



Center for Grøn Beton

Beton med alternativ flyveaske

Udført af:

Marianne Tange Hasholt

Dorthe Mathiesen

Teknologisk Institut, Beton, december 2002

Titel: Beton med alternativ flyveaske

Udført af: Marianne Tange Hasholt
Dorthe Mathiesen

Dato: December 2002

ISBN: 87-7756-681-5

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

Indholdsfortegnelse

0. INDLEDNING	4
1. RECEPTER	5
1.1 P-BETONER	5
1.2 A-BETONER	6
2. MEKANISKE EGENSKABER	7
2.1 STYRKE OG STIVHED	7
2.2 KRYBNING	8
2.3 SEMI-FULDSKALA FORSØG MED SØJLER OG BJÆLKER.....	8
3. BRAND.....	10
3.1 MEKANISKE EGENSKABER UNDER BRAND	10
3.2 EKSPLOSIV AFSKALNING	10
4. UDFØRELSE	11
4.1 PRODUKTIONSEGENSKABER	11
4.2 HÆRDEEGENSKABER.....	12
5. HOLDBARHED	13
6. KONKLUSION	14
7. REFERENCER	15
APPENDIX 1: RECEPTER.....	16
P-BETONER.....	16
A-BETONER	17
APPENDIX 2: PRØVNINGSOVERSIGT.....	18
APPENDIX 3: KEMISK ANALYSE AF ALTERNATIV FLYVEASKE	20

0. 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%

Formålet med denne rapport er at sammenfatte de resultater og erfaringer, der er opnået for beton med alternativ flyveaske i løbet af Grøn Beton-projektet. Med *alternativ* flyveaske menes både flyveaske, der stammer fra fyring med biobrændsel så som træflis og halm og aske fra samfyring af kul og biobrændsel. I Grøn Beton-projektet er der imidlertid kun afprøvet aske fra fyring med ren biobrændsel. Den alternative flyveaske er ikke omfattet af DS/EN 450, der kun omhandler flyveaske fra kulfyrede værker. Derfor kan den alternative flyveaske med de nuværende bestemmelser i DS 481 ikke anvendes som flyveaske i beton.

Betonvareindustrien i Sverige anvender allerede den alternative flyveaske. Der produceres imidlertid langt større mængder alternativ flyveaske, end betonvareindustrien kan aftage, hvorfor store mængder bliver deponeret. Den alternative flyveaske er derfor blevet inddraget i Grøn Beton-projektet for at introducere et nyt restprodukt i fabriksbetonproduktion, der ellers skulle være deponeret.

1. 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 betonerne. De fuldstændige recepter er angivet i appendix 1. Nedenfor redegøres kun for de enkelte betoners karakteristika.

I Grøn Beton-projektet er alle betoner med alternativ flyveaske produceret hos Sydsten.

1.1 P-betoner

I grundpakken blev der udarbejdet to P-recepter med alternativ flyveaske på baggrund af en velkendt referencerecept fra Sydstens fabrik i Eslöv, se beskrivelsen af PFA20 og PFA40 i Tabel 1.

Tabel 1: P-beton med alternativ flyveaske i grundpakken. Beskrivelsen svarer til "bør"-recepter.

Betegnelse	PFA20	PFA40
Beskrivelse	P-beton, hvor alternativ flyveaske udgør 20% af pulvermængden (bestemt ved vægt)	P-beton, hvor alternativ flyveaske udgør 40% af pulvermængden (bestemt ved vægt)
Produktionssted	Sydsten/Eslöv	Sydsten/Eslöv

Oprindeligt var det hensigten at proportionere betonerne efter det generelle princip i Grøn beton, hvor:

- pastavolumenet fastholdes på samme niveau som for referencerecepten
- det ækvivalente v/c-forhold fastholdes (efter svensk praksis er aktivitetsfaktoren for flyveaske 0,3)

Den lave aktivitetsfaktor samt det forhold, at flyveaske har lavere densitet end cement (2300 kg/m³ mod 3200 kg/m³) betyder, at pulvervolumenet bliver stort og vandindholdet pr. m³ beton følgelig meget lille. Men da den alternative flyveaske samtidigt forøger betonens vandbehov, viste det sig i praksis umuligt at følge det skitserede princip. Det blev derfor besluttet

- at erstatte cement med alternativ flyveaske, kg til kg.

Dette betyder, at pastavolumenet stiger og at tilslagsvolumenet må reduceres tilsvarende. Det betyder også, at de ækvivalente v/c-forhold stiger. Dette blev dog fundet acceptabelt, så længe betonerne blot opfylder DS 481s krav. Her er der for P-betonerne ikke stillet krav til det ækvivalente v/c-forhold, kun til betonens styrke.

Stor pakke

Det blev besluttet at inddrage P-beton med alternativ flyveaske i stor pakke. Den pågældende beton, P7, har et indhold på 30% af pulvervægten, da grundpakken viste, at 40% var for meget til at opnå tilfredsstillende styrker. P7 er således en mellemting mellem PFA20 og PFA40.

Udvidet pakke

P7 fra stor pakke fortsatte stort set uændret i udvidet pakke, dog er recepten justeret til Sydstens fabrik i Malmö.

1.2 A-betoner

Der er i grundpakken udført forsøg med to A-betoner med alternativ flyveaske, hvor flyveasken udgør henholdsvis 20% og 30% af pulvermængden, se Tabel 2.

Tabel 2: A-beton med alternativ flyveaske i grundpakken.

Betegnelse	AFA20	AFA30
Beskrivelse	P-beton, hvor alternativ flyveaske udgør 20% af pulvermængden (bestemt ved vægt)	P-beton, hvor alternativ flyveaske udgør 30% af pulvermængden (bestemt ved vægt)
Produktionssted	Sydsten/Eslöv	Sydsten/Eslöv

Lige som for P-betonerne viste det sig ikke muligt at fastholde pastamængde og ækvivalent v/c-forhold, men de to betoner overholder DS 481s krav til A-betoner, hvor det ækvivalente v/c-forhold ikke må overstige 0,45 (flyveasken regnes med aktivitetsfaktoren 0,5).

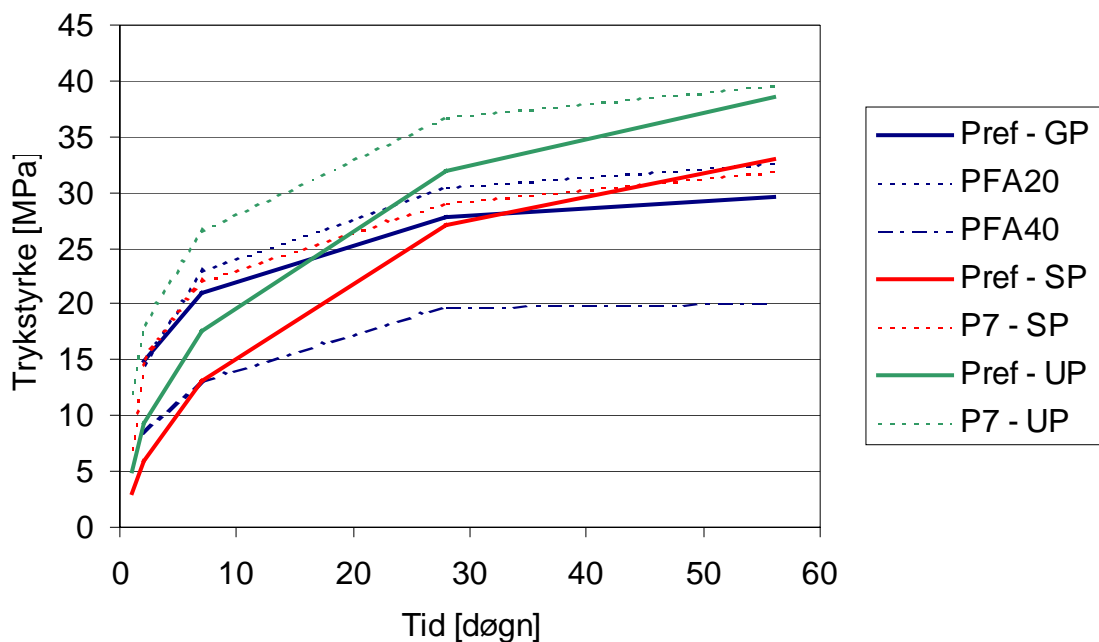
Stor pakke

Undersøgelserne i grundpakken viste, at beton med alternativ flyveaske har et højt indhold af chlorider. Derfor blev det opgivet at lave beton med alternativ flyveaske til brug i aggressivt miljø, hvor chloridindholdet kan øges yderligere på grund af udefrakommende saltes indtrængen, og hvor risikoen for armeringskorrosion derfor bliver for stor. Den alternative flyveaske har også et højt alkaliindhold, der kan være problematisk i aggressivt miljø, hvor fugtforholdene ofte er gode for alkali-kiselreaktioner.

2. Mekaniske egenskaber

2.1 Styrke og stivhed

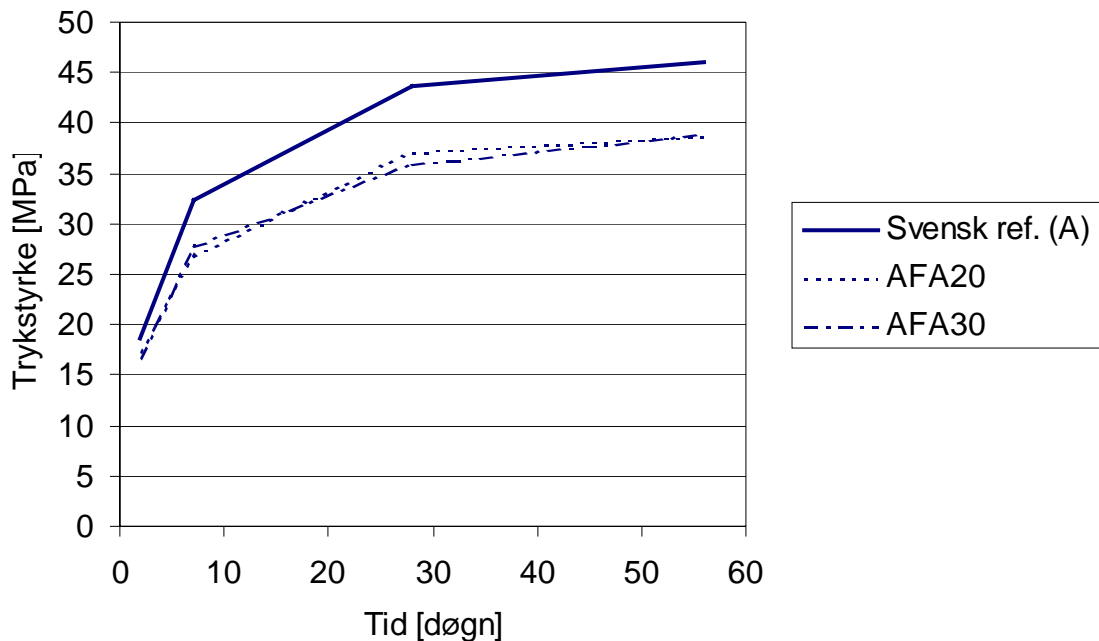
Der er målt trykstyrkeudvikling i både grundpakken, stor pakke og udvidet pakke. Resultaterne for beton med alternativ flyveaske fremgår af Figur 1 og Figur 2.



Figur 1: Styrkeudvikling for P-betoner.

I grundpakken (de blå kurver) viste resultaterne, at styrkeudviklingen for PFA20 følger styrkeudviklingen for Sydsten/Eslövs egen reference, mens PFA40s styrke til alle terminer er betydeligt lavere. Den lave styrke tilskrives det høje flyveaskeindhold, hvorfor flyveaskeindholdet i P7 i stor pakke blev sat til 30% af pulvermængden.

30% ser ud til at være et optimalt flyveaskeindhold for den pågældende P-beton. I både stor pakke (røde kurver) og udvidet pakke (grønne kurver) er der opnået pæne styrker for P7. Bemærk! referencebetonerne i stor og udvidet pakke er ikke direkte sammenlignelige med P7, idet referencebetonerne stammer fra Unicons fabrikker i henholdsvis Nr. Sundby og Horsens.



Figur 2: Styrkeudvikling for A-beton.

I grundpakken (blå kurver) viste A-beton med alternativ flyveaske sig at have lavere styrker end referencebetonen frem. Der kan ikke konstateres nogen forskel på, om betonen indeholder 20 eller 30% alternativ flyveaske.

Der er ikke målt E-modul på betoner med alternativ flyveaske i grundpakken grundet tekniske problemer. Det betyder, at der kun er målt E-modul og spaltetrækstyrke på to betoner med alternativ flyveaske, nemlig P7 i stor og udvidet pakke. Dette er et meget spinkelt grundlag at vurdere sammenhængen mellem på den ene side E-modul eller spaltetrækstyrke og på den anden side trykstyrken. Der er dog ikke noget, der tyder på, at disse sammenhænge er anderledes end for andre betoner, herunder beton med konventionel flyveaske.

2.2 Krybning

Krybning ved stor last er undersøgt for P7 i stor pakke. P7 kryber i lighed med de øvrige testede betoner fra Sydsten hurtigere end referencen Pref fra Unicon i Nr. Sundby, hvilket dog må tilskrives forskellen mellem svensk og dansk praksis snarere end de respektive grønne tiltag. Det ser ikke ud til, at alternativ flyveaske øger risikoen for krybebrud.

2.3 Semi-fuldskala forsøg med søjler og bjælker

Arbejdskurver målt i stor pakke viste, at P7 var den sejeste af alle de testede betoner og havde en brudtøjning, der klart oversteg de 3,5%, der normalt regnes med. Derfor blev denne beton udvalgt til forsøg med bjælkens bøjningsbæreevne og instabilitet af søjler. Disse forsøg kan betragtes som en kontrol af beregningsmetoder: Når materialeparametrene udtrykt ved bl.a. arbejdskurver er kendt, er det så muligt at beregne forskellige konstruktionsdeles opførsel ved belastning? Således er målingerne af bjælkernes bøjningsbæreevne sammenlignet med

bøjningsbæreevnen beregnet vha. DS 411, metode A og B, og søjlernes instabilitet er sammenlignet med en numerisk beregning. Alt i alt ser bjælker støbt med P7 ud til at opføre sig som forudsat i DS 411, og søjleberegningerne ser heller ikke ud til at være anderledes for P7 end for andre betoner.

For P7s vedkommende er der ligeledes udført forsøg med armeringsforankring og bjælkers forskydningsbæreevne. Det ser ikke ud til, at tilsætning af alternativ flyveaske ændrer ved betonens forankringsstyrke set i forhold til trykstyrken. Forskydningsbæreevnen for P7 er lavere end det, der kan beregnes vha. formler angivet i DS 411 baseret på diagonaltrykmetoden, men det samme har kunnet konstateres for alle de testede P-beton.

3. Brand

3.1 Mekaniske egenskaber under brand

De mekaniske egenskaber under brand er undersøgt for P7 i udvidet pakke. Resultaterne viser, at P7s styrke og stivhed ændrer sig i takt med temperaturen på samme måde som referencebetonen Pref. P7s temperaturudvidelse er mindre end Prefs, især ved temperaturer over 400°C, hvor Prefs temperaturudvidelseskoefficient stiger. Den observerede forskel har dog næppe ret meget at gøre med den alternative flyveaske. Det er primært tilslaget termiske udvidelse, der styrer betonens udvidelse. Pref har tilslag bestående af kvartssand og søsten, mens P7 har tilslag af knust granit med en mindre udvidelse

3.2 Eksplosiv afskalning

P7 blev testet for eksplosiv afskalning i en prøvestand i stor pakke. P7 klarede sig godt i sammenligning med gennemsnittet af P-betonerne, det vil sige mindre end 20% af den eksponerede overflade skallade af. Det er dog ikke afklaret, hvor godt prøvesituationen afspejler en realistisk brandsituation.

I udvidet pakke blev P7 igen testet for eksplosiv afskalning, denne gang både ved semi-fuldskalaforsøg med vægelementer udført på Dansk Brand- og Sikringsteknisk Institut, dels i samme prøvestand som i stor pakke, men med et modificeret prøvningsforløb. P7-vægelementerne viste ingen tegn på eksplosiv afskalning. Dette understøttes af resultaterne fra prøvestanden.

4. Udførelse

4.1 Produktionsegenskaber

Bearbejdighed og luftindhold er to af de vigtigste produktionsegenskaber. Målinger af netop disse egenskaber er gentaget i alle Grøn Betons prøvningspakker. Resultaterne fremgår af Tabel 3 og Tabel 4.

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 – GP (Eslöv)	130	100	2,1	2,1
PFA20	60	30	3,8	3,6
PFA40	90	80	3,0	2,8
Pref – stor pakke	90	40 ¹	5,0	4,4 ¹
P7 – stor pakke	80	40 ¹	3,5	3,0 ¹
Pref – udv. pakke	130	80	4,6	3,5
P7 – udv. pakke	80	60	1,8	2,1

1. målt 1 time efter blanding i stedet for ½ time efter blanding

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
Svensk reference (A)	80	50	5,2	4,9
AFA20	90	70	7,2	5,8
ABS30	130	80	7,8	6,5

For både P- og A-betoner med alternativ flyveaske kunne det konstateres, at der kræves en væsentlig højere dosering af plastificerende og superplastificerende midler for at opnå en tilfredsstillende bearbejdighed. Dette kan både skyldes, at den alternative flyveaske gør betonen mere vandkrævende, og at flyveaskens indhold af kulstof reagerer med tilsætningsstofferne og på den måde gør dem uvirksomme. I grundpakken havde P-betonerne med alternativ flyveaske allerede fra begyndelsen lavere sætmål end referencen og navnlig PFA20 tabte hurtigt bearbejdigheden. Ved de øvrige blandinger af beton med alternativ flyveaske er sætmålstabene mere lig de respektive referencebetoner.

For A-beton med alternativ flyveaske ser det ud til, at luften er mindre stabil end i referencebetonen. Dette kan igen skyldes, at flyveaskens glødetab, der reagerer med luftindblandingsmidlet.

4.2 Hærdeegenskaber

Afbindingstiden blev bestemt i grundpakken ved hjælp af proctormålinger. 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 – GP (Sydsten, Eslöv)	7,2	4,1
PFA20	7,7	6,1
PFA40	>8,0	9,0
Pref – udv. pakke (Unicon, Horsens)	-	5,7
P7 – udv. pakke	-	5,7
Aref – GP (Sydsten, Eslöv)	5,3	4,1
AFA20	7,3	5,9
AFA30	8,7	7,6

Det samlede billede tyder på, at beton med alternativ flyveaske har en længere afbindingstid end referencebetonerne fra Sydsten, der ikke indeholder flyveaske. Derimod er afbindingstiden målt i udvidet pakke på niveau med den danske referencebeton, der indeholder flyveaske. Det ser således ikke ud til, at forlængelsen af afbindingstid er længere for alternativ flyveaske end for konventionel flyveaske. Det er dog ikke klart, om det er asken i sig selv, der forårsager denne forlængelse. Det kan også skyldes den øgede dosering af tilsætningsstoffer, der ofte virker retarderende.

Den forlængede afbindingstid smittede også af på tid til glitning målt i stor pakke for P7. Betonen blev ligeledes i stor pakke undersøgt med hensyn til generelle støbeegenskaber. P7 blev karakteriseret som en anelse klisteret, men ellers fundet i orden. Finish blev på den hærdede beton blev ikke undersøgt.

I udvidet pakke blev P7 undersøgt med hensyn til, hvor følsom betonen er overfor plastisk svind. P7 ligner referencen Pref med hensyn til fordampningshastighed, tid til ophør af våd overflade og fordampning ved første revne. Pulveret i Pref indeholder ca. 25% konventionel flyveaske og 5% mikrosilica, så den puzzolanske tilsætning i begge betoner, Pref og P7, er således cirka 30%, og målingerne tyder også på, at de har nogenlunde samme behov for udtørningsbeskyttelse.

5. Holdbarhed

I Grøn Beton-projektet er de holdbarhedsmæssige egenskaber kun undersøgt for A-betoner. Der er ikke udført deciderede holdbarhedsundersøgelser for beton med alternativ flyveaske, da disse var henlagt til stor og udvidet pakke, hvor ingen A-betoner med alternativ flyveaske deltog.

Den alternative flyveaske har et ret højt indhold af chlorid (ca. 1,5%). Det betyder, at der via flyveasken tilsættes chlorider svarende til 0,3% af pulvervægten i AFA20 og 0,5% af pulvervægten i AFA30. Det er så store mængder, at betonen må anses som uegnet til aggressivt miljø, hvor udefra kommende chlorider kan øge niveauet yderligere. I DS 481 er kravet til A-beton således, at indholdet af chlorider ikke må overstige 0,2% af pulvervægten. I armeret beton i passiv miljøklasse tillades derimod et chloridindhold på op til 1,0% af pulvervægten, så her er det ikke på samme måde et problem at anvende den alternative flyveaske. Der er heller ikke krav i DS 481 til P-betonernes alkaliindhold, hvorfor den alternative flyveaskes reativt høje alkaliindhold ikke skønnes at være et problem i denne miljøklasse.

6. Konklusion

Beton med alternativ flyveaske fra biobrændsel har en klar miljøfordel:

- ved at introducere alternativ flyveaske i fabriksbetonproduktion bliver det muligt at anvende et restprodukt, der ellers skulle have været deponeret.

DS 481 tillader kun brug af flyveaske, der opfylder DS/EN 450, det vil sige flyveaske fra kulfyring. Den alternative flyveaske kan tilsættes som en ”øvrige tilsætning”, idet det så skal dokumenteres, at den alternative flyveaske ikke fremmer armeringskorrosion eller på anden måde forringer betonens egenskaber. Men som ”øvrige tilsætning” er den alternative flyveaske kun interessant at anvende i P-betoner, for hvis den alternative flyveaske erstatter konventionel flyveaske i miljøklasse M, A eller E uden at måtte medregnes i det ækvivalente v/c-forhold, vil betonen få svært ved at opfylde krav til minimum v/c-tal.

Det er et andet regelgrundlag, der er gældende i Sverige, hvor Sydsten producerer beton med alternativ flyveaske.

I Grøn Beton-projektets forskellige prøvningsfaser har P-beton med alternativ flyveaske (P7) vist sig at have generelt gode mekaniske egenskaber. Betonen er meget sej, men beregningsmæssigt er det muligt at regne på konstruktionsdelenes styrke og stivhed efter almindelige principper.

Med hensyn til brand ser ændringerne af P7s styrke og stivhed ud til at følge de temperaturbestemte ændringer i Prefs styrke og stivhed. P7s termiske udvidelse ved høje temperaturer (over 400°C) er betydeligt mindre end Prefs. I forsøg med opvarmning op til ca. 600°C og efterfølgende afkøling var P7s temperaturudvidelse stort set reversibel, mens Pref fik blivende deformation på ca. 10‰ pga. revnedannelse. Det er dog primært forskelle i de to betoners tilslagssammensætning, der er årsag til forskellene i termisk opførsel. Ved semi-fuldskalaforsøg viste P7 ingen tegn på eksplosiv afskalning og ligner på dette punkt de øvrige testede P-betoner, incl. referencen.

Med hensyn til de udførelsesmæssige egenskaber har den alternative flyveaske især betydningen for afbindingstiden, der bliver markant forlænget i forhold til beton uden flyveaske, men ikke i forhold til beton med aske fra kulfyring, der opfylder DS/EN 450. Der er stor sandsynlighed for, at den forlængede afbindingstid i højere grad skyldes en højere dosering af tilsætningsstoffer end asken i sig selv, og det er derfor også sandsynligt, at problemet kan gøres mindre ved en bedre receptjustering. Beton med alternativ flyveaske blev i øvrigt karakteriseret som havende udmærkede støbeegenskaber, om end betonen var en anelse klisteret. Igen spiller mængden af tilsætningsstoffer givetvis en rolle.

I den indledende fase, kaldet grundpakken, indgik både A- og P-beton med alternativ flyveaske. Flyveaskens indhold af chlorid gav dog anledning til et betænkeligt højt chloridindhold i A-betonen, som derfor ikke forventes at have tilstrækkelig holdbarhed.

Samlet vurderes den alternative flyveaske fra biobrændsel således at være uegnet til A-beton, men den vil kunne anvendes i P-beton.

7. Referencer

- [1] ”Grundpakke rapportering. Beton med uorganiske restprodukter. Slammaske og Alternativ 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] ”Eksplisiv afskalning af beton – nyudviklet prøvningsmetode”, Center for Grøn Beton, DTU, Februar 2003.
- [12] ”Mekaniske egenskaber under brand”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [13] ”Udførelse. Varmeudvikling og plastisk svind”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, September 2002.
- [14] ”Holdbarhed. Hovedrapport”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.

Appendix 1: Recepter

De angivne recepter er faktiske recepter blandet på fabrik. Recepterne er opgivet efter dansk praksis, dvs. at tilslaget er angivet i våd, overfladetør tilstand.

Den kemiske sammensætning af den alternative flyveaske er målt i grundpakken og angivet i appendix 3.

P-betoner

Tabel 6: Recepter for P-betoner med alternativ flyveaske. Alle mængder er angivet i $[kg/m^3]$.

		Sydsten ref.	PFA20	PFA40	Pref	P7	Pref	P7
		Grund- pakke	Grund- pakke	Grund- pakke	Stor pakke	Stor pakke	Udv. pakke	Udv. pakke
		Eslöv	Eslöv	Eslöv	Horsens	Eslöv	Horsens	Malmö
Cement	Slite Std/PK cement AaP Rapid	275 -	211 -	176 -	- 143	191 -	- 166	194 -
Flyveaske	Perstorp bioaske Danaske B1	- -	60 -	101 -	- 51	79 -	- 60	79 -
Mikrosilica	Pulver	-	-	-	10	-	12	-
Vand	Vandværksvand	182	172	163	136	157	146	165
Sand	0/8 Östervang	1004	992	975	-	997	-	1008
	0/4 Nr. Haldne kl. A	-	-	-	793	-	-	-
	0/2 SC Vestbirk	-	-	-	-	-	737	-
Sten 1	4/8 Uddevalla kl. A	-	-	-	197	-	-	-
	4/8 SC Århus	-	-	-	-	-	199	-
Sten 2	8/16 Östervang	-	106	130	-	118	-	-
	8/16 Dalby	-	-	-	-	-	-	227
	8/16 Vigsø kl. M	-	-	-	382	-	-	-
	8/16 SC Århus	-	-	-	-	-	398	-
Sten 3	16/25 Östervang	890	760	773	-	783	-	-
	16/25 Dalby	-	-	-	-	-	-	667
	16/32 Vigsø kl. M	-	-	-	556	-	-	-
	16/32 SC Århus	-	-	-	-	-	545	-
Plastificering	Peramin V	-	1,29	1,41	-	1,54	-	1,19
	Conplast 212	-	-	-	1,41	-	1,95	-
Superplastificering	Peramin F ¹	1,35	1,36	2,99	-	-	-	2,05
	CEM 92M	-	-	-	-	1,88	-	-
Luftindbl.-middel	Conplast 316 AEA 1:5	-	-	-	0,22	-	0,08	-
Målt luft	[%]	2,1	3,8	3,0	5,0	3,5	4,6	2,0
Ækv. v/c-forhold	[-]	0,67	0,72	0,73	0,73	0,69	0,67	0,71

1. Peramin F indeholder formaldehyd, der figurerer på Miljøstyrelsens liste over uønskede stoffer. Den blev derfor forsøgt erstattet i stor pakke, men blev igen introduceret i udvidet pakke.

A-betoner*Tabel 7: Recepter for A-betoner med alternativ flyveaske. Alle mængder er angivet i [kg/m³].*

		Reference	AFA20	AFA30
		Grundpakke	Grundpakke	Grundpakke
		Eslöv	Eslöv	Eslöv
Cement	Anlægningscement	423	336	287
Flyveaske	Perstorp bioaske	-	85	123
Vand	Vandværksvand	159	151	140
Sand	0/8 Östervang	859	814	820
Sten 1	8/16 Östervang	222	202	212
Sten 2	16/25 Östervang	693	671	664
Luftindblanding	Peramin HPA	0,13	0,21	0,22
Superplastificering	Peramin F ¹	2,93	2,08	2,00
	Glenium	-	-	1,66
Målt luft	[%]	5,2	7,2	7,8
Ækv. v/c-forhold	[-]	0,38	0,40	0,41

1. Peramin F indeholder formaldehyd, der figurerer på Miljøstyrelsens liste over uønskede stoffer. Den blev derfor forsøgt erstattet i stor pakke, men blev igen introduceret i udvidet pakke.

Appendix 2: Prøvningsoversigt

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

- Grundpakkerapport om beton med uorganiske restprodukter [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, 13,14]

Tabel 8: Prøvning af mekaniske egenskaber (BK1).

	PFA20	PFA40	P7 - stor pakke	P7 - udv. pakke	AFA20	AFA30
Styrkeudvikling						
E-modul						
Arbejdskurver						
Spaltetrækstyrke						
Krybning ved stor last						
Temperaturudvidelse						
Fugtbevægelser						
Foirankringsevne						
Udmattelse						
Krybning ved moderat last						
Forskydningsbæreevne						
Bøjningsforsøg						
Instabilitet af søjler						

Tabel 9: Prøvning af egenskaber under brandpåvirkning (BK2).

	PFA20	PFA40	P7 - stor pakke	P7 - udv. pakke	AFA20	AFA30
Mekaniske egenskaber						
Eksplisiv afskalning						

Tabel 10: Prøvning af udførelsesmæssige egenskaber (BK3).

	PFA20	PFA40	P7 - stor pakke	P7 - udv. pakke	AFA20	AFA30
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						

Appendix 3: Kemisk analyse af alternativ flyveaske

I Tabel 11 ses den kemiske sammensætning af den alternative flyveaske, der er benyttet i grundpakken. Til sammenligning er der også angivet sammensætningen af en konventionel flyveaske, der opfylder flyveaskestandarden DS/EN 450.

Tabel 11: Kemisk sammensætning af alternativ flyveaske og en traditionel dansk flyveaske, der benyttes til betonproduktion.

Komponent	Enhed	Alternativ flyveaske	Typisk dansk flyveaske, der overholder DS/EN 450
CaO	% af tørstof	18,1	2,78
SiO ₂	% af tørstof	29,4	59,7
Fe ₂ O ₃	% af tørstof	4,23	7,57
Al ₂ O ₃	% af tørstof	14,7	21,3
TiO ₂	% af tørstof	8,15	0,98
P ₂ O ₅	% af tørstof	0,424	0,34
MgO	% af tørstof	2,84	1,35
MnO ₂	% af tørstof	0,599	-
Cl	% af tørstof	1,50	0,004
SO ₃	% af tørstof	-	0,65
K ₂ O-total	% af tørstof	2,91	0,65
Na ₂ O-total	% af tørstof	2,81	0,52
Na ₂ O-ækvivalent	% af tørstof	4,71	1,84
As	mg/kg	189	<30
Ba	mg/kg	9620	-
Be	mg/kg	1,48	-
Cd	mg/kg	31,3	<10
Co	mg/kg	<4,99	32
Cr	mg/kg	1050	137
Cu	mg/kg	916	77
Hg	mg/kg	1,47	0,2
La	mg/kg	56,9	-
Nb	mg/kg	<5,30	-
Ni	mg/kg	138	100
Pb	mg/kg	1010	34
Sc	mg/kg	6,62	-
Sn	mg/kg	<21,2	-
Sr	mg/kg	668	-
V	mg/kg	55,7	268
W	mg/kg	<53	-
Y	mg/kg	36	-
Zn	mg/kg	6920	181
Zr	mg/kg	38,8	-
glødetab	% af tørstof	4,6	3,4