

Selvkompakterende beton - SCC

af Jacob Thrysoe og Thorkild Rasmussen
Aalborg Portland A/S
Anette Berrig, Marianne Tange Hasholt og Claus Pade
Teknologisk Institut, Beton

Emneord: Beton, SCC, selvkompakterende, flydeegenskaber, rheologi, delmaterialer, proportionering, produktion, tilslag, kitmasse, målemetoder, udførelse



BETON-TEKNIK

Indledning

Selvkomprimerende beton, flydebeton, vibreringsfri eller vibrationslet beton – mange betegnelser har været knyttet til de meget letbearbejdlige betoner, som i de senere år har fundet større og større anvendelse i betonindustrien.

Hvilket navn der bedst beskriver disse betoner, kan der være mange meninger om, men selvkomprimerende beton – SCC (Self Compacting Concrete) er blevet den officielle betegnelse.

SCC definition:

Beton der uden mekanisk påvirkning kan udfylde en given form uden at separere.

Fælles for disse betoner er, at de i forhold til traditionel plastisk beton (sætmålsbeton) kræver meget lidt eller slet ingen bearbejdning i forbindelse med udstøbningen.

Fordelene ved selvkomprimerende

beton er mange, men fordelene for arbejdsmiljøet vil nok vise sig som den væsentligste. Vibrationer, rystelser og støj reduceres markant i forhold til traditionelle betonstøbninger. Herudover vil der som regel, i kraft af mindre lønomsparinger, kunne skabes god økonomi i at anvende selvkomprimerende beton, også selvom materialeprisen kan være lidt højere.

Endelig kan der også være eksempler på komplicerede forme og vanskelige støbeforhold, hvor udstøbning med traditionelle betoner ikke kan gennemføres med et tilfredsstillende resultat.

Ulemperne vil være knyttet til risikoen for separation, utilstrækkelig kompaktering og større krav til produktionsstyring.

Som ved al anden betonproduktion er det vigtigt, at betonens bearbejdighed og udstøbningsprocessen er tilpasset hinanden. Udstøbningsprocesserne for gulve, in situ støbte vægge og de mange varianter af betonelementer vil være for-

skellige og behovet for betonens bearbejdighed derfor også forskellig.

Beton med udbredelsesmål (DS 2426: 2004 Annex U) over ca. 550 mm vil typisk omtales som selvkomprimerende beton, medens den øvre grænse vil ligge omkring 700 - 750 mm afhængig af bl.a. stenstørrelse og anvendelse.

Mulighederne for at optimere betonens bearbejdighed vil være størst, hvis udstøbningsprocessen kan defineres og udføres med stor ensartethed, som fx i en betonelementproduktion.

Det er vanskeligere for fabriksbetonproducenterne at tilpasse betonen de små, men ikke altid ubetydelige forskelle, som forskellige entreprenører praktiserer under udstøbningen. Sammen med varierende transporttider medfører dette behov for mere robuste allround betoner, samt øget behov for dialog mellem betonproducent og entreprenør.

Ønsket om letbearbejdlige betoner er ikke nyt. Inden de plastificerende tilsætningsstoffer for alvor fik deres udbre-



Figur 1. Udstøbning af fundament med selvkomprimerende beton, også kaldet SCC. Brug af vibrationsudstyr er ikke nødvendigt for at placere betonen korrekt, hvorfor både støj og tid brugt på selve udstøbningsopgaven kan reduceres i forhold til, hvis der var brugt konventionel sætmålsbeton.

delse i 1970'erne, var vand sammen med optimering af kornkurver og pakning eneste mulighed for at forbedre betonernes bearbejdelighed. Idet alt for høje vandindhold af flere årsager er uønsket, havde dette sine begrænsninger.

De traditionelle lignin-baserede plastificeringsstoffer ændrede kun lidt ved dette, og først da superplastificeringsstofferne kom på markedet i slutningen af 1970'erne, blev der mulighed for at fremstille flydebeton, som det hed dengang, uden samtidig at benytte meget høje vandindhold.

Superplastificeringsstofferne havde ekstremt gode dispergeringsevner. Konsekvensen var ofte meget følsomme betoner med stor risiko for separation. Kun for særlige materialer, som fx Densit®, var det muligt at fremstille robuste flydebetoner. Flydebeton blev derfor aldrig den store succes.

De nyere generationer af tilsætningsstoffer har superplastificeringsstof-

fernes gode dispergeringsevne, men kombinerer dette med stabiliserende virkninger på de opslæmninger af partikler, som en beton består af.

Det betyder ikke, at alle flydebetonens problemer er væk, men det har gjort det væsentligt lettere for betonproducenterne at balancere i det område, hvor resultatet bliver godt.

Udviklingen vil uden tvivl fortsætte, og vi kan i fremtiden forvente endnu bedre tilsætningsstoffer med henblik på fremstilling af robuste, selvkompakterende betoner. Herudover kan vi sikkert også forvente, at nye hjælpestoffer udvikles eller videreudvikles i form af kemiske tilsætningsstoffer, fillermaterialer o.l.

På fabriksbetonområdet er det primært på områderne gulve, belægninger, bunde o.l., at SCC har fået sin største udbredelse.

På betonelementområdet er anvendelsesområdet for SCC også vandrette støbninger som vægge o.l., men herudover har SCC også vundet stor udbre-

delse ved støbning af bjælker, søjler, tagplader o.l.

Denne publikation beskriver hovedsageligt materialevalg, sammensætning, produktion og udførelse med SCC. Egenskaberne af den hærdnede SCC er ikke behandlet.

Publikationen er udarbejdet i forbindelse med det danske innovationskonsortie »SCC Konsortiet«.



Figur 2. Ved brug af SCC er det muligt at lave konstruktioner med udførelsesmæssigt udfordrende tværsnit af høj kvalitet. SCC kan herved bidrage med et forbedret image og en øget konkurrenceevne for beton generelt set i forhold til andre byggematerialer. På billedet er vist opførelsen af en ny tilbygning til Ordrupgaard-museet i Charlottenlund, tegnet af den irakisk-britiske arkitekt Zaha Hadid, 2004. Den anvendte SCC er tilsat sort farvepigment. [Kilde: E. Pihl & Søn A/S].

Betons flydeegenskaber

Når man tilsætter cement eller andre fine partikler til vand, får man en opslæmning, hvis flydeegenskaber er en funktion af vandets rheologiske parametre og af partiklernes finhed og pakning. Et materiales rheologiske egenskaber beskrives ved hhv. flydespænding og viskositet, hvor flydespændingen beskriver hvor stift materialet er og viskositeten beskriver hvor tykflydende materialet er. I tabel 1 er viskositeten for udvalgte materialer vist.

Materiale	Viskositet [Pa·s]
Vand, 20 °C	0,001002
Linolie, 30 °C	0,0331
Olivenolie, 20 °C	0,084
Motorolie SAE30, 20 °C	0,2
Glycerin, 20 °C	1,49
Sirup, 20 °C	2,5
Honning, 25 °C	2-14
Ketchup, 20 °C	50
Jordnøddesmør, 20 °C	250
Vindueskit, 20 °C	100.000

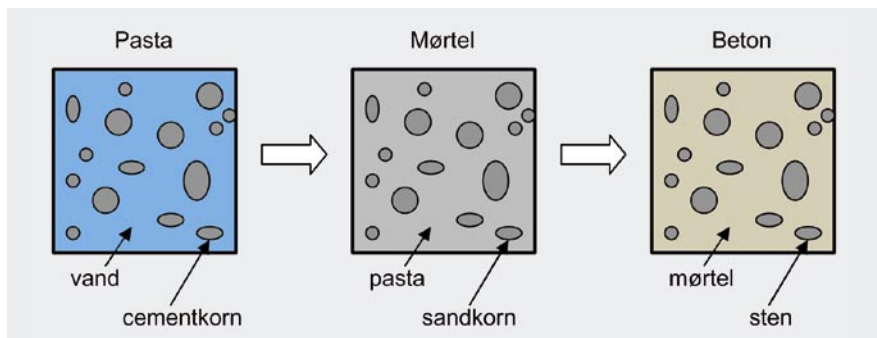
Tabel 1. Viskositet for udvalgte materialer.

Når man tilsætter sand (fint tilslag under 4 mm) til cementpastaen, får man en mørtel, som man kan betragte som en ny opslæmning, hvor væsken nu består af pasta. Mørtlen har igen andre rheologiske egenskaber end pastaen. Endelig kan man tilsætte sten (groft tilslag over 4 mm) til mørtelen og få endnu en ny opslæmning – beton – med et tredje sæt af rheologiske egenskaber, se figur 3.

Betons flydeegenskaber hidrører således dels fra stenene, dels fra mørtelen, der igen afhænger af flere forskellige parametre. Det er derfor en forholdsvis kompleks sag at modellere flydeegenskaber for den friske beton. Betons rheologi er forklaret mere uddybende på modstående side.

SCCs særlige flydeegenskaber

Traditionel beton er kendetegnet ved en relativ høj flydespænding. Vibring af den traditionelle beton har netop til formål at overvinde flydespændingen og derigennem få betonen korrekt udstøbt i formen.



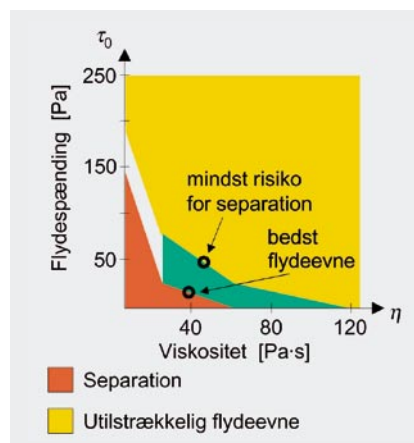
Figur 3. Tre forskellige målestokke med tre forskellige opslæmninger: cementpasta, mørtel og beton.

For at få beton til at flyde som SCC er det nødvendigt at reducere flydespændingen, så alene tyngden af betonens egenvægt er nok til at overvinde denne. Dette opnås ved at tilsætte et superplastificerende tilsætningsstof, der påvirker pastaens flydeegenskaber, så der samlet set opnås en lavere flydespænding for betonen. Figur 4 viser de rheologiske parametre, dvs. flydespænding og plastisk viskositet, for SCC i forhold til traditionel beton.

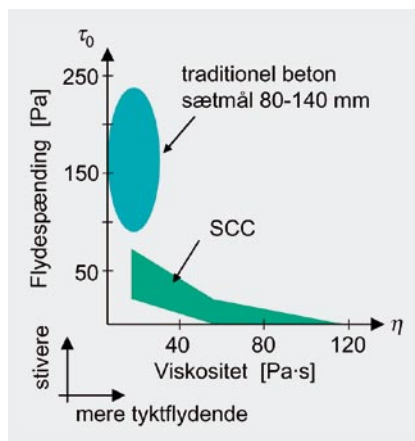
Som regel er stenes densitet større end mørtelens densitet. Det betyder, at tyngdekraften på den enkelte sten er større end opdriften. Der er således en resulterende kraft, der får stenen til at synke til bunds, så betonen separerer. I traditionel beton modvirkes separationen af, at den resulterende kraft på stenen ikke er tilstrækkelig til at overvinde mørtelens flydespænding, og når mørtlen ikke flyder, bliver stenen holdt oppe.

Denne mekanisme virker imidlertid ikke i samme grad i SCC, hvor flydespændingen er meget lavere. Det er på den ene side nødvendigt at sikre, at SCC er

mere tykflydende end traditionel beton, således at stenen synker så langsomt, at det i praksis er uden betydning; men SCC må på den anden side ikke blive så tykflydende, at den flyder dårligt under udstøbning, se figur 5.



Figur 5. Flydespænding versus plastisk viskositet. SCC ligger i et område mellem beton, der separerer og beton, der ikke flyder. Efter [1].



Figur 4. Rheologiske parametre for henholdsvis SCC og traditionel beton.

Når man sammensætter en SCC recept, skal man således indgå et kompromis mellem to modsatrettede hensyn, nemlig hensynet til risiko for separation og hensynet til at opnå gode flydeegenskaber. Dette er én af forklaringerne på, at produktion af SCC stiller større krav til produktionen end traditionel beton. Forskellen mellem vellykket SCC og kassabel SCC er mindre, og derfor er de tilladelige variationer i produktionen også mindre end ved produktion af traditionel beton.

Betons rheologi

Et materiales bearbejdelighed kan beskrives i kvalitative termer (god, dårlig, for blød, for stiv, etc.), afhængig af om den er passende til et bestemt formål. Ved sammenligning af flere forskellige materials bearbejdelighed anvendes rheologien, der er videnskaben om stoffers deformation og flydeegenskaber. I det følgende gennemgås teorien bag nogle af de rheologiske grundbegreber for at kunne beskrive, hvordan SCCs flydeegenskaber adskiller sig fra traditionel beton.

Newton'ske væsker

De simpleste modeller fås ved at antage idealiserede sammenhænge. Fra konstruktionslæren kendes fx de ideal-elastiske og de ideal-plastiske materialer. Mht. væsker refereres der ofte til et idealiseret materiale, nemlig den Newton'ske væske [10]. Den Newton'ske væske er usammentrykkelig, dvs. at rumfanget er konstant, men den kan ændre form, når den påvirkes af forskydningspændinger, se figur 6.

Den Newton'ske væske er kendetegnet ved, at selv uendeligt små forskydningspændinger fremkalder deformation, og deformationens udvikling fortsætter, så længe væskeelementet er belastet. Der er proportionalitet mellem belastningen og deformationshastigheden, som udtrykkes ved hastighedsgradienten over væskeelementet (se også figur 7):

$$\tau = \eta \frac{dv}{dx} \quad (1)$$

hvor:

- τ er forskydningspændingen
- η er væskens viskositet
- dv/dx er hastighedsgradienten over væskeelementet

Flydespænding: Den nødvendige spænding (kraft pr. arealenhed), der skal tilføres for at få betonen i bevægelse.

Viskositet: Et mål for den indre friktion under en accelereret bevægelse og dermed for hvor tykflydende betonen er.

Thixotropi: Gradvis fald i et materials viskositet som følge af en påført forskydningspænding, fulgt af en gradvis strukturel genopbygning, når spændingen fjernes.

Bingham-materialer

I mange tilfælde er de idealiserede materialemodeller tilstrækkelige til at kunne forklare observationer fra virkelighedens verden; fx vand.

Der findes dog også en del materialer, der ikke umiddelbart passer ind i én af de idealiserede kategorier. Frisk beton er et eksempel på sådan et materiale. Ved små belastninger, energitilførsel, deformeres betonen næsten ikke, mens den ved store belastninger nærmest flyder som en væske.

Binghams materialemodel kombinerer to ideale materialemodeller, nemlig modellen for en Newton'sk væske og et ideal-plastisk materiale. Sidstnævnte er et materiale, der først deformeres, når spændingen i materialet overskrider en bestemt kritisk værdi τ_0 (kaldet flydespændingen), hvorefter materialet flyder og deformeres uendeligt. Denne model anvendes normalt ved beskrivelse af betons flydeegenskaber.

Den matematiske formel for Binghams materialemodel ser således ud:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dx} + \tau_0 \quad (2)$$

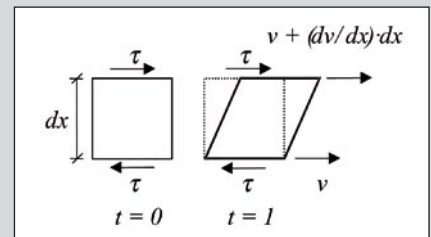
Formel (1) og (2) er illustreret i figur 7. Ved sammenligning af disse fremgår det, hvorledes Bingham-materialet adskiller sig fra en Newton'sk væske.

Bearbejdelighedsparametre

Når frisk beton betragtes som et Bingham-materiale, kan dets bearbejdelighed beskrives entydigt ved hjælp af flydespænding og viskositet. De to parametre bestemmes ved at udføre forsøg, så det er muligt at optegne en $(dv/dx, \tau)$ -kurve. Flydespændingen τ_0 svarer da til kurvens skæring med den lodrette τ -akse, mens viskositeten svarer til kurvens hældning.

Det er nødvendigt at bestemme mindst to punkter på $(dv/dx, \tau)$ -kurven, før kurven kan optegnes. Nogle gange ses betonens bearbejdelighed beskrevet ved den *tilsyneladende* viskositet. Den *tilsyneladende* viskositet η_t bestemmes ved at regne materialet som en Newton'sk væske ud fra et enkelt kendt punkt på $(dv/dx, \tau)$ -kurven, se figur 7.

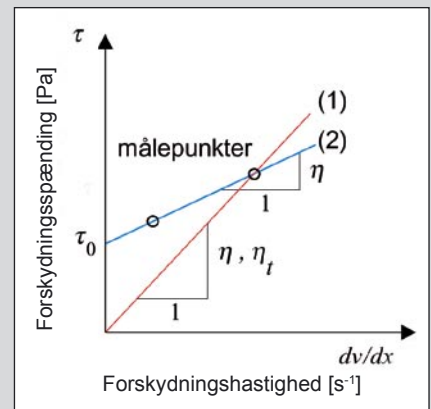
For et Bingham-materiale afhænger den *tilsyneladende* viskositet af den forskydningshastighed, den er målt ved. Den er derfor kun et retvisende mål for bearbejdeligheden, hvis den er bestemt



Figur 6. Væskeelement påvirket af forskydningspændinger. Forskydningspåvirkningen starter til tiden $t=0$. Spændingerne medfører, at væsken strømmer med større hastighed i den øverste del af elementet end i den nederste del. Lidt senere (til tiden $t=1$) er væskeelementet derfor blevet deformert.

ved en spænding, der svarer til de forhold, hvor materialet benyttes. For at kunne skelne viskositeten i Bingham-modellen fra den *tilsyneladende* viskositet, kaldes førstnævnte også for den *plastiske* viskositet.

På mange blandestationer registreres betonens bearbejdelighed ved en watt-metermåling, hvor effektforbruget ved en given blande-hastighed bestemmes. Denne fremgangsmåde svarer lidt til at bestemme den *tilsyneladende* viskositet, idet betonens bearbejdelighed her karakteriseres på baggrund af kun ét målepunkt. Dette forklarer også, hvorfor betontyper, hvor bearbejdeligheden opleves som vidt forskellige, kan have samme watt-metermåling. Det skyldes, at betonerne har forskellig viskositet og flydespænding, men lige præcis ved den valgte blande-hastighed har de ens forskydningspænding.



Figur 7. Sammenhæng mellem forskydningspænding og hastighedsgradient i hhv. en Newton'sk væske (1: ---) og i et Bingham-materiale (2: —).

Delmaterialer

Cement

Cementens kemiske sammensætning og finhed har betydning for egenskaberne af den friske SCC. Især spillet mellem cement og de anvendte plastificerende tilsætningsstoffer har betydning for de rheologiske egenskaber.

Det er især klinkermineralet C_3A samt vandopløseligt alkali og sulfat i cementen, som bevirker, at forskellige plastificeringsstoffer i en given beton giver forskellige flydeegenskaber. Tilsvarende vil cementens finhed (Blaine) have betydning for doseringen af plastificeringsstofferne.

I figur 8 er vist et eksempel på bearbejdigheden af cementpasta, baseret på tre kendte cementtyper, ved tilsætning af tre forskellige kommercielle superplastificerende tilsætningsstoffer ved forskellig dosering.

Som udgangspunkt kan alle typer Portland-cement anvendes til selvkomprimerende beton og valget skal derfor hovedsageligt foretages ud fra holdbarhedsmæssige, styrkemæssige og arkitektoniske krav til betonen. Meget grovkornede cementer vil udvise øget tendens til bleeding og separation, og de mest nærliggende typer vil således være **RAPID**[®] cement og **BASIS**[®] cement eller AALBORG WHITE[®], hvis man ønsker en hvid beton.

Mineralske tilsætninger

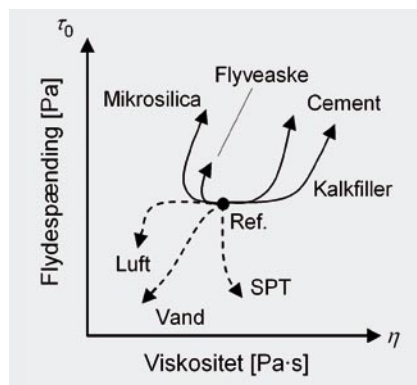
For at opnå en god stabilitet af kitmassen (pasta med luft) skal partikkelkoncentrationen være relativ høj (lavt v/c-forhold), og samtidig skal kitmassevolumenet være højt for at sikre tilslagets bevægelighed, så betonen kan flyde frit. Dette fører sædvanligvis til høje cementindhold, og mineralske tilsætninger (jvf. DS/EN 206-1) vil ofte være en billig substitution.

De i Danmark hyppigst anvendte mineralske tilsætninger til SCC er flyveaske og mikrosilica. Flyveaske er typisk af cementfinhed, men billigere end cement. Mikrosilica er specielt ved dens meget store finhed, men anvendt i moderate doseringer kan den forbedre betonens stabilitet. Andre fine materialer såsom kalkfiller og stenmel kan også anvendes.

Kitmassens sammensætning, herunder anvendelsen af mineralske tilsætninger, har stor indflydelse på de rheologiske parametre. Figur 9 viser, hvorledes de rheologiske parametre *principielt* ændres ved øget tilsætning af forskellige delmaterialer. De viste tendenser kan dog være anderledes afhængig af udgangspunktet for den aktuelle beton.

Flyveaske

Flyveaskens kugleformede partikler har en gunstig virkning på betonens flydeegenskaber.

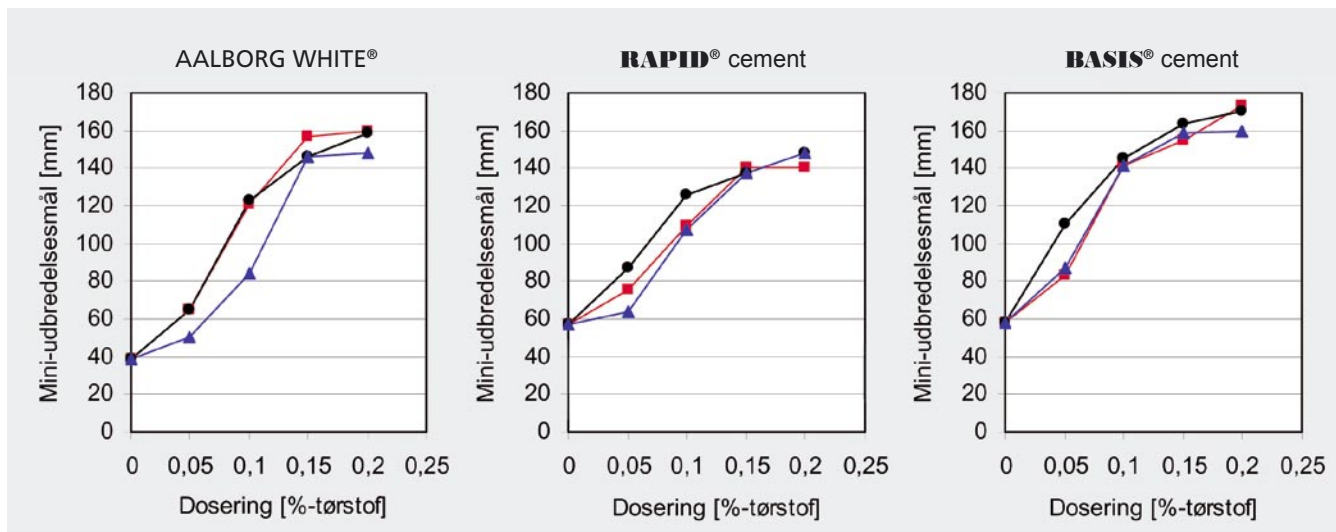


Figur 9. Principskitse af hvorledes mængden af cement og forskellige materialer ved tilsætning ændrer de rheologiske egenskaber af en given beton.

Tilsætning af flyveaske vil desuden indvirke på betonens afbindingstid og styrkeudvikling. Forholdet mellem cement og flyveaske kan benyttes til at regulere styrken, som for en SCC ellers kan blive unødvendig høj til mange formål.

Mikrosilica

Mikrosilica tilføjer en ny fraktion i relation til pakning, og sammenholdt med materialets gode styrkeegenskaber, vil det være muligt at lave meget stærk SCC med mikrosilica. Mikrosilica benyttes dog i mindre omfang end fx flyveaske.



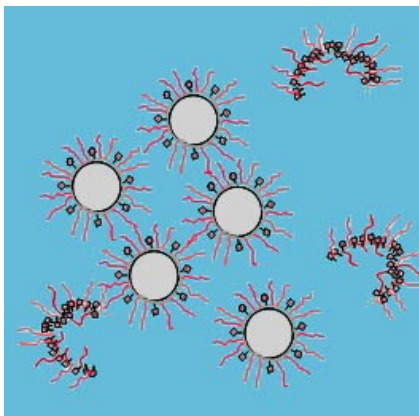
Figur 8. Indflydelse af tre forskellige kommercielle superplastificerende tilsætningsstoffer på flydeegenskaberne af tre danske cementtyper. De tre tilsætningsstoffer er alle baseret på polycarboxylat som aktiv komponent. Udbredelsesmålet (bestemt ved »mini-udbredelsesmål«) er bestemt 10 minutter efter blanding på cementpasta ved forskellig dosering af superplast. Undersøgelserne er foretaget ved EMPA (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt) i Zürich, Schweiz.

I forbindelse med gulve og udtørring kan mikrosilica have en negativ virkning. Hvis problemet derimod er bleeding eller instabilitet af kitmassen, fx ved anvendelse af grove cementer, eller sand uden finstof, kan mikrosilica reducere problemet. Mikrosilicaen virker her stabiliserende på SCC (mindre risiko for separation), idet mobiliteten af vand i den friske beton reduceres.

Mikrosilicaens kugleformede partikler virker smørende, men ved høje doseringer vil kitmassen blive klistrende og risikoen for plastiske svindrevner øges. Selvom mikrosilica er blevet relativt dyrt, kan der ligge en økonomisk gevinst i, at det virker stabiliserende på vandfasen mellem cement- og flyveaskepartiklerne. Partiklerne kan derfor pakkes lidt løsere (billigere), uden risiko for bleeding og separation af kitmassen.

Tilsætningsstoffer

Til selvkompakterende beton anvendes altid superplastificerende tilsætningsstof (SPT) samt i visse tilfælde også stabilisator, der er et viskositetsmodificerende tilsætningsstof, også kaldet VMA (Viscosity Modifying Agent). Desuden anvendes ofte luftindblandende tilsætningsstof. Luftindblanding har desuden en stabiliserende effekt og indvirker på betonens flydeegenskaber. I Danmark produceres SCC næsten uden undtagelse altid med luftindblandingsmiddel.



Figur 10. Principskitse for adsorption af modificerede polycarboxylater på cementpartikler. Cementpartiklerne frastøder hinanden pga. »steriske hindringer« når de adsorberede molekyler begynder at overlape hinanden.

Superplastificerende tilsætningsstoffer

Superplastificerende tilsætningsstoffer har været under konstant udvikling de senere år. Det har primært været deres indflydelse på betonens konsistenstab og afbinding samt på kitmassens stabilitet, der har været arbejdet med.

Produkterne er typisk opdelt i to grupper; den ene gruppe tilgodeser fabriksbetonproducentens ønske om langsomt konsistenstab under transport, medens den anden er tilpasset betonelementproducentens ønsker om hurtig afbinding og styrkeudvikling.

Entreprenørens ønske om hurtig afbinding efter endt udstøbning er også noget, der arbejdes med.

De superplastificerende tilsætningsstoffer, der i dag anvendes til selvkompakterende beton, er hovedsageligt, modificerede polycarboxylater.

Strukturen af de superplastificerende tilsætningsstoffer er bygget op omkring en polymer ryggrad, hvortil der er koblet forskellige funktionelle kæder, som giver molekylet den superplastificerende effekt. Populært sagt har det superplastificerende molekyle form som en kam, hvor tænderne er kulbrinte-sidekæder, der stikker ud fra molekylets ryggrad, se figur 10. Molekylet adsorberes på cement- eller fillerpartikler under blandingen af betonen.

Når cement-/fillerpartiklerne med de adsorberede molekyler på overfladen nærmer sig hinanden, sker der en frastødning imellem de enkelte partikler som følge af steriske hindringer, dvs. en fysisk hindring mellem de overlappende polymersidekæder. Rækkevidden af den dispergerende, steriske effekt hos moderne SPT er væsentligt længere, end den var for tidligere SPT-typer, hvilket resulterer i en mere stabil og længelevende plastificering. Ved at ændre på fx antallet og længden af molekylets sidekæder eller ved at blande to typer molekyler, kan der fremstilles SPT, som er særligt egnet eller designet til bestemte typer beton.

Generelt er de SPT-typer, der findes på det danske marked velegnede, men udviklingen vil ofte ske rykvis, og i perioder vil ét produkt derfor kunne være lidt foran de andre i udviklingen.

Stabilisatorer

Stabilisator/VMA tilsættes selvkompakterende beton for at modvirke tendens til separation (at tilslaget synker til

bunds i pastaen). VMA virker ved at tykne vandfasen, dvs. ved at øge viskositeten. Effekten skyldes, at VMA er i stand til at danne hydrogenbindinger, hvorved de fysisk binder vand til sig og sveller. Samtidig har VMA den egenskab, at effekten er størst, når betonen ikke er under kraftpåvirkning; dvs. når betonen er udstøbt. VMA anvendes ikke meget i Danmark p.t.

VMA består af polymerer, typisk af typerne Welan-gum, cellulose derivater, polyethylenoxider eller stivelse.

Luftindblandingsmidler

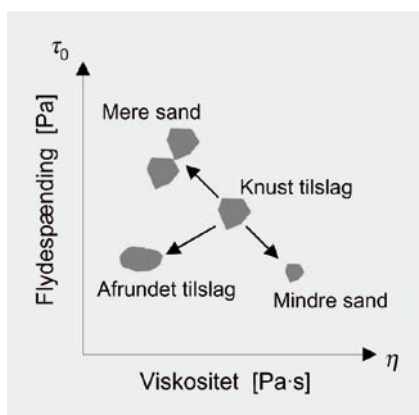
Luft udgør sammen med sandet det billigste fyldstof i betonen, og når der for SCC ofte er rigelig styrke, har luftindholdet i praksis ingen negativ betydning. Luftindblanding er derfor et naturligt valg og et indhold på 5 - 7 % vil som regel være passende.

Luftporernes størrelse ligger helt nede i fillerens og cementens partikelstørrelse, og i denne størrelsesorden er luftbobler ikke bløde og eftergivelige. De er forholdsvis stive, og har mere karakter af et kugleformet filler materiale.

For luftbobler i den rigtige størrelse, 10-300 µm, er opdrift ikke noget problem, og luften har dertil en stabiliserende virkning på pastaen i kraft af svage elektrokemiske bindinger mellem partikler og luftbobler.

Tilslagsmaterialer

Til SCC anvendes de samme tilslagsmaterialer som til konventionel beton. Såvel kornform som kornkurve har betydning for flydeegenskaberne af SCC. Afrundede korn giver både lavere flydespænding og lavere plastisk viskositet end kantede korn (knust materiale), se figur 11. Tilslagets pakningsegenskaber vil også afspejle kornform og kornkurve, og er en anden indgangsvinkel til vurdering af alternative tilslag, [9]. I sidste ende er det det sammensatte tilslag, som er afgørende for flydeegenskaberne, men det er især sandets kornkurve/paknings-egenskaber, som er vigtige - primært fordi sandet spænder over et større interval end stenfraktionerne. Dog kan indhold af evt. stenmel have betydning for stenedens egnethed.



Figur 11. Ved at erstatte knust tilslag med afrundet reduceres såvel flydespændingen som den plastiske viskositet. Ved at øge sandindholdet øges flydespændingen samtidigt med, at den plastiske viskositet reduceres; omvendt hvis sandindholdet reduceres.

Sten

Som for anden blødstøbt beton gælder, at afrundede sten bør foretrækkes frem for kantede og knuste sten, af hensyn til bearbejdeligheden.

Stenstørrelsen bør, som altid, vælges under hensyntagen til konstruktionen, armeringsforhold mm., men til de fleste formål vil en maks. stenstørrelse på 16 mm være passende i SCC. Kun i tilfælde af meget massive konstruktioner eller ukomplicerede støbninger bør stenstørrelsen øges.

Ved traditionel beton vil påvirkningen fra mekanisk vibrering øge mobiliteten af stenene ganske betragteligt, og ofte hindre eller nedbryde en evt. blokering, medens det for SCC skal ske alene ved tyngdekraftens hjælp.

Den nedadrettede kraft (inkl. opdrift) på en sten vil være proportional med stensens dimension i tredje potens, medens den stabiliserende kraft fra flydespænding og viskositet vil være proportional med dimensionen i anden potens. Risikoen for separation vil derfor øges med øget stenstørrelse.

Stenkvaliteten (materialeklassen) skal naturligtvis som minimum afspejle miljøklassen for konstruktionen, men især for gulve, som udsættes for slid, er det vigtigt at undgå lette korn i overfladen. For korn med densitet under 2100 - 2200 kg/m³ vil opdriften dominere, og der vil være tale om en opad rettet kraft.

Materialeklasse M vil i mange tilfælde være tilstrækkelig, men der er også eksempler på klasse M sten, hvor en del af de tilladte 5 vægt-% under 2400 kg/m³ er helt nede i dette densitetsområde. Dette kan imødegås ved at stille supplerende krav til indholdet af lette korn ≤ 2200 kg/m³, eller alternativt anvende klasse A sten til gulve udsat for slid.

Medens risikoen for opdrift øges med faldende korndensitet, vil risikoen for nedsynkning øges med stigende korndensitet. Eksempelvis vil den nedadrettede kraft (inkl. opdrift) på en sten af granit derfor typisk være 20 – 25 % større end på en tilsvarende flintesten. Dette modvirkes dog ofte af en ru og irregulær overflade, som medfører større modstand mod nedsynkning.

Sand

Som for sten gælder, at et afrundet sand bør foretrækkes, og samtidig vil en »flad« kornkurve være at foretrække. Mange sandmaterialer indeholder imidlertid stort set intet materiale over 2 mm, og i visse tilfælde kan det endog være begrænset til 1 mm.

For sådanne sandtyper er det især vigtigt, at tilslaget også indeholder en 4 - 8 mm fraktion. Forholdene i den fine ende af kornkurven er måske endnu vigtigere. De største partikler i cementen er omkring 50 µm, for flyveaske lidt større, og det er vigtigt for stabiliteten af kitmassen og mørtlen, at der ikke er et alt for stort spring op til de mindste sandkorn.

Sandet bør derfor indeholde en del materiale ≤ 0,250 mm og også en vis mængde ≤ 0,125 mm. Passende mængder skønnes at være 12 – 18 % ≤ 0,250 mm, hhv. 1 - 3 % ≤ 0,125 mm.

Hvis sandet mangler materiale i den fine ende, vil øget indhold af cement eller flyveaske (og dermed lavere v/c-forhold) kunne være en nødvendig løsning. For meget finstof i sandet vil medføre dårligere flydeegenskaber, og bør derfor undgås.

Sammensætning af SCC

Grundlæggende sammensættes SCC efter de samme principper, som man benytter ved proportionering af almindelig blødstøbt beton. Processen kan derfor helt traditionelt opdeles i to delprocesser:

- Sammensætning af tilslag
- Sammensætning af pastafasen og evt. luftindblanding

For SCCs vedkommende er der blot tale om beton med specielle krav til den friske beton, idet den på samme tid både skal være ekstremt letbearbejdelig og udvise stabilitet under transport og udstøbning.

Som tidligere nævnt er det yderst vanskeligt at modellere bearbejdeligheden af frisk beton. Derfor er det ikke muligt udelukkende på baggrund af teori at regne sig frem til sammensætning af en beton med bestemte flydeegenskaber. Ved at kombinere teori med mere erfaringsbaserede metoder, er det dog muligt at sammensætte en recept, der kun kræver mindre justeringer ved prøveblanding.

Der kan være flere metoder at sammensætte en beton på, især for tilslagets vedkommende. I det følgende er de to mest anvendte fremgangsmåder beskrevet; kornkurver og pakningsanalyser.

Sammensætning af tilslaget

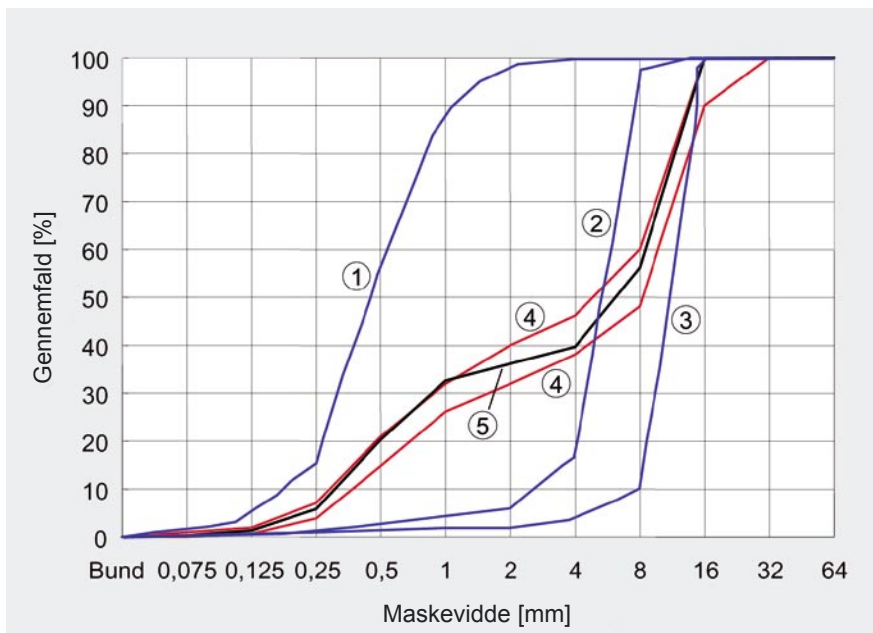
Materialevalget vil især for tilslagets vedkommende være geografisk – og i sidste ende – økonomisk betinget.

Sammensætning af tilslaget kan enten ske med udgangspunkt i tilslagenes kornkurver eller tilslagenes pakningsegenskaber, og ofte med fordel ved en kombination af begge metoder. Ofte vil de to metoder give næsten samme resultat. Pakningsanalysen kan dog i højere grad tage højde for materialeegenskaberne i det aktuelle tilfælde.

Anvendelse af kornkurver bygger primært på praktiske erfaringer, medens pakningsanalyserne er mere teoretisk funderet, se [9].

Kornkurverne har været helt dominerende hidtil, og erfaringsgrundlaget derfor større end for pakningsmetoden, som til gengæld har sin styrke i kraft af det teoretiske grundlag.

I det følgende er de to metoder til at sammensætte SCC anvendt på materialerne vist i tabel 2. Bakkesand (0-2



Figur 12. Vejledende område for kornkurve ved $d_{max} = 16$ mm.
 1. Bakkesand (0-2 mm), 2. Søsten (4-8 mm), 3. Søsten (8-16 mm),
 4. Grænse kornkurver og 5. S sammensat kornkurve. Se tabel 2.

Sigtestørrelse (mm)	Bakkesand 0-2 mm gennemfald (%)	Søsten 4-8 mm gennemfald (%)	Søsten 8-16 mm gennemfald (%)
32	100	100	100
16	100	100	100
8	100	97	10
4	100	17	4
2	98	5	2
1	88	4	2
0,5	55	3	1
0,25	15	1	1
0,125	4	0	0
0,063	1	0	0
Korndensitet (kg/m ³)	2626	2585	2616
Egenpakning (-)	0,66	0,68	0,63

Tabel 2. Tilslagsmaterialer benyttet i eksemplet.

mm) samt afrundede 4-8 og 8-16 mm søsten. Kornkurverne for de tre tilslagsmaterialer er vist i figur 12.

Kornkurvebetragtninger

Kornkurverne og det tilknyttede erfaringsgrundlag bygger som regel på nogle få kornstørrelser, typisk gennemfald på 0,25 mm, 1 mm og 4 mm, samt på $\frac{1}{2} d_{max}$.

Figur 12 viser vejledende kornkurver for SCC ved $d_{max} = 16$ mm. Figuren viser endvidere den sammensatte kornkurve ved en fordeling af de tre tilslag i tabel 2 med 35 % sand, 17 % 4-8 mm sten og 48 % 8-16 mm sten.

Mange danske sandmaterialer indeholder meget lidt materiale i intervallet 1-4 mm, hvilket bevirker det forholdsvist flade stykke på kornkurven mellem 1 og 4 mm.

Hvorvidt man bør tilstræbe en kornkurve i toppen eller i bunden af intervallet i figur 12, kan bl.a. vurderes ud fra delmaterialernes pakningsegenskaber. Hvis stenenes kornform er overvejende kantet (lav egenpakning), bør stænmængden holdes lav, og kornkurven derfor vælges i toppen af intervallet. Omvendt hvis stenene er overvejende afrundede. Kornkurver er pr. definition på vægtbasis, men partiklernes opfø-

relser i betonen vil i højere grad afspejle volumener. Hvis densiteterne, som i det viste eksempel, er næsten ens for alle delmaterialerne, har det ingen betydning, men hvis der er store densitetsforskelle på sand og sten, bør det også indgå i overvejelserne.

På samme måde bør fordelingen mellem små og store sten afspejle de to stenfraktioners indhold af kantet og knust materiale. Ofte indeholder 4-8 mm fraktionen meget knust materiale, og mængden af denne fraktion bør i så fald reduceres.

Pakningsanalyser

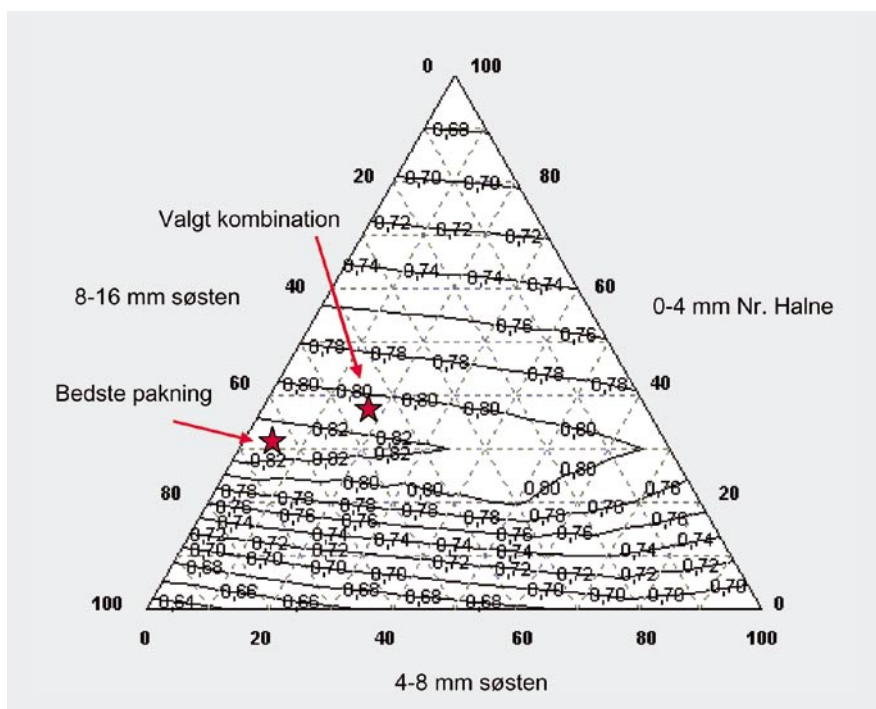
Pakningsanalysen foretages på grundlag af de enkelte materials egenpakning, kornkurver samt parameteren μ , som beskriver interaktionen mellem tilslagspartiklerne, jf. [9]. Pakningsanalysen for materialerne i tabel 2 er vist i figur 13.

I pakningsdiagrammet er det muligt at aflæse den samlede pakning for en vilkårlig kombination af tre tilslagsmaterialer. Niveaukurverne virker som højdekurverne på et landkort, der gør det nemt at finde »bakketoppen« – der i pakningsanalysen er den tilslagskombination, der giver den største pakning.

I princippet er det en fordel at vælge kombinationen med den største pakning. Det kræver mindre pasta til at fylde hulrummene mellem tilslagspartiklerne, og et lavt pastaindhold reducerer både pris, varmeudvikling og svind.

I de fleste tilfælde er der imidlertid også andre hensyn, der taler for at vælge en tilslagskombination, der er lidt forskudt fra optimum. Det gælder fx hensynet til at opnå en beton, der er mindst muligt følsom overfor doseringsafvigelser og variationer i delmaterialerne samt hensynet til at opnå god stabilitet og gode flydeegenskaber.

I figur 13 ses det, at niveaukurverne for pakningen ligger tæt i området med kombinationer med mange 8-16 mm sten (neden for punktet med størst pakning). Når kurverne ligger tæt, betyder det, at variationer i tilslaget (kornstørrelsesfordeling mv.) og doseringsafvigelser giver større variationer i den samlede pakning og dermed variationer i betonens bearbejdelighed. Det anbefales derfor at vælge kombinationen i et område, hvor der er langt mellem niveaukurverne, for at få en mindre følsom beton. Dette vil føre til



Figur 13. Pakningsanalyse af materialer vist i tabel 2.

en højere sandprocent end i kombinationen med maksimal pakning. I pakningsdiagrammet figur 13 ses endvidere, at den maksimale pakning kan opnås uden brug af en 4-8 mm fraktion. Uden denne fraktion, vil der opstå et partikelspring. Sandkornene vil derved kunne pakkes i hulrummene mellem de større partikler, uden at forstyrre de større partiklers pakning, hvilket samlet giver en højere pakning. Derimod er der ikke plads til en 4-8 mm sten mellem tætpakkede 8-16 mm sten, så tilstedeværelsen af 4-8 mm sten skaber større afstand mellem 8-16 mm stenene og derfor bliver pakningen lavere. Det har dog også fordele at have en velgraderet, sammensat kornkurve, fx giver det mindre risiko for separation. Derfor bør man ikke uden videre udelukke en mellemfraktion. Hvor stor 4-8 mm fraktionen bør være, afhænger dels af kornformen og dels af, hvor fint sandet er (om der er meget materiale i 2-4 mm fraktionen). En passende mængde af 4-8 mm sten vil typisk være 15-20 %, hvis der er tale om overvejende afrundet materiale, og mindre, fx 10-15 %, i tilfælde af et knust materiale. Som det ses af figur 13, vil det som regel være muligt at finde en tilslagskombination, der både giver minimal følsomhed overfor variationer, og som giver god stabilitet,

uden at få en pakning, der er væsentligt lavere end den maksimale pakning. Ved den valgte tilslagskombination (37 % sand, 18 % 4-8 mm sten og 45 % 8-16 mm sten) er pakningen således 0,81, mens den maksimalt opnåelige pakning er ca. 0,82. Ved fastlæggelse af de absolutte mængder af tilslag, skal der tages højde for, at det er nødvendigt med et vist pastatillæg, for at opnå en passende bearbejdelighed. Pastatillægget er den mængde pasta (og evt. luft) der er nødvendig ud over den mængde pasta, der fylder hulrummene imellem tilslagspartiklerne. For SCC vil et pastatillæg på 140-160 l pr. m³ beton være passende. Det svarer nogenlunde til pastatillægget for en traditionel, luftindblandet beton med v/c-forhold 0,40, hvor bearbejdeligheden er justeret vha. pastamængden til et sætmål i intervallet 140-220 mm, [9]. Når pastamængden for SCC ikke er markant højere end for traditionel beton, skyldes det, at SCCs flydeegenskaber i høj grad styres ved at ændre på kitmassens egenskaber.

Sammensætning af kitmassen

For at opnå god stabilitet i kitmassen, skal volumenforholdet mellem vand og faste partikler typisk ned i området sva-

rende til et v/c-tal på 0,36 - 0,40, hvilket svarer til 65 - 70 % af cementens egenpakning. Da dette i mange tilfælde vil medføre unødvendigt høje styrker, kan en del af cementen med fordel substitueres med flyveaske.

Flyveaske

Flyveaskemængden kan fx vælges i området 15 - 30 % af pulvremængden, hvor den nedre ende repræsenterer betoner, hvor hurtig afbinding samt tidlig og/eller høj styrke ønskes. Ved substitution af cement med flyveaske, bør man i denne sammenhæng tænke i volumen, dvs. at 1 kg cement kan erstattes med ca. 0,7 kg flyveaske, svarende til en »volumen-faktor« på 1,4.

På grund af flyveaskens kugleformede partikler kan man ofte have lidt større faststofindhold i kitmassen, uden at denne bliver unødigt tyktflydende.

Mikrosilica

Mikrosilica har en tendens til at gøre kitmassen mere tyktflydende, men kan omvendt afhjælpe bleedingproblemer, hvis sandet er lidt for groft. Det bør dog ikke tilsættes i for store mængder; 3 - 5 % af pulveret vil sædvanligvis være passende.

Superplastificerende tilsætningsstoffer

For de superplastificerende tilsætningsstoffer bør doseringsmængderne vælges efter leverandørens anvisninger. Databladene anfører ofte meget vide grænser for dosering, men et udgangspunkt kunne være en dosering lidt over midtpunktet i intervallet.

Betonens følsomhed overfor variationer i vandindhold vil generelt øges med øget dosering af superplastificerende tilsætningsstoffer, hvorfor meget høje doseringer sjældent er ønskelige. Omvendt skal man naturligvis op på en dosering, hvor kitmassen opnår de ønskede flydeegenskaber.

Herudover har cementtypen en vis betydning, fx vil Aalborg Portland **LAVALKALI SULFATBESTANDIG** cement og AALBORG WHITE® typisk have et mindre doseringsbehov (ca. 25 %) end Aalborg Portland **RAPID**® cement og Aalborg Portland **BASIS**® cement. Flyveaske har ligeledes et lavere doseringsbehov end cement, så fordelingen mellem cement og flyveaske vil også have betydning, hvis doseringen sker på pulverbasis.

Overvejelser vedr. pakning og kornkurver

At anvendelse af kornkurver hhv. pakningsanalyser ofte fører til stort set samme resultat, skyldes naturligvis, at et tilslagsmateriales pakningsmæssige egenskaber også afspejler kornstørrelsesfordelingen. Når man derfor pr. erfaring vælger et sandindhold i omegnen af 40 % af det samlede tilslag med d_{max} 16 mm, svarer det helt til det, en forenklet pakningsanalyse ville føre til. Pakningsteori tager udgangspunkt i kugleformede partikler fordelt på flere fraktioner, og selv om virkeligheden er en anden, giver det brugbare løsninger.

Kugleformede partikler af ens størrelse kan teoretisk pakkes til en egenpakning eller pakningsgrad på 0,74, men ved en så høj pakning vil partiklerne være fuldstændig låst i en fast struktur. Kuglerne skal således lejres så løst, at det svarer til en pakningsgrad på ca.

70 % af den teoretisk opnåelige, før partikelsystemet opnår fri bevægelighed. Ved højere pakningsgrader, vil systemets bevægelighed være reduceret, ved at partiklerne skal »zig-zagge« mellem hinanden, og væsken (mørtel eller cementpasta) skal strømme til de områder af systemet, som er i bevægelse. Dette medfører en uønsket træghed i systemet.

Gennemføres dette princip for 8-16 mm stenene og sandet i tabel 2, findes følgende:

Stenene skal tilsættes i en mængde svarende til 70 % af stenenes egenpakning på 0,63, altså 0,44 m³ eller 1150 kg/m³.

Det resterende volumen - 0,56 m³ - skal indeholde sand pakket til 70 % af sandets egenpakning på 0,66, altså 0,26 m³ eller 680 kg/m³.

Sandet udgør således 37 vægt-%, helt i overensstemmelse med det tidligere fundne.

Her vil man også vælge at erstatte en del af 8-16 mm stenene med 4-8 mm sten.

Hvis der i stedet var anvendt knuste bakkesten med lavere egenpakning og korndensitet, fx 0,58 og 2580 kg/m³, ville resultatet i stedet være blevet et stenindhold på 1050 kg/m³ og et sandindhold på 725 kg/m³, svarende til 41 % eller godt 10 % mere sand.

Eksemplet viser, hvorfor sandindholdet ofte vælges i omegnen af 40 %, men illustrerer samtidig, at forenkede pakningsanalyser kan tage højde for forskelle i materialeegenskaberne, som de vejledende kornkurver ikke tager højde for.

Virkeligheden er sædvanligvis mere kompliceret, og styrken ved pakningsprogrammet er netop, at det kan tage højde for sådanne forhold.

Luft

I Danmark produceres SCC næsten uden undtagelse med indblandet luft, og et luftindhold på 5 - 7 % vil som regel være passende.

Hvis luftindblanding udelades, skal volumen af den øvrige del af kitmassen øges. Dette er en af årsagerne til, at man i andre lande opererer med højere pulverindhold end i Danmark. En anden årsag er de gode danske sand- og stenmaterialer.

Luften har endvidere en stabiliserende virkning på pastaen i kraft af svage elektrokemiske bindinger mellem partikler og luftbobler.

En ulempe ved luftindblanding er, at man dermed også har et luftindhold, som skal styres.

Eksempel på SCC proportionering

Den sidste fase i proportioneringen vil forløbe lidt forskelligt, afhængig af om det bygger på kornkurvebetragtninger eller pakningsanalyser.

For at opnå sammenlignelige recepter, er der i begge tilfælde forudsat et luftindhold på 6 % og et v/c-tal på 0,40.

Doseringsmængderne af superplastificeringsstof og luftindblandingsstof vil være produktafhængige, og er udeladt af proportioneringen.

Kornkurvebetragtninger

Hvis proportioneringen bygger på kornkurvebetragtninger, vil man sædvanligvis skønne et vandbehov for betonen. Dette skøn bygger i høj grad på erfaring med de pågældende tilslagsmaterialer, men graden af plastificering mm. spiller også ind.

Vandbehovet vil typisk ligge i intervallet 130 – 160 l/m³, og med de aktuelle materialer i tabel 2 samt en »moderat« dosering af superplastificeringsstof, skønnes vandbehovet til 140 l/m³.

Cementindholdet er derfor: $(140/0,40) = 350 \text{ kg/m}^3$.

Idet tilslaget fordeles efter den tidligere fundne fordeling (35 % sand, 17 % 4-8 mm sten og 48 % 8-16 mm sten) kan den endelige recept herefter beregnes jf. resultatet i tabel 3.

Pakningsanalyse

Hvis proportioneringen bygger på pakningsanalyser, vil man i stedet tage udgangspunkt i tilslaget pakningsgrad (her 0,81) samt et erfaringsmæssigt pastatillæg, som typisk ligger i området 140 – 160 l/m³ beton. (ikke at forveksle med vandbehovet). Her skønnes pastatillægget til 150 l/m³ beton.

Tilslagsvolumenet i 1 m³ beton kan herefter beregnes som: $(1000-150)*0,81 = 690 \text{ l/m}^3$.

Fordelingen af tilslaget foretages på volumenbasis med 37 % sand, 18 % 4-8 mm sten og 45 % 8-16 mm sten. Recepten er derved fastlagt, og kan beregnes jf. resultatet i tabel 3.

	Proportioneringsprincip	
	Kornkurver	Pakningsanalyser
Cement	350	350
Vand (frit)	140	140
Sand 0-2 mm	630	670
Sten 4-8 mm	305	320
Sten 8-16 mm	860	810

Tabel 3. Sammensætning af SCC baseret på hhv. kornkurver og pakningsanalyse. Alle mængder er angivet i kg/m³.

Hvilken recept der giver det »bedste« resultat er ikke forsøgt vurderet, men begge forslag vil være et godt udgangspunkt for prøveblandinger med efterfølgende småjusteringer, herunder valg af doseringsniveau af luftindblandingsmiddel og superplastificeringsstof.

I tabel 4 er vist en checkliste for sammensætning af SCC og i tabel 5 er vist eksempler på typiske SCC recepter til forskellige formål.

Produktion af SCC

Variationer i produktionsforhold påvirker SCC's bearbejdelighed væsentligt mere, end tilfældet er for traditionel beton. Der skal fx ikke ske ret store ændringer i tilslaget fugtindhold, før det slår igennem på bearbejdeligheden af SCC, således at betonen enten ikke er selvkompakterende mere eller separerer ved udlægningen.

Variationer i betontemperaturen kan ligeledes medføre variationer i bearbejdeligheden, da effekten af de tilsætningsstoffer som anvendes til at give bearbejdelighed, afhænger af temperaturen.

Det er derfor nødvendigt at have godt styr på variationerne i de enkelte delmaterialer, hvis produktion af SCC skal blive en succes.

Luften kan være vanskelig at styre, og udsving i luftindhold på $\pm 2\%$ kan sammenlignes med udsving i pulver- eller fillermængden på $\pm 50 - 60 \text{ kg/m}^3$.

Betonens luftindhold påvirkes bl.a. af flyveaskens restkul og variationer heri, men stenmel og anden finstof i tilslaget kan, hvis de varierer, også medføre variationer i luftindholdet.

Generelt er ensartede delmaterialer en forudsætning for at kunne styre luftindholdet.

Styring af selve blandeprocessen er desuden meget afgørende for en ensartet produktion af SCC, idet variationer i blandesekvens og blandetid vil give variationer i bearbejdeligheden og evt. risiko for skumdannelse eller anden uønsket opførsel i betonen. Se nærmere i [8] for forslag til styring af blandeprocessen ved production af SCC.

	Typisk værdi	Bemærkning
Sten	1000 - 1200 kg/m ³	Tilpasses materialets egenpakning og densitet, se [9]
Sand	600 - 800 kg/m ³	Tilpasses materialets egenpakning og densitet, se [9]
Kornkurve	Se figur 12	
V/(C + 1,4 (FA+MS))	0,36 - 0,40	FA = Flyveaske, MS = Mikrosilica
Flyveaske	15 - 30 % af pulver	Høj dosering \Rightarrow langsom afbinding og styrkeudvikling
Mikrosilica	3 - 5 % af pulver	Højere dosering \Rightarrow øget risiko for plastisk svind, dårligere flydeevne
SPT	Dosering ca. midt i anbefalet interval	Højere dosering \Rightarrow større følsomhed for variationer i vandindhold Lavere dosering \Rightarrow dårligere flydeevne
Luft	5 - 7 %	Højere luftindhold \Rightarrow tendens til flødeskumseffekt (dårlig flydeevne) Lavere luftindhold \Rightarrow mindre stabil, dyrere beton

Tabel 4. Checkliste for sammensætning af SCC beton.

	Gulvbeton	Elementbeton	Hvid beton
Betonklassifikation	P20	M30	A35
Cement	235	330	350
Flyveaske	100	80	-
Mikrosilica	-	20	-
Vand	135	160	140
Superplastificeringsmiddel*	3,5	3,6	3,0
Luftblandingsmiddel*	2,0	0,5	0,5
Sand 0-2 mm	740	640	650
Sten 4-8 mm	290	240	220
Sten 8-16 mm	720	800	880

*Dosering er afhængig af fabrikat

Tabel 5. Eksempler på SCC recepter til forskellige formål – alle mængder er anført i kg/m³.

Måle- og kontrolmetoder

Til bestemmelse af flydeegenskaber for SCC og dermed betonernes anvendelighed til forskellige udførelsmæssige opgaver, anvendes i dag en række forskellige måle- og kontrolmetoder. Idet der p.t. ikke er en fælles præference for hvilke af disse metoder, der anvendes til bestemmelse af givne parametre, gives der i det følgende en oversigt over de mest almindeligt anvendte. Se også [6] og [7].

Udbredelsesmål

Udbredelsesmålet anvendes til bestemmelse af det horisontale frie flyd for SCC. Metoden er baseret på metoden for bestemmelse af sætmål og metoden for udbredelsesmål for konventionel beton. Udbredelsesmålet bestemmes med omvendt sætmålskegle jvf. DS 2426:2004 Annex U, se figur 14.A. Udbredelsesmålet er i høj grad bestemt af betonens flydespænding og giver god information om betonens flydeevne og bearbejdelighed, samt nogen information om tendens til separation. Udbredelsesmålet giver dog ingen information om risiko for blokering ved armering. Fordelen ved udbredelsesmålet er, at det er nemt at udføre. Ulempen er, at fremgangsmåden, som ved normal sætmålsbestemmelse, introducerer en vis operatørafhængighed.

Udbredelsestid

Bestemmelse af udbredelsestid bygger

på målemetoden for udbredelsesmål. Betonens sejhed kan vurderes ud fra den tid, der går fra betonen sættes i bevægelse, og til den når et givent *udbredelsesmål*. Typisk bestemmes tiden til 300 mm (T_{300}), 500 mm (T_{500}) og til det endelige udbredelsesmål (T_{slut}). Udbredelsestiderne bestemmes vha. et stopur, videokamera med tidsangivelse eller lignende.

Udbredelsestiden giver god information om betonens flydeevne, dvs. hvor hurtigt en given form kan fyldes.

Fordelen ved bestemmelse af udbredelsestiden er, at det er simpelt at udføre. Ulempen er igen, at det er en operatørafhængig metode.

J-ring

Som for udbredelsestid, er anvendelse af J-ring baseret på udbredelsesmålmotoden, se figur 14.B. J-ringen anvendes til at bestemme den selvkomprimerende betons evne til at passere armeringen i en given konstruktion. J-ringen består af en jernring med en diameter på 300 mm påmonteret armeringsjern. En sætmålskegle placeres i midten af J-ringen, og betonen flyder herved ud gennem de påmonterede armeringsjern. Er forskellen mellem udbredelsesmålet med og uden J-ring mindre end 50 mm og/eller højdeforskellen mellem beton inde i J-ringen og udenfor mindre end 5 mm, er der som hovedregel ikke problemer med blokering.

L-boks

L-boksen anvendes til vurdering af en SCC betons flydeegenskaber og evne til at passere armering i en given konstruktion. L-boksen er, som navnet antyder, formet som et L, se figur 14.C, hvor den vertikale og horisontale del er adskilt af en flytbar plade; foran pladen er der monteret armeringsstænger. Betonen fyldes i den vertikale del og pladen fjernes, således at SCC betonen flyder ud gennem de påmonterede armeringsstænger, ud i den horisontale boks. Når flydet stopper, måles højden af betonen i hver ende af den horisontale boks, hvilket indikerer hældningen på en stillestående beton, samt betonens evne til at fylde en form ved egen kraft. Blokering kan hertil vurderes visuelt. Desuden måles tiden til betonen har nået 200 mm og 400 mm ud i den horisontale del, hvilket giver information om betones flydeevne.



Figur 14. Forskellige metoder til kontrol og undersøgelse af SCC's bearbejdelighed. (A) Udbredelsesmål, (B) J-ring, (C) L-Boks og (D) BML-viskosimeter.

BML- viskosimeter

BML-viskosimetret, se figur 14.D, giver til forskel fra de førnævnte metoder, direkte information om betonens rheologiske egenskaber; flydespænding og plastisk viskositet. I BML-viskosimetret fyldes en beholder med 15 liter beton. En fortdanet kerne nedsænkes heri og beholderen sættes i rotation. Betonens påvirkning af kernen ved forskellige hastigheder kan herefter omsættes til de rheologiske parametre. Metoden er relativt avanceret og vil formodentligt kun blive anvendt i forskningslaboratorier.

2-Parametermåling

Princippet for en »to-parametermåling« er analogt til måling med BML-viskosimetret, idet betonens modstand mod bearbejdning måles ved forskellige hastigheder - gerne direkte i betonblanderen. Målingen kan fx ske ved at presse en kugle igennem betonen ved varierende hastigheder og samtidig måle kraften på kuglen. Ud fra sammenhængen mellem kraft og hastighed kan betonens rheologiske parametre bestemmes. Den helt store gevinst opnås, hvis dette princip kan implementeres direkte i selve betonblanderen, idet det herved bliver muligt under selve blandingen at korrigere betonens rheologiske parametre og dermed dens flydeegenskaber.

Andre målemetoder for bearbejdelse

Andre metoder til kontrol og undersøgelse af SCCs bearbejdelse [6,7]:

- U-Boks
- V-Funnel (V-tragt)
- Filling Vessel (Fyldnings beholder)
- Orimet test metode
- Visuelt stabilitets index

Det forventes, at der i løbet af 2005 kommer en fælles europæisk anbefaling af prøvningsmetoder til SCC.

Udførelse

Transport

For SCC er transporttiden afgørende for hvor ensartet frisk beton, der leveres til støbestedet.

På elementfabrikker er dette sjældent et problem, men for fabriksbeton, der skal leveres til byggepladser, kan dette være et stort problem. Hvis der er store variationer i transporttiden på grund af fx myldretidstrafik, bør det derfor overvejes, om tilsætningen af det superplastificerende tilsætningsstof skal foretages ved ankomst til byggepladsen i stedet for på fabrikken.

Udstøbning af gulve

Det er en stor fordel at anvende SCC til større gulvstøbninger, idet produktiviteten kan øges markant. SCC er i den forbindelse specielt egnet til gulve, hvor der ikke er særlige krav til gulvets planhed, samt til gulve, hvor der efterfølgende skal pålægges slidlag.

Man skal dog altid sørge for at have en grundig modtagekontrol, som kan sikre, at der ikke anvendes beton med for store variationer i bearbejdelse, som kan øge risikoen for separation og skumdannelse på overfladen.

Hvis separation og/eller skumdannelse

forekommer, kan der dannes et pasta- eller mørtellag i overfladen, som kan være fra et par mm op til 40 - 50 mm i tykkelsen. Dette »slamlag« vil have andre egenskaber, typisk lavere styrke, end den resterende beton, og slamlaget gør efterbehandling af betonoverfladen vanskeligere. Betoner med slamlag er fx svære at glitte, uden at der opstår skader i overfladen. Det kan desuden være nødvendigt at slyngrense overfladen for at fjerne slamlaget, således at overfladen bliver stærk nok til, at der kan opnås en god vedhæftning til et efterfølgende lag.

Der bør altid foretages en vurdering af overfladen på SCC betoner, hvor der skal udlægges slid- og afretningslag.

Ved udstøbning af gulve bør SCC udlægges på traditionel vis ved opbygning af en støbefront, således at risikoen for støbeskel minimeres. Støbefronten vil dog typisk være bredere end ved støbning med traditionel beton.

Efter udlægning skal overfladen afrettes. SCC er som betegnelsen siger *selvkompakterende beton*, men den er ikke *selvnivellerede*. Afretning kan fx foretages ved jutning af overfladen.



Figur 15. SCC øger produktiviteten ved store gulvstøbninger.



Figur 16. Udlægning af SCC med opbygget støbefront.



Figur 17. Afretning af SCC ved jutning.

Ved en sådan afretning af SCC kan det dog være svært at opfylde de krav til planhed af gulvet, der stilles til lagerrum eller til steder, hvor der skal lægges gulv direkte ovenpå.

Nogle typer SCC har på grund af det høje indhold af finstof samt superplast en tendens til dannelse af en skorpe («gummihud») på overfladen. Dette medfører, at den indblandede luft i betonen samles 2-5 mm under betonens overflade i stedet for at forsvinde fra denne. Dette fænomen kan gøre det umuligt at glitte med vingeglitter, uden at overfladen bliver ødelagt.

Hvis der anvendes sten svarende til materialeklasse P, vil betonens tendens til separation ligeledes kunne medføre, at der vil være for mange lette korn i betonoverfladen. Dette giver en ujævn overflade med svage områder, som kan blive knust ved kørsel med fx truck.

Det er derfor meget vigtigt, at den anvendte SCC til gulve er robust og at læs, der viser tendens til separation, bliver sorteret fra.



Figur 18. SCC med lette korn der giver ujævnheder i overfladen.



Figur 19. Vandret udstøbning af betonelement.

Efterbehandling af gulve

Hurtig afdækning af overfladen er nødvendig for at undgå plastiske svindrevner. På grund af det højere fillerindhold i SCC er tiden fra udstøbning, til at afdækning skal være etableret, for at undgå plastiske svindrevner, ofte væsentligt kortere sammenlignet med anvendelse af traditionel beton. Det høje indhold af finstof medfører desuden risiko for skorpedannelse i overfladen, som følge af for hurtig

udtørring. Ofte vil det være vanskeligt at afdække store gulvflader hurtigt nok med plast. I sådanne tilfælde bør der i stedet påsprøjtes forseglingsmiddel, som på et senere tidspunkt kan fjernes ved slyngrensning; hvis det er nødvendigt for den efterfølgende påklæbning af gulvbelægning eller maling af gulvet. Slibning af et gulv efter hærdningen er endvidere en mulighed, som prismæssigt kan konkurrere med traditionel glitning.



Figur 20. Færdigglittet betonelement.



Figur 21. SCC er særlig egnet til komplicerede støbninger, hvor det er svært at få vibreret traditionel beton ordentligt.

Vandret udstøbning af elementer

Ved anvendelse af SCC til udstøbning af vægelementer på formborde er det som udgangspunkt vigtigt, at hele formfladen bliver fyldt med beton fra samme sats, idet selv korte tidsforskydninger kan give farvevariationer i overfladen. Størst sikkerhed for ensartede overflader opnås, hvis første lag gives en meget kort vibration (~2 sek.), på trods af, at det er såkaldt SCC, der anvendes.

Efterbehandling af elementer

For at undgå gummihud og luftporesamlinger i overfladen af betonelementerne er det vigtigt at afdække elementerne med plast, der lægges direkte ned på betonoverfladen. Herved bliver overfladen bedst beskyttet, og glitning med talerken- og vingeglitter er herefter mulig.



Figur 22. Den færdige kvalitet af overfladen afhænger bl.a. af hvor slidte forme, der er brugt, og om der er brugt for meget formolie.

Lodrette støbninger med SCC

Det er en stor fordel at anvende SCC til støbning af komplicerede konstruktioner som fx høje vægge eller konstruktioner med en geometri, der kræver store mængder armering eller mange udspæringer.

I sådanne konstruktioner vil det ofte være vanskeligt at få vibreret traditionel beton tilstrækkeligt med vibratorstave, med mindre form og armering designes specielt, så der sikres adgangsforhold til vibratorstavene.

Formsystemet og den valgte udstøbningsmetode har stor betydning for det færdige resultat specielt med hensyn til at opnå ensartede overflader og få luftporer i overfladen.

Der kan normalt anvendes samme formmaterialer og formolier til SCC, som der anvendes til traditionel beton. De mest ensartede overflader opnås ved at anvende nye forme, idet gamle og slidte forme giver større risiko for farvevariationer i overfladen. Hvis der anvendes for store mængder formolie, kan dette medføre en øget mængde af luftporer i overfladen. Det kan derfor være en fordel at anvende så lidt formolie som muligt og mere tyndflydende end normalt.



Figur 23. SCC pumpes ind i den nederste del af formen.

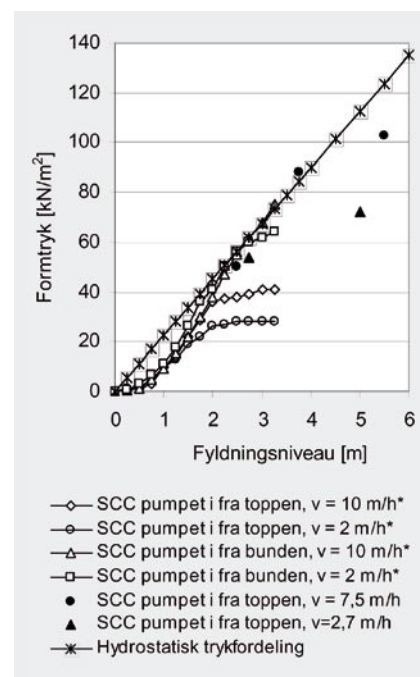
Ved dimensionering af formsystemerne er det vigtigt at have planlagt, hvordan formfyldningen skal foregå. De pænest overflader opnås ofte, hvis betonen pumpes ind i bunden af formen, eller ved at pumpe studs hele tiden holdes let nedstukket i den allerede udstøbte beton. Hvis SCC falder frit ned i formen, øges risikoen for separation og inhomogen luftporefordeling.



Figur 24. SCC pumpes i høj form med pumpe studs neddykket i betonen.

Formtryk

Hvis betonen pumpes ind fra bunden af formen, vil betonen blive holdt levende under hele støbningen, og formtrykket kan derfor forventes at blive højere sammenlignet med traditionel udstøbning i lag. Ved dimensionering af forme, hvor betonen skal pumpes ind fra bunden, anbefales det, at formene dimensioneres for tryk svarende til *mindst* hydrostatisk trykfordeling.



Figur 25. Formtryk afhænger bl.a. af fyldningsmetode og -hastighed, men også af armeringstæthed og geometri.

Ved støbning hvor pumpe studs holdes let nedstukket i den allerede udstøbte beton, eller hvor betonen falder frit ned i formen – hvilket dog bør undgås - afhænger formtrykket dels af fyldningshastigheden, dels af hvor viskøs eller thixotrop den pågældende beton er. Ved meget store støbninger afhænger formtrykket endvidere af, hvor hurtigt betonen binder af.

Der er foretaget forskellige forsøg med måling af formtryk ved forskellige fyldningshastigheder, men formtrykkets afhængighed af betontypen er endnu ikke fuldstændigt afklaret.

Referencer

[1] Wallevik, O., Kursusmateriale: »Rheology of Cement based Particle Suspensions such as Self-Compacting Concrete», IBRI Rheocenter, Reykjavik, August 2003.

[2] RILEM: *Self-Compacting Concrete*. State-of-the-art report of RILEM Technical Committee 174-SCC, redigeret af Å. Skarendahl og Ö. Petersson, Report no. 23, RILEM Publications S.A.R.L., Paris (2000).

[3] Billberg, P.: *Self-compacting concrete for civil engineering structures – the Swedish experience*, CBI-report 2:99, CBI, Stockholm (1999)

[4] François de Larrard: *Concrete Mixture Proportioning. A scientific approach*, (ISBN 0419235000), E & FN Spon, London (1999).

[5] Brameshuber, W., Uebachs, S.: *Investigations on the formwork pressure using self-compacting concrete*, Proceedings 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete, PRO33, RILEM, pp. 281-288, Reykjavik, August 2003.

[6] PCI, *Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete in Precast/Prestressed Concrete Institute Member Plants*, TR-6-03 (ISBN 0-937040-68-1), Chicago, April 2003.

[7] Brameshuber, W.: *Selbstverdichtender Beton*, Schriftenreihe Spezialbetone Band 5 (ISBN 3-7640-0417-7), Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, December 2003.

[8] Aalborg White Research and Development Centre (RDC): *Self Compacting Concrete based on Aalborg White®*, folder til download på www.AalborgWhite.com, Aalborg, Oktober 2004.

[9] Glavind, M., et. al.: *Pakningsberegninger som hjælpemiddel ved betonproportionering*. Aalborg Portland, CtO Beton-Teknik (2/11/1999), November 1999, Aalborg.

[10] Barnes, H. A. et. al.: *An Introduction to Rheology*, (ISBN 0-444-87140-3), Elsevier, Amsterdam, 1996.

Løssalgspris: Kr. 75,- inkl. moms



AALBORG PORTLAND

CtO - Cementteknisk Oplysning

Postboks 165 • DK-9100 Aalborg
Tel. +45 99 33 77 54
www.aalborg-portland.dk