da der er tale om to forskellige styrkeklasser af cement. Grundpakkens resultater tyder umiddelbart på det modsatte, idet Aref's styrke her er højere end AV1s styrke. De to betoner har imidlertid ikke samme v/c-forhold (Aref: 0,37; AV1: 0,41). Hvis der korrigeres for dette vha. Bolomeys formel, tyder resultaterne på to betoner med nogenlunde samme styrke. I stor pakke, hvor betonerne har mere sammenlignelige v/c-forhold, er A0s styrke den største.

Det kan konkluderes, at cementtypen har betydning for styrken. Men mens cementernes styrkebetegnelser indikerer en forskel på ca. 20%, er den reelle forskel efter 28 døgn noget mindre. Selve styrkeudviklingens forløb har imidlertid skiftet karakter, idet styrkerne ved de tidlige terminer (1-2 døgn efter støbning) er væsentligt forbedrede ved brug af rapidcement.

Flyveaskeindholdets betydning

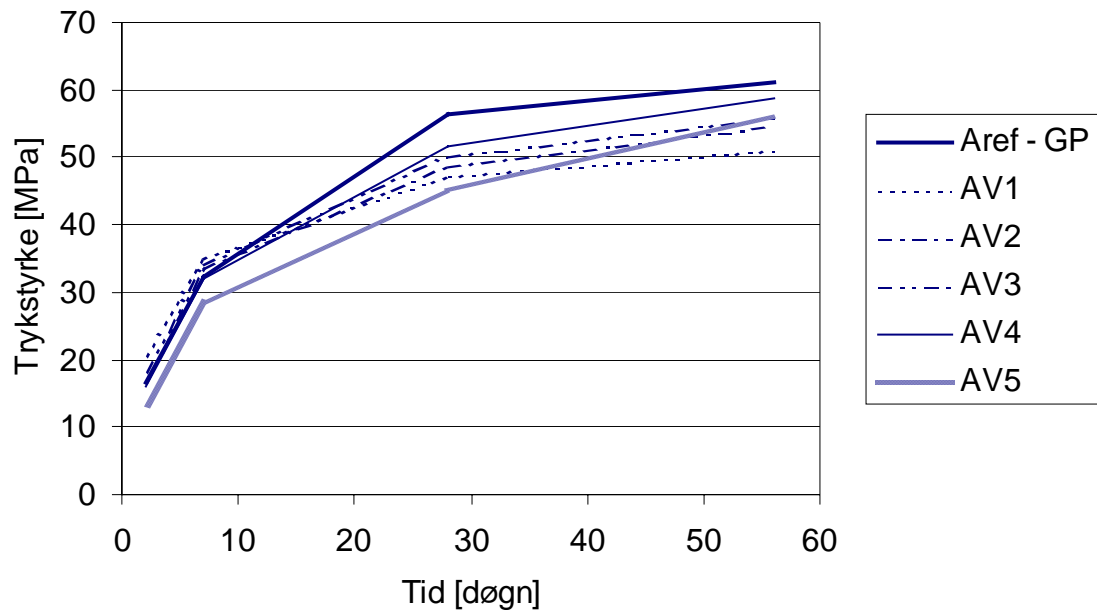
I grundpakken er der foretaget forsøg med både P- og A-beton med varierende flyveaskeindhold, se Figur 2 og Figur 3.



Figur 2: Styrkeudvikling for P-beton med forskelligt flyveaskeindhold.

I grundpakken (de blå kurver) er Pref den P-beton, der har den højeste styrke til alle terminer. Igen er der dog i nogen grad tale om synsbedrag pga. varierende, ækvivalente v/c-forhold. Således har PV1 og PV2 ækvivalente v/c-forhold på 0,78 og 0,80, der adskiller sig væsentligt fra det tilstræbte, ækvivalente v/c-forhold på 0,70. Ved korrektion fås, at PV1 og PV2, begge med 50% flyveaske, har 28-døgns styrker på ca. 75% af Pref. PV3 med 60% flyveaske har ca. 60% af Prefs 28-døgnsstyrke, mens PV4 med 70% flyveaske kun har ca. $\frac{1}{3}$ af Prefs styrke. Ved 56 døgn er de procentvise forskelle i forhold til referencen mindre. PV1 og PV2 når op på referencebetonens niveau, og PV3 når op på 80% af referencens styrke, mens PV4 stadigvæk har et meget stort efterslæb. Derfor anses 60% som en øvre grænse for hvor meget flyveaske, der kan tilsættes P-beton.

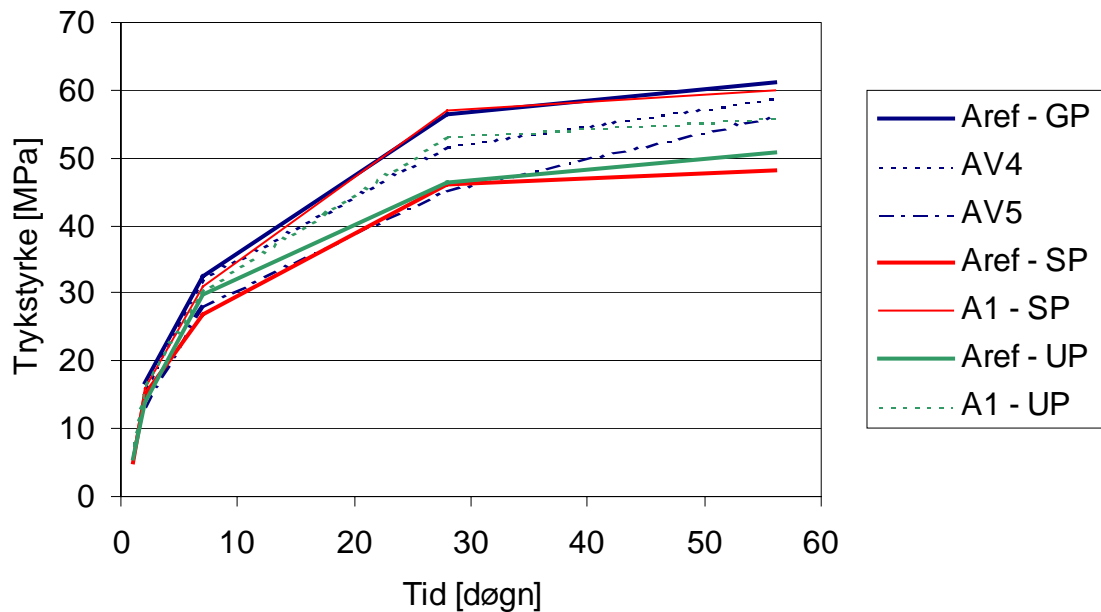
Det blev efterfølgende forsøgt at tilsætte 10% specialfiller i en kombination med 50% flyveaske. Dette gav styrker en anelse lavere end referencen, men bedre styrker end både 60% flyveaske og 50% flyveaske uden specialfiller. I stor pakke havde Pref og P2 stort set identiske styrker. Her er v/c-forholdet dog i P2s favør, så reelt har P2s pulverkombination med 50% flyveaske og 10% specialfiller en lidt lavere styrke end referencen. I både grundpakken og stor pakke tyder resultaterne på, at beton med specialfiller vil have en større styrketilvækst efter 56 døgn end referencen, idet den sidste del af styrkeudviklingskurven er mindre flad.



Figur 3: Styrkeudvikling for A-betoner med forskelligt flyveaskeindhold.

I Figur 3 ses fem grønne A-betoner fra grundpakken med varierende flyveaskeindhold op til 40%, der alle har styrker, der er lidt lavere end referencen. Der er dog tale om samme reference som i Figur 1, hvor v/c-forholdet er for lavt i forhold til de øvrige betoner. Ved korrektion vha. Bolomeys formel fås, at referencebetonens styrke er den laveste, og herefter stiger styrken svagt med stigende flyveaskeindhold.

Dette understøttes af de gentagne styrkemålinger i stor og udvidet pakke, hvor beton med 40% flyveaske kombineret med rapidcement har højere styrke end referencen med lavalkali-, sulfatbestandig cement og 9% flyveaske, se Figur 4.



Figur 4: Styrkeudvikling for A-betoner med højt flyveaskeindhold.

Arbejdskurvens forløb

E-modul og spaltetrækstyrke for beton med forhøjet indhold af flyveaske ser ud til at forholde sig til trykstyrken som vanligt, også selvom doseringen af flyveaske øges kraftigt som det er tilfældet i P2 og A1.

Måling af arbejdskurver tyder dog på, at betonen er blevet mere skør, dvs. den bryder forholdsvis kort efter arbejdskurvens toppunkt.

3.2 Krybning

I stor pakke er krybning målt ved høje lastniveauer, dvs. lastniveauer svarende til 70%, 80% og 90% af de respektive betontypers trykstyrke. Der er ikke fundet indikationer på, at store mængder flyveaske øger risikoen for krybebrud.

I udvidet pakke er der udført krybeforsøg med A1 ved moderat last (ca. 40% af 28-døgns styrken). Disse forsøg tyder på, at krybningen er af samme størrelsesorden som for referencebetonen, så de store mængder flyveaske ser ikke ud til at ændre på krybeegenskaberne.

3.3 Semi-fuldskala forsøg med søjler og bjælker

Pga. A1s skørhed blev den valgt som den ene af to betoner til forsøg med bjælkers bøjningsbæreevne og søjlers instabilitet. Den anden beton var P7, der, hvad sejhed angår er A1s modsætning, idet den er meget sej. Det ser ud til, at det for begge disse yderpunkter er muligt at regne på sædvanlig vis jf. DS 411 og gængse numeriske metoder, hvor trykarbejdslinien inddrages.

For A1s vedkommende er der ligeledes udført forsøg med armeringsforankring og bjælkers forskydningsbæreevne. Det ser ikke ud til, at tilsætning af store mængder flyveaske ændrer ved betonens forankringsstyrke set i forhold til trykstyrken. Forskydningsbæreevnen for A1 er lavere end det, der kan beregnes vha. formler angivet i DS 411 baseret på diagonaltrykmotoden. Det samme har kunnet konstateres for de øvrige testede A-betoner, men det er A1, der afviger mest. En mulig forklaring er A1s høje styrke. A1 havde den højeste styrke af alle de testede A-betoner, og styrken er på grænsen af normens gyldighedsområde. Således må betonens karakteristiske trykstyrke i en armeret betonkonstruktion ifølge DS 411 aldrig regnes større end 60 MPa, og normens beregningsudtryk er derfor ikke nødvendigvis retvisende ved højere styrker.

4. Brand

4.1 Mekaniske egenskaber under brand

De mekaniske egenskaber er ikke undersøgt for hverken P- eller A-beton med store mængder flyveaske.

4.2 Eksplosiv afskalning

Både P2, A0 og A1 blev afprøvet i stor pakke i en prøvestand opbygget på DTU. Forsøgene blev foretaget på et tidspunkt, hvor prøvestanden endnu var under udvikling, og det er ikke klart, hvordan resultaterne skal tolkes. Det er således ikke muligt at vurdere, om skift af cementtype fra lavalkali-, sulfatbestandig cement til rapidcement eller forøget dosering af flyveaske kan have konsekvenser for betonens eksplosive afskalning.

5. Udførelse

5.1 Produktionsegenskaber

I grundpakken, stor pakke og udvidet pakke er friskbetonegenskaberne blevet målt på forskellige betoner, der er blandet på forskellige fabrikker og tilpasset forskellige materialer, se Tabel 3 og Tabel 4. Dette giver en god fornemmelse af generelle ændringer ved at anvende fx store mængder flyveaske. I forbindelse med demonstrationsbro-projektet er samme betoner blandet et stort antal gange på samme fabrik og med samme materialer. Dette giver et indtryk af, hvor følsom betonens egenskaber er overfor selv små variationer i produktionen.

Tabel 3: Målinger af friskbetonegenskaber for P-betoner

	Sætmål [mm]		Luftindhold [%]	
	umiddelbart efter blanding	½ time efter blanding	umiddelbart efter blanding	½ time efter blanding
Pref – grundpakken	100	70	4,2	2,7
PV1	100	80	4,4	3,2
PV2	110	90	4,1	2,8
PV3	130	80	5,2	3,5
PV4	80	70	5,0	3,1
PV5	100	70	3,0	2,9
Pref – stor pakke	90	70	5,0	5,0
P2 – stor pakke	100	90	4,8	4,5

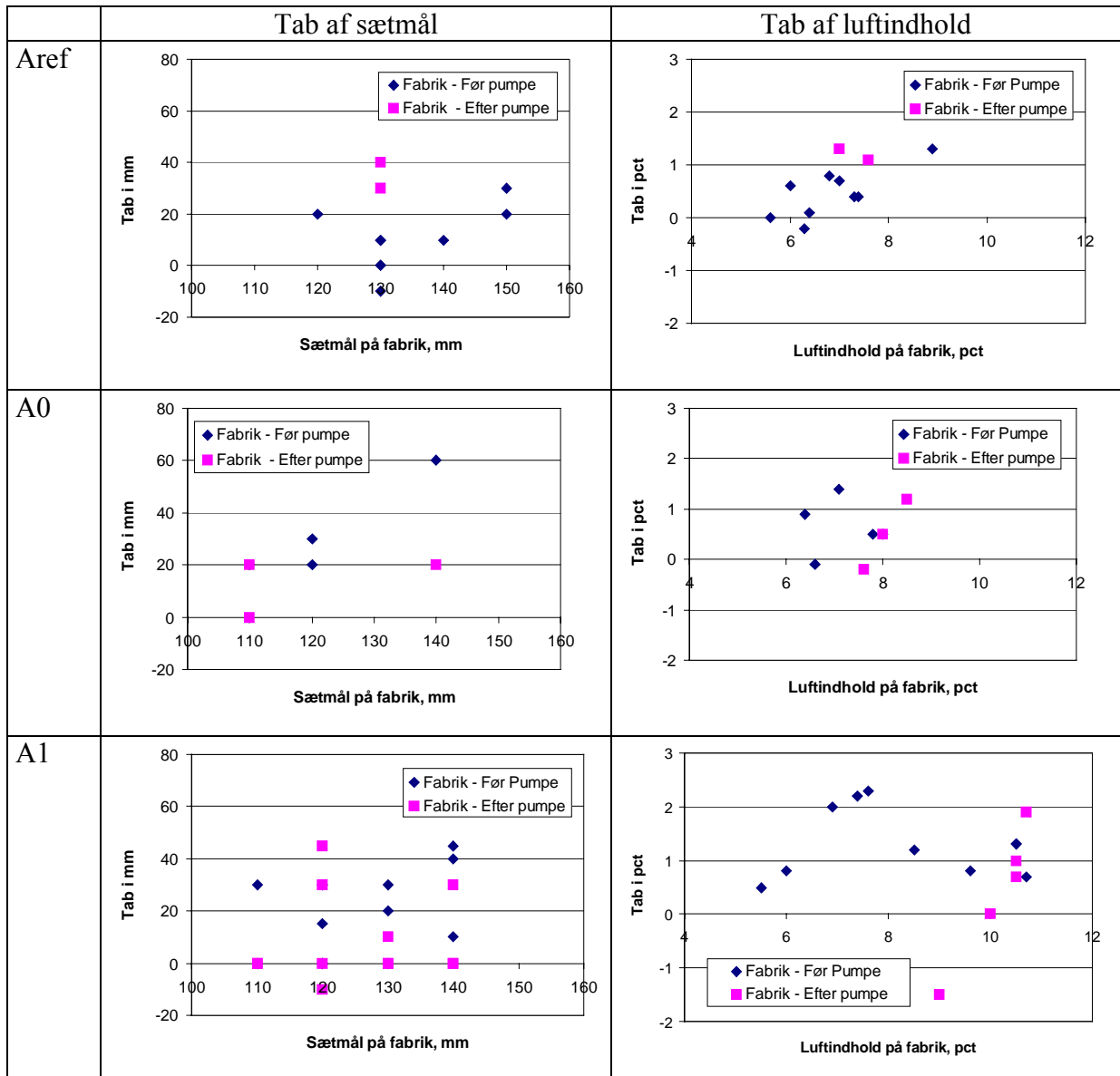
Tabel 4: Målinger af friskbetonegenskaber for A-betoner

	Sætmål [mm]		Luftindhold [%]	
	umiddelbart efter blanding	½ time efter blanding	umiddelbart efter blanding	½ time efter blanding
Aref – grundpakken	80	70	6,9	5,3
AV1	100	90	7,7	6,2
AV2	130	100	7,0	6,0
AV3	130	110	6,8	4,3
AV4	110	80	6,2	4,0
AV5	110	60	7,0	4,5
Aref – stor pakke	100	80	8,4	7,8
A0 – stor pakke	110	80	7,2	7,2
A1 – stor pakke	120	90	6,4	6,1
Aref – udvidet pakke	140	130	6,8	6,9
A1 – udvidet pakke	130	110	5,6	4,3

Det kræver væsentligt øgede doseringer af plastificerende, superplastificerende og luftindblandende stoffer for at opnå tilfredsstillende bearbejdelighed og luftindhold i beton med højt flyveaskeindhold. Det ses, at betoner med store mængder flyveaske har et lidt større tab af bearbejdelighed. Dertil kommer en klar tendens til, at der i A-betonerne er et større tab af luft i beton med store mængder flyveaske end i de respektive referencebetoner. Samtidigt

viser senere luftporeanalyser, at luftporestrukturen er grovere i beton med meget flyveaske, se kapitel 6.

I demonstrationsbro-projektet var der ved brodækstøbningen krævet totalkontrol af både sætmål og luftindhold på såvel fabrik som på byggepladsen. Dette har resulteret i et ret stort malmateriale for netop disse parametre, se Figur 5.



Figur 5: Observationer af sætmålstab og tab af luftindhold ved støbning af demonstrationsbroen.

Signaturforklaringen i Figur 5 læses på følgende måde: *Fabrik – Før pumpe* beskriver forskellen for den pågældende parameter (sætmål eller luftindhold), dvs. differencen på målinger foretaget på fabrikken og på byggepladsen umiddelbart før betonen blev pumpet. Tilsvarende for *Fabrik – Efter pumpe*.

Observationerne ved støbning af demonstrationsbroen understøtter konklusionerne fra prøvningspakkerne: Der er et lidt større tab af luft, når indholdet af flyveaske er højt. Samtidigt viste det sig på støbedagen, at betonen var svær at justere på plads, givetvis fordi bl.a. betonens bearbejdelse er meget mere påvirkelig af flyveaske-variationer end det er tilfældet med referencebetonen. Derfor er det nødvendigt at justere beton med højt indhold af flyveaske til lige præcis den aktuelle flyveaskeleverance. Da først recepten var justeret, var betonen til gengæld meget ensartet fra blanding til blanding. Entreprenøren kom imidlertid til at vente næsten 2 timer på betonen på grund af det ekstra arbejde med at justere, en ventetid, der selvsagt ikke er hensigtsmæssig midt i en brostøbning.

5.1.1 Støbeegenskaber

Mht. støbeegenskaber blev P2 i stor pakke karakteriseret som en beton, der er svær at arbejde med. Betonen havde tendens til bleeding, hvilket besværliggjorde glitningen, ligesom finishen blev dårligere end for referencen. I grundpakken, hvor der blev målt vandseparation, var der dog ikke tegn på, at P-beton med store mængder flyveaske bleeder mere end referencebetonen.

I modsætning til P2 fik A1 fine kommentarer med på vejen, da støbeegenskaberne blev vurderet i stor pakke. Finishen var også god, om end der var betydeligt flere luftbobler mod formsiden ved undervibrering end for referencebetonen.

Ved brodækstøbningen blev der for A1 konstateret problemer med at afrette og afkoste overfladen for at opnå den ønskede ruhed. Betonen dannede simpelthen alt for hurtigt skorpe, og det var derfor nødvendigt at anvende curing for at få den fornødne tid til arbejdet.

5.2 Hærdeegenskaber

Afbindingstiden blev bestemt ved proctormåling i grundpakken. Samtidigt blev varmeudviklingen målt i grundpakke og udvidet pakke, og denne giver også en indikation af afbindingstiden, se Tabel 5.

Tabel 5: Afbindingstid.

	Proctor-måling	τ_0 bestemt ved varmeudvikling
	[h]	[modenhedstime]
Pref – grundpakken	7,7	-
PV1	12	8,2
PV2	11	6,5
PV3	19	11,7
PV4	18	8,3
PV5	19,5	17,1
Aref – grundpakken	6,7	6,4 ¹
AV1	6,5	6,8
AV2	8	7,3
AV3	8	7,4
AV4	9	7,5
AV5	(antaget at være den samme som AV4)	(antaget at være den samme som AV4)
Aref – udvidet pakke	-	6,3
A0 – udvidet pakke	-	5,3
A1 – udvidet pakke	-	8,0

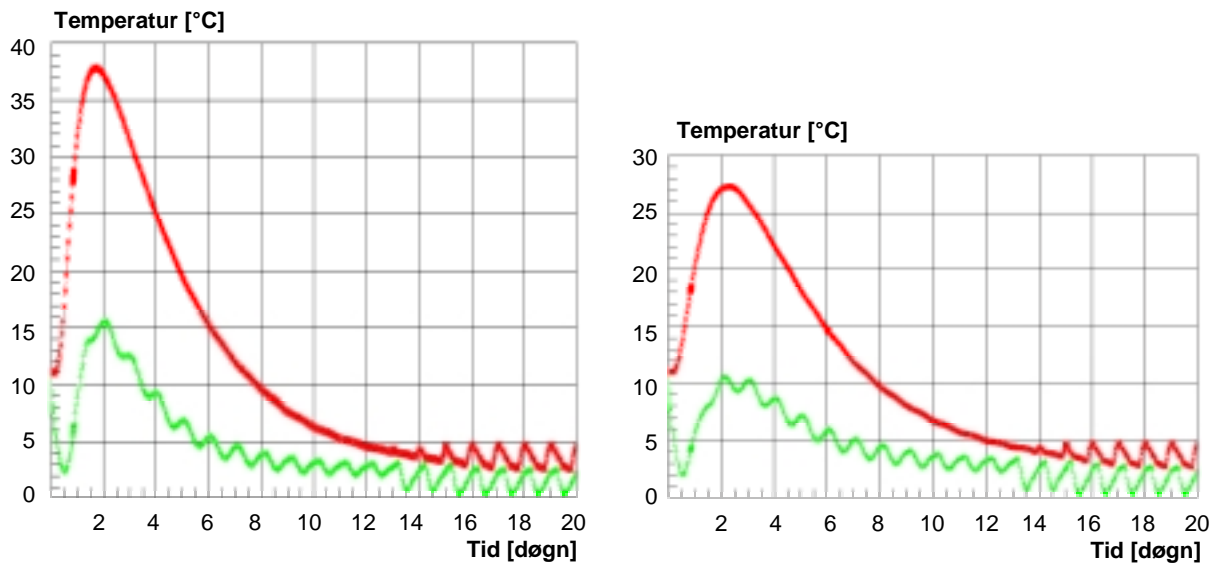
1. Ikke opgivet i oprindelig rapport, men beregnet på baggrund af Q_{∞} , τ_0 og α

I grundpakken er der for en del af P-betonerne med store mængder flyveaske bestemt afbindingstider på op i mod 20 timer, hvilket er en meget lang og helt uacceptabel afbindingstid. Afbindingstiderne for A-betonerne med forøget flyveaskeindhold er ikke nær så lange, men der er en tydelig tendens til, at de har en forlænget afbindingstiden. Dette forekommer selvom disse betoner også indeholder rapidcement, der trækker lidt i den modsatte retning, hvilket ses ved at sammenligne A0 og Aref. Det er dog ikke givet, at det er flyveasken i sig selv, der forlænger afbindingstiden. Disse betoner indeholder store mængder tilsætningsstoffer, og dette er også kendt for at kunne retardere hærdeforløbet.

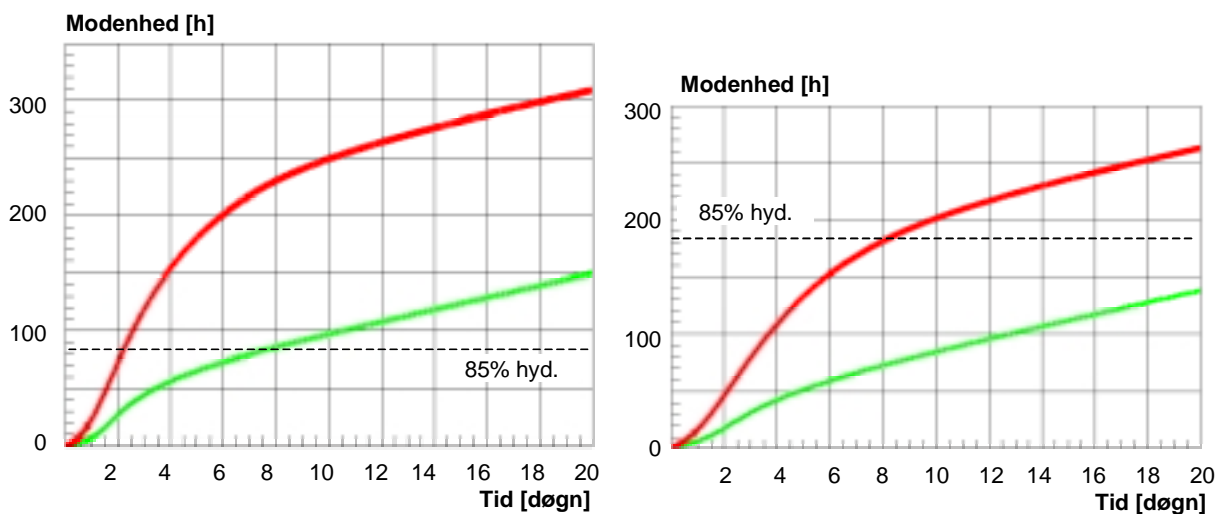
Af varmeudviklingerne ses det også, at varmeudviklingen pr. m^3 beton er betydeligt lavere for beton med store mængder flyveaske, hvilket dog ikke er særligt overraskende. Det kan være en fordel ved støbning af massive konstruktioner, men det kan også være en ulempe, for når betonen genererer mindre varme, får den en lavere temperatur og dermed en langsommere modenhedsudvikling.

Et andet positivt træk ved beton med højt indhold af flyveaske kunne konstateres i udvidet pakke, hvor A1 blev undersøgt for følsomhed overfor plastisk svind. Som den eneste beton viste den ikke tegn på revner. Der er dog tale om målinger, der er behæftet med nogen usikkerhed. Men de støtter ikke DS 482, hvor kravene til udtørningsbeskyttelse stiger med stigende indhold af flyveaske. A1 kræver tilsyneladende ikke mere af udtørningsbeskyttelsen end referencebetonen.

Særligt for A1 er der foretaget bestemmelse af de nødvendige parametre til en hærdesimulering, efterfulgt af en simulering af en brøstøbning med programmet 4C-Temp&Stess. Den pågældende simulering svarer til en vinterstøbning, hvor lufttemperaturen varierer mellem 0 og 5°C. Resultaterne ses i Figur 6 og Figur 7.



Figur 6: Simuleret temperaturudvikling i brodæk støbt med beton med A0 med 10% flyveaske (til venstre) og med A1, dvs. beton med 40% flyveaske (til højre). Den røde kurve svarer til brodækkets centertemperatur, mens den grønne kurve beskriver temperaturen i kantbjælkens overflade.



Figur 7: 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.

A1 har en langsommere varmeudvikling end A0, og derfor bliver temperaturen i brodækkets midte heller ikke så høj. Dette er på den ene side en fordel, idet det mindsker risikoen for termorevner. En simulering af spændingerne i A1 viser da også, at der ved den pågældende brostøbning kun opstår små trækspændinger, der er ukritiske i forhold til A1s trækstyrke. Men A1s langsomme varmeudvikling kan på den anden side også være en ulempe.

Den betyder, at betonen har en langsommere modenhedsudvikling. Iflg. DS 482 skal udtørningsbeskyttelsen opretholdes, indtil betonen har en hydratiseringsgrad på 85%. Som det ses af Figur 7, tager det forholdsvis lang tid, før denne hydratiseringsgrad opnås i en kantbjælke støbt med A1.

6. Holdbarhed

Holdbarhedsegenskaberne er udelukkende undersøgt for A-betoner. Undersøgelserne er primært forløbet i stor pakke.

6.1 Beton med rapidcement i stedet for lavalkali-, sulfatbestandig cement

A0 er testet mht. chloridmodstand, carbonatisering, alkali-kisel-reaktivitet og frostbestandighed. På alle punkter viste betonen tilfredsstillende egenskaber, der er næsten identiske med referencebetonens egenskaber. I nogle tilfælde er A0 endda en anelse bedre, fx er chloriddiffusionskoefficienten lidt lavere.

Rapidcementen har et deklareret C_3A -indhold på 6%, der er lidt højere end grænsen på 5% for cement med høj sulfatbestandighed. Rapidcementen har derfor kun moderat sulfatbestandighed, hvilket er årsagen til at fx Vejdirektoratet i ”Almindelige ArbejdsBeskrivelser” opretholder et krav om brug af lavalkali-, sulfatbestandig cement til alle konstruktioner i aggressivt og ekstra aggressivt miljø, selvom dette ikke kræves i DS 481.

Sulfatbestandigheden er ikke undersøgt i Grøn Beton-projektet. Producenten af rapidcementen – Aalborg Portland – vurderer, at sulfatbestandigheden ved anvendelse af rapidcement 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 aggressivtmiljø, fx konstruktioner i havvand eller fundamenter i sulfatholdig jord.

6.2 Beton med store mængder flyveaske

På baggrund af undersøgelserne af A1 kan det konkluderes at

- A1s chloridmodstand er bedre end Grøn Beton-projektets referencebeton til aggressivt miljø. Betonernes chloriddiffusionskoefficient er fulgt det første år efter støbning, hvor chloriddiffusionskoefficienten er målt til 3 terminer. I begyndelsen kan en del af forbedringen tilskrives skift af cementtype, idet A0 også har bedre chloridmodstand end referencen. A1 ser ud til at forbedre sin chloridmodstand forholdsvis mere end de øvrige betoner ved den sene termin, hvilket alene må tilskrives flyveasken og dens evne til at binde chlorider.
- A1 kunne på forhånd forudses at have større carbonatisering end referencen, da flyveaske og calciumhydroxid i betonen reagerer ved en puzzolanreaktion. Dette efterlader betonen med et lavere indhold af calciumhydroxid, så der er mindre buffer, der skal omsættes ved carbonatisering, før betonens pH-værdi falder. Forsøg viste dog, at carbonatiseringsfronten i A1 kun skred lidt hurtigere frem end i referencebetonen. Det vurderes derfor, at for konstruktioner i aggressivt miljø udført med A1-beton vil det ikke føre til en forkortet levetid, da det hyppigst er chloridindtrængning, der bestemmer levetiden.
- A1s alkali-kiselreaktivitet synes ikke at være ændret af de store mængder flyveaske.
- A1 kræver særlig agtpågivenhed for at opnå en frostbestandig beton (se uddybning af dette punkt nedenfor).

Resultater fra luftporeanalyser og måling af afskalning i en accelereret frost/tø-test (SS 13 72 44) for Aref og A1 er samlet i Tabel 6.

Tabel 6: Resultater af luftporeanalyse og frost/tø-test for henholdsvis Aref og A1.

	Luftporeanalyse, DS/EN 480-11				Frost/tø-test, SS 13 72 44		Vurdering
	Total	Mikro- luft	Specifik overflade	Afstands- faktor	Afsk. 28 døgn	Afsk. 56 døgn	
	[%]	[%]	[mm ⁻¹]	[mm]	[kg/m ²]	[kg/m ²]	
Aref – stor pakke	6,2	3,0	28	0,13	0,01	0,01	meget god
Aref – bro prøvestøbning (borede cylindre)	5,8	4,4	42	0,10	0,08 ¹	0,08 ¹	meget god
A1 – stor pakke	5,2	0,8	14	0,33	356	881	ej accept.
A1 – udvidet pakke	3,4	1,2	25	0,22	241	336	god
A1-1 – bro prøvestøbning (støbte cylindre)	4,0	1,2	24	0,22	283	329	god
A1-1 – bro prøvestøbning (borede cylindre)	3,5	0,9	17	0,31	2218 ¹	2253 ¹	ej accept.
A1-1 – bro	5,3	2,1	24	0,18	-	-	-
A1-1 – bro	5,1	2,4	24	0,19	-	-	-
A1-2 – bro	5,3	3,2	36	0,13	-	-	-

1. Frost/tø-forsøg er udført på rå overflader, hvilket forventes at give væsentligt større afskalning end test på savede overflader som beskrevet i standarden.

Resultaterne i Tabel 6 skal holdes op imod kravene i DS 481, hvor afstandsfaktoren ikke må overstige 0,20 mm og hvor betonen efter en accelereret frost/tø-test skal kunne karakteriseres som *god* eller *meget god*.

Det ses i Tabel 6, at A1s totale luftindhold er en anelse mindre end det er for Aref, sandsynligvis fordi der har været et større tab af luft i den friske beton. En meget iøjnefaldende forskel er også det lavere indhold af mikroluft før A1-1 blev justeret til A1-2 i forbindelse med bro-projektet. Dette slår tydeligt igennem på afstandsfaktoren og den specifikke overflade. Forskellen i mikroluft er et stort problem, fordi det kun er det totale luftindhold, der måles for den friske beton, og derfor kan man ikke kende mikroluftindholdet, før betonen er indbygget, og det er for sent. Resultaterne af frost-testen ser ud til at følge resultaterne af luftporeanalysen, hvor betoner med afstandsfaktorer større end 0,30 dumper eftertrykkeligt.

Resultaterne viser, at det er muligt at fremstille beton med store mængder flyveaske, der er frostbestandig, men det kræver at der er fokus på netop frostbestandigheden ved forprøvningen.

7. Konklusion

I grøn Beton-projektet er der arbejdet mod et miljømål om at reducere CO₂-emissionerne ved betonproduktion med 30%. Dette mål er søgt opnået ved to strategier:

- ved at erstatte meget energikrævende cementtyper med mindre energikrævende
- ved at erstatte cement med flyveaske for at minimere betonens klinkerindhold.

Der er afprøvet forskellige recepter, der repræsenterer disse strategier. Ved at erstatte lavalkali-, sulfatbestandig cement med rapidcement i en beton til aggressivt miljø er der således nået en CO₂-reduktion på ca. 30%. Hvis flyveaskeindholdet derudover øges fra ca. 10% til ca. 40% af pulvermængden, bliver den samlede CO₂-reduktion på over 50%.

For P-betonerne er der efter en indledende screening arbejdet videre med en beton med et flyveaskeindhold på 50% af pulverindholdet samt en specialfiller på 10% af pulverindholdet. Her er CO₂-besparelsen i forhold til referencebetonen ca. 35%.

Det ser således ud til at være muligt at opfylde miljømålet om at reducere CO₂-emissioner med 30% for både A- og P-betoner. Den testede P-beton med en specialfiller bestående af ovnstøv fra cementproduktion opfylder desuden et andet miljømål om at genanvende cement- og betonbranchens egne restprodukter, der eller skulle have været deponeret.

De testede betoner kan stort set anvendes som de referencebetoner, de er sammenlignet med, se dog nedenstående kommentarer i afsnit 7.1 og 7.2.

7.1 Beton med rapidcement i stedet for lavalkali-, sulfatbestandig cement

Beton med rapidcement kan umiddelbart anvendes jf. DS 481, også i aggressiv miljøklasse.

I Grøn Beton-projektet har A-beton med rapidcement i de foretagne undersøgelser vist egenskaber, der er fuldt på højde med en referencebeton med lavalkali-, sulfatbestandig cement.

Sulfatbestandigheden er ikke undersøgt i Grøn Beton regi. Producenten (Aalborg Portland) vurderer, at dette kun vil være et problem i særlige tilfælde, med meget sulfat i omgivelserne (fx i havvand eller mosejord), hvilket som regel kan forudses på konstruktionstidspunktet.

7.2 Beton med store mængder flyveaske

Beton med store mængder flyveaske har generelt gode mekaniske egenskaber. Flyveasken ser ikke ud til at ændre på relationen mellem trykstyrke og henholdsvis E-modul og spaltetrækstyrke. De store mængder flyveaske ser ud til at give en forholdsvis skør beton, der bryder lige efter arbejdskurvens toppunkt.

Erfaringerne med de udførelsesmæssige egenskaber for beton med store mængder flyveaske er blandede. I både P- og A-betoner er der tale om betoner med store mængder

tilsætningsstoffer for at opnå tilstrækkelig bearbejdelighed og luft i betonen. P2 blev betegnet som svær at udstøbe tilfredsstillende, bl.a. var der problemer med at glitte den ordentligt, og den endelige finish blev ikke så god som for referencebetonen. Derimod blev A1 karakteriseret som en beton med gode støbeegenskaber. Varmeudviklingen pr. m² beton er for begge betoner lav, og det kan i nogle situationer være en fordel.

Ved målinger af friskbetonegenskaber kunne det konstateres, at der er et lidt større tab af bearbejdelighed over tid for betoner med store mængder flyveaske end for referencebetonerne. A-betonerne havde desuden forholdsvis store tab af luftindhold i forhold til referencen. Ved produktion af beton til demonstrationsbroen, hvor de samme recepter er blandet mange gange, findes der et tilstrækkeligt stort materiale til at vurdere variationerne. Her viste der sig også at være større tab af sætmåls- og lufttab for beton med højt flyveaskeindhold, men da først betonen var justeret ind, var variationerne fra blanding til blanding som for referencebetonen. Netop justeringen viste sig imidlertid at være et problem på selve støbedagen, og derfor må det konstateres, at beton med store mængder flyveaske kræver mere af styring og kontrol.

Ved analyse af planslib af den hærdnede beton kunne det konstateres, at indholdet af de mindste luftporer, den såkaldte mikroluft, er mindre for betoner med store mængder flyveaske. Disse ændringer af luftporestrukturen er et stort problem, da det gør det vanskeligere at opfylde kravene til frostbestandighed. En række accelererede frost/tø-test udført på beton med store mængder flyveaske viser med stor tydelighed, at det netop er frostbestandigheden, der er denne betons akilleshæl. Om den ændrede luftporestruktur udelukkende skyldes flyveasken, eller om en uheldig kombination af tilsætningsstoffer også spiller ind, er uvist.

Beton med store mængder flyveaske viste i øvrigt tilfredsstillende holdbarhedsegenskaber. Evnen til at modstå chloridindtrængning var forbedret i forhold til referencen, mens carbonatiseringen forløb lidt hurtigere og betonens alkali-reaktivitet var uændret.

8. Referencer

- [1] ”Grundpakke rapportering. Beton med store mængder flyveaske”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, Januar 2001.
- [2] ”Rapportering. Resultatoversigt, Stor pakke”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, Marts 2001.
- [3] ”Rapportering. BK1 – Mekaniske egenskaber, Stor pakke”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, Februar 2001.
- [4] ”Status for BK2 efter brandprøvning i Stor pakke”, Center for Grøn Beton, DTU, Februar 2001.
- [5] ”Rapportering. BK3 – Udførelse – Stor pakke. Statusrapport”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, Januar 2001.
- [6] ”Rapportering. BK4 – Holdbarhed, Stor pakke”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, Februar 2001.
- [7] ”Arbejdskurver, spaltetrækstyrke og udmattelsesundersøgelser”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [8] ”Fugttransport, svind- og temperaturdeformationer samt krybning”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [9] ”Forskydningsbæreevne af bjælker. Forankring af gevindstænger”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [10] ”Bøjning af armerede bjælker. Instabilitet af søjler”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [11] ”Ekspllosiv afskalning af beton – nyudviklet prøvningsmetode”, DTU, Februar 2003.
- [12] ”Udførelse. Varmeudvikling og plastisk svind”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, September 2002.
- [13] ”Holdbarhed. Hovedrapport”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [14] ”Demobro”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.

Appendix 1: Recepter

De angivne recepter er faktiske recepter blandet på fabrik undtagen recepter til demonstrationsbroen, hvor den samme beton er blandet flere gange. Her er der i stedet angivet ”bør”-recepter fra betonblanketten. Alle betoner er blandet hos Unicon, hvor den aktuelle fabrik er angivet ved recepten.

P-betoner

Tabel 7: Recepter for P-betoner med store mængder flyveaske i grundpakken.

		Pref	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5
		Grund- pakke	Grund- pakke	Grund- pakke	Grund- pakke	Grund- pakke	Grund- pakke
		Horsens	Horsens	Horsens	Horsens	Horsens	Horsens
Cement	AaP Rapidcement	148	120	101	85	61	89
Flyveaske	Danaske B1	51	121	112	149	181	130
Mikrosilica	Elkem pulver	12	-	14	15	15	15
Specialfiller	Hvid/grå ovnstøv	-	-	-	-	-	26
Vand	Vandværksvand	138	138	144	127	131	129
Sand	0/2 Vestbirk kl. A	773	738	754	728	731	810
Sten 1	4/8 Vestbirk kl. P	174	168	172	166	164	175
Sten 2	8/16 Vestbirk kl. P	398	403	388	394	387	404
Sten 3	16/32 Vestbirk kl. P	581	562	562	564	556	587
Plastificering	C P214	1,70	1,96	1,82	2,00	2,06	2,13
Superplastificering	Conplast SP 430	-	2,40	2,25	5,04	2,62	2,42
Luftindblanding	C 316 AEA 1:11	0,40	0,14	0,22	0,24	0,26	0,21
Målt luft		4,2	4,4	4,1	5,2	5,0	2,9
Ækv. v/c-forhold		0,71	0,78	0,80	0,70	0,74	0,72

Tabel 8: Recepter for P-betoner med store mængder flyveaske og specialfiller i stor pakke.

		Pref	P2
		Stor pakke	Stor pakke
		Nr. Sundby	Nr. Sundby
Cement	AaP Rapidcement	143	90
Flyveaske	Danaske B1	51	128
Mikrosilica	Elkem pulver	10	14
Specialfiller	Hvid/grå ovnstøv	-	26
Vand	Vandværksvand	136	126
Sand	0/4 Nr. Haldne kl. A	793	781
Sten 1	4/8 Uddevalla kl. A	197	189
Sten 2	8/16 Vigsø kl. M	382	371
Sten 3	16/32 Vigsø kl. M	556	540
Plastificering	Conplast 212	1,41	1,91
Superplastificering	Conplast SP 605	-	1,10
Luftindblanding	Conplast 316 AEA 1:5	0,22	0,69
Målt luft		5,0	4,8
Ækv. v/c-forhold		0,73	0,66

A-betoner*Tabel 9: Recepter for A-betoner med store mængder flyveaske i grundpakken.*

		Aref	AV1	AV2	AV3	AV4	AV5
		Grundpakke	Grundpakke	Grundpakke	Grundpakke	Grundpakke	Grundpakke
		Horsens	Horsens	Horsens	Horsens	Horsens	Horsens
Cement	AaP Lavalkali	309	-	-	-	-	-
	AaP Rapidcement	-	274	272	219	190	188
Flyveaske	Danaske B1	32	28	64	101	138	135
Mikrosilica	Elkem pulver	18	16	18	17	17	17
Vand	Vandværksvand	131	128	140	121	118	119
Sand	0/2 Vestbirk kl. A	660	671	637	662	667	650
Sten 1	4/8 Jelsa kl. A	230	242	232	232	243	233
Sten 2	8/16 Jelsa kl. A	353	358	365	351	382	350
Sten 3	16/32 Jelsa kl. A	579	573	545	594	551	586
Plastificering	C P214	2,50	2,88	3,21	2,36	2,42	2,39
Superplastificering	Conplast SP 430	-	-	-	3,38	3,44	2,78
Luftindblanding	C 316 AEA 1:11	2,10	2,88	1,41	1,68	1,73	4,74
Målt luft		6,9	7,7	7,3	6,8	6,2	7,0
Ækv. v/c-forhold		0,37	0,41	0,42	0,42	0,42	0,44

Tabel 10: Recepter for A-betoner med store mængder flyveaske i stor og udvidet pakke.

		Aref	A0	A1	Aref	A0	A1
		Stor pakke	Stor pakke	Stor pakke	Udvidet pakke	Udvidet pakke	Udvidet pakke
		Nr. Sundby	Nr. Sundby	Nr. Sundby	Horsens	Horsens	Horsens
Cement	AaP Lavalkali	288	-	-	308	-	-
	AaP Rapidcement	-	287	189	-	314	207
Flyveaske	Danaske B1	34	32	137	31	31	137
Mikrosilica	Elkem pulver	17	17	18	18	18	17
Vand	Vandværksvand	149	155	132	145	152	128
Sand	0/4 Nr. Haldne kl. A	621	629	646	-	-	-
	0/2 Vestbirk kl. A	-	-	-	650	634	662
Sten 1	4/8 Uddevalla kl. A	244	245	251	-	-	-
	4/8 Eikefet kl. A	-	-	-	230	227	230
Sten 2	8/16 Uddevalla kl. A	855	858	871	-	-	-
	8/16 Eikefet kl. A	-	-	-	368	353	339
Sten 3	16/32 Eikefet kl. A	-	-	-	546	567	577
Plastificering	Conplat 212	2,39	2,50	2,42	2,50	2,51	2,45
Superplastificering	Conplast SP 605	-	-	3,40	-	-	-
	Strukturo BA1	-	-	-	-	-	3,43
Luftindblanding	Conplast 316 AEA 1:5	1,01	0,73	0,50	0,95	0,93	0,96
Målt luft		8,4	7,2	6,4	6,8	6,2	6,2
Ækv. v/c-forhold		0,45	0,47	0,46	0,41	0,43	0,43





Tabel 11: Recepter for A-betoner med store mængder flyveaske i demonstrationsbroen.

		Aref	A0	A1-1 ¹	A1-2 ¹
		Bro	Bro	Bro	Bro
		Horsens	Horsens	Horsens	Horsens
Cement	AaP Lavalkali	317	-	-	-
	AaP Rapidcement	-	317	210	238
Flyveaske	Emineral B5	32	32	142	135
Mikrosilica	Elkem pulver	18	18	18	18
Vand	Vandværksvand	153	153	125	133
Sand	0/2 Vestbirk kl. A	636	633	658	579
Sten 1	4/8 Eikefet kl. A	232	232	232	232
Sten 2	8/16 Eikefet kl. A	348	348	348	347
Sten 3	16/32 Eikefet kl. A	580	580	580	581
Plastificering	Conplat 212	1,0	1,0	2,2	2,7
Superplastificering	Strukturo BA1	-	-	3,7	4,3
Luftindblanding	Conplast 316 AEA 1:5	2,6	2,6	2,6	2,3
Ækv. v/c-forhold		0,42	0,42	0,41	0,41

1. A1-1 og A1-2 betegner A1 før og efter justering. A1-1 er anvendt til fundament og søjler, mens brodækket er støbt med A1-2.















Appendix 2: Prøvningsoversigt

Ved angivelse af kilden, hvor de specifikke måleresultater findes, er der i overalt anvendt følgende farvekode:

-  Grundpakkerapport om beton med store mængder flyveaske [1]
-  Rapportering fra Stor pakke bestående af en oversigtsrapport [2] samt rapporter fra hver af de faglige aktiviteter BK1-BK4 [3, 4, 5, 6]
-  Rapportering fra udvidet pakke fra de forskellige faglige aktiviteter [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13]
-  Rapportering fra demonstrationsbro-projektet [14]

P-beton

Tabel 12: Prøvning af mekaniske egenskaber (BK1).

	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5	P2 - stor pakke
Styrkeudvikling						
E-modul						
Arbejdskurver						
Spaltetrækstyrke						
Krybning ved stor last						
Temperaturudvidelse						
Fugtbevægelser						
Forankringsevne						
Udmattelse						
Krybning ved moderat last						
Forskydningsbæreevne						
Bøjningsforsøg						
Instabilitet af søjler						

Tabel 13: Prøvning af egenskaber under brandpåvirkning (BK2).

	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5	P2 - stor pakke
Mekaniske egenskaber						
Eksplisiv afskalning						

Tabel 14: Prøvning af udførelsesmæssige egenskaber (BK3).

	PV1	PV2	PV3	PV4	PV5	P2 - stor pakke
Sætmål og sætmålsændring						
Luftindhold og -ændring						
Densitet af frisk beton						
Densitet af hærdnet beton						
Vægtforskel top/bund						
Vandseparation						
Afbindingstid						
Varmeudvikling						
Vibreringstid						
Glittetid						
Betonens støbeegenskaber						
Finish mod forside samt finish af glittet overflade						
Betonens makrostruktur						
Luftporestrukturens følsomhed overfor vibrering						
Kvalitet af støbeskel						
Plastiske svindrevner						

A-betoner

A-betonerne er i nedenstående tabeller delt i betoner, hvor cementtypen er eneste ændring, og betoner, hvor både cementtype og flyveaskeindhold er ændret.

A-beton med rapidcement

Tabel 15: Prøvning af mekaniske egenskaber (BK1) for betoner med rapidcement og uændret flyveaskeindhold.

	AV1	A0 - stor pakke	A0 - udv. pakke	A0 - bro
Styrkeudvikling				
E-modul				
Arbejdskurver				
Spaltetrækstyrke				
Krybning ved stor last				
Temperaturudvidelse				
Fugtbevægelser				
Forankringsevne				
Udmattelse				
Krybning ved moderat last				
Forskydningsbæreevne				
Bøjningsforsøg				
Instabilitet af søjler				

Tabel 16: Prøvning af egenskaber under brandpåvirkning (BK2) for betoner med rapidcement og uændret flyveaskeindhold.

	AV1	A0 - stor pakke	A0 - udv. pakke	A0 - bro
Mekaniske egenskaber				
Eksplosiv afskalning				

Tabel 17: Prøvning af udførelsesmæssige egenskaber (BK3) for betoner med rapidcement og uændret flyveaskeindhold.

	AV1	A0 - stor pakke	A0 - udv. pakke	A0 - bro
Sætmål og sætmålsændring				ej ændring
Luftindhold og -ændring				ej ændring
Densitet af frisk beton				
Densitet af hærdnet beton				
Vægtforskel top/bund				
Vandseparation				
Afbindingstid				
Varmeudvikling				
Vibreringstid				
Glittetid				
Betonens støbeegenskaber				
Finish mod forside samt finish af glittet overflade				
Betonens makrostruktur				
Luftporestrukturens følsomhed overfor vibrering				
Kvalitet af støbeskel				
Plastiske svindrevner				

Tabel 18: Prøvning af holdbarhedsmæssige egenskaber (BK4) for betoner med rapidcement og uændret flyveaskeindhold.

	AV1	A0 - stor pakke	A0 - udv. pakke	A0 - bro
Luftporestruktur				
Frostbestandighed, afskalning				
Frostbestandighed, indre revnedannelse				
Carbonatisering				
Alkalireaktivitet				
Chloridmodstand				
Tyndslibsanalyse				

A-beton med rapidcement og store mængder flyveaske

Tabel 19: Prøvning af mekaniske egenskaber (BK1) for betoner med rapidcement og store mængder flyveaske.

	AV2	AV3	AV4	AV5	A1 - stor pakke	A1 - udv. pakke	A1-1 - bro	A1-2 - bro
Styrkeudvikling								
E-modul							se note 1	
Arbejdskurver								
Spaltetrækstyrke								
Krybning ved stor last								
Temperaturudvidelse								
Fugtbevægelser								
Forankringsevne								
Udmattelse								
Krybning ved moderat last								
Forskydningsbæreevne								
Bøjningsforsøg								
Instabilitet af søjler								

1. incl. E-modul udvikling

Tabel 20: Prøvning af egenskaber under brandpåvirkning (BK2) for betoner med rapidcement og store mængder flyveaske.

	AV2	AV3	AV4	AV5	A1 - stor pakke	A1 - udv. pakke	A1-1 - bro	A1-2 - bro
Mekaniske egenskaber								
Eksplisiv afskalning								

Tabel 21: Prøvning af udførelsesmæssige egenskaber (BK3) for betoner med rapidcement og store mængder flyveaske.

	AV2	AV3	AV4	AV5	A1 - stor pakke	A1 - udv. pakke	A1-1 - bro *	A1-2 - bro
Sætmål og sætmålsændring							ej ændring	
Luftindhold og -ændring							ej ændring	
Densitet af frisk beton								
Densitet af hærdnet beton								
Vægtforskel top/bund								
Vandseparation								
Afbindingstid								
Varmeudvikling								
Vibreringstid								
Glittetid								
Betonens støbeegenskaber								
Finish mod forside samt finish af glittet overflade								
Betonens makrostruktur								
Luftporestrukturens følsomhed overfor vibrering								
Kvalitet af støbeskel								
Plastiske svindrevner								

* For A1-1 til demonstrationsbroen er der udover prøvningsomfanget i dette skema udført målinger af selvdutøringsvind, krybning i tidlig alder og spaltetrækstyrke-udvikling for at kunne gennemføre en hærdesimulering.

Tabel 22: Prøvning af holdbarhedsmæssige egenskaber(BK4). for betoner med rapidcement og store mængder flyveaske.

	AV2	AV3	AV4	AV5	A1 - stor pakke	A1 - udv. pakke	A1-1 - bro	A1-2 - bro
Luftporestruktur								
Frostbestandighed, afskalning								
Frostbestandighed, indre revner								
Carbonatisering								
Alkalireaktivitet								
Chloridmodstand								
Tyndslibsanalyse								