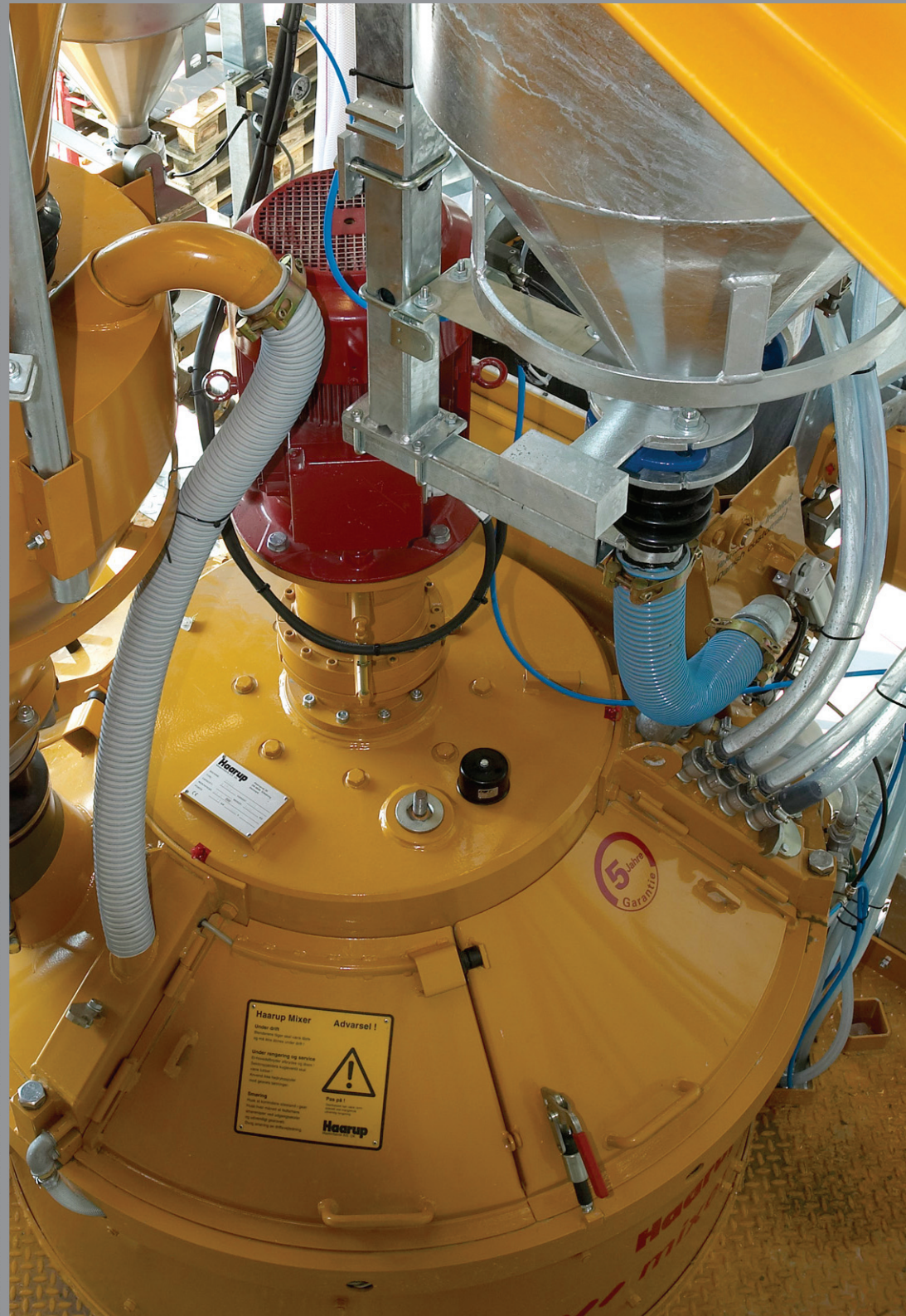




TEKNOLOGISK
INSTITUT

Håndbog for sammensætning af SCC



Indhold

1.	Introduktion	4
2	Flydeegenskaber af SCC	6
2.1	Måling af flydeegenskaber	6
3	Sammensætning af SCC	7
4	Sammensætning og flydeegenskaber	10
4.1	Tilslagsmængde (ϕ)	10
4.2	Kornform (f/k)	10
4.3	Sandets kornkurve	12
4.4	Vandcementtal	12
4.5	Flyveaske	13
4.6	Mikrosilica	14
4.7	Superplastificerende tilsætningsstof (SP)	14
4.8	Stabilisator	14
4.9	Luftindblanding	16
4.10	Justering af en betonrecepts rheologi	17
5	Koncept for udvikling af ny SCC	18

Håndbog for sammensætning af SCC, oktober 2007

*Udgiver: Teknologisk Institut, Beton
Gregersensvej, 2630 Taastrup
+ 45 7220 2226 - concrete.centre@teknologisk.dk*

*Tryk: Paritas A/S
2. Oplag: 200 stk.
ISBN: 87-7756-766-8*

*Hovedforfattere: Claus Pade
Lars Nyholm Thrane
Claus V. Nielsen*

Layout: Thomas Juul Andersen

Forsidefoto viser Teknologisk Instituts betonblandeanlæg samt tilslagsmaterialer til beton.

Reproduktion af dele af Håndbogen er tilladt, hvis tydelig kildeangivelse angives.

Forord

SCC-Konsortiet var et innovationskonsortium støttet af Ministeriet for Videnskab Teknologi og Udvikling i perioden 2003-2007.

Et af de vigtigste resultater af SCC-Konsortiets arbejde er udarbejdelsen af to håndbøger, med gode råd og anvisninger til hhv. sammensætning af SCC og udførelse af SCC.

Håndbog for sammensætning af SCC skal dels medvirke til en øget anvendelse af SCC i Danmark og dels medvirke til en bedre forståelse af sammenhængen mellem betonsammensætning og SCC's rheologi / bearbejdelighed.

Betonproducenten kan bruge Håndbogen til at koble betonsammensætning med flydeegenskaber, som igen kan kobles til de udførelsesmæssige aspekter hvorved der opnås en bedre forståelse af de udførendes ønsker, behov og krav.

Andre interessanter kan med fordel læse håndbogen for at opnå en bedre generel forståelse af de udfordringer som er forbundet med sammensætning af SCC.

SCC-Konsortiet, august 2007

SCC-Konsortiets kernepartnere:

- *Teknologisk Institut, Beton*
- *Aalborg Portland A/S*
- *Unicon A/S*
- *MT Højgaard A/S*
- *Betonelement A/S*
- *DTU-IMM*
- *Videometer A/S*

www.SCC-Konsortiet.dk
www.VoSCC.dk

1. Introduktion

SCC er den korte betegnelse for selvkompakterende beton. Betegnelsen dækker over den mest lovende nyskabelse i betonbranchen i de seneste 20 år. Set i forhold til traditionel beton kræver SCC ingen vibrering under udstøbning. Dermed kan en række arbejdsoperationer udelades med øget produktivitet og en mærkbar forbedring af arbejdsmiljøet til følge.

Den største forskel mellem traditionel beton og SCC ligger i konsistensen i betonens friske tilstand. Figur 1.1 viser traditionel sætmålsbeton og SCC. Det er klart, at sætmålet ikke giver nogen mening for SCC og hidtil har flydemålet været brugt til at angive SCC's konsistens og bearbejdelighed. Det kræver dog også den såkaldte plastiske viskositet at beskrive flydeegenskaberne fyldestgørende. De øvrige vigtige betonegenskaber såsom styrke, stivhed, holdbarhed osv. er stort set identiske for SCC og traditionel beton.

Ved at udnytte SCC's flydeevne er det muligt at omstøbe tæt og kompliceret armering uden brug af vibrering. SCC er i stand til at flyde ud i selv komplicerede formgeometrier med udsparinger og lignende, hvor det er svært at komme til med stavvibratører.

Det forventes, at SCC kan medvirke til at reducere støbefejl såsom stenreder og give bedre overfladekvalitet. SCC er desuden velegnet til pumpning ind i ufremkommelige forme med overforskalling, understopning, o.l.

Håndbogen henvender sig primært til de personer som har ansvaret for betonsammensætning i en betonproducerende virksomhed. Materialet er også tænkt som muligt baggrundsmateriale i forbindelse med undervisning i SCC teknologi ved de tekniske undervisningsinstitutioner.

Håndbogen beskriver hvilken indflydelse den enkelte mix design parameter (f.eks. det enkelte delmateriale) har på SCCs flydeegenskaber. Der gives en vejledning i, hvordan en betonrecept kan justeres for at opnå de ønskede flydeegenskaber så de er tilpasset udførelsesteknik og konstruktionstype, samt forslag til hvordan man kan gribe sammensætning af SCC an helt fra bunden.

De udførelsesmæssige aspekter ved SCC er yderligere behandlet i "Håndbog for udførelse af SCC", SCC-Konsortiet, august 2007.

Erfaringerne er opnået med danske delmaterialer og for flydemål i området 450 mm til 700 mm.



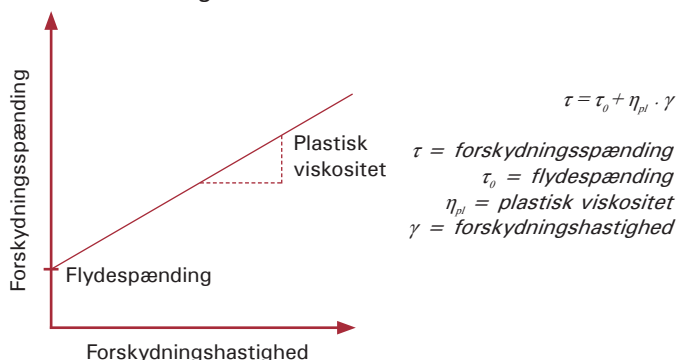
Figur 1.1. Sætmål for traditionel beton til venstre målt som sammensynkningen af en 300 mm høj betonkegle. Flydemål i form af diameteren for et tilsvarende SCC prøveemne ses til højre. Sætmålet for traditionel beton ligger typisk i intervallet 100-200 mm, mens flydemålet for SCC ligger på ca. 500 - 700 mm.

2. Flydeegenskaber af SCC

Traditionelt set benyttes flydemålet til at beskrive SCC's flydeegenskaber, men det er påvist, at SCC kræver mindst to parametre til at beskrive flydeegenskaberne. Flydeegenskaberne for SCC er således karakteriseret ved følgende parametre:

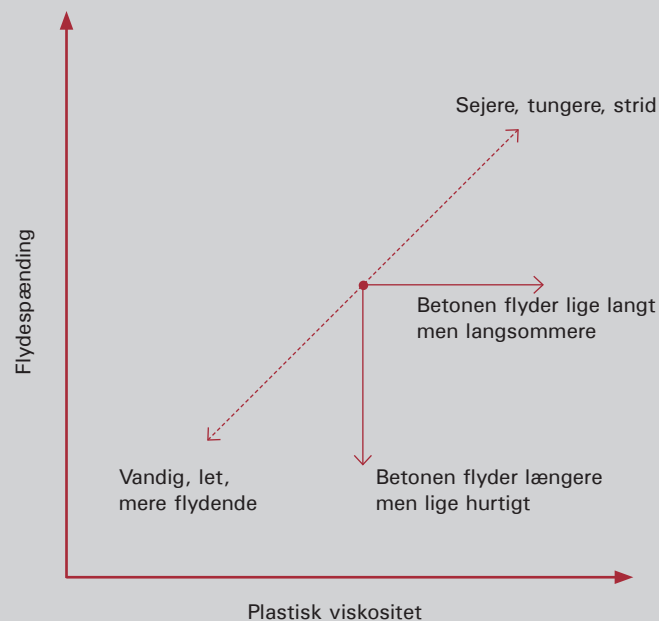
- Flydespændingen τ_0 beskriver betonens flydeevne og dermed hvor langt betonen kan flyde. Flydespændingen er tæt forbundet med flydemålet. En høj flydespænding giver lavt flydemål og omvendt.
- Den plastiske viskositet η_{pl} beskriver betonens sejhed. En høj viskositet giver en klistret SCC, som er svær at sprede ud (tykt- og langsomtflydende). Omvendt giver en lav viskositet en hurtigflydende SCC, som føles let at arbejde i.

Materialer hvis flydeegenskaber kan beskrives af en flydespænding og en plastisk viskositet kaldes Bingham-materialer. Betydningen af de to parametre er illustreret i figur 2.1.

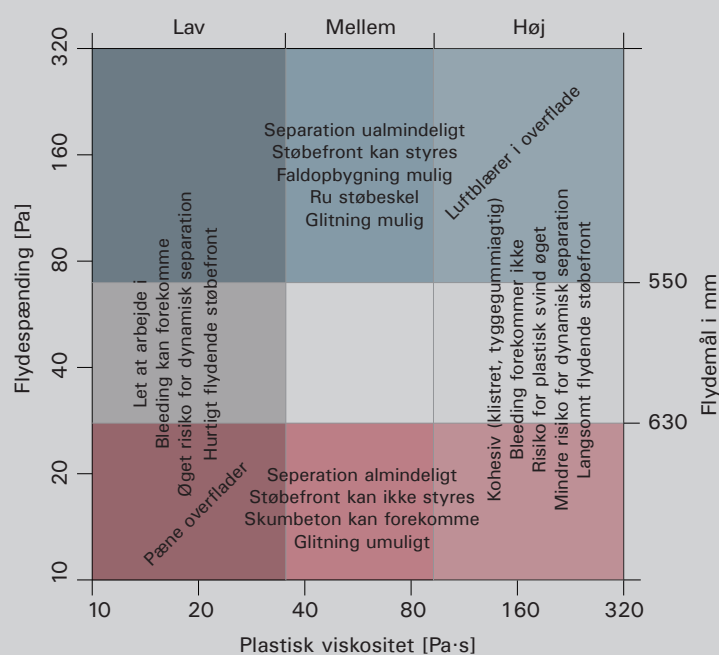


Figur 2.1. Flydekurve for et Bingham-materiale som SCC.

To betoner med ens flydemål og med hhv. lav og høj plastisk viskositet opfattes som hhv. letflydende og klistret/sej/langsomtflydende af betonarbejderne. De to betoner vil flyde lige langt, men flydehastigheden vil være forskellig. Den observerede effekt af at ændre på de rheologiske parametre i relation til hvordan betonen opfattes af brugeren er vist i figur 2.2. De danske erfaringer med betydningen af de rheologiske parametre i forbindelse med udførelse af betonstøbninger med SCC er vist i figur 2.3.



Figur 2.2. De rheologiske parametres indflydelse på hvordan SCC flyder og opfattes af brugeren (betonarbejderen).



Figur 2.3. Sammenhæng mellem danske SCC betoners rheologi og de udførelsesmæssige erfaringer. Indikeret flydemål i mm. på højre vertikale akse.

2.1 MÅLING AF FLYDEEGENSKABER

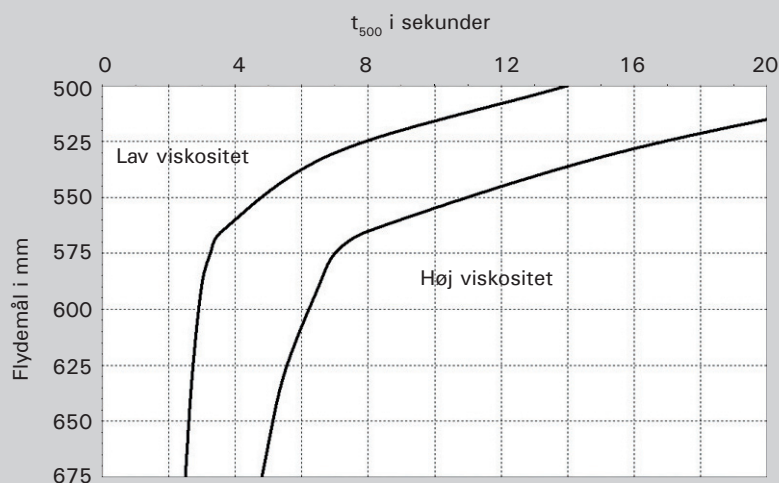
Bestemmelse af de rheologiske parametre kan foretages med et rheometer som f.eks. det islandske BML-viskometer eller ved hjælp af 4C-Rheometer systemet udviklet på Teknologisk Institut i Danmark (figur 2.4). 4C-Rheometret er baseret på gennemførelse af en automatiseret flydemålstest, hvor de rheologiske parametre bestemmes ved analyse af udbredelseskurven. Numerisk simulering af flydemålstesten ligger til grund for analysen. BML-viskometret er et "klassisk" rotationsviskometer, hvor de rheologiske parametre bestemmes ud fra kendskabet til strømningen imellem to coaxiale cylindre.

Det er muligt at koble bestemmelsen af flydemålet med en tidsmåling af det antal sekunder det tager betonen at flyde ud til en flydemålsdiameter på 500 mm (t_{500}). En hurtig udbredelse er lig med lav viskositet og omvendt. I de situationer hvor bestemmelse af de rheologiske parametre ved hjælp af f.eks. 4C-Rheometer eller BML-viskometer ikke er praktisk muligt, kan man alternativt estimere de rheologiske parametre ud fra flydemål og t_{500} baseret på figur 2.5.

Vær opmærksom på at målingen af t_{500} er forbundet med relativt store usikkerheder.



Figur 2.4. 4C-Rheometer øverst og BML viskometer nederst



Figur 2.5. Tidsmåling t_{500} afhængighed af flydemål og viskositetsklasse. Det antages at keglen er retvendt og løftes 15 cm. på ca. 2 sek. i en jævn bevægelse.

3. Materialemodel - SCC sammensætning

For at forudse hvordan ændringer i betonens sammensætning påvirker bearbejdigheden er det en fordel at have en materialemodel, som er forankret i fysiske/kemiske principper snarere end i ren empiri. Det er naturligvis en forudsætning, at der findes metoder til måling af bearbejdelsesparametre som korrekt og entydigt karakteriserer den selvkompakterende betons flydeegenskaber – dette er diskuteret i det forrige afsnit.

Nedenfor er en sådan materialemodel præsenteret. Modellen er udviklet i Japan af S. G. Oh, T. Noguchi and F. Tomosawa (Toward Mix Design for Rheology of Self-Compacting Concrete, Proceedings of the First RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete, pp.361-372, 1999), og kan i langt de fleste tilfælde forklare de observerede ændringer i SCCs rheologiske egenskaber som følge af ændringer i materialesammensætningen.

Modellen udtrykker de to rheologiske parametre plastisk viskositet og flydespænding på følgende form:

$$\eta_{pl} = \eta_{pasta} \cdot (a_{\eta} \cdot \Gamma^{-b_{\eta}} + 1) \quad (3.1)$$

$$\tau_0 = \tau_{0,pasta} \cdot (a_{\tau} \cdot \Gamma^{-b_{\tau}} + 1) \quad (3.2)$$

- η_{pl} er plastisk viskositet af beton
- η_{pasta} er plastisk viskositet af betons pasta
- τ_0 er flydespænding af beton
- $\tau_{0,pasta}$ er flydespænding af betons pasta
- Γ er den relative pastalagtykkelse omkring tilslagspartikler
- a_{τ} , a_{η} , b_{τ} , og b_{η} er konstanter (afhænger af det specifikke produktionsanlæg)

Betonens flydeegenskaber ses at afhænge direkte proportionalt af pastaens flydespænding og plastiske viskositet. Når Γ øges (stort pastalag omkring tilslag) vil parenteser i (3.1) og (3.2) langsomt nærme sig ettallet og flydeegenskaberne for betonen vil være lig med pastaens. Når Γ omvendt mindskes og pastalaget går imod nul vil både flydespænding og plastisk viskositet for betonen vokse uden øvre grænse.

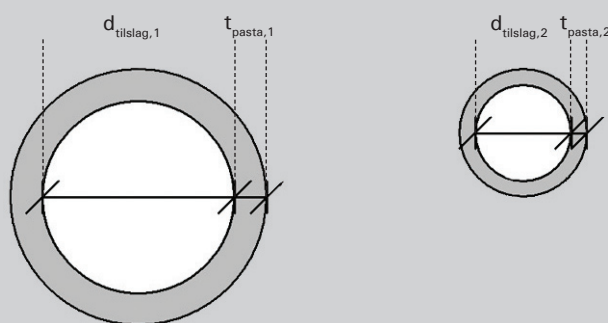
Materialemodellen bygger på, at beton kan ses som et to-fasesystem bestående af tilslag og pasta, hvor pastaen deles op i:

- pasta, der er nødvendig for at fylde hulrummene ud mellem tilslag
- overskudspasta (resten)

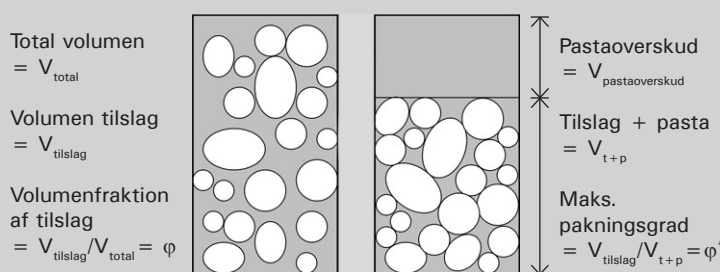
Mængden af overskudspasta er afgørende for betonens flydeegenskaber. Materialemodellen antager, at overskudspastaen fordeles på overfladen af alle tilslagspartikler i et tyndt lag, der er proportionalt med den enkelte tilslagspartikels størrelse. Jo større partikel des tykkere lag, men set i forhold til partiklens diameter, er lagtykkelsen den samme for alle partikler svarende til den relative pastalagtykkelse Γ :

$$\Gamma = \frac{t_{pasta,1}}{d_{tilslag,1}} = \frac{t_{pasta,2}}{d_{tilslag,2}} \quad (3.3)$$

I figur 3.1 er vist to tilslagspartikler med relativt lige tykke pastalag for en given Γ , dvs. at (3.3) er gældende.



Figur 3.1. To tilslagspartikler med samme relative pastalagtykkelse dvs. $\Gamma - t/d = \text{konstant}$



Figur 3.2. Illustration af betons to faser bestående af tilslag og pasta. Til højre er tilslaget i betonen komprimeret til dets maksimale pakningsgrad defineret ved pakningsgraden ϕ^* . Volumenfraktionen af tilslaget betegnes ϕ og ses til venstre.

Ud fra figur 3.2 kan pastaoverskudet udtrykkes på følgende måde vha. pakningsgraden φ :

$$V_{\text{total}} = V_{\text{pastaoverskud}} + V_{\text{t+p}} \quad (3.4)$$

$$\Downarrow$$

$$V_{\text{pastaoverskud}} = V_{\text{total}} - \frac{V_{\text{tilslag}}}{\varphi^*}$$

Nu divideres der med V_{total} som kan betragtes som et enhedsvolumen, og pastaoverskuddet udtrykkes som:

$$V_{\text{pastaoverskud}} = 1 - \frac{\varphi}{\varphi^*} \quad (3.5)$$

I modellen antages det nu, at der på en kugleformet tilslagspartikel med diameter d fordeles et pastaoverskud med konstant tykkelse t .

$$\text{Pastaoverskud} = O_{\text{kugle}} \cdot t = \pi \cdot d_{\text{kugle}}^2 \cdot \Gamma \cdot d_{\text{kugle}} \quad (3.6)$$

$$\Downarrow$$

$$\Gamma = \frac{\text{Pastaoverskud}}{6 \cdot V_{\text{kugle}}}, \quad \begin{cases} O_{\text{kugle}} = \pi d_{\text{kugle}}^2 \\ V_{\text{kugle}} = \frac{\pi d_{\text{kugle}}^3}{6} \end{cases}$$

hvor O_{kugle} = kuglens overfladeareal og V_{kugle} = kuglens rumfang er indsat. Hvis man dernæst indsætter (3.5) i (3.6) fås efter division med referencevolumen V_{total} :

$$\Gamma = \frac{V_{\text{pastaoverskud}}}{6 \cdot \varphi} = \frac{1 - \frac{\varphi}{\varphi^*}}{6 \cdot \varphi} \quad (3.7)$$

Den relative pastatykkelse kan dermed udtrykkes ved hjælp af følgende generelle udtryk:

$$\Gamma = \frac{1 - \frac{\varphi}{\varphi^*}}{f / k \cdot \varphi} \quad (3.8)$$

hvor

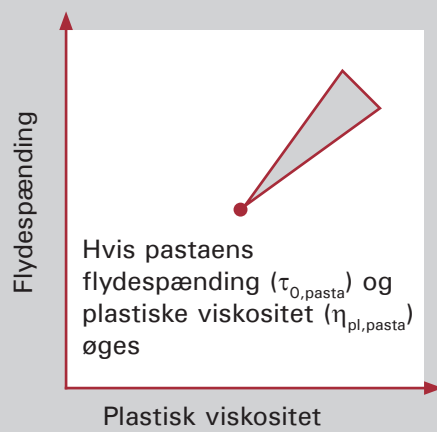
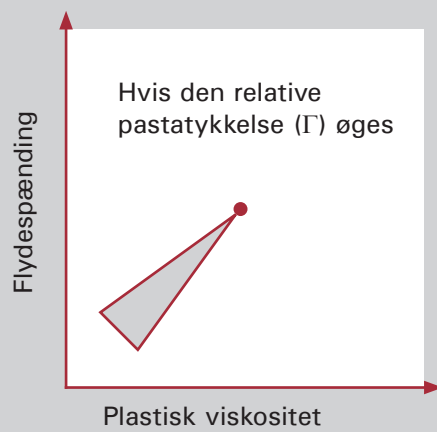
- φ er tilslagets pakningsgrad
- φ^* er tilslagets maksimale pakningsgrad, hvor overskudspasta udelades
- f/k er en faktor der beskriver tilslagets kornform – er lig 6 for den perfekte kugleform og større for alle andre geometrier. Jo mere kornformen afviger fra kuglen des højere værdi.

For danske SCC-betoner vil Γ typisk ligge på værdier mellem 0,02 og 0,05.

Materialemodellen (3.1) og (3.2) sammen med (3.8) forudsiger, at en betons rheologi er en funktion af pastaens sammensætning igennem dennes rheologi udtrykt ved (η_{pasta} , $\tau_{0,\text{pasta}}$), af tilslagets sammensætning (φ^*) og kornform (f/k), samt af det volumetriske forhold imellem pasta og tilslag udtrykt ved φ .

Helt grundlæggende gælder derfor, at bearbejdigheden af en beton kan justeres ved at ændre på enten pastaens bearbejdighed (η_{pasta} eller $\tau_{0,\text{pasta}}$) og/eller den relative pastatykkelse (Γ). Hvis den plastiske viskositet eller flydespændingen af en betons pastafase øges, så øges også betonens plastiske viskositet eller flydespændingen. Hvis den relative pastatykkelse i en beton øges så falder både den plastiske viskositet og flydespændingen af betonen – se i øvrigt figur 3.3.

I kapitel 4 er indflydelsen af specifikke ændringer af betonsammensætningen diskuteret og underbygget af eksperimentelle målinger og materialemodellen anvendes til at forklare de gjorte observationer.



Figur 3.3. Grundlæggende ændringer af en betons rheologi som forudsagt af materialemodellen.

4. Sammensætning og flydeegenskaber

4.1 TILSLAGSMÆNGDE (φ)

Volumenandelen af tilslag i SCC har betydning for bearbejdigheden på samme måde som det også er tilfældet for konventionel sætmålsbeton. Fra sætmålsbeton er det kendt at når indholdet af tilslag sænkes så stiger sætmålet jf. Popovics, Betonbogen, 2. udgave, side 681 og CtO Beton-Teknik 2.11.1999, Aalborg. "Pakningsberegninger anvendt til betonproportionering". I sidstnævnte ses bl.a. at en forøgelse af volumenfraktionen af tilslaget svarende til 10 liter pr. m^3 sænker sætmålet med 50 mm. Der findes desværre endnu ikke tilsvarende kurver for SCC, men det er klart, at en forøgelse af volumenfraktionen af tilslaget vil betyde en højere flydespænding (lavere flydemål) og plastisk viskositet. Dette er også i overensstemmelse med materialemodellen, som forudsiger, at en forøgelse af volumenfraktionen af tilslaget (φ), som er lig med at den relative pastatykkelse (Γ) bliver mindre, fører til en stigning i både flydespændingen og den plastiske viskositet.

Et eksempel på effekten af at øge pastaindholdet (sænke volumenfraktionen af tilslaget) er vist i tabel 4.1. Både flydespænding og plastisk viskositet falder når mængden af pasta (l/m^3) øges. Dette er i overensstemmelse med materialemodellen jf. figur 3.3, idet en forøgelse af pastaindholdet betyder, at den relative pastatykkelse (Γ) stiger.

4.2 KORNFORM (f/k)

Der har stor betydning om der benyttes afrundede eller kantede tilslag i en SCC. Kantede korn nødvendiggør mere pasta pr. m^3 end afrundede korn, hvilket også er kendt fra konventionel sætmålsbeton. Som det fremgår af figur 4.3 kan man opnå samme flydespænding med en recept, som indeholder ca. 50 liter/ m^3 mindre pasta, hvis man anvender afrundede sømaterialer i stedet for knuste granitter. Hvis man kunne anvende glaskugler (både som groft og fint tilslag) ville det være muligt at spare yderligere 50 liter/ m^3 pasta.



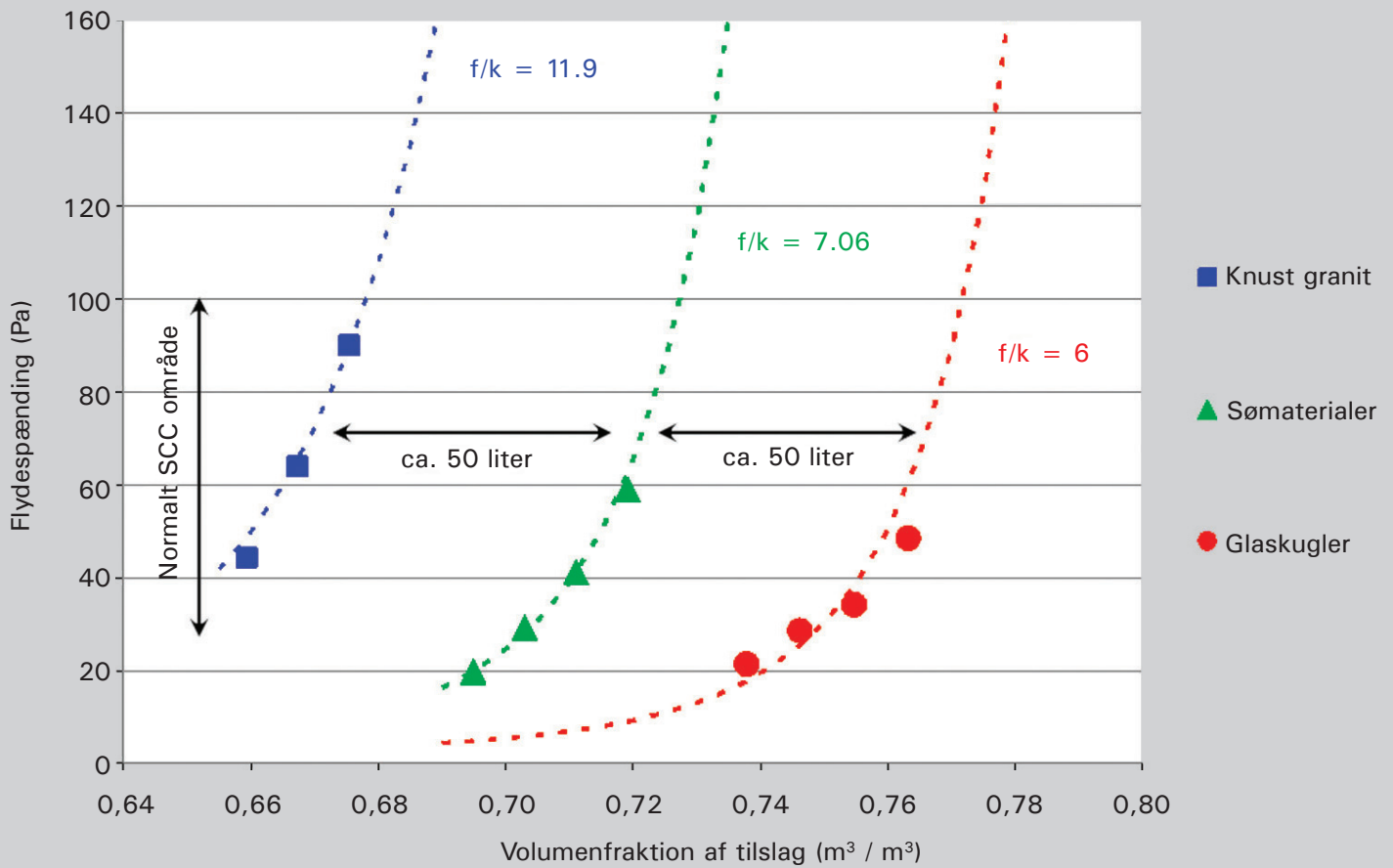
Figur 4.1. Hvis tilslagsmængden (φ) sættes ned falder både den plastiske viskositet og flydespændingen.



Figur 4.2. Hvis kantetheden og eller ruheden (f/k) af tilslaget øges så stiger både den plastiske viskositet og flydespændingen.

Beton	Tilslag (l/m ³)	Pastaoverskud (l/m ³)	Flydemål (mm)	Flydespænding (Pa)	Plastisk viskositet (Pa·s)
A	712,1	140	495	94	44
B	699,7	155	580	44	39
C	691,4	165	620	32	29

Tabel 4.1. Ændring af de rheologiske parametre som følge af et stigende pasta-indhold i SCC.



Figur 4.3. Indflydelse af stenenes kornform (f/k) på flydespænding vist som funktion af volumenfraktion af tilslag i betonen. Stiplede kurver og f/k -værdier estimeret ud fra Materialemodellen (ligning 3.2).

4.3 SANDETS KORNKURVE

For betonsand sammensat ved blanding af forskellige fraktioner af tørret kvartssand vil en forøgelse af sandets finhed medføre at både den plastiske viskositet og flydespændingen forøges, når betonsammensætningen i øvrigt holdes konstant (tabel 4.2).

Det dog vigtigt at gøre opmærksom på at det er relativt komplekst at vurdere effekten af sandets kornkurve på SCCs flydeegenskaber. Hvis man entydigt skal vurdere indflydelsen af f.eks. sandets kornkurve på en SCC-beton må man nødvendigvis arbejde med en sandforekomst hvor densitet, kornform, mv. er identiske for alle sandets partikler uanset størrelse. For naturmaterialer vil disse krav sjældent kunne overholdes, og man kan f.eks. ikke direkte sammenligne to forskellige forekomster. Samtidig skal man være opmærksom på at pakningsgraden af sandet og dermed af det sammensatte tilslag kan ændre sig når sandets kornkurve ændres. Desuden kendes indflydelsen af sandets kornkurve på SCCs følsomhed overfor naturlige variationer i delmaterialeegenskaber ikke.

4.4 VANDCEMENTTAL

Det realistiske scenarium at betragte i forbindelse med vandcementtallet er indflydelsen på den plastiske viskositet under forudsætning af at flydespændingen (flydemålet) holdes konstant. Hvis vandcementtallet sænkes, vil det som udgangspunkt medføre, at mængden af superplastificerende tilsætningsstof må sættes op for at fastholde flydemålet. Samtidig observeres en stigning af den plastiske viskositet, som sandsynligvis skyldes, at faststofindholdet i pastaen er højere jo lavere vandcementtallet er.

I tabel 4.3. er vist et eksempel på indflydelse af v/c-tallet på de rheologiske parametre. Betonerne A og B blev produceret på en betonfabrik og var "identiske" bortset fra v/c-tallet, som var 0,59 henholdsvis 0,40. Som det fremgår af tabellen, var den plastiske viskositet væsentligt højere af betonen med det lave v/c-tal.

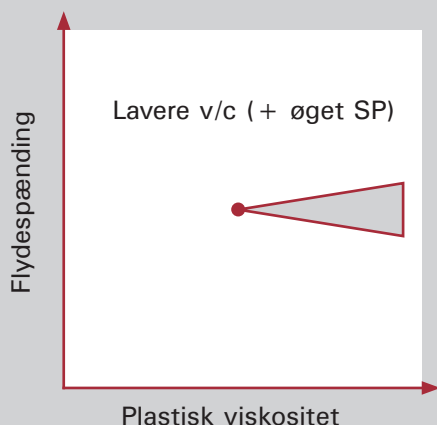
4.5 FLYVEASKE

Flyveaske finder udbredt anvendelse i dansk SCC. Flyveaske består af kugleformede partikler af omtrent samme størrelse som cementkorn, men med en væsentlig lavere densitet på gennemsnitligt ca. 2300 kg/m³. Proportioneringsmæssigt har flyveaske en k-faktor på 0,5, hvorfor 2 kg flyveaske erstatter 1 kg cement ved beregning af v/c-tal. Hvis betonens pastaindhold i øvrigt holdes konstant, vil flyveaske således erstatte både cement og vand. Øget flyveaskeindhold i beton vil derfor resultere i, at faststofvolumenet i pastaen øges, pga. k-faktoren og den lavere densitet af flyveasken i forhold til cement. Dette resulterer i, at den plastiske viskositet stiger og behovet for superplast stiger - analogt til en sænkning af vandcementtallet.

I tabel 4.4 er vist resultaterne af nogle målinger på SCC-beton med varierende flyveaskeindhold ved konstant pastaindhold og v/c-tal.

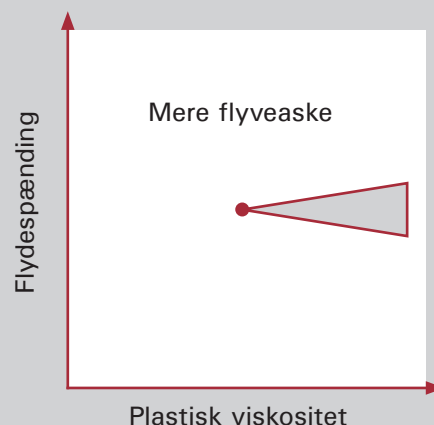


Figur 4.4. Hvis finheden af sandet øges ved fastholdt sand:sten så stiger flydespændingen og den plastiske viskositet.



Figur 4.5. Lavere v/c-tal øger den plastiske viskositet når flydespændingen holdes konstant (konstant pastamængde).

Lavere v/c-tal kræver mere SP hvis pastamængden holdes konstant.



Figur 4.6. Større indhold af flyveaske øger den plastiske viskositet ved fastholdt flydespænding (konstant v/c-tal og pastamængde). Større indhold af flyveaske øger behovet for SP (konstant v/c-tal).

Beton	Sand	Gennemfald på 0,250 mm. (%)	SP dosering (% af pulver)	v/c	Flydemål (mm)	Flydespænding (Pa)	Plastisk viskositet (Pa·s)
A	Fin	30	0,79	0,38	400	265	191
B	Mellem	20	0,79	0,38	430	191	86
C	Grov	10	0,79	0,38	540	64	68

Tabel 4.2. Indflydelse af sandets kornkurve på de rheologiske parametre af SCC.

Beton	Tilslag (l/m ³)	v/c	Flydemål (mm)	Flydespænding (Pa)	Plastisk viskositet (Pa·s)
A	341	0,59	630	30	47
B	341	0,40	675	21	223

Tabel 4.3. Ændring af de rheologiske parametre som følge af et lavere v/c-tal ved konstant pastaindhold i SCC. Doseringen af superplast var 0,9 % for beton A og 1,6 % for beton B.

Beton	Cement:Flyveaske (vol:vol)	Pasta (l/m ³)	v/c	SP kg/m ³	Flydemål (mm)	Flydespænding (Pa)	Plastisk viskositet (Pa·s)
A	60:40	300	0,59	1,17	570	44	11
B	50:50	300	0,59	1,51	565	46	22
C	40:60	300	0,59	1,60	580	41	28

Tabel 4.4. Ændring af de rheologiske parametre som følge af et større flyveaskeindhold ved konstant flydespænding, v/c og pastaindhold i SCC.

4.6 MIKROSILICA

Mikrosilica består af kugleformede partikler som i gennemsnit er ca. 100 gange mindre end cementkorn, men med en væsentlig lavere densitet på gennemsnitligt ca. 2200 kg/m³. Proportioneringsmæssigt har mikrosilica en k-faktor på 2, hvorfor 1 kg mikrosilika erstatter 2 kg cement ved beregning af v/c-tal. Hvis betonens pastaindhold iøvrigt holdes konstant, vil erstatning af cement med mikrosilika betyde, at vandindholdet i betonen øges. Øget mikrosilicaindhold i beton vil derfor resultere i at faststofvolumenet i pastaen mindskes, pga. k-faktoren, idet denne effekt ikke opvejes af den lavere densitet af mikrosilica i forhold til cement.

I tabel 4.5 er vist et eksempel på hvordan øget indhold af mikrosilica påvirker de rheologiske egenskaber af en SCC-beton, idet v/c, pastaindhold og flydemål er holdt konstant. Det ses, at den plastiske viskositet falder når indholdet af mikrosilica øges. Eksempelvis falder viskositeten ca. til det halve hvis 14 volumenprocent cement erstattes med mikrosilica.

4.7 SUPERPLASTIFICERENDE TILSÆTNINGSSTOF (SP)

SP er nødvendigt for at producere SCC. Når doseringen af SP øges, falder betonens flydespænding mens den plastiske viskositet forbliver stort set upåvirket.

Et eksempel på indflydelsen af doseringen af SP på de rheologiske parametre er vist i tabel 4.6.

Der findes mange typer af superplastificerende tilsætningsstoffer på markedet, og ikke alle er lige gode til enhver betontype. Således findes der eksempler på inkompatibilitet imellem cementtype og superplasttype, hvor det simpelthen har været umuligt af opnå tilfredsstillende flydeegenskaber i form af tilstrækkelig lav flydespænding af SCC.

4.8 STABILISATOR (VMA)

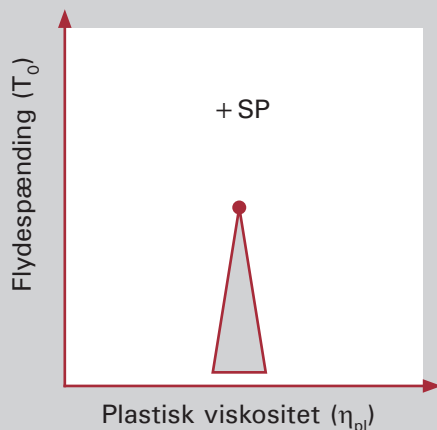
Stabilisatorer finder udbredt anvendelse til SCC i nogle lande, men i Danmark ser denne type tilsætningsstof kun beskednen anvendelse. Baseret på resultater for to typer stabilisator påvirker den type tilsætningsstof stort set udelukkende de rheologiske egenskaber gennem en forøgelse af flydespændingen. Betegnelsen stabilisator dækker over mange produkter og det kan ikke udelukkes at der findes produkter som har en anden effekt på de rheologiske parametre end den ovenfor beskrevne.

Stabilisator kan anvendes til at redde en beton som på grund af for lav flydespænding ellers vil separere. Der er også spekuleret i, at stabilisator kan bevirke at SCC bliver nemmere at pumpe, hvilket sagtens kan være tilfældet, men som dog indtil videre må anses for ikke at være dokumenteret.

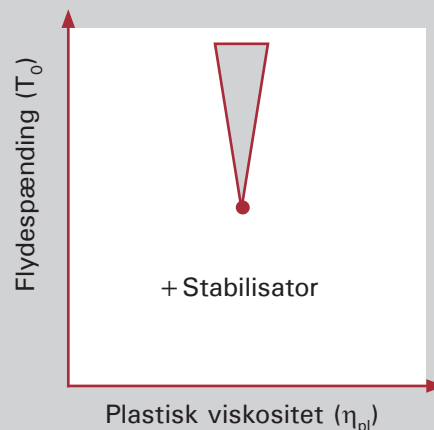
Eksempler på indflydelsen af stabilisator (VMA) på de rheologiske egenskaber af SCC er vist i tabel 4.7.



Figur 4.7. Mikrosilica nedsætter den plastiske viskositet ved fastholdt flydespænding, pastaindhold og v/c-tal. Mikrosilicaindhold større end ca. 8 %-vol af pulveret øger behovet for SP (konstant v/c-tal).



Figur 4.8. Forøget dosering af superplastificerende tilsætningsstof mindsker flydespændingen. Forøget dosering af superplastificerende tilsætningsstof påvirker ikke den plastiske viskositet nævneværdigt.



Figur 4.9. Tilsætning af stabilisator øger flydespændingen. Tilsætning af stabilisator påvirker ikke den plastiske viskositet nævneværdigt.

Beton	Cement:Mikrosilica (vol:vol)	SP (kg/m ³)	Pasta (l/m ³)	v/c	Flydemål (mm)	Flydespænding (Pa)	Plastisk viskositet (Pa·s)
A	100:0	3,85	300	0,38	545	59	85
B	96:4	3,77	300	0,38	520	74	64
C	92:8	4,03	300	0,38	540	62	59
D	86:14	4,18	300	0,38	480	110	39
E	75:25	4,95	300	0,38	500	90	37

Tabel 4.5. Ændring af de rheologiske parametre som følge af et større mikrosilicaindhold ved "konstant" flydespænding, v/c og pastaindhold i SCC.

Beton	SP dosering (% af pulver)	v/c	Flydespænding (Pa)	Plastisk viskositet (Pa·s)
A	0,79	0,38	191	86
B	0,89	0,38	37	79
C	0,97	0,38	27	65

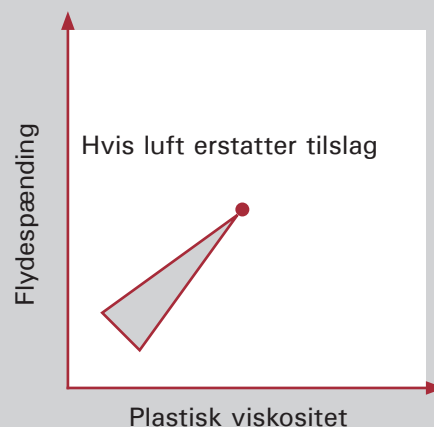
Tabel 4.6. Ændring af de rheologiske parametre som følge af en højere dosering af superplast ved konstant v/c og pastaindhold.

Beton	VMA (% af pulver)	v/c	Flydemål (mm)	Flydespænding (Pa)	Plastisk viskositet (Pa·s)
A	-	0,59	615	33	24
A	0,20 %	0,59	570	48	30
B	-	0,42	575	46	62
B	0,30 %	0,42	480	110	65

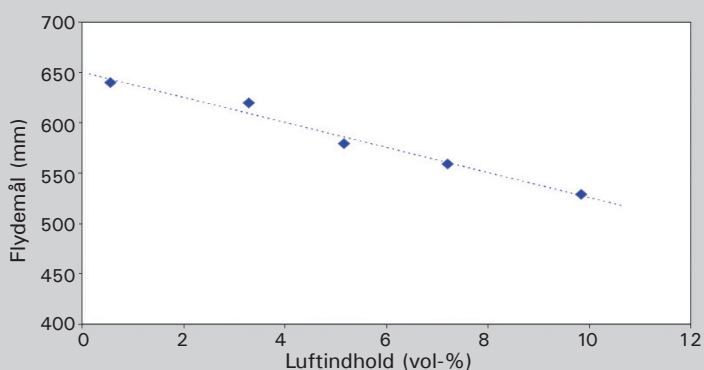
Tabel 4.7. Rheologiske parametre af to betoner før og efter tilsætning af stabilisator.

4.9 LUFTINDBLANDING

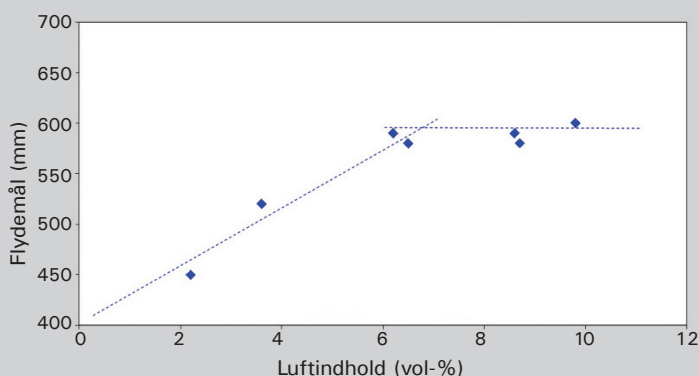
Luftindblanding af beton er meget ofte anvendt i Danmark også i beton hvor der ikke er krav om frostbestandighed. Indblandet luft bør nok betragtes som en del af pastafasen selv om luft ikke har samme bearbejdelighedsforbedrende effekt som pasta. Dette er illustreret i figur 4.11, som viser at for fastholdt volumen af pasta + luft så falder flydemålet for stigende indhold af luft i betonen. Effekten af at øge mængden af indblandet luft på bekostning af tilslag i vist i figur 4.12, hvoraf det fremgår at flydemålet stiger med stigende luftindhold op til et luftindhold på ca. 6 %, hvorefter flydemålet ikke påvirkes af yderligere luftindblanding. Udskiftning af luft med tilslag er analogt med til at mindske volumenfraktionen af tilslag hvilket jfr. materialemodellen også burde føre til et større flydemål (flydespænding) og til lavere plastisk viskositet. Det sidste er dog ikke bekræftet ved forsøg.



Figur 4.10. Hvis luft erstatter tilslag forøges bearbejdeligheden op til ca. 6 % indblandet luft. Forøget indblandet luftindhold over 6 %-vol bidrager ikke til øget bearbejdelighed. Et volumen pasta giver større bearbejdelighed end det samme volumen indblandet luft.



Figur 4.11. Flydemål som funktion af luftindhold for beton med konstant indhold af pasta + luft. Et volumen pasta giver større bearbejdelighed end det samme volumen indblandet luft.



Figur 4.12. Flydemål som funktion af luftindhold for beton med konstant pasta-indhold og stigende luftindhold. Udskiftning af tilslag med luft giver øget bearbejdelighed op til et luftindhold på ca. 6 %.

4.10 JUSTERING AF EN BETONRECEPTS RHEOLOGI

Hvis man ønsker at justere på en eksisterende recepts rheologi kan man i tabel 4.8 få inspiration til hvordan dette kan ske gennem ændringer af betonsammensætningen.

RECEPTÆNDRING	FLYDESPÆNDING	PLASTISK VISKOSITET
Mere pasta (mindre tilslag)	↓	↓
Mere SP	↓	↓
Mere flyveaske	holdt konstant med dosering af SP	↑
Mere mikrosilica	holdt konstant med dosering af SP	↓
Mere stabilisator	↑	konstant
Højere v/c tal	holdt konstant med dosering af SP	↓
Mere afrundet kornform	↓	↓
Finere sand	↑	↑

Tabel 4.8. Indflydelse af recept justeringer på de rheologiske parametre af SCC. Grønt felt betyder at værdien af parameteren bliver mindre ved den nævnte ændring, rød farve betyder at værdien bliver større, og gul farve betyder at parameteren ikke påvirkes.

5. Koncept for udvikling af ny SCC

Sammensætning af dansk SCC adskiller sig ikke væsentligt fra sammensætningen af traditionel sætmålsbeton. Den væsentligste forskel er, at SCC har et højere pastaindhold. I det følgende er der givet en punktvis beskrivelse af koncept for sammensætning af SCC helt fra bunden. Efterfølgende gives der et eksempel ved anvendelse af det beskrevne koncept.

1. Egenpakningen af tilslagsmaterialerne bestemmes jf. CtO Beton-Teknik "Pakningsberegninger som hjælpemiddel ved betonproportionering", Alborg Portland 02.11.1999.
2. Der gennemføres en pakningsberegning fx ved hjælp af hjælpeprogram såsom 4C-Packing (fra Teknologisk Institut). 4C-Packing kombinerer tre tilslagsfraktioner og giver et trekantsdiagram over pakningsgraden som funktion af den indbyrdes mængdefordeling. Der vælges en kombination som ligger lidt på den mørtelrige side af pakningsoptimum, hvor niveaukurver ligger langt fra hinanden så variationer har mindre betydning. Et eksempel er givet nedenfor i figur 5.1. Såfremt det er økonomisk forsvarligt kan et højere sandindhold udmærket anvendes ud fra et rheologisk synspunkt.
3. Ud fra specifikationerne på betonen er miljø- og styrkeklassen givne, hvilket stiller krav til cementtype, mineralske tilsætninger og minimum v/c-tal. Fastlæggelse af pulversammensætningen foregår derfor på den traditionelle måde. Med kendskab til ønsket pulverkombination (det antages at der anvendes en kombination af cement og flyveaske men andre kombinationer af pulver, mikrosilica, kalkfiller etc., kan anvendes blot formlerne korrigeres til at tage højde herfor) og v/c-tal kan vandbehovet beregnes ud fra følgende udtryk:

$$\left(\frac{v}{c}\right)_{\text{ækv}} = \frac{m_v}{m_c + K_{fa} m_{fa}} \quad \text{og} \quad x_{fa} = \frac{m_{fa}}{m_c} \quad (5.1)$$

hvor der er regnet med en cement-flyveaske pulverkombination, som det ofte er tilfældet i SCC. Indeks ækv betyder, at v/c-tal beregnes under hensyntagen til k-faktoren K_{fa} . Vægtfordelingen af flyveaske set i forhold til cement er betegnet x_{fa} . Når de to udtryk samles fås et udtryk for vandbehovet, som funktion af pulverkombinationen:

$$m_v = m_c \left(\frac{v}{c}\right)_{\text{ækv}} (1 + K_{fa} x_{fa}) \quad (5.2)$$

og flyveaskemængden er bestemt af

$$m_{fa} = x_{fa} m_c \quad (5.3)$$

4. For SCC er der krav til et ønsket flydemål, som igen kan omskrives til et pastaoverskud i betonen. For et tilstræbt flydemål på 550 mm vil et udgangspunkt være 140 l/m³ pastaoverskud for afrundede materialer (sømaterialer) og 180 l/m³ pastaoverskud for de knuste materialer (granit), hvis betonen ikke er luftindblandet. Hvis betonen luftindblandes kan der tages udgangspunkt i et pastaoverskud som er ca. 20 l/m³ mindre. Tilslagsmængden og pastaoverskuddet er forbundet ved følgende udtryk:

$$V_{\text{tilslag}} = (1 - V_{\text{pastaoverskud}}) \varphi^* \quad (5.4)$$

hvor φ^* er den valgte pakningsgrad opnået i forbindelse med pakningsanalysen. Med kendskab til tilslagsvolumen og tilslagsdensitet kan vægten af de enkelte tilslagsfraktioner nemt beregnes.

5. På basis af ovennævnte størrelser kan de øvrige delmaterialer proportioneres vha. følgende volumenregnskab:

$$V_v + V_c + V_{fa} = 1 - V_{tilsl} - V_{luft} - V_{add} \quad (5.5)$$

hvor venstresiden summerer pastaens volumen og højresiden angiver hulrummet mellem tilslagsmaterialet fratrukket luft og tilsætningsstoffer. Efter en let omskrivning fås

$$\frac{m_v}{\rho_v} + \frac{m_c}{\rho_c} + \frac{m_{fa}}{\rho_v} = 1 - V_{tilsl} - V_{luft} - V_{add} \quad (5.6)$$

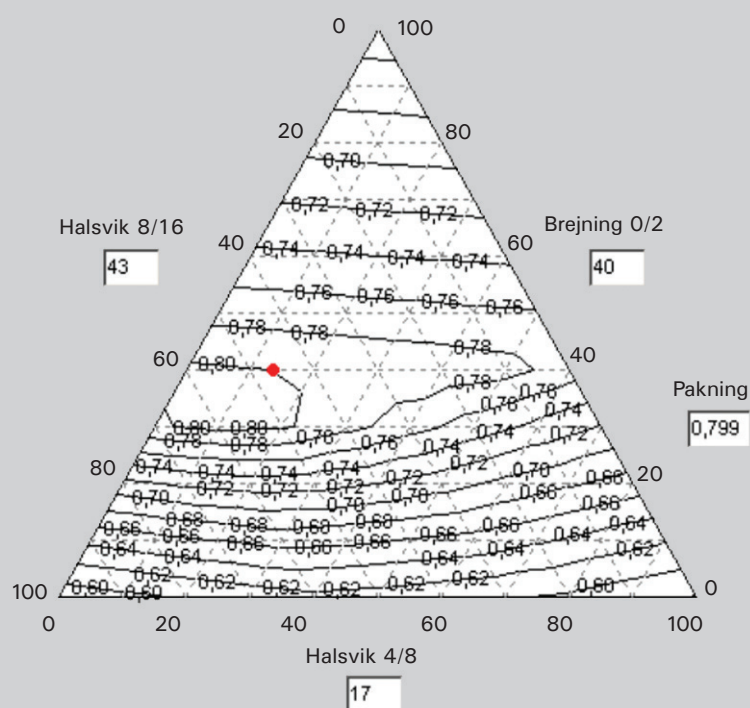
Dernæst indsættes (5.2) og (5.3) i venstresiden af (5.6) og ligningen løses mht. cementindholdet, hvilket efter et par omrokeringer ender med følgende:

$$m_c = \frac{1 - V_{tilsl} - V_{luft} - V_{add}}{\left(\frac{v}{c}\right)_{\text{ækv}} \frac{(1 + K_{fa} \cdot x_{fa})}{\rho_v} + \frac{1}{\rho_c} + \frac{x_{fa}}{\rho_{fa}}} \quad (5.7)$$

hvorfra cementindholdet kan bestemmes, idet det

antages at luftindhold og tilsætningsstoffer er kendte størrelser. Når cementindholdet således er bestemt kan også vand- og flyveaskeindhold bestemmes under pkt. 3.

6. Der er således skabt et fornuftigt grundlag for prøveblandinger hvor tilsætningsstoffer justeres ind på baggrund af leverandørens anvisninger og egne erfaringer indtil den ønskede konsistens opnås.



Figur 5.1. Pakningstrekanter for typiske danske klasse E materialer. Den røde prik repræsenterer en god kombination af tilslag med en pakningsgrad på 0,799 (ϕ').

Eksempel

En SCC-beton skal sammensættes ud fra følgende forudsætninger:

- Styrkeklasse C25
 - Vandcementtal = 0,59
 - Der anvendes rapidcement ($\rho_c = 3160 \text{ kg/m}^3$)
 - Der anvendes flyveaske ($\rho_{fa} = 2300 \text{ kg/m}^3$ og $K_{fa} = 0,5$)
 - $x_{fa} = 0,667$, dvs. 2:3 fordeling mellem flyveaske og cement på vægtbasis
- Flydemål = 550 mm
- Luftindhold i den friske beton = 1,5 %, dvs. ingen luftindblanding
- Tilslagsmaterialer: 0/4 (densitet_{VOT} = 2643 kg/m³), 4/8 (densitet_{VOT} = 2682 kg/m³), 8/16 (densitet_{VOT} = 2648 kg/m³)

Trin 1:

Egenpakning af de tre tilslagsfraktioner blev bestemt til 0,700 (0/4 fraktion), 0,663 (4/8 fraktion) og 0,643 (8/16 fraktion). Pakningdiagrammet for de tre fraktioner er vist i figur 5.2. Den valgte tilslagssammensætning på volumenbasis er 40% 0/4, 20% 4/8 og 40% 8/16 med en pakningsgrad på 0,828.

Trin 2:

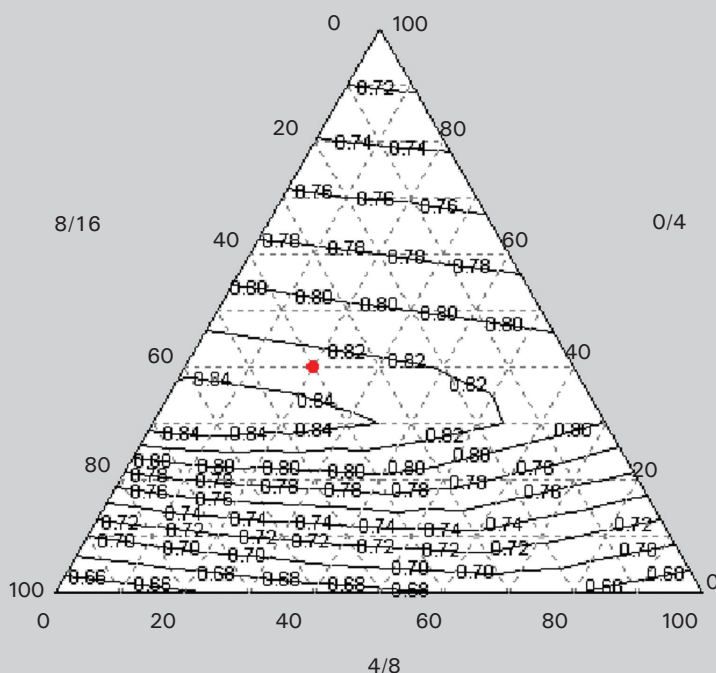
Betonreceptens indhold af tilslag kan nu beregnes vha. (5.4):

$$V_{\text{tils}} = (1 - V_{\text{pastaoverskud}}) \cdot \varphi^* = (1 - 0,140) \cdot 0,828 = 0,712 = 712 \text{ l/m}^3$$

Da tilslagsmaterialerne er afrundede vælges som udgangspunkt et pastaoverskud på 140 l/m³. Tilslagets volumen vil således være 712 l/m³ og fordelt på de tre fraktioner svarende til 284,8, 142,4 og 284,8 l/m³ for hhv. fraktion 0/4, 4/8 og 8/16. Disse volumener kan naturligvis omregnes til kg/m³ ud fra kendskabet til tilslagsmaterialernes densiteter.

Trin 3:

Totalmængden af pasta inklusive luft og tilsætningsstoffer udgør 1000 l/m³ – 712 l/m³ = 288 l/m³. Luftindholdet er 15 l/m³ og tilsætningsstofferne skønnes til at udgøre 0,5 l/m³, hvilket betyder i alt 272,5 l/m³ cement, flyveaske og vand.



Figur 5.2. Pakningsdiagram beregnet vha. 4C-Packing for 0/4, 4/8 og 8/16 fraktionerne anvendt i dette eksempel. Den valgte kombination af tilslag symboliseret af den røde prik (40 % 0/4, 20 % 4/8 og 40 % 8/16) har en pakningsgrad φ^* på 0,828.

Cementindholdet beregnes ved indsættelse i (5.7):

$$m_{\text{cement}} = \frac{1 - 0,712 - 0,015 - 0,0005}{\frac{0,59 \cdot (1 + 0,5 \cdot 0,667)}{1000} + \frac{1}{3160} + \frac{0,667}{2300}} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3} \right)$$

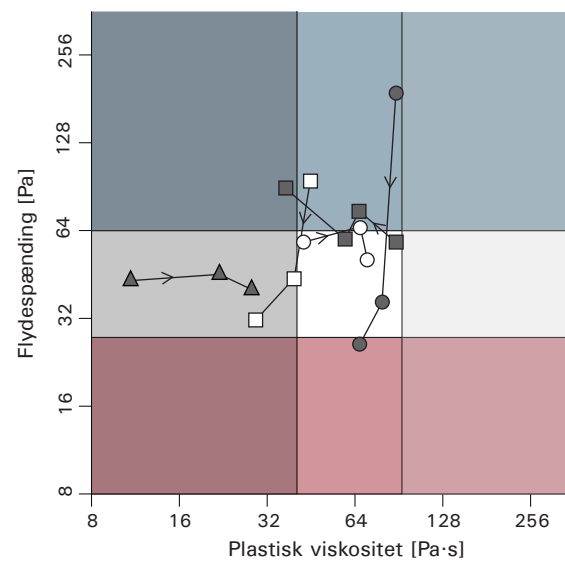
$$= \frac{0,2725}{0,001393} = 195,6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Indsættes dernæst i (1) og (2) fås det, at betonen skal indeholde 130,4 kg flyveaske, og 153,8 kg vand pr. m³. Tilslagsmængderne er angivet i skemaet nedenfor.

Trin 4:

På basis af prøveblanding blev der fundet en passende dosering af SP og den endelige recept ses herunder:

Materiale	SSD [kg/m ³]
Rapidcement	195,6
Flyveaske	130,4
Vand	153,8
Sand 0/4 mm	754
Sten 4/8 mm	382
Sten 8/16 mm	753
Superplast	2,0
Luft	15
v/c-tal	0,59
Flydemål (mm)	550
Flydespænding (Pa), 4C-Rheometer	57
Plastisk viskositet (Pa s), 4C-Rheometer	37



- **SP**, stigende dosering - v/c og pastaandhold er konstant
- **Mikrosilica**, stigende indhold - Ækvivalent v/c og flydespænding holdt næsten konstant ved at variere dosering af superplast.
- ▲ **Flyveaske**, stigende indhold - Ækvivalent v/c og flydespænding holdt næsten konstant ved at variere dosering af superplast.
- **Ækvivalent v/c**, faldende værdi - Pastaandhold er konstant og flydespænding næsten holdt konstant ved at variere dosering af superplast.
- **Pasta**, stigende indhold - Ækvivalent v/c og dosering af superplast holdt konstant.