



Center for Grøn Beton

Beton med slammaske

Udført af:

Marianne Tange Hasholt

Dorthe Mathiesen

Teknologisk Institut, Beton, december 2002

Titel: Beton med slamaske

Udført af: Marianne Tange Hasholt
Dorthe Mathiesen

Dato: December 2002

ISBN: 87-7756-683-1

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.....	8
2.1 STYRKE OG STIVHED	8
2.2 KRYBNING	9
2.3 SEMI-FULDSKALA FORSØG MED SØJLER OG BJÆLKER	10
3. BRAND	11
3.1 MEKANISKE EGENSKABER UNDER BRAND	11
3.2 EKSPLOSIV AFSKALNING.....	11
4. UDFØRELSE.....	12
4.1 PRODUKTIONSEGENSKABER	12
4.2 HÆRDEEGENSKABER	13
5. HOLDBARHED	15
6. UDREDNINGSSARBEJDE.....	18
7. KONKLUSION.....	20
8. REFERENCER.....	22
APPENDIX 1: RECEPTER.....	23
P-BETONER	23
A-BETONER.....	24
APPENDIX 2: PRØVNINGSOVERSIGT	26
APPENDIX 3: KEMISK ANALYSE AF SLAMASKE	29

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 konkrete resultater og erfaringer, der er opnået for beton med slammaske i løbet af Grøn Beton-projektet.

Slammaske er et restprodukt, der stammer fra forbrænding af spildevandsslam. Der produceres årligt 10-15.000 ton slam på landsbasis, som i dag må deponeres, fordi der ikke kan findes anvendelse for asken. Askens fysiske og kemiske karakteristika varierer noget afhængigt af forbrændingsmetode og kilden til slammen. Fx vil tungmetaller fra industrispildevand kunne genfindes i asken.

Slamasken er ikke omfattet af DS/EN 450, der kun omhandler aske fra kulfyrede værker. Slamasken kan således ikke umiddelbart anvendes til betonproduktion, da de nuværende bestemmelser i DS 481 fordrer, at asken er omfattet af DS/EN 450. I Grøn Beton-projektet er slamasken introduceret som et nyt restprodukt, der ikke i forvejen anvendes i betonproduktion.

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 betonene. De fuldstændige recepter er angivet i appendix 1 og slamaskens kemiske sammensætning er angivet i appendix 3. Nedenfor redegøres kun for de enkelte betoners karakteristika.

1.1 P-beton

I grundpakken blev der testet to P-beton med slamaske. Oprindeligt tog recepterne udgangspunkt i et andet grundpakke-projekt om reduktion af CO₂ ved betonproduktion. Her havde resultaterne vist, at P-beton, der skulle opfylde nogle nærmere angivne krav til styrke, kunne produceres med almindelig flyveaske fra kulfyrede svarende til 60% af pulveret. Forforsøg med P-beton med 60% slamaske viste dog helt uacceptabelt lave styrker (fx blot 2,4 MPa efter 14 døgn). Derfor blev grundpakkens recepter i stedet for som beskrevet i Tabel 1.

Tabel 1: P-beton med slamaske i grundpakken.

Betegnelse	PSM50	PSM100
Beskrivelse	P-beton, hvor slamaske erstatter 50% af flyveasken i referencen	P-beton, hvor slamaske erstatter 100% af flyveasken i referencen
Produktionssted	Unicon/Holbæk	Unicon/Holbæk

Slamasken i grundpakkeforsøgene er fra Avedøre Spildevandscenter, der forbrænder spildevandsslam i en etageovn. Slammaske fra etageovne er kendt for at have en puzzolansk effekt, og derfor forudsættes slamasken at have aktivitetsfaktoren 0,5. Da slamaske og konventionel flyveaske har nogenlunde samme densitet, er det således muligt at erstatte flyveaske med slamaske kg til kg uden at ændre på mængderne for de øvrige materialer, og samtidigt fastholde både tilslagsmængde og ækvivalent v/c-forhold. Slamasken anvendt i grundpakken er dog noget grovere end normal flyveaske.

Stor pakke

Det viste sig, at PSM50 opnåede samme styrkeudviklingsforløb som referencebetonen, mens PSM100 opnåede lidt lavere styrker. Det blev valgt at lade PSM100 fortsætte til stor pakke med betegnelsen P3, for at gå til grænsen med slamaskeindholdet.

Både PSM50 og PSM100 havde dog haft problemer med at opnå tilfredsstillende friskbetonegenskaber. Således havde det krævet store doser plastificeringsstoffer at opnå tilfredsstillende sætmål. Dette blev primært tilskrevet, at slamasken fra Avedøre Spildevandscenter havde en stor absorption, hvilket gjorde betonen mere vandkrævende, og at slamasken var svær at dispergere. Det blev derfor besluttet i stor pakke at anvende en slamaske fra rensningsanlægget Lynettefællesskabet. Kemisk ligner den slamasken fra Avedøre, men askepartiklerne er mindre, så størrelsesfordelingen mere minder om konventionel flyveaske.

Der blev udført indledende forsøg med at justere recepten dels til den nye type aske og dels til et nyt produktionssted (Unicon i Nr. Sundby). I Nr. Sundby bestod 25% af pulveret i referencebetonen af flyveaske, mens det kun var 17% for referencen i grundpakken. Det viste sig ved styrkemålinger i forbindelse med receptjusteringen, at det ikke længere var optimalt at erstatte den konventionelle flyveaske fuldstændigt med slamaske, idet trykstyrkerne blev for lave. Den P3, der blev afprøvet i stor pakke, endte derfor med at have en pulverkombination med 17% slamaske og 8% konventionel flyveaske, altså samme procentvise andel af slamaske som i grundpakken.

Udvidet pakke

Der er ikke valgt nogen passiv beton med slamaske til udvidet pakke. Dog er der udført forsøg med eksplosiv afskalning med en beton, der principielt svarer til stor pakkes P3. Denne beton er blandet hos Unicon i Horsens og indeholder slamaske fra Lynetten.

1.2 A-betoner

Udviklingsforløbet for A-betonerne følger næsten samme spor som P-betonerne. Der blev udarbejdet to A-recepter i grundpakken med henholdsvis 50% og 100% substitution af den konventionelle flyveaske med slamaske fra Avedøre Spildevandscenter, se Tabel 2.

Tabel 2: A-beton med slamaske i grundpakken.

Betegnelse	ASM50	ASM100
Beskrivelse	A-beton, hvor 50% af flyveasken er erstattet af slamaske fra Avedøre	A-beton, hvor 100% af flyveasken er erstattet af slamaske fra Avedøre
Produktionssted	Unicon/Holbæk	Unicon/Holbæk

Stor pakke

ASM50 og ASM100 havde stort set identiske styrker. For begges vedkommende var der tale om styrker lidt under referencen (ca. 10% lavere efter 56 døgn). Det blev valgt at lade ASM100 gå videre til stor pakke. Dog blev slamasken fra Avedøre, ligesom for P-betonerne, skiftet ud med slamaske fra Lynettefællesskabet. I stor pakke blev recepten justeret til Unicons fabrik i Nr. Sundby. Da flyveaske i referencebetonen fra Nr. Sundby kun udgør 10% af pulvermængden, mens det var 14% for referencen i grundpakken, var der ingen problemer med at bibeholde den fuldstændige substitution af flyveaske. I stor pakke er denne beton kaldt A3.

Udvidet pakke

I stor pakke viste A3 mange positive egenskaber, bl.a. høj styrke. Derfor blev denne beton valgt til udvidet pakke.

Mellem stor pakke og udvidet pakke blandede Unicon imidlertid nogle P-betoner med slamaske, der ikke levede op til de styrker, der tidligere var målt for de samme betoner. Der blev sat et udredningsarbejde i gang for at klarlægge årsagen til disse styrkereduktioner. En af hypoteserne var, at det skyldtes produktionsomlægninger på Lynettens forbrændingsanlæg, hvor bl.a. forbrændingstemperaturen var blevet sænket. Det lykkedes aldrig helt at få indkredset årsagen. Men som et led i udredningsarbejdet blev der gennemført forsøg med

forskellige typer slamaske. Her viste aske fra Avedøre Spildevandscenter sig at føre til de bedste beton-styrker. Avedøreværket havde siden grundpakken skiftet forbrændingsanlæg, så der her anvendes fluid-bed teknik. Der var således ikke tale om den samme aske som i grundpakken, men en aske, der ligesom i stor pakke minder meget om almindelig flyveaske.

Det blev valgt at anvende denne nye slamasketype fra Avedøre i udvidet pakke, hvor betonene blev blandet hos Unicon i Horsens.

Demonstrationsbro-projektet

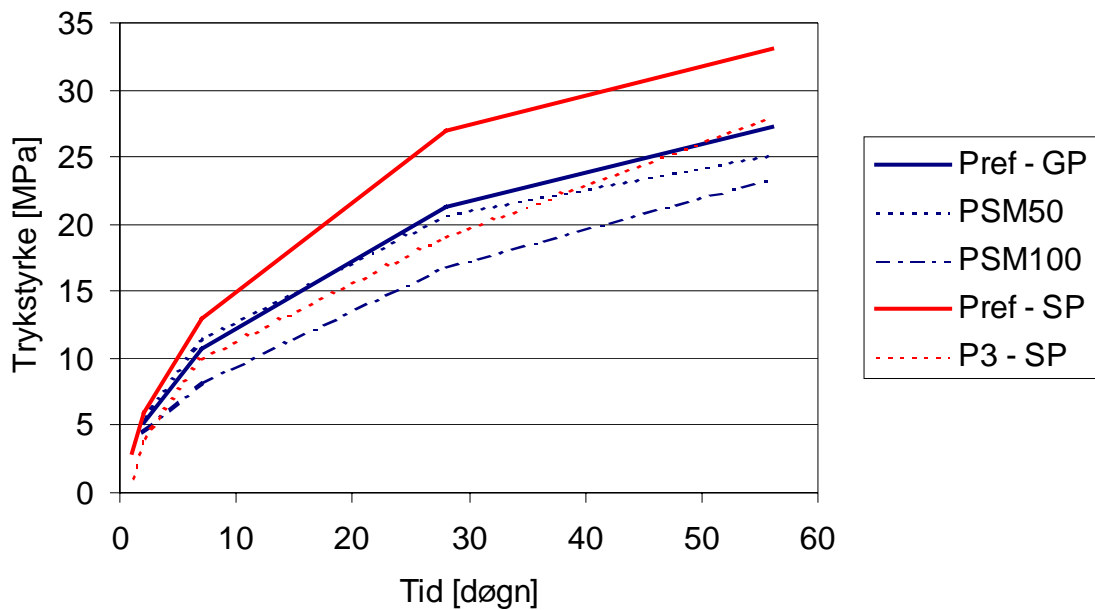
A3 er også valgt til demonstrationsbroprojektet. Denne beton er identisk med A3 i udvidet pakke, og derfor har en del af resultaterne fra udvidet pakke kunnet bruges som dokumentation i forbindelse med forprøvningen. Derfor foreligger der ikke så mange resultater fra forprøvningen.

Pga. tvivl om, hvorvidt det ville være muligt at opnå de ønskede styrker og generel utryghed forårsaget af, at slamasken tidligere havde givet uventede styrkeudviklingsforløb i P-betoner, blev det dog valgt ikke at indbygge betonen i broens bærende dele. A3-beton er i stedet anvendt til sætningsplader i forlængelse af brodækket, hvor kravene til betonens styrke og øvrige mekaniske egenskaber ikke er så høje som i de bærende konstruktionsdele. Endvidere er sætningspladerne forholdsvis nemme at skifte ud, hvis der skulle vise sig at være noget galt med dem. Men sætningspladerne vil blive eksponeret på samme måde som brodækket, og dermed bliver det muligt at følge betonens holdbarhed på lige fod med de øvrige betoner i demonstrationsbroen.

2. Mekaniske egenskaber

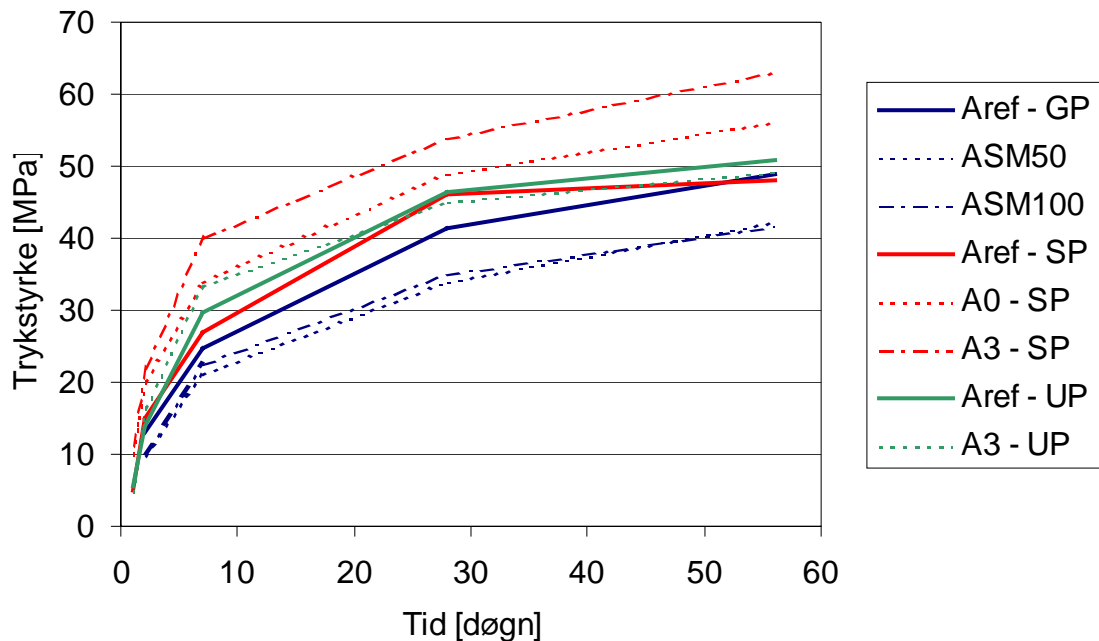
2.1 Styrke og stivhed

Der er målt trykstyrkeudvikling for beton med slamaske i alle tre prøvningspakker, dvs. grundpakke, stor pakke og udvidet pakke. Resultaterne fremgår af Figur 1 og Figur 2 for henholdsvis P- og A-beton.



Figur 1: Styrkeudvikling for P-beton med slamaske.

Det ses, at i grundpakken havde PSM50 en styrke til alle terminer, der stort set svarer til grundpakkens referencebeton. PSM100 havde en lidt lavere styrke. Således er styrken efter 28 døgn under 20 MPa, der er den tilsigtede styrkeklasse, men denne styrke er nået efter 56 døgn. I stor pakke er P3s styrke betydeligt under stor pakkens reference, men den er stadigvæk på niveau med grundpakkens reference. P3s styrkemæssige efterslæb i forhold til stor pakkens reference kan forklares i forskelle på v/c-forhold (Pref: 0,73; P3: 0,78) og luftindhold (Pref: 5,0%; P3: 7,0%). I både grundpakke og stor pakke er der konstateret et større luftindhold i betoner med slamaske end i de respektive referencer. Dette ses til trods for at slamaskebetonerne er blandet med væsentligt mindre luftindblandingsmiddel.



Figur 2: Styrkeudvikling for A-beton med slamaske.

I grundpakken (blå kurver) er både referencebeton og beton med slamaske blandet med lavalkali-, sulfatbestandig cement. Det ses, at beton med slamaske opnår en lavere styrke end referencen.

Dette billede er vendt i stor pakke (røde kurver), hvor A3 har større styrke end referencebetonen. En del af den ekstra styrke kan forklares med, at A3 i stor pakke er blandet med rapidcement, da en beton, A0, blandet med rapidcement og almindelige flyveaske også har højere styrke end referencebetonen. Dette er dog ikke hele forklaringen, da A3 også har større styrke end A0.

I udvidet pakke (grønne kurver) ligner billedet igen resultaterne fra grundpakken. Referencen og A3 har næsten samme styrke, men det var forventet, at A3 ville have den største styrke på grund af de to betoners forskellige cementtype. På baggrund af ovenstående er det således meget vanskeligt at vurdere, om slamaskens aktivitet er på niveau med, eller ringere eller bedre end aktiviteten af konventionel flyveaske.

For de parametre, der hænger sammen med trykstyrken, dvs. elasticitetsmodul og spaltetrækstyrke, ser der for både P- og A-betoner ud til at være samme sammenhæng som for konventionelle betoner.

2.2 Krybning

I stor pakke er krybning målt ved høje lastniveauer, dvs. lastniveauer svarende til 70%, 80% og 90% af de respektive betontypers trykstyrke. Både P3 og A3 viste krybebrud ved last svarende til 90% af trykstyrken, men det gjorde de respektive referencebetoner også. P3 brød som den eneste P-beton også ved 80% last (efter ca. 1 time). Ved 70% fulgte dens krybeforløb

imidlertid de øvrige betoner blandet på samme fabrik. Da der kun er afprøvet én cylinder for hvert lastniveau, er resultaterne behæftet med nogen usikkerhed, og der er således ikke tilstrækkeligt statistisk grundlag til at konkludere, at P3 mht. krybning er en mere sårbar beton.

A3s krybning ved moderat last er undersøgt i udvidet pakke. Der er ikke noget, der tyder på, at denne beton mht. krybning er anderledes end andre betoner.

2.3 Semi-fuldskala forsøg med søjler og bjælker

For A3 er der udført forsøg til undersøgelse af bjælkens forskydningsbæreevne i udvidet pakke. Der er ligeledes lavet forsøg med betonens forankringsevne. Resultaterne viser, at slamasken ikke påvirker disse egenskaber, idet A3 med den aktuelle trykstyrke ser ud til at opføre sig som andre betoner med samme styrkeniveau.

3. Brand

3.1 Mekaniske egenskaber under brand

De mekaniske egenskaber er ikke undersøgt for hverken P- eller A-beton med slamaske.

3.2 Eksplosiv afskalning

Både P3 og A3 blev afprøvet i stor pakke i en prøvestand opbygget på DTU. På grund af manglende erfaringer med denne type forsøg er der dog usikkerhed om, hvordan resultaterne skal tolkes. Det er ikke på denne baggrund muligt at drage nogen konklusion.

P3 med Lynette-aske blev afprøvet i udvidet pakke ved semi-fuldskalaforsøg med små vægelementer. Her viste betonen ingen tegn på eksplosiv afskalning. Der er således ikke noget, der tyder på, at slamaske forøger betonens eksplosive afskalning under brand.

4. Udførelse

4.1 Produktionsegenskaber

Bearbejdelighed og luftindhold er to væsentlige produktionsegenskaber. Resultaterne af målinger foretaget umiddelbart efter blanding samt efter ½ time i rotér-bil 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 – grundpakken	110	70	4,5	2,5
PSM50	100	70	5,5	4,3
PSM100	90	70	5,5	3,6
Pref – stor pakke	90	70	5,0	5,0
P3 – stor pakke	100	60	7,0	5,5
Pref – udvidet pakke	130	80	4,6	3,5
P3 – brand ¹	40 ²	-	6,0	-

1. P3 – brand er i princippet identisk med P3 – stor pakke, dvs. blandet med Lynette-asse, men den er blandet i Horsens som de øvrige betoner i udvidet pakke, hvor P3 – stor pakke er blandet i Nr. Sundby. Derfor er Pref – udvidet pakke også taget med i tabellen til sammenligning.
2. Kunne være blevet justeret bedre, da det tilsigtede sætmål var 100 mm. Det blev valgt at støbe med denne blanding, da entreprenøren vurderede, at det lave sætmål ikke var et problem ved udstøbning af et vægelement.

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	110	80	6,9	5,6
ASM50	100	80	7,7	6,8
ASM100	120	90	7,4	5,3
Aref – stor pakke	100	80	8,4	7,8
A3 – stor pakke	120	100	7,8	5,5
Aref – udvidet pakke	140	130	6,8	6,9
A3 – udvidet pakke	130	120	10,5	9,5

Det ses, at sætmålene og og sætmålstabene er på niveau med referencebetonerne.

Luftindholdet i P-betonerne er ikke så afgørende, men det er vigtigt at opnå et stabilt luftindhold i den friske A-beton af hensyn til frostbestandigheden. Både ASM100 og A3 i stor pakke tabte mere end 2 procentpoint af luften eller ca. ⅓ af det oprindelige luftindhold i løbet af den første halve time efter blanding. A3s luftindhold i udvidet pakke er mere stabilt, men også på et generelt højere niveau. Hvis man ser på recepterne, så er der i grundpakken og stor pakke anvendt meget mindre luftindblandingsmiddel i slamaskebetonerne end i referencen.

Dette gør sig også i nogen grad gældende i udvidet pakke, om end forskellen ikke er helt så stor. Resultaterne tyder således på, at hvis man ønsker et stabilt luftindhold i slamaskebetonen, så er der grænser for, hvor meget man kan reducere doseringen af luftindblandingsmiddel, også selvom indholdet af luft umiddelbart efter blanding ser ud til at være højt.

Det er kendt, at superplastificerende tilsætningsstoffer kan virke luftindblandende, og da A-beton med slamaske i modsætning til referencebetonen indeholder superplastificerende midler, er det muligt, at det generelt høje luftindhold i den friske beton kan reduceres, uden at det går udover luftindholdets stabilitet, ved at justere på netop indholdet af superplastificerende midler eller ved at forsøge sig frem med forskellige produkter. I grundpakken, stor pakke og udvidet pakke er der imidlertid anvendt tre forskellige kommercielle mærker (Peramin F, Conplast SP605 og Conplast SP610). Noget kan således tyde på, at det er et generelt problem, og at man i nogen grad må leve med et højere luftindhold i den friske beton.

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 [h]	τ_0 bestemt ved varmeudvikling [modenhedstime]
Pref – grundpakken	6,0	4,1
PSM50	7,5	5,6
PSM100	7,0	4,2
Pref – udvidet pakke	-	5,7
P3 – brand	-	10,2
Aref – grundpakken	7,0	3,5 ¹
ASM50	8,5	7,1
ASM100	8,8	4,5
Aref – udvidet pakke	-	6,3
A3 – udvidet pakke	-	8,1

1. Ikke opgivet i den oprindelige rapport, men beregnet på baggrund af Q_{∞} , τ_c og α .

Det ses, at i grundpakken, hvor der både findes proctormålinger og registrering af varmeudvikling, er resultaterne med hensyn til afbindingstid noget modstridende. Proctormålingerne tyder på, at mængden af slamaske forlænger afbindingstiden lidt, mens der ikke er nogen tendens i afbindingstiden bestemt ved varmeudvikling.

I udvidet pakke, hvor der kun findes resultater fra varmeudvikling og hvor typen af slamaske er en anden, ser slamasken også ud til at forlænge afbindingstiden. Det er dog reelt ikke til at afgøre, om det er slamasken eller den øgede mængde plastificerende hjælpestoffer, der forsinker afbindingen.

I stor pakke blev der for P3 noteret længere tid fra blanding til betonen var klar til glitning end for Pref. For A3 var denne tid stort set den samme som for Aref. Både P3 og A3 havde lidt dårligere finish, idet der var flere grove lufthuller mod forsisiden end for referencebetonerne. Begge betoner blev i øvrigt karakteriseret som havende udmærkede støbeegenskaber.

Mht. udtørningsbeskyttelse er A3 ikke mere følsom overfor dannelse af plastiske svindrevner end Aref og A0 (beton med rapidcement). Det ser således ud til, at slammaske, hvad angår udtørningsbeskyttelse, kan behandles på lige fod med konventionel flyveaske.

5. Holdbarhed

Holdbarhedsegenskaberne er udelukkende undersøgt for A-beton med slamaske, ikke P-beton. Holdbarhedsundersøgelserne er primært forløbet i stor pakke, hvor A3 indeholdt slamaske fra Lynetten. Det kunne her konkluderes, at:

- A3s chloridmodstand er lidt bedre end referencebetonens. Forskellen er størst ved den tidligste prøvningstermin (28 døgn efter støbning). Forskellen er mindre ved den seneste termin 1 år efter støbning, men stadigvæk signifikant. Da det må forventes, at chloriddiffusionskoefficienten bestemt efter 1 år siger mest om hele betonens levetid, så vil der reelt ikke være så stor forskel på slamaskebeton og referencebetonen som indikeret af de tidlige målinger, men forskellen er i slamaskebetonens favør. Resultater fra udvidet pakke støtter, at slamaskens chloridmodstand er bedre end referencebetonens.
- A3s carbonatisering er på niveau med referencebetonens.
- A3s alkali-kisel-reaktivitet er uproblematisk, så længe der ikke tilføres alkali fra omgivelserne. Bindemiddelfasen med slamaske har et større alkali-indhold end en beton med konventionel flyveaske. Ekspansionsmålinger på prøveemner, der indeholdt reaktivt sand, viste dog ikke tegn på ekspansion.
- A3 viste tilfredsstillende frostbestandighed, se nedenfor.

Luftporeanalyse og accelererede frost/tø-forsøg er som nogle af de eneste holdbarhedsundersøgelser gentaget i udvidet pakke, se Tabel 6. Der ses bort fra et enkelt forsøg i grundpakken, da slamasken anvendt i grundpakken er meget anderledes end asken i de to øvrige prøvningspakker, og fordi denne aske pga. andre problemer (fx en absorption, der ikke er veldefineret) ikke er velegnet til beton.

Tabel 6: Resultater af luftporeanalyse og frost/tø-test for henholdsvis Aref og A3.

	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 ¹	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 ²	meget god
A3 – stor pakke ¹ 31 døgn gl. v. start	6,4	0,8	13	0,30	0,05	0,07	meget god
A3 – stor pakke ¹ 59 døgn gl. v. start	do	do	do	do	0,09	0,18	god
A3 – udvidet pakke 31 døgn gl. v. start	7,6	3,5	27	0,13	0,00	0,00	meget god
A3 – udvidet pakke 59 døgn gl. v. start	do	do	do	do	0,01	0,01	meget god
A3 – udvidet pakke 87 døgn gl. v. start	do	do	do	do	0,00	0,00	meget god
A3 – bro prøvestøbning (borede cylindre)	7,0	3,7	28	0,12	0,02	0,03	meget god

1. I stor pakke er frost/tø-forsøg udført efter en modificeret udgave af SS 13 72 44, hvor der også måles tegn på indre skader i form af længdeændringer. Dette medfører, at ca. hver 7. frost/tø-cyklus mangler.
2. Frost/tø-forsøg er udført på rå overflader, hvilket forventes at give væsentligt større afskalning end test på sandede overflader som beskrevet i standarden.

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

I stor pakke havde A3 en meget god frostbestandighed (målt som afskalning), når proceduren blev fulgt og forsøg startet 31 døgn efter støbning. Det var forventet, at nogle af de grønne betoner ville have en langsommere egenskabsudvikling, og derfor blev alle betoner også testet med start 59 døgn efter støbning. Her viste A3 overraskende større afskalning end når prøveemnerne kun var 31 døgn ved første frosteksponeering. Dette skabte frygt for at slamasken kunne påvirke betonen i negativ retning, så dens frostbestandighed ville blive dårligere med tiden. Derfor blev dette gjort til et særligt undersøgelsespunkt i udvidet pakke, hvor A3 blev testet til 3 terminer. Her er der dog intet, der tyder på, at frostbestandigheden forringes med alderen, så resultatet i stor pakke må bero på den almindelige usikkerhed ved metoden.

Foruden de forskellige standardiserede undersøgelser, hvor resultaterne er nævnt ovenfor, er der foretaget en mineralogisk undersøgelse af tyndslib fra en A3-beton (stor pakke), hvor prøven er udtaget ca. 1 år efter støbning. I forbindelse med stor pakkes afprøvning af støbeegenskaber, blev der støbt nogle klodser på ca. 1 m³ hver. Disse blev efterfølgende opstillet på et areal ved Teknologisk Institut. Den udtagne prøve stammer således fra beton,

der ikke har været udsat for saltning, men som har været eksponeret for almindeligt vejrlig, herunder en vinter.

Undersøgelsen viser en beton med nogen ettringit i luftporene, men dog ikke mere, end hvad der ofte ses i konstruktionsbeton og må betragtes som almindeligt. Slamasken har et højere sulfat-indhold end almindelig flyveaske. På det tidspunkt, hvor prøven blev udtaget, var disse sulfater bundet i calcium- og fosfat-faser. Kendskabet til disse faser er ikke stort, og det vides derfor heller, hvor stabile de er over tid og hvilke faktorer, der evt. kan påvirke de ligevægte, faserne indgår i. Dette aspekt bør undersøges nærmere. I værste fald kan sulfaterne frigives på et senere tidspunkt i betonens "liv" og reagere med C_3A . Denne reaktions produkter er ekspansive og kan derfor skade betonen. Hvis dette viser sig at være et problem, vil det kunne sandsynligvis kunne forebygges ved brug af sulfatbestandig cement med lavt C_3A -indhold.

6. Udredningsarbejde

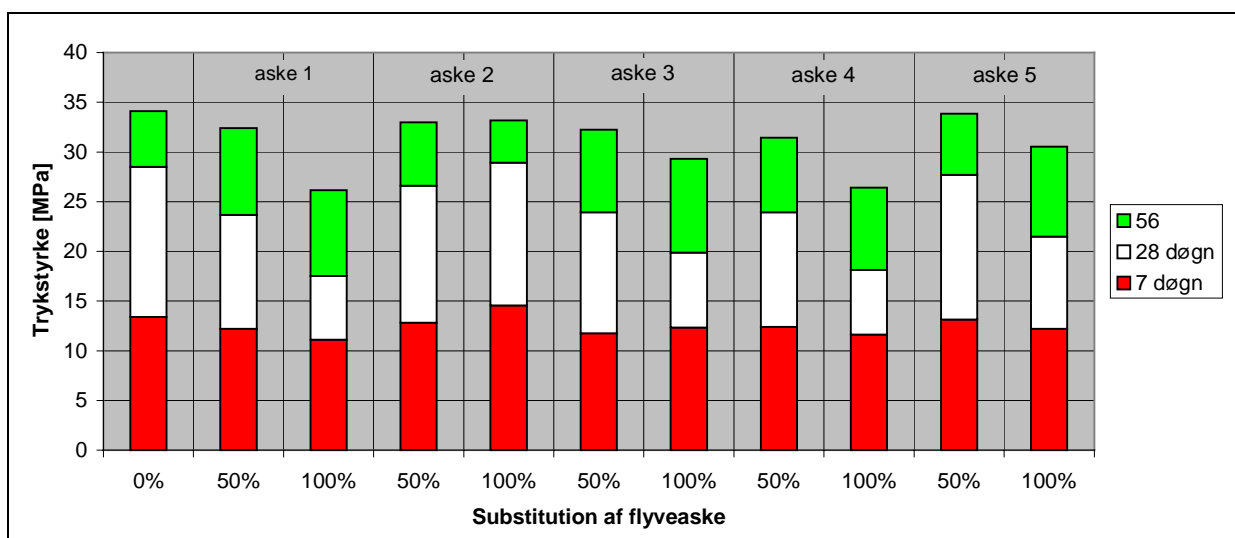
Som nævnt i kapitel 1 blev der mellem stor pakke og udvidet pakke gennemført et antal undersøgelser af slamaskebetoner, der ligger ud over de egentlige prøvningspakker: grundpakken, stor pakke og udvidet pakke. Årsagen var, at Unicon på eget initiativ (udenfor Grøn Beton-projektet) havde blandet et antal P-betoner i forskellige styrkeklasser (12-30 MPa). Her var der foretaget en 100% substitution af flyveaske med slamaske. Alle disse betoner havde markant lavere styrker end til referencer med almindelig flyveaske. Styrkereduktionerne var således på 24-54%, hvilket blev vurderet som meget alarmerende.

Udredningsarbejdet i Grøn Beton-projektet kom primært til at omfatte observation af styrkeudvikling for et antal P-betoner med forskellige typer aske:

1. Lynette-aske udtaget juni 2001
2. Avedøreaske udtaget juni 2001. Denne aske stammer fra en anden ovn end i grundpakken, så asken er lige så fin som Lynetteasken og leveret tør.
3. Lynette-aske udtaget november 2000
4. Lynette-aske udtaget februar 2001 og formalet til en finere kornkurve end den ubehandlede slamaske
5. Lynette-aske udtaget i maj 2000 og anvendt i stor pakke til såvel A- som P-betoner

Grunden til, at der var så mange asker fra Lynetten, var at denne allerede var undersøgt i Grøn Beton (stor pakke), og at der undervejs var sket nogle ændringer i Lynettens forbrændingsprocedure, bl.a. var forbrændingstemperaturen blevet sænket. Der var derfor mistanke om, at den ændrede procedure havde ført til nogle uheldige ændringer af asken.

Resultaterne ses i Figur 3.



Figur 3: Styrkeudvikling for P-beton med forskellige typer flyveaske.

Det ses, at:

- for alle Lynette-askerne reduceres styrken, jo højere slamaskeholdet er
- partikelstørrelsen tilsyneladende ikke spiller nogen særlig rolle for styrken, da resultaterne for aske 4 ligner de øvrige Lynette-asker
- Avedøreasken har stort set samme styrke, uanset om der substitueres 0%, 50% eller 100%. Derved adskiller den sig fra Lynette-asken, og ser således ud til at være bedre egnet til betonproduktion.

At slamaskens andel af pulverindholdet har betydning var sådan set ikke en overraskelse i lyset af de resultater, der allerede var tilgængelige. I grundpakken måtte meget høje indhold af slamaske (op til 60% af pulveret) opgives allerede under for-forsøgene, fordi styrkerne var helt utilfredsstillende, og siden viste PSM100 sig at have lavere styrker end PSM50. PSM100 havde et slamaskehold på 17% af pulveret. Ved justering af recepter til stor pakke blev dette forsøgt hævet til ca. 25% af pulveret, fordi den nye referencerecept indeholdt 25% flyveaske. Men dette måtte opgives, igen på grund af utilfredsstillende styrker.

Derimod kan det overraske, at Avedøre-asken tilsyneladende er så meget bedre end Lynette-asken. De kemiske analyser tyder nemlig på, at askerne fra de to kilder er ret ens. Der er mindre forskelle, så Avedøreasken har et lidt højere sulfatindhold, et højere indhold af CaO og et lavere indhold af SiO₂ samt et lidt lavere alkali-indhold.

Der er ikke konstateret samme grad af styrkereduktion for A-betonerne som for P-betonerne, faktisk havde A3 større styrke end referencebetonen i stor pakke. En mulig forklaring på dette kunne være, at porevæsken i A-betonerne har en højere pH-værdi end P-betonerne, og at det således vil være muligt at bedre slamaskebetonernes styrkeresultater ved at alkali-aktivere betonerne. Denne forklaring kan ikke udelukkes, men den stemmer ikke med, at Avedøreasken med det laveste alkali-indhold giver de bedste styrker.

På et punkt adskiller slamasken sig, uanset kilde, fra almindelig flyveaske fra kulfyring. Slamasken indeholder ca. 20% P₂O₅ (gælder både for aske fra Avedøre og fra Lynetten), men indholdet er under 1% for almindelig flyveaske. Dette kan være en anden forklaring på, hvorfor slamasken påvirker styrkerne. P₂O₅ er bundet i calciumforbindelser i slamasken. Denne kan opløses over tid, og fosforforbindelserne kan retardere cementens hydratisering. Dette kan forklare, at den reducerede styrkeudvikling i udredningsarbejdet primært ses mellem 7 og 28 døgn. Det stemmer også overens med, at forholdet mellem slamaske og cement har betydning.

Det lykkedes imidlertid ikke i løbet af udredningsarbejdet at komme en egentlig forklaring nærmere, så resultatet er, at der er to hypoteser om, hvorfor slamaske forårsager styrkereduktioner: Dels at slamasken behøver alkali-aktivering, dels at det høje indhold af P₂O₅ påvirker cementens hydratisering negativt.

7. Konklusion

Beton med slamaske kan anvendes i beton jf. DS 481, hvis det kan dokumenteres, at betonen opfylder DS 481s krav. Men slamasken skal tilsættes som ”øvrige andre tilsætninger” og ikke som flyveaske, da asken ikke er omfattet af DS/EN 450. Det betyder, at asken ikke kan tages med i beregningen af betonens ækvivalente v/c-forhold.

Beton med slamaskes største miljømæssige fordel er, at den gør det muligt at anvende et uorganisk restprodukt, der ellers skulle have været deponeret. I den aktuelle A-beton med slamaske afprøvet i stor og udvidet pakke er lavalkali-, sulfatbestandig cement erstattet af rapidcement, hvilket desuden reducerer CO₂-emissionerne ved produktion af betonen.

Hvis betonen produceres uden formaldehydholdige tilsætningsstoffer, overholder den samtidigt Grøn Beton-projektets miljøbetingelser. Dog er det ikke undersøgt i nærværende projekt, om tungmetaller og andre stoffer i slamasken kan påvirke betonfabrikkernes spildevandskvalitet negativt.

Beton med slamaske har generelt gode mekaniske egenskaber, om end et udredningsarbejde omfattende P-betoner gennemført mellem stor og udvidet pakke tyder på, at beton med slamaske har tendens til en lavere styrkeudvikling. Det har ikke været muligt at klarlægge årsagen til styrkereduktionen og det er derfor heller ikke muligt at forudse omfanget af den på baggrund af fx en kemisk analyse af slamasken. Et af de ubesvarede spørgsmål er, om slamaskens indhold af fosfor i form af P₂O₅ spiller ind og hæmmer cementens hydratisering. Slamasken indeholder ca. 20% P₂O₅, mens almindelig flyveaske indeholder under 1%.

De mekaniske egenskaber under brand er ikke undersøgt, men P-beton med slamaske er undersøgt med hensyn til eksplosiv afskalning under brand. Forsøgene forløb som semi-fuldskalforsøg ved brandeksponering af små væg-elementer. Betonen viste ikke tegn på eksplosiv afskalning.

Beton med slamaske har ligeledes gode udførelsesmæssige egenskaber. Dog kræver beton med slamaske forholdsvis høje doseringer af plastificerende og/eller superplastificerende tilsætningsstoffer, hvilket kan forklare, at fx tiden før betonen er klar til glitning bliver lidt længere. Betonens finish var ikke helt som referencebetonens, idet der var flere luftbobler mod formsiden. Slamasken har tilsyneladende en let luftindblandende virkning, idet betonen har et luftindhold, der er lige så stort som referencebetonen eller større med mindre luftindblandingsmiddel. Dette er muligvis ikke en direkte følge af anvendelsen af slamaske, men af de plastificerende og superplastificerende midler, der er nødvendige for at opnå den ønskede bearbejdelighed. Med hensyn til plastisk svind ser beton med slamaske ud til at opføre sig som beton med almindelig flyveaske, og har derfor også samme behov for udtørningsbeskyttelse.

Holdbarhedsmæssigt er chloridmodstanden for beton med slamaske lidt bedre end for en tilsvarende referencebeton til aggressivt miljø. Den testede beton viste på andre områder, carbonatisering, alkali-reaktivitet og frostbestandighed, meget tilfredsstillende resultater.

Den eneste holdbarhedsmæssige betænkelighed er slamaskens sulfatindhold. I nogle akser er dette indhold betydeligt højere end i konventionel flyveaske. Det gælder fx den slamaske, der er benyttet i udvidet pakke. Mineralogiske undersøgelser af 1 år gamle prøver viser, at sulfaten er bundet i calcium- og fosforforbindelser, og så længe den er det, er der ikke noget problem. Hvordan disse faser opfører sig over en længere årrække er imidlertid ikke kendt. Hvis sulfaten frigives på et senere tidspunkt, vil den kunne reagere med C_3A , hvilket er en ekspansiv og dermed potentiel skadelig reaktion.

8. Referencer

- [1] ”Grundpakke rapportering. Beton med uorganiske restprodukter. Slamaske 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, Teknologisk Institut, Beton, 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] ”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. Kemisk analyse af slamasken findes i appendix 3.

P-beton

Table 7: Recepter for P-beton med slammaske.

		Pref	PSM50	PSM100	Pref	P3
		grundpakke	grundpakke	grundpakke	stor pakke	stor pakke
		Holbæk	Holbæk	Holbæk	Nr. Sundby	Nr. Sundby
Cement	AaP Rapid	169	172	168	143	137
Flyveaske	Danaske B1	37	19	-	51	15
Mikrosilica	Elkem pulver	13	12	13	10	10
Slamaske ¹	Avedøre etageovn	-	27,6	59	-	33
	Lynetten etageovn	-	-	-	-	-
Vand	Vandværksvand	149	154	150	136	138
Sand 1	0/4 Aunsøgård kl. A	226	218	220	-	-
	0/4 Nr. Haldne kl. A	-	-	-	793	781
Sand 2	0/4 Mogenstrup kl. P	507	491	479	-	-
Sten 1	2/8 Aunsøgård kl. P	253	239	253	-	-
	4/8 Nr. Haldne kl. A	-	-	-	197	188
Sten 2	8/16 Aunsøgård kl. P	194	197	160	-	-
	8/16 Vigsø kl. M	-	-	-	382	369
Sten 3	16/32 Aunsøgård kl. P	681	699	696	-	-
	16/32 Vigsø kl. M	-	-	-	556	538
Plastificering	Conplast P212	1,34	2,05	1,83	1,41	1,54
Superplastificering	Peramin F ²	-	-	0,91	-	-
	Conplast SP605	-	-	-	-	3,18
Luftindblanding	Conplast AEA316 1:9	1,29	0,53	0,37	-	-
	Conplast AEA316 1:5	-	-	-	0,22	0,10
Målt luft		4,5	5,5	5,5	5,0	7,0
Ækv. v/c-forhold		0,71	0,71	0,68	0,73	0,78

1. Slamaske fra Avedøre har en absorbtion på ca. 50%, det har slamaske fra Lynetten ikke. I de angivne mængder Avedøre-aske er den absorberede vandmængde regnet med.
2. Peramin F indeholder formaldehyd, der figurerer på Miljøstyrelsens liste over uønskede stoffer, og blev derfor erstattet af Conplast SP605 i stor pakke.

A-betoner*Tabel 8: Recepter for A-betoner med slamaske i grundpakken.*

		Aref	ASM50	ASM100
		Grundpakken	Grundpakken	Grundpakken
		Holbæk	Holbæk	Holbæk
Cement	AaP lavalkali-, sulfatbestandig	292	282	285
Flyveaske	Danaske B1	48	23	-
Mikrosilica	Elkem pulver	15	15	15
Slamaske ¹	Avedøre etageovn	-	35	71
Vand	Vandværksvand	134	139	137
Sand 1	0/4 SS&G Kalundborg kl. A	183	179	180
Sand 2	0/4 Aunsøgård kl. A	447	443	422
Sten 1	8/16 Karlshavn kl. A	687	662	680
Sten 2	16/32 Karlshavn kl. A	467	452	456
Luftindblanding	Conplast AEA 316 1:9	3,36	1,92	1,18
Plastificering	Conplast P212	2,72	2,86	2,71
Superplastificering	Peramin F ²	-	-	1,31
Målt luft		6,9	7,7	7,4
Ækv. v/c-forhold		0,40	0,42	0,43

1. Slamaske fra Avedøre har en absorbtion på ca. 50%. I de angivne mængder er den absorberede vandmængde regnet med.
2. Peramin F indeholder formaldehyd, der figurerer på Miljøstyrelsens liste over uønskede stoffer. Peramin F blev derfor erstattet af Conplast SP605 i stor pakke.

Tabel 9: Recepter for A-beton med slamaske i stor pakke og udvidet pakke.

		Aref	A0	A3	Aref	A3
		stor pakke	stor pakke	stor pakke	udv. pakke	udv. pakke
		Nr. Sundby	Nr. Sundby	Nr. Sundby	Horsens	Horsens
Cement	AaP lavalkali	288	-	-	308	-
	AaP rapid	-	287	277	-	304
Flyveaske	Danaske B1	34	32	-	31	-
Mikrosilica	Elkem pulver	17	17	17	18	17
Slamaske ¹	Lynette etageovn	-	-	35	-	-
	Avedøre fluid bed	-	-	-	-	31
Vand	Vandværksvand	149	155	143	145	133
Sand	0/4 Nr. Haldn kl. A	621	629	640	-	-
	0/2 Vestbirk kl. A	-	-	-	650	613
Sten 1	4/8 Uddevalla kl. A	244	245	249	-	-
	4/8 Eikefet kl. A	-	-	-	230	227
Sten 2	8/16 Uddevalla kl. A	855	858	865	-	-
	8/16 Eikefet kl. A	-	-	-	368	329
Sten 3	16/32 Eikefet kl. A	-	-	-	546	566
Luftindblanding	Conplast AEA 316 1:5	1,01	0,73	0,31	0,95	0,52
Plastificering	Conplast P212	2,39	2,50	2,23	2,50	3,09
Superplastificering	Conplast SP605	-	-	3,18	-	-
	Conplast SP610	-	-	-	-	3,56
Målt luft		8,4	7,2	6,4	6,8	6,0
Ækv. v/c-forhold		0,45	0,47	0,45	0,41	0,39

Bemærk! I Tabel 9 er der også angivet en recept for A0 i udvidet pakke, der er skridtet mellem Aref og A3, idet A0 ligesom A3 indeholder rapidcement i stedet for lavalkali-, sulfatbestandig cement, men A0 indeholder ikke slamaske.

Der er ikke angivet recepter for A3 i demonstrationsbroen, da betonen her i princippet er identisk med betonen fra udvidet pakke, idet der dog kan forekomme mindre variationer fra blanding til blanding.

Appendix 2: Prøvningsoversigt

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

- Grundpakkerapport om beton med betonindustriens egne 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]
- Rapportering fra demonstrationsbro-projektet [14]

Foruden prøvningen beskrevet i nedenstående tabeller, er der udført et udreningsarbejde mht. slamaskebetonernes styrker. Disse resultater findes kun beskrevet i mødereferater og interne notater.

Table 10: Prøvning af mekaniske egenskaber (BK1).

	PSM50	PSM100	P3 - stor pakke	ASM50	ASM100	A3 - stor pakke	A3 - udv. pakke
Styrkeudvikling							
E-modul							
Arbejdskurver							
Spaltetrækstyrke							
Krybning ved stor last							
Temperaturudvidelse							
Fugtbevægelser							
Forankringsevne							
Udmattelse							
Krybning ved moderat last							
Forskydningsbæreevne							
Bøjningsforsøg							
Instabilitet af søjler							

Tabel 11: Prøvning af egenskaber under brandpåvirkning (BK2).

	PSM50	PSM100	P3 - stor pakke	ASM50	ASM100	A3 - stor pakke	A3 - udv. pakke
Mekaniske egenskaber							
Eksplisiv afskalning							

Tabel 12: Prøvning af udførelsmæssige egenskaber (BK3).

	PSM50	PSM100	P3 - stor pakke	ASM50	ASM100	A3 - stor pakke	A3 - udv. 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 13: Prøvning af A- betonernes holdbarhedsmæssige egenskaber(BK4).

	ASM50	ASM100	A3 - stor pakke	A3 - udv. pakke
Luftporestruktur				
Frostbestandighed, afskalning				
Frostbestandighed, indre revnedannelse				
Carbonatisering				
Alkalireaktivitet				
Chloridmodstand				
Tyndslibsanalyse				

Appendix 3: Kemisk analyse af slamaske

Den slamaske, der er anvendt i henholdsvis grundpakke, stor pakke og udvidet pakke, har gennemgået en kemisk analyse. Resultaterne fremgår af Tabel 14.

Tabel 14: Kemisk sammensætning af tre typer slamaske samt traditionel, dansk flyveaske.

Kilde		Avedøre Spildevands- center	Lynette- fællesskabet	Avedøre Spildevands- center	Almindelig flyveaske ²
Forbrændingstype		Etageovn	Etageovn	Fluid bed	-
Anvendt i		grund- pakken ¹	stor pakke	udvidet pakke	-
Densitet	kg/m ³	ca. 2200	2758	2858	2200
CaO	% af tørstof	21,2	16,2	24,4	2,78
SiO ₂	% af tørstof	20,6	25,4	20,2	59,7
Fe ₂ O ₃	% af tørstof	12,0	12,5	15,1	7,57
Al ₂ O ₃	% af tørstof	5,69	8,5	6,0	21,3
TiO ₂	% af tørstof	0,91	1,5	1,1	0,98
P ₂ O ₅	% af tørstof	18,8	21,4	20,2	0,34
MgO	% af tørstof	2,49	3,3	2,4	1,35
Cl	% af tørstof	0,18	0,0	0,0	0,004
SO ₃	% af tørstof	3,27	0,21	2,01	0,65
K ₂ O-total	% af tørstof	1,27	2,83	1,36	0,65
Na ₂ O-total	% af tørstof	0,91	1,33	0,88	0,52
Na ₂ O-ækvivalent	% af tørstof	1,74	3,19	1,77	1,84
As	mg/kg	<30	<30	<30	<30
Cd	mg/kg	<10	<20	<20	<10
Co	mg/kg	23	52	<20	32
Cr	mg/kg	157	70	148	137
Cu	mg/kg	917	782	817	77
Hg	mg/kg	<0,1	0,1	1,2	0,2
Mn	mg/kg	600	483	806	313
Ni	mg/kg	172	107	155	100
Pb	mg/kg	214	437	397	34
Tl	mg/kg	<20	<20	<20	<20
V	mg/kg	43	63	36	268
Zn	mg/kg	2064	2542	2709	181
glødetab	% af tørstof	13,1	2,1	2,5	3,4

1. Gennemsnit af to prøver
2. Typisk dansk flyveaske, der overholder DS/EN 450