



Center for Grøn Beton

Beton med betonslam

Udført af:

Marianne Tange Hasholt

Dorthe Mathiesen

Teknologisk Institut, Beton, december 2002

Titel: Beton med betonslam

Udført af: Marianne Tange Hasholt
Dorthe Mathiesen

Dato: December 2002

ISBN: 87-7756-685-8

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	9
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.....	17
P-BETONER	17
A-BETONER.....	18
APPENDIX 2: PRØVNINGSOVERSIGT	19

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 sammenfatter de resultater og erfaringer, der er opnået for beton med betonslam i løbet af Grøn Beton-projektet.

Betonslam er et restprodukt, der stammer fra vask af biler, blandeanlæg mm. Det består således af hydratiserede cementpartikler, flyveaske og mikrosilica, rester af tilsætningsstoffer samt fint sand opslemmet i vand, idet stenfraktionen skilles fra og genbruges separat. Når betonslam blandes i beton, indgår vand i slammets som en del af blandevandet, mens slammets tørstofindhold erstatter en del af tilslaget. Problemet ved anvendelse af betonslam i beton er, at tørstofindholdet varierer både over tid og lokalt i beholderen. Således påvirkes tørstofindholdet fx af, om en bil lige er blevet tømt for overskudsbeton, og det er ikke altid at omrøringen er tilstrækkelig til at sikre en fuldstændig dispergering af tørstoffet.

Både Sydsten og Unicon har fabrikker, hvor betonslam kan opsamles og genbruges i betonproduktion, og dette sker allerede i nogen udstrækning. Men fx har Sydsten valgt ikke at anvende betonslam til aggressiv miljøklasse, idet der forudses problemer med betonens luftindhold. Opgaven i Grøn Beton-projektet er således at dokumentere egenskaberne af beton med betonslam, så betonslam kan anvendes til betonproduktion i alle miljøklasser, og på den måde medvirke til, at betonindustrien kan anvende egne restprodukter.

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 der anvendt betonslam, dels fra Unicon og dels fra Sydsten. Hos Unicon er betonslammets tørstofindholdet ca. 20%. Hos Sydsten er det gennemsnitlige tørstofindhold 10%, men det varierer fra 5 til 15%. Til gengæld råder den pågældende fabrik over udstyr, der automatisk måler betonslammets densitet og dermed dets tørstofindhold.

1.1 P-beton

I grundpakken blev der udarbejdet tre recepter på baggrund af en velkendt referencerecept fra Unicons fabrik i Randers, se beskrivelsen af 301 (P), 302 (P) og 303 (P) i Tabel 1. I disse tre betoner er pastasammensætningen så vidt muligt holdt konstant (svarende til referencerecepten), mens andelen af betonslam varierer. Betonslammets tørstof erstatter i alle betoner tilslag (forholdsvis lige meget i alle størrelsesfraktioner). Der blev desuden iværksat prøvning af en fjerde beton, 304 (P), hvor cementmængden er reduceret 20 kg pr. m³ beton.

Tabel 1: P-beton med betonslam i grundpakken. Beskrivelsen svarer til "bør"-recepter, hvor betonslam er angivet som tørstof.

Betegnelse	301 (P)	302 (P)	303 (P)	304 (P)
Beskrivelse	P-beton med 28 kg betonslam pr. m ³ beton svarende til 15% af cementvægt. Ækvivalent v/c-forhold: 0,65	P-beton med 38 kg betonslam pr. m ³ beton svarende til 21% af cementvægt. Ækvivalent v/c-forhold: 0,65	P-beton med 52 kg betonslam pr. m ³ beton svarende til 28% af cementvægt. Ækvivalent v/c-forhold: 0,65	P-beton med 36 kg betonslam pr. m ³ beton svarende til 21% af cementvægt. Ækvivalent v/c-forhold: 0,86
Produktionssted	Unicon/Randers	Unicon/Randers	Unicon/Randers	Unicon/Randers

Stor pakke

Resultater fra Grundpakken viste, at beton med betonslam havde en fin styrkeudvikling. Betonslammet havde betydning for bearbejdéligheden, men den nedsatte bearbejdélighed kunne kompenseres ved at øge doseringen af tilsætningsstoffer. Derfor blev det valgt i stor pakke at fortsætte med en beton med så meget betonslam som muligt. I P5 stammer alt blandevandet fra betonslam, dog med mulighed for at efterdosere vandværksvand, hvis watt-metermålingen viser, at betonen indeholder for lidt vand.

I grundpakken var der ved proportionering af betonerne anvendt en fremgangsmåde, hvor betonslammet erstattede dele af tilslaget i alle størrelsesfraktioner. Dette betød, at beton med betonslam fik større indhold af finstof end referencebetonen, og den havde tendens til at blive

klistret. For at reducere mængden af finstof til noget, der minder om referencebetonens finstofindhold, erstatter betonslam i stor pakke udelukkende sand, ikke noget af det grovere tilslag.

I realiteten minder P5 i stor pakke meget om 302 (P) fra grundpakken. Dog er recepten justeret til Unicons fabrik i Nr. Sundby, og cementtypen er ændret til ny rapid cement.

Udvidet pakke

P5 fra stor pakke fortsatte stort set uændret i udvidet pakke, dog er recepten justeret til Unicons fabrik i Horsens.

1.2 A-beton

De indledende recepter til grundpakken blev udarbejdet ved hjælp af pakningsberegninger. Med den opnåede pakning var det muligt at reducere pastamængden i forhold til referencerecepten og derved spare 30 kg cement pr. m³ beton.

Derefter blev der udarbejdet to recepter, hvor henholdsvis 50% og 100% af blandevandet stammer fra betonslam, og hvor betonslammets tørstof erstatter sand. Recepterne blev udarbejdet under forudsætning af, at betonslammet har et tørstofindhold på 10%. De to recepter svarer således til at der er henholdsvis 5% og 10% tørstof i den totale mængde blandevand. Den dag, betonene blev blandet, blev det aktuelle tørstofindhold målt, og forholdet mellem blandevand fra vandværk og fra betonslam blev justeret for at nå de to nævnte tørstofprocenter i blandevandet. I denne beregning blev den tredje kilde, fugt i tilslag, regnet som en del af vandværksvandet. De to recepter i grundpakken er beskrevet i Tabel 2.

Tabel 2: A-beton med betonslam i grundpakken.

Betegnelse	ABS50	ABS100
Beskrivelse	A-beton, hvor tørstofindholdet i blandevandet er 5% svarende til at ca. 50% af vandværksvandet erstattes af vand fra betonslam	A-beton, hvor tørstofindholdet i blandevandet er 10% svarende til at al vandværksvandet erstattes af vand fra betonslam
Produktionssted	Sydsten/Eslöv	Sydsten/Eslöv

Stor pakke

ABS100 gik videre til stor pakke, hvor den fik betegnelsen A5. Dog er recepten justeret, idet produktionsstedet er flyttet til Sydstens fabrik i Malmö.

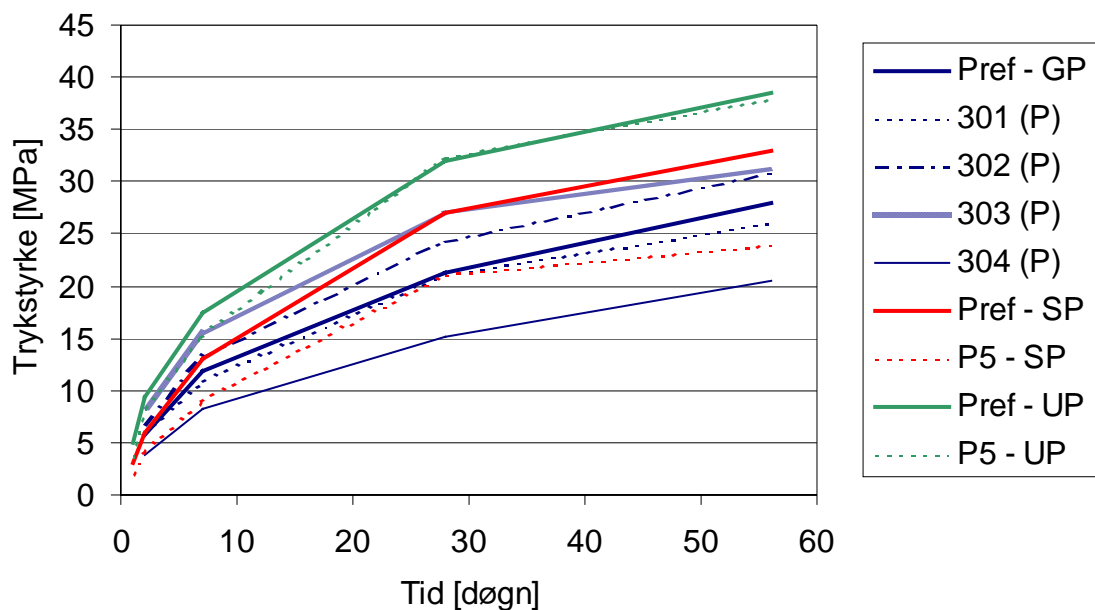
Udvidet pakke

A-beton med betonslam er ikke afprøvet i hverken udvidet pakke eller demonstrationsbroen, da det ikke er praktisk muligt at transportere frisk beton fra Sydsverige til en støbning i Jylland.

2. Mekaniske egenskaber

2.1 Styrke og stivhed

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

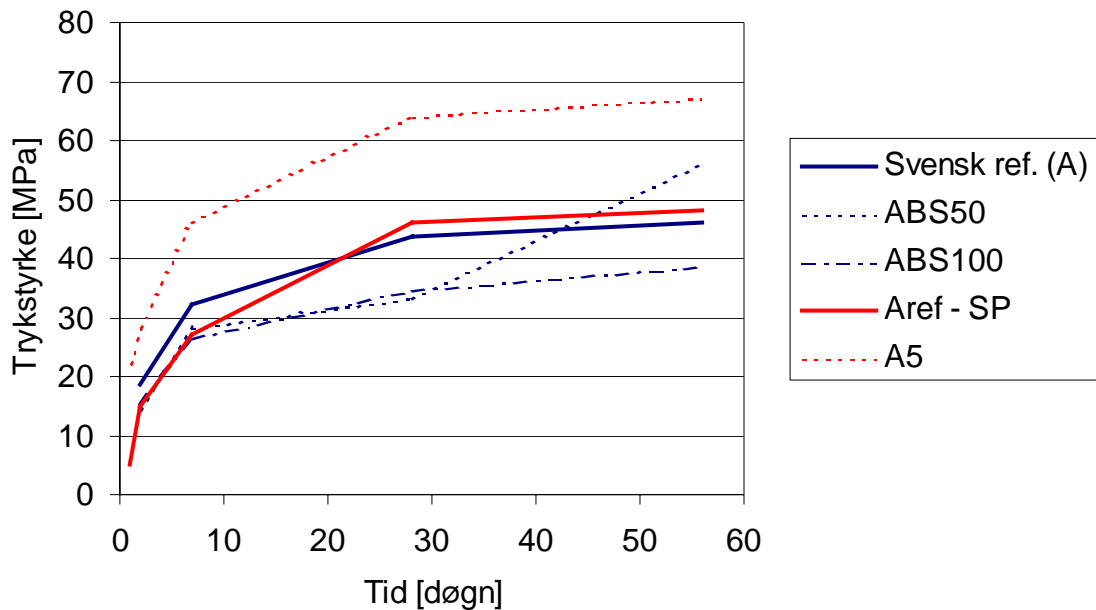


Figur 1: Styrkeudvikling for P-betoner.

I grundpakken (de blå kurver) viste resultaterne, at styrkeudviklingen for 301 (P), 302 (P) og 303 (P) er på niveau med referencebetonen fra samme fabrik, dvs. Unicons fabrik i Randers. For de to sidstnævnte er styrkerne endda lidt højere end referencebetonens. 304 (P) har en styrke, der er noget lavere end referencebetonen, hvilket kan tilskrives det højere v/c-forhold (0,86 mod referencens 0,65).

I stor pakke (røde kurver), hvor forsøgene blev henlagt til Unicons fabrik i Nr. Sundby, steg referencebetonens styrke. Der sås ikke den samme styrketilvækst for P5, så i stor pakke overholdt den ikke kravene om en minimumstyrke efter 56 døgn på 85% af referencen. Noget af forskellen kan tilskrives forskelle i luftindhold og v/c-forhold. Hvis der korrigeres for dette, overholder P5 netop kravet, men kommer ikke op på niveau med referencens styrke.

I udvidet pakke (grønne kurver) steg referencebetonens styrke endnu en gang. Denne gang er produktionen foregået hos Unicon i Horsens. P5 viste sig at have en styrkeudvikling, der er stort set identisk med referencens.



Figur 2: Styrkeudvikling for A-betoner.

I grundpakken (blå kurver) viste A-beton med betonslam sig at have lavere styrker end referencebetonen frem til 28 døgn. Efterfølgende revancherede ABS50 sig, mens ABS100 også efter 56 døgn havde markant lavere styrke end referencen fra samme fabrik. I stor pakke (røde kurver) er A5 støbt hos Sydsten i Malmö, mens Aref er støbt hos Unicon i Nr. Sundby, så en direkte sammenligning er ikke meningsfuld. Men det ses, at selvom ABS100 og A5 har samme v/c-forhold, så er det lykkedes at producere en beton i stor pakke med betydeligt højere styrke.

Pga. tekniske problemer er E-modulet i grundpakken kun målt på P-betoner med betonslam, ikke A-betoner. Det er derfor P-betonerne, der giver de bedste muligheder for at vurdere betonslams indflydelse på elasticitetsmodul, da der både findes resultater for beton med forskellige indhold af betonslam og flest gentagne prøver (grundpakke, stor pakke og udvidet pakke). Det ser ikke umiddelbart ud til, at relationen mellem styrke og E-modul påvirkes af tilsætningen af betonslam. Tilsvarende ser der på baggrund af forsøgene i stor pakke ud til at være en uændret sammenhæng mellem trykstyrke og spaltetrækstyrke.

2.2 Krybning

Krybning ved stor last er undersøgt for P5 og A5 i stor pakke. A5 kryber hurtigere end referencen Aref. Dette skyldes dog næppe, at betonen indeholder betonslam, da der er en generel tendens til at betoner blandet i Sverige (P6, P7, A5 og A6) udviser større krybeastighed end de danske betoner. Det ser ikke ud til, at betonslam øger risikoen for krybebrud.

2.3 Semi-fuldskala forsøg med søjler og bjælker

Der er udført forsøg til undersøgelse af armeringsforankring og bjælkers forskydningsbæreevne for P5 i udvidet pakke. På baggrund af forankringsforsøgene er der ikke noget, der tyder på, at betonslam reducerer betonens forankringskapacitet. Brudbelastningen i forankringsforsøgene er ganske vist større for referencebetonen Pref end for P5, men dette svarer til forskellen i de to betoners trykstyrke.

Forskydningsbæreevnen for P5 er lavere end det, der kan beregnes vha. formler angivet i DS 411 baseret på diagonaltrykmetoden. Det samme har kunnet konstateres for alle de testede P-betoner. Det betyder, at normens udtryk ikke er på den sikre side, hvad man ellers burde kunne forvente.

3. Brand

3.1 Mekaniske egenskaber under brand

De mekaniske egenskaber under brand er undersøgt for P5. Resultaterne viser, at P5 med hensyn til styrke og stivhed stort set opfører sig som Pref. Den termiske udvidelse er også næsten en tro kopi af Pref. Dette er forventeligt, da de primært er tilslagstypen, der styrer den termiske udvidelse, og bortset fra at betonslammets tørstof erstatter en del af sandet, har de to betoner samme tilslagskombination. Her spiller betonslammets tørstof på ca. 20 kg pr m³ beton en lille rolle i forhold til den samlede tilslagsmængde på ca. 1880 kg pr. m³ beton.

3.2 Eksplosiv afskalning

P5 er testet for eksplosiv afskalning i semi-fuldskalaforsøg med vægelementer udført på Dansk Brand- og Sikringsteknisk Institut. Her viste P5 ingen tegn på eksplosiv afskalning.

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	120	110	3,5	2,7
301 (P)	90	70	4,1	3,1
302 (P)	90	60	3,6	3,1
303 (P)	80	60	3,4	3,1
304 (P)	120	90	2,3	2,0
Pref – stor pakke	90	70	5,0	5,0
P5 – stor pakke	110	90	6,8	6,5
Pref – udv. pakke	130	80	4,6	3,5
P5 – udv. pakke	120	110	3,5	2,7

I grundpakken er der en tendens til, at beton med betonslam har en dårligere bearbejdighed fra starten end referencebetonen, til trods for at doseringen af plastificering er øget. Denne forskel mellem betonslam-beton og referencebeton ser ud til at være elimineret i stor og udvidet pakke. Dette kan både skyldes den ændrede praksis, hvor betonslam i stor og udvidet pakke erstatter sand i stedet for tilslag i alle størrelser, og at erfaringen fra grundpakken er brugt til at køre betonerne bedre ind. I stor pakke fortsatte målingerne af bearbejdighed ud over 1 time, og det kunne konstateres, at P5 tabte bearbejdigheden efter ca. 1½ time. Tab af luft er på niveau med referencebetonerne.

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
ABS50	110	70	6,7	6,2
ABS100	80	60	6,5	5,6
Aref – stor pakke	100	70 ¹	8,4	7,0 ¹
A5	80	30 ¹	6,0	4,3 ¹

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

Begge A-betoner med betonslam blev i grundpakken vurderet som nemme at arbejde med, og de adskilte sig ikke negativt fra referencebetonen. I stor pakke havde A-beton med betonslam efter 1 time stort set mistet bearbejdigheden. Dette er et problem, for hvis

anvendelsestidspunktet i forhold til blandetidspunktet varierer, vil der komme meget store sætmålsvariationer.

Mht. luftindholdet, der oprindeligt var Sydstens største bekymring ved at benytte betonslam i A-beton, så ses det, at der er et lidt større tab af luft for betoner med betonslam. Som det fremgår af afsnit 5, så er der imidlertid stadigvæk et højt indhold af de fine luftporer, der betyder mest for frostbestandigheden, så dette er øjensynligt ikke noget problem.

4.2 Hærdeegenskaber

Afbindingstiden blev bestemt både i grundpakke og i stor pakke. 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	7,3	-
301 (P)	4,8	3,8
302 (P)	4,5	3,4
303 (P)	3,8	5,8
304 (P)	5,0	3,2
Pref – udv. pakke	-	5,7
P5 – udv. pakke	-	3,2
Svensk reference (A)	5,3	4,1
ABS50	4,8	4,4
ABS100	5,0	4,0

For P-betonerne ses det af proctormålingerne, at betonslam fremmer en hurtig afbinding. Det er sværere at se en gennemgående tendens for afbindingstiden bestemt vha. varmeudvikling. For A-betonerne viser proctormålingerne en hurtigere afbinding, mens afbindingstiden bestemt ved varmeudvikling stort set er uberørt af om betonen indeholder betonslam eller ej. I stor pakke er det registreret, at både P5 og A5 hurtigere bliver klar til glitning end de respektive referencebetoner.

Med hensyn til støbeegenskaber blev P5 i stor pakke vurderet at være lige så god som referencebetonen og give lige så god finish. Derimod blev A5 i stor pakke karakteriseret som vanskeligere at udstøbe. Den var mere følsom for over- og undervibrering og den havde tendens til at skille under glitningen. Finish blev ikke vurderet.

I udvidet pakke blev P5 undersøgt med hensyn til, hvor følsom betonen er overfor plastisk svind. Forsøget viste, at betonen på mange måder ligner referencebetonen (samme fordampningshastighed og samme tidspunkt for ophør af våd overflade). Fordampningen ved første tegn på revnedannelse er dog lidt lavere ($3,5 \text{ kg/m}^2$ mod referencens $5,2 \text{ kg/m}^2$), hvilket kan betyde, at P5 kræver lidt mere af foranstaltningerne til udtørningsbeskyttelse. Forskellen er dog ikke større, end at den kan være et udslag af forsøgsusikkerhed.

5. Holdbarhed

Holdbarhedsegenskaberne er udelukkende undersøgt for A-beton med betonslam. Holdbarhedsundersøgelserne er primært forløbet i stor pakke. Det kunne her konkluderes, at

- A5s chloridmodstand er betydeligt dårligere end Grøn Beton-projektets referencebeton til aggressivt miljø. Dette skal dog næppe tilskrives betonslammet, idet A5s chloridmodstand kun er en anelse dårligere end en sammenlignelig svensk beton uden betonslam. Forskellen mellem Aref og A5s chloridmodstand vurderes derfor at skyldes generelle forskelle mellem dansk og svensk beton, hvor de svenske betoner, herunder A5, er produceret med en anden type cement og uden flyveaske.
- A5s carbonatisering er betydeligt mindre end referencebetonens, så carbonatisering forventes ikke at blive noget specielt problem i aggressivt miljø.
- A5 viste meget god frostbestandighed målt som afskalning i en accelereret frost/tø-test i henhold til SS 13 72 44. Selvom det totale luftindhold var lavt (14,3% kitmasseluft), var afstandsfaktoren god (0,17 mm), idet en stor del af luften var mikroluft, dvs. luftporer med diametre mindre end 300 µm.

6. Konklusion

Iflg. DS 481 kan betonslam anvendes i P-beton, hvis tørstofindholdet ikke overstiger 10% af blandevandet. I A-beton tillades kun et tørstofindhold op til 2%. Der er således ingen af de grønne betoner med betonslam, der umiddelbart opfylder DS 481.

Beton med betonslam har ellers nogle miljømæssige fordele:

- Når en del af sand og blandevand erstattes med betonslam, kan der spares på naturlige ressourcer som sand og drikkevand. Mht. tilslag lever de testede betoner dog ikke op til Grøn Betons miljømål om at nyttiggøre restprodukter som tilslag svarende til 20% af betonens samlede vægt.
- Det gør det muligt at genanvende ét af betonindustriens egne restprodukter, der ellers skulle have været deponeret

Beton med betonslam har generelt gode mekaniske egenskaber. Dette gælder også under brand, hvor P5 viste samme opførsel som referencebetonen Pref. Ved semi-fuldskalaforsøg viste P5 ingen tegn på eksplosiv afskalning og ligner på dette punkt de øvrige testede P-beton, incl. referencen.

De udførelsesmæssige egenskaber for betonslam er karakteriseret ved et hurtigere tab af bearbejdelighed og en hurtigere afbinding end beton uden betonslam. Den hurtige afbinding kan konstateres, selvom de forholdsvis høje doseringer af plastificeringsmidler, der er nødvendige for at opnå den ønskede bearbejdelighed, burde virke i den modsatte retning. Erfaringerne med støbning af P-beton med betonslam var gennemgående positive, mens der var nogle problemer ved støbning af A-beton med betonslam, idet den havde tendens til at skille under glitningen.

Holdbarhedsmæssigt er chloridmodstanden ringere end for en gennemsnitlig dansk beton til aggressivt miljø, men på niveau med andre svenske betoner til anlægskonstruktioner. Da den afprøvede recept tager udgangspunkt i en svensk referencerecept, vurderes det, at det ikke er betonslammet, der påvirker chloridmodstanden. Den testede A5-beton viste på andre områder, carbonatisering og frostbestandighed, meget tilfredsstillende resultater.

7. Referencer

- [1] ”Grundpakke rapportering. Beton med betonindustriens egne restprodukter – Sydsten”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, Januar 2001.
- [2] ”Statusrapport til seminar i Grøn beton d. 9-10. dec. 1999”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 1999.
- [3] ”Rapportering. Resultatoversigt, Stor pakke”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, Marts 2001.
- [4] ”Rapportering. BK1 – Mekaniske egenskaber, Stor pakke”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, Februar 2001.
- [5] ”Status for BK2 efter brandprøvning i Stor pakke”, Center for Grøn Beton, DTU, Februar 2001.
- [6] ”Rapportering. BK3 – Udførelse – Stor pakke. Statusrapport”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, Januar 2001.
- [7] ”Rapportering. BK4 – Holdbarhed, Stor pakke”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, Februar 2001.
- [8] ”Arbejdskurver, spaltetrækstyrke og udmattelsesundersøgelser”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [9] ”Fugttransport, svind- og temperaturdeformationer samt krybning”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [10] ”Forskydningsbæreevne af bjælker. Forankring af gevindstænger”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [11] ”Bøjning af armerede bjælker. Instabilitet af søjler”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [12] ”Ekspllosiv afskalning af beton – nyudviklet prøvningsmetode”, Center for Grøn Beton, DTU, Februar 2003.
- [13] ”Mekaniske egenskaber under brand”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [14] ”Udførelse. Varmeudvikling og plastisk svind”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, September 2002.
- [15] ”Holdbarhed. Hovedrapport”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.

[16] "Demobro", Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.

Appendix 1: Recepter

De angivne recepter er faktiske recepter blandet på fabrik.

P-betoner

Tabel 6: Recepter for P-betoner med betonslam afprøvet i grundpakken. Alle betoner er blandet på Unicons fabrik i Randers. Alle mængder er angivet i [kg/m³].

		300 (P) reference	301 (P)	302 (P)	303 (P)	304 (P)
Cement	AaP Rapid	183	182	177	189	159
Flyveaske	Danaske B1	67	67	65	68	66
Mikrosilica	Pulver	13	13	13	13	13
Vand	Vandværksvand + evt. vand fra betonslam	156	163	182	184	185
Betonslam	Angivet som tørstof	-	28	38	52	36
Sand	0/4 Haldum kl. A	736	759	698	675	709
Sten 1	8/16 Jebjerg kl. P	404	259	383	375	385
Sten 2	16/32 Jebjerg kl. P	672	735	628	617	654
Plastificering	Conplast 212	2,17	2,19	2,60	4,20	2,93
Superplastificering	Peramin F ¹	-	-	-	2,49	-
Luftindbl.-middel	Conplast 316AEA 1:4	0,36	0,36	0,34	0,42	0,30
Målt luft	[%]	3,5	4,1	3,6	3,4	2,3
Ækv. v/c-forhold	[-]	0,65	0,68	0,78	0,76	0,86

1. Peramin F indeholder formaldehyd, der figurerer på Miljøstyrelsens liste over uønskede stoffer, og det er derfor ikke anvendt efter Grundpakken.

Tabel 7: Recepter for P-betoner med betonslam afprøvet i Stor og Udvidet pakke. Alle mængder er angivet i $[\text{kg}/\text{m}^3]$.

		Pref	P5	Pref	P5
		Stor pakke	Stor pakke	Udvidet pakke	Udvidet pakke
		Nr. Sundby	Nr. Sundby	Horsens	Horsens
Cement	AaP Rapid ¹	143	141	166	168
Flyveaske	Danaske B1	51	52	60	60
Mikrosilica	Pulver	10	10	12	13
Vand	Vandværksvand + evt. vand fra betonslam	136	141	146	155
Betonslam	Angivet som tørstof	-	26	-	19
Sand	0/4 Nr. Haldne kl. A	793	696	-	-
	0/2 SC Vestbirk	-	-	737	692
Sten 1	4/8 Uddevalla kl. A	197	195	-	-
	4/8 SC Århus	-	-	199	202
Sten 2	8/16 Vigsø kl. M	382	387	-	-
	8/16 SC Århus	-	-	398	403
Sten 3	16/32 Vigsø kl. M	556	559	-	-
	16/32 SC Århus	-	-	545	567
Plastificering	Conplast 212	1,41	1,60	1,95	1,97
Luftindbl.-middel	Conplast 316AEA 1:5	0,22	0,77	0,08	0,37
Målt luft	[%]	5,0	6,8	4,6	3,5
Ækv. v/c-forhold	[-]	0,73	0,77	0,67	0,70

1. Ny rapid cement

A-betoner

Tabel 8: Recepter for A-betoner med betonslam. Alle mængder er angivet i $[\text{kg}/\text{m}^3]$.

		Reference	ABS50	ABS100	A5
		Grund-pakke	Grund-pakke	Grund-pakke	Stor pakke
		Eslöv	Eslöv	Eslöv	Malmö
Cement	Anlægningscement	418	391	386	398
Vand	Vandværksvand + evt. vand fra betonslam	157	153	144	148
Betonslam	Angivet som tørstof		7	17	15
Sand	0/8 Östervang	849	823	854	832
Sten 1	8/16 Östervang	219	221	213	200
Sten 2	16/25 Östervang	685	695	690	718
Luftindblanding	Peramin HPA	0,12	0,14	0,14	0,12
Superplastificering	Peramin F	2,90	3,13	3,19	3,95
Målt luft	[%]	5,2	6,7	6,5	6,2
Ækv. v/c-forhold	[-]	0,38	0,40	0,38	0,38

Appendix 2: Prøvningsoversigt

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

- Grundpakkerapporter om beton med betonindustriens egne restprodukter [1, 2]
- Rapportering fra Stor pakke bestående af en oversigtsrapport [3] samt rapporter fra hver af de faglige aktiviteter BK1-BK4 [4, 5, 6,7]
- Rapportering fra udvidet pakke fra de forskellige faglige aktiviteter [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]
- Rapportering fra demonstrationsbro-projektet [16]

Tabel 9: Prøvning af mekaniske egenskaber (BK1).

	301 (P)	302 (P)	303 (P)	304 (P)	P5 - stor pakke	P5 - udv. pakke	ABSS50	ABS100	A5 - stor pakke
Styrkeudvikling									
E-modul									
Arbejdskurver									
Spaltetrækstyrke									
Krybning ved stor last									
Temperaturudvidelse									
Fugtbevægelser									
Foirankringsevne									
Udmattelse									
Krybning ved moderat last									
Forskydningsbæreevne									
Bøjningsforsøg									
Instabilitet af søjler									

Tabel 10: Prøvning af egenskaber under brandpåvirkning (BK2).

	301 (P)	302 (P)	303 (P)	304 (P)	P5 - stor pakke	P5 - udv. pakke	ABSS50	ABS100	A5 - stor pakke
Mekaniske egenskaber									
Eksplisiv afskalning									

Tabel 11: Prøvning af udførelsmæssige egenskaber (BK3).

	301 (P)	302 (P)	303 (P)	304 (P)	P5 - stor pakke	P5 - udv. pakke	ABS50	ABS100	A5 - 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									

Tabel 12: Prøvning af A- betonernes holdbarhedsmæssige egenskaber (BK4).

	ABS50	ABS100	A5 - stor pakke
Luftporestruktur			
Frostbestandighed, afskalning			
Frostbestandighed, indre revnedannelse			
Carbonatisering			
Alkalireaktivitet			
Chloridmodstand			
Tyndslibsanalyse			