

Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen

Nr. 17 1990

Genbrug af frisk betonspild
i betonelementer og betonvarer

Miljøministeriet **Miljøstyrelsen**

Strandgade 29, 1401 København K, tlf. 31 57 83 10

666 : 628,477.2

B4

ex.3

Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen, nr. 17/1990

Genbrug af frisk betonspild
i betonelementer og betonvarer

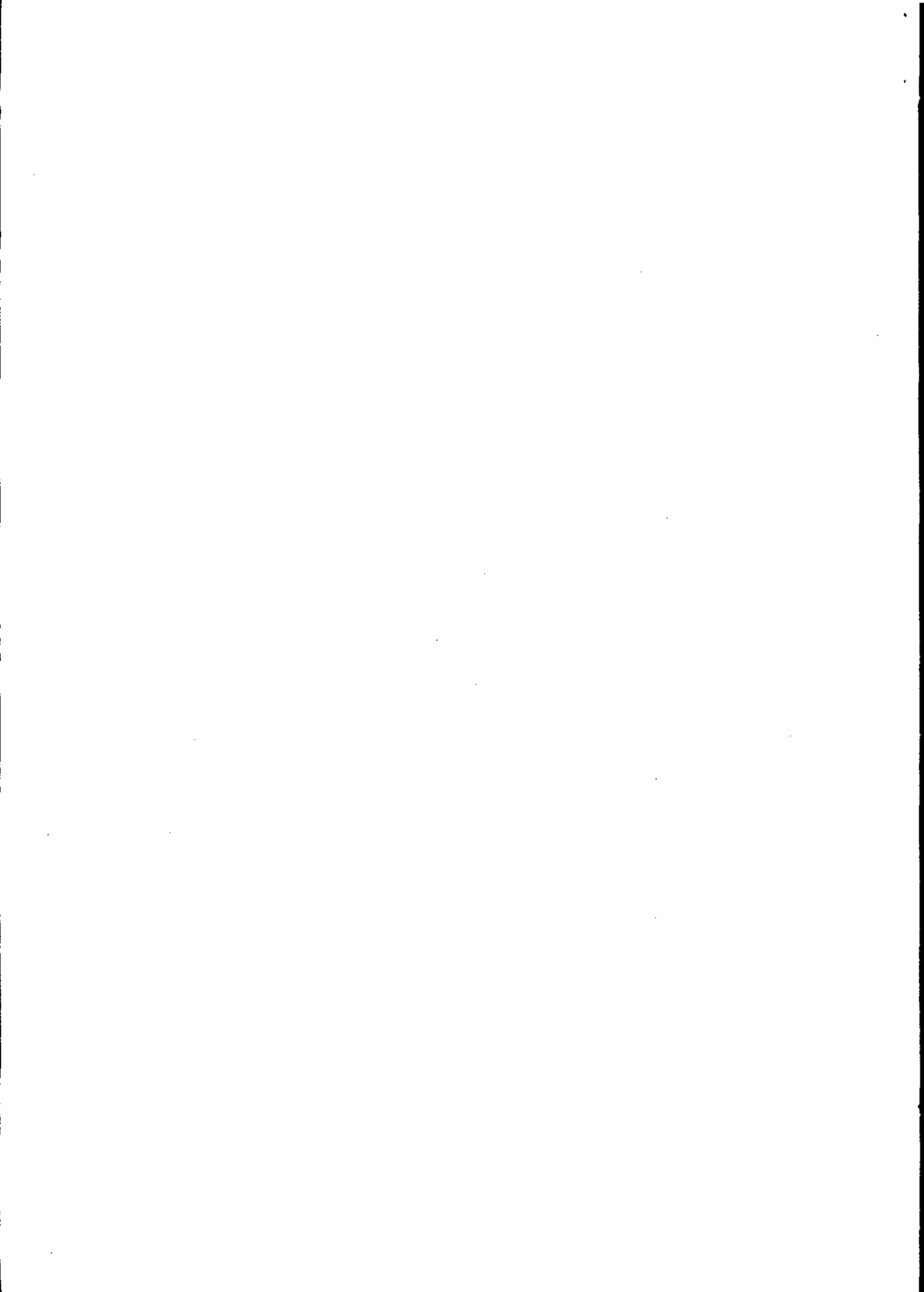
Søren T. Skovsende
Dansk Teknologisk Institut

MILJØSTYRELSEN
BIBLIOTEKET
Strandgade 29
1401 København K

Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Rapporten er udarbejdet med tilskud fra Rådet vedr. genanvendelse og mindre forurenende teknologi.

Det skal bemærkes, at de fremsatte synspunkter ikke nødvendigvis dækkes af Rådet eller Miljøstyrelsen.



0. FORORD

Denne rapport beskriver resultaterne af projektet, der bærer titlen "Genbrug af friske beton- og mørtelrester ved fremstilling af betonvarer og betonelementer". Projektet er finansieret af Rådet vedrørende genanvendelse og mindre forurenende teknologi.

Formål

Formålet med dette projekt har været at undersøge de betonteknologiske aspekter ved genanvendelse af friske betonrester under de specielle forhold, der gør sig gældende ved betonvare- og betonelementproduktion. Undersøgelserne har været baseret på at undersøge, hvilken betydning støbevand med et meget højt indhold (25-50 vægt%) af opslemmede bestanddele vil have på såvel den friske som den hærdede betons egenskaber. De opslemmede bestanddele består af mere eller mindre hydratiserede cementpartikler samt en ganske lille mængde finsand.

Projektet er udført dels hos Dansk Teknologisk Institut, dels hos Modulbeton I/S i Ølstykke (betonelementfabrikant) og hos A/S Langeskov Beton i Langeskov (betonvarefabrikant) med civilingeniør Arne Damgård Jensen som projektleder.

Laboratorieforsøgene er udført på Dansk Teknologisk Institut af laboratorieforvalter Mogens Hansen, arbejdsmand Jan Hansen, akademiingeniør Hanne Strunge og akademiingeniør Søren Skovsende. Projektrapporten er udarbejdet af Søren Skovsende.

Fuldskalaprøvningsne hos Modulbeton blev primært forestået af ingeniør Povl Erik Juhl; hos Langeskov Beton af ingeniør Niels Peter Frandsen. Afprøvningsne hos producenterne er foretaget af fabrikkens sædvanlige laboratoriepersonale.

Endvidere indgår overvejelser om genbrugsslams indflydelse på betons styrkeudvikling foretaget af G.M. Idorn Consult A/S ved akademiingeniør Niels Thaulow. Ingeniør, dr.phil. Susanta Chatterji, Dansk Teknologisk Institut, Byggeteknik har ligeledes bidraget med overvejelser omkring dette emne.

Projektet er gennemført i perioden august 1989 - marts 1990.

Projektet har været fulgt af en følgegruppe med nedenstående deltagere:

- Lars Søborg og Jette Skaarup
Miljøstyrelsen, Genanvendelseskontoret
- Gunnar Hansen
Betonelementforeningen
- Peter Toksvig
Modulbeton I/S, Ølstykke
- Kristian Frandsen
A/S Langeskov Beton, Langeskov
samt
Dansk Beton Industriforening.

INDHOLDSFORTEGNELSE

	Side
0. Forord	2
1. Konklusion	5
2. Indledning	6
2.1 Baggrund for oparbejdning	6
2.2 Normer og retningslinier	8
3. Undersøgelser og forudsætninger	9
3.1 Indledning	9
3.2 Forudsætninger	9
3.3 Oversigt over laboratorieforsøg	13
3.4 Oversigt over fuldskalaprøvninger	14
4. Undersøgelser af slam	15
4.1 Indledning	15
4.2 Fremstilling af kunstigt slam	15
4.3 Slam fra Modulbeton	15
4.4 Slammets sammensætning	17
5. Undersøgelser af den friske betons egenskaber	18
5.1 Konsistens	18
5.2 Bearbejdelighed	22
6. Undersøgelse af den hærtnede betons egenskaber	27
6.1 Trykstyrke og styrkeudvikling	27
6.2 Bøjningstrækstyrke (mørtel)	29
6.3 Svind (mørtel)	30
6.4 Luftindhold	31
6.5 Strukturanalyse	32
6.6 Tæthedsprøvning	35
6.7 Krakelering og kulør (mørtel)	36
7. Sammenfatning og diskussion	37
8. Overvejelser omkring genbrugsslams indflydelse på betons styrkeudvikling	40
9. Litteraturliste	44

1. KONKLUSION

Projektet har undersøgt, hvilken betydning støbevand med et meget højt indhold (25 - 50 vægt%) af opslemmede bestanddele har på såvel frisk som hærdet element- og betonvarebetons egenskaber.

Undersøgelserne har indikeret, at den maksimale faststofandel i støbevandet må sættes til ca. 25 vægt% (med vandmængden i betonen fastholdt).

En slamtilsætning med en faststofandel i støbevandet på 25 vægt% bevirker en signifikant indvirkning på

- den friske betons konsistens
- den friske betons bearbejdelighed
- den hærdede betons trykstyrke
- den hærdede betons luftindhold.

Slamtilsætningen bevirker en forringet konsistens (udtrykt ved vebetallet), bearbejdelighed (udtrykt ved afbindingstiden) samt luftindhold (mængde og fordeling). Derimod øges betonens trykstyrke - både de tidlige styrker og 28 døgns trykstyrken.

Det er muligt at opnå en styrkeudvikling svarende til en beton uden slamtilsætning ved at sænke cementindholdet ca. 10% og betontemperaturen ca. 10°C.

Selv efter en sådan korrektion er vebetallet ca. fordoblet og afbindingstiden ca. halveret i forhold til en beton uden slamtilsætning.

Såfremt konsistensen (vebetallet) ved vandtilsætning yderligere tilnærmes betonen uden slamtilsætning opnås væsentligt lavere styrker (stadig med 10% cementreduktion).

Det har dog været muligt at udstøbe pæne betonelementer og -varer med de svagere, konsistenstilnærmede betoner, idet betonen selv ved samme konsistens virker mere sammenhængende ("klæg").

Med høj doseringskoncentration af slam til jordfugtig beton vil det være nødvendigt at anvende (yderligere) plastificerende tilsætningsstoffer til slamtilsatte betoner, hvis konsistensen skal bibeholdes uden væsentlig styrkereduktion.

2. INDLEDNING

2.1 Baggrund for oparbejdning

Spildbeton og kasserede produkter udgør 3 - 5% af betonproduktionen på danske betonelement- og betonvarefabrikker. Spildbetonen udgør op mod halvdelen heraf.

Hovedparten af spildbetonen og de kasserede betoner bliver i dag deponeret på kontrollerede lossepladser.

Hertil kommer, at spildevand fra rensning af blandede anlæg m.v. i dag ledes ud i kloaksystemet.

En genanvendelse af den friske spildbeton vil betyde en aflastning af miljøet gennem både et mindre råstofforbrug og et mindre behov for affaldsdeponering.

I Helsingør har en fabriksbetonproducent, Nordsjællands Færdigbeton (NF-beton) på eget initiativ etableret et såkaldt "oparbejdningsanlæg" med det klare formål at genbruge al spildbeton. I oparbejdningsanlægget foretages der i princippet en "rensning" af spildbetonen. Under denne bliver tilslagsmaterialerne med kornstørrelse større end ca. 0,2 mm udskilt. Disse materialer anvendes efter en fraktionering som tilslag til ny beton i passiv miljøklasse.

Vaskevandet, som indeholder mere eller mindre hydratiserede cementpartikler, evt. flyveaske og mikrosilica, samt finsand opsamles i et bassin. Det herved fremkomne slamvand, som indeholder 5-10 vægt% faststof, bruges derefter som støbevand til ny beton.

Et projekt afsluttet i juli 1988/1/, udført af Teknologisk Institut i samarbejde med NF-beton, viser helt klart, at det er muligt at fremstille god og holdbar fabriksbeton med anvendelse af slamvand, som kan indeholde helt op til ca. 15 vægt% faststof bestående af cementpartikler, puzzolaner og finsand.

Projektet følges op af et p.t. igangværende projekt mellem NF-beton, Danmarks Ingeniørakademi - Bygningsafdelingen, Axel Nielsen A/S, Rådgivende Ingeniører F.R.I og Dansk Teknologisk Institut - Byggeteknik omkring fastlæggelse af data for styrkeberegning af beton blandet med slamvand med 0, 7 og 14 vægt% faststof.

Betonelement- og betonvareproducenterne synes i høj grad at stå med de samme problemer som fabriksbetonproducenterne, som de to ovennævnte projekter har været rettet imod.

Der er dog nogle væsentlige betonteknologiske forskelle mellem fremstilling af fabriksbeton og betonelementer samt -varer udover de rent tekniske og produktionsmæssige betingelser.

Blandt de væsentlige forskelle mellem fabriksbeton og betonelement- og betonvareproduktion er bla.:

- Man arbejder med stivere, varme- og hurtighærdede betoner (hurtig afforskalling), hvor bearbejdelighed, svind og afbindingshastighed er blandt de væsentlige parametre.
- For især betonvarer er styrke og tæthed vigtige egenskaber.
- På grund af et lavt vandforbrug er en høj "doseringskoncentration" ønskværdig, det vil sige, at man ønsker at kunne anvende støbevand med en relativ høj faststofkoncentration.

For begge produktionstypers vedkommende er spildbetonen relativt mørtelig, hvorved der vil fremkomme en relativ stor mængde "slam".

Der findes i dag ikke genbrugsanlæg på betonelement- og betonvarefabrikker her i landet. De fleste benytter sig af slambassin med bundfældning og forskellige former for efterklaringsbassiner, inden vandet bortledes til kloakken. Nogle fabrikker anvender det klarede vand i betonproduktionen. De bundfældede materialer bliver kørt på lossepladsen. Især i betonvareproduktionen udstøbes ofte "halvfærdige" betonvarer af spildbetonen til direkte kassation. Disse kassationsprodukter vil et vist omfang kunne konverteres til frisk spildbeton, såfremt der indføres genbrugsanlæg.

I betonvarefabrikationen anvendes nogle steder nedknuste, kasserede betonvarer som tilslag til nye betonvarer. Et projekt udført i samarbejde mellem Danmarks Ingeniørakademi - Bygningsafdelingen, Axel Nielsen, Rådgivende Ingeniører F.R.I. og Dansk Beton Teknik har belyst de styrkemæssige aspekter omkring dette.

2.2 Normer og retningslinier

Beton til elementer og betonvarer skal opfylde kravene i Dansk Standard DS 411 samt eventuelt kravene i Basisbetonbeskrivelsen.

I Dansk Ingeniørforenings norm for betonkonstruktioner, Dansk Standard DS 411, 3. udgave, marts 1984 står der bl.a. følgende:

- "3.1.2.3 Vand

Vand må ikke indeholde stoffer, der kan skade armeringen eller forringe betonens holdbarhed.

Vandprøver skal udtages i henhold til DS 423.2.

"Vejledning": Normens krav til støbevand vil normalt være overholdt, når der anvendes vandværksvand".

I Basisbetonbeskrivelsen, marts 1987, står der, at vand, som skal bruges til betonfremstilling, skal være af kvalitet som drikkevand leveret fra vandværk.

I den tidligere udgave af DS 411 (2. udgave, december 1973) var angivet en vejledende øvre grænse på 2 gram opslemmede bestanddele pr. liter støbevand, svarende til "slamvand" med blot 0,2 vægt% faststofandel.

Fabriksbetonkontrollen (FBK) har imidlertid i en teknisk meddelelse i september 1989 givet mulighed for anvendelse af slamvand med en faststofkoncentration på op til 12 vægt% som støbevand til fabriksbeton i passiv og moderat miljøklasse. Forudsætning for anvendelse af slamvand er dog, at "oparbejdningsanlægget" er af samme princip som anlægget hos NF-beton, Helsingør.

Udenlandske normer (vesttyske, japanske og amerikanske) giver i langt større udstrækning end de danske mulighed for at anvende slamvand som støbevand.

3. UNDERSØGELSER OG FORUDSÆTNINGER

3.1 Indledning

De betonteknologiske undersøgelser har været rettet mod hvilken indflydelse støbevand, som indeholder op til ca. 50 vægt% opslemmede bestanddele i form af cementpartikler, puzzolaner og finsand, har på såvel den friske som den hærdnede betons egenskaber.

Første del af projektet er foregået på Dansk Teknologisk Institut, Byggeteknik, hvor der er foretaget laboratorieforsøg med såvel "kunstigt" fremstillet slam som slam fra Modulbeton. Anden del er foregået hos Modulbeton og hos Langeskov Beton, hvor der er foretaget praktiske forsøg under normale produktionsbetingelser.

Vores forsøgsrække er en direkte fortsættelse af det i juli 1988 afsluttede projekt om genanvendelse af frisk betonspild i fabriksbeton/1/. Forsøgene er derfor baseret på resultaterne herfra.

3.2 Forudsætninger

Udenlandske undersøgelser har påvist, at cementtypen ikke har indflydelse på genbrugsbetonens egenskaber. Slammets indvirkning på genbrugsbetonens egenskaber stiger derimod med stigende cementandel i slammets faststofandel.

Endvidere øges slammets indvirkning på genbrugsbetonen med faldende vand-cementforhold og med faldende sætmål. Ligeledes øges indvirkningen med alderen af slammet; dog kun op til ca. 7 døgn.

Fra det tidligere projekt om genanvendelse af frisk betonspild (op til ca. 14 vægt% faststof) i fabriksbeton/1/ foreligger følgende vurderinger:

Egenskab	Slamtilsætningens effekt
FRISK BETON:	
Luftindhold	Ingen
Densitet	Ingen
Sætmål	Mindskes
Afbindingstid	Mindskes op til en time
Bleeding	Ingen målbar effekt, men subjektivt bedømt holdes bedre på vandet

Egenskab	Slamtilsætningens effekt
HÆRDNET BETON:	
Styrkeudvikling	Ingen - evt. let forhøjede styrker
Bøjetrækstyrke	Mindskes
E-modul	Mindskes - statistisk meget lille materiale
Svind	Øges let
Luftporestruktur	Ingen
Vedhæftning	Mindskes let
Krakelering	Ingen
Vandopsugning	Mindskes - statistisk meget lille materiale
Struktur	Ingen
Kulør	Ingen

I nærværende projekt er i forhold til ovenstående udeladt prøvning af bleeding, E-modul, vedhæftning og vandopsugning.

Prøvestøbningerne i laboratoriet på Dansk Teknologisk Institut, Byggeteknik blev indledt med kunstigt, fremstillet slamvand, udelukkende med rapid-cement som faststofandel. Slamvandets alder ved støbning var 7-10 døgn.

Som referencebetoner blev der valgt to hyppigt anvendte elementbetoner (A og B) fra Modulbeton samt en hyppigt anvendt betonvarebeton (C) fra Langeskov Beton.

Af praktiske grunde er de ved laboratorieforsøgene anvendte tilslagsmaterialer og tilsætningsstoffer ikke de samme, som til dagligt anvendes af producenterne.

Referencebetonernes vand-cementforhold og sætmål er lavere end de betoner, der indgik i det tilsvarende projekt omkring fabriksbeton.

Med disse forhold samt sammensætningen af det kunstigt fremstillede slam taget i betragtning måtte der forventes maksimal indvirkning på genbrugsbetonens egenskaber, hvoraf især bearbejdelighed, afbingsid og tidlig styrke er væsentlige parametre.

Der blev udført prøvestøbninger med 0 vægt% (reference), 25 og 50 vægt% faststofandel i slamvandet (støbevandet).

Efter de indledende prøvestøbninger blev der foretaget justerende prøvestøbninger i laboratoriet på Dansk Teknologisk Institut, Byggeteknik.

Endelig blev der foretaget praktiske forsøg (fuldskala-prøvning) under normale produktionstekniske betingelser hos Modulbeton I/S og A/S Langeskov Beton.

Af produktionstekniske årsager var det kun muligt at udstøbe ét element (slapt armeret hul-dæk) hos Modulbeton. Den daglige produktion indgår som reference.

Hos Langeskov Beton blev der udstøbt en reference-betonvare (ø 50 x 225 cm rør) samt fem tilsvarende betonvarer med slamtilsætning. Prøvestøbningerne blev her begrænset af, at fabrikken ikke selv opsamler slam, der derfor blev leveret fra Modulbeton.

Udstøbninger af betoncylindre hos Dansk Teknologisk Institut, Byggeteknik og hos Langeskov Beton blev udført efter metode udarbejdet af CtO, det vil sige med 8 kg's komprimerings- og glittelod.

Referencebetoner

Referencebetonerne var sammensat således ved laboratorieforsøgene på Dansk Teknologisk Institut, Byggeteknik:

Bestanddel	Betontype	A kg/m ³	B kg/m ³	C kg/m ³
Cement, rapid		288	365	215
Flyveaske		32	0	135
Silicaslurry (50%)		0	0	45
Vand		145	140	86
Superplast		0	2,2	2,0
Luftindblanding		0	0,2	0
Bakkesand, kl. A		941	612	528
Søsten, kl. M. 4/8		0	0	747
Søsten, kl. M. 8/16		956	0	634
Granit, kl. A. 8/16		0	1172	0
Ækvivalent v/c forhold		0,48	0,38	0,33

Prøvestøbninger

Ved laboratorieforsøgene blev der udført følgende prøve-
støbninger:

Prøve- beteg- nelse	Reference beton	Faststof- andel i slamvand (støbevand)		Receptkorrektio n af			Beton tempe- ratur °C
		%	kg	Cement- indhold kg	Flyveaske- indhold kg	Sand- indhold kg	
Indledende prøvestøbninger:							
A-0	A	0	0	0	0	0	37
A-25	A	25	36	0	0	-36	37
A-50	A	50	72	0	0	-72	37
B-0	B	0	0	0	0	0	37
B-25	B	25	35	0	0	-35	37
C-0	C	0	0	0	0	0	37
C-25	C	25 ^{**})	22	0	-22	0	37
Justerende prøvestøbninger:							
B-25/II	B	25	35	-35	0	0	31
B-25/III	B	25	35	-35	0	0	26
B-25/IV	B	25 ^{*)}	35 ^{*)}	-35	0	0	26
C-25/II	C	25 ^{*)}	22 ^{*)} ^{**)}	-22	0	0	23

^{*)} Slam fra Modulbeton (øvrige betoner er med kunstigt fremstillet slam).

^{**)} Vand i silicaslurry er ikke indregnet i støbevand.

Vandmængden blev fastholdt i forhold til referencebetonerne.

Generelt

Når der i denne rapport refereres til laboratorieforsøg, betyder dette, at betonen er fremstillet og prøvet i laboratoriet på Dansk Teknologisk Institut, Byggeteknik.

Fuldskalaprøvning, Modulbeton, refererer til beton fremstillet og prøvet på Modulbeton I/S, Ølstykke (betonelementfabrik).

Fuldskalaprøvning, Langeskov Beton, refererer til beton fremstillet og prøvet på A/S Langeskov Beton, Langeskov (betonvarefabrik).

3.3 Oversigt over laboratorieforsøg

Frisk beton

- sætmål
- vebetal
- densitet
- luftindhold
- temperatur

Frisk mørtel

- afbinding

Hærdnet beton

- styrkeudvikling
- luftporeanalyse
- strukturanalyse

Hærdnet mørtel

- bøjningstrækstyrke
- svind
- krakelering og kulør

3.4 Oversigt over fuldskalaprøvninger

Modulbeton

Frisk beton

- vebetal
- densitet
- udstøbning af et slapt armeret hul-dækelement

Hærdnet beton

- cylindertrykstyrke (1, 7 og 28 døgn)

Langeskov beton

Frisk beton

- udstøbning af seks \emptyset 50 x 225 cm rør

Hærdnet beton

- cylindertrykstyrke (1 og 28 døgn)
- knusning af rør
- tæthedsprøvning af rør.

4. UNDERSØGELSER AF SLAM

4.1 Indledning

I undersøgelserne blev dels anvendt "kunstigt" fremstillet slam og dels slam fra et opsamlingskar (bundfældningskar) på Modulbeton I/S i Ølstykke.

Ved prøvestøbningerne hos Modulbeton og Langeskov Beton blev der anvendt slam fra Modulbetons opsamlingskar.

A/S Langeskov Beton har ikke anlæg til opsamling af spildproduktionen men har i forbindelse med projektet udført forsøg med opslemning af slam i et sandfilter. Disse forsøg måtte opgives, primært fordi det tilførte slamvand blot strømmede igennem "årer" i sandfilteret og derpå lagde sig som "overfladevand".

4.2 Fremstilling af kunstigt slam

Det "kunstigt" fremstillede slam, der blev anvendt på Dansk Teknologisk Institut, Byggeteknik blev fremstillet som ren cementslam.

Cementslammet blev sammensat af rapid-cement og vand i portioner af 51 kg. 17 kg cement og 34 kg blev hældt i en Demitas vandcementblander. Efter blandingen af cement og vand henstod blandingen under kraftig, uafbrudt omrøring i 5 døgn. Herefter blev slamblandingen ledt ned i et 100 liters tøndeformet kar med tætsluttende låg og henstod her indtil støbning.

Slammets alder ved støbning var 7-10 døgn. Slamsammensætningen var gennemsnitligt i vægt% 41% faststof (cement) og 59% vand. Slammet blev ved støbningerne rørt op i støbeandet, således at en faststofkoncentration i støbeandet på 25% og 50% kunne opnås.

4.3 Slam fra Modulbeton

Modulbeton indsamler slamvand fra diverse slambassiner og samler dette i en åben container, der fungerer som bundfældningskar. Efter bundfældning (klaringsvandet ledes bort) fremkommer der slam (slamvand) med en faststofandel på 20-30%.

Modulbeton har i 1987 fået foretaget en analyse af en slamprøve hos Aalborg Portland.

Analyseresultat:

Tørstofindhold	22%
pH	12,7
Na ₂ O	0,33% (af tørstof)
K ₂ O	0,63% (af tørstof)
Cl ⁻	0,05% (af tørstof)
SO ₃	1,91% (af tørstof)

Sigteanalyse angivet på tørstofbasis:

<u>Sigte</u>	<u>Gennemfalds-%</u>
1,0 mm	99,9%
0,5 mm	99,7%
0,25 mm	99,6%
0,125 mm	96,8%
Tørdensitet	2,21 g/cm ³

Disse analyseresultater ligger tæt op af de analyseresultater, der foreligger på det slam fra NF-beton, der indgik i projektet om genbrug af friske betonspild i fabriksbeton. I NF-betons slam kunne der ikke ved UV-spektrofometri påvises tilstedeværelsen af tilsætningsstoffer.

Der er derfor ikke i dette projekt udført yderligere analyser af Modulbetons slam.

Ved både laboratorieforsøgene og fuldskalaprøvningerne var sammensætningen af slammet fra Modulbeton 26 vægt% faststof og 74 vægt% vand.

Ved laboratorieforsøgene og fuldskalaafprøvningen hos Langeskov Beton blev slammet opbevaret i lukkede 10-15 liters spande indtil støbning.

Ved alle støbninger var slammets alder 7-10 døgn.

Ved laboratorieforsøgene blev slammet rørt op i støbeandet, således at en faststofkoncentration på 25% kunne opnås.

Ved fuldskalaafprøvningerne blev slammet tilsat "rent", det vil sige i en sammensætning på 26 vægt% faststof og 74 vægt% vand (svarende til en faststofandel på 35 vægt%, såfremt al støbevandet er indeholdt i slammet). Dette skyldes, at fugtindholdet i tilslagsmaterialerne udgjorde al tilsat vand.

Selv ved længere tids opbevaring bundfældede slammet ikke yderligere, hvorfor en faststofandel på 35 vægt% formentlig vil være maksimum ved anvendelse af "naturligt" slam.

Vurdering

Slammet indeholder ikke materiale, der kan skade beton.

Slammet er overvejende af cement-finhed.

4.4 Slammets sammensætning

Der er fremstillet tyndslib af udtørret slam. På tørrende slamprøver er der ligeledes udført røntgen-diffraktionsanalyser.

I både det kunstigt fremstillede slam og slammet fra Modulbeton er hovedbestanddelen calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i pladeformede krystaller. Især i slammet fra Modulbeton er en del af calciumhydroxiden reageret (karbonatiseret) til det helt inaktive calciumcarbonat CaCO_3 ; i langt mindre omfang ses den samme tendens i det kunstigt fremstillede slam.

I den kunstigt fremstillede slam ses $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i alle mulige størrelser; i slammet fra Modulbeton bemærkes enkelte meget store krystaller. De større krystaller kan forklares ved en større opløselighed af $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ved lavere temperatur - slammet opbevares udendørs på Modulbeton og er indsamlet i oktober måned.

I ingen af slamtyperne er der nævneværdig cementreaktivitet tilbage, idet C_3S -mineralerne nærmest er forsvundet. Der ses dog enkelte ikke-reagerede C_2S -minerale (hydratiserer normalt langsomt).

I slammet fra Modulbeton ses lidt flyveaske og lidt (<1 vol.-%) finsand.

5. UNDERSØGELSER AF DEN FRISKE BETONS EGENSKABER

5.1 Konsistens

5.1.1 Laboratorieforsøg

Beskrivelse

På alle 11 betoner er der udført målinger af den friske betons sætmål, vebetal, luftindhold og densitet.

Prøvningerne blev udført i henhold til prøvningsmetoderne:

- DS 423.12, Betonprøvning. Frisk beton. Konsistens.
 Sætmål, 2. udgave.
- DS 423.13, Betonprøvning. Frisk beton. Konsistens.
 Vebetal, 2. udgave.
- DS 423.15, Betonprøvning. Frisk beton. Luftindhold,
 1. udgave.
- DS 423.16, Betonprøvning. Frisk beton. Densitet,
 1. udgave.

Konsistens målt på frisk beton med og uden slamtilsætning.

Slamtilsætning: 25 og 50 vægt% faststofandel i støbeandet. (Vandmængden fastholdt).

Blanding: Indledende tørblanding, indtil ensartet kulør af blandingen er opnået, og afsluttende blanding i 180 sekunder efter tilsætning af støbevand (incl. slam og evt. silicaslurry). Evt. plastificering og luft er tilsat midtvejs i våd-blandetiden. Der er anvendt tvangsblander med 50 liters blandekar.

Prøveudtagning: Til måling af sætmål og vebetal er udtaget 1 prøve af hver betonblanding. Til måling af luftindhold og densitet er der ligeledes udtaget 1 prøve af hver betonblanding. Densiteten er endvidere angivet for den tungeste og den letteste af de med komprimeringslod udstøbte \varnothing 100 x 200 mm cylindre.

Resultater

Sætmål og vebetal

Sætmålet er nul for alle betoner.

Beton	Vebetall (sek)	Beton	Vebetall (sek)	Beton	Vebetall (sek)
A-0	11	B-0	12	C-0	58
A-25	27	B-25	64	C-25	60
		B-25/II	57		
		B-25/III	41		
		B-25/IV	27	C-25/II	42
A-50	>120				

Luftindhold og densitet

Luftindhold:

Beton	Luft (%)	Beton	Luft (%)	Beton	Luft (%)
A-0	4,4	B-0	4,0	C-0	2,0
A-25	3,4	B-25	2,3	C-25	1,7
		B-25/II	1,8		
		B-25/III	2,2		
		B-25/IV	2,4	C-25/II	2,0
A-50	12,5				

Densitet:

Beton	Densitet (kg/m ³)	Beton	Densitet (kg/m ³)	Beton	Densitet (kg/m ³)
A-0	2331	B-0	2375	C-0	2433
A-25	2356	B-25	2426	C-25	2416
		B-25/II	2421		
		B-25/III	2416		
		B-25/IV	2426	C-25/II	2406
A-50	2026				

Densitet målt på cylindre:

Beton	Densitet (kg/m ³)	Beton	Densitet (kg/m ³)	Beton	Densitet (kg/m ³)
A-0	max 2394 min 2298	B-0	max 2410 min 2364	C-0	max 2466 min 2428
A-25	max 2400 min 2347	B-25	max 2440 min 2314	C-25	max 2436 min 2254
		B-25/II	max 2440 min 2401		
		B-25/III	max 2435 min 2401		
		B-25/IV	max 2430 min 2402	C-25/II	max 2437 min 2370
A-50	max 2359 min 2183				

Målingerne af luftindhold og densitet må tages med nogen forbehold på grund af den meget vanskelige komprimering af de stive betoner. Komprimeringen af cylindrene er foregået ved anvendelse af 8 kg's komprimerings- og glitteledder. Specielt var komprimeringen af beton A-50 vanskelig, hvilket ses af et luftindhold på 12,5% og en densitet omkring 2000 kg/m³.

5.1.2 Fuldskalaforsøg

Der er ved ingen af fuldskalaforsøgene udført forsøg med konsistensændringer som følge af slamtilsætning.

Dette skyldes, at forsøgene kun kunne gennemføres ved "korrekt" konsistens af hensyn til det eksisterende vibrationsudstyr og nødvendigheden af omgående afformning.

Mere effektiv vibrering vil ofte ikke være mulig på grund af Arbejdstilsynets krav til støjniveau.

Vurdering

Veбетallet for den friske beton stiger markant med slamtilsætninger, hvor faststofandelen i støbevand er henholdsvis 25 og 50 vægt%.

En nedsættelse af cementindholdet svarende til faststofandelen i støbevand og en nedsættelse af betontemperaturen på godt 10°C virker dog afdæmpende på stigningen. Beton med slam fra Modulbeton har endvidere lavere veбетal end beton med kunstigt slam.

I betonen af type B er veбетallet omtrent fordoblet i forhold til referencebetonen med en 25% slamtilsætning på trods af justeringer af cementindhold og temperatur.

I betonen af type C, hvor veбетallet selv i referencebetonen var meget højt kan der ikke spores nogen signifikant ændring af veбетallet med slamtilsætning.

En slamtilsætning med en faststofandel på 25 vægt% af støbevand reducerer tilsyneladende luftindholdet i betontyperne A og B (kun betontype B er luftindblandet), ligesom densiteten viser tegn på øgning. I betontype B mindskes reduktionen af luftindholdet ved en reduktion af cementmængden og betontemperaturen samt ved anvendelse af slam fra Modulbeton i stedet for kunstigt slam.

I betontype C kan der ikke konstateres nogen forskel i luftindhold og densitet mellem referencebetonen og betonen iblandet slam fra Modulbeton. I betonen med kunstigt slam forekommer luftindholdet dog at være mindsket.

5.2 Bearbejdelighed

5.2.1 Laboratorieforsøg

Beskrivelse

På alle 11 betoner er der udført måling af afbindingstiden.

Ved betonens afbinding forstås den styrketilvækst, som bestemmes på mørtel under den indledende hærkning, normalt indenfor 8 timer efter blandingen.

Mørtlens afbindingstid er dens alder ved indtrængningsmodstanden 3,5 MPa.

3,5 MPa betragtes som vibrationsgrænsen, det vil sige det punkt i hærningen, efter hvilket betonen ikke længere kan gøres plastisk ved genvibrering.

Prøvningsmetode: DS 423.27 Betonprøvning. Frisk beton. Afbinding, 1. udgave.

Afbindingstid målt på cementmørtel (uden tilsætning af sten-tilslag) med og uden slamtilsætning.

Slamtilsætning: 25 og 50 vægt% faststofandel i støbeblandingen (vandmængden fastholdt).

Blanding: Indledende tørblending, indtil ensartet kulør er opnået, og afsluttende blanding i 180 sekunder efter tilsætning af støbevand (incl. slam og evt. silicaslurry).

Evt. plastificering og luft er tilsat midtvejs i vådblandetiden. Der er anvendt tvangsblender med 15 liters blanderkar.

Måleudstyr: Soiltest pocket penetrometer.

Resultater

Afbindingstid:

Beton	Afbin- dingstid (min)	Beton	Afbin- dingstid (min)	Beton	Afbin- dingstid (min)
A-0	205	B-0	347	C-0	194
A-25	34	B-25	33	C-25	19
		B-25/II	59		
		B-25/III	84		
		B-25/IV	104	C-25/II	90
A-50	4				

Der har ikke været nogen signifikant forskel i afbindingstiden mellem mørtler udstøbt med og uden komprimeringslod. Undtaget herfor er mørtlen af beton A-50, hvor afbindingstiden var 73 og 4 min. for mørtel udstøbt henholdsvis uden og med komprimeringslod. Mørtlen udstøbt uden komprimeringslod fremstod helt usammenhængende (som isolerede korn).

5.2.2 Fuldskalaprøvning, Modulbeton

Beskrivelse

Ved fuldskalaprøvningen hos Modulbeton blev der udstøbt et slapt armeret hul-dækelement af betontype A.

Konsistenskravet for udstøbning af et sådant element er et veбетal nær 11 sekunder.

Bearbejdigheden blev vurderet visuelt efter en slamtilsætning, der med de givne tilslagsmateriale-fugtigheder var så nær 25 vægt% som muligt samtidig med, at veбетallet for betonblandingen holdtes nær 11 sekunder. Slammet blev volumendoseret.

I den slamtilsatte beton blev cementindholdet reduceret fra 345 kg til 302 kg pr. sats (1,2 m³).

Resultat

Den blandede beton opnåede følgende egenskaber i forhold til den løbende produktion:

Frisk beton	Slam-beton	Reference
Vebetaltid	13 sek.	11 sek.
Densitet	2294 kg/m ³	2350 kg/m ³
v/c forhold	0,61	0,48
Slamtilsætning	25%	0%
<hr/>		
Hærdnet beton		
<hr/>		
Trykstyrke*)		
1 døgn	9,4	16,8
7 døgn	26,9	måles ej
28 døgn	36,9	48,7

*) Bestemt på udstøbte cylindre.

Mandskabet, der udstøbte betonen, bemærkede ikke, at betonen var "anderledes".

Konsistenstillene (modstanden i blanderen) var lavere end normalt, men betonen virkede stivere og mere klæg (og "klumpet") end referencebetonen.

Det udstøbte element var uden fejl.

5.2.3 Fuldskalaprøvning, Langeskov Beton

Beskrivelse

Ved fuldskalaprøvningen hos Langeskov Beton blev der udstøbt 6 stk. ø 50 x 225 cm rør af betontype C.

I forhold til laboratorieforsøgene var betontypen siden blevet ændret, således at silicamængden var blevet øget med 25%.

Kravet til konsistensintervallet for den aktuelle betonvare er snævert. Ved udstøbning vurderes konsistensen ved modstanden i blanderen samt visuelt.

Bearbejdigheden blev vurderet visuelt efter en slamtilsætning, der med de givne tilslagsmateriale-fugtigheder var så høj som mulig samtidig med, at konsistensen vurderedes "korrekt".

I de slamtilsatte betoner blev cementindholdet reduceret fra 135 kg til 122 kg pr. sats (0,63 m³).

Resultat

Den blandede beton opnåede følgende egenskaber. Referencetonen uden slamtilsætning indgik i rør nr. 1.

	Rør nr.			
	1	2	3, 4 og 5	6
Frisk beton:				
v/c forhold	0,33	0,49	0,42	0,39
slamtilsætning	0%	16%	13%	12%
konsistens	God	For blød	Næsten som referencen (1)	Meget lig referencen (1)
Udseende af færdigt rør	Fejlfri	Blev overraskende nok stående efter afformning. Mange blærer i overfladen	Blærer i overfladen	Enkelte blærer i overfladen
Hærdnet beton:				
Trykstyrke*)				
1 døgn	17,4 MPa	8,6 MPa	13,6 MPa	ej målt
7 døgn	ej målt	ej målt	40,9 MPa	ej målt
30 døgn	60,4 MPa	ej målt	54,1 MPa	ej målt
Knusning af rør**)	223 KN	157 KN	213 KN	194 KN

*) Bestemt på udstøbte cylindre

***) Knusningen er foretaget ved påføring af en enkeltkraft vinkelret på rørenes længderetning. Kraften er påført 119 cm fra rørenes mufte-ende. Rørene er understøttet over 50 cm på begge sider af kraftens angrebepunkt. Afstanden mellem understøtningsfladerne er 62,5 cm.

Modenhed ved prøvning: 13,25 døgn.

Krav til 28 døgn styrke: 141,75 KN.

Alle rør overholder krav til tolerancer på mål.

Vurdering

Betonens afbindingstid forkortes drastisk med tilsætning af slam med en faststofandel svarende til 25 og 50 vægt% af støbevandet.

Virksomheden aftager med reduktion af cementindhold og betontemperatur samt ved anvendelse af slam fra Modulbeton i stedet for kunstigt slam. Forkortelsen af afbindingstiden er dog stadig markant (mere end halveret).

Ved ingen af fuldskalaprøvningsrørene har det været muligt at fastholde vandmængden i forhold til referencebetonerne med slamtilsætning. Kravet til fastholdt konsistens (vebetal) har nødvendiggjort en forøget vandtilsætning med deraf følgende reduktion af styrken.

Det var dog muligt begge steder med den forøgede vandtilsætning at opnå betoner med korrekt konsistens. Bearbejdigheden af disse betoner var meget nær bearbejdigheden af referencebetonerne uden slamtilsætning.

Betonerne tilsat slam virkede dog en anelse federe, mere klæge og mere "gummi-agtige" end referencebetonerne. Det var dog muligt med den sædvanlige udstøbnings- og vibreringssteknik at udstøbe et fejlfrit hul-dækelement på Modulbeton, hvorimod de hos Langeskov Beton udstøbte rør havde en lidt forøget mængde af blærer i oversiden (ydersiden).

6. UNDERSØGELSER AF DEN HÆRDEDE BETONS EGENSKABER

6.1 Trykstyrke og styrkeudvikling

6.1.1 Laboratorieforsøg

Beskrivelse

På alle 11 betoner er der udført målinger af 28-døgns trykstyrken og styrkeudviklingen.

Prøvningsmetode: DS 423.23. Betonprøvning. Hærdnet beton. Trykstyrke, 2. udgave.

Trykstyrker målt på betoner med og uden slamtilsætning. Slamtilsætning: 25 og 50 vægt% faststofandel i støbeandet (vandmængden fastholdt).

Betonerne er af de samme blandinger, som blev anvendt til undersøgelserne af den friske betons konsistens, hvorfor blandedproceduren er den samme som til disse.

Prøveudtagning: Til trykprøvning ved alle terminer er udstøbt 3 stk. ø 100 x 200 mm cylindre af hver betonblanding. Prøvetidspunkterne er 1, (2), 3, 7, (14) og 28 døgn efter udstøbningen. Cylindrene blev udstøbt i 4-5 lag, hvert lag komprimeret med et 8 kg's komprimeringslod, sidste lag dog med et 8 kg's glittelod.

Resultater

Styrkeudvikling og 28 døgns trykstyrke:

Beton	Prøvningstermin (døgn)					
	1	2	3	7	14	28
	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
A-0	16,1	24,4	26,5	33,5	39,1	37,6
A-25	25,9	33,0	35,1	39,2	42,9	45,1
A-50	27,3					49,2
B-0	26,3	35,6	41,5	49,5	56,0	59,7
B-25	43,7	52,9	55,3	60,0	63,8	71,2
B-25/II	38,8		51,0	54,3		72,0
B-25/III	34,3		47,8	55,8		65,3
B-25/IV	30,3		43,4	50,7		57,1
C-0	27,6	37,2	43,2	52,2	62,8	72,7
C-25	31,0	38,8	29,2	52,2	56,7	51,9
C-25/II	21,2		34,9	44,0		62,2

Enkelte cylindre af beton A-50, B-25 og C-25 gav signifikant lavere styrker end de øvrige cylindre, hvilket kunne henføres til markant lavere densiteter som følge af en ufuldstændig komprimering. Disse cylindre indgår ikke i ovennævnte resultater.

Vurdering

Betonens trykstyrke øges signifikant ved alle terminer med tilsætning af slam med en faststofandel svarende til 25 og 50 vægt% af støbevandet.

Virksomheden aftager med reduktion af cementindhold og betontemperatur samt ved anvendelse af slam fra Modulbeton i stedet for kunstigt slam.

For betontype B er der, med 25 vægt% slam fra Modulbeton en cementreduktion på en tilsvarende mængde samt en reduktion af betontemperaturen på ca. 10°C, opnået en styrkeudvikling lig med styrkeudviklingen for den ikke slamtilsatte referencebeton.

For betontype C kan der ikke konstateres nogen signifikant effekt af slamtilsætningen på trykstyrken og styrkeudviklingen.

6.2 Bøjningstrækstyrke

6.2.1 Laboratorieforsøg

På de 7 betoner fra de indledende laboratorieforsøg er der udført måling af bøjningstrækstyrken.

Prøvningsmetode: TI-B 27 (83). Bøjningstræk/trykstyrke af mørtelprismer.

Bøjningstrækstyrke målt på cementmørtel med og uden slamtilsætning.

Slamtilsætning: 25 og 50 vægt% faststofandel i støbeblandingen (vandmængden fastholdt).

Mørtlerne er af de samme blandinger, som blev anvendt til undersøgelserne af den friske mørtels afbindingstid, hvorfor blandedproceduren er den samme som til disse.

Der er udstøbt 3 mørtelprismer af hver beton. Støbning og prøvning i henhold til TI-B 27 (83). Mørtelprismer A-50 er håndstampede.

Efterbehandling af prøveemner: Afdækket i form i 1 døgn ved ca. 20°C og lagret i vandbad ved 20°C i 27 døgn.

Resultater

Bøjningstrækstyrke efter 28 døgn:

Beton	Bøjnings- trækstyrke (MPa)	Beton	Bøjnings- trækstyrke (MPa)	Beton	Bøjnings- trækstyrke (MPa)
A-0	7,2	B-0	7,6	C-0	10,1
A-25	7,4	B-25	9,2	C-25	8,7
A-50	6,0				

Vurdering

Resultaterne af bøjningstrækstyrke-forsøgene udviser ikke en entydig tendens.

At bøjningstrækstyrkerne synes at mindskes med slamtilsætningen for betontyperne A og C, mens de synes at øges for betontype B, kan skyldes, at mørtlen af type B havde langt bedre flydeegenskaber end mørtlerne og typerne A og C, der var vanskelige at komprimere.

De reducerede bøjningstrækstyrker for betontyperne A og C tilsat slam kan således skyldes ufuldstændig komprimering.

6.3 Svind

6.3.1 Laboratorieforsøg

Beskrivelse

På de 7 borekerner fra de indledende laboratorieforsøg er der udført måling af mørteldelens svind.

Prøvningsmetode: TI-B 26 (86). Hærdnet mørtel. Svind.

Svind målt på cementmørtel med og uden slamtilsætning.

Slamtilsætning: 25 og 50 vægt% faststofandel i støbeandet (vandmængden fastholdt).

Mørtlerne er af de samme blandinger, som blev anvendt til undersøgelserne af den friske mørtels afbindingstid, hvorfor blandeproceduren er den samme som til disse.

Støbning af prøveemner i henhold til TI-B 26 (86). Mørtelprismer A-50 er håndstampede.

Efterbehandling af prøveemner: Afdækket i form i 1 døgn ved ca. 20°C, lagret i vandbad i 27-28 døgn og i ca. 50% RF og ca. 20°C i 156 døgn.

Resultat

Svind efter 84 døgn/184 døgn:

Beton	Svind (o/oo)	Beton	Svind (o/oo)	Beton	Svind (o/oo)
A-0	0,63/0,81	B-0	0,87/1,20	C-0	0,54/0,65
A-25	0,79/1,02	B-25	0,80/1,22	C-25	0,55/0,80
A-50	0,72/1,06				

Vurdering

Slamtilsætningen har øget især langtidssvindet af betontyperne A og C, hvorimod der ikke kan konstateres nogen indvirkning på betontype B, hvis mørteldel har de bedste flydeegenskaber.

6.4 Luftindhold

6.4.1 Laboratorieforsøg

Beskrivelse

På de 7 betoner fra de indledende laboratorieforsøg er der udført måling af den hærdede betons luftindhold.

Målingerne er blevet udført på cylindre komprimeret med 8 kg's komprimeringslod til støtte for de noget usikre (grundet vanskelig komprimering) luftindholdsmålinger på den friske beton. Kun betontype B er luftindblandet.

Prøvningsmetode: TI-B 4. Luftporemåling i hærnet beton.

Luftporemåling på beton med og uden slamtilsætning.

Slamtilsætning: 25 og 50 vægt% faststofandel i støbeblandet (vandmængden fastholdt).

Betonerne er af de samme blandinger, som blev anvendt til undersøgelse af den friske betons konsistens, hvorfor blandeproceduren er den samme som til disse.

Prøveudtagning: Til prøvning af luftindhold (og mikrostruktur) er der udstøbt 1 cylinder af hver betonblanding. Cylinderen er komprimeret ved anvendelse af 8 kg's komprimerings- og glittelodder.

Resultat

Total luftindhold:

Beton	Total luft %	Beton	Total luft %	Beton	Total luft %
A-0	4,0	B-0	2,7	C-0	1,1
A-25	1,7	B-25	1,2	C-25	2,0
A-50	11,7				

Luftindhold og porefordeling:

Beton	Total luft %	Luft % i porer > 2 mm	Spec. overfl. mm ⁻¹	Afstands- faktor mm
B-0	2,7	0,6	31	0,21
B-25	1,2	0,1	26	0,35

Vurdering

Generelt er luftindholdene målt på den hærdede beton lavere end luftindholdet målt på den friske beton.

Tendensen er dog den samme, idet luftindholdet mindskes med slamtilsætningen (betontype C og den ukomprimerbare beton A-50 dog undtaget). Ligeledes forringes luftporesystemet i den luftindblandede betontype B.

6.5 Strukturanalyse

6.5.1 Laboratorieforsøg

Beskrivelse

Til en vurdering af slamtilsætningens betydning på betonens mikrostruktur er der fremstillet tyndslib fra de 7 betoner fra de indledende laboratorieforsøg.

Strukturanalysen udføres på tyndslib, der fremstilles af udsavede, fluorescensimprægnerede betonstykker, og som analyseres i polarisations- og fluorescensmikroskop. Et

tyndslib dækker et areal på ca. 30 x 45 mm. Tyndslibene er fremstillet af betonerne ca. 14 døgn efter udstøbningen.

Prøvningsmetode: TI-B 5 (87). Strukturanalyse i forbindelse med kvalitetskontrol.

Strukturanalyse på beton med og uden slamtilsætning.

Slamtilsætning: 25 og 50 vægt% faststofandel i støbe vandet (vandmængden fastholdt).

Betonerne er af de samme blandinger, som blev anvendt til undersøgelse af den friske betons konsistens, hvorfor blande proceduren er den samme som for disse.

Prøveudtagning: Til strukturanalyse (og luftporestruktur) er der udstøbt 1 cylinder af hver betonblanding. Cylinderen er komprimeret ved anvendelse af 8 kg's komprimerings- og glittelodder.

Resultater

Betontype A

Betontilslaget er tætpakket, hvorfor betonen har et lavt pastavolumen. Mikrostrukturen er pæn med enkelte luftindslutninger. Der ses uhydratiseret cement og flyveaske. Normal $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -struktur.

I betonen med en slamtilsætning på 25 vægt% faststofandel i støbe vandet kunne der konstateres lidt flere mikrorevner, og v/c forholdet blev vurderet til at være en anelse højere. Betonen kunne ligne en varmhærdet beton, idet $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -strukturen er væsentligt ændret med meget mindre krystaller.

Der ses endvidere store (aflange plader - formentlig dog nok "diskos-formede") $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -krystaller i pastaen. Disse krystaller er tilsat betonen inden afbindingen (det vil sige tilsat blandingen).

Betonen med en slamtilsætning på 50 vægt% faststofandel i støbe vandet har helt tydeligt ikke været komprimerbar.

I vandfyldte, tidligere luftfyldte porer ses grove $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -krystaller. Endvidere ses der sekundær (omkrySTALLISERET) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ i et helt usædvanligt omfang for så ung en beton, hvilket underbygger at der tidligere har optrådt mange, små ustabile (iblandede) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -krystaller.

Pastaen ser i øvrigt rimeligt normal ud. Eneste "problem" synes at være bearbejdigheden.

Betontype B

Betonen er mere pastarig end betontype A. Der ses normalt udfældet Ca(OH)_2 samt indblandet luft. Der ses spor efter flyveaske.

Betonen med en slamtilsætning på 25 vægt% faststofandel i støbe vandet er mere finkornet med hensyn til de Ca(OH)_2 -krystaller, der er dannet i pastaen.

I pastaen ses endvidere større (iblandede) Ca(OH)_2 -krystaller. Der findes ikke vandfyldte porer i pastaen, hvorfor der ikke findes grove Ca(OH)_2 -krystaller heri.

Betontype C

Der ses ingen Ca(OH)_2 -krystaller eller alkalier i pastaen (på grund af silica-tilsætningen). Der er meget flyveaske. Der ses lidt luftindslutninger, tydende på komprimeringsproblemer.

I betonen med en slamtilsætning på 25 vægt% faststofandel i støbe vandet er komprimeringsproblemerne tydeligere. Her ses heller ingen normalt udfældede Ca(OH)_2 -krystaller, hvorimod der ses rester af store (iblandede) Ca(OH)_2 -krystaller.

Der findes ikke vandfyldte porer i pastaen, hvorfor der ikke findes grove Ca(OH)_2 -krystaller heri.

Vurdering

Slamtilsætningen vurderes ikke at have en skadelig effekt på betonens mikrostruktur.

Der sker dog en ændring af Ca(OH)_2 -strukturen, idet krystalstørrelsen for de normalt udfældede krystaller mindskes, hvilket indikerer, at slamtilsætningen er kimdannende (dermed accelereres også afbindingen). Endvidere kan der spores store, iblandede Ca(OH)_2 -krystaller. Krystaller af denne størrelse vil ikke omkrystallisere ved tilsætning til frisk beton.

6.6 Tæthedsprøvning

6.6.1 Fuldskalaprovning, Langeskov Beton

Beskrivelse

På de seks udstøbte \varnothing 50 x 225 cm rør blev der udført undersøgelse af tætheden overfor vand.

Observation af fugtgennemsivning på rør støbt af beton med og uden slamtilsætning.

Rørene placeres på et gummiunderlag på spidsenden.

Rørene fyldes med vand; såfremt der sker fald i vandstanden, suppleres med yderligere vandtilsætning. Utætheder vurderes visuelt efter min. 2 timer.

Resultat

<u>Rør nr.</u>	<u>Observation</u>
1	Ingen fugtpletter
2	Ingen fugtpletter
3	Ingen fugtpletter
4	Ingen fugtpletter
5	To fugtpletter samt et lille område med få dråbedannelser
6	Vandgennemsivning gennem 8 huller ved spidsenden. Ingen fugtpletter på rørstammen.

Vurdering

Alle rør vurderes at være tætte. Vandgennemsivningen ved spidsenden af rør nr. 6 skyldes en produktionsfejl, hvorved spidsen er blevet drejet af.

6.7 Krakelering og kulør

6.7.1 Laboratorieforsøg

Beskrivelse

På de 7 betoner fra de indledende laboratorieforsøg er mørteldelens krakeleringstendens og kulør undersøgt.

Prøvningsmetode: TI-B 27 (83). Bøjningstræk/trykstyrke.

Prøvningsmetode: TI-B 26 (86). Hærdnet mørtel. Svind.

Observation af krakeleringstendens på prizmer støbt af cementmørtel med og uden slamtilsætning.

Slamtilsætning: 25 og 50 vægt% faststofandel i støbeblandingen (vandmængden fastholdt).

Mørtelprismerne er de samme, som blev anvendt til undersøgelserne af den friske betons svind, hvorfor blande- og udstøbningsproceduren er den samme som for disse.

Efterbehandling af prøveemner: Afdækket i form i 1 døgn ved ca 20°C, lagret i vandbad 27-28 døgn og i ca. 50% RF og ca. 20°C i 156 døgn.

Prøvning: Visuel observation af omfang af krakelering samt kulør på mørtelprismernes overflade.

Resultat

På ingen af mørtelprismerne kunne der konstateres krakelering.

På prizmerne med slamtilsætning synes der at være en ganske svag mørk-toning i forhold til prizmerne uden slamtilsætning. Mørk-toningen kan ikke observeres på betontype C (der indeholder silica).

Vurdering

Slamtilsætningen vurderes ikke at forøge betonens krakeleringstendens, hvorimod der kan forventes en ubetydelig mørk-toning af lyse betontyper.

7. SAMMENFATNING OG DISKUSSION

Undersøgelsen over hvilken betydning, anvendelse af støbevand med op til 50 vægt% faststofandel på såvel frisk som hærdet element- og betonvarebetons egenskaber, har omfattet en række prøvninger af forskellige egenskaber.

Der er gennemført prøveserier med tre stive betoner med og uden slamtilsætning. Slamtilsætningen har været 25 vægt% faststofandel i støbevandet (vandmængden fastholdt) samt i et enkelt tilfælde 50 vægt%.

Selvom langt fra alle kombinationer af parametre er gennemprøvet, er der opnået et relativt sikkert vurderingsgrundlag for en række af de undersøgte egenskaber, primært

- den friske betons konsistens
- den friske betons bearbejdelighed
- den hærdede betons styrkeudvikling.

For de øvrige undersøgte egenskaber er der opnået en orienterende vurdering (tendens).

I modsætning til de tidligere gennemførte undersøgelser af slamtilsætningens (op til 14 vægt%) indvirkning på fabriksbeton (sætmål 80-160 mm), der blot påviste en målbar effekt på den friske betons sætmål og afbinding, har undersøgelserne her vist en indvirkning på en lang række andre egenskaber.

Den mest "ekstreme" af de undersøgte betontyper (betonvarebeton, lavt v/c og højt vebeta) adskiller sig dog fra de to øvrige betontyper ved, at effekten fra slamtilsætningen ikke er signifikant.

I de to øvrige betontyper (elementbetoner) bevirker slamtilsætningen en signifikant indvirkning på

- konsistens
- afbindingstid
- trykstyrke
- luftindhold.

Der kan endvidere spores en ikke skadelig ændring af Ca(OH)_2 -strukturen i pastaen (gælder for alle tre betontyper).

Slammets indvirkning på konsistensen kommer direkte til udtryk ved et markant forøget vebetal. Konsistensændringen er så stor, at betonerne kun vanskeligt kan komprimeres. Ved tilsætning af slam svarende til 50 vægt% faststofandel i støbe vandet er konsistensændringen så voldsom, at komprimering nærmest er umulig. Tilsyneladende kan der dog højst opnås en faststofandel på ca. 35 vægt% ved anvendelse af "naturligt" slam.

Bearbejdigheden ændres ligeledes markant, udtrykt ved en væsentligt forkortet afbindingstid.

Slamtilsætningen forårsager en væsentlig forhøjelse af betonens trykstyrke, især ved de tidlige styrker. 28-døgns trykstyrken er dog også signifikant højere end for den tilsvarende beton uden slamtilsætning. Normalt vil en accelleret styrkeudvikling forårsage lavere 28-døgnsstyrke.

Luftindholdet synes at falde med slamtilsætningen ligesom poresystemet forringes.

Den forøgede trykstyrke vurderes at kunne henføres til en pulvereffekt fra det tilsatte slam, hvilket betyder samme bindemiddeleffekt ved en lavere hydratiseringsgrad.

Den accellererede afbinding kan formentlig henføres til en tilførsel af små, kimdannende $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -krystaller fra slammet, som hurtigt omkrystalliseres. Der kan formentlig kun kompenseres herfor ved tilsætning af retarder.

Det er ikke muligt ud fra de foretagne undersøgelser at afgøre om den forøgede indvirkning af slamtilsætningen i forhold til undersøgelsen af fabriksbetonerne skyldes den højere slamkoncentration og/eller de mere "ekstreme" (stivere) betontyper.

En justering af betonblandingerne med en reduktion af cementindholdet svarende til mængden af faststofandelen i støbe vandet med en tilhørende reduktion af betontemperaturen på godt 10°C giver et styrkeudviklingsforløb helt svarende til en beton uden slam, hvis der samtidig anvendes "naturligt" slam.

Reduktion af cementindhold og betontemperatur mindsker også effekten af slamtilsætningen, hvilket på vebetallet og afbindingstiden. Begge egenskaber er dog stadig henholdsvis fordoblede og halverede. Den forkortede afbindingstid er ikke nødvendigvis kritisk, hvorimod konsistensændringen stadig er i overkanten med de eksisterende komprimeringsmetoder.

En større andel af sand i slammet vil muligvis kunne have en gavnlig effekt på konsistensen. Det anvendte slam fra Modulbeton indsamles fra et bundfældningskar, der fyldes med materiale fra flere slambassiner. Slammets sandindhold er meget lille (< 1 vol.-%) og vil måske være større i et genindvindingsanlæg.

Fuldskalaforsøgene viser, at en justering af betonerne til det givne konsistenskrav gør det nødvendigt at øge vandmængden i betonen, hvilket reducerer betonens styrke. Med denne justering er det muligt at udstøbe betonelementer og betonvarer af god kvalitet.

Såfremt konsistensen af betonerne tilsat slam kan optimeres med plastificerende eller retarderende tilsætningsstoffer, vurderes det at være muligt at fremstille betonelementer og betonvarer med en faststofandel på 25 vægt% i støbevandet med en samtidig cementbesparelse i størrelsesorden 10%.

8. OVERVEJELSER OMKRING GENBRUGSSLAMS INDFLYDELSE PÅ BETONS STYRKEUDVIKLING

8.1 Indledning

Ved tilsætning af genbrugsslam til beton observerer man både i praksis og ved laboratorieforsøg, at slammet påvirker afbindingen af betonen og betonens styrkeudvikling. Effekten ses både med kunstigt slam fremstillet ved hydratisering af cement i laboratoriet og ved genbrugsslam fra betonproduktion.

Teoretisk set kan i hvert fald tre forskellige effekter påvirke hydratiseringsforløbet for cementen i betonen ved anvendelse af genbrugsslam:

1. Hydratisering af cementrester i slammet.
2. Kemisk acceleration af hydratiseringsprocessen.
3. "Fillereffekt".

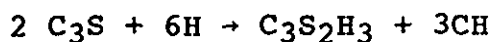
I det følgende behandles disse effekter enkeltvis.

8.2 Cementrester i slammet

Hvis der forekom cementrester i slammet ville en videre hydratisering af disse i den nye beton kunne bidrage til styrkeudviklingen. Det har imidlertid ikke været muligt at påvise væsentlige mængder af cementklinkemineraler i hverken den kunstige slam eller i slammet fra Modulbeton.

Røntgendiffraktion viser, at slammets krystallinske del består af calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$. I slammet fra Modulbeton må det antages, at der findes calciumsilikathydrat, som sammen med calciumhydroxid er det normale reaktionspunkt ved cementhydratisering.

Skematisk kan processen beskrives:

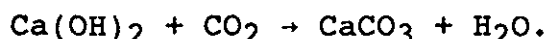


alit + vand \rightarrow calciumsilikathydrat + calciumhydroxid

idet C = CaO , s = SiO_2 , H = H_2O .

En mikroskopisk undersøgelse af tyndslib af kunstigt slam og slam fra Modulbeton bekræfter, at der ikke er cement til stede i slammet i en sådan mængde, at det ville kunne påvirke styrkeudviklingen. Calciumhydroxid forekommer som pladeformede krystaller af varierende størrelse. Calcium-

carbonaten er dannet ved karbonatisering af calciumhydroxid ved reaktion med luftens kuldioxid:



Vurdering

Undersøgelserne viser, at der ikke er cementrester i slammet, som betinger dets opførsel ved gebrug.

8.3 Kemisk acceleration af hydratiseringen

Tilstedeværelsen af calciumhydroxid i slammet kan have en kemisk effekt på betonen ved genbrug. Det er kendt, at de fleste accelerators består af letopløselige calciumsalte. Der er ikke i litteraturen fuld enighed om mekanismen ved denne acceleration, men det er sandsynligt, at den hænger sammen med, at der hurtigere opstår en overmætning af calciumhydroxid i betonens porevæske, når der er en ekstra calciumkilde foruden cementen selv. Når overmætningen når en passende størrelse, dannes der krystalkim af calciumhydroxid, som derefter vokser under forbrug af calciumioner fra porevæsken. Efter dette tidspunkt falder calciumionkoncentrationen ned til mætningspunktet bestemt af calciumhydroxids opløselighedsprodukt:

$$[\text{Ca}^{++}] [\text{OH}^-]_2 = \text{konstant}.$$

(Calciumionkoncentrationen ganget med hydroxylionkoncentrationen i anden potens er konstant).

Erfaringsmæssigt medfører dette fald i calciumionkoncentrationen, at hydratiseringsprocessen tager fart efter en hvileperiode. Cementen binder af, og betonen udvikler styrke. Det er derfor forståeligt, at calciumhydroxidkrystaller i genbrugsslammet kan påvirke betonens afbinding og tidlige styrkeudvikling.

Man må forvente, at de små krystaller går delvis i opløsning under blandeprocessen, hvorved porevæsken hurtigt når mætningspunktet. Når cementen derefter hydratiserer under frigørelse af calciumhydroxid i opløsning, så virker de ikke opløste calciumhydroxidkrystaller som kim, der vokser. Derved udfældes den til stadighed dannede calciumhydroxid som fast krystallinsk calciumhydroxid. Eksperimenter på Betonforskningslaboratoriet, Karlstrup, i begyndelsen af 70'erne med tilsætning af krystallin calciumhydroxid til cement og efterfølgende hydratisering i et mikrokalorimeter underbygger denne hypotese.

Tyndslibsmikroskopi på betonprøver fremstillet med enten kunstigt slam eller slam fra Modulbeton bekræfter ligeledes hypotesen.

Sammenlignet med referencebeton uden slamtilsætning er calciumhydroxidkrystallerne i cementpastaen meget mindre, og der er flere af dem. Cementpastaen ligner derved mere en varmhærdet beton end en beton hærdet ved rumtemperatur.

I en prøve med ekstra høj slamdosering (A·50) fandtes desuden en usædvanlig mængde grove calciumhydroxidkrystaller i tidligere luftfyldte porer. Porerne må være blevet vandfyldte under vandlagringen og små calciumhydroxidkrystaller er via opløsning omkrystalliseret til store krystaller, hvor der er plads, det vil sige i store porer. Små krystaller har nemlig større opløselighed end store krystaller på grund af forskel i overfladeenergi. I denne prøve, såvel som i de andre prøver med genbrugsslam, sås desuden grove krystaller af calciumhydroxid i selve cementpastaen. Disse krystaller er primære krystaller, som stammer fra slammet.

Vurdering

Det er sandsynligt, at det er tilstedeværelsen af krystallinsk calciumhydroxid i genbrugsslammet, som giver en accelereret afbinding og en forøgelse af de tidlige styrker.

8.4 Filler-effekt

Det er en næsten universel gyldig observation, at hvis man øger den tidlige styrke af en beton ved accelereret hærdning, så får man en lavere slutstyrke, end man havde fået ved en normalhærdning. Dette ses f.eks. ved varmhærdning og ved anvendelse af calciumchlorid accelerator. Det er derfor meget overraskende, at anvendelsen af genbrugsslam både accelererer afbindingen og hæver de tidlige styrker, samtidig med at 28 døgns styrken også stiger!

Effekten ses både ved anvendelse af kunstigt slam og slam fra Modulbeton.

Effekten kan ikke forklares ved videre hydratisering af cement i slammet, da det er stort set færdighydratiseret inden genanvendelsen. Den kemiske effekt af calciumhydroxid kan næppe heller tages til indtægt for de høje 28 døgns styrker.

Det er imidlertid kendt fra litteraturen, at et finkornet inaktivt materiale kan have en positiv virkning på styrken, selvom det ikke deltager aktivt i den kemiske reaktion.

Det kan kaldes en fillereffekt.

Cementfabrikkerne i Europa udnytter dette ved at tilsætte f.eks. finformalet kalk til cementen, hvorved man får et billigere produkt, men med uændrede styrkeegenskaber. Der kan tilsættes op til 5%, uden at det deklarereres.

Man kan forestille sig, at de fine partikler virker som kim for udfældning af calciumsilikathydrat, som er det primære bindemiddel i betonen. Derved ændres den rumlige fordeling af bindemidlet i betonen, hvilket kan give en styrkefordel uden at porøsiteten ændres. Billedligt talt kan fillerkornene virke som bro piller, der gør det lettere for bindemidlet at slå bro fra ét cementkorn til et andet. Man må forvente, at fillereffekten også påvirker de tidlige styrker i en positiv retning.

Genbrugsslammets indhold af calciumsilikathydrat må være meget effektiv som filler, da det består af ultrafine partikler. Desuden har det den samme sammensætning og struktur som det bindemiddel, der dannes i betonen.

Det kan være vanskeligt eksperimentelt at skelne mellem fillereffekten og den kemiske effekt.

Vurdering

Tilstedeværelsen af fine partikler i genbrugsslammet hæver både de tidlige og de sene betonstyrker ved en fillereffekt.

9. LITTERATURLISTE

/1/ Preben Jensen og Bent Grelk: Genbrug af frisk betonspild. Projektrapport udført for Miljøstyrelsen. Teknologisk Institut, 1988.

Se i øvrigt litteraturlisten i ovennævnte.



