Dette afgangsprojekt omhandler undersøgelsen af, hvorvidt det er muligt at reducere risikoen for separation, af den friske beton, gennem tilsætningen af lermineraler. Der er anvendt en lokalt forekommende lerslam, der tilvejebringes ved afvaskning af tilslagsmaterialer samt et kommercielt tilgængeligt lerprodukt.

Gennem forsøg er det dokumenteret, at begge lerprodukter har en stabiliserende effekt. Stabiliteten er vurderet ud fra følsomheden af flydemålet samt risikoen for separation ved variationer i vandindholdet. Tilsætningen af lermineraler medfører, at det er nødvendigt at øge pastavolumenet, for at opnå de ønskede reologiske egenskaber.

En laseranalyse afslørede at begge lerprodukters kornkurve mindede meget om kornkurven for flyveaske. På baggrund af dette blev der foretaget forsøg, hvor lertilsætningen blev erstattet med en tilsvarende mængde flyveaske. Forsøgene viste, at det ikke er partikelstørrelsen, der skaber stabiliteten, men derimod lermineralernes partikelform samt evne til at optage vand.

I forbindelse med forsøgene blev der udstøbt prøvelegemer af betonen tilsat lermineraler. Gennem måling af de hærdnede prøvelegemers trykstyrke og elasticitetskoefficient kunne det konstateres, at lertilsætningen ikke påvirker disse væsentligt.

Regulering af selvkompakterende betons reologi ved tilsætning af lermineraler

Regulering af selvkompakterende betons reologi ved tilsætning af lermineraler

Af Henrik B. Jensen, Thomas P. Madsen & Christian B. Ruggaard

Aalborg Universitet
Det Ingeniør, Natur og Sundhedsvidenskabelige Fakultet
Institut for Byggeri og Anlæg
9. og 10. semester, juni 2009

Aalborg Universitet
Det Ingeniør, Natur og Sundhedsvidenskablige fakultet
Institut for Byggeri og Anlæg

Titel: Regulering af selvkompakterende betons reologi ved tilsætning af lermineraler
Forfattere: Henrik B. Jensen, Thomas P. Madsen og Christian B. Ruggaard
Vejleder: Eigil V. Sørensen
Projektperiode: 1. september 2008 - 23. juni 2009
Oplagstal: 5
Sidetal: 240

Synopsis:

Dette afgangsprojekt omhandler undersøgelsen af, hvorvidt det er muligt at reducere risikoen for separation, af den friske beton, gennem tilsætningen af lermineraler. Der er anvendt en lokalt forekommende lerslam, der tilvejebringes ved afvaskning af tilslagsmaterialer samt et kommercielt tilgængeligt lerprodukt.

Gennem forsøg er det dokumenteret, at begge lerprodukter har en stabiliserende effekt. Stabiliteten er vurderet ud fra følsomheden af flydemålet samt risikoen for separation ved variationer i vandindholdet. Tilsætningen af lermineraler medfører, at det er nødvendigt at øge pastavolumenet, for at opnå de ønskede reologiske egenskaber.

En laseranalyse afslørede at begge lerprodukters kornkurve mindede meget om kornkurven for flyveaske. På baggrund af dette blev der foretaget forsøg, hvor lertilsætningen blev erstattet med en tilsvarende mængde flyveaske. Forsøgene viste, at det ikke er partikelstørrelsen, der skaber stabiliteten, men derimod lermineralernes partikelform samt evne til at optage vand.

I forbindelse med forsøgene blev der udstøbt prøvelegemer af betonen tilsat lermineraler. Gennem måling af de hærdnede prøvelegemers trykstyrke og elasticitetskoefficient kunne det konstateres, at lertilsætningen ikke påvirker disse væsentligt.

Abstract:

This project deals with the investigation of whether it is possible to reduce the risk of segregation in the fresh concrete through the addition of clay minerals. In the study a locally occuring clay slurry obtained by the washing of aggregates and a commercially available clay product is used.

Through experiments it is documented that both clays have a stabilizing effect. Stability is assessed on basis of the sensitivity of the slump flow and the risk of segregation by variations in the water content. The addition of clay minerals necessitate an increase in the paste volume in order to achieve the desired rheological properties.

A laser analysis revealed that the grain curve of both clays was similar to the grain curve of fly ash. In light of this experiments was conducted where the clays were replaced by an equivalent amount of fly ash. The experiments showed that it is not the particle size but the shape of the clay minerals and their ability to absorp water that creates stability.

In connection with the experiments test specimens of the concrete containing clay minerals were cast. By measuring the compressive strength and Youngs modulus of the test specimens it was established that the addition of clay minerals have no influence on these.

Forord

Denne rapport er resultatet af et langt afgangsprojekt på civilingeniøruddannelsens 9. og 10. semester på Aalborg Universitets Bygge- og Anlægskonstruktionslinie.

Rapporten består af en hovedrapport og et appendiks placeret bagerst i rapporten. Derudover er der vedlagt en CD, hvor relevante programmer og forsøgsdata forefindes. På CDen findes ligeledes rapporten i PDF-format.

Kilder er angivet på følgende måde: [Forfatter, udgivelsesår]. Bagerst i rapporten findes den komplette litteraturliste. Ved kilder hentet fra internettet er det angivet, hvornår disse sidst er besøgt.

Projektet er gennemført i samarbejde med Kroghs A/S, Unicon A/S og Aalborg Portland A/S. Kroghs A/S har leveret tilslagsmateriale og lerslam til forsøgene og der rettes en speciel tak til produktionschef Lars Andersen, som også har bistået med opklarende oplysninger. Unicon A/S har leveret nogle af delmaterialerne og i den forbindelse rettes en speciel tak til regionschef i produktion Nord, Henrik Walter Larsen. Aalborg Portland A/S har leveret cementen og kaolinen til forsøgene. Desuden har de været behjælpelig med analyse af diverse lerprøver samt hjulpet med generelle opklarende oplysninger. I den forbindelse rettes en speciel tak til geolog Jakob Lund.

Desuden takkes vejleder lektor Eigil V. Sørensen og ingeniørassistent i betonlaboratoriet Per Knudsen for godt samarbejde.

Aalborg, juni 2009

Henrik Beier Jensen

Thomas Pilegaard Madsen

Christian Bjerre Ruggaard

Indhold

I Projektbeskrivelse **11**

1 Indledning **13**

2 Problemanalyse **15**
2.1 Selvkompakterende beton 15
2.2 Delmaterialer i SCC 18
2.3 Erfaringer med lermineraler i beton 21

3 Problemformulering **27**

4 Problemafgrænsning **29**

II Teori **31**

5 Lermineraler **33**

6 Karakterisering af de anvendte lertyper **41**
6.1 Røntgendiffraktometri 41
6.2 Elektronmikroskopi 45
6.3 Resultatbehandling 49

7 Hydratisering af kitmasse **59**

8 Reologi **63**
8.1 Newton'ske væsker 63
8.2 Bingham-materialer 64
8.3 Bearbejdlighedsparametre 64
8.4 Betonens flydeegenskaber 65

8.5 Måling af reologiske parametre 67

9 Delmaterialernes indflydelse på reologien 73
9.1 Tilslagsmængde 74
9.2 Kornform 76
9.3 Sandets kornkurve 77
9.4 Vandcementtal 78
9.5 Flyveaske 79
9.6 Mikrosilica 83
9.7 Superplastificerende tilsætningsstoffer 85
9.8 Viskositetsmodificerende additiver 88
9.9 Luftindblandingsstoffer 89
9.10 Opsummering 93

10 Opstilling af kriterium for stabilitet 95

11 Mineralogi versus partikelstørrelse 99

12 Trykstyrke 101

13 Elasticitetskoefficient 105

III Forsøgsbeskrivelse 109

14 Forsøgsstrategi 111

15 Forsøgsprocedure 113
15.1 Blanding af SCC 113
15.2 Forsøg med frisk SCC 115
15.3 Udstøbning og lagring af prøvelegemer 121
15.4 Forsøg med hærdnet SCC 122

IV Forsøg 127

16 SPT versus flydemål 129
16.1 Mørtelforsøg med sammensat kornkurve 129
16.2 Mørtelforsøg med 0-2mm sand 132
16.3 Konklusion 133

17 Reproducerbarhed **135**
17.1 Forsøgsresultater 135
17.2 Konklusion 140

18 Undersøgelse af lers indflydelse på reologien **141**
18.1 Forsøgsresultater 141
18.2 Konklusion 142

19 Variation af vandcementtal **143**
19.1 Basisrecept 144
19.2 Basisrecept tilsat 1% kaolin 147
19.3 Basisrecept tilsat 3% kaolin 150
19.4 Diskussion af resultater 153
19.5 Konklusion 157

20 Partikelstørrelse versus mineralogi **159**
20.1 Forsøgsresultater 161
20.2 Diskussion af resultater 163
20.3 Konklusion 168

21 Bradstedslams indflydelse på reologien **171**
21.1 Forsøgsresultater 173
21.2 Diskussion af resultater 175
21.3 Konklusion 179

22 Kaolinits indflydelse på styrkeegenskaberne **181**
22.1 Trykstyrke 181
22.2 Elasticitetskoefficient 182
22.3 Konklusion 183

V Konklusion **185**

23 Konklusion **187**
23.1 Stabilitet 187
23.2 Hærdnet beton 190

24 Anbefalinger **193**

25 Erfaringsopsamling **195**
25.1 Kornkurvebetragtninger 195
25.2 Forsøgsbasis 196
25.3 Orientering af sætmålskegle 196
25.4 Udtagning af prøve 197
25.5 Måling af separation 198

VI Appendiks **201**

A Delmaterialer **203**
A.1 0-2mm sand 203
A.2 5-8mm sten 204
A.3 8-16mm sten 205
A.4 Flyveaske, type B4 206
A.5 Rapid Cement 207
A.6 SPT - Glenium Sky 531 208

B Udbredelseskurver **211**
B.1 Reproducerbarhed 211
B.2 Bestemmelse af lermængde 212
B.3 Basisrecept 213
B.4 1% kaolin 214
B.5 3% kaolin 215
B.6 3% Bradsted lerslam 216
B.7 Flyveaske 217
B.8 Støbning 218

C Støbningsdata **219**

D Mørtelforsøg **221**
D.1 Recepter 221
D.2 Forsøgsprocedure 222

E Statistisk grundlag **225**

F Trykstyrke **227**
F.1 Basisrecept 227
F.2 Recept tilsat 5% ler 228

G Elasticitetskoefficient **231**
G.1 Basisrecept 231
G.2 Recept tilsat 5% ler 232

H Mætningsforsøg med kaolin **233**

Litteraturliste **237**

I del I beskrives baggrunden for anvendelsen af selvkompakterende beton. Herunder sammensætningen samt de enkelte delmaterialer. Ligeledes forefindes et litteraturstudium, hvor der redegøres for tidligere erfaringer gjort med tilsætningen af lermineraler til beton. På baggrund af dette opstilles problemformuleringen samt problemafgrænsningen.

DEL I

PROJEKTBESKRIVELSE

1 Indledning **13**

2 Problemanalyse **15**
2.1 Selvkompakterende beton ……. ……. 15
2.2 Delmaterialer i SCC……. 18
2.3 Erfaringer med lermineraler i beton…… 21

3 Problemformulering **27**

4 Problemafgrænsning **29**

Kapitel 1
Indledning

Beton har været brugt som konstruktionsmateriale gennem flere tusinde år. I takt med industrialiseringens indtog blev anvendelsen af beton mere og mere udbredt, og idag er beton det mest anvendte konstruktionsmateriale. Som en konsekvens af dette er der sket en stor udvikling indenfor betonindustrien. Udviklingen har medført, at en ny type letbearbejdelig selvkompakterende beton, herefter betegnet SCC, har set dagens lys.

Det var japanske forskere, der i 1980 startede udviklingen af SCC. Siden har denne form for beton vundet større og større indpas i byggeindustrien, og specielt i Danmark bliver denne form for beton ofte benyttet. Således udgør markedsandelen af SCC idag over 30% af fabriksbetonproduktionen og over 70% af elementbetonproduktionen. SCC er kendetegnet ved at være letflydende, hvorfor det er muligt at udfylde forme uden brug af vibrering. Da SCC er vibrationsfri, medfører det et betydeligt bedre arbejdsmiljø, dels ved en reducering i støjniveauet og dels ved, at betonarbejderne spares for det tunge fysiske arbejde med vibratorene. Ligeledes har SCC den fordel, at der ingen begrænsninger er i formgivningen af konstruktioner, hvilket er gældende for traditionel sætmålsbeton, idet støbeformen overalt skal være tilgængelig for vibrationsudstyret.

Ulempen ved SCC er, at det er vanskeligt at styre flydeegenskaberne samtidig med, at stabiliteten af den friske beton opretholdes. Ved anvendelse af SCC skal flydeegenskaberne således sikres, uden at der samtidig opstår separation, dvs., at stenene synker mod bunden i den friske beton. Dette stiller større krav til kvalitetsstyringen, idet selv små ændringer i delmaterialerne kan medføre betydelige ændringer af SCCens egenskaber.

Tidligere forskningsprojekter har demonstreret positive effekter på stabiliteten af SCC, ved tilsætning af bestemte typer lermineraler. På baggrund af dette, vil nærværende projekt undersøge, om det er muligt, at forbedre stabiliteten af den friske beton ved tilsætning af lermineraler. I undersøgelsen tages der udgangspunkt i anvendelsen af to typer leropslæmninger. Den ene type er en lokalt forekommende lerslam fra Bradsted grusgrav, jf. figur 1.1, tilvejebragt ved afvaskning af tilslagmaterialer. Den anden type lerslam, der undersøges, består af kaolinit, hvilket bl.a. anvendes til keramik fremstilling.

Figur 1.1: Placeringen af Bradsted grusgrav

Der arbejdes i projektet med en beton i passiv miljøklasse og en styrkeklasse på 25MPa. Udover at sikre stabiliteten ved tilsætning af lermineraler undersøges det ligeledes, hvilken indflydelse lermineralerne har på betonens styrkemæssige egenskaber.

Kapitel 2

Problemanalyse

Flere producenter af SCC har konstateret, at selv små ændringer i sammensætningen af delmaterialerne samt i delmaterialernes egenskaber kan have uheldige konsekvenser for egenskaberne af den færdige SCC. Risikoen for separation er det største problem og samtidig den faktor, der er vanskeligst at kontrollere. I nærværende projekt undersøges det, om det er muligt at skabe en mere stabil beton ved tilsætning af lermineraler. I det følgende beskrives de karakteristika, der kendetegner SCC, herunder den generelle sammensætning. Sidst i kapitlet findes resultaterne af et litteraturstudie af emnet. Heri en beskrivelse af, hvilke erfaringer der tidligere er gjort i forbindelse med tilsætningen af lermineraler til SCC.

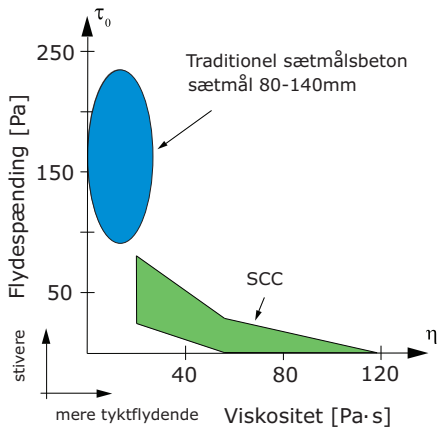
2.1 Selvkompakterende beton

I dette afsnit beskrives de karakteristika, der gør sig gældende for SCC, herunder den generalle sammensætning, dvs., hvilke delmaterialer SCC består af. SCC er en af nyskabelserne indenfor betonbranchen. I modsætning til traditionel sætmålsbeton er SCC vibrationsfri, hvilket indebærer, at en række arbejdsoperationer udelades, hvorved produktiviteten på arbejdspladsen øges, samt at arbejdsmiljøet forbedres. Afsnittet er skrevet med udgangspunkt i [Herholdt et al., 1985] og [Thrysøe et al., 2004].

Forskellen på traditionel sætmålsbeton og SCC er konsistensen af den friske beton. Traditionel sætmålsbeton er mere stiv end SCC i den friske betonfase jf. figur 2.2. Dette medfører, at SCC flyder længere horisontalt ved egen kraft end traditionel sætmålsbeton. Betonen karakteriseres ved at foretage konsistensforsøg. Metoderne til konsistensforsøg for hhv. traditionel sætmålsbeton og SCC er grundlæggende ens. Ved begge typer beton anvendes en sætmålskegle på et plant underlag. Forskellen består i, at ved traditionel sætmålsbeton anvendes en retvendt sætmålskegle, mens der ved SCC anvendes en omvendt sætmålskegle. For traditionel sætmålsbeton benyttes det traditionelle sætmål, mens der for SCC benyttes et såkaldt flydemål. Dette betyder, at efter løftning af sætmålskeglen karakteriseres den traditionelle sætmålsbeton ud fra den vertikale sætning, mens den for SCC karakteriseres ud fra det horisontale flydemål. Udførelsen af de to konsistensforsøg er illustreret på figur 2.1.

Figur 2.1: Venstre: Sætmål for traditionel sætmålsbeton; Højre: Flydemål for SCC [Pade et al., 2007]

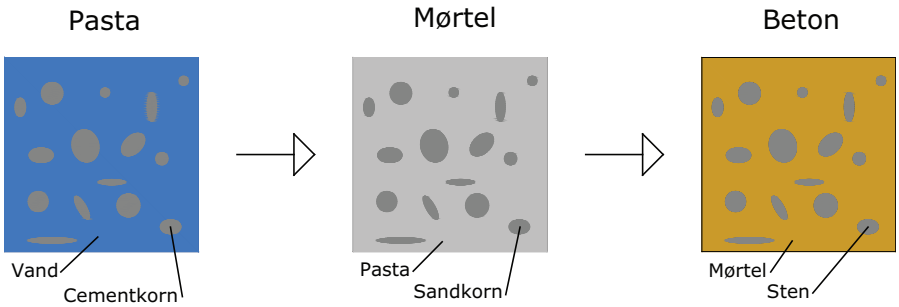
Karakteriseringen af en SCC foretages ud fra flydespændingen, τ_0, og viskositeten, η, hvilket betegnes betonens reologiske egenskaber. Flydespændingen beskriver, hvor stift et materiale er, dvs. hvor stor en kraft, der skal tilføres for at få materialet i bevægelse. Viskositeten beskriver hvor tyktflydende et materiale er, dvs., hvor hurtigt materialet flyder. For at få betonen i bevægelse skal flydespændingen overvindes. For traditionel sætmålsbeton overvindes flydespændingen ved mekanisk påvirkning, sædvanligvis vibrering. Idet der ikke vibreres ved SCC, skal flydespændingen være så lav, at alene tyngden af betonens egenvægt er i stand til at overvinde flydespændingen. Flydespændingen reduceres ved tilsætning af superplastificerende tilsætningsstoffer, som er beskrevet senere i kapitlet. De områder hvori de reologiske egenskaber for hhv. traditionel sætmålsbeton og SCC normalt ligger, fremgår af figur 2.2.



Figur 2.2: De reologiske egenskaber for henholdsvis traditionel sætmålsbeton og SCC [Thrysøe et al., 2004]

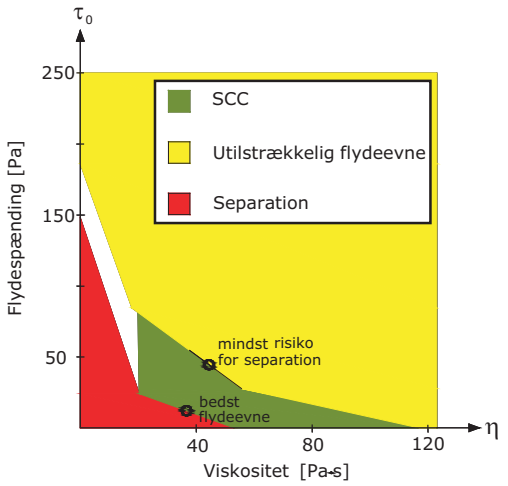
Beton kan generelt opdeles i tre forskellige opslæmninger. Den første opslæm-

ning betegnes pasta, hvor cementpartiklerne er opslæmmet i vand. Anden opslæmning betegnes mørtel, hvor sandpartiklerne er opslæmmet i pasta og den sidste opslæmning betegnes beton, hvor sten er opslæmmet i mørtel. De tre opslæmninger fremgår af figur 2.3.



Figur 2.3: De tre opslæmningsfaser [Thrysøe et al., 2004]

Det er vigtigt, at betonen ikke separerer, hvilket kan ske i alle tre faser. Vandet kan skilles fra cementpartiklerne, hvorved der opstår bleeding, sandet kan skilles fra pastaen og stenene kan skilles fra mørtlen. Oftest sker dette ved, at densiteten af sten er større end densiteten af mørtlen, hvilket resulterer i en nedadrettet resulterende kraft på stenene. Den resulterende kraft modvirkes for traditionel sætmålsbeton ved, at kraften ikke er tilstrækkelig til at overvinde mørtlens flydespænding. For SCC er flydespændingen lavere, hvorved den nødvendige resulterende kraft for at opnå separation er væsentlig mindre. For at modvirke dette har SCC generelt en højere viskositet, således at stenene synker med en så lav hastighed, at det er uden betydning. Dog skal den pågældende SCC stadig have tilstrækkelig flydeevne til at kunne udfylde støbeformen. Disse modsatrettede krav betyder, at betonproducenterne „bevæger sig på en knivsæg“ mht. hvornår betonen har de ønskede reologiske egenskaber og hvornår den skal kasseres. Denne problematik er illustreret på figur 2.4.



Figur 2.4: Flydespænding versus viskositet. SCC ligger i området mellem beton, der separerer og beton, der ikke har tilstrækkelig flydeevne [Thrysøe et al., 2004]

Som det fremgår af figur 2.4, vil små ændringer i betonens flydespænding medføre, at betonen enten ikke har tilstrækkelig flydeevne eller i værste fald separerer.

2.2 Delmaterialer i SCC

SCC består som traditionel sætmålsbeton hovedsageligt af vand, cement, sand og sten. Sand og sten betegnes normalt som betonens tilslagsmateriale. Ud over disse komponenter kan SCC også indeholde mineralske tilsætninger i form af flyveaske og mikrosilica. Endvidere anvendes tilsætningsstoffer og luftindblanding, alt efter kravene til den friske beton.

2.2.1 Cement

Cement er fremstillet ved at varme kalk og andre materialer såsom ler til 1450°C i en roterovn. Herefter afkøles materialet og produktet, der fremkommer kaldes for klinker. Klinkerne formales sammen med gips og andre ikke skadelige uorganiske materialer, og danner portlandcement. Cement er et pulver, der ved sammenblanding med vand hærdner, og bliver til et produkt, der er bestandigt i vand, hvorfor cement i byggeteknikken benævnes et hydraulisk bindemiddel. Cementens finhed og kemiske sammensætning har indflydelse på egenskaberne af den friske SCC. Det er muligt at anvende alle portlandcementer til fremstillingen af SCC, hvilket gør, at cementtypen normalt vælges ud fra styrkemæssige, holdbarhedsmæssige eller arkitektoniske krav.

2.2.2 Tilslag

Som tidligere nævnt dækker betegnelsen tilslag over materialerne sand og sten. Tilslagsmaterialet, der benyttes til SCC, er det samme som for traditionel sætmålsbeton. Da tilslaget er den billigste komponent i betonen, sigtes der efter en så stor andel af tilslagsmaterialerne som muligt. Tilslaget udgør traditionelt ca. 75% af betonen. For at et tilslagsmateriale indenfor dansk betonteknik kan karakteriseres som en sand, skal partikelstørrelsen være mellem 0,002mm og 4mm. Sand kan findes i helt ren form, dvs. sorteret, når det er aflejret af vand eller vind. Denne form betegnes normalt strandsand. Det kan også findes som en sammensætning af forskellige partikelstørrelser, når det er aflejret af is. Denne form betegnes normalt bakkesand. For partikler større end 4mm betegnes tilslaget sten.

Kornformen såvel som kornkurven har betydning for betonens flydeegneskaber. Til SCC er afrundede partikler at foretrække, idet disse bidrager til lavere flydespænding samt lavere viskositet i forhold til kantede partikler. Som tidligere nævnt har kornkurven også stor indflydelse på bearbejdeligheden af betonen. En „flad“ kornkurve er at foretrække, idet der ikke er stor variation mellem fraktionerne i sandet eller stenene. De fleste sandmaterialer indeholder stort set ikke fraktioner større end 2mm, og i ekstreme tilfælde er de største fraktioner kun 1mm. Ved disse sandmaterialer er det vigtigt, at tilslagsmaterialet i form af sten har partikler mellem 4mm og 8mm, for ikke at gøre springet fra sandfraktionerne til stenfraktionerne for stort. Idet de største partikler i cementen er omkring 50μ og i flyveasken lidt større, er det vigtigt for stabiliteten af betonen, at sandmaterialet indeholder en del fraktioner under 0,250mm og under 0,125mm, for at springet ikke er for stort. Sandmaterialet må dog ikke indeholde for meget finstof, idet dette bidrager til dårligere flydeegenskaber.

I SCC er det vigtigt, at stenmaterialet ikke indeholder partikler større end 16mm, da dette medfører, at den nedadrettede resulterende kraft på stenene bliver stor, hvorved risikoen for separation øges.

2.2.3 Mineralske tilsætninger

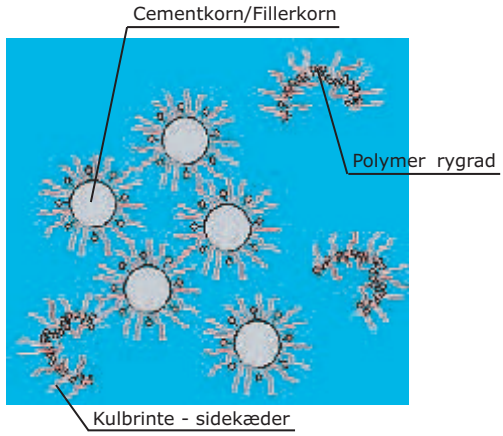
De mest anvendte mineralske tilsætninger er flyveaske og mikrosilica. De mineralske tilsætninger reducerer mængden af cement, der skal benyttes til betonen. Dette kan være medvirkende til en sænkning af omkostningerne ved betonproduktionen. Ydermere vil en reduktion af cementindholdet medføre, at svind og varmeudvikling i den pastarige SCC reduceres.

Flyveaske er en forbrændingsrest, der fremkommer ved fyring med fint formalet kul i kraftværker. Det primære indhold i flyveaske er glas i form af kugleformede småpartikler, der er af samme størrelsesorden som cementpartiklerne. De kugleformede partikler har indflydelse på SCCens flydeegenskaber. Flyveasken bidrager endvidere til en hurtigere afbinding og en højere langtidsstyrke.

Mikrosilica er et biprodukt fra produktion af siliciummetal og ferrosilicium i elektriske ovne. Mikrosilica er et langt finere pulver end flyveaske og cement, hvilket bidrager til, at cementpastaen pakkes tættere. Mikrosilicaen giver således en direkte forøgelse af betonens trykstyrke. Dog skal der kun anvendes små mængder af mikrosilica, idet det ellers øger risikoen for plastiske svindrevner. Anvendelsen af mikrosilica i Danmark er dog stærkt nedadgående, idet efterspørgsel af materialet har gjort det dyrt og vanskeligt at skaffe.

2.2.4 Tilsætningsstoffer

De tilsætningsstoffer der benyttes til SCC er superplastificerende tilsætningsstof, SPT, viskositetsmodificerende tilsætningsstof, VMA, og luftindblandende tilsætningsstof, LIM. Der benyttes altid SPT til fremstilling af SCC. Der findes forskellige typer af SPT alt efter, hvilke betonproduktioner de skal anvendes til. Som eksempel kan nævnes SPT, der tilgodeser betonelementproducentens ønske om hurtig afbinding og styrkeudvikling. Indenfor de seneste år er der sket en stor udvikling indenfor SPT, hvor den nyeste generation hovedsageligt består af modificerede polycarboxylater. Strukturen af SPT består af en polymer rygrad, hvortil der er koblet forskellige funktionelle kæder. SPT er sammen med cementpartikler illustreret på figur 2.5.

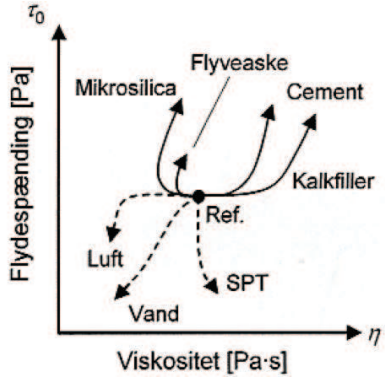


Figur 2.5: Principskitse af hvorledes polycarboxylaterkæderne sætter sig på cementpartiklerne [Thrysøe et al., 2004]

De modificerede polycarboxylater adsorberes på cementpartiklerne under blandingen af betonen. Dette bevirker, at cementpartiklerne frastøder hinanden pga. sterisk virkning, hvilket medfører, at betonens flydespænding nedsættes. Herved reduceres betonens stivhed og betonen flyder længere.

VMA er en stabilisator, der skaber hydrogenbindinger, hvilket bevirker at vand binder sig til tilsætningsstoffet. Denne binding af vand medfører en forøgelse af både flydespænding og viskositet. Ved tilsætning af luftindblandingsmidler skabes der svage elektrokemiske bindinger mellem partikler og luftbobler. For de fleste betoner vil et luftindhold mellem 5% og 7% være passende. Endvidere giver luftindblandingen en mere frostbestandig beton.

For at skabe et overblik over de enkelte delmaterialers indflydelse på de reologiske egenskaber, er dette anskueliggjort på figur 2.6.



Figur 2.6: Delmaterialernes indflydelse på flydespændingen og viskositeten [Thrysøe et al., 2004]

En mere detaljeret forklaring af delmaterialerne og deres indflydelse på betonens reologiske egenskaber forefindes i kapitel 9.

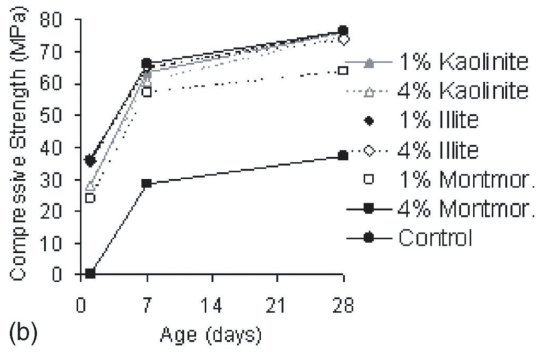
2.3 Erfaringer med lermineraler i beton

Idet der tidligere er foretaget forsøg med tilsætning af lermineraler i beton, er der i dette afsnit fulgt op på nogle af resultaterne herfra. Forsøgene havde til hensigt at fastlægge om lermineraler har en negativ indflydelse på styrkeegenskaber og plastisk svind i den hærdnede beton. Derudover blev der i forsøgene undersøgt om kalk- og formalede sandpartikler, der i størrelsesorden minder om lerpartikler, havde samme indflydelse på den friske og hærdnede beton. Afsnittet er skrevet med udgangspunkt i artiklen [Norvell et al., 2007].

Denne sammenligner, hvilken indflydelse lermineraler og partikler på størrelse med disse har på beton. Artiklen konstaterer, at partikler med kornstørrelser under 75μ, uanset om der er tale om lerpartikler, havde stor indflydelse på såvel bearbejdeligheden som styrken og holdbarheden. En detaljeret forklaring af opbygningen og dannelsen af lermineraler forefindes i kapitel 5.

Tidligere var disse partiklerstørrelser uønskede, fordi styrken blev nedsat pga. deres store specifikke overfladeareal, hvilket medfører et øget vandforbrug. Dette øgede vandforbrug kan nedsættes ved tilsætning af vandreducerende tilsætningsstoffer. I SCC benyttes de mindste partikler ($< 75\mu$) til at forøge bearbejdeligheden ved at udfylde den nederste del af kornkurven. I traditionel sætmålsbeton er det ønskeligt, ud fra et økonomisk og miljømæssigt synspunkt, at øge andelen af micropartikler ($< 75\mu$). Derudover er det vigtigt at vide, hvorledes ultrafine partikler ($< 5\mu$) påvirker betonens egenskaber. Lermineraler er i denne størrelsesorden. I forbindelse med at anvende ler i beton har det stor indflydelse, hvilket lermineral der benyttes. Grundet størrelsen og formen af lerpartiklerne er det specifikke overfladeareal større end for sandpartikler. Lerpartiklernes evne til at adsorbere vand og kvælde forøger vandbehovet i betonen, hvis ikke lerpartiklerne let afgiver vandet igen. Er dette ikke tilfældet stiger vandbehovet, hvilket medfører at vandcementtallet stiger, hvorved styrken falder. Som beskrevet i kapitel 5 er der stor forskel på det specifikke overfladeareal mellem de tre lermineraler, kaolinit, illit og montmorillonit, hvilket også medfører, at der er stor forskel på vandbehovet. Da montmorillonit har det største specifikke overfladeareal, er det også denne lerart, der har det største vandbehov.

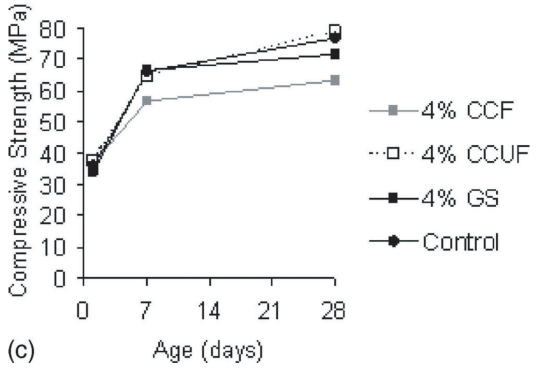
På figur 2.7 er trykstyrken optegnet som funktion af antal modenhedsdøgn for beton tilsat hhv. 1% og 4% af de tre lermineraler, kaolinit, illit og montmorillonit. Styrkeudviklingen er målt ved konstant vandcementtal, hvor der er tilstræbt et sætmål på 110 ± 5mm. For at opnå det ønskede sætmål og samtidig have konstant vandcementtal er der tilført HRWR (High range water reducer). Idet vandcementtallet er holdt konstant, er det forventelig at styrkeegenskaberne, for de enkelte blandinger er identiske. Som det fremgår af figur 2.7, er dette ikke tilfældet, og denne afvigelse må derfor tilskrives tilstedeværelsen af lermineralerne.



Figur 2.7: Styrkeudviklingen for beton indeholdende lermineralerne, kaolinit, illit og montmorillonit, med konstant vandcementtal [Norvell et al., 2007]

Som det fremgår af figur 2.7, afhænger styrken af lermineralets specifikke overfladeareal. Udover det specifikke overfladeareal er det også væsentligt, at bindingerne mellem montmorillonit udgøres af vandmolekylder, hvilket medfører, at der adsorberes flere vandmolekyler. På baggrund af figur 2.7 kan det konkluderes, at lermineralet montmorillonit ikke egner sig som tilsætning til beton, idet det forringer styrken betydeligt, mens de to andre lermineraler, kaolinit og illit, i små mængder ikke lader til at have indflydelse på styrken.

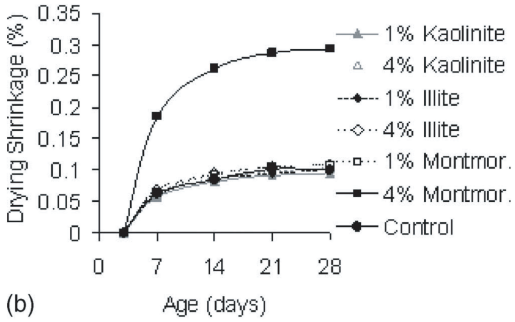
Optegnes tilsvarende trykstyrken, hvor det istedet for lermineraler er ultrafine partikler, der er tilsat i form af calcium karbonat (CCF), ultrafint calcium karbonat (CCUF) og formalet sand (GS), fås den på figur 2.8 viste trykstyrkeudvikling.



Figur 2.8: Styrkeudviklingen for beton indeholdende ultrafine partikler, med konstant vandcementtal [Norvell et al., 2007]

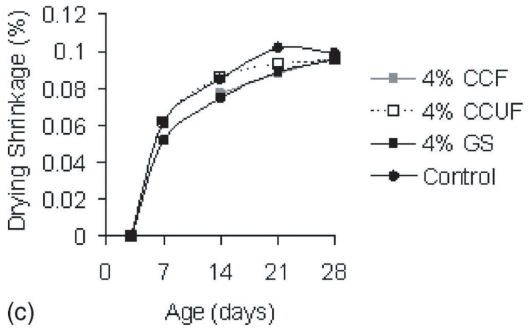
CCF indeholder 60% materiale mindre end 2μ, mens CCUF indeholder 90% mindre end 2μ. GS indeholder 96% materiale mindre end 5μ. Som det fremgår af figur 2.8, er der stort set ingen styrkereduktion ved tilsætning af ultrafine partikler i forhold til styrkereduktionen ved tilsætning af ler.

Udover styrkeudviklingen er det ligeledes undersøgt, hvilken indflydelse de tre lermineraler og de ultrafine partikler har på betonens udtørringssvind. Af figur 2.9 fremgår det, at stort set kun lermineralet montmorillonit har indflydelse på svindet, idet det her kunne konstateres et udtørringssvind, der var tre gange større end ved de andre lerarter.



Figur 2.9: Svindudviklingen for beton indeholdende lermineralerne, kaolinit, illit og montmorillonit, med konstant vandcementtal [Norvell et al., 2007]

Det fremgår af figur 2.10, som det var tilfældet med styrkeudviklingen, at de ultrafine partikler stort set ingen indflydelse har på svindet.



Figur 2.10: Svindudviklingen for beton indeholdende ultrafine partikler, med konstant vandcementtal [Norvell et al., 2007]

Som det fremgår af de forsøg, der er foretaget med hensyn til tilsætning af lermineraler og ultrafine partikler i beton, har kun lermineralet montmorillonit væsentlig indflydelse på betonens trykstyrke og svind, mens kaolinit og illit kun har ringe indflydelse.

I nærværende projekt er det formålet at forsøge at stabilisere SCC vha. tilsætning af lermineraler. Tidligere undersøgelser har konkluderet, at lermineralet palygorskit sammen med tilsætning af SPT har den ønskede effekt. Opfinderne bag dette koncept er Anders Henrichsen og Holger Lindgreen og dette er nedfældet i patentet „Concrete containing superplasticiser and palygorskite" [Office, 2000]. Tidligere er der blevet lavet mange andre patenter vedrørende tilsætning af uorganiske materialer for at forbedre betonens egenskaber. Det føromtalte patent udmærker sig fra de øvrige på en række punkter, hvor den største forskel er, at dette patent er udviklet til SCC, hvorimod de øvrige patenter er udviklet til traditionel sætmålsbeton. Derudover er der tale om et specifikt lermineral (palygorskit) og ikke bare lermineraler generelt. Idet tilsætningen af palygorskit skal forbedre egenskaberne for SCC, er det reologien og stabiliteten der ønskes forbedret.

Ved tilsætning af 2-10% palygorskit, målt som vægt-% af det totale bindemiddel, er det konkluderet, at reologien og stabiliteten forbedres. Reologien forbedres ved, at flydespændingen sænkes, mens viskositeten øges. Idet flydespændingen sænkes kræves mindre kraft for at få betonen til at flyde, hvilket er en fordel for SCC, idet det er egenvægten af betonen alene, der skal overvinde flydespændingen. Ved at viskositeten øges, er der mindre chance for, at betonen separerer. Det er vigtigt, at viskositeten ikke bliver for høj, idet betonen således vil have svært ved at omslutte armeringen ordentligt.

Udover forbedret reologi og stabilitet er det også konkluderet, at beton produceret med tilsætning af palygorskit og SPT er mindre følsom overfor variation af vandindholdet. Således påvirkes de reologiske egenskaber ikke af en mindre variation af vandindholdet. Dette er en stor fordel for betonproducenterne, idet det erfaringsmæssigt har vist sig, at selv meget små variationer af delmaterialerne fra betonblanding til betonblanding, kan have stor indflydelse på betonens egenskaber.

Kapitel 3
Problemformulering

Projektet tager udgangspunkt i at undersøge, om det er muligt at tilvejebringe løsninger på problemet vedrørende stabiliteten af SCC gennem tilsætning af lermineraler. Som beskrevet i afsnit 2.3 er der i faglitteraturen omtalt typer af lermineraler (montmorillonit), som har en negativ indflydelse på trykstyrken såvel som svindet. Andre typer af lermineraler har dog vist sig ikke at have indvirkning på disse egenskaber (kaolinit og illit), mens lermineralet palygorskit har vist sig at have en positiv indflydelse på SCC, idet det giver en stabiliserende effekt.

Der undersøges to typer af lermineraler. Den ene i form af en lerslam tilvejebragt ved afvaskning af lokale tilslagsmaterialer. Den anden type lerslam der undersøges består af kaolinit, hvilket bl.a. anvendes til keramik fremstilling. Der lægges vægt på, at disse lermineraler har en stabiliserende effekt på betonen uden at medføre en forringelse af betonens styrkeegenskaber. Der arbejdes med en betontype til fabriksbeton i passiv miljøklasse og en karakteristisk styrke på 25MPa..

Problemet forsøges løst gennem teoretiske overvejelser, som understøttes af eksperimentielle undersøgelser.

Kapitel 4
Problemafgrænsning

SCC har gennem de sidste år vundet større og større indpas i byggeridustrien i Danmark, dog er der i forbindelse med SCC problemer med stabilitet af den friske beton. Dette projekt har til formål at stabilisere den friske beton ved tilsætning af lermineraler. Til vurdering af om lermineralerne virker stabiliserende på den friske beton er der foretaget forsøg med to lertyper. Der benyttes en lokaltforekommende lerslam fra Bradsted, som tilvejebringes ved afvaskning af tilslagsmaterialer og derudover benyttes en ler bestående af kaolin leveret af Aalborg Portland. Idet det er stabiliteten, der ønskes forbedret, fokuseres der hovedsageligt på den friske betons flydeegneskaber. For at minimere fejlkilder i forbindelse med den friske beton, er der valgt ikke at benytte et luftindblandingsmiddel, LIM. Til dispergering af lermineralerne er der benyttet et rystebord for at skabe en så homogen blanding som muligt. Vurdering af om denne metode skaber en effektiv dispergering af lermineralerne, ligger dog udenfor rammerne af dette projekt.

For at vurdere om tilsætningen af lermineraler har indflydelse på styrkeegenskaberne er der lavet forsøg, hvor trykstyrken og elasticitetskoefficienten er målt og resultaterne sammenlignet for blandinger med og uden lermineraler.

Delmaterialerne der anvendes til de eksperimentielle undersøgelser fremgår af tabel 4.1.

Producent	Materiale
Aalborg Portland A/S	Rapid cement
Aalborg Portland A/S	Kaolin
Kroghs A/S	0-2mm sand
Kroghs A/S	8-16mm sten
Kroghs A/S	Bradsted lerslam
Rekefjord Stone A/S	5-8mm sten
Emineral	Flyveaske B4
Aalborg vandforsyning	Vand
BASF Construction Chemicals A/S	Glenium Sky 531

Tabel 4.1: Materialer og producenter for de anvendte materialer i de eksperimentielle undersøgelser

DEL II

I del II behandles den teoretiske del af projektet. De generelle karakteristika for lermineraler er beskrevet, ligesom der er foretaget en karakterisering af de anvendte lertyper. Derudover gives en overordnet beskrivelse af hvorledes kitmassen hydratiserer. Dernæst beskrives betonens reologi, herunder delmaterialernes indflydelse på denne. Der er opstillet et stabilitetskriterium. Ud fra dette vurderes det, om tilsætningen af lermineraler virker stabiliserende. Endelig er der en beskrivelse af de mekaniske egenskaber i form af trykstyrken og elasticitetskoefficienten.

TEORI

5 Lermineraler **33**

6 Karakterisering af de anvendte lertyper **41**
6.1 Røntgendiffraktometri……. 41
6.2 Elektronmikroskopi…..……... 45
6.3 Resultatbehandling…….. 49

7 Hydratisering af kitmasse **59**

8 Reologi **63**
8.1 Newton'ske væsker...……... 63
8.2 Bingham-materialer….. ……. 64
8.3 Bearbejdelighedsparametre..…… 64
8.4 Betonens flydeegenskaber..……. 65
8.5 Måling af reologiske parametre...…… 67

9 Delmaterialernes indflydelse på reologien **73**
9.1 Tilslagsmængde... ……... 74
9.2 Kornform……... ……. 76
9.3 Sandets kornkurve...…… 77
9.4 Vandcementtal…..……... 78
9.5 Flyveaske……. 79
9.6 Mikrosilica.. …… 83
9.7 Superplastificerende tilsætningsstoffer…….……... 85
9.8 Viskositetsmodificerende additiver….…… 88
9.9 Luftindblandingsstoffer ..…… 89
9.10 Opsummering…… 93

10 Opstilling af kriterium for stabilitet **95**

11 Mineralogi versus partikelstørrelse **99**

12 Trykstyrke **101**

13 Elasticitetskoefficient **105**

Kapitel 5
Lermineraler

I dette kapitel vil de generelle karakteristika for ler blive beskrevet, hvorefter de mest almindeligt forekomne lermineraler beskrives mere detaljeret.

Karakteriseringen af ler sker enten ud fra partikelstørrelse eller mineralogi. Anvendes betegnelsen ler henvises til partikelstørrelsen, mens der ved lermineraler henvises til mineralogien.

Indledningsvis beskrives hvorledes de forskellige jordpartikler er dannet. Følgende er skrevet med udgangspunkt i [Ovesen et al., 2007]. Det er den geologiske historie, der er bestemmende for en jordarts sammensætning og struktur. De fleste jordarter er dannet ved, at bjergarter gennem en række processer er omdannet. Processerne der forløber er:

- Forvitring
- Erosion
- Transport
- Aflejring
- Diagenese (omdannelse)

Dannelsen af jordpartikler sker ved forvitring, som er en fysisk og kemisk proces. Fysisk forvitring sker ved dannelse af revner og sprækker i fast fjeld. Forvitringen sker ved, at der opstår spændingsaflastninger, som følge af landhævninger eller -sænkninger, erosion eller trykændring i vandet i jorden. Den kemiske forvitring forløber ved tilstedeværelsen af vand. Først bliver vandet optaget ved overfladeadsorption, hvorefter der forløber nogle kemiske processer: hydrolyse, udvaskning, udskiftning af kationer, oxidering og karbonatisering. Efter fysisk såvel som kemisk forvitring vil jordpartiklerne transporteres væk fra stedet, hvor forvitringen har fundet sted, ved strømmende vand, vind, gletscherbevægelse samt tyngdekraften. Transporten af jordpartiklerne har indflydelse på egenskaberne af den jordart, der bliver aflejret. Dels sker der en sortering, idet de største partikler aflejres nærmest oprindelsesstedet, dels bearbejdes jordpartiklerne under transporten, således at deres form ændres. Udover at egenskaberne påvirkes af transporten, vil de ligeledes påvirkes af aflejringsmiljøet, dvs.

de geografiske og geologiske forhold på aflejringsstedet.

Ud fra partiklernes diameter karakteriseres, hvilken fraktion der er tale om. I dansk geoteknisk praksis anvendes de i tabel 5.1 angivne inddelinger til at karakterisere partiklerne.

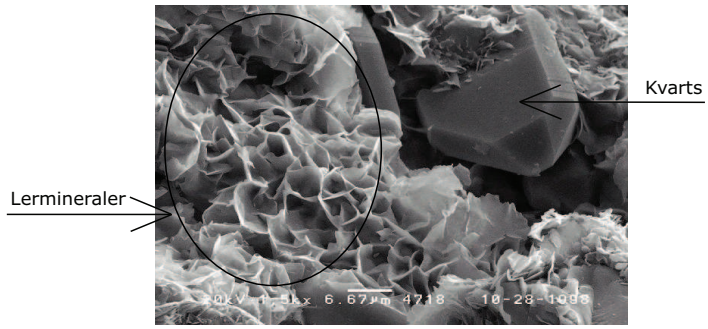
Fraktion	Diameter [mm]
Sten	>2
Sand	2-0,06
Silt	0,06-0,002
Ler	<0,002

Tabel 5.1: Geoteknisk praksis for bestemmelse af fraktion [Ovesen et al., 2007]

De enkelte jordpartiklers størrelse bestemmes for de større partikler ved sigtning, mens det for de mindre bestemmes ved sedimentation. Partikelstørrelsen har stor indflydelse på vandgennemstrømmeligheden for en given jordart. Jo større partikler desto større gennemstrømmelighed. Det vil sige, at ler stort set kan blokere for gennemstrømning af vand. For at en jordart kan betegnes som ler, skal den indeholde 15% partikler med en størrelse under 0,002mm.

Der er stor forskel på formen af de enkelte partikler alt afhængig af partikelstørrelsen. Mindre partikler er således ikke bare en formindsket udgave af større partikler. For sten, sand- og siltpartikler er udstrækningen for det meste af samme størrelsesorden i alle tre dimensioner, hvorimod lermineraler typisk er pladeformede eller undertiden stav- eller nåleformede. Dette dækker over, at lermineralernes udstrækning normalt er stor i to retninger og lille i én retning, eller stor i én retning og lille i to retninger.

Formen af jordpartiklerne afhænger af de mineraler, de består af. Den karakteristiske pladeform for lerpartikler skyldes, at disse har en laggitterstruktur, i modsætning til sten, sand- og siltpartikler, som hovedsageligt består af mineraler med rumgitterstruktur. Af figur 5.1 fremgår den flade struktur for lermineraler.



Figur 5.1: Den karakteristiske flade struktur for lermineraler (montmorillonit), hvor der er sket agglomerering af lermineraler over en kvartspartikel

Der er i nærværende projekt fokuseret på tre lermineraler, idet der forefindes dokumentation af tidligere forsøg med disse [Norvell et al., 2007]. De tre lermineraler er:

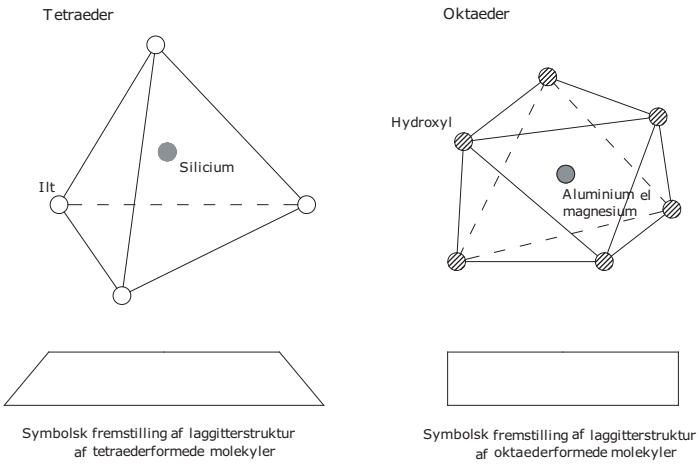
- Illit
- Kaolinit
- Montmorillonit

Alle de ovennævnte lermineraler har en flad struktur. For alle lermineraler er det et karakteristika, at de alle har en stor specifik overflade, defineret som partiklens overflade i m^2 pr. g. De specifikke overflader for de forskellige mineraler fremgår af tabel 5.2.

Lermineral	Specifik overflade [m^2/g]
Kaolinit	10-20
Illit	65-100
Montmorillonit	op til 800

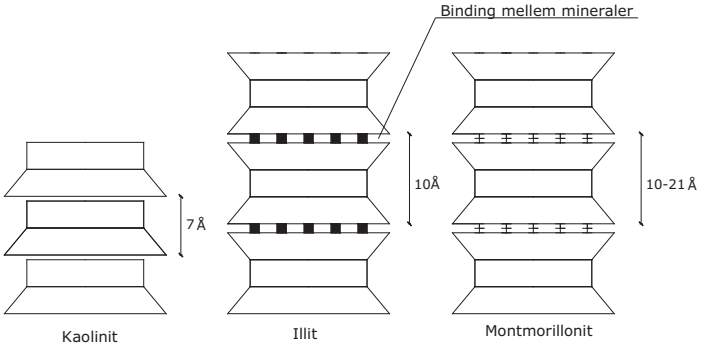
Tabel 5.2: Specifik overflade for lermineralerne kaolinit, illit og montmorillonit [Ovesen et al., 2007]

Der er to basale molekylestrukturer hvoraf lermineraler er opbygget. Et silicium tetraeder og et aluminium/magnesium oktaeder. De to molekylestrukturer fremgår af figur 5.2.



Figur 5.2: Molekylestrukturen for et silicium tetraeder og et aluminium/magnesium oktaeder samt den symbolske fremstilling af deres laggitterstruktur [Ovesen et al., 2007]

Disse basale strukturer er grundlaget for de laggitterstrukturer der dannes. Forskellige kombinationer af tetraeder og oktaeder danner de forskellige lermineraler. Ud fra de laggitterstrukturer, der er vist på symbolsk form nederst på figur 5.2, kan de tre lermineraler dannes ved en laggitterstruktur som vist på figur 5.3.



Figur 5.3: Laggitterstrukturen for de tre mineraler: kaolinit, illit og montmorillonit [Ovesen et al., 2007]. 1 Å = 10^{-10}m

Som det fremgår af figur 5.3, er kaolinit et såkaldt 1:1 mineral, dvs., at der skal benyttes et lag tetraeder celler og et lag oktaeder celler for at danne kaolinit. Bindingen mellem kaolinit mineralerne udgøres af en relativ stærk brintbinding. Illit og montmorillonit derimod er 2:1 mineral. Det vil sige, at de er opbygget som sandwichelementer med et lag oktaederceller i midten omgivet

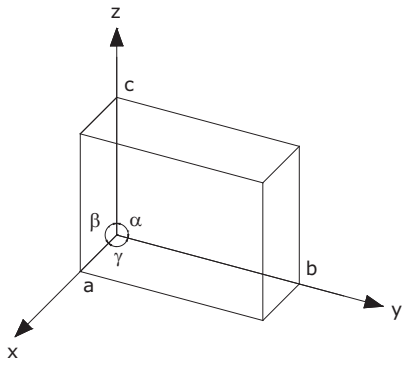
af to lag tetraederceller, jf. figur 5.3. Bindingen mellem illit mineralerne består af en relativ svag binding med kalium, mens bindingen for montmorillonit består af en meget svag binding af adsorberede vandmolekyler og metalliske ioner.

Lermineralernes overflade har en negativ elektrisk ladning. Dette medfører, at de positivt ladede ioner (kationer), der er i det omkringliggende vand, bliver tiltrukket. Grundet partiklernes termiske energi vil der ligeledes opstå en frastødning, hvilket medfører, at der alt i alt dannes et løst bundet lag af kationer på partiklerne. Derudover vil lerpartiklerne omgives af et lag af vandmolekyler, idet disse er dipoler. De elektriske kræfter mellem lerpartiklerne medfører, at ler er sammenhængende (kohæsiv), i modsætning til mineraler, med rumgitterstruktur der ikke har samme sammenhængskraft.

I det følgende er de tre lermineraler, kaolinit, illit og montmorillonit, beskrevet nærmere. Det vil sige, hvorledes lermineralerne er opbygget, herunder hvilke grundstoffer de består af. Derudover er lermineralet palygorskit ligeledes beskrevet, idet det tidligere er fundet, at dette mineral har en stabiliserende effekt på SCC [Office, 2000]. I forbindelse med karakteriseringen af lerslammet fra Bradsted, jf. kapitel 6, kunne det konstateres, at slammet indeholdt lermineralet dickit, hvorfor dette også beskrives.

5.0.1 Kaolinit/Dickit

Kaolinit og dickit har samme kemisk sammensætning, hvorfor disse vil beskrives under et. Forskellen mellem kaolinit og dickit findes i gitterstrukturen, hvilket beskrives nærmere i det følgende. Mineraler opdeles i enhedsceller med kantlængderne a, b og c samt de interaksiale vinkler α, β og γ. En principskitse af dette fremgår af figur 5.4.



Figur 5.4: Principskitse af enhedscelle med kantlængderne a, b og c og interaksiale vinkler α, β og γ

Kaolinit har en såkaldt triklin gitterstruktur, mens dickit har en monoklin gitterstruktur. Forskellen mellem disse gitterstrukturer fremgår af tabel 5.3.

	Triklin	Monoklin
Sidelængde	$a \neq b \neq c$	$a \neq b \neq c$
Interaksial vinkel	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90°$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma = 90°$

Tabel 5.3: Forskellen mellem en triklin og monoklin gitterstruktur

Kaolinit og dickit består begge af aluminium og silicium. Den kemiske sammensætning for kaolinit og dickit er:

$$Al_2Si_2O_5(OH)_4$$

Molekylevægten er på 258,16g og den kemiske sammensætning fremgår af tabel 5.4.

Grundstof		Andel [%]
Aluminium	Al	20,90
Silicium	Si	21,76
Hydrogen	H	1,56
Oxygen	O	55,78

Tabel 5.4: Grundstofsfordeling i kaolinit og dickit

5.0.2 Illit

Illit består hovedsageligt af silicium. Derudover indeholder illit grundstofferne kalium, magnesium, aluminium og jern. Den kemiske sammensætning af illit er:

$$K_{0,6}\,(H_3O)_{0,4}\,Al_{1,3}Mg_{0,3}Fe^{2+}_{0,1}Si_{3,5}O_{10}(OH)_2 \cdot (H_2O)$$

Molekylevægten er på 389,35g og den kemiske sammensætning fremgår af tabel 5.5.

Grundstof		Andel [%]
Kalium	K	6,03
Magnesium	Mg	1,87
Aluminium	Al	9,01
Jern	Fe	1,43
Silicium	Si	25,25
Hydrogen	H	1,35
Oxygen	O	55,06

Tabel 5.5: Grundstofsfordeling i illit

5.0.3 Montmorillonit

Montmorillonit består hovedsageligt af silicium. Derudover indeholder montmorillonit grundstofferne natrium, kalcium og aluminium. Den empiriske formel for montmorillonit er:

$$Na_{0,2}Ca_{0,1}Al_2Si_4O_{10}(OH)_2\,(H_2O)_{10}$$

Molekylevægten er på 549,07g og den kemiske sammensætning fremgår af tabel 5.6.

Grundstof		Andel [%]
Natrium	Na	0,84
Kalcium	Ca	0,73
Aluminium	Al	9,83
Silicium	Si	20,46
Hydrogen	H	4,04
Oxygen	O	64,11

Tabel 5.6: Grundstofsfordeling i montmorillonit

5.0.4 Palygorskit

Palygorskit består hovedsageligt af silicium. Derudover indeholder palygorskit grundstofferne magnesium og aluminium. Den empiriske formel for palygorskit er:

$$Mg_{1,5}Al_{0,5}Si_4O_{10}(OH) \cdot 4\,(H_2O)$$

Molekylevægten er på 411,35g og den kemiske sammensætning fremgår af tabel 5.7.

Grundstof		Andel [%]
Magnesium	Mg	8,86
Aluminium	Al	3,28
Silicium	Si	27,31
Hydrogen	H	2,21
Oxygen	O	58,34

Tabel 5.7: Grundstofsfordeling i palygorskit

Kapitel 6

Karakterisering af de anvendte lertyper

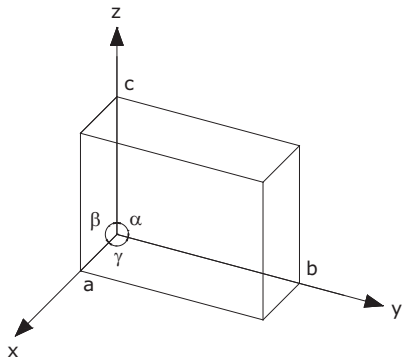
I dette kapitel karakteriseres de to typer lerslam, der er anvendt i projektet. Den ene type lerslam er hentet fra Kroghs A/S grusgrav i Bradsted og tilvejebragt ved afvaskning af tilslagsmaterialer. Den anden type lerslam er leveret af Aalborg Portland A/S og er af en type, der bl.a. anvendes til keramikfremstilling. Til at karakterisere de lermineraler der findes i de to typer af opslæmning, benyttes røntgendiffraktometri samt elektronmikroskopi.

Røntgendiffraktometri benyttes til at identificere, hvilke mineraler slammet består af, samt andelen af disse. Elektronmikroskopi benyttes til at bestemme grundstofsfordelingen i den pågældende prøve samt andelen af de enkelte grundstoffer. Det vil sige, at ved røntgendiffraktion er det muligt at foretage en kvantitativ analyse af lerslammets mineralske sammensætning, mens der med elektronmikroskopi foretages en kemisk analyse af prøven. I det følgende beskrives teorien samt udførelsen af de to forsøgsmetoder, hvorefter der foretages en resultatbehandling.

De to typer af analyse der er foretaget af lerslammet kunne, med det til rådighed værende udstyr, kun foretages på tørstof. Lerslammet blev derfor tørret ved ca. 40°C i varmeskab, indtil alt frit vand var fordampet. Ved fordampning af vand tørrer lerslammet ind til en fast sammenhængende masse, der efterfølgende blev malet til et pulver. Størsteparten af partiklerne vil efter denne behandling have en størrelsesorden på omkring 10-30μ. Efter formalingen blev pulveret sigtet ved en maskevidde på 63μ.

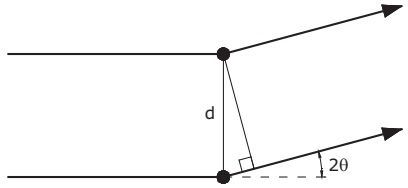
6.1 Røntgendiffraktometri

Generelt er krystaller opbygget af gentagne enhedsceller med kantlængderne a, b og c samt de interaksiale vinkler α, β og γ. Principskitse af en enhedscelle fremgår af figur 6.1.



Figur 6.1: Principskitse af enhedscelle med kantlængderne a, b og c og de interaksiale vinkler α, β og γ [Andersen, 2000]

I røntgendiffraktometri stammer en diffrakteret stråle fra vekselvirkningen mellem den indfaldende røntgenstråle og den krystallinske forbindelses elektroner. Af figur 6.2 fremgår et eksempel på en éndimensionel krystal bestående af ens atomer med afstanden d.



Figur 6.2: Éndimensionel krystal bestående af ens atomer [Andersen, 2000]

Vinklen mellem de to stråler benævnes 2θ, jf. figur 6.2. For at diffrakterede stråler skal forstærke hinanden maksimalt ved interferens, skal Braggs lov være opfyldt:

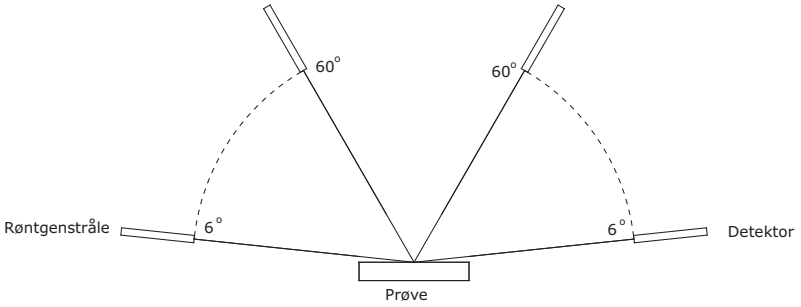
$$2d \cdot sin\theta = n \cdot \lambda \tag{6.1}$$

Hvor

- d er den interatomare afstand
- n er ordenen af bøjningen
- λ er bølgelængden

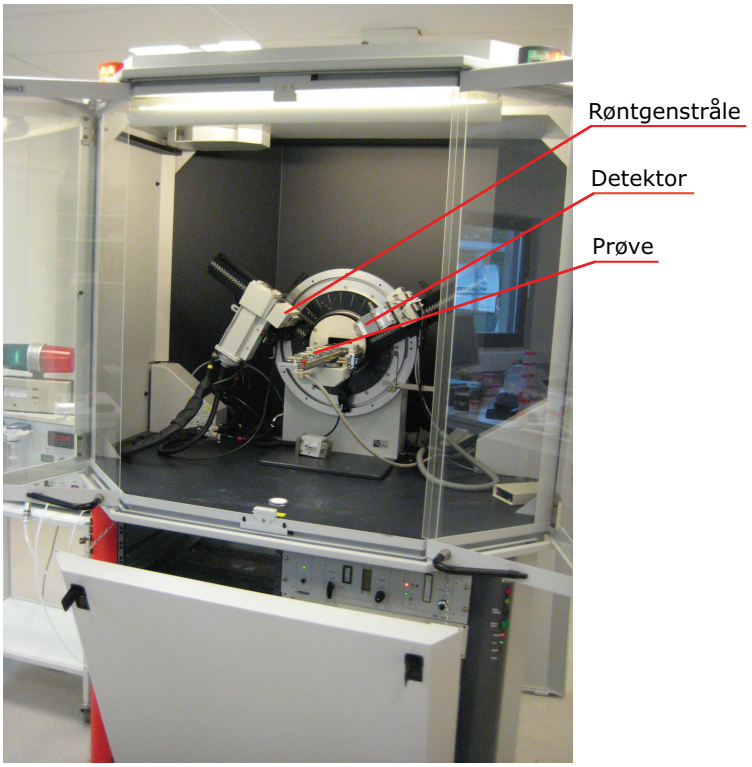
Inden for røntgendiffraktometri findes flere metoder til at karakterisere en given prøve. I dette projekt er pulverdiffraktometri benyttet og denne metode beskrives i det følgende. Ved pulverdiffraktometri består prøven af små partikler, som hver især er mindre end 63μ. Prøven bestråles med røntgen og den

indkomne stråle og detektoren, som måler intensiteten, varieres mellem 6° og 60°. Dette er illustreret på figur 6.3.



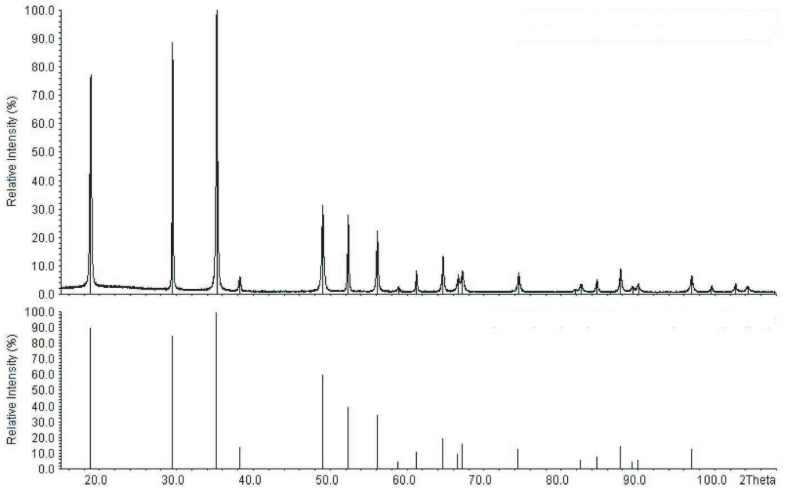
Figur 6.3: Principskitse af hvorledes prøven bestråles

Det anvendte diffraktometer er af mærket *Bruker*. Det blev stillet til rådighed af Aalborg Portland og ses på figur 6.4.



Figur 6.4: Anvendt diffraktometer til analyse af lerslammet

Ved at måle intensiteten af den diffrakterede stråle sammenholdt med vinklen er det muligt at optegne intensiteten som funktion af vinklen, 2θ. Herefter sammenlignes det optegnede spektrum med kendte spektre, hvorefter det er muligt at identificere mineralerne. Idéen er således at sammenligne de største peaks for at se, hvilke mineraler prøven indeholder. Nogle af de mindre peaks svarer til et mineral fundet ved de største peaks blot af en anden orden, jf. formel 6.1. Af figur 6.5 fremgår, for et givent krystallinsk stof, målt intensitet som funktion af vinklen, sammenlignet med et diagram fra Powder Diffraction File, International Center for Diffraction Data, som er en stor international database indeholdende spektre fra de fleste krystalinske stoffer.



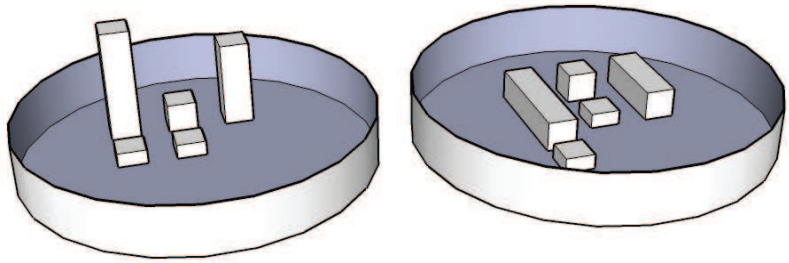
Figur 6.5: Øverst: Målt intensitet for et givent krystallinsk stof; Nederst: Diagram fra Powder Diffraction File, International Center for Diffraction Data [Andersen, 2000]

Udover at røntgendiffraktometri kan bestemme, hvilke mineraler en given prøve indeholder, er det ligeledes muligt at bestemme, hvor stor en mængde hver mineraltype udgør af prøven. Dette sker ved at lave et bedste fit ud fra de intensiteter, der er målt, og de mineraler der er fundet at være i prøven.

For at kunne undersøge det formalede lerpulver i røntgendiffraktometeret skal en lille metalcylinder pakkes med pulveret. Metalcylinderen der er anvendt, ved forsøget, ses på figur 6.6.

Figur 6.6: Lerprøve pakket i metalcylinder anvendt ved røntgendiffraktometri

For at få en så nøjagtig måling som muligt er det vigtigt, at overfladen på prøven er plan. Ensartede prøvningsforhold sikres ved hver gang at fylde cylinderen fra oven, hvorefter prøven trykkes i en håndbetjent presse med forudindstilt trykkraft. Efter cylinderen med prøve er trykket i pressen, skrabes det resterende materiale, der rager op over cylinderkanten, af med en ret glasplade. Denne proces skaber en plan overflade på prøveemnet, men har den bivirkning at påtvinge de enkelte partikler en given orientering. Principskitse af denne bivirkning er illustreret på figur 6.7.



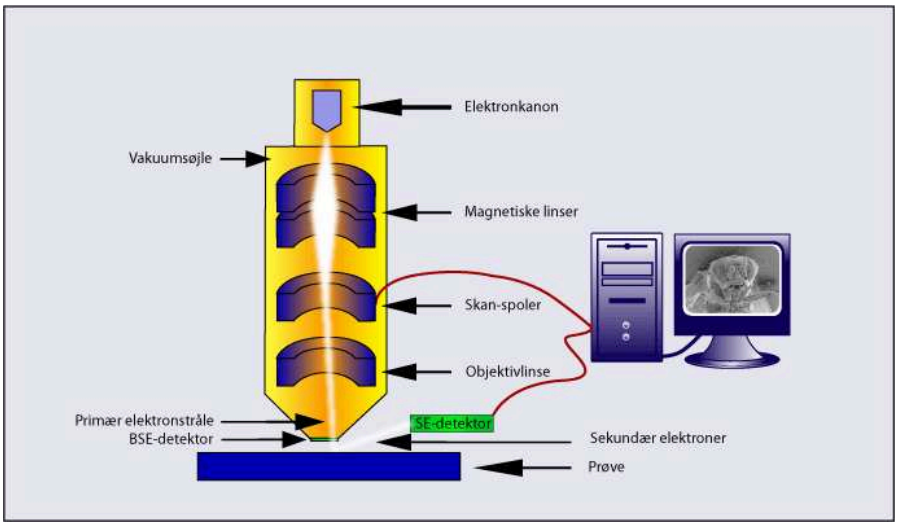
Figur 6.7: Partiklernes orientering. Venstre: Naturlig; Højre: Påtvungen

Resultatet af denne påtvungne orientering af partiklerne vil være en overrepræsentation af det stof, de store partikler indeholder. Årsagen til dette er, at de store partikler efter komprimering fylder mere i overfladen af prøven, jf. figur 6.7.

6.2 Elektronmikroskopi

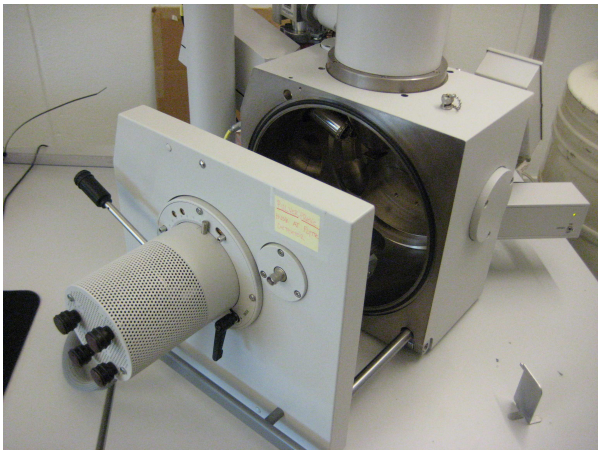
Inden for elektronmikroskopi findes i lighed med røntgendiffraktometri flere forskellige metoder. I det følgende beskrives Skanning Elektron Mikroskop (SEM), da dette er benyttet til analysen af lerslammet. Ved et SEM fokuseres elektronstrålen meget præcist og denne skannes over prøven. Når elektronstrålen rammer prøven, sker der en vekselvirkning, og ud fra dette er det muligt at

danne billeder af overfladen samt at foretage en grundstofsanalyse. Figur 6.8 viser princippet i et SEM.



Figur 6.8: Principskitse af opbygningen af et SEM [DTU, 2008]

Det anvendte elektronmikroskop er af mærket *Phillips* med modelbetegnelsen *XL 30*. Det blev stillet til rådighed af Aalborg Portland og ses på figur 6.9.



Figur 6.9: Det anvendte skanning elektronmikroskop

Elektronerne dannes ved elektronkanonen, ved at et lille wolframfilament opvarmes og vha. et spændingsfald, trækkes elektronerne ud, således at der skabes en elektronstråle. Idet elektroner er elektrisk ladede kan disse påvirkes af et mag-

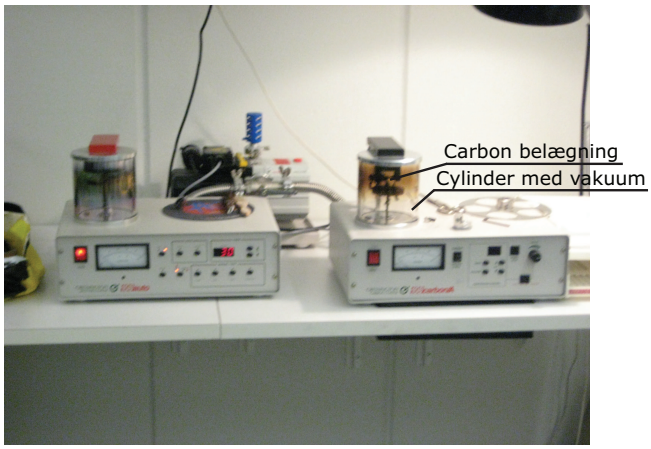
netisk felt. De magnetiske linser, som er vist på figur 6.8, har til formål dels at fokusere strålen og dels at få strålen til at skanne frem og tilbage over prøven.

Når elektronerne rammer prøven kan der ske flere ting, som hver især giver mulighed for at analysere prøven. Dels kan der skabes et billede ud fra de elektroner, der rammer prøven, og dels kan der gives en ganske præcis information om prøvens sammensætning. Når der skal skabes et billede af prøven vælges hvor mange billedpunkter (pixels), der ønskes, og så skanner mikroskopet et område svarende til en pixel. Når elektronerne rammer en kerne i prøven, vil disse reflekteres tilbage, de såkaldte backscatter elektroner. Disse elektroner opsamles af en detektor, BSE-detektor på figur 6.8. Rammer elektronerne derimod ikke kerner, vil de langsomt miste deres energi som en konsekvens af gentagne kollisioner med prøvens atomer. Kollisionen medfører, at elektroner vil blive revet løst fra prøven. Elektronerne har et relativt lavt energiniveau, men enkelte elektroner vil være istand til at undslippe prøven. Indlægges et mindre spændingsfald mellem prøven og en detektor, kan disse sekundære elektroner, SE, opsamles, jf. figur 6.8. Det er disse principper, der skaber 3D billederne ved et SEM. Billedet dannes ved at måle hvor mange elektroner, der opsamles af hhv. BSE-detektoren og SE-dektoren og dette antal omregnes til en gråtoneværdi. Denne gråtoneværdi aftegnes på en computerskærm svarende til den pixel, der er skannet. Opsamlingen af BSE og SE danner 3D billeder, men det er svært at se forskel på grundstoffer i denne metode. Forskellen på SE og BSE er, at de giver to forskellige typer billeder. Billeder baseret på BSE fortæller noget om massefylden af de mineraler, der rammes, mens billeder baseret på SE fortæller noget om topografien.

Udover BSE og SE kan der foregå en vekselvirkning mellem elektronstrålen og prøven. Der kan opstå røntgenstråling. Røntgenstråling opstår ved, at en elektron i strålen river en indre elektron i atomet løs. En af de andre elektroner i atomet vil hoppe ind og tage dennes plads, hvorved der udsendes røntgenstråling. Energien i en røntgenstråle er karakteristisk for det pågældende grundstof, hvorved det er muligt at få ganske præcise informationer omkring prøvens sammensætning, dvs., hvor stor en andel af de forskellige grundstoffer der findes i en given prøve.

Ved forsøgets start er der udtaget en lille prøve af det tørrede lerslam. For at SEM kan frembringe et tydeligt billede af prøvens krystaller, belægges prøven med et ultratyndt elektrisk ledende lag for at undgå akkumulering af statisk elektriske felter i prøven under elektronbestålingen. Der belægges normalt med

carbon, guld eller platin. Belægningen afhænger af materialets art. Analyseres der f.eks. på organisk materiale anvendes der normalt guld og platin, mens der for uorganisk materiale anvendes en carbon belægning. Denne belægningsfordeling skyldes, at uorganisk materiale normalvis ikke indeholder carbon, hvorved dette ikke influerer på resultatet af SEM forsøget. Visse uorganiske stoffer såsom stål og diamant indeholder carbon, men da forsøget blev foretaget på lerslam, blev det antaget for sikkert at anvende denne type af belægning. Carbon belægningen blev påført under vakuum, hvilket er illustreret på figur 6.10.



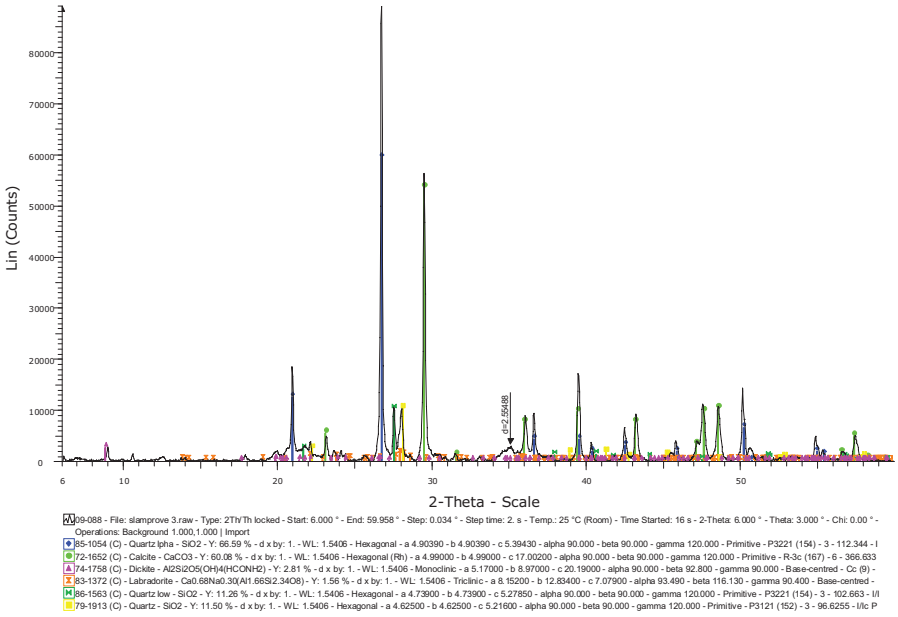
Figur 6.10: Prøven til SEM-analyse påføres carbonbelægning under vakuum

6.3 Resultatbehandling

I det følgende gennemgås resultaterne af de analyser, der danner grundlag for karakteriseringen af de lermineraler, der anvendes i projektet. Resultatbehandlingen er opdelt således, at resultaterne for Bradsted lerslam og kaolin fra Aalborg Portland figurerer i hver deres afsnit.

6.3.1 Analyse af Bradsted lerslam

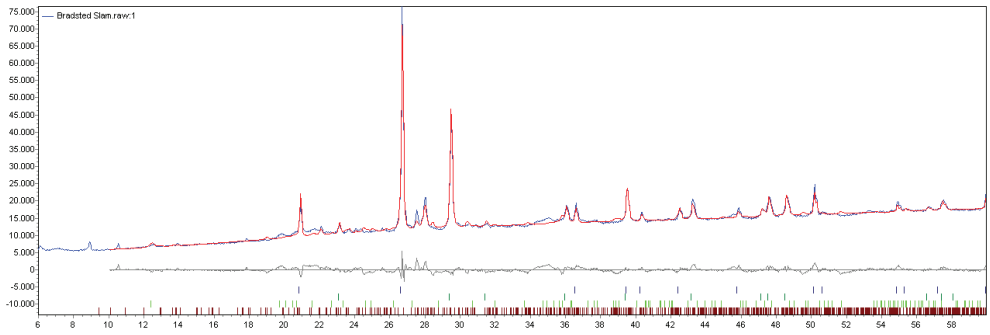
I dette afsnit fremgår resultaterne af analysen for Bradsted lerslam. Spektret fundet ved røntgendiffraktometri fremgår af figur 6.11.



Figur 6.11: Plot af resultat fra røntgendiffraktion

På figur 6.11 måles intensiteten på y-aksen mens afbøjningsvinklen måles på x-aksen. Herefter er mineralerne i prøven bestemt ved at lægge spektre fra grundstoffer i databasen ind over prøvens spektrum.

Herefter indlægges data for de mineraler, der på figur 6.11 er fastslået at være i prøven. På denne måde kan fordelingen, af de enkelte mineraler i prøven, findes ved bedste fit af resultatet til prøvens spektrum. Resultatet af dette fremgår af figur 6.12



R-Values

Rwp : 4.66

Quantitative Analysis - Rietveld

Phase 1	: Quartz	35 %
Phase 2	: Calcite	34 %
Phase 3	: "Dickite (BAILEY)"	9 %
Phase 4	: Anorthite	21 %

Figur 6.12: Bedste fit af prøvens spektrum til spektre i Powder Diffraction File database

Af figur 6.12 ses det, at overensstemmelsen mellem det målte spektrum og data fra databasen er fundet med en korrelationskoefficient på 4,66. Normalt betegnes fit med en korrelationskoefficient på under 5 for velkorreleret [Lund, Aalborg Portland].

Ud fra røntgendiffraktometri kunne det konstateres, at prøvens mineralogiske sammensætning er, som opstillet i tabel 6.1.

Mineral	Mængde [%]
Kvarts	35
Calcit	34
Dickit	9
Anorthit	21

Tabel 6.1: Bradsted lerslammets mineralogiske sammensætning

Mineralet kvarts er et af de mest forekommende mineraler på jorden. Det stammer fra den naturlige forvitring af bl.a. granit, sandsten og kalk. Kvarts er kemisk inert som tilsætningsstof til betonproduktion [KU, 2008]. At det er kemisk inert betyder at det ikke påvirker betonens hydratisering.

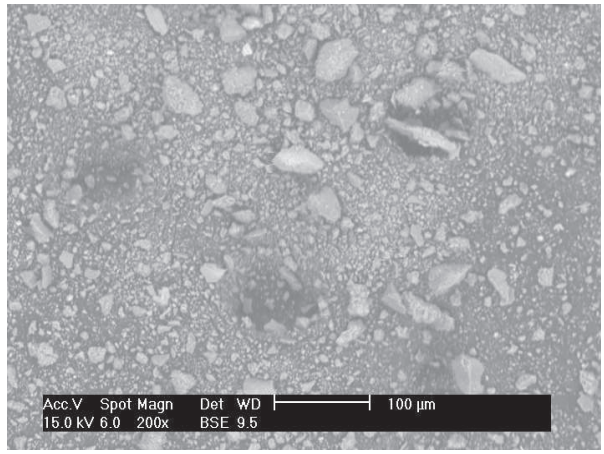
Mineralet calcit (calciumcarbonat) er hovedsageligt kalk. Kalk stammer primært fra skallerne af marine organismer. Calcit er kemisk inert som tilsæt-

ningsstof til betonproduktion [KU, 2008].

Mineralet dickit er en amorf form af lermineralet kaolinit. Det vil sige, at kemisk er de to identiske, men opbygningen af gitterstrukturen er forskellig. Dickit er aktivt i forhold til betonproduktion, da lermineralet vil optage vand og binde dette i højere eller lavere grad [KU, 2008].

Mineralet anorthit er en variant af feldspat. Feldspat er navnet på en gruppe af mineraler, der udgør omkring 60% af jordens skorpe. Betegnelsen dækker over krystalliseret magma. Anorthit er kemisk inert som tilsætningsstof til betonproduktion [KU, 2008].

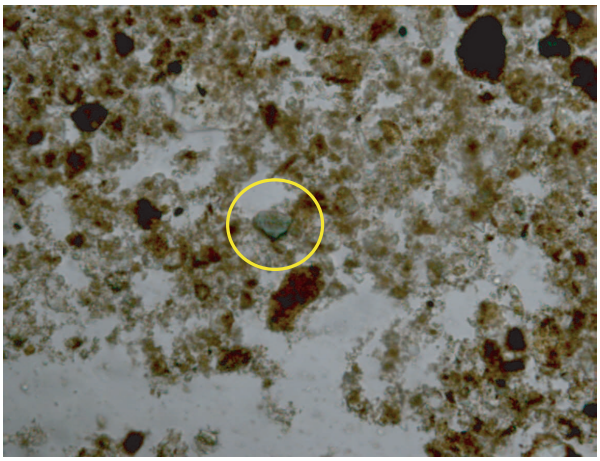
Som beskrevet tidligere fortæller billeder foretaget med BSE noget om massefylden af mineralerne. Dette bevirker, at tungere partikler bliver lysegrå, mens lettere partikler får en mere mørkegrå farve pga. differens i mængden af reflekterede elektroner. Dette ses på figur 6.13.



Figur 6.13: Billede af prøve taget vha. BSE

Ud fra figur 6.13 kan det konstateres, at der er stor variation mellem de største og de mindste partikler i lerslammet. De største partikler er i størrelsesordnen 40-60μ, mens de mindste partikler ligger på omkring 1μ og mindre. Endvidere kunne det konstateres, at der var med en homogen blanding at gøre, idet der ikke forekom sammenklumpning af partiklerne i lerslammet. En vurdering af om mineralerne forekommer sammenklumpede, eller om der er tale om hele mineraler, foretages ved at betragte partiklernes brudflader. Fremtræder brudfladerne skarpe, betegnes den enkelte partikel som hel og uden sammenklumpning.

Idet der ikke kan skelnes mellem de forskellige partikler i BSE forsøget, blev prøven analyseret i et traditionelt optisk mikroskop. Ud fra dette var det muligt at skelne mellem de forskellige partikler. Det var her ligeledes muligt at bestemme, hvilke partikler der bestod af f.eks. dickit, da disse har en karakteristisk grøn farve. Dette ses på figur 6.14. Partiklen bestående af dickit er markeret med gult.



Figur 6.14: Billede af prøve taget vha. optisk mikroskop

Der blev foretaget otte analyser af den kemiske sammensætning vha. elektronmikroskopi, hvorefter det endelige resultat blev fundet ved midlingen af disse. Den kemiske sammensætning af prøven af Bradsted slammet fremgår af tabel 6.2.

Navn	Kemisk betegnelse	Indhold [%]
Natriumoxid	Na_2O	1,3
Magnesiumoxid	MgO	2,1
Calciumoxid	CaO	14,5
Jernoxid	Fe_2O_3	15,0
Aluminiumoxid	Al_2O_3	11,0
Siliciumdioxid	SiO_2	52,4

Tabel 6.2: Kemisk sammensætning af Bradsted lerslam

Sammenligning af røntgendiffraktometri og elektronmikroskopi

I dette afsnit foretages en sammenligning af resultaterne fra de to typer af analyse. Resultaterne fra de to analyser sammenlignes ved at betragte det procentvise indhold af grundstofferne: silicium, calcium, aluminium og natrium. Denne sammenligning fremgår af tabel 6.3

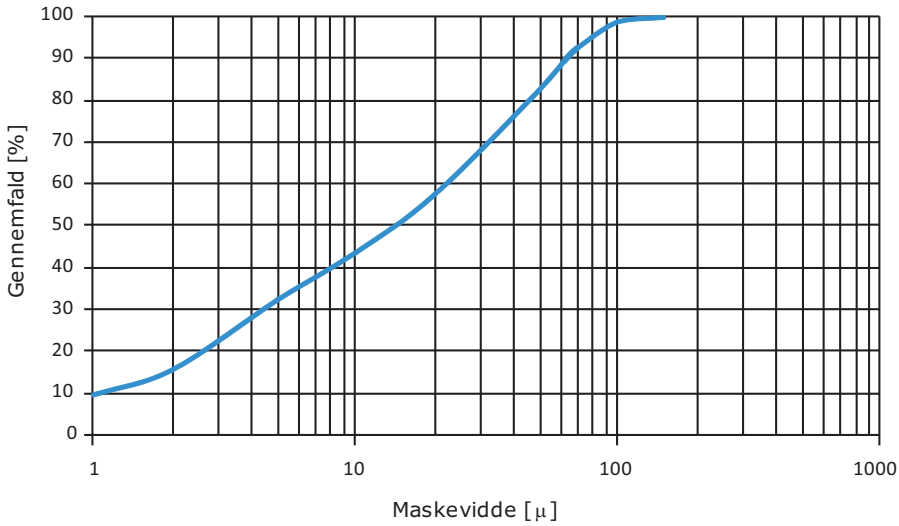
Grundstof	Røntgendiffraktion [%]	SEM [%]
Silicium	17,7	17,5
Calcium	7,3	7,2
Aluminium	4,2	4,4
Natrium	0,74	0,90

Tabel 6.3: Sammenligning af det procentvise indhold af grundstofferne: silicium, calcium, aluminium og natrium fundet ved de to analyser

Det fremgår af tabel 6.3, at der er god overensstemmelse mellem indholdet af de fire grundstoffer fundet ved henholdsvis røntgendiffraktometri og SEM. Idet der er en god overensstemmelse, må resultaterne fra røntgendiffraktometri analysen antages at være korrekte. SEM-analysen er som tidligere beskrevet blot en kemisk og billedmæssig analyse af prøven, mens røntgendiffraktion giver et kvantitativt billede af prøvens mineralogi.

Resultatet af SEM-analysen angiver et indhold af jernoxid (Fe_2O_3) på 15% i prøven. Dette stemmer ikke overens med resultatet fra røntgendiffraktionsanalysen, hvor jernoxid ikke forekommer. Årsagen til denne uoverensstemmelse kan være, at prøven indeholder urenheder. Røntgendiffraktometeret er ikke i stand til registere disse urenheder i krystalstrukturen, hvilket bevirker forskellen registreret mellem røntgendiffraktometri og SEM-analysen.

I forbindelse med karakteriseringen af hvilke mineraler slamprøven indeholdt, blev der ligeledes foretaget en laseranalyse for at fastlægge kornkurven for prøven. Kornkurven optegnet med logaritmisk maskevidde fremgår af figur 6.15.



Figur 6.15: Kornkurve for prøve

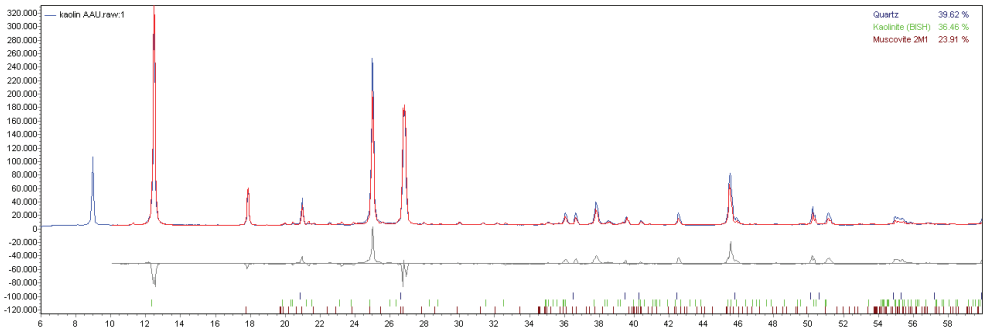
Ved laseranalysen fandtes en 50% fraktil på 15μ. Ved pyknometerforsøg er faststofsdensiteten af Bradsted lerslammet bestemt. Denne er fundet til:

$$\rho_{s,Bradsted} = 2587 kg/m^3 \tag{6.2}$$

6.3.2 Analyse af kaolin fra Aalborg Portland

Kaolin er betegnelsen for et materiale indeholdende store mængder af kaolinit. Idet gitterstrukturen er forskellig for lermineralerne dickit og kaolinit, er det muligt at skelne mellem disse vha. røntgendiffraktometri. I analysen af Bradsted lerslammet kunne det konstateres, at de to analysemetoder, hhv. røntgendiffraktometri og elektronmikroskopi, gav samme resultat. På baggrund af dette er der kun foretaget røntgendiffraktometri af kaolinen fra Aalborg Portland.

Resultatet af analysen for kaolinen fra Aalborg Portland, dvs. den kvantitative analyse, er illustreret på figur 6.16.



R-Values

Rwp : 16.11

Quantitative Analysis - Rietveld

Phase 1	: Quartz	39 %
Phase 2	: "Kaolinite (BISH)"	36 %
Phase 3	: "Muscovite 2M1"	24 %

Figur 6.16: Bedste fit af prøvens spektrum til spektre i Powder Diffraction File database

Den mineralogiske sammensætning af kaolinpulveret fundet ved røntgendiffraktometri er opstillet i tabel 6.4.

Mineral	Mængde [%]
Kvarts	39
Kaolinit	36
Muscovit	24

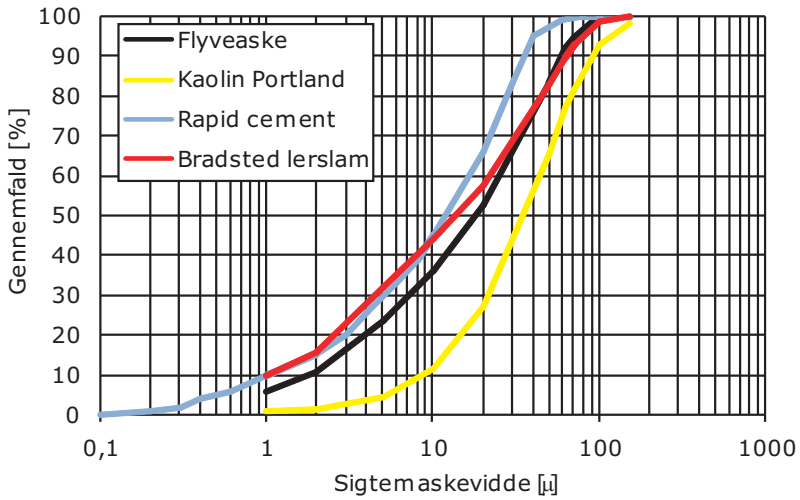
Tabel 6.4: Kaolinpulverets mineralogiske sammensætning

Mineralet muscovit går også under betegnelsen glimmer, hvilket er et stof der består af tynde film af silikatmineraler. Muscovit er kemisk inert som tilsætningsstof til betonproduktion. Muscovit kan indeholde vand, men bindingerne mellem muscovitmolekylerne udgøres af kationerne og der er således ikke plads til vand mellem molekylerne. I modsætning hertil er ler, som holdes sammen af van der Waals bindinger. Van der Waals bindinger er forholdsvis svage kemiske bindinger, som opstår når elektronfordelingen i en partikel - det kan være et atom (ædelgasserne) eller et molekyle - er ujævnt fordelt. Herved opstår der en forskydning af partiklens elektriske ladning, hvorved den får dipolkarakter. Dipoler i forskellige partikler vil påvirke hinanden og derved tiltrækkes. Styrken af van der Waals bindingerne afhænger af antallet af elektroner i partiklerne, jo flere elektroner jo større styrke har bindingen. Idet lermolekyler holdes sam-

men af van der Waals bindinger er der således masser af plads til vand, hvorfor lermolekyler er i stand til at optage og frigive vand.

Af figur 6.16 fremgår det, at overensstemmelsen mellem det målte spektrum og data fra databasen er fundet med en korrelationskoefficient på 16,11. Idet korrelationskoefficienten er over 5, er fittet mellem det aktuelle spektrum og de til rådighed værende spektre i databasen ikke godt. Herved kan den mineralogiske sammensætning muligvis afvige fra den opstillet i tabel 6.4.

For at bestemme kornkurven for kaolinen blev der foretaget en laseranalyse. Den optegnede kornkurve for kaolinen sammenholdt med kornkurven for Bradsted lerslam, flyveaske og rapid cement fremgår af figur 6.17.



Figur 6.17: Kornkurver for Bradsted lerslam, Aalborg Portland kaolin, flyveaske og rapid cement

Som det fremgår af figur 6.17 er der forskel i de individuelle kornkurver. Den gennemsnitlige partikelstørrelse for de fire materialer er opstillet i tabel 6.5.

Stof	Gennemsnitlig partikelstørrelse [μ]
Flyveaske	18
Kaolin Portland	36
Rapid cement	11
Bradsted lerslam	14

Tabel 6.5: Gennemsnitlig partikelstørrelse

Som det fremgår af tabel 6.5 er den gennemsnitlige partikelstørrelse for kaolinen væsentlig større end de andre tre typer.

Ved pyknometerforsøg er faststofsdensiteten af kaolinen bestemt. Denne er fundet til:

$$\rho_{s,kaolin} = 2717 kg/m^3 \tag{6.3}$$

Kapitel 7

Hydratisering af kitmasse

I det følgende beskrives, hvad der sker, når kitmassen hydratiserer, dvs. hvilke kemiske og fysiske fænomener, der foregår under hydratiseringen. Hvor intet andet er anført, er følgende skrevet med udgangspunkt i [Herholdt et al., 1985].

Cement fremstilles ved formaling af cementklinker. De fire vigtigste klinkermineraler er listet i tabel 7.1, hvor også den kemiske sammensætning er angivet.

Navn	Klinkermineral	Kemisk sammensætning
Tricalciumsilikat	C_3S	$3CaO\cdot SiO_2$
Dicalciumsilikat	C_2S	$2CaO\cdot SiO_2$
Tricalciumaluminat	C_3A	$3CaO\cdot Al_2O_3$
Tetracalciumaluminatferrit	C_4AF	$4CaO\cdot Al_2O_3\cdot Fe_2O_3$

Tabel 7.1: Navn og kemisk sammensætning for de fire vigtigste klinkermineraler

Navnene samt den kemiske sammensætning for de enkelte oxider, der indgår i klinkermineralerne, fremgår af tabel 7.2.

Navn	Kemisk betegnelse	Kemisk sammensætning
Calciumoxid	C	CaO
Siliciumdioxid	S	SiO_2
Aluminiumoxid	A	Al_2O_3
Jernoxid	F	Fe_2O_3
Svovltrioxid	$\overline{S}$	SO_3

Tabel 7.2: Navn og kemisk sammensætning for oxiderne der indgår i klinkermaterialerne

Cement reagerer med vand, hvorved der dannes hydrater, heraf navnet hydratisering. Ved hydratisering af C_3S og C_2S dannes der en serie kalksilikathydrater, hvis sammensætning kan angives som $C_3S_2H_3$. Det er dette stof, der giver cementen dens bindemiddelegenskaber. $C_3S_2H_3$ har fået betegnelsen tobermorit, fordi det minder om det naturlige mineral af samme navn. Udover tobermorit dannes der under hydratiseringen af C_3S og C_2S også calciumhydroxid, CH. Calciumhydroxid gør cementpastaens væskefase stærkt basisk, hvilket er gunstigt for indstøbte armeringsjern, hvis overflade under disse forhold passiveres, således at korrision ikke kan forekomme. Derudover kan calciumhydroxid reagere med puzzolaner under dannelse af calciumsilikathydrater, hvilket vil bidrage til betonens styrke. Hydratiseringen for de silikatholdige klinkermineraler for-

løber som følger:

$$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3CH \tag{7.1}$$

$$2C_2S + 4H \rightarrow C_3S_2H_3 + CH \tag{7.2}$$

C_3S har væsentlig betydning for styrkeudviklingen af cementpastaen. Specielt er dette tilfældet i den tidlige fase, hvilket skyldes, at C_3S sammenlignet med C_2S reagerer hurtigt. C_3S er til dels afhængigt af de andre komponenter i cementen. Således vil tilstedeværelsen af såvel C_3A som gips fremme hydratiseringen af C_3S. C_2S reagerer betydeligt langsommere end C_3S, hvorfor C_2S først har betydning for de sene styrker.

Kendskabet til hydratiseringen af C_3A er temmelig mangelfuld, dog vides det, at C_3A via forskellige mellemprodukter omdannes til slutproduktet C_3AH_6. Hydratiseringen kan således skrives ved:

$$C_3A + H \rightarrow C_3AH_6 \tag{7.3}$$

Ren C_3A reagerer meget hurtigt med vand, hvilket betyder, at blandingen binder af i løbet af få minutter. Problemet vedrørende den hurtige afbinding kan afhjælpes ved, under formalingen, at tilsætte nogle få procent gips, $CaSO_4{\cdot}2H_2O$. Under udfældelse af calciumsulfoaluminathydrat, $3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}3CaSO_4{\cdot}32H_2O$, forsinker gipsen C_3A's reaktion med vand i nogen tid. Ovenstående hydratiseringsreaktion for C_3A undertrykkes og istedet vil følgende reaktion finde sted:

$$C_3A + 3C\overline{S}H_2 + 26H \rightarrow C_6A\overline{S}_3H_{32} \tag{7.4}$$

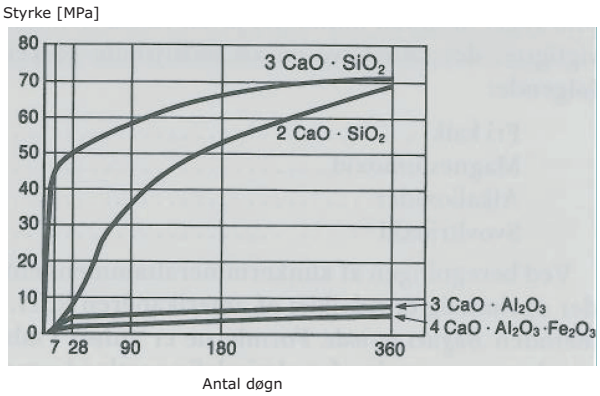
Først når al gips er opbrugt, hvilket typisk vil ske inden for de første 24 timer, vil reaktionen givet ved 7.3 gå igang.

Hydratiseringen af C_4AF er den dårligst undersøgte af samtlige. Dette hænger dels sammen med, at der ikke er tale om et enkelt klinkermineral, men om en række stoffer og dels at disse forbindelser er af relativ ringe betydning. Følgende reaktion anses for brugbar:

$$C_4AF + 2CH + 10H \rightarrow C_3AH_6 + C_3FH_6 \tag{7.5}$$

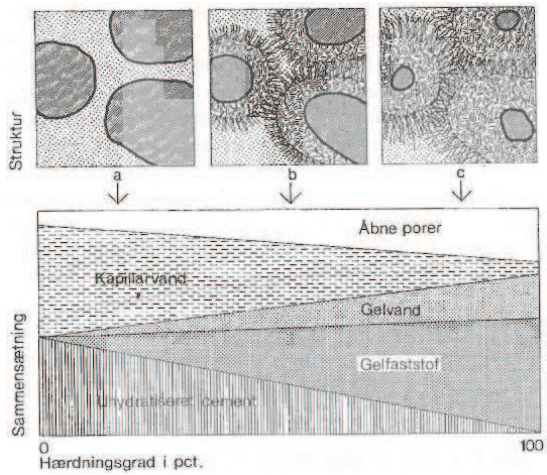
C_4AF bidrager kun i begrænset omfang til cementpastaens styrkeudvikling.

Under hydratiseringen opstår der en calciumsilikathydratgel, som er den vigtigeste styrkegivende komponent i cementpastaen. De forskellige hærdnede klinkermineraler bidrager forskelligt til styrkeudvilkingen. Af figur 7.1 fremgår styrkeudviklingen for de hædnede klinkermineraler.



Figur 7.1: Styrkeudviklingen for de hærdnede klinkermineraler [Herholdt et al., 1985]

Ved hydratisering af cementen dannes cementpastaens struktur. Reaktionen mellem cement og vand starter ved, at ioner frigøres fra cementpartiklernes overflade og danner en overmættet opløsning, hvorfra reaktionsprodukterne udfældes. Hydratiseringsprodukterne dannes især på overfladen af cementpartiklerne, og kaldes cementgel. Ved fortsat hydratisering sker der en formindskelse af kernen af uhydratiseret cement. De dannede gelprodukter er tættest ind mod kernen og har en mere åben struktur ud mod overfladen. Bindemiddelegenskaberne i cementpastaen fremkommer ved sammenvoksning af de dannede gelprodukter mellem de enkelte cementpartikler [Hansen og Pedersen, 1982]. Hydratiseringsprocessen er illustreret på figur 7.2.



Figur 7.2: Illustration af hydratiseringsprocessens forløb [Hansen og Pedersen, 1982]

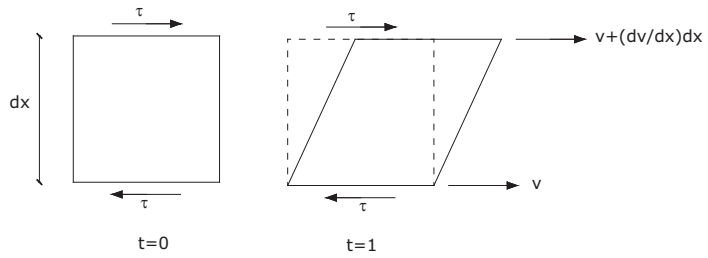
Kapitel 8

Reologi

Reologi er læren om stoffers deformation og flydeegenskaber, dvs. bearbejdeligheden af et givent materiale. For at kunne beskrive, hvorledes flydeegenskaberne for SCC adskiller sig fra traditionel sætmålsbeton, beskrives i det følgende teorien bag nogle af de reologiske grundbegreber. Sluttelig i afsnittet er der forklaret hvordan reologien af betonen karakteriseres vha. BML-viskometer. Hvor intet andet er anført, er følgende skrevet med udgangspunkt i [Thrysøe et al., 2004].

8.1 Newton'ske væsker

For en simpel model antages det idealiserede tilfælde, f.eks. kendes inden for konstruktionslæren ideal-plastiske materialer. Når der refereres til det idealiserede tilfælde indenfor væsker, tales der om Newton'ske væsker. Den Newton'ske væske karakteriseres ved at være usammentrykkelig, dvs., at volumenet er konstant, mens formen kan ændres ved påvirkning af forskydningsspændinger, jf. figur 8.1.



Figur 8.1: Væskeelement påvirket af forskydningsspændinger. Spændingerne medfører, at væsken strømmer med større hastighed i den øverste del af elementet

Kendetegnende for Newton'ske væsker er, at selv små forskydningsspændinger fremkalder deformationer, og denne deformation fortsætter så længe legemet er påvirket. Der er proportionalitet mellem belastningen og deformationshastigheden, udtrykt ved hastighedsgradienten over væskeelementet. Dette medfører, at der er følgende sammenhæng mellem belastningen og deformationshastigheden:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dx} \tag{8.1}$$

Hvor

τ er forskydningsspænding
η er viskositet
$\frac{dv}{dx}$ er hastighedsgradient

De idealiserede materialemodeller er i mange tilfælde tilstrækkelige til at forklare virkelighedens verden, som det f.eks. er tilfældet for vand. For andre materialer er det dog nødvendigt at tage mere avancerede modeller i brug. Dette er tilfældet for frisk beton, idet betonen for små belastninger stort set ikke deformeres, mens det ved store belastninger nærmest opfører sig som en væske. I det følgende beskrives en mere avanceret model, Bingham-modellen.

8.2 Bingham-materialer

Binghams materialemodel er en kombination af to ideale materialemodeller, nemlig modellen for en Newton'sk væske og modellen for et ideal-plastisk materiale. Den ideal-plastiske model beskriver, hvorledes et materiale først deformeres, når en kritisk spænding, τ_0, overskrides. Overskrides den kritiske spænding, begynder materialet at flyde, og materialet vil deformere sig uendeligt. Binghams materialemodel er givet ved:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dx} + \tau_0 \tag{8.2}$$

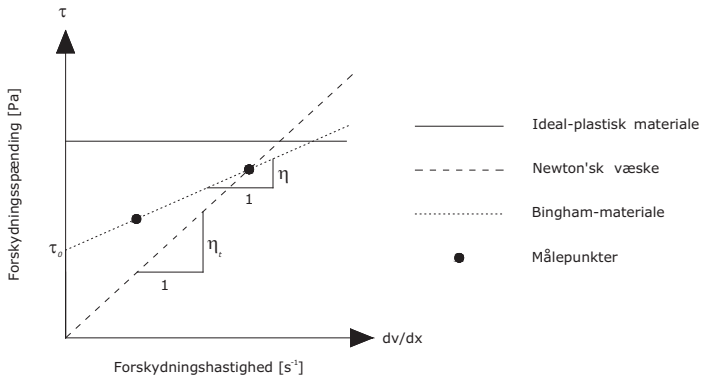
Hvor

τ_0 er den kritiske spænding (flydespændingen)

Flydespændingen er den spænding, der skal tilføres for at få betonen i bevægelse, mens viskositeten er et mål for den indre friktion, dvs., hvor tyktflydende materialet er.

8.3 Bearbejdlighedsparametre

De tre førnævnte materialemodeller, Newton'sk væske, Bingham-materiale og ideal-plastisk materiale, kan alle optegnes i et $(dv/dx, \tau)$-diagram. Af figur 8.2 fremgår de tre materialemodeller i et $(dv/dx, \tau)$-diagram.



Figur 8.2: Sammenhæng mellem forskydngingsspænding og hastighedsgradient for hhv. et ideal-plastisk materiale, en Newton'sk væske samt et Bingham-materiale

Bearbejdligheden af en frisk beton kan beskrives entydigt vha. flydespændingen, τ_0, og viskositeten, η, når betonen betragtes som et Bingham-materiale. For at bestemme de to parametre, τ_0 og η, udføres forsøg, således to målepunkter i $(dv/dx, \tau)$-diagrammet kan optegnes, jf. figur 8.2. Flydespændingen, τ_0, er da skæringen med den lodrette akse, mens viskositeten, η, er gradienten.

Undertiden ses betonens bearbejdelighed beskrevet ved den tilsyneladende viskositet, η_t, som bestemmes ved at betragte materialet som en Newton'sk væske. Viskositeten fundet ved Bingham-modellen benævnes også den plastiske viskositet. I denne rapport anvendes to-parameter måling til at registrere de reologiske parametre. Det skal nævnes, at hvor der benyttes betegnelsen viskositet refereres til den plastiske viskositet.

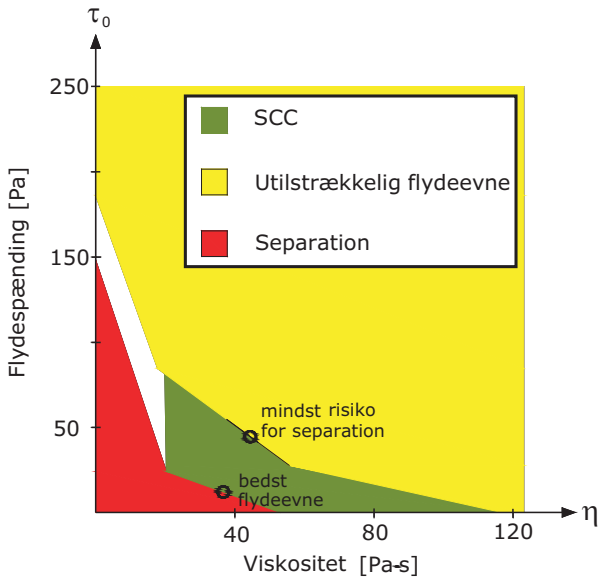
Forsøg til bestemmelse af flydespændingen samt viskositeten lader sig ikke særligt nemt udføre i praksis, hvorfor der istedet ofte benyttes to andre parametre, nemlig flydemål og udbredelsestid.

8.4 Betonens flydeegenskaber

For traditionel sætmålsbeton er flydespændingen relativ høj. Dette bevirker, at der skal anvendes mekanisk påvirkning for at overvinde flydespændingen, oftest i form af vibratorer. Ved SCC skal flydespændingen overvindes alene ved tyngden af egenvægten, hvorfor det er nødvendigt at sænke flydespændingen. Som tidligere nævnt opnås dette til dels ved at tilsætte SPT, men derudover er det ligeledes nødvendigt at have et pastaoverskud i forhold til hvad der er nødvendigt for at udfylde hulrummene mellem tilslagsmaterialerne. Et pastaoverskud

medfører, at tilslaget har lettere ved at bevæge sig, hvorved bearbejdeligheden øges.

For SCC kan der opstå problemer vedrørende separation. Idet stenenes densitet er større end mørtelens densitet, vil tyngdekraften på den enkelte sten være større end opdriften, dvs., at der er en resulterende nedadrettet kraft på stenen. I traditionel sætmålsbeton er denne nedadrettede kraft ikke i stand til at overvinde mørtelens flydespænding. For SCC er flydespændingen lavere, hvorved tyngdekraften på stenen kan medføre, at denne vil synke mod bunden, således der opstår separation. For SCC er der således to modsættende krav. På den ene side er det nødvendigt at sikre sig, at betonen har en højere viskositet end traditionel sætmålsbeton for at undgå separation, men på den anden side må viskositeten ikke blive så høj, at betonen flyder dårligt under udstøbning. Af figur 8.3 fremgår, hvornår der opstår separation, samt hvornår SCC ikke har tilstrækkelig flydeevne.



Figur 8.3: Flydespænding versus viskositet. SCC ligger i området mellem beton, der separerer og beton, der ikke har tilstrækkelig flydeevne [Thrysøe et al., 2004]

Som det fremgår af figur 8.3, er der ikke stor forskel på, om SCC er vellykket eller den må kasseres enten pga., at flydeevnen er for dårlig, eller at betonen separerer. Derfor stilles der strengere krav til produktionskontrol af SCC i forhold til traditionel sætmålsbeton.

8.5 Måling af reologiske parametre

I nærværende projekt er der anvendt to metoder til at bestemme betons reologiske egenskaber. Den ene metode er baseret på måling af flydemålet og den dertilhørende udbredelsestid. I den anden metode bestemmes de reologiske egenskaber ved at anvende et BML-viskometer. I det følgende gennemgås teorien bag udregningen af de reologiske egenskaber vha. BML-viskometeret. For de to metoders forsøgsprocedure henvises til kapitel 15.

8.5.1 BML-viskometer

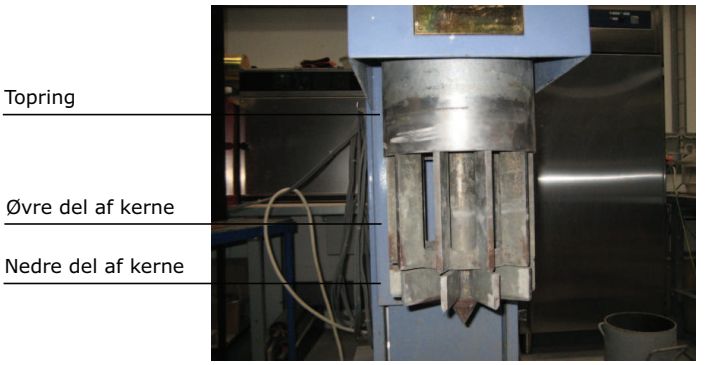
BML-viskometeret er udviklet af Dr. Olafur Wallevik i 1987. Apparatet der blev anvendt i forbindelse med de udførte forsøg i projektet fremgår af figur 8.4. Teoriafsnittet er skrevet med udgangspunkt i [Wallevik, 2000]

Figur 8.4: BML-viskometer

Ved traditionel sætmålsbeton er det som regel flydespændingen, der dominerer bearbejdeligheden, hvorved information omkring viskositeten bliver mindre vigtig. Ved SCC er flydespændingen dog noget lavere og derfor opstår der et behov for at kende både flydespænding og viskositet for at kunne beskrive bearbejdeligheden. Dette kan opnås ved hjælp af BML-viskometeret.

I BML-viskometeret fyldes en beholder med beton. En fortandet kerne nedsænkes i beholderen, og beholderen sættes i rotation. Den fortandede kerne forbliver stationær under beholderens rotation. Betonens kraftpåvirkning på den fortandede kerne måles herefter ved forskellige rotationshastigheder. Disse målinger kan efterfølgende omregnes til et udtryk for betonens reologiske egenskaber. Beholderen har lameller parallel med omdrejningsaksen for at undgå

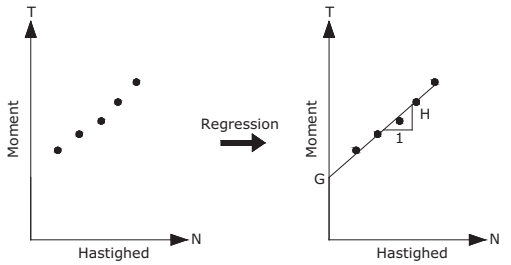
slip mellem betonen og beholderens væg. Den fortandede kerne er opbygget af tre dele, hvilket ses på figur 8.5.



Figur 8.5: De tre dele den fortanede kerne består af

Den øvre del af kernen er koblet sammen med en lastcelle, der måler kraftpåvirkningen, der herefter omsættes til et moment. Under rotationen vil der opstå en kompleks tre dimensionel forskydningstilstand i bunden af beholderen. I denne forskydningstilstand er forskydningen ikke ens ved en given hastighed. Herved er der risiko for, at forskydningerne ved bunden endnu ikke er i ligevægt på trods af, at ligevægt er opnået i den øverste del af beholderen. For at omgå denne problematik er det nødvendigt at sikre en to dimensionel forskydningstilstand. Dette opnås ved, at den nedre del af kernen ikke kobles på lastcellen, og derfor ikke influerer på målingen af momentet.

Ved at registrere det moment, T, kernen påvirkes af ved forskellige hastigheder, N, er det muligt at bestemme flydespændingen samt viskositeten. Principskitsen af et $T - N$ diagram fremgår af figur 8.6.



Figur 8.6: Principskitse af T-N diagram for et BML-viskometer forsøg

Ved at foretage en regressionsanalyse er det muligt at bestemme konstanterne G og H, jf. figur 8.6. Konstanterne er hhv.

- G: Kraften der er nødvendig for at få betonen i bevægelse
- H: Modstanden af betonen ved øget hastighed

Ud fra værdierne af G og H beregner den medfølgende software flydespændingen, τ_0, og viskositeten, η. τ_0 og η findes ved at løse den såkaldte Reiner-Rivlin ligning. Ligningen der skal løses er givet ved:

$$T = \frac{4\pi\mu h}{\left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_y^2}\right)}\Omega + \frac{4\pi\tau_0 h}{\left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_y^2}\right)} ln\left(\frac{r_y}{r_i}\right) = H\Omega + G \tag{8.3}$$

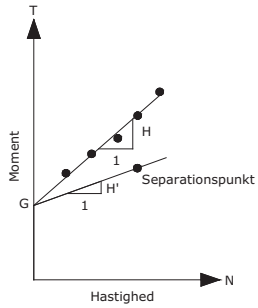
Hvor

μ	er viskositeten [Pa· s]
τ_0	flydespændingen [Pa]
h	er den effektive højde [m]
r_i	er radius på den fortandede kerne [m]
r_y	er radius på beholderen [m]
Ω	er vinkelhastigden [m/s]

Sammenhængen mellem vinkelhastigheden, Ω, og hastigheden, N, er:

$$\Omega = 2\pi \cdot N \tag{8.4}$$

Ved at løse ligningerne 8.3 og 8.4 bestemmes således τ_0 og η. For at løse ligningerne skal der i den medfølgende software indtastes de geometriske størrelser på kernen og beholderen. Udover flydespændingen og viskositeten angiver viskometeret ligeledes en separationskoefficient, som er et mål for, hvor meget betonen separerer. Separationskoefficienten kan opfattes som ændringen af viskositeten under forsøget. Denne separationskoefficient bestemmes ved, at rotationshastigheden øges til maksimum, hvorefter den sænkes til 2/3 af maksimum og separationspunktet afsættes i $T - N$ diagrammet, jf. figur 8.7.



Figur 8.7: Principskitse af T-N diagram for et BML-viskometer forsøg, hvor også separationspunktet er indtegnet

Separationskoefficienten er den relative ændring af viskositeten under forsøget udtrykt ved:

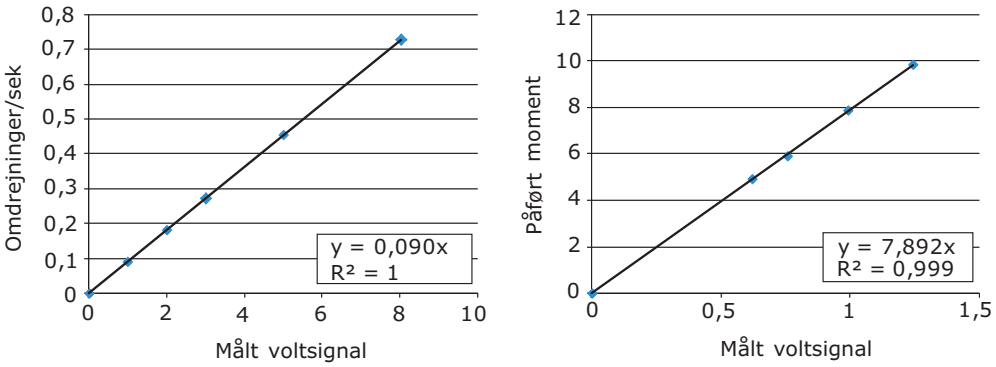
$$Sep = \frac{H - H'}{H} \cdot 100\% \tag{8.5}$$

Er gradienten nogenlunde ens på de to linier (Sep<5%), kan det forventes, at risikoen for at der opstår separation ikke er stor og blandingen derved er stabil. Er der en markant forskel mellem gradienterne (Sep>10%), er resultaterne påvirket af separation, hvilket indikerer, at blandingen er ustabil.

Både hastigheden og momentet registreres som et volt-signal. For at omsætte disse volt-signaler benyttes omregningskonstanter. I forbindelse med anvendelsen af BML-viskometeret er det således nødvendigt indledningsvis at kalibrere apparatet. Dette gøres ved at registrere den hastighed, hvormed beholderen roterer samt det dertilhørende volt-signal. Ved at variere hastigheden er det således muligt at optegne en lineær sammenhæng mellem hastigheden og output signalet i volt. På tilsvarende vis findes omregningskonstanten mellem momentet og volt-signalet ved at påsætte et kendt moment på kernen, og måle den dertilhørende spænding. Momentet er genereret ved at påføre en kendt belastning vinkelret på kernens akse og ud fra armen er momentet beregnet, jf. figur 8.8.

Figur 8.8: Påføring af moment til kalibrering

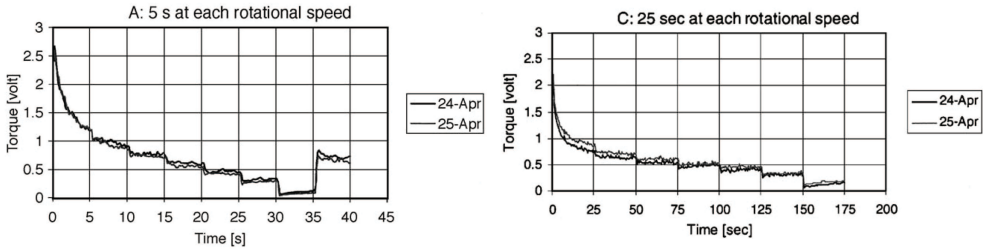
Af figur 8.9 fremgår omregningskonstanterne samt regressionskonstanten.



Figur 8.9: Venstre: Kalibreringskonstant for omdrejningshastigheden; Højre: Kalibreringskonstant for momentet

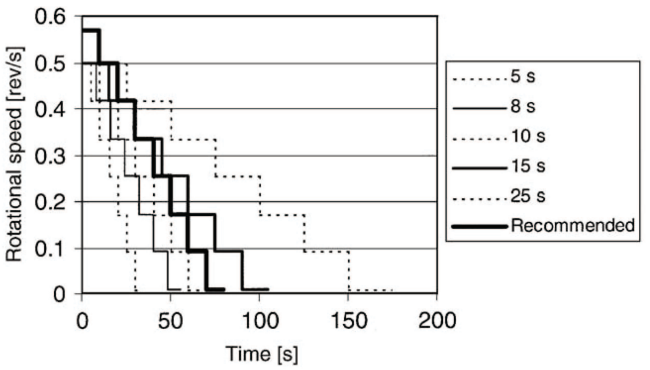
De fundne kalibreringskonstanter indtastes i den medfølgende software, hvorefter det er muligt at foretage forsøg til bestemmelse af τ_0 og η for blandingerne.

Det kan på BML-viskometeret indstilles hvor længe, der skal måles ved hver rotationshastighed. Dette er illustreret på figur 8.10, hvor der er målt med hhv. 5 sek. og 25 sek. ved hver rotationshastighed.



Figur 8.10: Indflydelsen af måleintervallet (tiden) på måleresultaterne [Geiker et al., 2002]

Som det fremgår af figur 8.10, er der ikke opnået ligevægt ved hvert tidsskridt i den måling, hvor der benyttes måleintervaller på 5 sekunder. Ved ligevægt forstås, at momentet antager en konstant værdi over det pågældende tidsskridt. For målingen hvor der anvendes tidsskridt på 25 sek., er der opnået ligevægt ved hvert tidsskridt. En undersøgelse fra 2002 [Geiker et al., 2002] omkring denne problemstilling har igennem forsøg med forskellige rotationshastigheder givet anbefalinger på den optimale prøvetagningstid ved hver rotationshastighed. Et plot af den anbefalede prøvetagningstid fra undersøgelsen er gengivet på figur 8.11.



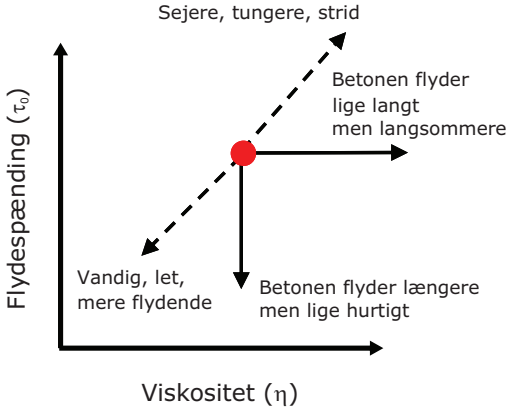
Figur 8.11: Undersøgelse af rotationshastigehed vs. prøvetagningstid [Geiker et al., 2002]

Ved høje rotationshastigheder er det observeret, at momentet falder og ikke opnår ligevægt indenfor de første 20 sekunder. Ved lave rotationshastigheder øges momentet over prøvetagningsperioden, hvilket indikerer, at der sker en genopbygning af blandingens mikrostruktur [Geiker et al., 2002]. I undersøgelsen kunne der konstateres vertikal separation ved prøvetagningstid på 25 sek. og over. Herved forstås, at de tungere partikler i tilslaget bundfældes, hvorved momentet på den indre cylinder falder.

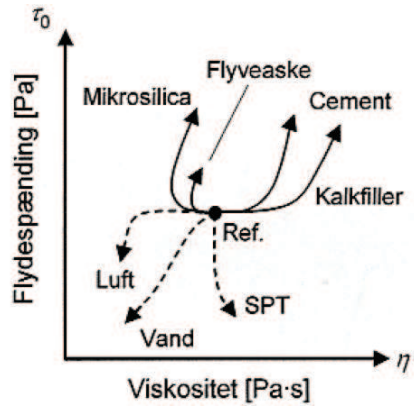
Kapitel 9

Delmaterialernes indflydelse på reologien

Betonproducenterne har konstateret at selv små ændringer i betonens delmaterialer har stor indflydelse på betonens bearbejdelighed. På baggrund heraf findes der i dette kapitel en beskrivelse af de enkelte delmaterialers indflydelse på betonens reologiske egenskaber. En kvalitativ beskrivelse af betonens flydeegenskaber, udtrykt ved ændringen i de reologiske egenskaber fremgår af figur 9.1. En oversigt over delmaterialernes overordnede indflydelse på betoners reologiske egenskaber er illustreret på figur 9.2.



Figur 9.1: Kvalitativ beskrivelse af betoners reologiske egenskaber [Pade, 2008]



Figur 9.2: Principskitse af delmaterialernes overordnede indflydelse på betoners reologiske egenskaber [Thrysøe et al., 2004]

Som det fremgår af figur 9.1, vil en stigning i flydespændingen medføre, at flydemålet nedsættes. Ligeledes fremgår det af figur 9.1, at en ændring i viskositeten medfører en ændring i udbredelseshastigheden. Øges viskositeten, nedsættes udbredelseshastigheden. De delmaterialer eller faktorer der har den største indflydelse på betonens flydeegenskaber er:

- Tilslagsmængde
- Kornform
- Sandets kornkurve

- Vandcementtal
- Flyveaske
- Mikrosilica
- Superplastificerende tilsætningsstoffer
- Viskositetsmodificerende additiver (Stabilisator)
- Luftindblandingsstoffer

Sammensætningen af SCC foregår grundlæggende efter de samme principper som traditionel sætmålsbeton. Det overordnede formål er at styre betonens flydeegenskaber. De ønskede flydeegenskaber vælges dog ofte ud fra hensyntagen til stabilitet og økonomi. Sammensætningsprocessen kan opdeles i to delprocesser:

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

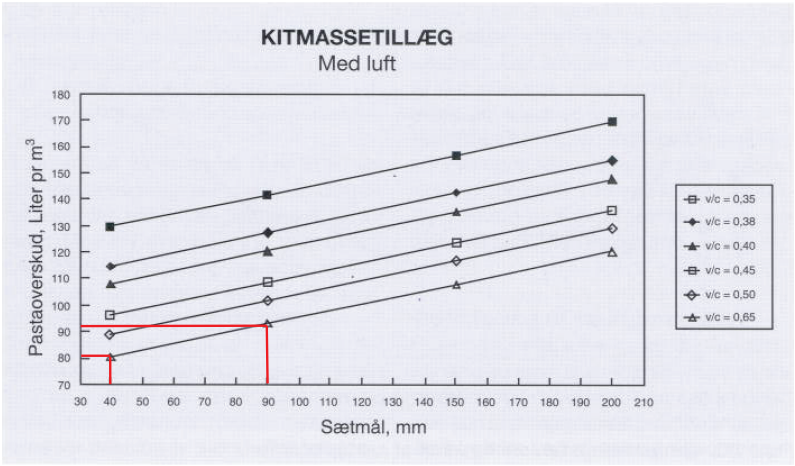
Sammensætningen af tilslaget kan ske enten med udgangspunkt i tilslagenes kornkurver eller med udgangspunkt i pakningsanalyser. Årsagen til at pakningsanalyser foretrækkes er, at pakningsanalyser foretages på baggrund af de enkelte materialers egenpakning, kornkurver samt interaktionen mellem tilslagspartiklerne, mens sammensætning ud fra kornkurvebetragtninger alene er empirisk baseret.

Ved vurdering af om to betoner har de samme reologiske egenskaber, anvendes flydemålet og udbredelseshastigheden som sammenligningsgrundlag. Styrkemæssigt er det oftest 28 døgns styrken, der anvendes som sammenligningsgrundlag. Skal to betoner sammenlignes ud fra et styrkemæssigt synspunkt, skal vandcementtallet være identisk. Forskelligt indhold af flyveaske og mikrosilica kan forårsage, at pulverindholdet i to betoner varierer ved samme vandcementtal. Dette vil influere på de to betoners flydemål jf. figur 9.2. For at opnå samme flydemål er det muligt at justere på blandingens flydespænding ved at ændre doseringen af SPT.

9.1 Tilslagsmængde

Som ved traditionel sætmålsbeton har mængden af tilslag indflydelse på bearbejdeligheden af SCC. Ved traditionel sætmålsbeton sker der en reducering af sætmålet, hvis mængden af tilslag øges. Den modsatte effekt findes, hvis

mængden af tilslag sænkes. I så fald stiger sætmålet. Resultatet af en forøgelse af mængden af tilslag på sætmålet for traditionel sætmålsbeton fremgår af figur 9.3.



Figur 9.3: Tilslagsmængdens indflydelse på flydeegenskaberne [Glavind et al., 1999]

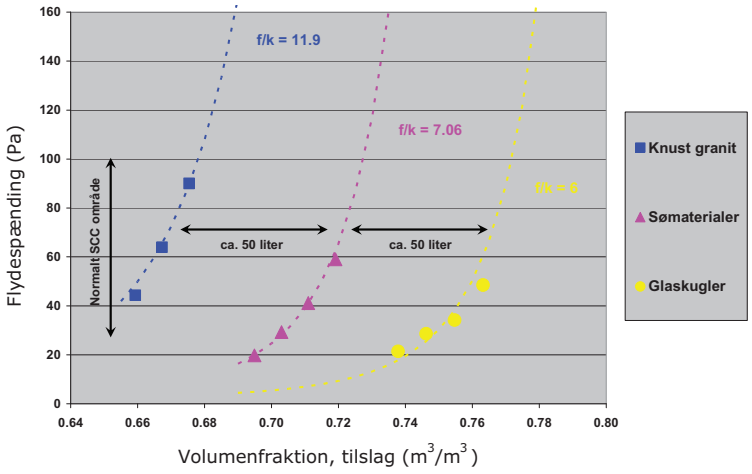
Det fremgår af figur 9.3, at en forøgelse af tilslagsmængden med omkring 10 liter pr. m^3 medfører, at sætmålet sænkes med omkring 50mm. Det fremgår ligeledes af figur 9.3, at denne effekt er uafhængig af vandcementtallet. Der findes på nuværende tidspunkt ikke tilsvarende undersøgelser af tilslagsmængdens indflydelse på flydemålet for SCC, men teoretisk vil fysikken være identisk. En forøgelse af tilslagsmængden vil medføre højere flydespænding. Forøgelsen af flydespændingen er en direkte konsekvens af, at en øget volumenfraktion tilslag gør betonen sejere/stivere. Dette er ligeledes i overensstemmelse med materialemodellen for et Bingham-materiale, jf. kapitel 8.

I takt med at flydespændingen falder ved sænkning af tilslagsmængden, vil viskositeten ligeledes falde. Konsekvensen af øget tilslagsmængde på de reologiske egenskaber er illustreret på figur 9.4.

Figur 9.4: Konsekvensen af øget tilslagsmængde [Pade et al., 2007]

9.2 Kornform

Formen af de enkelte partikler der udgør tilslaget, har ligeledes stor betydning for betonens flydeegenskaber. Fra traditionel sætmålsbeton er det kendt, at kantede partikler kræver mere pasta pr. m^3 end afrundede partikler for at opnå samme reologiske egenskaber. Det fremgår af figur 9.5, at der kan opnås samme flydespænding, med en recept der indeholder ca. 50 liter pr. m^3 mindre pasta, hvis der anvendes afrundede sømaterialer frem for kantede knuste granitter.



Figur 9.5: Kornformens indflydelse på det nødvendige pastavolumen [Pade, 2008]

Undersøgelsen vist på figur 9.5 er foretaget med konstante vandcementtal samt konstant dosering af SPT [Pade, 2008]. Forholdet f/k, der fremgår af figur 9.5, er en faktor der beskriver tilslagets kornform. Den perfekte kornform, i undersøgelsen i form af glaskugler, antager værdien 6. Denne værdi er større for alle andre geometrier. Jo mere kornformen afviger fra kuglen, des højere værdi

antager f/k-faktoren. Som det fremgår af figur 9.5, er det i princippet muligt at spare ca. 50 liter pr. m^3 pasta ved at anvende glaskugler i stedet for sømaterialer og fastholde flydeegenskaberne. Dog har brugen af glaskugler som tilslag indenfor betonproduktion naturligvis både økonomiske og styrkemæssige ulemper, hvorfor det ikke anvendes i praksis. Hvis kantetheden og/eller ruheden af tilslaget, udtrykt ved kornformsfaktoren f/k, øges så stiger både flydespændingen og viskositeten [Pade et al., 2007]. Dette er illustreret på figur 9.6.

Figur 9.6: Konsekvens af øget kantethed/ruhed af tilslaget [Pade et al., 2007]

9.3 Sandets kornkurve

Indflydelsen af kornkurvens sammensætning på SCCs flydeegenskaber er vanskelig at beskrive. Skal indflydelsen af f.eks. sandets kornkurve på SCC vurderes entydigt, skal der være tale om en sand, hvor densitet, kornform og overfladekarakter er identisk for alle sandets partikler uanset størrelse. Dette er et krav, der i realiteten ikke er muligt at overholde for naturmaterialer. Pakningsgraden af sandet og dermed af det sammensatte tilslag kan ændre sig, når sandets kornkurve ændres.

Indflydelsen af sandets kornkurve på SCCs følsomhed overfor naturlige variationer i delmaterialernes egenskaber er endnu ikke klarlagt [Pade et al., 2007].

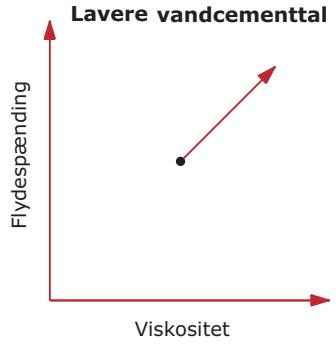
For sand sammensat af forskellige fraktioner tørret kvartssand, vil en forøgelse af sandets finhed medføre, at både flydespændingen og viskositeten forøges. Dette er illustreret på figur 9.7.

Figur 9.7: Konsekvensen af øget finhed af sandfraktionen [Pade et al., 2007]

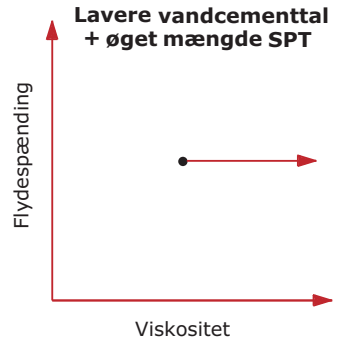
9.4 Vandcementtal

Traditionelt set anvendes vandcementtallet som et kvalitativt udtryk for betonens styrke og tæthed. Her redegøres for virkningen af en ændring i vandcementtallet på de reologiske egenskaber.

Sænkes vandcementtallet øges faststofindholdet i pastaen, hvilket vil medføre, at viskositeten og flydespændingen stiger. Konsekvensen af en sænkning af vandcementtallet uden ændring i doseringen af tilsætningsstoffer er illustreret på figur 9.8. For at være i stand til at fastholde flydemålet under sænkning af vandcementtallet er det nødvendigt at tilsætte SPT. Effekten af dette på betonens flydeegenskaber er illustreret på figur 9.9.



Figur 9.8: Konsekvens af lavere vandcementtal [Pade et al., 2007]



Figur 9.9: Konsekvens af lavere vandcementtal samt øget dosering af SPT [Pade et al., 2007]

9.5 Flyveaske

Flyveaske er en forbrændingsrest, der opstår ved fyring af fint formalet kul i kraftværker [Herholdt et al., 1985]. Når kulstoffet forbrændes består efterladenskaberne hovedsageligt af siliciumdioxid, aluminiumoxid, jernoxid og calcium. Efter afkøling vil disse partikler størkne til mikroskopiske glasagtige kugler som fanges i filtre på kraftværkernes skorstene. Den glasagtige egenskab opstår, idet siliciumdioxid udgør omkring halvdelen af indholdet i flyveasken. Størrelsesordenen af partiklerne er 1-100μ. Densiteten af flyveaske er lavere end cement og vil typisk ligge omkring 2300kg pr. m^3 [Pade et al., 2007].

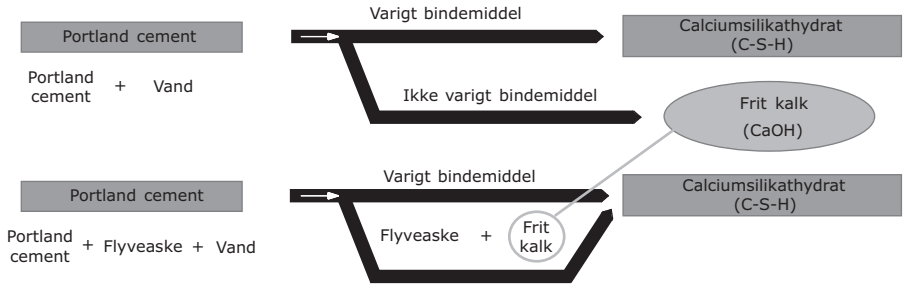
De partikler flyveasken består af er kugleformede, hvilket tillader dem at flyde og blande sig frit i betonen. Dette giver en „kugleleje“ effekt, som virker smørende på det resterende tilslag i den friske beton. Denne smørende effekt øger bearbejdeligheden og bevirker derved, at vandmængden i betonen teoretisk set kan nedsættes [Headwaters, 2008]. Flyveaske som materiale har puzzolanegenskaber. Ved puzzolan forstås et materiale, der ikke i sig selv har bindemiddelegenskaber, men som i formalet form og under tilstedeværelsen af fugt vil reagerer med calciumhydroxid ved normale temperaturer og danne svært opløselige produkter med cementlignende bindeegenskaber [Herholdt et al., 1985]. Calciumhydroxid fremkommer ved hydratisering af kitmassen, hvilket er beskrevet nærmere i kapitel 7.

Flyveasken vil naturligt indeholde en større eller mindre del uforbrændt kulstof. Mængden af det resterende kulstof vil have en direkte virkning på luftindholdet i betonen. Årsagen til dette er, at kulstoffet binder dele af luftindblandingsstoffet, der tilsættes betonen for at opnå det ønskede luftindhold. Dette bevirker, at beton indeholdende flyveaske typisk kræver tre til fire gange så stor mængde luftindblandingsstof for at opnå samme luftindhold som beton uden flyveaske [Herholdt et al., 1985]. Helt specifikt hvor meget ekstra luftindblandingsstof der skal anvendes i beton indeholdende flyveaske for at opnå det korrekte luftindhold, bestemmes af flyveaskens såkaldte glødetab. Ved glødetab forstås den mængde af et givent materiale, der forsvinder efter en glødning ved 900-1000°C under luftens adgang. Dette vægttab er typisk forårsaget af bortgang af kuldioxid og vand [Herholdt et al., 1985]. Der er således en direkte sammenhæng mellem glødetabet og indholdet af uforbrændt kulstof i flyveasken.

Under cements hydratisering er de to vigtigste reaktionsprodukter tobermorit og calciumhydroxid. Tobermorit ($C_3S_2H_3$) er et kalksilikathydrat, der fungerer som bindemiddel i betonpastaen. De store mængder calciumhydroxid

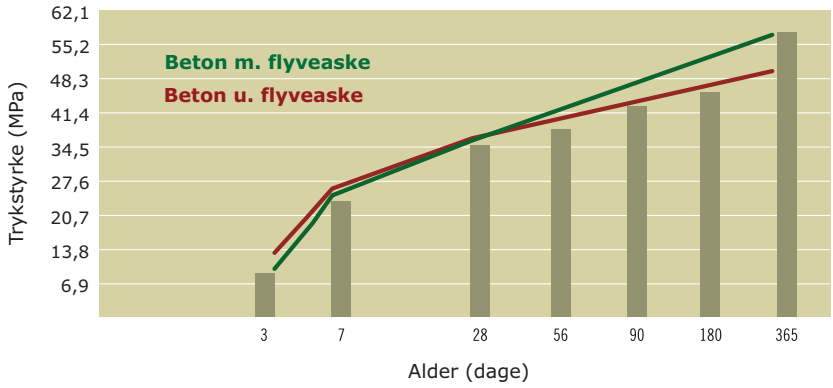
($Ca(OH)_2$) der dannes, har den egenskab at gøre cementpastaen stærkt basisk, men har i sig selv ingen varige bindemiddelegenskaber. En høj pH-værdi i betonen svarende til den stærkt basiske virkning af calciumhydroxiden på pastaen, har den effekt at passivere armeringen. Med tiden vil en del af calciumhydroxiden blive omdannet til calciumcarbonat, hvorved der er fare for, at pH-værdien falder under den grænse, hvor armeringen er passiveret. Denne proces kaldes for „karbonatisering" og er en fordel for uarmeret beton, i og med at betonen herved bliver mere tæt, og styrken stiger. For armeret beton, er det som nævnt en farlig proces, idet faren for korrosion af armeringen øges.

I beton hvor bindemidlet udelukkende udgøres af cement, vil calciumcarbonaten (kalk) restere som inaktivt fyldstof i betonen. Flyveaske har den egenskab at kunne reagere med calciumhydroxiden, hvorved der dannes calciumsilikater med bindemiddelegenskaber tilsvarende klinkermineralernes. Hydratiseringsprocessen for to blandinger, en med og uden flyveaske, er illustreret på figur 9.10.



Figur 9.10: Hydratiseringsprodukter. Øverst: Blanding uden flyveaske; Nederst: Blanding med flyveaske [Headwaters, 2008]

Som det fremgår af figur 9.10, er det muligt også at udnytte calciumhydroxiden, der fremkommer som reaktionsprodukt ved hydratiseringen i styrkemæssig henseende, ved tilsætning af flyveaske. Den største forskel på beton med og uden brug af flyveaske skal findes i styrkeudviklingen. Betoner hvor dele af cementen er erstattet af flyveaske, udvikler styrke langsommere end rene portland cement betoner. Til gengæld vil betoner indeholdende flyveaske være i stand til at udvikle højere langtidsstyrker end rene portland cement betoner. En amerikansk undersøgelse af styrkeudviklingen af beton med og uden flyveaske er gengivet på figur 9.11



Figur 9.11: Flyveaskens bidrag til betonens styrkeudvikling [Headwaters, 2008]

Som det fremgår af figur 9.11 vil betoner indeholdende flyveaske udvikle en højere langtidsstyrke end rene portland cement betoner ved fastholdt vandcementtal. Det fremgår ligeledes af figur 9.11, at de to betoner vil have omkring samme 28 døgns styrke. Forskellen skal findes i udviklingen af det reaktionsprodukt (calciumsilikat) der binder betonen sammen. I rene portland cement betoner skabes disse calciumsilikater ved reaktionen mellem vand og cement. I betoner hvor dele af cementen er erstattet med flyveaske, skabes de første calciumsilikater ligeledes ved reaktionen mellem vand og cementen. Herudover vil flyveasken reagere med biproduktet fra denne første reaktion (mellem vand og cement). Reaktionen mellem flyveaske og biproduktet fra reaktionen mellem vand og cement (calciumhydroxid) vil herefter skabe yderligere calciumsilikater.

Det kan således konstateres, at flyveasken først bidrager til den styrkemæssige udvikling efter den initiale reaktion mellem cement og vand. Dette er illustreret på figur 9.10. Flyveasken er som beskrevet afhængig af calciumhydroxiden, der først fremkommer efter reaktionen mellem vand og cement er forløbet, for at kunne danne de varige calciumsilikater, der binder betonen sammen. Uden cement vil flyveasken ikke kunne reagere. Ved en fuldstændig hydratisering vil 1kg cement i blandingen typisk producere omkring 250g calciumhydroxid [Headwaters, 2008].

Flyveaskes styrkebidrag kan tages i regning ved at anvende den såkaldte aktivitetsfaktor, k. Aktivitetsfaktoren er forholdet mellem en given puzzolanmængdes bidrag til betonstyrken og samme cementmængdes bidrag til styrken. Da der ikke nødvendigvis er linearitet i styrkeudviklingen, er aktivitetsfaktoren

som regel opgivet i forhold til 28 døgns styrken. Anvendes aktivitetsfaktoren i forbindelse med beregning af andre styrker, må stærkt varierende værdier påregnes. Puzzolaners aktivitetsfaktor afhænger af deres reaktionsevne, dvs. af arten og af reaktionstiden [Herholdt et al., 1985]. For flyveaske anvendes en aktivitetsfaktor på 0,5 ved beregning af 28 døgns styrken [Pade et al., 2007]. Dette betyder, at 2kg flyveaske erstatter 1kg cement ved beregning af vandcementtallet.

Idet flyveaskens reaktioner er afhængig af cementens initiale reaktion, er der en øvre grænse for indholdet af flyveaske i forhold til cementindholdet i betoner [Aalborg Portland, 2007]. Da flyveaskens tillæg til betonstyrken regnes vha. aktivitetsfaktormetoden, er det maksimalt tilladelige indhold af flyveaske, der må tages i regning i betonen 33 vægt-% af cementindholdet. Flyveaske har som tidligere beskrevet en densitet på 2300kg pr. m^3 og cement har en densitet på 3100-3150kg pr. m^3, afhængigt om der er tale om Basis eller Rapid cement. Dette medfører, at det maksimalt tilladelige volumenmæssige forhold mellem flyveaske og cement er 1 del flyveaske til 2,25 dele cement. Anvendes en større mængde flyveaske i betonen, må det overskydende indhold ikke medregnes i beregningen af vandcementtallet [DS/EN 206-1, 2002]. Det anbefales dog at holde indholdet af flyveaske i SCC-betoner mellem 15-30% af pulverindholdet, hvor den nedre ende repræsenterer betoner hvor hurtig afbinding ønskes [Thrysøe et al., 2004].

Idet der skal anvendes en aktivitetsfaktor på 0,5, vil tilsætningen af flyveaske til en given blanding medfører, at faststofindholdet stiger. Konsekvensen af et øget faststofindhold i betonen på de reologiske egenskaber fremgår af figur 9.12. For at modvirke effekten af det øgede faststofindhold på flydemålet er det nødvendigt at øge doseringen af SPT. Effekten af dette er illustreret på figur 9.13.

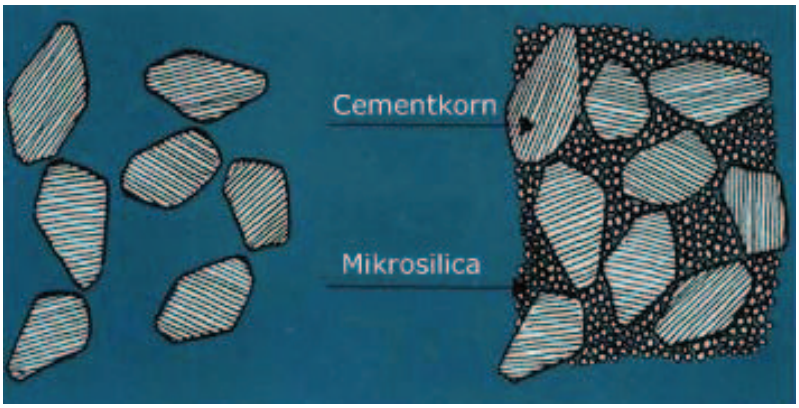
Figur 9.12: Konsekvens af øget mængde flyveaske [Pade et al., 2007]

Figur 9.13: Konsekvens af øget mængde flyveaske samt øget tilsætning af SPT [Pade et al., 2007]

9.6 Mikrosilica

Mikrosilica fremkommer som et biprodukt af forbrændingen af ren quartz med koks i elektriske smelteovne ved produktionen af siliciummetaller og ferrosilicium. Disse siliciummetaller og ferrosilicium produceres under så høje temperaturer, at der dannes en røg af siliciummonooxid, der brænder til siliciumdioxid. Efter forbrænding størkner siliciumdioxiden til små glaskugler [Petersen, 2008]. Mikrosilica fremtræder, i tør tilstand, som et ekstremt finkornet pulver, bestående af kugleformede partikler af amorf kisel med en maksimal kornstørrelse på omkring 1μ. Størrelsesmæssigt er de enkelte mikrosilicapartikler således mindre end cementpartikler. Kisel er betegnelsen for mineraler bestående af siliciumforbindelser. Mikrosilicas specifikke overflade varierer fra 15.000-25.000m^2 pr. kg [Herholdt et al., 1985]. Densiteten af mikrosilica er omkring 2200kg pr. m^3 [Pade et al., 2007].

Mikrosilica består næsten udelukkende af siliciumdioxid (94-98%), hvorved stoffet har udprægede puzzolanegenskaber. Hertil kommer en såkaldt mikrofillereffekt, der består i, at mikrosilicapartiklerne på grund af deres ringe størrelse i forhold til cementkornene, virker tætnende på cementpastabindemidlets struktur ved at udfylde en del af hulrummet mellem cementpartiklerne [Herholdt et al., 1985]. Fillereffekten af mikrosilica er illustreret på figur 9.14.



Figur 9.14: Fillereffekt af mikrosilica [SFA, 2008]

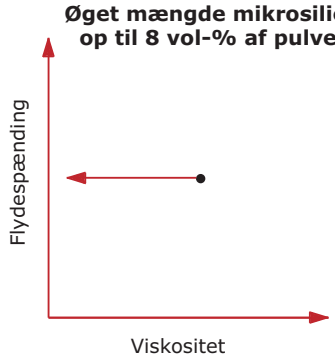
Som ved flyveaske opstår bindemiddelvirkningen af mikrosilica ved, at den calciumhydroxid, der dannes ved cementens hydratisering, reagerer med siliciumdioxiden i mikrosilicaen og danner calciumsilikater. Styrkebidraget fra mikrosilica tages, lig flyveaske, i regning vha. aktivitetsfaktoren, k. For mikrosilica er aktivitetsfaktoren, ved beregning af 28 døgns styrken, k, sat til 2. Ofte vil aktivitetsfaktoren i virkeligheden værre højere ($k = 3-5$) [Herholdt et al., 1985]. Det vil sige, at proportioneringsmæssigt erstatter 1kg mikrosilica 2kg cement ved beregning af vandcementtallet. Holdes betonens pastaindhold konstant, medfører dette, at vandindholdet i betonen øges. Øget mikrosilicaindhold i beton vil derfor resultere i, at faststofvolumenet i pastaen reduceres, pga. aktivitetsfaktoren, idet denne effekt ikke opvejes af den lavere densitet af mikrosilica i forhold til cement [Pade et al., 2007]. Da mikrosilicapartiklerne som beskrevet er kugleformede, lig flyveasken, vil mikrosilica ligeledes give den såkaldte „kugleleje“ effekt og virke smørende på cementkornene i betonen.

En moderat dosering af mikrosilica kan forbedre betonens stabilitet. Især ved problemer med *bleeding*, vil mikrosilica reducere problemet ved at nedsætte mobiliteten af vand i den friske beton [TekInst, 2008]. Fænomenet *bleeding* er karakteriseret ved, at betonens tungeste bestanddele vil søge nedad under tyngdekraftens påvirkning, hvilket vil medføre at noget af blandevandet fortrænges og søger mod overfladen. Når vandet bevæger sig op mod betonoverfladen, kan der dannes grove strømningskanaler i betonen med styrkeforringelse til følge [Herholdt et al., 1985]. Problemet opstår typisk, når der anvendes grove cementer eller sand uden finstof [Pade et al., 2007]. I forbindelse med udtørring kan for meget mikrosilica være årsag til plastiske svindrevner, idet finere cement/puzzolaner øger risikoen herfor. Dette kommer til udtryk når mængden af

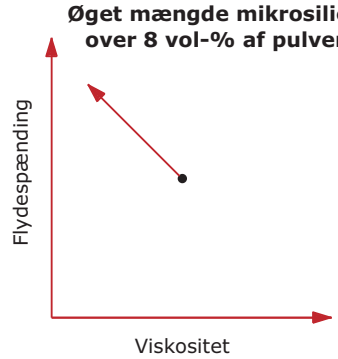
tilsat mikrosilica overstiger en vis grænse. Hvis nemlig den hastighed, hvormed vand fordamper fra betonens overflade, overstiger betonens bleedinghastighed, udtørrer betonoverfladen. Det er da sandsynligt, at der opstår plastisk svind med eventuelle revnedannelser til følge [Herholdt et al., 1985].

Den maksimale mængde mikrosilica, der tillades regnet med i aktivitetsfaktormetoden er 11 vægt-% af cementindholdet. Dette medfører, at det maksimalt tilladelige volumenmæssige forhold mellem mikrosilica og cement er 1 del mikrosilica til 6,45 dele cement. Værdien på 11% specificerer det maksimalt tilladelige indhold af mikrosilica i betoner, mens det ved SCC betoner anbefales at holde tilsætningen på omkring 3-5% [Pade et al., 2007].

Ved tilsætning af mikrosilica op til omkring 8 vol.-% af pulveret vil resultatet være en reduktion af blandingens viskositet. Dette er illustreret på figur 9.15. Tilsættes blandingen mere end 8 vol.-% mikrosilica, er det nødvendigt at tilsætte yderligere SPT for at fastholde flydemålet. Det vil sige, at tilsættes blandingen over 8 vol.-% mikrosilica, vil dette resultere i en forøgelse af blandingens flydespænding. Dette er illustreret på figur 9.16.



Figur 9.15: Konsekvens af øget mængde mikrosilica op til 8 vol.-% af pulveret [Pade et al., 2007]



Figur 9.16: Konsekvens af øget mængde mikrosilica over 8 vol.-% af pulveret [Pade et al., 2007]

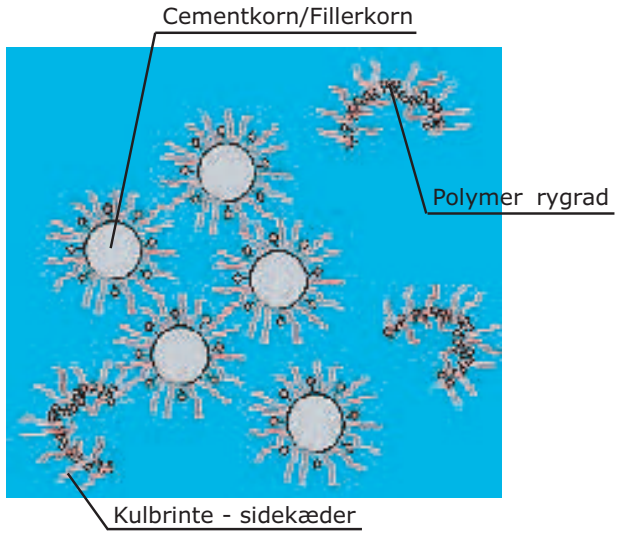
9.7 Superplastificerende tilsætningsstoffer

Superplastificerende tilsætningsstoffer er additiver, der forbedrer bearbejdeligheden af den friske beton. SPTer er primært opdelt i to grupper. Den ene gruppe er produceret specifikt til anvendelse i forbindelse med fabriksbeton, hvor der ønskes et langsomt konsistenstab under transport. Den anden gruppe er specifikt tilpasset producenterne af betonelementers ønsker om hurtig afbin-

ding og styrkeudvikling. Anvendes én type af SPT fra betonelementindustrien til f.eks. fabriksbeton, kan konsekvensen være, at det ønskede flydemål ikke kan opnås. Således findes der eksempler på inkompatibilitet imellem cementtype og superplasttype, hvor det har været umuligt at opnå de tilstrækkelige flydeegenskaber. Det vil sige, hvor flydespændingen ikke har kunnet sænkes til det ønskede niveau [Pade et al., 2007].

Den form for SPT der anvendes i dag, tilhører 2.generation af SPT baseret på modificerede polymerer af polycarboxylater med lange sidekæder. Strukturen af SPTer er bygget op omkring en polymer rygrad, hvortil der er koblet funktionelle sidekæder, der 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 rygrad [Thrysøe et al., 2004].

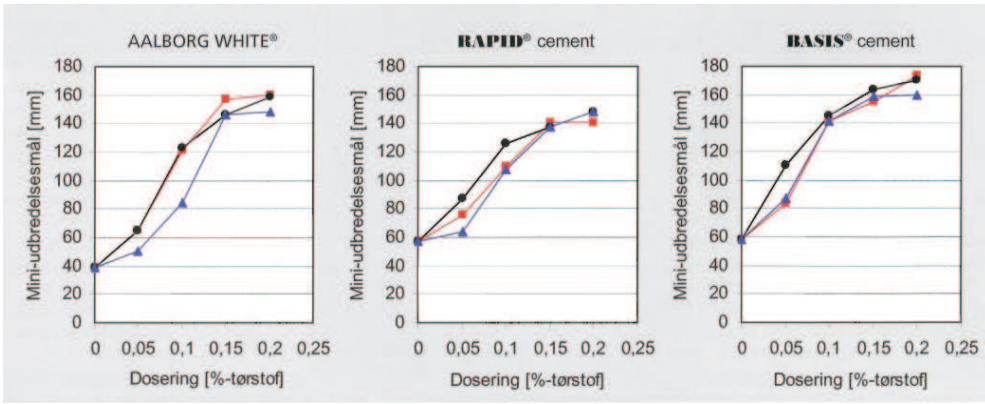
Virkningen af SPT fremkommer ved, at molekylet adsorberes på cement- eller fillerpartiklerne under blanding af beton [Thrysøe et al., 2004]. Når cement/fillerpartiklerne med de adsorberede molekyler på overfladen nærmer sig hinanden, sker der en frastødning imellem de enkelte partikler som følge af steriske hindringer, dvs. en fysisk hindring, mellem de overlappende polymersidekæder [Thrysøe et al., 2004]. Denne steriske effekt virker dispergerende på partiklerne i betonblandingen. En illustration af cement/fillerpartikler med adsorberede polycaboxylater findes på figur 9.17.



Figur 9.17: Principskitse af polycarboxylaters adsorption på cement/filler partiklerne [Thrysøe et al., 2004]

Doseringen af SPT ligger sædvanligvis omkring 1-2 vægt-% af pulveret i blandingen. Som udgangspunkt skal doseringen dog ligge inden for et interval opgivet af leverandøren. De fleste typer af SPT leveres opløst i vand, hvorved dette ekstra vand skal modregnes i proportioneringen. SPT må ikke tilsættes tørre materialer og skal derfor tilføres efter eller sammen med blandevandet. Leverandørernes anvisninger for tilsætning af SPT har ofte meget vide grænser, men et fornuftigt udgangspunkt kunne være en dosering lidt over midtpunktet i intervallet [Thrysøe et al., 2004]. Tilsættes blandingen for meget superplast, vil dette resultere i overdreven separation af betonen. Forsøg har tillige vist, at for meget superplast i betonblandingen vil resultere i en forsinkning af hærdnetiden [Banfill et al., 2008].

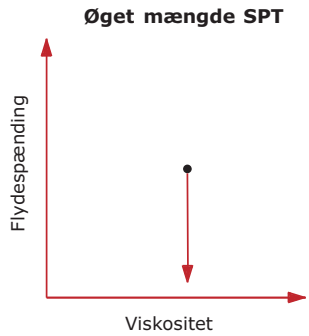
Forsøg med tre forskellige typer SPT på tre danske cementtyper, har demonstreret variation i indflydelsen på flydeegenskaberne. De tre superplasttyper er alle baseret på polycarboxylater [Thrysøe et al., 2004]. Resultaterne fra forsøget er gengivet i figur 9.18.



Figur 9.18: Effekt af tre forskellige typer SPT på flydeegenskaberne [Thrysøe et al., 2004]

Betonens følsomhed overfor variationer i vandindhold har tendens til at øges proportionelt med doseringen af superplast, hvorfor meget høje doseringer sjældent er ønskeligt. Omvendt skal doseringen først og fremmest tilpasses de ønskede flydeegenskaber. Valg af cementtype har betydning for doseringen af superplast, idet f.eks. Aalborg White og Lavalkali sulfatbestandig cement har lavere doseringsbehov end Aalborg Portland Rapid cement og Aalborg Portland Basis cement. Forskellen i doseringsbehov er omkring 25%. Flyveaske har ligeledes et lavere doseringsbehov end cement, så fordelingen mellem cement og flyveaske vil også have betydning, hvis doseringen sker på pulverbasis [Thrysøe et al., 2004]. Indflydelsen af SPT på den friske betons reologiske egen-

skaber fremgår af figur 9.19.



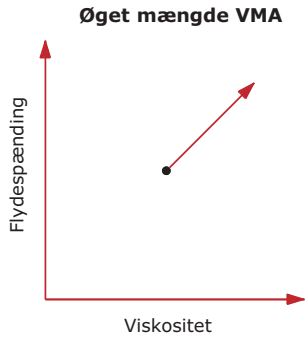
Figur 9.19: Konsekvens af øget tilsætning af SPT [Pade et al., 2007]

Som det fremgår af figur 9.19 påvirker tilsætningen af SPT ikke viskositeten.

9.8 Viskositetsmodificerende additiver

Viskositetsmodificerende additiver tilsættes SCC beton for at modvirke tendens til separation i form af, at tilslaget synker til bunds i pastaen, dvs. for at øge betonens stabilitet. VMA kaldes undertiden for stabilisator. VMA virker ved at tykne vandfasen, dvs. ved at øge viskositeten [Thrysøe et al., 2004]. Denne effekt skyldes, at VMA danner hydrogenbindinger, der fysisk binder vand til sig og sveller. Denne fysiske effekt er størst, når betonen ikke er under kraftpåvirkning, dvs., når betonen er udstøbt.

VMA består af polymerer, oftest af typerne biogums, cellulose derivater, polyethylenoxider eller stivelse. Brugen af VMAer er ikke særlig udbredt i Danmark. Idet hydrogenbindingerne reducerer andelen af det frie vand i blandingen, vil dette medføre en forøgelse af blandingens flydespænding. VMA kan anvendes til at „redde“ en beton som separerer grundet for lav flydespænding. Da andelen af det frie vand reduceres, vil pastaen blive tykkere, hvorved viskositeten ligeledes vil stige. Indflydelsen af VMA på de reologiske egenskaber af den friske beton er illustreret på figur 9.20.



Figur 9.20: Konsekvens af øget tilsætning af VMA

9.9 Luftindblandingsstoffer

LIM tilsættes beton med det formål at skabe en mikroluftporestruktur. Dette bevirker, at pastavolumenet forøges i den friske beton og gør den hærdnede beton frostbestandig. Beton er af natur et finporøst materiale, og hvis porene er vandmættede når betonen udsættes for frost, vil betonen sprænges og revne, da is fylder mere end vand. Selve frostsikkerheden består derfor i, at den introducerede mikroluftporestruktur virker som ekspansionsbeholdere for det frysende vand [Munch-Petersen, 2008].

Normen for tilsætningsstoffer, DS/EN 934-2, foreskriver at al udendørs beton, som udsættes for vand og frost skal fremstilles med et luftindhold på minimum 4,5%. Udsættes betonen yderligere for tøsaltpåvirkning skærpes kravet til luftindholdet. Det naturlige luftindhold i betoner, betegnes „indkapslet luft“ og fremkommer som resultat af rester af luft mellem tilslagspartiklerne. Den indkapslede luft må ikke forveksles med luft i eventuelle porøse korn. Dette såkaldte naturlige luftindhold kan for naturligt forekommende tilslagsmaterialer sættes til omkring 1,5% og for skærvematerialer til omkring 2% af betonrumfanget [Herholdt et al., 1985].

Ved en given betonblanding ønskes en konstant pastamængde. Et højere luftindhold vil således medføre, at andelen af de delmaterialer der indgår i pastaen reduceres, hvilket resulterer i lavere styrker for den hærdnede beton. Som tommelfingerregel anvendes, at trykstyrken typisk reduceres 4-5% pr. % indblandet luft [Aalborg Portland, 2007]. Sædvanligvis har SCC dog rigelig styrke, hvorfor luftindholdet i praksis ikke anses for at have væsentlig negativ betydning [Thrysøe et al., 2004]. Luftporernes størrelse ligger helt nede i fillerens og cementens partikelstørrelse, dvs. mellem 10-500μ. I denne størrelsesorden er

luftbobler ikke bløde og eftergivelige, men forholdsvis stive og har mere karakter af et kugleformet fillermateriale [Thrysøe et al., 2004]. For luftbobler i den rigtige størrelse, 10-300μ, er opdrift ikke noget problem, og luften har dertil en stabiliserende effekt på pastaen i kraft af svage elektrokemiske bindinger mellem partikler og luftbobler [Thrysøe et al., 2004].

LIM består normalt af organiske forbindelser med lange, lige molekylekæder med en hydrofob gruppe i den ene ende og en hydrofil gruppe i den anden ende. Den hydrofile gruppe bevirker, at LIM er opløseligt i vand, mens de hydrofobe grupper medfører en sænkning af blandevandets overfladespænding, og derved gør det lettere at få indblandet luft i betonen. Forskellen mellem deciderede LIM og stoffer der nedsætter vands flydespænding, f.eks. sæbe, er at LIM ligeledes indeholder stoffer, der stabiliserer de skabte luftbobler i betonen. En af de hyppigst anvendte ingredienser i LIM til at sænke flydespændingen i vandet er tensid. Tensid er vandopløselige fedtsyresæber og lignosulfonater. Til at stabilisere den indblandede luft anvendes ofte „VinsolResin“ som er et naturligt blandingsprodukt af kulbrinter hidrørende fra neutraliserede harpikssyrer fra nåletræer [Herholdt et al., 1985]. Kemisk vil VinsolResin opfører sig som en meget tung olie [AVJ, 2008].

Virkningen af et givent LIM afhænger af en lang række faktorer, hvorfor doseringsmængden altid skal fastsættes eksperimentielt med de aktuelle materialer. Af faktorer der må tages i betragtning ved ønske om et bestemt luftindhold, kan nævnes [Herholdt et al., 1985]:

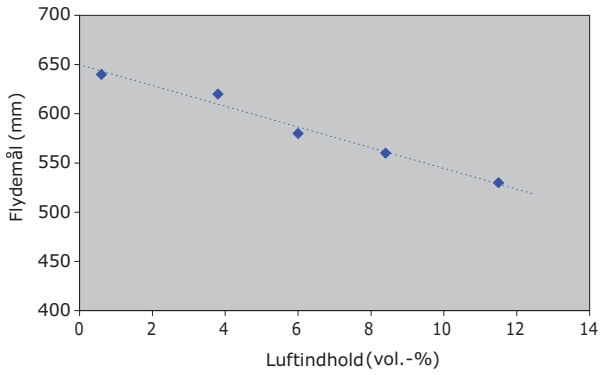
- Tilslagets art og kornkurve: Øget fillerindhold giver øget luftindhold op til en vis grænse, hvorefter det modsatte er tilfældet.
- Blandetid og blandingsmetode, omfang af mekanisk bearbejdning.
- Cementtype: Lavt gipsindhold kræver større dosering.
- Betontemperatur: Jo lavere temperatur, desto højere luftindhold opnås.
- Vandcementtal: Meget stive eller meget bløde betoner vil medføre et lavt luftindhold.
- Andre faktorer: Restkulindhold i flyveaske og portlandflyveaskecement vil adsorbere de hydrofobe molekyler, hvilket nødvendiggør højere dosering når disse bestanddele indgår i betonen.

De ovennævnte faktorer betyder, at luftindholdet i en beton er meget vanskeligt at styre. I den friske beton vil luftboblerne have en plastificerende virkning, dvs.

en smørende effekt, hvorved bearbejdeligheden forøges og separations- og bleeding tendenser samt fare for slamlagsdannelse nedsættes [Herholdt et al., 1985]. Denne smørende virkning kan udnyttes til reduktion af vandindholdet uden at ændre konsistensen af betonen. Luftindholdet bevirker, at den friske beton bliver mere klæbrig og sammenhængende, samt at der i den hærdnede beton skabes større vandtæthed og dermed øget holdbarhed.

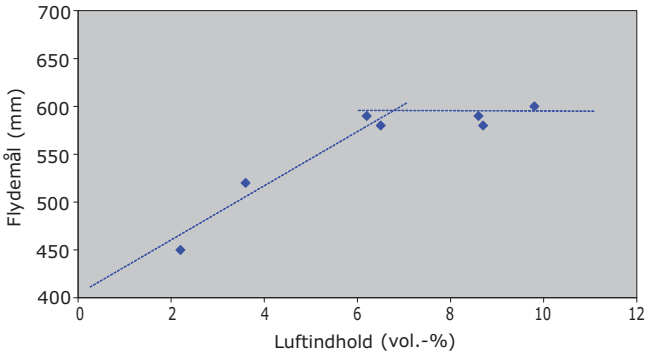
LIM må ikke tilsættes tørre materialer og skal derfor tilsættes sammen med eller efter tilsætning af blandevandet. For at reducere risikoen for, at LIM bliver „fanget“ i hydratiseringsprodukterne, har erfaring vist, at bedste resultat opnås ved at opdele tilsætningen af blandevandet i to faser. Først tilsættes de tørre materialer en så stor del af blandevandet, at alle partikler opfugtes. Herved sættes hydratiseringen igang. Herefter opblandes LIM i resten af blandevandet og tilsættes betonblandingen [Sørensen, 2008].

Luftindholdets indflydelse på flydeegenskaberne afhænger af om luftboblerne erstatter pasta eller tilslag volumenmæssigt. Betragtes situationen, hvor luftboblerne erstatter pasta, vil dette betyde en forøgelse af de reologiske egenskaber. Et volumen pasta giver større bearbejdelighed end det samme volumen indblandet luft. Dette er illustreret på figur 9.21.



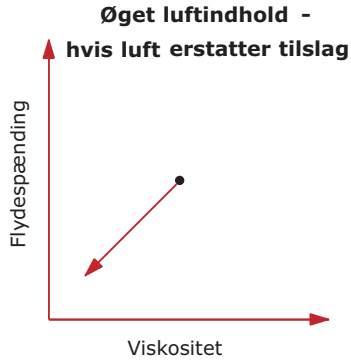
Figur 9.21: Flydemål som funktion af luftindhold for beton med konstant indhold af pasta + luft [Pade, 2008]

Betragtes situationen hvor luftboblerne erstatter tilslag, vil den modsatte effekt kunne observeres op til en vis grænse. Udskiftning af tilslag med luft giver øget bearbejdelighed op til et luftindhold på omkring 6% [Thrysøe et al., 2004]. Dette er illustreret på figur 9.22.



Figur 9.22: Flydemål som funktion af luftindhold for beton med konstant pastaindhold og stigende luftindhold [Pade, 2008].

Effekten af situationen, hvor luftboblerne erstatter tilslag på de reologiske egenskaber, fremgår af figur 9.23. Som beskrevet er dette gældende op til omkring 6 vol.-% indblandet luft. Forøget luftindblanding over 6 vol.-% bidrager ikke til øget bearbejdelighed jf. figur 9.22.



Figur 9.23: Konsekvens af øget luftindhold, hvor luft erstatter tilslag [Pade et al., 2007]

9.10 Opsummering

I dette afsnit findes en opsummering af delmaterialernes indflydelse på de reologiske egenskaber. Dette er opstillet skematisk i figur 9.24.

RECEPTÆNDRING	FLYDESPÆNDING	VISKOSITET
Mere pasta (mindre tilslag)	↓	↓
Mere SPT	↓	↓
Mere flyveaske	holdt konstant	↑
Mere mikrosilica	holdt konstant	↓
Mere stabilisator	↑	holdt konstant
Højrere vandcementtal	holdt konstant	↓
Mere afrundet kornform	↓	↓
Finere sand	↑	↑

Figur 9.24: Indflydelse af receptjusteringer på de reologiske egenskaber for SCC [Pade et al., 2007]

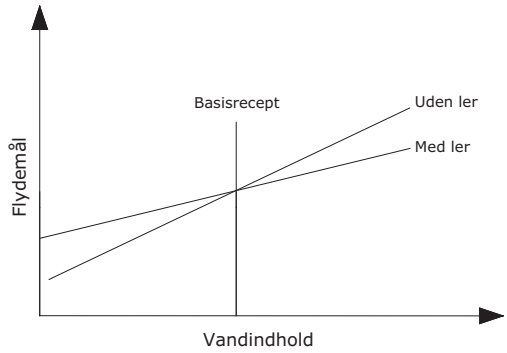
Grønt felt betyder, at værdien af parameteren bliver mindre ved den nævnte ændring. Rødt felt betyder, at værdien bliver større, og gult felt betyder, at parameteren ikke påvirkes af ændringen [Pade et al., 2007].

Kapitel 10

Opstilling af kriterium for stabilitet

Som det fremgår af kapitel 9 vil alle betonens delmaterialer være med til at definere de reologiske egenskaber. Det ligger således uden for rammerne af dette projekt at dokumentere samtlige delmaterialers indflydelse på betonens reologi. I samråd med en række betonproducenter er det valgt at fokusere på vandindholdets indflydelse på flydespændingen samt risikoen for separation.

For at vurdere om lermineraler har en stabiliserende effekt på SCC, er der foretaget forsøg med varierende vandindhold hhv. med og uden tilsætning af lermineraler. I disse forsøg registreres, hvorledes betonens flydemål varierer ved ændringer i vandindholdet. Teorien er, at tilsætningen af lermineraler gør betonen mindre følsom overfor utilsigtede variationer i vandindholdet. Tanken er, at variationen af flydemålet som funktion af vandindholdet er mindre for de blandinger, der er tilsat lermineraler. Principskitse af dette fremgår af figur 10.1.



Figur 10.1: Principskitse af flydemålets ændring som funktion af øget vandindhold for SCC med og uden tilsætning af lermineraler

Som det fremgår af figur 10.1, vil en SCC med tilsætning af lermineraler betragtes som værende mere stabil, hvis gradienten i flydemål/vandindhold afbildningen er mindre end gradienten for en SCC uden tilsætning af lermineraler.

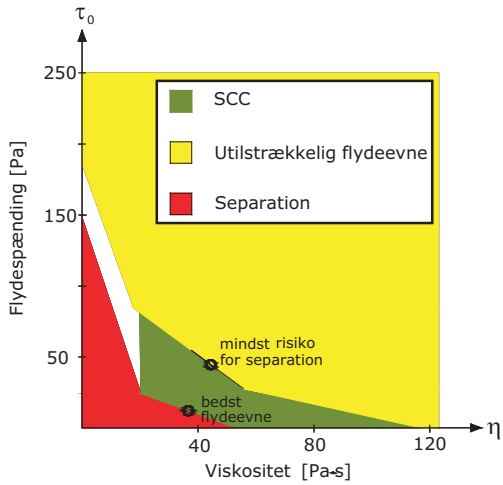
Der er i projektet anvendt tre metoder til at bestemme separationen af en given betonblanding. De tre metoder er:

- Visuel observation af separation ved flydemål
- Måling af separation ved metode opstillet af Aalborg Portland
- Måling af separation vha. BML-viskometer

I praksis anvendes den visuelle bestemmelse af separation ved modtagekontrol af betonen på byggepladser og deslige. Igennem projektet har det vist sig, at den visuelle bedømmelse giver det mest retvisende billede af separationen, hvorfor denne metode tillægges størst betydning. Årsagen til dette er primært, at målingerne af separationen vha. både Aalborg Portlands metode samt BML-viskometeret har vist sig ikke at være konsistente.

Således er kriteriet for stabilitet i nærværende projekt baseret på lerets indflydelse på betonens flydespænding samt lerets evne til at modvirke separation i den pågældende blanding.

Den sidste reologiske parameter, viskositeten, vil dog også have stor indflydelse på betonens brugsegenskaber, men inddrages ikke i stabilitetskriteriet. I forsøgene er viskositeten dokumenteret vha. flydetiden, T_{500}. Idet de tilsatte lermineraler vil optage vand, vil dette uvægerligt have indflydelse på betonens viskositet, idet mængden af det frie vand udgør den faktor, der har størst indflydelse på viskositeten. Stiger viskositeten vil dette have en positiv indflydelse på stabiliteten ved at pastaen tyknes jf. figur 10.2. Det er dog ikke tydeligt i hvilket omfang, dette gør sig gældende, hvilket forsøgene skal hjælpe med til at afdække.



Figur 10.2: Flydespænding versus viskositet. SCC ligger i området mellem beton, der separerer og beton, der ikke har tilstrækkelig flydeevne [Thrysøe et al., 2004]

Idet stabilitetskriteriet er bygget op omkring variationer i tilslagsmaterialernes vandindhold, gives der i det følgende en vurdering af, hvor stort et ekstra vandindhold der må forventes at kunne forekomme i en given blanding. Hovedsageligt er det vandindholdet i sandet, der kan skabe problemer, da dette kan være meget stort grundet det store overfladeareal sammenlignet med stenene.

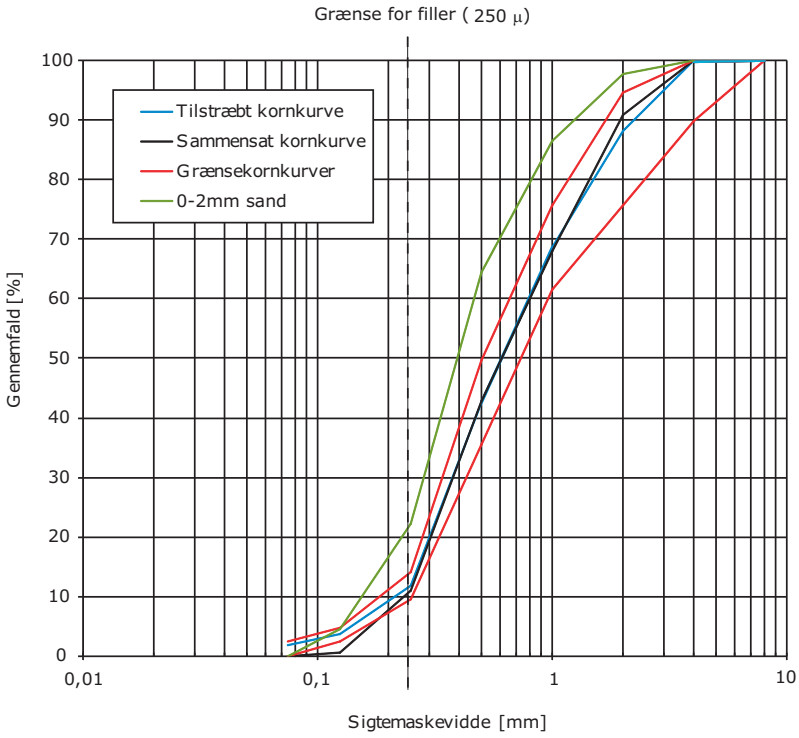
Tilslagsmaterialerne opbevares som regel udendørs, hvilket kan give anledning til store variationer i vandindholdet. Det er således ikke ualmindeligt, at sand kan indeholde 5% vand [Sørensen, 2008]. I den anvendte basisrecept benyttes ca. 800kg sand pr. m^3, hvilket således svarer til 40kg ekstra vand pr. m^3 ved et vandindhold på 5%. Der benyttes ca. 150kg vand pr. m^3, hvorved de 40kg ekstra vand pr. m^3 svarer til en forøgelse af vandindholdet i betonen på ca. 27%.

I forbindelse med produktion af beton foretages der jævnlig kontrol af vandindholdet i tilslagsmaterialerne, hvorfor det vurderes, at det ikke er realistisk, at vandindholdet i hver blanding forøges med 27%. På baggrund af dette antager projektgruppen, at der med rimelighed kan forventes et ekstra vandindhold på mellem 5-10%. Derfor er der i undersøgelsen af stabiliteten ved tilsætning af lermineraler opereret med et ekstra vandindhold på maksimalt 10%.

Kapitel 11

Mineralogi versus partikelstørrelse

Fillerindholdet i en given blanding har stor indflydelse på stabiliteten af en beton. Filler defineres som partikler på under 250μ. For at vurdere fillerindholdets betydning for stabiliteten er der foretaget forsøg med to forskellige kornkurver. Den ene består af en veldefineret kornkurve beliggende indenfor de anbefalede grænsekornkurver i henhold til [Thrysøe et al., 2004]. Den anden er kornkurven for 0-2mm sand. Kornkurverne fremgår af figur 11.1, hvor også grænsen for filler er indtegnet. For yderligere information omkring kornkurverne og deres sammensætning henvises til kapitel 16.



Figur 11.1: Kornkurve for 0-2mm sand samt den sammensatte kornkurve

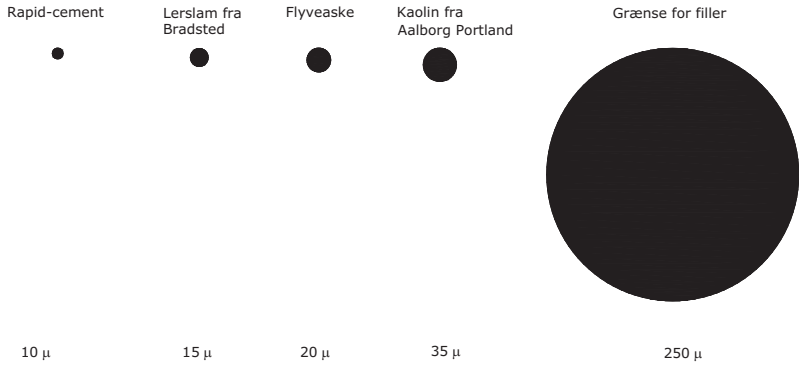
Som det fremgår af figur 11.1, er fillerindholdet i 0-2mm sand større end i den sammensatte kornkurve.

I de efterfølgende forsøg kunne det konstateres, at der ikke kunne skabes en stabil beton under anvendelse af den sammensatte kornkurve. I de blandinger hvor den sammensatte kornkurve blev benyttet, kunne der observeres tydelig separation. Ved anvendelse af 0-2mm sandet forblev betonen stabil.

På baggrund af disse forsøg kunne det konstateres, at fillerindholdet i betonen er af stor betydning for stabiliteten.

Idet begge de anvendte lertilsætninger kan betegnes som filler, er det vigtigt, at fastslå i hvor høj grad, det er lermineralerne eller partikelstørrelsen i lertilsætningen, der bidrager til stabiliteten. Under karakteriseringen af lermineralerne kunne det konstateres, at kornkurven for begge de anvendte lertyper lå meget tæt op ad kornkurven for flyveasken jf. 6.3. Sammenlignes stabiliteten af blandinger med tilsætning af hhv. flyveaske og lermineraler, kan det således undersøges, om det er mineralogien eller partikelstørrelsen, der bidrager til stabiliteten.

Af figur 11.2 fremgår middelkornstørrelsen for de anvendte delmaterialer.



Figur 11.2: Middelkornstørrelser for de anvendte delmaterialer

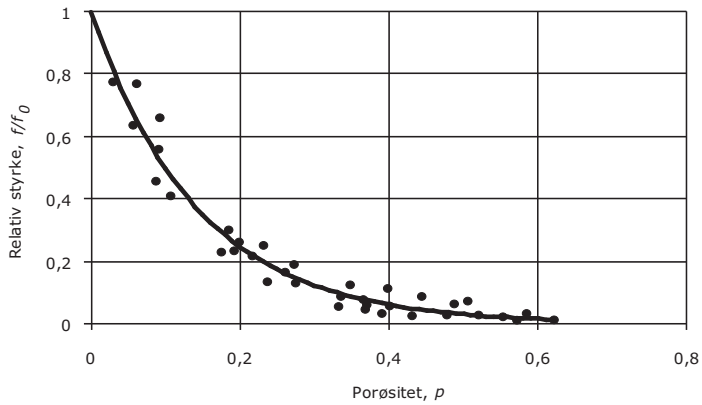
Som reference er middelkornstørrelsen for 0-2mm sand 400μ.

Kapitel 12
Trykstyrke

Trykstyrken anses for at være betonens vigtigste egenskab, og der er en vis relation mellem andre af betonens egenskaber og trykstyrken. De væsentligste parametre, der har indflydelse på betonens trykstyrke, er vandcementtallet, luftindholdet, indholdet af mineralske tilsætningsstoffer (puzzolaner) og tilslagets art.

Beton klassificeres ved dens trykstyrke, dvs. bestilles en 45MPa beton, henvises der til en beton med en enakset karakteristisk 28 døgns trykstyrke på 45MPa. I dette kapitel beskrives hvilke parametre, der har indflydelse på betonens trykstyrke. Hvor intet andet er anført, er følgende skrevet med udgangspunkt i [Herholdt et al., 1985].

Beton betragtes som et kompositmateriale bestående af en cementpastamatrix og et tilslagsmateriale. Tilslagets (sand- og stenpartikler) styrke er normalt væsentlig større end cementpastaens, hvorfor et brud hovedsageligt foregår gennem cementpastaen. Cementpastaens styrke vil som regel være bestemmende for betonens styrke. Styrken af cementpastaen opnås gennem hydratisering, jf. kapitel 7. Som for alle andre materialer gælder det ligeledes for cementpastaen, at styrken aftager med stigende porøsitet. Dette er illustreret på figur 12.1.



Figur 12.1: Sammenhængen mellem den relative styrke og porøsiteten for en række materialer. Den indtegnede kurve er givet ved $f/f_0 = e^{-7p}$ [Herholdt et al., 1985]

Cementpastaens porøsitet afhænger især af vandcementtallet på fremstillingsstadiet. Dette har derfor medført, at der gennem tiden er opstillet flere forskellige empiriske love, som udtrykker trykstyrken som funktion af vandcementtallet. Udover vandcementtallet afhænger styrken ligeledes af luftindholdet. I forbindelse med luftindhold skældnes der mellem to typer, naturligt luft og indblandet luft. Indblandes luft i betonen, vil dette nedsætte styrken i forhold til en ikke-luftindblandet beton med samme vandcementtal. Dette forhold omkring luftindhold tages der hensyn til i enkelte af disse empiriske formler, bl.a. Bolomeys korrigerede formel. Erfaringer har vist, at for hver % luft der indblandes nedsættes styrken med ca. 4%. Bolomeys korrigerede formel er givet ved:

$$f_c = K \cdot \left(\frac{1}{v/c} - 0,5 \right) \cdot (1 - 0,04\,(a - a_0)) \tag{12.1}$$

Hvor

f_c	er trykstyrken [MPa]
K	er en konstant, der bl.a. afhænger af cementtypen [MPa]
a	er luftindholdet [%]
a_0	er det naturlige luftindhold [%]

Det fysisk virkende tilsætningsstof, der er anvendt i dette projekt, er SPT, hvilket ikke har indflydelse på betonens trykstyrke.

Modsat de fysisk virkende tilsætningsstoffer vil visse mineralske tilsætningsstoffer bidrage til styrken. I Danmark er det hovedsageligt flyveaske og mikrosilica, der anvendes og mikrosilicaen i mindre og mindre omfang, idet anskaffelsesprisen er høj. Bidraget fra mineralske tilsætningsstoffer tages i regning ved den såkaldte aktivitetsfaktor, k. Aktivitetsfaktoren angiver forholdet mellem bidraget til betonstyrken for en given mængde mineralsk tilsætningsstof og styrkebidraget for samme mængde cement. For at tage aktivitetsfaktoren i regning benyttes et ækvivalent vandcementtal, $(v/c)_{ækv}$, i formel 12.1, hvor indholdet af et mineralsk tilsætningsstof omregnes til et ækvivalent cement indhold. Det ækvivalente vandcementtal beregnes af formel:

$$(v/c)_{ækv} = \frac{v}{c + k \cdot P} \tag{12.2}$$

Hvor

v er cementindholdet $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
c er vandindholdet $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
k er aktivitetsfaktoren [-]
P er indholdet af det anvendte mineralske tilsætningsstof $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

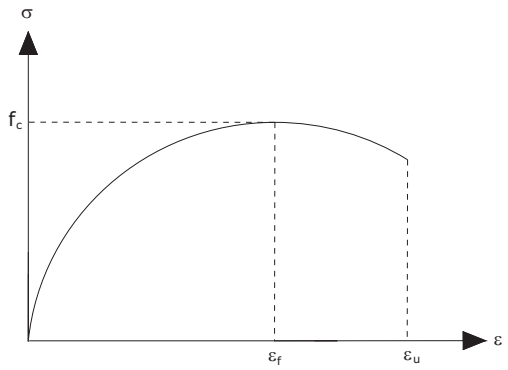
Som nævnt tidligere vil tilslagets art og partikelstørrelsesfordeling i et vist omfang påvirke trykstyrken. Normalt vil tilslagsarten ikke have nogen indflydelse på trykstyrken, idet tilslagets styrke, som tidligere beskrevet, er meget større end cementpastaens. Anvendes imidlertid lette tilslagsmaterialer, f.eks. letklinker, vil betonens styrke afhænge stærkt af tilslagsmaterialets egenskaber. Da der i dette projekt benyttes bakkesten og granit, vil styrken således overvejende afhænge af cementpastaens egenskaber. Tilslagets kornform og partikelstørrelse har i sig selv ingen indflydelse på betonens styrke. Begge egenskaber påvirker dog betonens vandbehov, hvorfor det indirekte kan påvirke styrken, idet det bevirker en ændring i vandcementtallet.

Kapitel 13

Elasticitetskoefficient

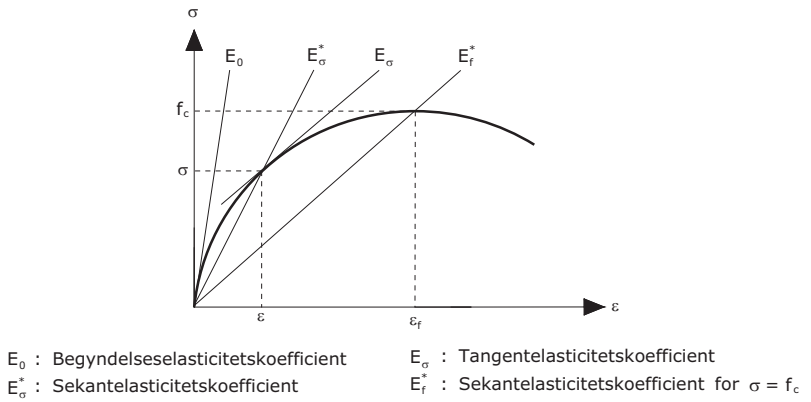
En anden af betonens vigtige egenskaber er elasticitetskoefficienten, som benyttes i forbindelse med at beskrive proportionaliteten mellem belastning og deformation. I det følgende beskrives, hvorledes elasticitetskoefficienten bestemmes, samt hvilke parametre, der har indflydelse på elasticiteskoefficienten. Følgende er skrevet med udgangspunkt i [Herholdt et al., 1985].

Når et betonlegeme påvirkes af tryk, vil der ske en deformation af legemet. Arbejdskurven for et materiale er en afbildning af sammenhængen mellem belastning og deformation. Ofte afbildes normalspændingen, σ, som funktion af tøjningen, ε. Arbejdskurven for beton har en krum form, jf. figur 13.1. Toppunktet angiver trykstyrken, f_c, med den dertilhørende tøjning, ε_f, mens ε_u angiver brudtøjningen.



Figur 13.1: Principskitse af trykarbejdskurven for beton

Elasticitetskoefficienten bestemmes som gradienten af arbejdskurven. På grund af arbejdskurvens krumme form er det muligt at bestemme flere forskellige elasticitetskoefficienter for samme beton. Elasticitetskoefficienten angives derfor enten som tangent- eller sekanthældningen. Tangent- og sekanthældningen er vist på figur 13.2.



Figur 13.2: Principskitse af de forskellige typer af elasticitetskoefficienter for beton

Som det fremgår af figur 13.2 afhænger elasticitetskoefficienten af spændingen, hvor elasicitetskoefficienten aftager med voksende spænding. Oftest angives elasticitetskoefficienten som sekanthældningen svarende til 0,3 gange brudspændingen, f_c.

Som tidligere nævnt er beton et kompositmateriale. Komponenterne i betonen har forskellige egenskaber, hvorfor betonens elasticitetskoefficient afhænger af elasticitetskoefficienterne for de enkelte komponenter, samt blandingsforholdet mellem disse. I stedet for at betragte beton som et flerkomponentsmateriale betragtes det som et tokomponentsmateriale, bestående af tilslag og cementpasta. Herved er det muligt at opstille forholdsvis simple formler. Elasticitetskoefficienten for et tokomponentmateriale kan således bestemmes ved:

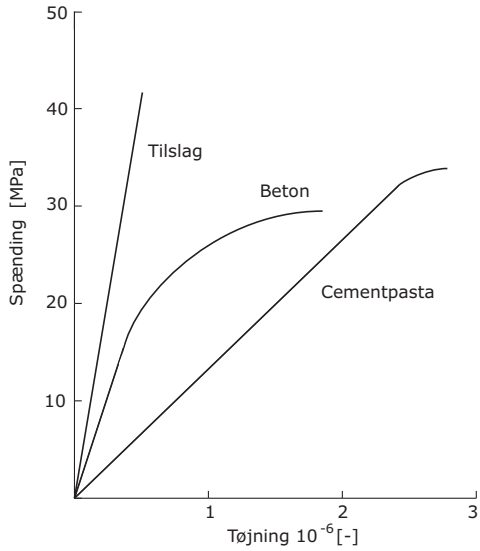
$$\frac{1}{E} = \frac{1-n}{E_p} + \frac{n}{E_t} \quad for\ E_p\ <\ E_t \tag{13.1}$$

Hvor

E	er betonens elasticitetskoefficient [MPa]
E_p	er cementpastaens elasticitetskoefficient [MPa]
E_t	er tilslagets elasticitetskoefficient [MPa]
n	er volumenandelen af tilslaget [-]

Formel 13.1 er gældende for samme spænding i tilslag og cementpasta, hvilket vil være gældende for stift tilslag og relativ slap cementpasta.

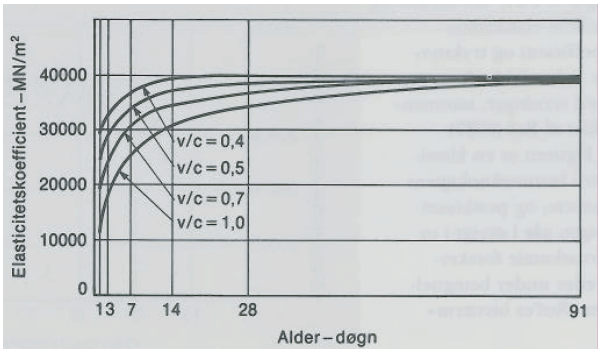
Arbejdskurverne for hhv. tilslaget og cementpastaen er tilnærmelsesvis retlinede, mens betonens arbejdskurve som tidligere nævnt er krum, jf. figur 13.3.



Figur 13.3: Spænding-tøjning relation for camentpasta, tilslag og beton [Neville og Brooks, 1987]

Grunden til at betonens arbejdskurve er krum, på trods af komponenternes lineære sammenhæng, er at der opstår spændingskoncentrationer omkring tilslagspartiklerne, hvilket medfører mikrorevner. Herved opnås større tøjninger ved samme spændingskoncentration. Disse mikrorevner forbliver stabile og vokser ikke op til en spænding på ca. 30% af trykspændingen. Efter de 30% begynder mikrorevnerne at udvide sig, indtil de til sidst brydes [Neville og Brooks, 1987]. Dette er illustreret på figur 13.3, hvor arbejdskurven for betonen til at starte med er forholdsvis lineær, og først derefter begynder at blive krum.

Som tidligere nævnt afhænger betonens elasticitetskoefficient af egenskaberne for hhv. cementpastaen og tilslaget. Cementpastaens egenskaber afhænger af vandcementtallet. Elasticitetskoefficienten vokser med aftagende vandcementtal, dog er effekten af variationer i vandcementtallet mindre end for styrken. Elasticitetskoefficientens afhængighed af vandcementtallet er især udtalt på de tidligere hærdningsstadier. Således ser det ud til, at sekantelasticitetskoefficienten med tiden når en slutværdi på ca. 40000MPa stort set uafhængigt af vandcementtallet, jf. figur 13.4.



Figur 13.4: Betonens elasticitetsmodul som funktion af tiden for forskellige vandcementtal [Herholdt et al., 1985]

Elasticitetskoefficientens delvise uafhængighed af vandcementtallet, kan forklares ud fra at elasticitetskoefficienten afhænger af begge komponenter, nemlig cementpasta og tilslag, mens trykstyrken kun afhænger af det svageste materiale, oftest cementpastaen. Idet cementpastaen kun udgør ca. 20-30 rumfangsprocent, vil selv store variationer i cementpastaens elasticitetskoefficient kun have ringe indflydelse på betonens elasticitetskoefficient.

I lighed med trykstyrken har indblandet luft en indvirkning på elasticitetskoefficienten. Indblandet luft medfører en forøgelse af cementpastaens porøsitet, hvorved cementpastaens, og dermed også betonens, elasticitetskoefficient falder. Virkningen af indblandet luft er dog ikke så stor for elasticitetskoefficienten som tilfældet er for trykstyrken, idet der gælder, at elasticitetskoefficienten aftager med ca. 2% for hver procent luft der indblandes.

DEL III

I del III gives en beskrivelse af den overordnede forsøgsstrategi. Det vil sige, hvilke forsøg der er udført samt formålet med de enkelte forsøg. Herefter følger en beskrivelse af forsøgsproceduren. For den friske beton er det de reologiske parametre samt risikoen for separation, der er undersøgt. Dette er gjort ved udbredelsesforsøg samt ved anvendelse af BML-viskometer. For den hærdnede beton er det trykstyrken og elasticitetskoefficienten, der er undersøgt. Ligeledes er der støbt cylindre til bestemmelse af separationen.

FORSØGSBESKRIVELSE

14 Forsøgsstrategi **111**

15 Forsøgsprocedure **113**
15.1 Blanding af SCC…….…… 113
15.2 Forsøg med frisk SCC……... 115
15.3 Udstøbning og lagring af prøvelegemer…..…….. 121
15.4 Forsøg med hærdnet SCC……..…… 122

Kapitel 14
Forsøgsstrategi

I dette kapitel beskrives hvilke forsøg, der er udført samt formålet med disse.

Indledningsvis undersøges hvor meget SPT, der skal tilsættes basisrecepten for at mætningspunktet er opnået. Dette forsøg har til formål at minimere mulige fejlkilder i de efterfølgende blandinger. Eventuelle unøjagtigheder i afvejningen af SPT vil således ikke påvirke flydemålet. Mætningspunktet er fundet ved at tilsætte SPT som vægt-% af pulveret, indtil flydemålet stagnerer. Forsøgene udføres på mørtel for at minimere materialeforbruget.

Ved produktionen af beton har det vist sig vanskeligt at opnå samme egenskaber for betonen fra blanding til blanding. For at vurdere hvor store variationer, der kan forventes af den friskes betons egenskaber, er der foretaget forsøg af reproducerbarheden. Formålet med dette forsøg er således at registrere de reologiske egenskaber, for derefter at fastslå hvilke naturlige variationer, der kan forventes fra blanding til blanding. Der laves seks ens blandinger, hvorudfra middelværdi og standardafvigelsen bestemmes. I de videre forsøg benyttes standardafvigelsen, til at give en indikation af de naturlige variationer i de reologiske parametre, der må kunne forventes.

Det laves et forsøg, hvor der tilsættes kaolin til en recept tilsat 5% ekstra vand. Tilsætningen af kaolin øges gradvist. Formålet med dette forsøg er at give en vurdering af, hvor stor en mængde kaolin, der skal tilsættes i de efterfølgende forsøg.

Efter det er konstateret, hvilken mængde kaolin der skal tilsættes, udføres forsøg med varierende vandindhold. Formålet med dette forsøg er at undersøge, om tilsætningen af kaolin fra Aalborg Portland virker stabiliserende på den friske beton. Vandindholdet varieres ud fra et udgangspunkt, hvor betonen er stabil. Vurderingen af i hvor høj grad tilsætningen af lermineraler virker stabiliserende afgøres ud fra to kriterier. Det ene kriterium, er hvor følsomt flydemålet er overfor variationer i vandindholdet. Det andet kriterium er, om den friske beton separerer. Riskoen for separation bygger på en visuel vurdering.

Efter at der er konstateret, om tilsætningen af kaolin har en stabiliserende effekt på den friske beton, udføres der forsøg med Bradsted lerslam. Formå-

let med dette forsøg er på tilsvarende vis, som for forsøget med kaolin, at se om tilsætningen af Bradsted lerslam har en stabiliserende effekt på den friske beton. Indholdet af lermineraler i kaolinen fra Aalborg Portland og lerslammet fra Bradsted er på hhv. 36% og 9%. Idet indholdet af lermineraler varierer mellem kaolinen og lerslammet er der foretaget en sammeligning af de to typer.

Ved karakteriseringen af kaolinen og lerslammet blev det konstateret, at kornkurverne for begge disse materialer minder forholdsvis meget om kornkurven for den anvendte flyveaske. Der laves et forsøg, hvor der i stedet for lermineraler tilsættes en tilsvarende mængde flyveaske. Formålet med dette forsøg er at undersøge, om det er partikelstørrelsen eller mineralogien, der virker stabiliserende på den friske beton.

Gennem projektet forkuseres der på de reologiske egenskaber i den friske tilstand. For at betonens anvendelsesmuligheder skal være intakte efter tilsætningen af lermineraler, udføres der forsøg, hvis formål er at undersøge om lermineralerne har en indvirkning på trykstyrken og elasticitetskoefficienten.

Kapitel 15

Forsøgsprocedure

I dette kapitel redegøres der for blanding, udstøbning og lagring af prøvelegemer. Endvidere beskrives forsøgene, der foretages for SCC i den friske og hærdnede tilstand.

15.1 Blanding af SCC

I dette projekt er der ved fremstilling af SCC fokuseret på, at producere en så ensartet blanding som mulig, for derved at reducere fejlkilder. Ved blandingens start udtages en repræsentativ prøve af tilslagsmaterialerne, sand og sten, til bestemmelse af det frie vand. Differencen mellem det totale vandindhold i materialet og materialets absorptionsværdi, kaldes for det frie vand. Det totale vandindhold bestemmes ved at udtage en repræsentativ mængde af materialet. For stenene udtages en prøve på ca. 350g, mens der for sandet afvejes ca. 100g. Tilslagsmaterialerne tørres dernæst ved høj temperatur, hvorved vægttabet fra våd til tør tilstand bestemmes. Absorptionsværdien findes ved, at det våde tilslag tørres, eksempelvis i et håndklæde, så tilslagsmaterialet fremstår som overfladetørt. Herefter opvarmes tilslaget indtil alt vand er fordampet, hvorefter forholdet mellem vægten af det overfladetørre tilslag og vægten af det gennemtørrede tilslag giver absorptionsværdien. Da det kunne konstateres, at absorptionsværdierne svinger fra forsøg til forsøg, blev det besluttet at anvende absorptionsværdierne opgivet fra tilslagsproducenten. Ud fra det fundne frie vand kan recepten korrigeres, og den nøjagtige mængde vand kan tilsættes.

Blandemaskinen der er benyttet, er en tvangsblander af typen Eirich SKG 1 med en kapacitet på 50 liter. Tvangsblanderen er illustreret på figur 15.1.

Figur 15.1: Tvangsblander Eirich SKG 1

Ved blanding af SCC, skal der som tidligere beskrevet, benyttes samme procedure for at opnå en ensartethed. I forbindelse med tilsætningen af SPT er der i deklarationen følgende specifikation:

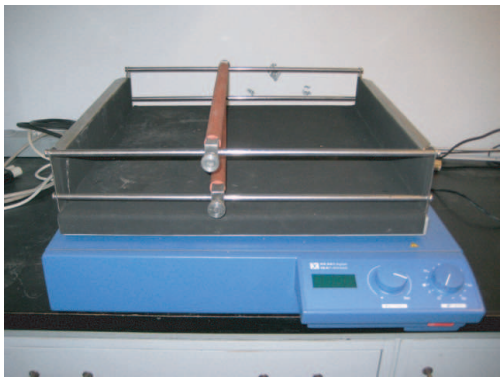
- SPT skal tilsættes som det første additiv og må ikke tilsættes tørre materialer

Med udgangspunkt i dette krav er blandingsproceduren til SCC udviklet. Blandingsproceduren er opstillet i tabel 15.1 og denne er fulgt ved samtlige blandinger.

Tilsætning	Blandetid [min]
Tilslag + halvdelen af vandet	3
Cement + flyveaske	2
Resterende vand (+ lermineraler)	2
SPT	2
I alt	9

Tabel 15.1: Blandeproces for SCC

De blandinger der tilsættes lermineraler oprøres disse med 700g af blandevandet i en plastbeholder. Denne plastbeholder placeres herefter på et rystebord, hvor opslæmningen står ca. 15min ved en hastighed på 300 omdr/min. På figur 15.2 ses det anvendte rystebord.



Figur 15.2: Det anvendte rystebord

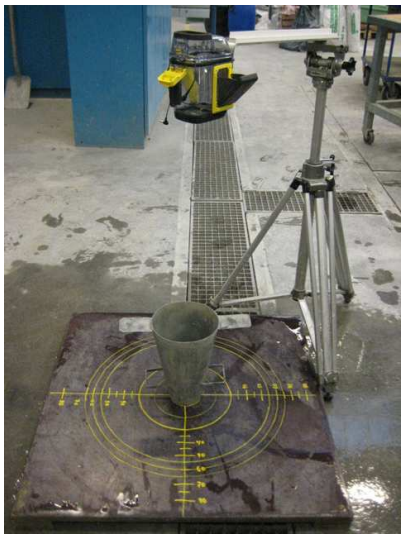
I forbindelse med produktionen af de enkelte betonblandinger og udførsel af de efterfølgende forsøg, blev der foretaget nogle foranstaltninger til at minimere eventuelle fejlkilder. Inden en blanding påbegyndes opfugtes tvangsblanderen, således at denne ikke adsorberer noget af blandevandet. Ligeledes opfugtes sætmålskeglen samt pladen, der anvendes til måling af flydemål for ikke at influere på flydemålet.

15.2 Forsøg med frisk SCC

For hver blanding er der foretaget en registrering af flydemålet. For de blandinger hvoraf der udstøbes prøvelegemer til måling af trykstyrke og elasticitetskoefficient måles yderligere luftindholdet og densiteten. Disse målinger udføres i henhold til [DS/EN:12350, 2004] og [DS2426, Anneks U, 2004], hvor sidstnævnte oplyser om justerede prøvningsmetoder i forbindelse med SCC. Derudover er der anvendt BML-viskometer til bestemmelse af betonens reologiske egenskaber.

15.2.1 Udbredelsesforsøg

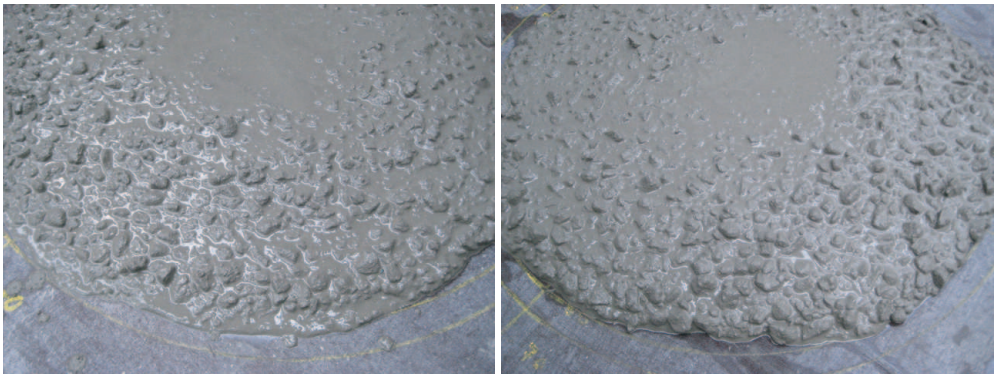
Udbredelsesforsøget anvendes til bestemmelse af flydeegenskaberne og derved bearbejdeligheden af den friske SCC. Bestemmelsen af flydemålet er baseret på metoden for bestemmelse af sætmål for traditionel sætmålsbeton. Til udbredelsesforsøget skal der benyttes en plade, som er lagt på et vandret underlag, med optegnede cirkler markerende forskellige afstande fra centrum. Endvidere skal der benyttes en omvendt sætmålskegle og et videokamera til dokumentation af flydehastigheden. Forsøgsopstillingen er illustreret på figur 15.3.



Figur 15.3: Forsøgsopstilling for flydemåling

Ved forsøgets start fugtes sætmålskeglens inderside samt pladen. Sætmålskeglen placeres i centrum af pladen med bunden op [DS2426, Anneks U, 2004]. Betonen hældes i sætmålskeglen langs kanten, således at risikoen for indkapsling af luft reduceres. Herefter løftes sætmålskeglen med en konstant hastighed, dog med tilstrækkelig hastighed, således at udbredelsen ikke hindres af sætmålskeglen. Flydemålet aflæses på pladen som gennemsnittet af det største flydemål og udbredelsen vinkelret derpå. Endvidere filmes flydemålet, hvorved det er muligt at fastlægge T_{300} og T_{500}. Betegnelserne T_{300} og T_{500} dækker over den tid, der går for at opnå en flydemålsdiameter på hhv. 300mm og 500mm.

I forbindelse med udbredelsesforsøgene er der udviklet en subjektiv skala til visuel bedømmelse af separationen. Ved den visuelle bedømmelse er der set efter to forskellige fænomener, „vandig midte“ og at pastaen skilles fra tilslaget langs flydemålets yderkant. „Vandig midte“ dækker over, at der opstår en ophobning af pasta i midten af flydemålet. De to fænomener ses på figur 15.4.



Figur 15.4: Venstre: Pastaen skilles fra tilslaget langs flydemålets yderkant; Højre: „Vandig midte“

Er et af disse fænomener tilstede ved måling af flydemålet, bedømmes betonen som værende separeret. Den visuelle bedømmelse af betonens tilstand er foretaget ud fra følgende betegnelser:

- Stabil
- Begyndende separation
- Separation

Betegnelsen begyndende separation dækker over, at der i den pågældende beton enten er tendens til „vandig midte“, eller en tendens til at pastaen skilles fra tilslaget.

15.2.2 BML-viskometer

Til BML-viskometeret medfølger fire målesystemer. Hvert målesystem består af en beholder, en fortandet kerne med tilhørende bunddel og topring. Hvilket målesystem der skal anvendes afhænger af den maksimale stendiameter i den blanding der ønskes analyseret. De fire målesystemer og deres betegnelser fremgår af figur 15.5.

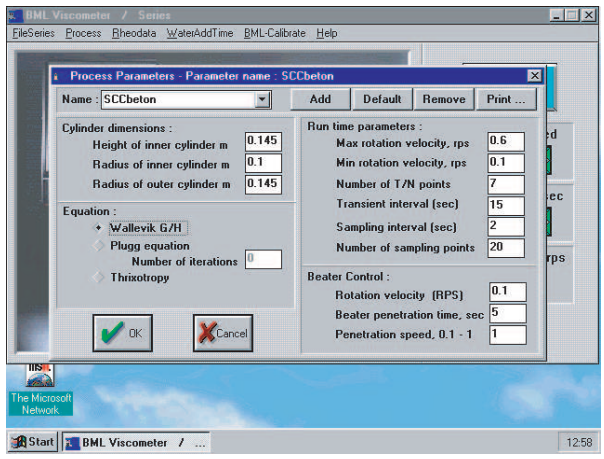
Figur 15.5: De fire målesystemer med dertilhørende betegnelser

Af tabel 15.2 fremgår hvilket målesystem, der skal benyttes ved en given blanding.

Målesystem	Blanding	Max kornstørrelse [mm]	Mængde [l]
M-170	Cementpasta og mørtel	5	3
M-200	Cementpasta og mørtel	8	3
C-200	Beton	22	12
C-240	Beton	32	24

Tabel 15.2: Målesystemer med specifikationer

I de udførte forsøg er målesystemet C-200 benyttet. Inden forsøget sættes igang, skal softwaren indstilles til det pågældende målesystem. Af figur 15.6 fremgår et skærmbillede af „Process Parameters“, hvilket er det faneblad, hvori det er muligt at ændre på indgangsparametrene i softwaren.



Figur 15.6: Skærmbillede af input parametre i BML-viskometer

Under „Process parameters“ indtastes geometrien af det valgte målesystem, ligningen hvorudfra de reologiske egenskaber beregnes, samt hvorledes målepunkterne til bestemmelse af de reologiske egenskaber skal afsættes.

I en tidligere undersøgelse: „The effect of measuring procedure on the apparent rheological properties of self-compacting concrete“ blev der gjort nogle erfaringer med hensyn til indstillingen af BML-viskometeret. Idet forsøg der har til hensigt at finde de optimale indstillinger for BML-viskometeret til formålet med dette projekt, ligger uden for rammerne af projektet, er det derfor besluttet at adoptere disse indstillinger. De anbefalede inputparametre til BML-viskometeret er opstillet i tabel 15.7.

Measuring procedures, input parameters

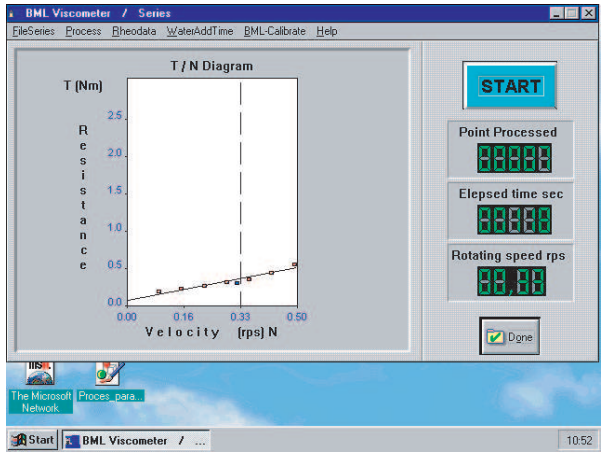
	Transient time (s) (no data logging)	Sampling time (s) (data logging)	Number of measuring points (rotational speeds)	Number of sampling points at each speed	Range of rotational speeds (rev/s)
	Total measuring time at each speed				
Typical values [5]	2	3	5	50	0.1 – 0 – 6
Values applied	0	5, 8, 10, 15 and 25	7 or 8	50	0.01 – 0.5 and 0.01 – 0.57

Figur 15.7: Anbefalede inputparametre til BML-viskometer [Geiker et al., 2002]. De indrammede værdier er benytttet i nærværende projekt

Som det fremgår af figur 8.11 i kapitel 8, ligger den anbefalede sampling time et sted mellem 10-15 sekunder. På baggrund af dette er det valgt at operere med en sampling time på 15 sekunder.

Efter at værdierne i fanebladet „Process Parameters“ er indtastet, fyldes behol-

deren med den korrekte mængde beton, jf. tabel 15.2, hvorefter forsøget sættes i gang. Herefter plottes de fundne punkter i et $T-N$-diagram. Et skærmbillede af $T-N$-diagrammet fremgår af figur 15.8.



Figur 15.8: Skærmbillede af et T-N-diagram

De reologiske parametre bestemmes direkte vha. den medfølgende software ved løsning af den tidligere nævnte Reiner-Rivlin ligning.

15.2.3 Luftindhold

Luftindholdet i den friske betonblanding måles vha. et „Press-Ur-Meter“ som består af en vandtæt beholder og en overdel med mulighed for aflæsning af trykket. Apparatet ses på figur 15.9.

Figur 15.9: Press-Ur-Meter

Beholderen fyldes med den friske beton og afrettes med en savende bevægelse. Kanten på beholderen rengøres, således at overdelen slutter tæt. Hulrummet mellem betonen og overdelen fyldes med vand, således at alle luftlommer er fjernet. Herefter pumpes der luft i apparatets luftkammer. Luftindholdet kan herved aflæses ved at åbne hovedventilen.

15.2.4 Densitet

I forbindelse med bestemmelse af luftindholdet, bestemmes densiteten af den friske beton også. Beholderen til bestemmelse af luftindholdet har et volumen på 8 liter, hvorefter densiteten af den friske beton kan bestemmes.

15.3 Udstøbning og lagring af prøvelegemer

De blandinger der benyttes til bestemmelse af trykstyrke og elasticitetskoefficient udstøbes til prøvelegemer under anvendelse af cylinderforme med målene Ø100x200mm. Ifølge standarden, [DS/EN 12390-1, 2002], skal der anvendes cylinderforme med målene Ø150x300mm. Dette bevirker, at trykstyrken for cylindrene, skal multipliceres med en omregningsfaktor på 0,95, for at være repræsentativ [DS/EN 12390-3, 2002]. En af de anvendte cylindriske støbeforme ses på figur 15.10.

Figur 15.10: Cylinderform med målene Ø100x200mm

Fremgangsmåden for fyldningen af de cylindriske støbeforme er, at der hældes langs kanten, hvorved risikoen for indeslutning af luft minimeres. Herefter afrettes overfladen med en savende bevægelse og låget fastspændes. Cylindrene

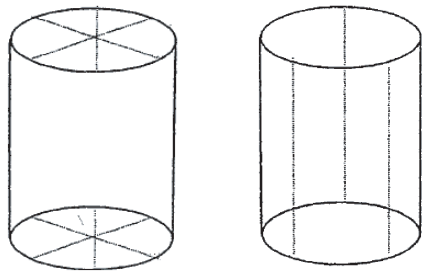
lagres liggende for at få en jævn fordeling af luften i prøvelegemet. Prøvelegemerne skal hærdne i formene i minimum 16 timer og maksimalt 3 døgn, ved en temperatur på 20 ± 5°C. Efter afformning lagres prøvelegemerne i vand ved en temperatur på 20 ± 2°C, indtil disse skal benyttes til bestemmelse af trykstyrke eller elasticitetskoefficient. Dette er i overensstemmelse med [DS/EN 12390-2, 2002].

15.4 Forsøg med hærdnet SCC

I dette afsnit er forsøgene, foretaget på den hærdnede beton, beskrevet. Der er ialt foretaget fire forsøg. Dette er bestemmelse af densitet, trykstyrke, elasticitetskoefficient samt separation. For hver blanding er der udstøbt to cylindre til bestemmelse af separation. For de blandingerne der er anvendt til måling af trykstyrke og elasticitetskoefficient er der udstøbt 18 cylindre. Trykstyrken er målt efter 1, 3, 7, 14 og 28 modenhedsdøgn, og der er benyttet tre cylindre til hver termin, for at have et statistisk grundlag. I forbindelse med trykstyrken er der foretaget en densitetsmåling af cylindrene. Elasticitetskoefficienten er kun bestemt ved 28 modenhedsdøgn.

15.4.1 Densitet

Bestemmelsen af den hærdnede betons densitet, sker ved at foretage en vægt- og volumenbestemmelse af betoncylindrene. Volumenbestemmelsen af en betoncylinder foretages som angivet i [DS/EN 12390-3, 2002]. Cylinderens diameter og højde angives som et gennemsnit af 3 målinger med skydelære. Cylinderens diameter måles i 3 positioner beliggende med cirka 60° i forhold til hinanden. Cylinderens højde måles på tilsvarende måde, dog med en indbyrdes afstand på cirka 120° i forhold til hinanden i længderetningen. De forskellige målepositioner er illustreret på figur 15.11.



Figur 15.11: Venstre: De stiplede linjer viser målepositioner af diameteren; Højre: De stiplede linjer viser målepositioner af højden [DS/EN 12390-3, 2002]

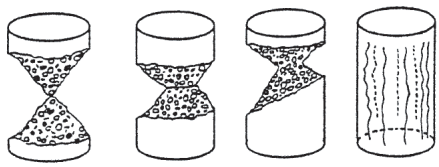
15.4.2 Trykstyrke

Trykprøvemaskinen der er benyttet, er af typen TONIPACK 3000 med en trykstyrkekapacitet på 3000kN. Denne består af en trykpresse og en styringsenhed, hvilket ses på figur 15.12.

Figur 15.12: Den anvendte trykprøvemaskine

Ved forsøgets start aftørres trykpressens overflader, således at evt. ujævnheder ikke får indflydelse på trykstyrken. Herefter indstilles styringsenheden, med hensyn til belastningshastigheden og om trykpressen automatisk skal stoppes, når den maksimale belastning er nået, eller om der skal fortsættes til total brud. Belastningshastigheden der er benyttet er 6,3kN pr. sek., hvilket er i overensstemmelse med [DS/EN 12390-3, 2002].

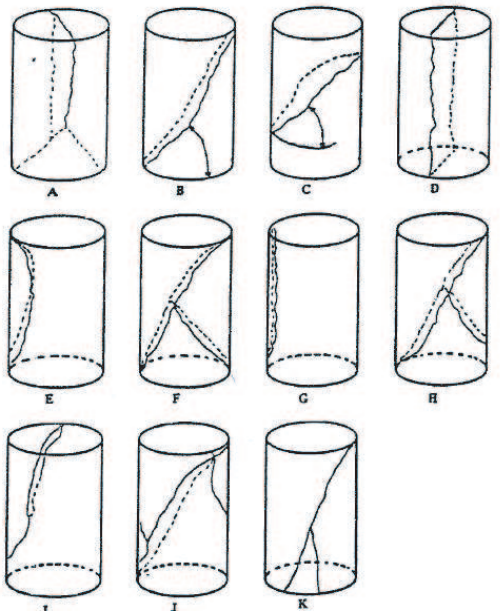
Vælges der er fortsætte til totalt brud, er det efterfølgende muligt at foretage en vurdering af brudtypen. Brudtypen kan enten karakteriseres som et tilfredsstillende eller utilfredsstillende brud. De tilfredsstillende brud som er angivet i [DS/EN 12390-3, 2002] er illustreret på figur 15.13.



Figur 15.13: Tilfredsstillende brudmåder [DS/EN 12390-3, 2002]

Et tilfredsstillende brud er karakteriseret som et adskillelsesbrud. Denne brudtype sker ved adskillelse af betonen i brudfladen, således at materialedelene fjerner sig fra hinanden vinkelret på brudfladen. Ved adskillesbruddet er det normalt, at revnerne løber parallelt med kraftens retning. De karakteristiske kegleformer, som illustreret på figur 15.13, fremkommer ved, at friktionskræfterne der opstår langs trykfladerne, arbejder sammen med de lodrette trykkræfter [Herholdt et al., 1985].

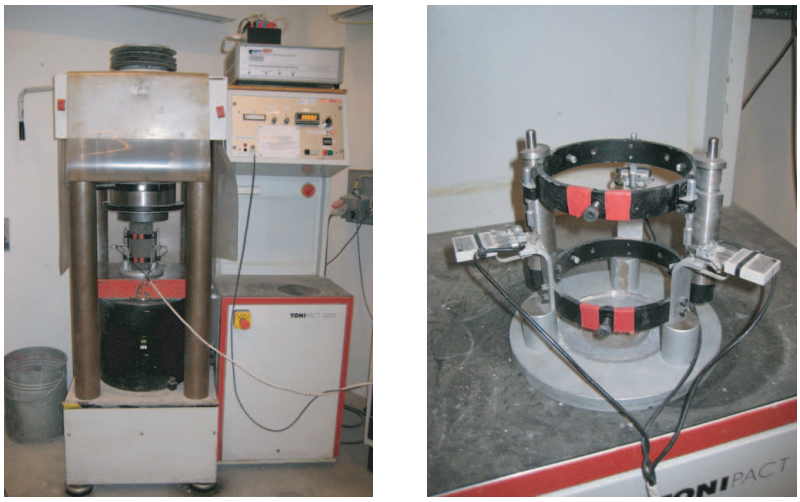
Opstår der derimod ikke et brud som illustreret på figur 15.13, karakteriseres bruddet som værende utilfredsstillende. Herefter skal det utilfredsstillende brud registreres og brudmønstret skal beskrives. Det utilfredsstillende brud karakteriseres ved at udvælge det brudmønster, illustreret i figur 15.14, der ligger tættest på det observerede.



Figur 15.14: Utilfredsstillende brudmåder [DS/EN 12390-3, 2002]

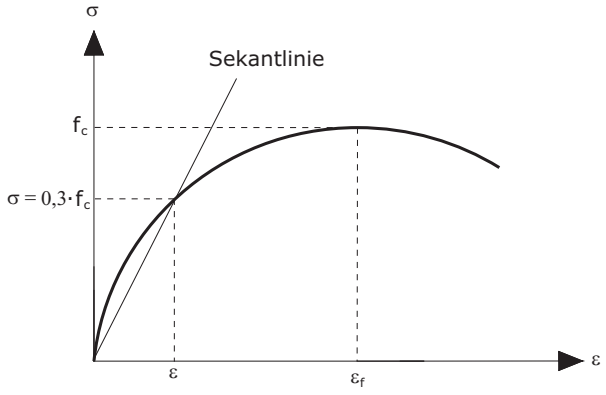
15.4.3 Elasticitetskoefficient

Til bestemmelse af elasticitetskoefficienten benyttes samme trykprøvemaskine, der blev anvendt til måling af trykstyrken. I forsøget udsættes betoncylindrene for en en-akset belastning, hvortil deformationen registreres. Til registrering af deformationen anvendes der clipgauges fra HBM af typen DD1 som flytningsmålere. Forsøgsopstillingen samt flytningsmålerne ses på figur 15.15.



Figur 15.15: Venstre: Forsøgsopstilling til bestemmelse af elasticitetskoefficienten; Højre: Apparatur til måling af deformationen

Som det fremgår af figur 15.15 er der monteret to ringe om prøvelegemet, mellem disse ringe sidder de tre flytningsmålere. Gennemsnittet af de registrerede flytninger er lig deformationen af prøvelegemet. Flytningsmålerne måler over en afstand på 100mm. Prøvelegemet belastes til ca. 40% af den forventede trykstyrke efter 28 modenhedsdøgn og der opsamles data med en opsamlingsfrekvens på 10Hz. Ud fra de opsamlede data optegnes arbejdskurven for det pågældende prøvelegeme. Elasticitetskoefficienten bestemmes som sekantelasticitetskoefficienten, der er givet ved sekanthældningen, svarerende til 0,3 gange brudspændingen [Herholdt et al., 1985]. Dette er illustreret på figur 15.16.



Figur 15.16: Bestemmelse af sekantelasticitetskoefficienten [Herholdt et al., 1985]

15.4.4 Separation

Udover den visuelle bedømmelse af separationen er der foretaget en beregning af denne ud fra en metode opstillet af Aalborg Portland [Portland, 2008]. Metoden bygger på, at en hærdnet betoncylinder skæres over i længderetningen, hvorefter de ti øverst beliggende sten, med en partikelstørrelse på over 4mm, identificeres. Herefter måles afstanden fra toppen af betoncylinderen til toppen af hver sten og gennemsnittet beregnes. Den procentvise separation kan herefter bestemmes ved at dividere gennemsnitsværdien med betoncylinderens højde. En betoncylinder hvor de ti øverste sten er optegnet ses på figur 15.17.

Figur 15.17: Betoncylinder med de 10 øverste sten med en partikelstørrelse over 4mm

DEL IV

I del IV gennemgås de udførte forsøg. Indledningsvis er der foretaget forsøg for at dokumentere reproducerbarheden. Dernæst er det undersøgt, hvilken mængde kaolin, der skal tilsættes for at stabilisere den friske beton. Herefter er stabiliteten overfor variationer i vandindholdet ved tilsætningen af kaolin undersøgt. Ved at erstatte kaolin med flyveaske er det undersøgt, om det er partikelstørrelsen eller lermineralernes kornform samt evne til at adsorbere vand, der virker stabiliserende. Herefter er det undersøgt, om tilsætningen af Bradsted lerslam har en stabiliserende effekt på den friske beton. Slutteligt er det undersøgt, om tilsætningen af kaolin påvirker trykstyrken og elasticitetskoefficienten.

FORSØG

16 SPT versus flydemål **129**
16.1 Mørtelforsøg med sammensat kornkurve 129
16.2 Mørtelforsøg med 0-2mm sand 132
16.3 Konklusion 133

17 Reproducerbarhed **135**
17.1 Forsøgsresultater 135
17.2 Konklusion 140

18 Undersøgelse af lers indflydelse på reologien **141**
18.1 Forsøgsresultater 141
18.2 Konklusion 142

19 Variation af vandcementtal **143**
19.1 Basisrecept 144
19.2 Basisrecept med 1% kaolin tilsat 147
19.3 Basisrecept med 3% kaolin tilsat 150
19.4 Diskussion af resultater 153
19.4 Konklusion..... 157

20 Partikelstørrelse versus mineralogi **159**
20.1 Forsøgsresultater 161
20.2 Diskussion af resultater 163
20.3 Konklusion 168

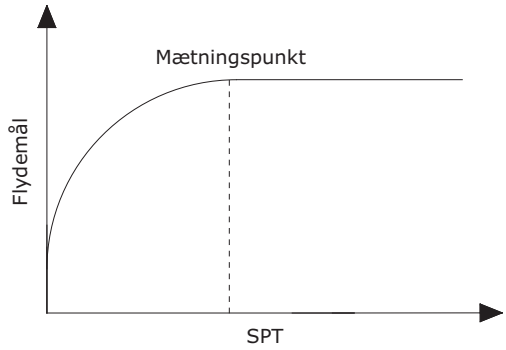
21 Bradstedslams indflydelse på reologien **171**
21.1 Forsøgsresultater 173
21.2 Diskussion af resultater 175
21.3 Konklusion 179

22 Kaolinits indflydelse på styrkeegenskaberne **181**
19.1 Trykstyrke 181
19.2 Elasticitetskoefficient..... 182
19.3 Konklusion 183

Kapitel 16

SPT versus flydemål

I dette kapitel vurderes, hvilken indflydelse SPT har på bearbejdeligheden af den friske beton. Som beskrevet i afsnit 2 vil tilsætningen af SPT nedsætte flydespændingen af den friske beton, hvilket øger flydemålet. Idet SPT molekylerne adsorberes på cement- og flyveaskepartiklerne, må der findes et mætningspunkt, dvs. et punkt, hvor alle partiklerne er dækket, og hvor yderligere tilsætning af SPT således ikke vil kunne adsorberes. Ifølge teorien vil flydemålet stagnere i det øjeblik dette mætningspunkt er nået. Principskitse af dette er illustreret på figur 16.1.



Figur 16.1: Principskitse af flydemålet som funktion af tilsætningen af SPT

Der er foretaget to mørtelforsøg til bestemmelse af mætningspunktet. Mørtelforsøgene er lavet med henholdsvis en veldefineret sammensat kornkurve og en 0-2mm sand, der indgår i basisrecepten for de senere forsøg. Mørtelforsøgene har til hensigt at eftervise, at kornkurven ingen indflydelse har på mætningspunktet. Ved disse forsøg måles et miniudbredelsesmål i forhold til den tilsatte mængde SPT. For recept og forsøgsprocedure henvises til appendiks D.

16.1 Mørtelforsøg med sammensat kornkurve

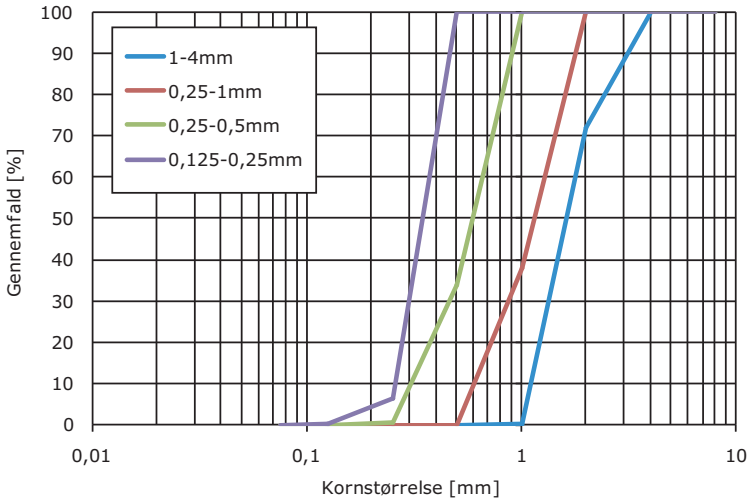
For dette mørtelforsøg er der benyttet en sammensat kornkurve bestående af fire fraktioner. Der er tilstræbt en kornkurve beliggende mellem grænsekornkurverne angivet i [Thrysøe et al., 2004]. Grænsekornkurverne er vist på figur 16.3.

De fire sandfraktioner der benyttes for at skabe den sammensatte kornkurve

er:

- 1-4mm (Grov)
- 0,25-1mm (Halvfin)
- 0,25-0,5mm (Fin)
- 0,125-0,25mm (Kvarts)

Kornkurverne for de fire fraktioner er optegnet i figur 16.2.



Figur 16.2: Kornkurverne for de enkelte sandfraktioner

Den sammensatte kornkurve findes ud fra kornkurverne for de enkelte delmaterialer og den valgte fordeling af disse. Dette kan udtrykkes på følgende måde:

$$gen_i = \frac{x_{grov}}{100} gen_{i,grov} + \frac{x_{h\ fin}}{100} gen_{i,h\ fin} + \frac{x_{fin}}{100} gen_{i,fin} + \frac{x_{kvarts}}{100} gen_{i,kvarts} \tag{16.1}$$

Hvor

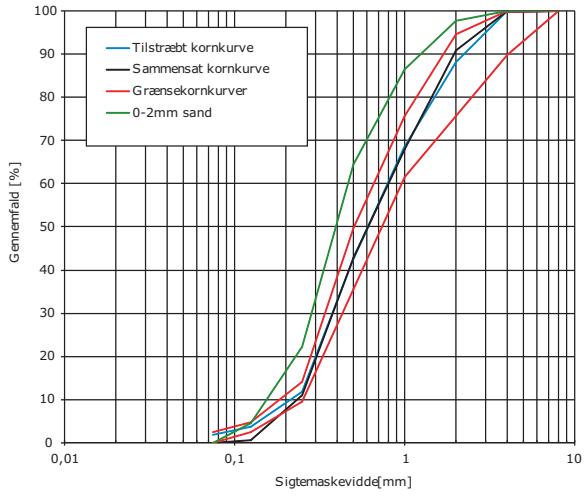
gen_i	er gennemfaldet for den i'te fraktion for den sammensatte kornkurve [%]
$x_{fin}..x_{kvarts}$	er de valgte fordelingsprocenter for delmaterialerne [%]
$gen_{i,grov}$	er gennemfaldet for den i'te fraktion for groft sand [%]
$gen_{i,h\ fin}$	er gennemfaldet for den i'te fraktion for halvfint sand [%]
$gen_{i,fin}$	er gennemfaldet for den i'te fraktion for fint sand [%]
$gen_{i,kvarts}$	er gennemfaldet for den i'te fraktion for kvarts sand [%]

For at finde fordelingsprocenterne for delmaterialerne foretages en iteration således, at den sammensatte kornkurve fitter den ønskede kornkurve bedst muligt. Fordelingsprocenterne for de enkelte delmaterialer er ved iteration fundet til 32, 38, 20 og 10 for hhv. grov, halvfin, fin og kvarts. Af tabel 16.1 fremgår gennemfaldet for den ønskede kornkurve, kornkurverne for delmaterialerne samt den sammensatte kornkurve.

	Gennemfald [%]					
Maskevidde [mm]	Ønsket kornkurve	Kvarts	Fin	Halvfin	Grov	Sammensat kornkurve
0,075	1,8	0	0	0	0	0
0,125	3,6	5	0	0	0	0,54
0,25	11,9	95	6	1	0	11,04
0,5	42,6	100	100	34	0	42,85
1	68,6	100	100	100	0	68,11
2	88,2	100	100	100	72	91,03
4	100	100	100	100	100	100
Fordeling [%]	-	10	20	38	32	-

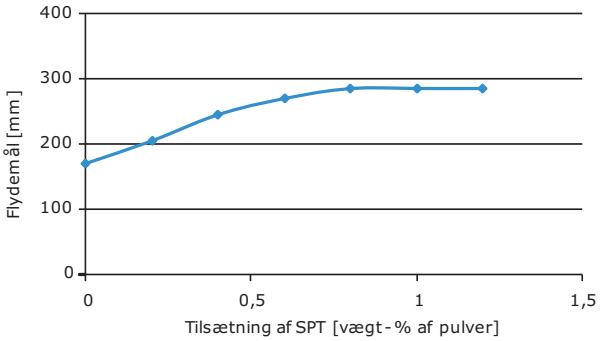
Tabel 16.1: Gennemfald for den ønskede kornkurve, kornkurverne for delmaterialerne samt den sammensatte kornkurve

Den ønskede kornkurve og den sammensatte kornkurve fremgår af figur 16.3. Her er også grænsekornkurverne i henhold til [Thrysøe et al., 2004] optegnet sammen med kornkurven for 0-2mm sand.



Figur 16.3: Den ønskede kornkurve samt den sammensatte kornkurve, grænsekornkurverne og kornkurven for 0-2mm sand

Mørtelforsøget er foretaget ved trinvist at øge doseringen af SPT med 0,2 vægt-% af pulveret (cement + flyveaske), indtil flydemålet stagnerer. Af figur 16.4 fremgår miniudbredelsesmålet som funktion af doseringen af SPT.



Figur 16.4: Miniudbredelsesmål som funktion af SPT

Af figur 16.4 fremgår det, at mætningspunktet er nået ved tilsætning af 0,8 vægt-%.

16.2 Mørtelforsøg med 0-2mm sand

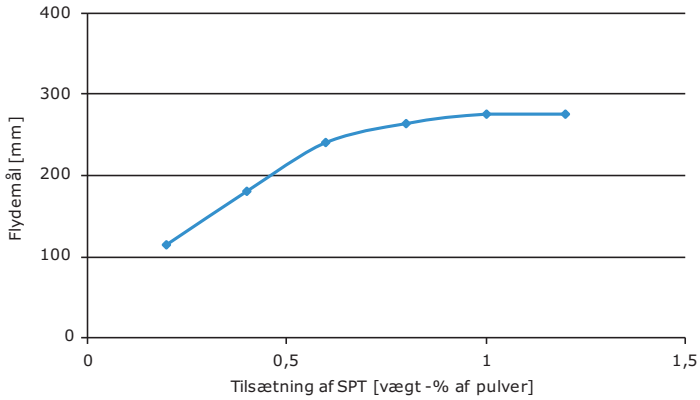
Kornkurven for 0-2mm sandet er opstillet i tabel 16.2.

Sigtestørrelse [mm]	Gennemfald [%]
128	100
64	100
32	100
16	100
8	100
4	100
2	98
1	88
0,5	65
0,25	23
0,125	4
0,075	0

Tabel 16.2: Sigteanalyse for 0-2mm sand

Den optegnede kornkurve for 0-2mm sand fremgår af figur 16.3. Mørtelforsøget med 0-2mm sand er foretaget analogt med forrige forsøg ved trinvist at øge doseringen af SPT med 0,2 vægt-% af pulveret. Af figur 16.5 fremgår mi-

niudbredelsesmålet som funktion af doseringen af SPT for mørtelforsøget med 0-2mm sandet.



Figur 16.5: Miniudbredelsesmål som funktion af SPT

Af figur 16.5 fremgår det, at mætningspunktet er nået ved tilsætning af 1,0 vægt-% for mørtelforsøget med 0-2mm sand.

16.3 Konklusion

Ved at betragte kurverne, der beskriver flydemålet som funktion af den procentvise tilsætning af SPT, jf. figurene 16.4 og 16.5, fremgår det, at forløbet er tilnærmelsesvist ensartet. Den lille afvigelse der eksisterer mellem de to kurver må tilskrives de måleusikkerheder, der uvægerligt vil forekomme. Det er derfor konkluderet, at kornkurven ingen indflydelse har på mætningspunktet.

Af mørtelforsøgene kunne det konstateres, at flydemålet stagnerede ved tilsætning af 0,8 vægt-% og 1,0 vægt-% for hhv. mørtlen med sammensat kornkurve og mørtlen med 0-2mm sand. På baggrund af disse resultater er det valgt at tilsætte 1,0 vægt-% SPT i de videre forsøg. Herved er fejlkilder vedrørende tilsætning af SPT minimeret, idet eventuelle unøjagtigheder i afvejningen af SPT ikke vil have indflydelse på flydemålet.

Kapitel 17

Reproducerbarhed

For at undersøge den naturlige variation der vil være fra blanding til blanding, er der foretaget seks individuelle forsøg med samme recept. For hver af disse blandinger er de reologiske egenskaber målt. Udover at undersøge den naturlige variation af en given recept fra blanding til blanding, er der foretaget et forsøg, hvor der måles to gange på samme blanding. Dette gøres for at undersøge nøjagtigheden af BML-viskometeret. Forsøgene tager udgangspunkt i en basisrecept med et vandcementtal på 0,6. Den anvendte basisrecept er opstillet i tabel 17.1.

	Densitet [kg/m^3]	Mængde [kg/m^3]
Cement	3160	263,6
Flyveaske	2300	79,3
Vand	1000	181,8
SPT	1100	3,4
0-2mm sand	2650	802,1
5-8mm sten	2730	155,4
8-16mm sten	2590	835,6

Tabel 17.1: Recept for 1m^3 SCC

Forsøgene er foretaget på blandinger á 20 liter og de reologiske egenskaber er målt ved henholdsvis flydemål og BML-viskometer.

17.1 Forsøgsresultater

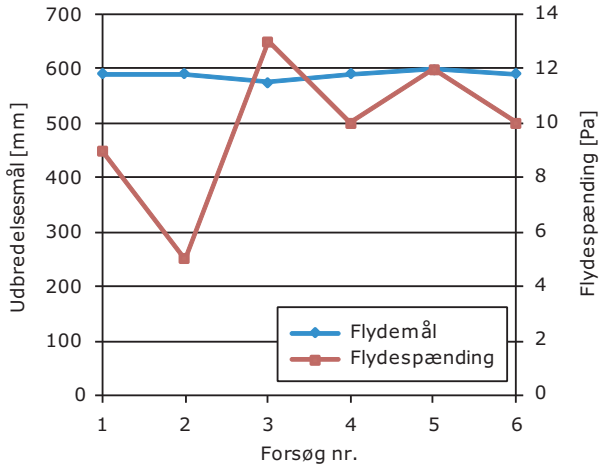
Resultaterne fra de seks udførte forsøg er opstillet i tabel 17.2

Forsøg	Flydemål [mm]	τ_0 [Pa]	η [Pa· s]	Separation [%]	T_{300} [s]	T_{500} [s]
1	590	9	5,1	9	-	-
2	590	5	2,5	11	0,5	1,2
3	575	13	6,3	8	0,35	0,95
4	590	10	5,2	5	0,65	1,25
5	600	12	4,6	12	0,56	1,2
6	590	10	4,8	13	0,6	1,3

Tabel 17.2: Reologiske parametre registreret ved reproducering af beton

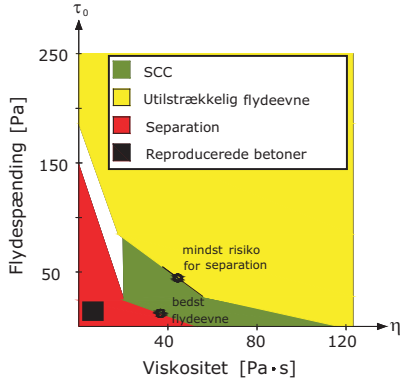
Der har ikke visuelt kunnet konstateres separation i nogle af de seks blandinger.

For at undersøge gyldigheden af resultaterne fra BML-viskometeret er disse sammenlignet med de registrerede flydemål, hvilket fremgår af figur 17.1.



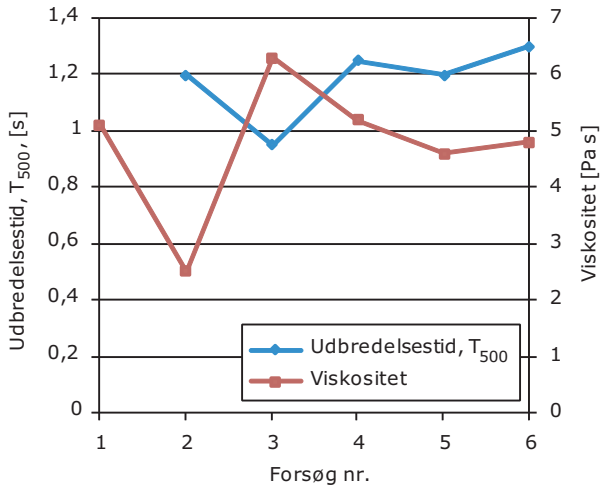
Figur 17.1: Variation af flydemål og flydespænding for de seks blandinger

Som det fremgår af figur 17.1, er der ikke umiddelbart en sammenhæng mellem registreret flydemål og målt flydespænding. Flydemålet ligger omkring 600mm og varierer kun 25mm fra mindste flydemål på 575mm til største flydemål på 600mm, hvilket giver en procentvis forskel på omkring 4%. Den målte flydespænding varierer fra 5 Pa til 13 Pa, hvilket giver en procentvis forskel på omkring 60%. Betragtes figur 17.2, der viser det interval, hvori de reologiske egenskaber for SCC normalt ligger, kan det konstateres, at de målte flydespændinger ligger indenfor det anbefalede interval.



Figur 17.2: De reologiske parametre for de reproducerede betoner

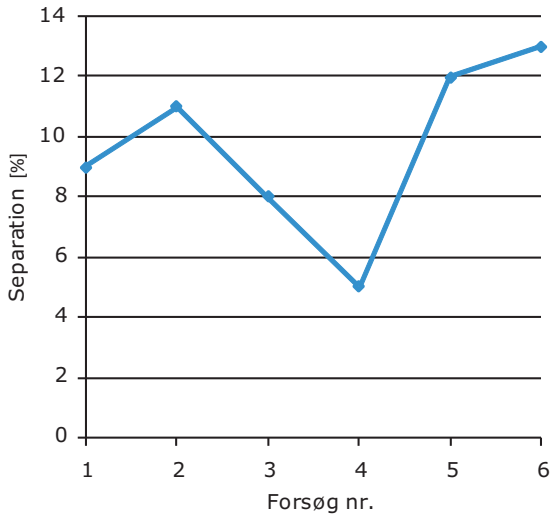
På samme vis sammenlignes de målte viskositeter fra BML-viskometeret med de registrerede udbredelsestider, T_{500}, hvilket fremgår af figur 17.3.



Figur 17.3: Variation af udbredelsestid og viskositet for de seks blandinger

Som det fremgår af figur 17.3, kan der ikke umiddelbart ses en sammenhæng mellem registreret udbredelsestid og målt viskositet. Udbredelsestiden, T_{500}, ligger omkring 1,2 sek og varierer 0,35 sek fra 0,95 sek til 1,3 sek, hvilket giver en procentvis forskel på omkring 25%. Den målte viskositet varierer fra 2,5 Pa·s til 6,3 Pa·s, hvilket giver en procentvis forskel på omkring 60%. Betragtes figur 17.2 kan det konstateres, at den målte viskositet er meget lav. Viskositeten ligger udenfor det anbefalede interval for SCC, og befinder sig i det områder, hvor betonen ifølge figuren 17.2 separerer. På trods af dette blev der ikke observeret separation i nogen af de seks blandinger.

Udover den visuelle bedømmelse af separationen måles denne også vha. BML-viskometeret. Den målte separation for de seks blandinger fremgår af figur 17.4.



Figur 17.4: Separation målt vha. BML-viskometer for de seks forsøg

Ved en separation på over 10% skal det forventes, at resultaterne er påvirket af separation. Ud fra dette kriterium burde der være separation i halvdelen af de seks blandinger.

Ud fra forsøgene foretaget for at dokumentere reproducerbarheden er en middelværdi samt standardafvigelsen for de enkelte reologiske parametre beregnet. Disse fremgår af tabel 17.3.

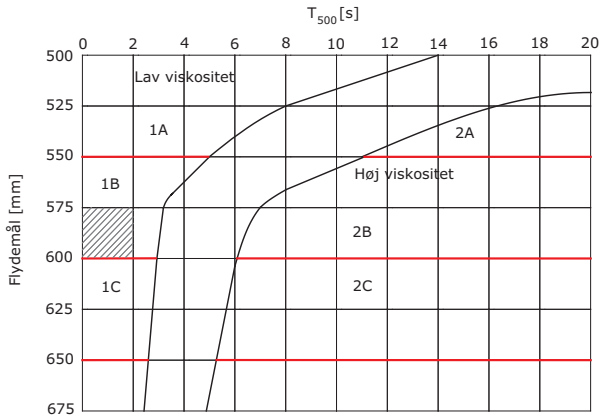
Reologisk parameter	Middelværdi	Standardafvigelse
Flydemål [mm]	589	8
τ_0 [Pa]	9,8	2,8
η [Pa· s]	4,8	1,3
Separation [%]	9,7	2,9
T_{500} [s]	1,2	0,1

Tabel 17.3: Middelværdi og standardafvigelse for de reologiske parametre registreret i forbindelse med dokumenteringen af reproducerbarheden

Ved vurdering af resultater i efterfølgende forsøg skal der således tages højde for den variation, der naturligt vil forekomme, jf. standardafvigelsen i tabel 17.3.

Det anbefalede område hvori SCC skal befinde sig, kan også optegnes på baggrund af flydemål og udbredelsestid. Denne type afbildning hvor de seks blan-

dinger er indtegnet, fremgår af figur 17.5.



Figur 17.5: Det skraverede område angiver placeringen af de seks blandinger [Pade et al., 2007]

Som det fremgår af figur 17.5, befinder alle seks blandinger i det skraverede felt betegnet 1B. I dette område er der begrænset risiko for separation, hvilket stemmer overens med den visuelle bedømmelse.

17.1.1 Undersøgelse af BML-viskometerets nøjagtighed

Nøjagtigheden af BML-viskometeret er undersøgt ved at foretaget to separate forsøg med samme blanding. Dette gøres ved at producere en blanding ud fra recepten opstillet i tabel 17.1 på 40 liter. Af disse 40 liter foretages der først en måling af flydemål, hvorefter BML-viskometeret påfyldes 12 liter, og de reologiske egenskaber registreres. Herefter gentages processen endnu en gang. De reologiske parametre fundet ved disse to forsøg fremgår af tabel 17.4.

Forsøg	Flydemål [mm]	τ_0 [Pa]	η [Pa· s]	Separation [%]	T_{300} [s]	T_{500} [s]
1	590	8	4,9	15	0,5	0,72
2	575	6	3,8	15	1,1	2,1

Tabel 17.4: Reologiske parametre registreret ved forsøg med samme blanding

Som det fremgår af tabel 17.4, er der god overensstemmelse mellem de parametre bestemt vha. BML-viskometeret for de to forsøg foretaget på samme blanding. Derudover er de målte værdier i samme størrelsesorden, som de værdier der blev målt ved undersøgelsen af reproducerbarheden.

17.2 Konklusion

De reologiske parametre er registreret for seks identiske blandinger. Formålet var dels at dokumentere, at det er muligt at reproducere en blanding, og dels at bestemme de naturlige variationer af de reologiske egenskaber, der kan forventes fra blanding til blanding. Ved vurdering af de reologiske egenskaber i de videre forsøg skal disse naturlige variationer således tages i betragtning.

Flydemålet for de seks blandinger varierer mellem 575mm og 600mm, svarende til en forskel på 4%. Flydespændingen udviser væsentlig større variationer. Således varierer flydespændingen mellem 5Pa og 13Pa, hvilket svarer til en forskel på ca. 60%. Med udgangspunkt i disse to observationer kan det konkluderes, at flydemålet giver et mere retvisende billede af betonens flydeegenskaber. Således skal de flydespændinger, der observeres i de efterfølgende forsøg tages med et vist forbehold.

Samme tendens til at BML-viskometeret udviser store udsving fra måling til måling, er ligeledes registreret for viskositeten. Således varierer T_{500} ca. 25%, mens viskositeten varierer ca. 60%. Forskellen mellem disse to målinger til bestemmelse af viskositeten er dog ikke så markant, som tilfældet er for flydespændingen.

Ved hver blanding er den visuelle separation observeret. Det kunne konstateres, at samtlige blandinger var stabile. Ved BML-viskometeret blev risikoen for separation ligeledes målt. Her ligger samtlige blandinger i et kritisk område, og halvdelen af blandinger skulle i følge viskometeret separere.

På baggrund af de observationer der er gjort ved registreringen af de reologiske parametre, kan det konkluderes, at flydemålet, T_{500} og den visuelle separation giver de mest retvisende resultater. I de videre forsøg vil det således være disse egenskaber, der lægges vægt på ved karakteriseringen af en given beton. BML-viskomeret vil stadig benyttes i de efterfølgende forsøg, men resultaterne vil blive behandlet med et vist forbehold.

Ud fra de seks blandinger er standardafvigelsen for hver reologisk parameter bestemt. I de efterfølgende forsøg vil denne standardafvigelse indtegnes på graferne, for at anskueliggøre de naturlige variationer, der kan forventes fra blanding til blanding.

Kapitel 18

Undersøgelse af lers indflydelse på reologien

Risikoen for separation ønskes reduceret gennem tilsætningen af lermineraler. Det er således tanken, at lermineralerne er i stand til at binde noget af det overskydende vand pga. deres store overfladeareal samt deres evne til at optage vand mellem lagene. Sker dette vil betonen således stadig fremstå stabil på trods af et øget vandindhold. Derudover vil lermineralernes flade partikelform ligeledes virke stabiliserende. I dette kapitel er der udført forsøg for at vurdere mængden af kaolin, der skal tilsættes i de videre forsøg. I kapitel 10 blev det bestemt, at der maksimalt kan forventes et øget vandindhold på 5-10%. I dette forsøg opereres der med et øget vandindhold på 5%.

Kaolinen er tilsat som vægt-% af pulveret. Recepten der er benyttet ved forsøget, fremgår af tabel 18.1.

	Densitet [kg/m^3]	Mængde [kg/m^3]
Cement	3160	261,3
Flyveaske	2300	78,6
Vand	1000	188,7
SPT	1100	3,4
0-2mm sand	2650	795,1
5-8mm sten	2730	154,1
8-16mm sten	2590	828,4

Tabel 18.1: Recept for 1m^3 SCC med et ekstra vandindhold på 5%

Ved tilsætningen af kaolin er denne rørt op i blandevandet.

18.1 Forsøgsresultater

Kaolinen er tilsat som hhv. 1, 2, 3, 4 ,5 og 10 vægt-% af pulveret. De reologiske parametre registreret ved tilsætningen af lermineralet kaolin, fremgår af tabel 18.2.

Vægt-% kaolin	Flydemål [mm]	τ_0 [Pa]	η [Pa· s]	Separation [%]	T_{300} [s]	T_{500} [s]
0	660	8	3,5	0	0,53	1,05
1	600	13	5,0	13	0,60	1,35
2	580	15	4,3	3	0,64	1,38
3	560	11	6,2	11	0,56	1,30
4	550	18	6,6	9	0,56	1,30
5	550	12	6,1	12	0,55	1,60
10	460	9	9,6	9	0,70	-

Tabel 18.2: De reologiske parametre registreret ved tilsætningen af lermineralet kaolin ved 5% ekstra vand

Tilsættes 1-3 vægt-% kaolin til en blanding med et ekstra vandindhold på 5%, opnås det ønskede flydemål. I tilfælde af at den pågældende blanding ikke indeholder ekstra vand, må det forventes at tilsætningen af lermineraler på samme vis reducerer flydemålet. Dette er undersøgt ved at tilsætte 3% kaolin til en blanding uden ekstra vand. Resultatet af dette forsøg fremgår af tabel 18.3

Vægt-% kaolin	Flydemål [mm]	τ_0 [Pa]	η [Pa· s]	Separation [%]	T_{300} [s]	T_{500} [s]
0	570	16	6,4	3	0,83	1,70
3	470	31	9,8	8	0,8	-

Tabel 18.3: De reologiske parametre registreret ved tilsætningen af 3% kaolin til basisrecepten uden ekstra vand

Som det fremgår af tabel 18.3, bliver flydemålet væsentligt mindre, og derved vil det være svært at opnå de ønskede flydeegenskaber for en given SCC, ved at tilsætte kaolin til en i forvejen stabil beton uden at foretage yderligere modificering af recepten. Idet tilsætningen af SPT i forvejen er over mætningspunktet er den eneste mulighed for at kompensere for det faldende flydemål, at øge pastavolumenet. Undersøgelsen af det påkrævede pastavolumen er foretaget i kapitel 19.

18.2 Konklusion

For at dokumentere reproducerbarheden af betonen er der tidligere udført seks forsøg. Ved de seks forsøg blev der registreret flydemål mellem 575mm og 600mm. Som det fremgår af tabel 18.2, skal der således tilsættes mellem 1-3 vægt-% kaolin, for at flydemålet ligger i det ønskede interval. Derudover er det konkluderet, at det er nødvendigt at øge pastavolumenet for at opnå det ønskede flydemål, hvis en i forvejen stabil recept tilsættes lermineraler.

Kapitel 19

Variation af vandcementtal

For at vurdere om lermineraler har en stabiliserende effekt på SCC, er der foretaget forsøg med varierende vandindhold hhv. med og uden tilsætning af lermineraler. Vurderingen af stabiliteten foretages ud fra det kriterium opstillet i kapitel 10. Det vil sige ved at undersøge ændringen i flydemål samt tendensen til separation ud fra en visuel bedømmelse.

I forsøgene er der ikke foretaget måling af luftindholdet, da dette ville medføre unødigt materialeforbrug. Herved forstås, at skulle kriteriet for blandingerne være et identisk luftindhold, vil dette betyde, at hver blanding skulle reproduceres mange gange, før det korrekte luftindhold opnås, da det erfaringsvist varierer vilkårligt mellem 1% og 2%. En anden medvirkende årsag til at luftindholdet ikke er målt, er at det fra projektgruppens side blev vurderet, at indflydelsen af variationen af luftindholdet på de reologiske parametre vil være minimal, da der i forvejen må påregnes en tolerance på +/- 25mm på de enkelte flydemål.

Forsøgene er foretaget på blandinger á 25 liter. Ved variationen af vandindholdet er der ikke korrigeret for mængden af de resterende materialer. Herved forstås, at ved f.eks. en forøgelse af vandindholdet er mængden af de resterende materialer ikke følgende nedjusteret. Dette har i praksis ingen indflydelse på betonens egenskaber, men betyder at det samlede volumen differerer fra 1000 l/m^3 alt efter, om der fjernes eller tilføres vand.

I forbindelse med tilsætningen af lermineraler opereres der med hhv. 1% og 3% kaolin. Ud fra dette vil det således vurderes, hvor stor en mængde der skal tilsættes for at gøre den friske beton stabil. I kapitel 21 er der foretaget en sammenligning af stabiliteten for betoner indeholdende hhv. kaolin og Bradsted lerslam.

I det følgende vil der indledningsvis være en gennemgang af, hvad der er registreret og observeret i forbindelse med forsøgene. Sidst i kapitlet findes en sammenligning og diskussion af resultaterne.

19.1 Basisrecept

I dette afsnit redegøres for forsøgene med variation af vandindholdet for basisrecepten, dvs. de forsøg der danner sammenligningsgrundlag for de efterfølgende forsøg med tilsætning af lermineraler (kaolin).

Den anvendte basisrecept er opstillet i tabel 19.1.

	Densitet [kg/m^3]	Mængde [kg/m^3]
Cement	3160	263,6
Flyveaske	2300	79,3
Vand	1000	181,8
SPT	1100	3,4
0-2mm sand	2650	802,1
5-8mm sten	2730	155,4
8-16mm sten	2590	835,6

Tabel 19.1: Recept for 1m^3 SCC

I forsøgene er vandindholdet varieret fra 10% mindre vand op til 4% ekstra vand. Der er foretaget forsøg med otte blandinger i alt. De otte forskellige blandinger samt ændringen af vandindholdets indflydelse på vandcementtal og pastaindhold for de individuelle blandinger, er opstillet i tabel 19.2.

Ekstra vand [%]	Vand [kg]	Vandcementtal	Pastaindhold [liter]
+4	4,7270	0,62	8,13
+2	4,6360	0,61	8,04
Basis	4,5449	0,60	7,94
-2	4,4541	0,59	7,85
-4	4,3632	0,58	7,76
-6	4,2723	0,56	7,67
-8	4,1814	0,55	7,58
-10	4,0905	0,54	7,49

Tabel 19.2: Oversigt over vandindhold, vandcementtal samt pastaindhold for de producerede blandinger

Ved tilsætningen af ekstra vand vil der opnås en dobbelteffekt. Således vil pastavolumenet forøges, hvilket medvirker til, at flydespændingen nedsættes. Derudover vil ekstra vand ligeledes medfører, at pastaen bliver tyndere.

19.1.1 Forsøgsresultater

De reologiske parametre, flydemål, separation samt flydetider for de udførte forsøg er opstillet i tabel 19.3.

Ekstra vand [%]	Flydemål [mm]	τ_0 [Pa]	η [Pa· s]	Separation [%]	T_{300} [s]	T_{500} [s]
+4	640	14	5,3	-1	0,85	1,92
+2	620	15	6,1	6	0,90	1,90
Basis	580	18	7,7	2	1,00	2,35
-2	610	17	6,6	1	0,78	1,80
-4	580	30	5,1	11	1,00	2,18
-6	580	22	9,2	-3	0,80	1,80
-8	545	25	10,7	7	0,85	2,20
-10	515	30	13,5	7	0,85	3,20

Tabel 19.3: De reologiske parametre for de udførte forsøg, registreret ved observation samt under anvendelse af BML-viskometer

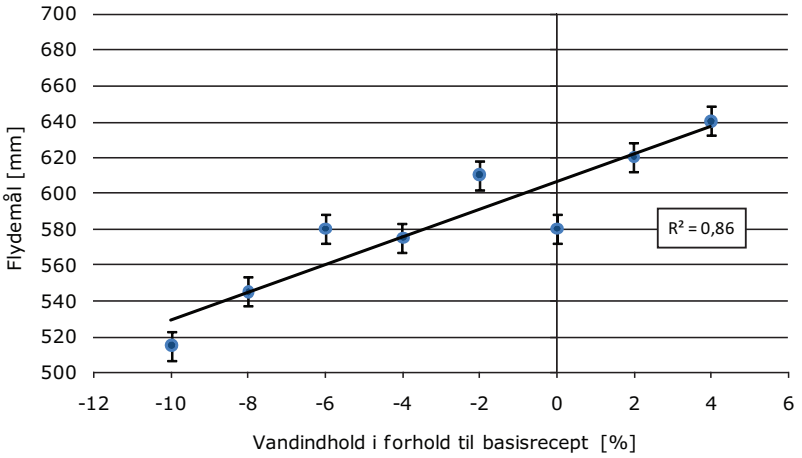
Som det fremgår af tabel 19.3 varierer flydemålet i forsøgene fra 515mm for blandingen med 10% mindre vand til 640mm for blandingen med 4% mere vand. Dette er i overensstemmelse med det forventede. Et enkelt punkt ligger dog udenfor, her tænkes på flydemålet for blandingen med 2% mindre vand. Denne burde være mindre end eller lig med 580mm. Igennem tidligere forsøg er det fundet, at flydemålet for en given recept kan variere med omkring 25mm fra forsøg til forsøg. Derfor må afvigelsen på de 30mm forklares med denne tolerance.

Som det fremgår af tabel 19.3 ligger nogle af punkterne, målt ved BML-viskometeret, ikke som man skulle forvente. Her tænkes f.eks. på flydespændingen for blandingen med 4% mindre vand. Denne burde være lavere i forhold til den målte værdi. Det samme gør sig gældende for viskositeten for blandingerne med henholdsvis 2% og 4% mindre vand. Her burde viskositeten være højere end de målte værdier. Det kan konstateres i lighed med tidligere observationer, at BML-viskometeret med de anvendte indstillinger arbejder med forholdsvis store tolerancer. Dog er der en klar tendens i resultaterne for de reologiske parametre, som er i overensstemmelse med det forventede.

BML-viskometeret foretager ligeledes en måling af den pågældende blandings separation. Af resultaterne i tabel 19.3 fremgår det, at den næstlaveste separation er målt for blandingen med det største vandindhold, hvorimod blandingen med det mindste vandindhold giver den næststørste separation. Dette er ikke i overensstemmelse med teorien, idet en tyndere pasta vil medføre større riskiko for separation, jf. kapitel 9. Variationen af den målte separation udviste samme tendens under de tidligere forsøg med reproducerbarhed, jf. kapitel 17. På baggrund af dette tillægges separationen målt vha. BML-viskometeret ingen

betydning.

For at kunne undersøge om tilsætningen af lermineraler vil have en stabiliserende effekt på betonen, er det nødvendigt at have et sammenligningsgrundlag. Sammenligningsgrundlaget skabes ved, at flydemålet optegnes som funktion af vandindholdet for de otte blandinger uden tilsætning af ler. Dette fremgår af figur 19.1.

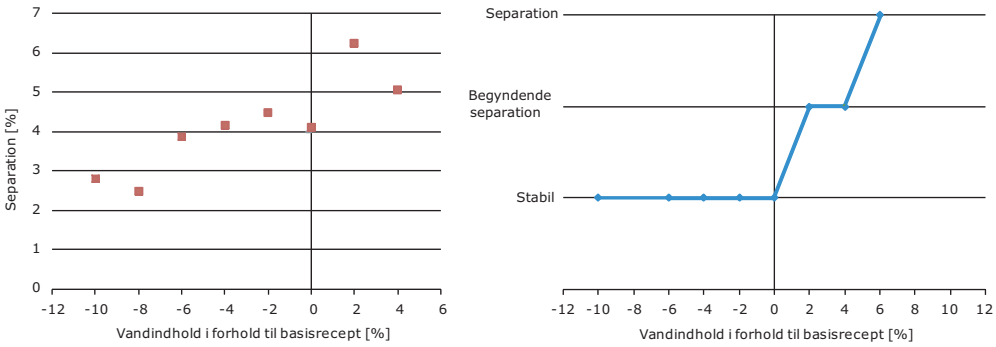


Figur 19.1: Flydemål som funktion af vandindhold for de otte blandinger. Ved hvert målepunkt er +/- standardafvigelsen indtegnet

Som det fremgår af figur 19.1, er der en forholdsvis god lineær sammenhæng mellem resultaterne, med en korrelationskoefficient på 0,86. Det punkt der afviger mest fra den bedste rette linie er resultatet fra basisblandingen. Som det fremgår af figur 19.1 og som også er kommenteret ovenfor, burde flydemålet for denne blanding være større. På figur 19.1 svarer en ændring i vandindholdet på 1% til en ændring en ændring i flydemålet på omkring 8mm.

Ved hver blanding er der ligeledes rent visuelt vurderet, om der var tegn på separation. For blandingerne tilsat hhv. 2% og 4% ekstra vand blev der registreret begyndende separation. Tydelig separation blev observeret ved blandingen med 6% ekstra vand.

Udover rent visuelt at vurdere om der opstår separation, er separationen målt vha. metoden udviklet af Aalborg Portland. Af figur 19.2 fremgår separationen optegnet som funktion af vandindholdet.



Figur 19.2: Separationen som funktion af vandindhold. Venstre: Målt separation ved Aalborg Portlands metode; Højre: Visuel bedømmelse af separationen

Som det fremgår af figur 19.2 er der som forventet en øget separation ved større vandindhold. Ved den visuelle bedømmelse kunne der konstateres begyndende separation ved 2% ekstra vand og ved 6% ekstra vand forekom der tydelig separation.

19.2 Basisrecept tilsat 1% kaolin

I dette afsnit redegøres for de reologiske parametre registreret ved tilsætningen af 1% kaolin til basisrecepten, hvor vandindholdet varieres. Disse sammenholdes senere med de reologiske parametre registreret uden tilsætning af lermineraler samt med tilsætningen af 3% kaolin. For sammensætningen af den anvendte kaolin henvises til kapitel 6. Kaolinen er forud for forsøgene tørret i varmeskab ved 105°C. Dette er gjort for at sikre, at eventuelt varierende vandindhold i kaolinen ikke skal få indflydelse på målingerne. Ved tilsætningen er kaolinen, opslæmmes denne i vand.

Af sammenlignelighedsgrunde er det nødvendigt at opnå ca. samme flydemål mellem de tre blandinger, dvs. uden kaolin, med 1% kaolin og 3% kaolin. Uden at tilsætte ekstra pasta er der ved tilsætningen af 1% kaolin registreret et flydemål på 590mm. Basisrecepten havde et flydemål på 570mm, og da der som tidligere beskrevet kan påregnes en variation på 25mm, anses dette udgangspunkt som acceptabelt. Udgangsrecepten der er benyttet i forsøgene, fremgår af tabel 19.4.

	Densitet [kg/m^3]	Mængde [kg/m^3]
Cement	3160	263,3
Flyveaske	2300	79,2
Vand	1000	181,6
SPT	1100	3,4
0-2mm sand	2650	801,1
5-8mm sten	2730	155,2
8-16mm sten	2590	834,5
Kaolin	2717	3,4

Tabel 19.4: Recept for 1m^3 SCC indeholdende 1% kaolin

Udgangspunktet er et vandcementtal på 0,6. Dette varieres ved at tilsætte mere eller mindre vand, procentmæssigt af udgangsreceptens vandindhold. Der tilsættes således -6%, -4%, -2%, 0%, +2%, +4%, +6% og +10% ekstra vand. I det følgende beskrives de observationer der er gjort, samt de reologiske parametre der er fundet i forbindelse med forsøgene.

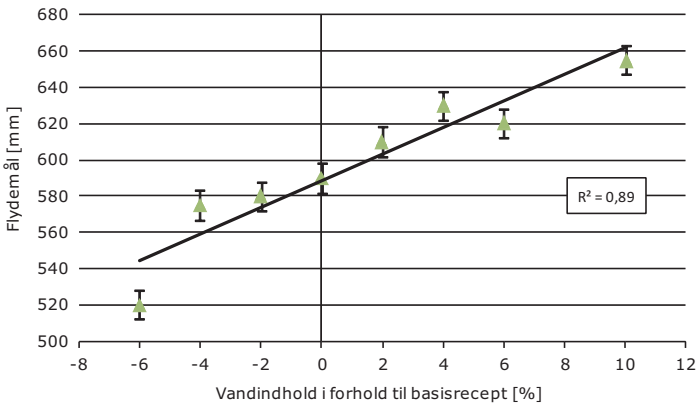
19.2.1 Forsøgsresultater

De registrerede flydemål og udbredelsestider samt de reologiske parametre fundet vha. BML-viskometeret fremgår af tabel 19.5.

Ekstra vand [%]	Flydemål [mm]	τ_0 [Pa]	η [Pa· s]	Separation [%]	T_{300} [s]	T_{500} [s]
-6	520	39	7,7	-69	0,77	1,92
-4	575	25	7,1	-5	0,68	1,35
-2	580	23	7,3	8	0,72	1,50
Basis	590	21	6,6	-1	0,64	1,25
+2	610	38	2	-28	0,75	1,40
+4	630	18	4,3	1	0,58	1,20
+6	620	24	3,6	-4	0,91	1,60
+10	655	25	2,6	-24	0,70	1,30

Tabel 19.5: De reologiske parametre registreret ved 1% kaolin og varierende vandindhold

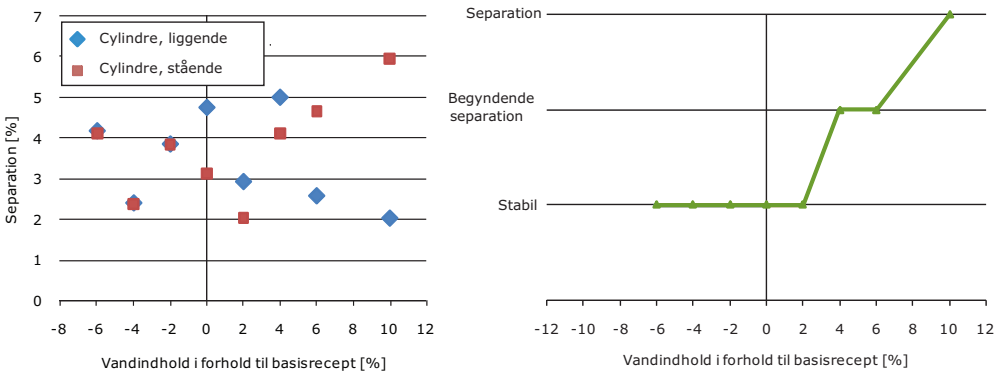
For at vurdere om tilsætningen af lermineraler har en stabiliserende effekt på den friske beton, er det som tidligere nævnt nødvendigt at vurdere gradienten, når flydemålet optegnes som funktion af vandindholdet. Af figur 19.3 fremgår flydemålet som funktion af vandindholdet for recepten tilsat 1% kaolin.



Figur 19.3: Flydemålet som funktion af varierende vandindhold ved tilsætning af 1% kaolin. Ved hvert målepunkt er +/- standardafvigelsen indtegnet

I forbindelse med udførsel af flydemål blev der konstateret begyndende separation ved 4% og 6% ekstra vand, mens der var tydelig separation ved 10% ekstra vand.

I lighed med forsøgene for basisrecepten er der udstøbt cylindre til vurdering af separationen. Cylindrene der blev udstøbt for basisrecepten lå alle ned under hærdning. Ved udstøbning af cylindrene for blandingerne med 1% kaolin blev én cylinder placeret liggende og den anden stående under hærdning. Årsagen til dette var at undersøge i hvor høj grad, dette påvirker separationen. Af figur 19.4 fremgår separationen for cylindrene samt den visuelle bedømmelse.



Figur 19.4: Separationen som funktion af vandindhold. Venstre: Målt separation ved Aalborg Portlands metode; Højre: Visuel bedømmelse af separationen

Som det fremgår af figur 19.4, er der meget stor variation i de målte separationer. For cylindrene der har stået op, er der en tendens til, at separationen stiger med øget vandmængde, hvilket også er i overensstemmelse med det forventede. For cylindrene der har ligget ned, ser det ud til, at det modsatte gør sig gældende, nemlig at separationen falder med øget vandmængde.

Ved den visuelle bedømmelse kunne der konstateres begyndende separation ved 4% ekstra vand og ved 10% ekstra vand forekom der tydelig separation.

19.3 Basisrecept tilsat 3% kaolin

I dette afsnit redegøres for de reologiske parametre registreret ved tilsætningen af 3% kaolin med varierende vandindhold. Kaolinen benyttes i samme form som ved tilsætning af 1%.

For at kunne sammenligne reologien for SCC med og uden lermineraler skal der opnås et flydemål for alle tre basisblandinger, der er af samme størrelseorden af hensyn sammenligningsgrundlaget. I kapitel 17 blev det fastslået, at basisblandingen uden ændring i vandindhold har et flydemål i intervallet 575-600mm. Derfor skal basisblandingen tilsat 3% kaolin ligeledes befinde sig i dette interval, hvis resultaterne skal kunne sammenlignes. Dette blev undersøgt i kapitel 18, hvor det kunne konstateres at flydemålet faldt til 470mm ved tilsætning af 3% kaolin. Det er derfor nødvendigt at øge flydemålet for basisblandingen med 3% kaolin. Idet vandcementtallet skal fastholdes, er nødvendigt at øge pastavolumenet i blandingen.

For at undersøge hvor meget pastavolumenet skal forøges, er der foretaget tre forsøg med udgangspunkt i recepten opstillet i tabel 19.1, hvor der er tilsat 3% kaolin. I forsøgene er pastavolumenet øget til hhv. 345, 330 og 325 liter i forhold til udgangspunktet på 318 liter pr. m^3. De efterfølgende målte flydemål for de omtalte ændringer i pastavolumenet, fremgår af tabel 19.6.

Pastavolumen [liter]	Flydemål [mm]
345	650
330	615
325	600

Tabel 19.6: Flydemål ved øget pastavolumen

Som det fremgår af tabel 19.6 opnås der et flydemål på 600mm ved et pastavolumen på 325 liter pr. m^3. Det kan således konstateres, at denne blanding holder sig indenfor det ønskede interval på 575-600mm i flydemål. På bag-

grund af dette øges pastavolumenet til 325 liter pr. m^3 for basisrecepten tilsat 3% kaolin, hvilket medfører at recepten bliver som opstillet i tabel 19.7.

	Densitet [kg/m^3]	Mængde [kg/m^3]
Cement	3160	268,9
Flyveaske	2300	80,7
Vand	1000	185,4
SPT	1100	3,5
0-2mm sand	2650	790,3
5-8mm sten	2730	153,2
8-16mm sten	2590	823,4
Kaolin	2717	10,5

Tabel 19.7: Recept for 1m^3 SCC indeholdende 325 liter pasta og 3% kaolin

Udgangspunktet er et vandcementtal på 0,6. Dette varieres ved at tilsætte mere eller mindre vand, procentmæssigt af udgangsreceptens vandindhold. Der tilsættes således -6%, -4%, -2%, 0%, +2%, +4%, +6% og +10% ekstra vand. I det følgende beskrives de observationer der er gjort, samt de reologiske parametre der er fundet i forbindelse med forsøgene.

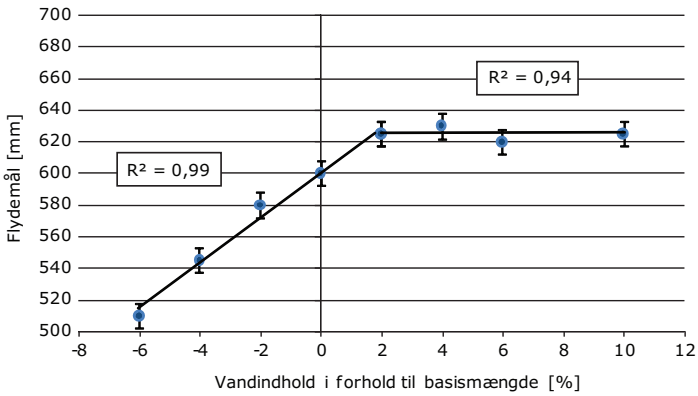
19.3.1 Forsøgsresultater

De registrerede flydemål og udbredelsestider samt de reologiske parametre fundet vha. BML-viskometeret fremgår af tabel 19.8.

Ekstra vand [%]	Flydemål [mm]	τ_0 [Pa]	η [Pa· s]	Separation [%]	T_{300} [s]	T_{500} [s]
-6	510	35	7,7	26	0,93	2,48
-4	545	26	8,3	8	0,73	1,85
-2	580	31	0,8	23	0,94	2,1
Basis	600	18	6,7	-4	0,75	1,60
+2	625	18	5,1	-2	0,83	1,65
+4	630	19	4,7	-5	0,70	1,40
+6	620	21	3,8	-4	0,65	1,3
+10	625	21	2,7	-7	0,73	1,52

Tabel 19.8: De reologiske parametre registreret ved 3% kaolin og varierende vandindhold

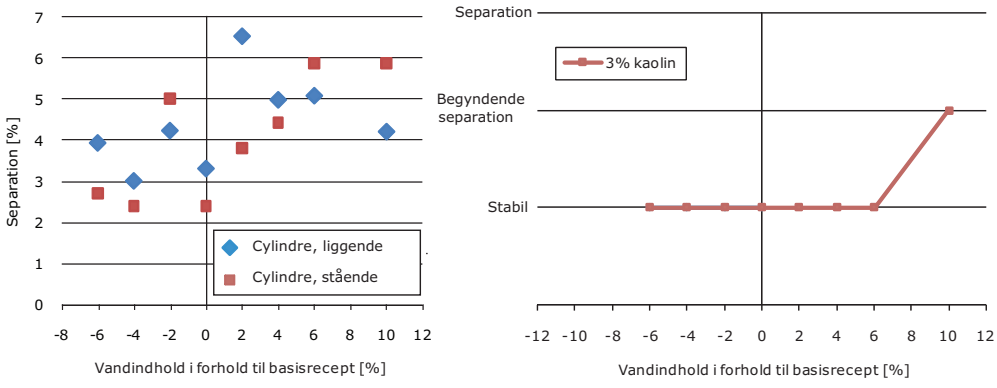
Optegnes flydemålet som funktion af vandcementtallet, er det observeret, at flydemålet falder ved mindre mængde vand i forhold til udgangsrecepten, mens flydemålet ved øget mængde vand er stort set uændret, jf. figur 19.5.



Figur 19.5: Flydemålet som funktion af varierende vandindhold ved tilsætning af 3% kaolin. Ved hvert målepunkt er +/- standardafvigelsen indtegnet

Som det fremgår af figur 19.5, er det valgt at foretage en opdeling af målepunkterne. Første del går fra et vandindhold på 6% mindre vand til 2% ekstra vand i forhold til basismængden. Anden del går fra 2% ekstra vand til og med 10% ekstra vand i forhold til basismængden. Ved første del af målepunkterne er der en god lineær sammenhæng med en korrelationskoefficient på 0,99. I den første del svarer en ændring i vandindholdet på 1% til en ændring i flydemålet på 15mm. Der er ligeledes god lineær sammenhæng på den anden del, med en korrelationskoefficient på 0,94. På den anden del kunne det konstateres, at ændringer i vandindholdet ikke havde væsentlig indflydelse på flydemålet.

Af figur 19.6 fremgår separationen for cylindrene samt den visuelle bedømmelse.



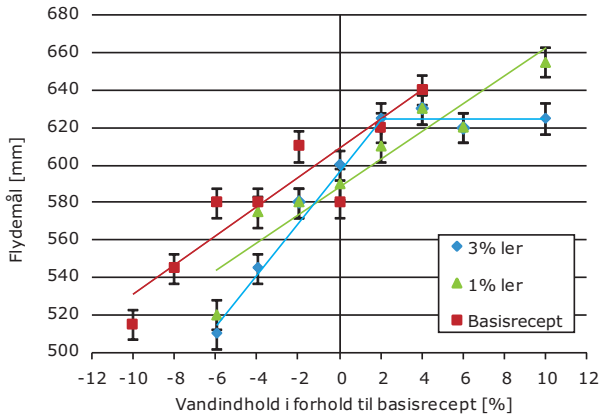
Figur 19.6: Separationen som funktion af vandindhold. Venstre: Målt separation ved Aalborg Portlands metode; Højre: Visuel bedømmelse af separationen

Som det fremgår af figur 19.6 er der en tendens til, at et øget vandindhold medfører større separation, hvilket også er i overensstemmelse med det forventede. Ydermere er det registreret, at der er større udsving i separationen for de cylindre, der har hærdnet stående i forhold til de cylindre, der har hærdnet liggende. Ved den visuelle bedømmelse kunne der konstateres begyndende separation ved 10% ekstra vand.

19.4 Diskussion af resultater

I dette afsnit er der foretaget en sammenligning af resultaterne fra de tre forsøgsserier samt en vurdering af lermineralernes effekt på stabiliteten.

Af figur 19.7 fremgår flydemålet for blandingerne som funktion af varierende vandcementtal. På figuren er ligeledes indtegnet standardafvigelsen for flydemålet fundet i kapitel 17. Standardafvigelsen betegner den naturlige variation, der må kunne forventes fra forsøg til forsøg.

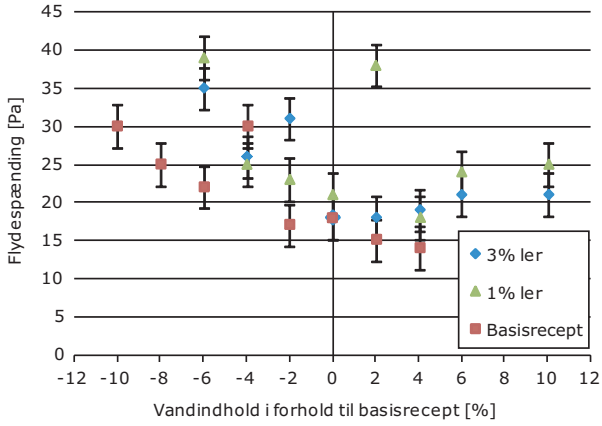


Figur 19.7: Flydemålet som funktion af varierende vandcementtal for hhv. beton med og uden tilsætning af lermineraler. De bedste rette linier er også indtegnet

Som det fremgår af figur 19.7 ligger punkterne for flydemålet for basisrecepten på en forholdsvis ret linie. Tilsvarende gør sig gældende for recepten tilsat 1% kaolin. For recepten tilsat 3% kaolin ligger punkterne ligeledes på en ret linie indtil en øget vandmængde på 2%, hvorefter flydemålet stagnerer. Indtil stagnationspunktet er der en tendens til, at gradienten er stejlere end for de andre to recepter. Dette er ikke i overensstemmelse med det forventede, jf. figur 10.1. Dog skal det bemærkes, at flydemålet for recepten tilsat 3% kaolin, antager en stort set konstant værdi ved en øget mængde vand. Dette viser, at recepten indeholdende lermineraler er mindre følsom overfor en øget mængde vand end

tilfældet er for basisrecepten. Indlægges bedste rette linie for basisrecepten og recepten med 1% kaolin, ses at gradienterne er stort set identiske. Gradienten er således 7,6 og 7,3 for recepten hhv. uden kaolin og med 1% kaolin. I henhold til figur 10.1 virker det således ikke stabiliserende at tilsætte 1% kaolin, idet dette blot medfører en forskydning af linien i forhold til basisrecepten.

Af figur 19.8 fremgår flydespændingen som funktion af vandcementtallet for blandingerne hhv. med og uden lermineraler.



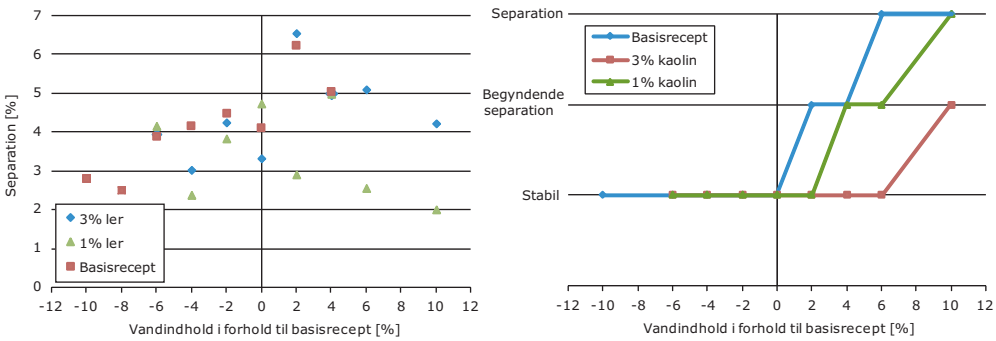
Figur 19.8: Flydespændingen som funktion af vandcementtallet

Som det fremgår af figur 19.8 er der en tendens til at flydespændingen, for basisrecepten, er faldende ved øget mængde vand, hvilket også er i overensstemmelse med stigende flydemål, jf. figur 19.7. At flydespændingen falder ved øget vandmængde stemmer overens med teorien. Ved øget vandmængde opnås dels en større mængde pasta og dels bliver pastaen „tyndere“, hvilket medfører, at flydespændingen falder og betonen dermed flyder længere. For blandingerne tilsat 3% kaolin er der god overensstemmelse mellem flydemål og flydespænding. Indledningsvist øges flydemålet og flydespændingen falder, indtil der fra 2% ekstra vand opnås konstant flydemål. Flydespændingen antager også her konstante værdier, idet de små udsving der kan observeres, ligger indenfor standardafvigelsen. For blandingerne tilsat 1% kaolin er der forholdsvis god overensstemmelse mellem flydespændingen og flydemålet op til basis vandindholdet, idet flydespændingen falder, mens flydemålet stiger. Ved tilsætning af ekstra vand er der store udsving mellem det registrerede og det forventede. Således skiller især flydespændingen registreret ved 2% og 10% ekstra vand sig ud.

Ved basisrecepten blev der allerede observeret begyndende separation ved et

ekstra vandindhold på hhv. 2% og 4%. For recepten indeholdende 1% kaolin blev der observeret begyndende separation ved hhv. 4% og 6% ekstra vand, mens der ved 10% ekstra vand var tydelig separation. For recepten med 3% kaolin blev der observeret begyndende separation ved et ekstra vandindhold på 10%. For sidstnævnte blev der ikke observeret egentlig separation under forsøgene. Således kunne det visuelt konstateres, at tilsætningen af kaolin har en stabiliserende effekt.

Af figur 19.9 fremgår den målte separation samt den visuelt bedømte separation, som funktion af vandmængden for recepterne hhv. uden og med lermineraler.

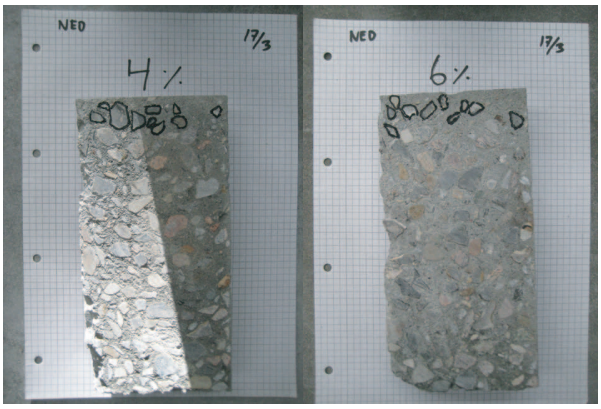


Figur 19.9: Separationen som funktion af vandindhold. Venstre: Målt separation ved Aalborg Portlands metode; Højre: Visuel bedømmelse af separationen

Ved brug af Aalborg Portlands metode, fremgår det af figur 19.9 at der ikke nogen tydelig tendens til, at der ved denne målemetode er større separation for blandingerne uden kaolin i forhold til dem med 3% kaolin. Dog er der en tendens til stigende separation som følge af større vandindhold. For blandingerne med 1% kaolin er der en tendens til mindre separation ved øget vandindhold, hvilket ikke stemmer overens med de observationer, der er gjort i forbindelse med den visuelle separation.

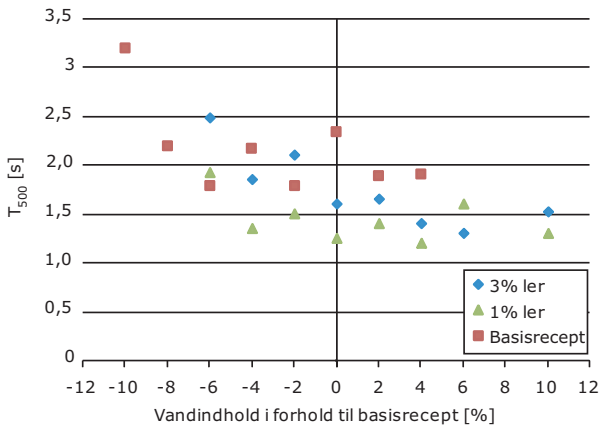
I forbindelse med anvendelsen af Aalborg Portlands metode til måling af separationen kan det konstateres, at der er visse faktorer metoden ikke tager højde for. Metoden tager f.eks. ikke hensyn til hvor homogent tilslagsmaterialet er fordelt i cylinderen. Det er derfor muligt at registrere en lille separation, men ved rent visuelt at vurdere den gennemskårne cylinder ses det, at de store sten primært er at finde i bunden af cylinderen og de små i toppen. På figur 19.10 er vist to gennemskårne cylindre indeholdende 3% kaolin og hhv. 4% og 6% ekstra vand. Som det fremgår af figur 19.9 er den målte separation stort set

identisk, mens det er tydeligt at cylinderen tilsat 4% ekstra vand har flere store sten i toppen i forhold til cylinderen med 6% ekstra vand.



Figur 19.10: Markering af de ti øverste sten til bestemmelse af separationen for hhv. 4% og 6% ekstra vand. Begge blandinger indeholdende 3% kaolin

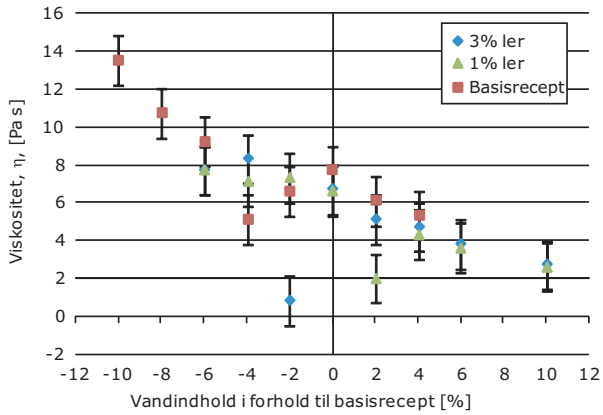
Udover at skabe en mere stabil beton ved tilsætningen af lermineraler er det hensigtsmæssigt, at egenskaberne af den friske beton ikke forringes væsentligt. Som det fremgår af figurene 19.7 og 19.8, er der en klar indikation af, at en given beton indeholdende 3% kaolin er mere stabil over for øget vandmængde i forhold til basisrecepten og recepten tilsat 1% kaolin. For at kontrollere, at tilsætningen af lermineraler ikke har en uønsket effekt på viskositeten er dels T_{500} og viskositeten plottet som funktion af vandcementtallet. T_{500} for blandingerne med og uden kaolin fremgår af figur 19.11.



Figur 19.11: Udbredelsestiden, T_{500}, for blandingerne med og uden lermineraler som funktion af vandcementtal

Som det fremgår af figur 19.11 er der ikke væsentlig variation mellem blandingerne med og uden lermineraler. Dog ser lermineralerne ud til at reducere viskositeten, idet T_{500} er lavere for blandingerne tilsat kaolin. Lermineralerne ser således ikke ud til at have den store indflydelse på viskositeten, hvorved der ikke umiddelbart sker nogen forringelse af den friske betons egenskaber ved at tilsætte lermineraler. For samtlige blandinger er der en tendens til, at udbredelsestiden falder ved øget vandindhold.

Af figur 19.12 fremgår viskositeten bestemt ved BML-viskometeret for samtlige blandinger.



Figur 19.12: Viskositeten som funktion af vandcementtallet for samtlige blandinger

Som det fremgår af figur 19.12, er der, hvis der ses bort fra blandingerne med 2% mindre vand, god overensstemmelse mellem blandingerne med og uden lermineraler. Således opnås stort set samme viskositet, hvilket også er i overensstemmelse med observationerne gjort ved måling af udbredelsestiden, jf. figur 19.11.

19.5 Konklusion

Ved udarbejdelsen af de to forsøgsserier med tilsætning af kaolin kan det konkluderes, at tilsætning af 3% kaolin har en stabiliserende effekt på betonblandingen. Betonblandingen med tilsætning af 1% kaolin udviser ikke tegn på at stabilisere den friske beton. Optegnes flydemålet som funktion af vandindholdet, er gradienten af den rette linie for 1% kaolin identisk med basisrecepten. Ud fra dette kan det konkluderes, at tilsætning af 1% kaolin ikke har en stabiliserende effekt. Tilsætningen af 3% kaolin giver ligeledes anledning til en ret linie, der dog stagnerer ved en øget vandmængde på 2% og over. Ud fra dette

kan det konkluderes, at recepten tilsat 3% kaolin er mindre følsom overfor en øget vandmændge end basisrecepten og recepten tilsat af 1% kaolin. Endvidere kan det konkluderes, at tilsættes der for lidt vand til blandingen tilsat 3% kaolin, giver dette anledning til en væsentlig reduktion i flydemålet, da gradienten for den rette linie er stejlere, end hvad der blev observeret for recepten med 1% kaolin og basisrecepten. Idet blandingen med 3% kaolin giver anledning til en væsentlig reduktion i flydemålet, er det nødvendigt at øge pastavolumenet fra 318l pr. m^3 til 325l pr. m^3. Dette gøres af hensyn til sammenligneligheden af de tre blandinger. Med det ekstra pastatillæg ligger basis for de tre forsøgsserier i intervallet 575mm til 600mm, hvilket er inden for den naturlige variation dokumenteret i kapitel 17.

Efter hver observation af flydemålet er der foretaget en visuel bedømmelse af separationen. Den visuelt bedømte separation for basisrecepten viser, at denne er stabil indtil der tilsættes 2% ekstra vand, hvorved der observeres begyndende separation. Ved et vandindhold på 6% ekstra vand er der observeret tydelig separation. For recepten tilsat 1% kaolin er der begyndende separation ved 4% ekstra vand og tydelig separation ved 10% ekstra vand. Ved blandingen tilsat 3% kaolin er der observeret begyndende separation ved 10% ekstra vand. Herved kan det ved visuel bedømmelse konkluderes, at blandingen med 3% kaolin har en stabiliserende effekt, mens 1% kaolin kun har beskeden effekt på den friske beton.

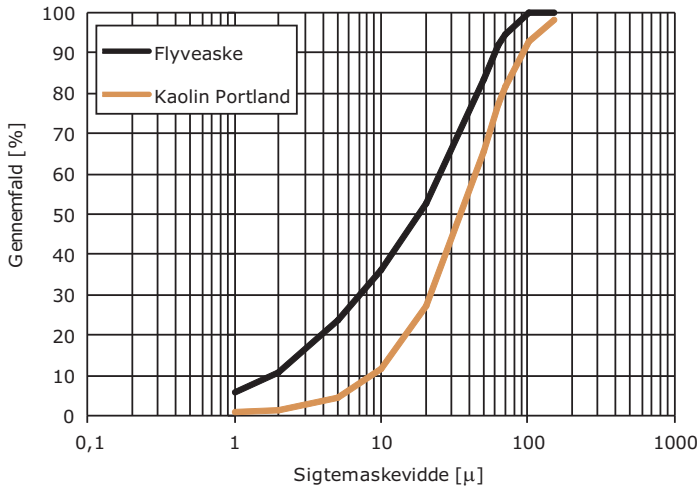
Derudover er det påvist, at tilsætningen af lermineraler ikke påvirker viskositeten betydeligt i forhold til basisrecepten.

Kapitel 20

Partikelstørrelse versus mineralogi

Tidligere undersøgelser med tilsætning af lermineraler i form af kaolin, har demonstreret en stabiliserende effekt på betonen, jf. kapitel 19. Disse undersøgelser havde udelukkende til hensigt at eftervise en stabiliserende effekt.

I dette kapitel foretages en undersøgelse af, hvorvidt det er partikelstørrelsen af kaolinen eller mineralogien, der skaber den stabiliserende effekt. Som beskrevet i kapitel 9, medfører større partikler en reducering af flydespændingen og viskositen og dermed en øget risiko for separation. I kapitel 6 blev det konstateret, at flyveasken i betonen er den bestanddel, der minder mest om kaolinen i forhold til kornkurven. Kornkurverne for hhv. kaolin og flyveaske er optegnet på figur 20.1.



Figur 20.1: Kornkurver for kaolin og flyveaske

Som det fremgår af figur 20.1, er flyveasken finere i fraktionen end kaolinen. Det må således konkluderes, at i så fald tilsætning af kaolin virker mere stabiliserende på betonen end en tilsvarende forøgelse af flyveaskeindholdet, må dette tilskrives andre forhold end partikelstørrelsen.

Fremgangsmåden i forsøgene med flyveasken er analog med forsøgene med tilsætning af kaolin. I stedet for at tilsætte 3% kaolin til blandingerne, tilsættes 3% ekstra flyveaske. Der foretages forsøg med syv blandinger, hvor vandindholdet varieres fra 6% mindre vand til 6% ekstra vand i forhold til basis. For at kunne sammenligne resultaterne fra forsøget med ekstra flyveaske med resultaterne fra forsøget med tilsætning af kaolin, er det nødvendigt at have omtrent samme flydemål som udgangspunkt.

Forsøgene er foretaget på blandinger á 25 liter. Indledningsvist blev der foretaget forsøg med basisrecepten tilsat 3% ekstra flyveaske, for at undersøge om dette influerede på flydemålet. Det kunne efterfølgende konstateres, at flydemålet steg ved tilsætning af ekstra flyveaske. Denne effekt var den omvendte af, hvad der kunne observeres i forsøgene med tilsætning af kaolin. For at opnå det ønskede flydemål, var det således nødvendigt at fjerne noget pasta fra blandingerne i forhold til basisrecepten. Igennem forsøg, hvor der systematisk blev fjernet noget af pastavolumenet, kunne det konstateres, at otte liter mindre pasta pr. m^3 i blandingen med 3% ekstra flyveaske gav samme flydemål som basisrecepten. Det samlede pastavolumen pr. m^3 i basisrecepten er 318l. Herved bliver basisrecepten tilsat 3% ekstra flyveaske som opstillet i tabel 20.1.

	Densitet [kg/m^3]	Mængde [kg/m^3]
Cement	3160	256,9
Flyveaske	2300	87,3
Vand	1000	177,2
SPT	1100	3,3
0-2mm sand	2650	811,5
5-8mm sten	2730	157,3
8-16mm sten	2590	845,5

Tabel 20.1: Recept for 1m^3 SCC tilsat 3% flyveaske. I den opgivne mængde flyveaske er tillagt de 3%

De syv blandinger samt ændringen af vandindholdets indflydelse på vandcementtal og pastaindhold for den pågældende blanding er opstillet i tabel 20.2.

Ekstra vand [%]	Vand [kg]	Vandcementtal	Pastaindhold [liter]
+6	4,6957	0,62	8,13
+4	4,6071	0,61	8,04
+2	4,5185	0,60	7,95
Basis	4,4299	0,59	7,86
-2	4,3413	0,58	7,77
-4	4,2527	0,57	7,68
-6	4,1641	0,55	7,60

Tabel 20.2: Oversigt over vandindhold, vandcementtal samt pastaindhold for de syv blandinger tilsat 3% flyveaske

20.1 Forsøgsresultater

Herunder følger en gennemgang af hvad der er registreret og observeret i forbindelse med de syv blandinger tilsat 3% flyveaske. Efter resultatbehandlingen foretages en sammenligning og diskussion af resultaterne fra forsøget med 3% flyveaske med resultaterne fra forsøget med 3% kaolin. De reologiske parametre, flydemål, separation samt udbredelsestider for de syv blandinger er opstillet i tabel 20.3.

Ekstra vand [%]	Flydemål [mm]	τ_0 [Pa]	η [Pa· s]	Separation [%]	T_{300} [s]	T_{500} [s]
+6	670	24	3,6	-2	0,56	1,02
+4	645	21	4,0	-45	0,75	1,39
+2	610	26	4,7	-47	0,64	1,80
Basis	605	16	6,0	7	0,75	1,33
-2	590	19	8,4	-2	0,75	1,85
-4	590	23	5,8	-6	0,83	1,73
-6	580	25	7,4	7	0,80	1,49

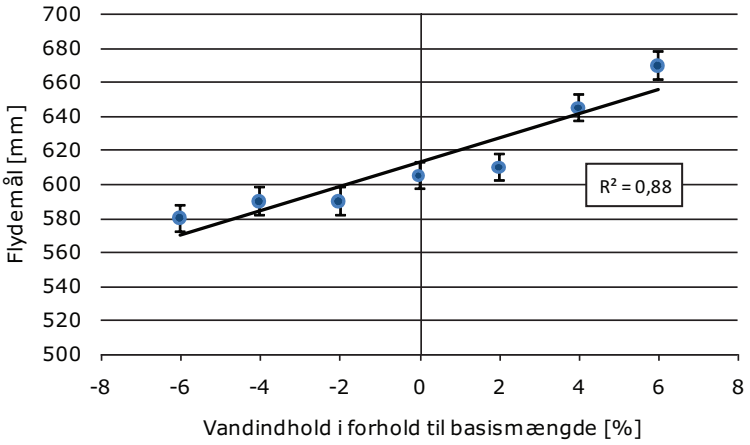
Tabel 20.3: De reologiske parametre for de syv blandinger tilsat 3% flyveaske

Som det fremgår af tabel 20.3, varierer flydemålet i forsøgene fra 580mm for blandingen med 6% mindre vand til 670mm for blandingen med 6% mere vand i blandingen.

Betragtes de målte værdier for flydespændingen, jf. tabel 20.3, er det ikke muligt at finde en tendens. Flydespændingen for blandingen med 6% mere vand er målt til 24Pa og flydespændingen for blandingen med 6% mindre vand er målt til 25Pa. Disse resultater stemmer ikke overens med det forventede. Som tidligere beskrevet er der en forskel i flydemål på 90mm for blandingerne med

hhv. største og mindste flydemål. Denne forskel kan altså ikke detekteres af BML-viskometeret. Med hensyn til viskositeten er der en tendens til, at denne stiger med faldende vandindhold, jf. tabel 20.3, hvilket er som forventet. Det er tidligere konstateret, at målingen af separationen i de pågældende blandinger vha. BML-viskometeret er unøjagtig. Dette er også tilfældet for de syv blandinger tilsat ekstra flyveaske, jf. tabel 20.3.

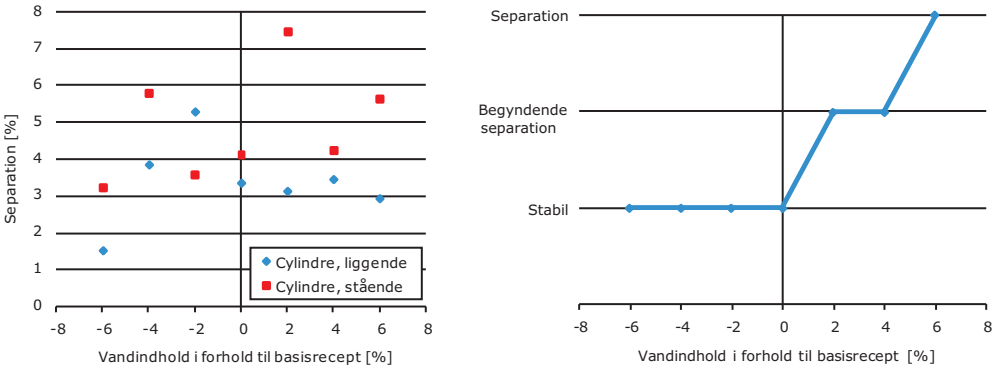
For at kunne sammenligne stabiliteten af blandingerne tilsat 3% flyveaske med blandingerne tilsat 3% kaolin, er flydemålet som funktion af vandcementtallet optegnet på figur 20.2.



Figur 20.2: Flydemålet som funktion af varierende vandindhold for recepterne tilsat 3% flyveaske. Ved hvert målepunkt er +/- standardafvigelsen indtegnet

Som det fremgår af figur 20.2 er der en god lineær sammenhæng mellem de syv målepunkter med en korrelationskoefficient på 0,88. En ændring i vandindholdet på 1% svarer til en ændring i flydemålet på omkring 10mm.

I forbindelse med måling af de enkelte blandingers flydemål, blev der foretaget en visuel bedømmelse af separationen, jf. kriterierne i kapitel 15. Ved blandingen med 2% og 4% ekstra vand blev der konstateret begyndende „vandig midte“, dvs. stadiet før separation. Ved 6% ekstra vand var der tydelig separation langs kanten. Som ved de tidligere forsøg, blev separationen ligeledes målt på støbte cylindre. Separationen målt ved denne metode som funktion af vandmængden fremgår af figur 20.3, hvor også den visuelle bedømmelse fremgår.



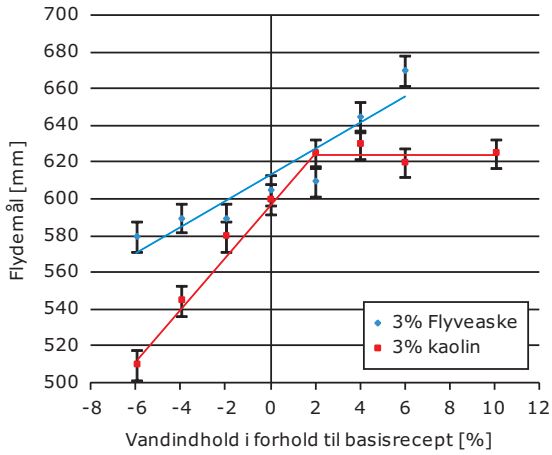
Figur 20.3: Venstre: Separationen som funktion af vandmængden for cylindre der hhv. har stået op og ligget ned; Højre: Visuel separation

Som det fremgår af figur 20.3, er korrelationen af resultaterne ikke god. Det kan blot konstateres, at resultaterne for de cylindre der har ligget ned, er bedre korrelerede end resultaterne for de cylindre, der har stået op. Dette er modsat af, hvad der blev registreret ved de blandinger, hvor der blev tilsat 3% kaolin. Ved de cylindre der har stået op, ses en tendens til større separation med stigende vandindhold. Dette er som forventet og identisk med, hvad der blev registreret ved forsøgene med tilsætning af 3% kaolin. Ved de cylindre der har ligget ned, viser måleresultaterne en stagnation i separationen. Dette stemmer ikke overens med hverken teori, eller hvad der visuelt blev observeret i laboratoriet.

20.2 Diskussion af resultater

I dette afsnit er der foretaget en sammenligning af forsøgene med varierende vandcementtal for basisrecepten tilsat hhv. 3% kaolin og 3% flyveaske.

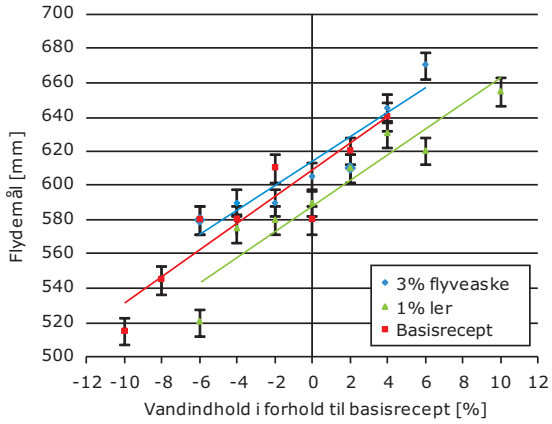
Af figur 20.4 fremgår flydemålet som funktion af vandindholdet for basisrecepten tilsat 3% kaolin og 3% flyveaske. På figuren er standardafvigelsen ligeledes indtegnet.



Figur 20.4: Flydemålet som funktion af vandindholdet for basisrecepten tilsat 3% kaolin og 3% flyveakse. Bedste rette linier er ligeledes indtegnet

Som det fremgår af figur 20.4 ligger punkterne for recepten tilsat 3% flyveaske på en forholdsvis ret linie. Recepten med 3% flyveaske har således ikke samme virkning som recepten tilsat 3% kaolin, idet recepten tilsat 3% kaolin ikke er følsom overfor ekstra vand, jf. den vandrette linie på figur 20.4.

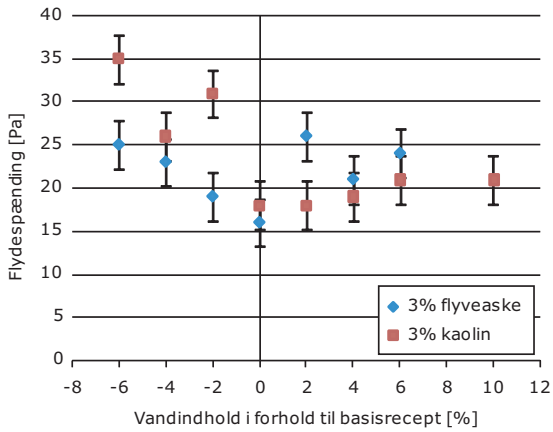
Recepten tilsat 3% flyveaske ser således ud til at opføre sig som basisrecepten og basisrecepten tilsat 1% kaolin, jf. figur 19.7. På figur 20.5 er flydemålet som funktion af vandindholdet for basisrecepten, samt basisrecepten tilsat hhv. 1% kaolin og 3% flyveaske optegnet.



Figur 20.5: Flydemålet som funktion af vandindholdet for basisrecepten, samt basisrecepten tilsat hhv. 1% kaolin og 3% flyveaske

Som det fremgår af figur 20.5, er der ikke den store forskel på gradienterne for de tre recepter, hvorfor der i henhold til figur 10.1 ikke kan påvises en stabiliserende effekt ved at tilsætte 3% flyveaske. De tre liniers gradienter er 7,6 for basisrecepten, 7,3 for recepten tilsat 1% ler og 7,2 for recepten tilsat 3% flyveaske. Der er derfor blot tale om en parallelforskydning, hvorved der ikke påvises nogen stabiliserende effekt.

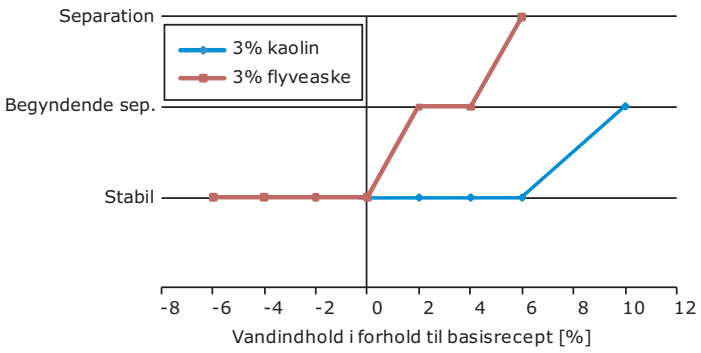
På figur 20.6 er flydespændingen optegnet som funktion af vandindholdet for basisrecepten tilsat hhv. 3% flyveaske og 3% kaolin.



Figur 20.6: Flydespændingen som funktion af vandindholdet

Som det fremgår af figur 20.6 og figur 20.4 er der god overensstemmelse mellem flydemålet og flydespændingen for recepten tilsat 3% kaolin. Således falder flydespændingen fra 6% mindre vand til basis, hvorefter flydespændingen forbliver forholdsvis uændret. Dette stemmer overens med flydemålet, som stagnerer for blandingerne fra 2% ekstra vand til 10% ekstra vand. For recepten tilsat 3% flyveaske stiger flydemålet i takt med, at vandindholdet øges. Herved burde flydespændingen tilsvarende falde i takt med øget vandindhold. Som det fremgår af figur 20.6, er dette ikke tilfældet. Dette må tilskrives de unøjagtigheder, der tidligere er observeret i forbindelse med anvendelsen af BML-viskometeret.

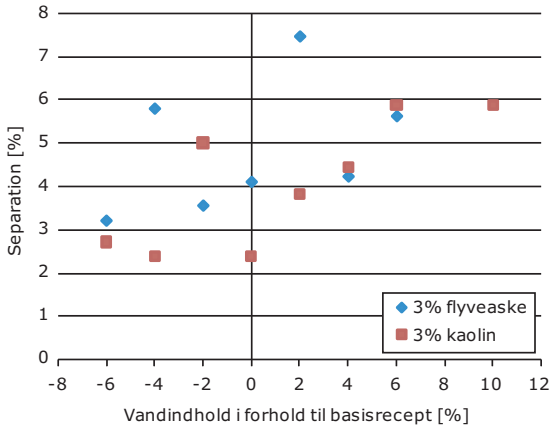
Som det fremgår af ovenstående, er flydemålet mindre følsomt for øget vandindhold for recepten tilsat 3% kaolin i forhold til recepten tilsat 3% flyveaske. Udover at flydemålet er mindre følsomt, skal tendensen til separation ligeledes være mindre, for at recepten er mere stabil. Af figur 20.7 fremgår den visuelt bedømte separation.



Figur 20.7: Visuel bedømmelse af separation observeret i forbindelse med flydemålet

Som det fremgår af figur 20.7, er der ved 2% ekstra vand observeret begyndende separation for blandingen tilsat 3% flyveaske, og ved 6% ekstra vand er der observeret tydelig separation. For recepten tilsat 3% kaolin er blandingerne stabile indtil 10% vand, hvor der opstår begyndende separation. Udover at flydemålet for recepten med 3% kaolin er mindre følsomt for ekstra vand er tendensen til separation også markant mindre, jf. figur 20.7.

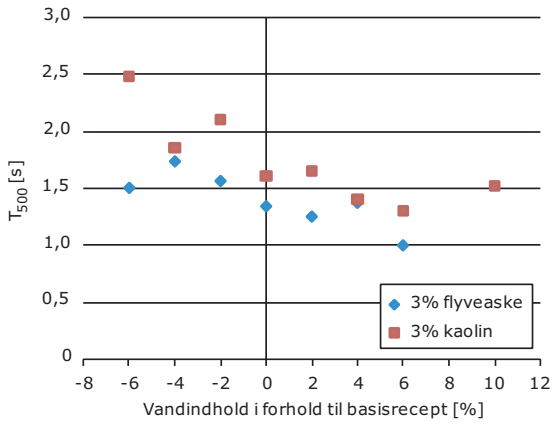
Separationen bestemt ved Aalborg Portlands metode fremgår af figur 20.8.



Figur 20.8: Separationen som funktion af vandindhold for basisrecepten tilsat hhv. 3% flyveaske og 3% kaolin

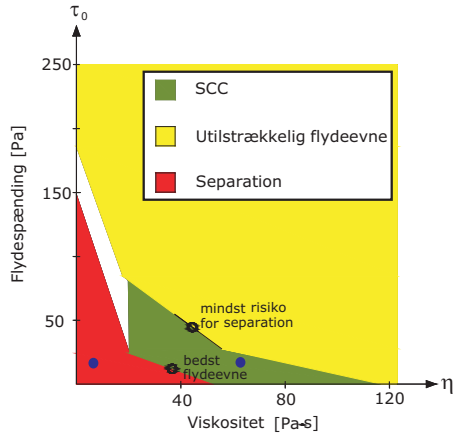
Den målte separation for recepten med 3% flyveaske er større end den målte separation for recepten tilsat 3% kaolin, jf. figur 20.8. Dette stemmer overens med observationerne foretaget under den visuelle bedømmelse af separationen.

Tilsætningen af flyveaske medfører ikke en mere stabil beton, hvilket ligeledes afspejles i udbredelsestiden, T_{500}. Udbredelsestiden som funktion af vandindholdet er optegnet på figur 20.9.



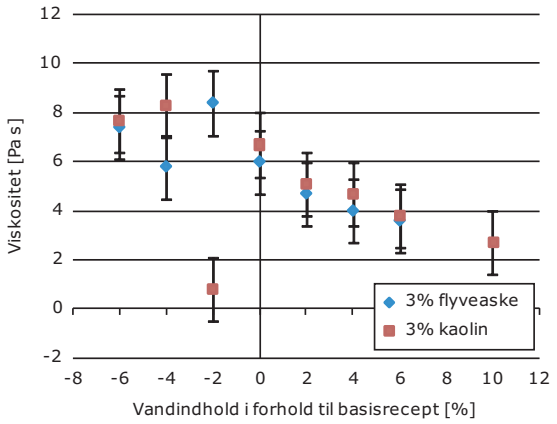
Figur 20.9: Udbredelsestiden, T_{500}, for basisrecepten tilsat hhv. 3% flyveaske og 3% kaolin

Som det fremgår af figur 20.9, er T_{500} faldende for basisrecepten tilsat flyveaske. At udbredelsestiden er faldende ved øget tilsætning af vand betyder, at viskositeten er faldende. Er viskositeten lav vil stenene synke hurtigere gennem pastaen, hvorved tendensen til separation øges. Dette er illustreret på figur 20.10, hvor en beton med lav viskositet sammenholdt med en beton med høj viskositet, kan medføre separation på trods af, at flydespændingen er den samme.



Figur 20.10: Områderne hvor betonen enten separarer, er stabil eller har manglende flydeevne. De blå punkter markerer en beton med hhv. høj og lav viskositet

Optegnes den målte viskositet er der i lighed med T_{500} er der en tendens til, at viskostiten er lavere for recepten tilsat 3% flyveaske i forhold til recepten tilsat 3% kaolin, jf. figur 20.11. Punktet ved 2% mindre vand for recepten tilsat 3% kaolin falder meget uden for de øvrige punkter, hvilket må tilskrives måleunøjagtigheder.



Figur 20.11: Viskositeten som funktion af vandindholdet for basisrecepten tilsat hhv. 3% flyveaske og 3% kaolin

20.3 Konklusion

På baggrund af forsøg foretaget med tilsætning af 3% flyveaske, kan det konkluderes, at flyveaske ikke har en stabiliserende effekt på den friske beton. Ved tilsætning af flyveaske er recepten mere følsom overfor et øget vandindhold i forhold til recepten tilsat 3% kaolin. Dette er dokumenteret ved observationer af flydemål og separation. Ved øget vandindhold stiger flydemålet markant for recepten tilsat 3% flyveaske, og er således blot en parallelforskydning af flydemålene for basisrecepten, jf. figur 20.5. I forhold til separationen, opstår der allerede begyndende separation ved et øget vandindhold på 2% og ved 6% ekstra vand forekommer tydelig separation, jf. figur 20.7.

For at kunne sammenligne stabilitetskriteriet vedrørende flydemålet mellem de forskellige recepter er det vigtigt, at udgangspunktet er identisk. Det vil sige, at der skal tilstræbes et flydemål på ca. 600mm. I forbindelse med beskrivelsen af de enkelte delmaterialers indflydelse på de reologiske parametre, skulle en forøgelse af flyveaskeindholdet medføre en højere flydespænding og viskositet, jf. kapitel 9. Igennem forsøg kunne det konstateres, at det var nødvendigt at reducere pastaindholdet fra 318l pr. m^3 til 310l pr. m^3 for at opnå

det ønskede flydemål. Effekten af en øget mængde flyveaske var således den modsatte af, hvad der er beskrevet i kapitel 9.

Risikoen for separation ved øget vandindhold afspejles ligeledes i T_{500}. For recepten tilsat 3% kaolin stagnerer T_{500} ved et øget vandindhold på 2% og derover, hvilket også stemmer overens med stagnationen i flydemålet. For recepten tilsat 3% flyveaske falder T_{500} med øget vandindhold, hvilket betyder, at viskositeten falder. Risikoen for separation stiger i takt med at viskositeten falder. Således er der god overensstemmelse mellem at et fald i viskositeten, medfører en øget risiko for separation.

Idet flyveasken ikke virker stabiliserende, kan det konkluderes, at det ikke er partikelstørrelsen, der virker stabiliserende, men derimod lermineralernes partikelform.

Kapitel 21

Bradstedslams indflydelse på reologien

Tidligere forsøg har vist, at kaolin har en stabiliserende effekt på SCC, jf. kapitel 19. I kapitel afsnit undersøges det, om Bradsted lerslam ligeledes har en stabiliserende effekt på SCC. For nærmere beskrivelse af lerslammet henvises til kapitel 6.

Fremgangsmåden for undersøgelsen af Bradsted lerslam er identisk med forsøget udført med tilsætning af kaolin. I stedet for tilsætning af 3% kaolin til recepten, er der tilsat 3% Bradsted lerslam. Der er produceret otte blandinger med lerslammet, hvor vandindholdet varieres fra 6% mindre vand til 10% ekstra vand i forhold til basis. For at kunne sammenholde målingerne for recepten tilsat Bradsted lerslam med målingerne for recepten tilsat kaolin, er der tilnærmet samme flydemål for de to recepters basisblanding. Forsøget med 3% kaolin viste, at der skulle anvendes 325 liter pasta for at basisblandingen opnåede et flydemål på 600mm. Forsøgene blev foretaget med udgangspunkt i recepten opstillet i tabel 19.1, hvortil der blev tilsat 3% lerslam. Flydemålene samt pastavolumen er opstillet i tabel 21.1.

Ekstra pastavolumen [liter]	Flydemål [mm]
318	525
325	560
330	600

Tabel 21.1: Flydemål ved øget pastavolumen

Som det fremgår af tabel 21.1 skal der anvendes 330 liter pasta for at basisrecepten tilsat lerslammet opnår et flydemål på 600mm. Herved er recepten med tilsætning af 3% lerslam som opstillet i tabel 21.2.

	Densitet [kg/m^3]	Mængde [kg/m^3]]
Cement	3160	273,0
Flyveaske	2300	82,1
Vand	1000	188,5
SPT	1100	3,6
0-2mm sand	2650	784,7
5-8mm sten	2730	151,6
8-16mm sten	2590	817,5
Lerslam	2587	10,7

Tabel 21.2: Recept for 1m^3 SCC indeholdende 330 liter pasta og 3% lerslam.

Variationen af vandcementtal og pastaindhold for den pågældende blanding er opstillet i tabel 21.3.

Ekstra vand [%]	Vand [kg]	Vandcementtal	Pastaindhold [liter]
-6	4,45	0,56	7,97
-4	4,54	0,58	8,06
-2	4,64	0,59	8,16
Basis	4,73	0,60	8,25
+2	4,82	0,61	8,35
+4	4,92	0,62	8,44
+6	5,01	0,64	8,54
+10	5,20	0,66	8,73

Tabel 21.3: Oversigt over vandindhold, vandcementtal samt pastaindhold for de otte blandinger tilsat Bradsted lerslam

21.1 Forsøgsresultater

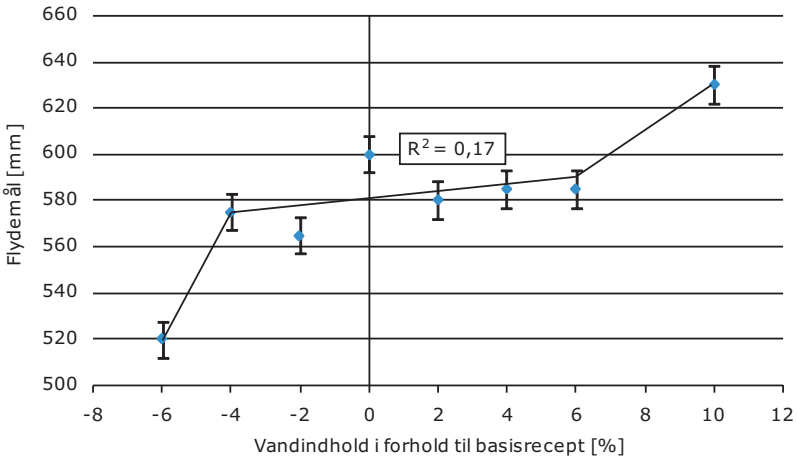
I følgende afsnit gennemgås resultaterne observeret og registreret i forbindelse med blandingerne tilsat 3% lerslam. Forsøgsresultaterne for tilsætning af 3% lerslam er opstillet i tabel 21.4.

Ekstra vand [%]	Flydemål [mm]	τ_0 [Pa]	η [Pa· s]	Separation [%]	T_{300} [s]	T_{500} [s]
-6	520	25	7,5	9	1	2,28
-4	575	22	5,3	7	0,90	1,78
-2	565	26	5,3	3	0,68	1,51
Basis	600	18	5,8	-5	0,90	1,78
+2	580	26	4,6	-6	0,75	1,46
+4	585	11	4,5	9	0,98	1,84
+6	585	95	-4,8	-63	0,75	1,36
+10	630	16	2,2	-12	0,73	1,40

Tabel 21.4: De reologiske parametre for blandingerne tilsat 3% lerslam

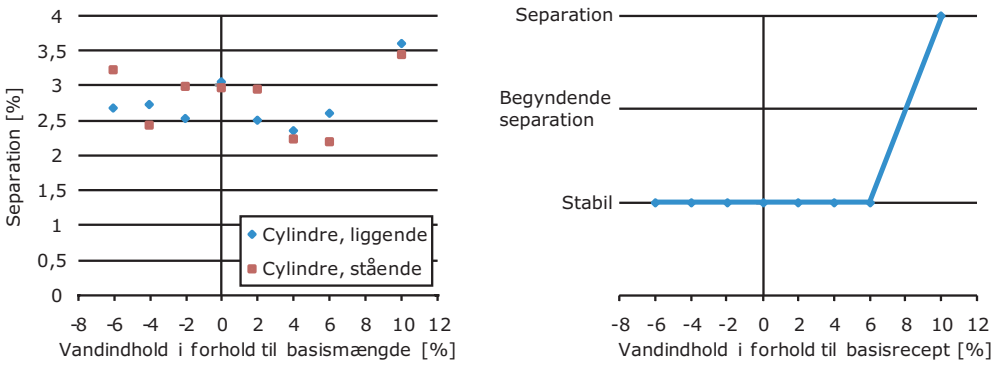
Som det fremgår af tabel 21.4, er der ikke nogen klar tendens for flydespændingen. Eksempelvis er flydespændingen for blandingen med 6% mindre vand 25Pa, mens den for blandingen med 2% ekstra vand er 26Pa, på trods af at flydemålet stiger fra 520mm til 580mm. Endvidere registrerede BML-viskometeret en forskel i flydespændingen på 11Pa mellem blandingerne med hhv. 4% mindre og 4% ekstra vand, på trods af at flydemålet kun varierer med 10mm. Viskositeten udviser tendens til at falde med stigende vandindhold, hvilket er som forventet. Den målte separation er i lighed med tidligere forsøg, meget unøjagtig. Målingen ved BML-viskometeret for blandingen med 6% ekstra vand forkastes idet de målte værdier afviger væsentligt fra de resterende.

Ved optegnelse af flydemålet som funktion af vandindholdet er det observeret, at flydemålet stiger i intervallet fra 6% mindre vand til 4% mindre vand, mens flydemålet er forholdsvis konstant i intervallet fra 4% mindre vand til 6% ekstra vand. I intervallet fra 6% ekstra vand til 10% ekstra vand blev der observeret en stigning i flydemålet. Ud fra disse observationer er det valgt at opdele målepunkterne i tre intervaller, jf. figur 21.1.



Figur 21.1: Flydemålet som funktion af vandindholdet

Som det fremgår af figur 21.1 er korrelationkoefficienten ikke specielt god. Dog ser det ud til, at der er en stagnation i flydemålet mellem 4% mindre vand til 6% ekstra vand, hvorfor det er valgt, at fitte disse punkter med bedste rette linie. Af figur 21.2 fremgår separationen optegnet som funktion af vandindholdet.



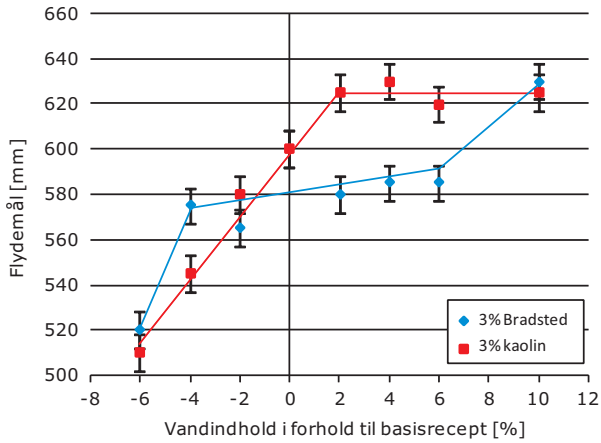
Figur 21.2: Separationen som funktion af vandindhold. Venstre: Målt separation ved Aalborg Portlands metode; Højre: Visuel bedømmelse af separationen

Som det fremgår af figur 21.2, er der god overensstemmelse mellem den målte separation og den visuelle bedømmelse af separationen. Ved begge metoder er der stagnation indtil blandingen, hvor der er tilsat 10% ekstra vand. Her ses, at den målte separation stiger samtidig med, at der visuelt konstateres separation.

21.2 Diskussion af resultater

I dette afsnit er der foretaget en sammenligning af resultaterne fra forsøgene med tilsætning af hhv. 3% kaolin og 3% Bradsted lerslam. Bradsted lerslam indeholder 9% dickit, mens kaolinen fra Aalborg Portland indeholder 36% kaolinit. I kapitel 20 er det konkluderet, at det er mineralogien og ikke partikelstørrelsen, der er afgørende for stabiliteten. Herved må det forventes, at recepten tilsat 3% kaolin er mere stabil end recepten tilsat 3% Bradsted lerslam, idet indholdet af lermineraler er større i kaolinen.

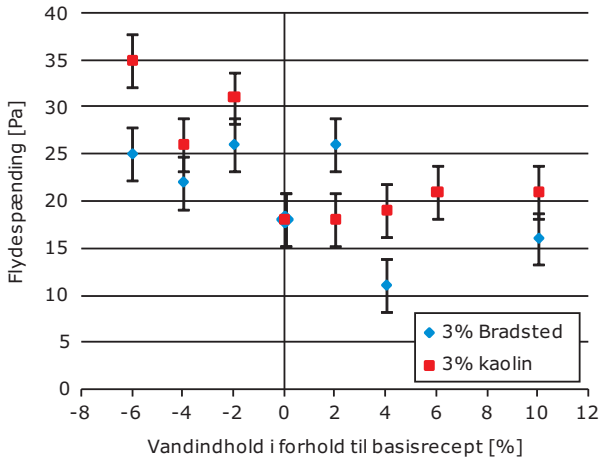
På figur 21.3 er flydemålene for de to recepter optegnet.



Figur 21.3: Flydemålet som funktion af vandindholdet for recepten tilsat hhv. 3% Bradsted lerslam og 3% kaolin

Som det fremgår af figur 21.3, er der en tendens til, at recepten tilsat Bradsted lerslam er stabil overfor moderat variation af vandindholdet. Således varierer flydemålet kun 20mm mellem blandingen med 4% mindre vand og blandingen med 6% ekstra vand. Herved ser tilsætningen af Bradsted lerslam ud til at have samme stabiliserende effekt som kaolinen. Dog er der en markant forøgelse af flydemålet ved 10% vand, som ikke kunne registreres i blandingerne med kaolinen.

Flydespændingen som funktion af vandindholdet for recepten tilsat hhv. Bradsted lerslam og kaolin fremgår af figur 21.4. Som beskrevet er målingen af blandingen med 6% Bradsted lerslam udeladt, idet denne afviger væsentligt fra de resterende.

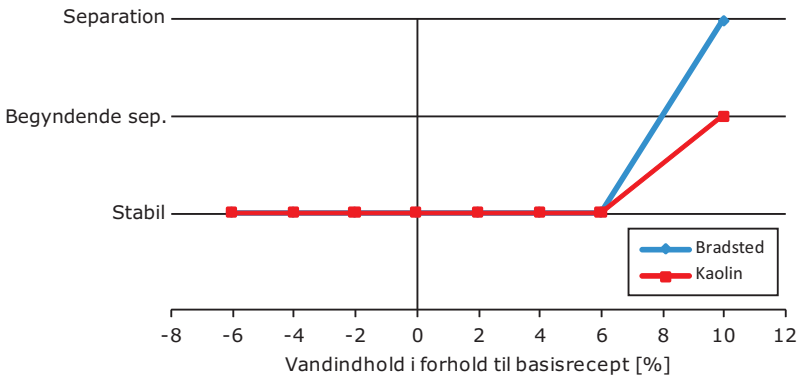


Figur 21.4: Flydespændingen som funktion af vandindholdet for recepten tilsat hhv. Bradsted lerslam og kaolin

Som det fremgår af figurene 21.4 og 21.3 er sammenhængen mellem flydemålet og flydespændingen ikke så markant for recepten tilsat Bradsted lerslam som for recepten tilsat kaolin. Således er sammenhængen, som tidligere beskrevet, mellem flydemålet og flydespændingen for recepten tilsat kaolin god. Betragtes flydemålet for recepten tilsat Bradsted lerslam, burde flydespændingen være forholdsvis ens for blandingen med 4% mindre vand og blandingen med 6% ekstra vand. Ligeledes burde flydespændingen være højere for blandingen med 6% mindre vand og lavere for blandingen med 10% ekstra vand. Dette er ikke tilfældet, men i forbindelsen med denne forsøgsserie har der været registreret store udsving ved benyttelsen af BML-viskometeret, jf. flydespændingen på 95Pa registreret ved 6% ekstra vand.

Af ovenstående kan det konstateres, at recepten tilsat Bradsted lerslam ikke er så følsom over for en variation i vandindholdet i intervallet mellem 6% mindre vand til 6% ekstra vand, som tilfældet er med recepten tilsat kaolin. Ved et øget vandindhold på 10% er der en indikation af, at recepten tilsat Bradsted lerslam har større tendens til separation. Dette begrundes med, at der i dette område er en markant forøgelse af flydemålet for recepten tilsat Bradsted lerslam i forhold til recepten tilsat kaolin.

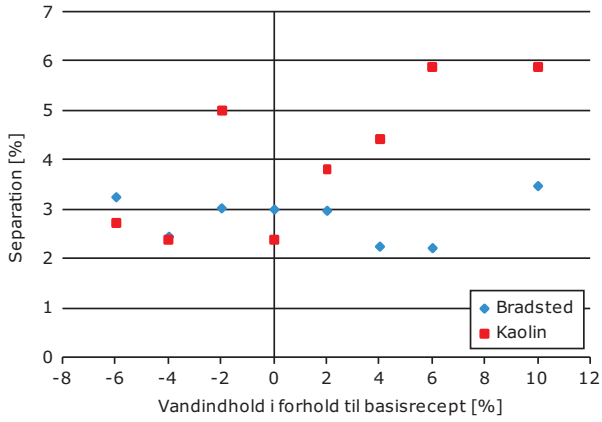
Den visuelle bedømmelse af den friske betons tendens til separation fremgår af figur 21.5.



Figur 21.5: Visuel bedømmelse af separation

Af figur 21.5 fremgår det, at den visuelle bedømmelse af separationen for hhv. Bradsted lerslam og kaolin er stort set identisk. Eneste forskel er, at der ved 10% ekstra vand ikke er en så kraftig separation ved kaolin, som tilfældet er ved Bradsted lerslam. Med udgangspunkt i flydemål og den visuelle separation må recepten tilsat Bradsted lerslam siges at være stabil overfor moderat variation i vandindhold.

Separationen målt ved Aalborg Portlands metode fremgår af figur 21.6.

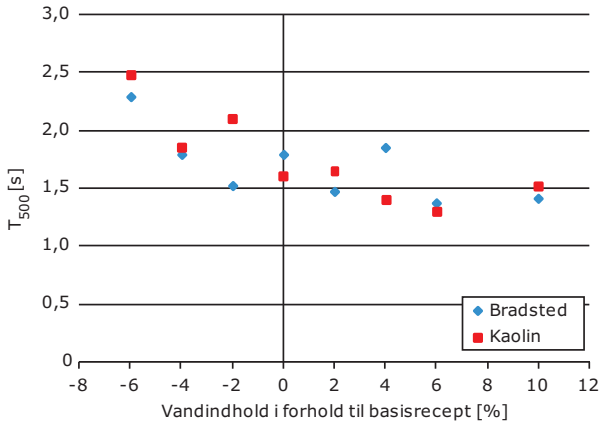


Figur 21.6: Separationen som funktion af vandindhold for recepten med hhv. 3% Bradsted lerslam og 3% kaolin

Den målte separation for recepten tilsat Bradsted lerslam stemmer godt overens med den visuelle bedømmelse af separationen. Således er separationen forholdsvis konstant, jf. figur 21.6. Dette var også hvad der kunne registeres visuelt,

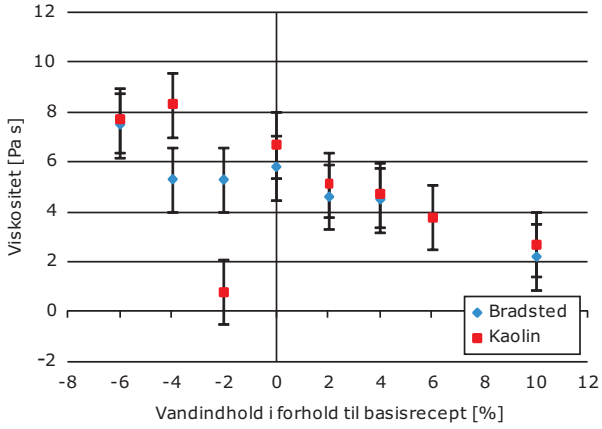
hvor der først var tegn på separation ved 10% ekstra vand.

Der er ikke den store forskel mellem recepterne tilsat hhv. Bradsted lerslam og kaolin, hvad angår følsomheden af flydemålet overfor øget vandindhold. Ligeledes er der ved separationen heller ikke registreret den store forskel. Af figur 21.7 fremgår det, at udbredelsestiden, T_{500}, forløber stort set identisk for de to recepter.



Figur 21.7: Udbredelsestiden, T_{500}, for recepten tilsat hhv. 3% Bradsted lerslam og 3% kaolin

Idet variationen i udbredelsestiden mellem de to recepter er minimal, kan denne tilskrives måleunøjagtigheder. I lighed med udbredelsestiden er der også god overensstemmelse i viskositeten mellem de to recepter, jf. figur 21.8.



Figur 21.8: Viskositeten som funktion af vandindholdet

21.3 Konklusion

Ved tilsætning af 3% Bradsted lerslam kan det konkluderes, at de parametre som definerer stabilitetskriteriet, ikke adskiller sig markant fra recepten tilsat 3% kaolin. Således kunne det konstateres, at der ved tilsætning af 3% Bradsted lerslam forekom en stagnation af flydemålet ved 4% mindre vand til 6% ekstra vand. Ved et ekstra vandindhold på 10% er der observeret en markant forøgelse af flydemålet. For tilsætning af 3% kaolin sker der en stagnation af flydemålet ved et øget vandindhold på 2% og over. Tendensen mellem de to recepter er således ens, idet der sker en stagnation af flydemålet. Hvornår denne stagnation indtræffer adskiller sig i de to recepter. Stagnationen indtræffer senere for recepten tilsat 3% kaolin.

Årsagen hertil kan være at indholdet af lermineraler i kaolinen fra Aalborg Portland er på 36%, mens indholdet af lermineraler i Bradsted lerslam er på 9%. Idet det tidligere er konkluderet, at vandet bindes i disse lerpartikler, vil den mængde vand, der bindes være større i kaolinen end i lerslammen. Herved vil mængden af „frit“ vand være mindre i recepten med kaolin, og derved vil pastaen være tykkere og flydespændingen stige.

Igennem forsøg blev det konstateret, at det var nødvendigt at øge pastaindholdet i forhold til basisrecepten fra 318l pr. m^3 til 330l pr. m^3 for at opnå det ønskede flydemål. Der skal således benyttes fem liter mere pasta i recepten tilsat 3% Bradsted lerslam i forhold til recepten tilsat 3% kaolin.

Betragtes stabilitetskriteriet i forhold til den visuelle separation, er der ikke den store forskel mellem de to recepter. Separationen indtræffer først ved 10% ekstra vand for begge recepter. For recepten indeholdende 3% Bradsted lerslam kunne der konstateres tydelig separation, mens der for recepten tilsat 3% kaolin blot kunne konstateres begyndende separation. Tendensen til separation stemmer godt overens med de observationer, der er gjort ved flydemålet. I henhold til flydemålet skulle risikoen for separation ved 10% ekstra vand være større for recepten tilsat 3% Bradsted lerslam, hvilket stemmer overens med bedømmelsen af den visuelle separation.

Ved vurdering af om Bradsted lerslam eller kaolin virker bedst til at stabilisere den friske beton, er der flere aspekter, der skal inddrages. Således vil tilsætningen af kaolin gøre betonen mere stabil overfor et ekstremt højt vandindhold (10%) i forhold til lerslammen fra Bradsted. Hvis derimod blandingerne har et vandindhold der varierer omkring basis, vil tilsætningen af kaolin forårsage, at

flydeegenskaberne ændres markant. Således vil flydemålet blive væsentligt mindre ved et mindre vandindhold end basis. Tilsætningen af lerslam fra Bradsted har ikke denne uheldige indflydelse på flydemålet ved et mindre vandindhold end basis. 4% mindre vand vil således ikke påvirke flydemålet betydeligt.

Kapitel 22

Kaolinits indflydelse på styrkeegenskaberne

Som beskrevet i afsnit 2.3, er det tidligere påvist, at tilsætningen af lermineralet kaolin ikke vil påvirke trykstyrken betydeligt. For at verificere dette, er der støbt cylindre, hvor trykstyrkeudviklingen er registreret. Ligeledes er det kontrolleret, at elasticitetskoefficienten ikke forringes væsentligt ved tilsætningen af lermineraler. Der er således støbt cylindre med basisbetonen samt en beton tilsat 5% kaolin. De 5% kaolin er valgt ud fra en vurdering, idet den optimale mængde ikke var undersøgt på daværende tidspunkt. I forsøgene beskrevet i kapitel 18 kunne det konstateres, at tilsætningen af lermineraler havde en kraftig virkning selv ved små doseringer. På baggrund af dette blev det ikke anset for nødvendigt med en tilsætning af lermineraler over 5%.

De reologiske egenskaber for de to blandinger fremgår af tabel 22.1.

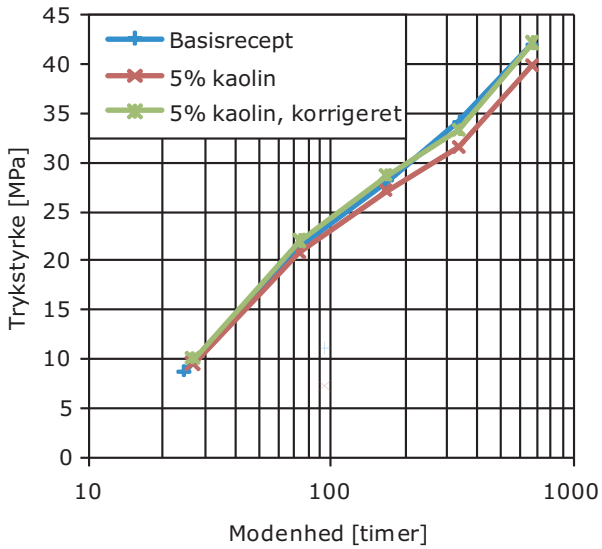
Recept	Flydemål [mm]	τ_0 [Pa]	η [Pa· s]	Separation [%]	T_{300} [s]	T_{500} [s]	Luftindhold [%]
Basis	575	48	9,8	1	0,35	0,95	1,2
5% kaolin	490	108	17,4	9	0,75	-	2,6

Tabel 22.1: De reologiske parametre for hhv. basisrecepten og recepten tilsat 5% kaolin

Som det fremgår af tabel 22.1 er luftindholdet af den friske beton ligeledes registreret, idet dette har indflydelse på trykstyrken, jf. kapitel 12.

22.1 Trykstyrke

Ved hver trykstyrkemåling er der prøvet tre cylindre. Ved optegning af trykstyrken som funktion af antal modenhedsdøgn er det middeltrykstyrken, der er anvendt. Trykstyrken og standardafvigelsen for de enkelte cylindre fremgår af appendiks F. For at tage højde for forskellen i luftindholdet registreret ved basisblandingen og blandingen med 5% kaolin, er der korrigeret for dette. En ændring i luftindholdet på 1%, medfører en ændring af trykstyrken på 4%. Trykstyrken normeres til et luftindhold på 1,2% for basisrecepten. Således skal trykstyrken for cylindrene tilsat kaolin øges i henhold til dette, idet luftindholdet ikke skal influere på trykstyrkemålingen. Af figur 22.1 fremgår trykstyrkeudviklingen som funktion af antal modenhedsdøgn.



Figur 22.1: Trykstyrkeudviklingen for hhv. basisrecepten, recepten med 5% kaolin samt den korrigerede styrkeudvikling

Som det fremgår af figur 22.1 forløber styrkeudviklingen ens for basisrecpten og den korrigerede styrkeudvilking for recepten tilsat 5% kaolin. Lermineralet kaolinit vil således ingen indflydelse have på styrkeudviklingen ved et vandcementtal på 0,6.

Ved bestemmelsen af trykstyrken, blev der foretaget en vurdering af brudmåden for hver cylinder. Alle cylindrene viste et tilfredsstillende brud. Den overvejende brudmåde var den karakteristiske "timeglasform". De resterende cylindre brød som den sidste brudfigur på figur 15.13.

22.2 Elasticitetskoefficient

Elasticitetskoefficienten måles efter 28 døgn og i lighed med trykstyrken benyttes tre cylindre. Elasticitetskoefficienterne for de individuelle cylindre findes i appendiks G. Elasticitetskoefficienten skal korrigeres for forskellen i luftindholdet mellem de to recepter, således at resultaterne er sammenlignelige. En ændring i luftindholdet på 1% medfører en ændring i elasticitetskoefficienten på 2%. Af tabel 22.2 fremgår de korrigerede middelværdier for elasticitetskoefficienten samt standardafvigelsen.

Recept	Elasticitetskoefficient [MPa]	Standardafvigelse [MPa]
Basisrecept	31211	548
5% kaolin	29164	667

Tabel 22.2: Middelværdien for elasticitetskoefficienten samt standardafvigelsen for hhv. basisrecepten og recepten med 5% kaolin

Som det fremgår af tabel 22.2, ligger middelværdierne forholdsvis tæt. Således er elasticitetskoefficienten på 31,GPa og 29,2GPa for hhv. basisrecepten og recepten med 5% kaolin. Dette giver en forskel på 7%. I henhold til formel 13.1 i kapitel 13 skal elasticitetskoefficienten for betonen tilsat kaolin være mindre, da volumenandelen af cementpastaen bliver større. Idet cementpastaens elasticitetskoefficient er mindre end tilslagets, vil en forøgelse af pastavolumenet ligeledes medføre en reducering af elasticitetskoefficienten.

Reduceringen af elasticitetskoefficienten ved tilsætningen af kaolin ligger indenfor et acceptabelt niveau, og vurderes ikke at være udslagsgivende for om en given beton kan anvendes. Derudover skal de usikkerheder, der vil være i forbindelse med disse forsøg, tages i betragtning. Idet der kun er målt elasticitetskoefficient på tre cylindre, er det statistiske grundlag for disse målinger beskedent. Én enkelt afvigende måling vil derfor have stor indflydelse på middelværdien.

22.3 Konklusion

Ved forsøg med tilsætning af 5% kaolin kan det konkluderes, at dette ikke har væsentlig indflydelse på trykstyrken såvel som elasticitetskoefficienten. Således har basisrecepten en 28 døgns trykstyrke på 42,0MPa, mens den korrigerede 28 døgns trykstyrke er på 42,1MPa for recepten tilsat 5% kaolin. Lermineralernes evne til at optage og binde vand, ser således ikke ud til at hindre hydratiseringsprocessen. Årsagen til dette kan være det høje vandcementtal, hvorved der vil være tilstrækkelig vand til at hydratiseringen vil forløbe 100%, selvom noget af vandet bindes i lermineralerne. I tilfælde af at vandet er bundet så hårdt til lermineralerne, at det ikke frigives ved hydratiseringen, kan det, ved lave vandcementforhold, tænkes at hydratiseringen ikke forløber 100%. Forløber hydratiseringen ikke 100% vil dette reducere styrken.

Elasticitetskoefficienten efter 28 døgn er på 31,2GPa og 29,2GPa for hhv. basisrecepten og recepten tilsat 5% kaolin. Dette svarer til en reducering på ca. 7%. I denne forbindelse skal det nævnes, at målingerne er forbundet med en vis usikkerhed, og at det statistiske grundlag er meget beskedent. For at dokumentere

effekten af lermineraler i beton på trykstyrken såvel som elasticitetskoefficienten er det valgt at benytte 5% kaolin. Efterfølgende forsøg har vist, at en tilsætning på 3% kaolin er tilstrækkelig til at stabilisere den undersøgte beton. Tilsætning af 3% kaolin fremfor 5% kaolin vil medføre en reduktion af pastavolumenet, hvorved det må forventes at variationen falder.

DEL V

I del V forefindes en opsamling på projektet. Indledningsvis er der konkluderet på de undersøgte problemstillinger. Herefter er der givet anbefalinger i henhold til de opnåede resultater. Sluttelig er der en erfaringsopsamling, hvori der er beskrevet de erfaringer, der er gjort i forbindelse med udarbejdelsen af denne rapport. Herunder vil der også være beskrevet, hvad der kunne gøres anderledes for at optimere processen.

KONKLUSION

23 Konklusion **187**
23.1 Stabilitet……. 187
23.2 Hærdnet beton…… 190

24 Anbefalinger **193**

25 Erfaringsopsamling **195**
25.1 Kornkurvebetragtninger……...……. 195
25.2 Forsøgsbasis…..……. ……. 196
25.3 Orientering af sætmålskegle…..…... …… 196
25.4 Udtagning af prøve…… 197
25.5 Måling af separation…….. 198

Kapitel 23

Konklusion

Projektet omhandler lermineraler som tilsætning til selvkompakterende beton (SCC). Formålet med tilsætningen af lermineraler er at øge stabiliteten af den friske beton. Der er gennem projektet arbejdet med en fabriksbeton i passiv miljøklasse med en karakteristisk trykstyrke på 25MPa. Udover at øge stabiliteten af den friske beton overfor variationer i delmaterialerne, er det ligeledes vigtigt, at de styrkemæssige egenskaber ikke forringes. Det er således undersøgt om tilsætningen af lermineraler påvirker trykstyrken og elasticitetskoefficienten.

Der er benytte to lerprodukter som tilsætningsstof. Det ene er en lerslam fra Bradsted grusgrav, som tilvejebringes gennem afvaskning af tilslagsmaterialer. Det andet er en kaolin leveret af Aalborg Portland, der bl.a. benyttes til fremstilling af keramik. Kaolinen fra Aalborg Portland indeholder 36% af lermineralet kaolinit. Lerslammet fra Bradsted indeholder 9% af lermineralet dickit. Den kemiske sammensætning for de to lermineraler er identisk. Forskellen mellem kaolinit og dickit består i opbygningen af gitterstrukturen.

I forbindelse med projektet er der formuleret et stabilitetskriterium. Ud fra dette er det vurderet om tilsætningen af lermineraler vil medføre en mere stabil beton. Således skal flydemålet være mindre følsomt overfor variationer i vandindholdet, ligesom risikoen for separation skal reduceres ved et øget vandindhold.

23.1 Stabilitet

Stabiliteten af den friske beton er vurderet ud fra de reologiske egenskaber. De reologiske egenskaber er registreret ved flydemålet og den dertil hørende udbredelsestid, ligesom der også er foretaget en visuel bedømmelse af separationen. Derudover er de reologiske parametre registreret ved anvendelse af et BML-viskometer. BML-viskometeret er i stand til direkte at bestemme flydespændingen, viskositeten samt separationen af den friske beton.

Beton er et kompositmateriale med stor kompleksitet. Dette medfører at der fra blanding til blanding kan opstå variationer i de reologiske egenskaber på

trods af, at der benyttes samme recept. For at vurdere den naturlige variation i de reologiske egenskaber, der kan forekomme fra blanding til blanding, er der lavet et forsøg med seks identiske blandinger. Ud fra dette forsøg kunne der observeres en minimal variation i flydemålet (4%) og udbredelsestiden (25%). Derimod kunne der ved anvendelse af BML-viskometeret registreres markante variationer af de reologiske egenskaber fra blanding til blanding (60%). Ligeledes kunne der ved BML-viskometeret registreres en markant risiko for separation, mens der ved den visuelle bedømmelse ikke kunne observeres separation.

Med udgangspunkt i forsøget for at dokumentere reproducerbarheden af betonen kan det konkluderes, at anvendelsen af BML-viskometeret til bestemmelse af de reologiske egenskaber er forbundet med store usikkerheder. Efterfølgende forsøg har underbygget dette, idet der kunne registreres reologiske parametre, der fysisk ikke har mening. Således er der ved visse forsøg målt en negativ viskositet og en negativ separation. Fra projektgruppens side er det derfor konkluderet, at de reologiske parametre registreret vha. BML-viskometeret skal tages med et vist forbehold. Det vurderes således, at flydemålet, udbredelsestiden samt den visuelle bedømmelse af separationen giver et mere retvisende billede af den friske betons bearbejdelighed.

Gennem en forsøgsserie hvor vandindholdet er varieret i forhold til udgangsrecepten er det konkluderet, at tilsætningen af 3% kaolin vil virke stabiliserende på den friske beton. Således skal der tilsættes 10% ekstra vand i forhold til udgangspunktet, før der kan registreres begyndende separation. Ved et mindre vandindhold i forhold til udgangspunktet falder flydemålet dog markant, hvilket således vil forringe den friske betons bearbejdelighed. Ved et øget vandindhold i forhold til udgangspunktet blev der registreret en stagnation i flydemålet.

Tilsætningen af 3% Bradsted lerslam viste sig på tilsvarende vis at øge stabiliteten. Således blev der først registreret separation ved et øget vandindhold på 10%. I modsætning til recepten tilsat kaolin viste flydemålet for recepten tilsat Bradsted lerslam sig ikke at være så følsom overfor variationer af vandindholdet. Således var der en tendens til stagnation af flydemålet mellem 4% mindre vand og 6% ekstra vand. Ved 10% ekstra vand steg flydemålet markant.

Bearbejdeligheden, udtrykt ved flydemålet, for recepten tilsat Bradsted lerslam er således bedre overfor variationer af vandindholdet i forhold til recepten tilsat kaolin. Dette skyldes, at indholdet af lermineraler er mindre i Bradsted lerslam end tilfældet er for kaolinen. Lermineralerne adsorberer vandmolekyler,

hvorved det „frie“ vand for recepten tilsat kaolin er mindre end for recepten tilsat Bradsted lerslam. Pastaen vil således blive tykkere og flydespændingen stige, udtrykt ved et faldende flydemål.

Tilsætningen af begge typer lermineraler har ligeledes vist, at viskositeten udtrykt ved udbredelsestiden, T_{500}, stagnerer ved et øget vandindhold i forhold til udgangspunktet.

Ved tilsætningen af lermineraler er det nødvendigt at øge pastavolumenet for at sikre samme bearbejdelighed som udgangsrecepten, dvs., en recept hvortil der ikke er tilsat lermineraler. Således er det nødvendigt at øge pastavolumenet fra 318l pr. m^3 til 325l pr. m^3 og 330l pr. m^3 for hhv. recepten tilsat kaolin og recepten tilsat Bradsted lerslam.

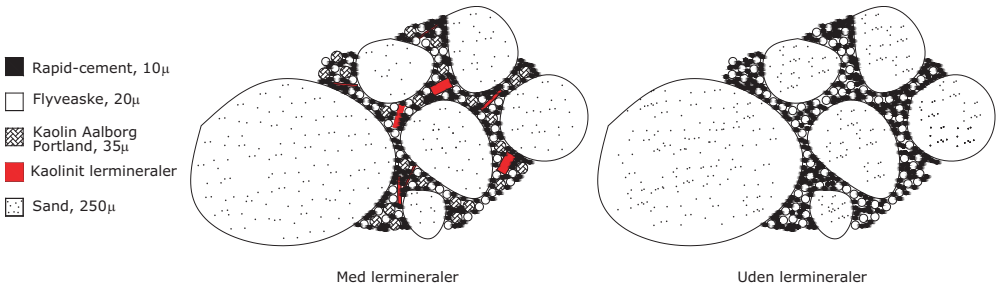
Ved karakteriseringen af de to lermineraler er det konkluderet, at kornkurverne for disse minder meget om kornkurven for den anvendte flyveaske. For at undersøge hvorvidt det var partikelstørrelsen, der bidrog til stabiliteten, blev der udført forsøg med tilsætning af ekstra flyveaske i stedet for lermineraler. Lermineralerne blev således erstattet med en tilsvarende mængde flyveaske. Tilsætningen af flyveaske viste, at betonen ikke blev mere stabil. Idet flyveasken ikke virker stabiliserende, kan det konkluderes, at det ikke er partikelstørrelsen, der virker stabiliserende, men derimod lermineralernes partikelform.

Efter at have konstateret, at tilsætningen af 3% kaolin og 3% lerslam har en stabiliserende effekt på den friske beton, er der fra projektgruppens side forsøgt at komme med et bud på, hvorfor det forholder sig således.

I forbindelse med tidligere forsøg er det konstateret, at mængden af finstof ($<250\mu$) har stor indflydelse på stabiliteten. Ved karakteriseringen af kaolinen og lerslammet er det fundet, at alle partiklerne ligger under finstofsgrænsen, jf. figur 6.17. Mængden af finstof i beton tilsat lermineraler øges således markant i forhold til betoner uden lermineraler.

Kendetegnende for lermineraler er, at disse har en pladeformet struktur, i modsætning til de øvrige komponenter, der alle er kugleformede. Det vil sige, at udstrækningen i to retninger er større end i den sidste retning. Lermineralerne besidder kohæsive egenskaber grundet van der Waals bindinger. I kraft af van der Waals bindingerne kan lermineralerne agglomereres til større partikler. Grundet lermineralernes pladeformede struktur kan det forestilles, at disse vil

være med til at „låse“ strukturen af cementpastaen. Herved vil betonens flydemål og tendens til separation ikke påvirkes betydeligt ved et øget vandindhold. Principskitse af hvorledes lermineralerne tænkes at „låse“ strukturen fremgår af figur 23.1. På figuren er der taget udgangspunkt i kaolinen, men lerslammet vil virke på tilsvarende vis.



Figur 23.1: Principsktise af strukturen i beton med og uden lermineraler

På figur 23.1 dækker betegnelsen: „Kaolin Aalborg Portland“ over de partikler i kaolinen som ikke er lermineraler, dvs. enten kvarts eller glimmer, som har en gennemsnitlig størrelse på 35μ. Kaolinit dækker over lermineralerne i kaolinen. Som beskrevet tidligere kan enhedscellerne for lermineraler agglomereres, hvorfor lerpartiklerne i figur 23.1 er tegnet i forskellige størrelser og former.

Som det fremgår af figur 23.1 vil strukturen for mørtlen indeholdende lermineraler være mere „låst“ pga. lermineralerne, hvorved den ikke vil være så flydende. I modsætning hertil er mørtlen uden lermineraler. Her vil alle komponenterne virke „smørende“ på tilslaget pga. de kugleformede partikler. Derudover vil strukturen for betoner tilsat lermineraler også være tættere pga. det større fillerindhold.

23.2 Hærdnet beton

Det primære formål med tilsætningen af lermineraler er at forbedre de reologiske egenskaber, herunder primært reducere risikoen for separation. Udover at forbedre de reologiske egenskaber er det ligeledes dokumenteret, at tilsætningen af lermineraler ikke påvirker trykstyrken og elasticitetskoefficienten væsentligt. Forsøgene er foretaget for en basisrecept og en recept tilsat 5% kaolin. Ved udstøbning af de to betoner kunne der konstateres forskel i luftindholdet. Dette blev der efterfølgende korrigeret for, således at resultaterne er sammenligneli-ge. Efter at trykstyrken er korrigeret, er det fundet, at 28 døgns styrken er på 42MPa og 42,1MPa for hhv. basisrecepten og recepten tilsat 5% kaolin.

For elasticitetskoefficienten er det konstateret, at tilsætningen af 5% kaolin medfører en reduktion fra 31,2GPa til 29,2GPa i forhold til basisrecepten. Det vurderes fra projektgruppens side, at denne reduktion af elasticitetskoefficienten ikke vil medføre begrænsninger for brugen af den hærdnede beton. Det er dokumenteret, at en tilsætning af 3% kaolin og Bradsted lerslam vil virke stabiliserende, hvorfor det må forventes, at variationen i elasticitetskoefficienten vil være mindre.

Kapitel 24
Anbefalinger

På baggrund af arbejdet udført i forbindelse med dette projekt anbefales det, at benytte lermineraler til stabilisering af den friske beton. Gennem forsøg er det dokumenteret, at lermineralerne dickit og kaolinit har en stabiliserende effekt på den friske beton.

Kaolinen fra Aalborg Portland indeholder 36% kaolinit, mens Bradsted lerslam inderholder 9% dickit. Denne forholdsvis store forskel i lerindholdet resulterer i, at kaolin adsorberer mere vand end Bradsted lerslam. Dette bevirker, at for blandinger med et forholdsvis lavt ekstra vandindhold, vil kaolinen have en uheldig indflydelse på blandingens bearbejdelighed i form af et lavt flydemål. Bradsted lerslam vil ikke reagere så kraftigt, grundet det lave lerindhold.

Betonproducenternes problem med hensyn til instabilitet af den friske beton skyldes, at vandindholdet i tilslaget kan variere meget fra blanding til blanding. Varierer blandingernes vandindhold fra 5% mindre vand til 5% ekstra vand, anbefales det, at benytte Bradsted lerslam fremfor kaolin. Årsagen til valget er, at Bradsted lerslam ikke reagere voldsomt ved for lav vandmængde, samt at det er dokumenteret, at lerslammet skaber en stabil betonblanding med 5% ekstra vand . Tilsættes kaolin istedet, vil dette have en uheldig indvirkning på betonblandingens flydeegenskaber ved 5% mindre vand, grundet kaolinens store optagelse af vand.

Kapitel 25

Erfaringsopsamling

I dette kapitel er der samlet op på de erfaringer, der er gjort i forbindelse med projektet. Erfaringerne er projektgruppens egne, der overvejende er tilvejebragt gennem forsøg i betonlaboratoriet.

25.1 Kornkurvebetragtninger

Det anvendte sand til blandingerne varierer i partikelstørrelse fra 0 til 2mm. På baggrund af dette blev der stillet spørgsmålstegn ved, om dette forhold kunne være en medvirkende faktor til de oplevede variationer i flydemål med samme recept, jf. kapitel 17. På trods af, at sandet virker homogent, er det muligt, at andelen af finstof kan variere betydeligt fra blanding til blanding. Det blev således besluttet at sammensætte kornkurven af nogle mere veldefinerede fraktioner. I forlængelse af dette blev det besluttet at sammensætte disse fraktioner til en kornkurve optimeret til anvendelse med SCC. Den ønskede kornkurve er beskrevet i faglitteraturen [Thrysøe et al., 2004] og figurerer i kapitel 16. De anvendte fraktioner er opstillet i tabel 25.1

Intern betegnelse	Partikelstørrelse [mm]
Grov	1-4
Halvfin	0,25-1
Fin	0,25-0,50
Kvarts	0,125-0,25

Tabel 25.1: Anvendte fraktioner ved tilstræbt kornkurve

Efterfølgende kunne det konstateres, at den tilstræbte kornkurve godt kunne sammensættes af de fire anvendte fraktioner, indtil partikelstørrelsen faldt under grænsen for finstof ved 250μ. Under finstofsgrænsen var der en væsentligt afvigelse fra, hvad der kunne skabes, og hvad der var tilstræbt, jf. figur 16.3. Ved 150μ var gennemfaldet omkring 1% for kornkurven sammensat af de fire fraktioner, mens den tilstræbte her havde et gennemfald på omkring 4%. Den anvendte 0-2mm sand havde her et gennemfald på omkring 5%.

På trods af, at den ønskede kornkurve ikke kunne genskabes fuldstændig, blev der foretaget forsøg til at fastslå, om dette ville influere på den friske betons egenskaber. Under disse forsøg, hvor 0-2mm sand blev erstattet med sand efter den sammensatte kornkurve, kunne det konstateres, at betonen blev ustabil. Betonen med den sammensatte kornkurve separerede allerede inden der blev

foretaget justeringer af vandindholdet. Denne separation var karakteriseret ved, at både fænomenet „vandig midte“ samt separation af pastaen fra tilslaget langs kanten af flydemålet var tilstede.

Det kan således konstateres, at ved tilpasning af to kornkurver til hinanden, er det overensstemmelsen af den nederste del (finstof) der er vigtigst. Yderligere kan det konkluderes, at indholdet af finstof i tilslaget er afgørende for betonens stabilitet.

25.2 Forsøgsbasis

På et tidligt stadie i projektet blev det vurderet, at de mange forsøg i betonlaboratoriet ville medføre et kraftigt materialeforbrug. Derfor blev der undersøgt muligheden for at foretage nogle af forsøgene på basis af mørtel i stedet for beton. Hypotesen var, at kunne der skabes en stabil mørtel, ville den dertilsvarende beton ligeledes være stabil. I henhold til stabilitetskriteriet, jf. kapitel 10, skal både flydemålet samt tendensen til separation undersøges. I projektet blev separationen primært bestemt ud fra visuel bedømmelse under registrering af flydemålet. I denne forbindelse viste det sig, at det var uhyre svært at vurdere separationen af en given mørtel. Anvendes beton er det som regel ligetil at vurdere om der opstår separation ved enten at betragte fænomenet „vandig midte“ eller ved at undersøge, om pastaen skilles fra stenene og derved „løber“ længere ud.

Ved en mørtel ligger tilslagets partikelstørrelser indenfor et mindre interval end betonens, hvorved disse fænomener bliver svære at se. Det er således ikke muligt at vurdere, om der opstår separation langs yderkanten af flydemålet. Fænomenet „vandig midte“ kan ikke anvendes til at bedømme separationen af en mørtel, idet dette var tilstede ved samtlige af de producerede mørtler indenfor de anvendte variationer i vandindholdet.

På baggrund af denne erfaring anbefales det at anvende beton fremfor mørtel, hvis stabiliteten ønskes vurderet ud fra kriterierne opstillet i kapitel 10.

25.3 Orientering af sætmålskegle

I nærværende projekt er registreringen af flydemålet sket i henhold til gældende normsæt, jf. [DS2426, Anneks U, 2004]. Heri er beskrevet, at sætmålskeglen skal placeres med den mindste diameter nederst. Yderligere skal sætmålskeglen løftes lodret senest 30 sek. efter fyldning og det skal sikres, at betonen strømmer kontinuert, og at selve løftet varer mellem 3-6 sek. Disse krav sammenholdt

med, at der skal tages hensyn til, at processen skal optages på videokamera, medfører at løftet er særdeles operatørafhængigt. Denne påstand underbygges af udbredelseskurverne, hvor operatørafhængigheden kan ses af udbredelsestiderne.

Løftes den omvendte sætmålskegle ikke fuldstændigt lodret, vil dette medføre et asymmetrisk flydemål, idet sætmålskeglens sider hindrer betonen i at flyde frit. Dette betyder mindre ved anvendelse af en retvendt sætmålskegle, idet siderne på denne ikke hindrer betonens udbredelse.

På baggrund af disse erfaringer, anbefales det at anvende en retvendt sætmålskegle ved lignende forsøg. Til forsøg hvor normsættet skal følges, er en ændring af forsøgsopstillingen nødvendig. Hertil forslås, at der anvendes en glasplade som underlag, således at flydemålet kan optages med et kamera placeret under glaspladen, istedet for på et stativ over pladen. På denne måde er det muligt at stå ret over pladens centrum og dermed bedre mulighed for at løfte sætmålskeglen lodret.

25.4 Udtagning af prøve

Da den første prøve af lerslam blev udtaget i Bradsted grusgrav, blev den taget fra en tank med forbindelse til slambassinet, der ses på figur 25.1. Denne prøve skulle primært anvendes til analyse og var derfor kun på omkring 5 liter. I tilfælde af at indholdet af lermineraler i prøven var acceptabelt, skulle der udtages en større prøve på lokaliteten. Ved analysen kunne det bl.a. konstateres, at prøven havde et lavt indhold af lermineraler og et lavt faststofindhold og det blev derfor diskuteret om det var muligt at øge faststofandelen. Dette var af hensyn til de mængder af lerslam, der skulle hentes fra Bradsted grusgrav.

Figur 25.1: Slambassin

Figur 25.2: Bundfældningsbassin

I Bradsted grusgrav findes også et bundfældningsbassin, hvor lerslammet fra slambassinet ledes over i. I dette bassin bundfældes faststoffet i lerslammet. Bundfældningsbassinet ses på figur 25.2.

Da der skulle hentes lerslam fra Bradsted grusgrav, skulle det samtidigt sikres, at der var nok til samtlige af de forestående forsøg. Det blev derfor besluttet at udtage prøven fra bundfældningsbassinet, således at faststofindholdet kunne øges, og de nødvendige mængder reduceres. Der blev derfor udtaget en prøve fra bundfældningsbassinet, og denne blev taget tæt ved udløbet. Det blev således antaget, at sammensætningen af slammet i bundfældningsbassinet var identisk med slammet i slambassinet, blot med et lavere vandindhold.

Denne antagelse viste sig dog ikke at være korrekt da prøven fra bundfældningsbassinet blev analyseret. Det viste sig, at denne prøve var langt grovere i fraktionen end den første prøve fra slambassinet, samt at indholdet af lermineraler var på 0,02%. Den første prøve havde et indhold af lermineraler på 9%. Idet projektet skulle undersøge indflydelsen af lermineraler på beton, måtte prøven fra bundfældningsbassinet kasseres.

Efterfølgende blev det forsøgt at finde en forklaring på denne forskel i prøverne. Forklaringen der lød mest fornuftig, var at prøven var udtaget for tæt på udløbet. Herved kunne det forventes, at de tungeste partikler i lerslammet ville aflejres tættest på udløbet og de lettere partikler transporteres længere.

25.5 Måling af separation

I forbindelse med måling af separation blev der i projektet anvendt tre forskellige metoder. Disse er:

- Måling af separation med BML-viskometer
- Måling af separation med Aalborg Portlands metode
- Visuel bedømmelse af separationen

Målingen af separationen med BML-viskometeret blev ikke anvendt til bestemmelse, af om en given blanding overholdt stabilitetskriterierne. Årsagen til dette var, at BML-viskometeret demonstrerede meget inkonsistente resultater gennem hele projektet. Det gjalt ikke blot separationen, men også målingen af de reologiske parametre. Der var adskillige eksempler på, at BML-viskometeret registrerede kraftig separation ved en blanding, der tydeligvis ikke separerede og hvor store sten var fremtrædende i overfladen. Derudover kan nævnes, at

BML-viskometeret registrerede lille separation i blandinger med et højt vandindhold og stor separation i blandinger med et lavt vandindhold, jf. kapitel 19.

I projektet blev BML-viskometeret programmeret i overensstemmelse med de indstillinger, der var blevet anvendt i en tidligere undersøgelse, jf. kapitel 15. Disse indstillinger gav en forbedring i forhold til de oprindelige indstillinger, men de ovennævnte problemer vedblev at være tilstede. Der var ingen hjælp at hente i BML-viskometerets tilhørende manual, der intet nævner omkring indstillingen af apparaturet. Det er muligt, at en korrekt indstilling af BML-viskometeret vil gøre det istand til at levere brugbare resultater ved måling på SCC.

Udover at anvende BML-viskometeret, blev separationen målt ved en metode udviklet af Aalborg Portland. Ved denne metode skulle der udstøbes prøvelegemer fra de producerede blandinger. Efter hærdning overskæres prøvelegemerne, og separationen måles som gennemsnittet af de ti øverste stens afstand til prøvelegemets top. Ved de første forsøg var der tvivl omkring, hvorledes støbeformene skulle orienteres under hærdning. Således foregik hærdningen af de første prøvelegemer liggende. Projektgruppen blev senere opmærksom på, at det var mere hensigtsmæssigt at lade prøvelegemerne hærdne stående. Dette medførte, at der gennem de resterende forsøg blev udstøbt prøvelegemer, hvor det ene hærdnedes stående og det andet liggende. Dette blev gjort således, at de første forsøgsresultater stadig kunne bruges som sammenligningsgrundlag.

Ved denne metode vil der konstateres separation ved alle prøvelegemer, men graden vil naturligvis variere. Igennem projektet er der ved denne metode registreret separation fra 1,5-7,5%. Der kunne ikke på noget tidspunkt konstateres nogen entydig sammenhæng mellem vandindhold i betonen og separation ved anvendelse af denne metode. Derimod kunne der observeres nogle af de samme problemer som ved BML-viskometeret. Resultaterne varierer uanset om prøvelegemerne orienteres stående eller liggende under hærdning. På trods af, at der ved denne metode er stor variation i måleresultaterne, har det vist sig, at tendensen som regel er som forventet. Indlægges bedste rette linie, gennem målepunkterne, findes øget separation med stigende vandindhold, jf. kapitel 19. På baggrund af den store variation af resultaterne kan denne metode ikke anbefales til måling på individuelle blandinger, her forstås målinger der står alene.

Projektgruppen blev opmærksom på, at der var faktorer som metoden ikke tager hensyn til. Eksempelvis tager metoden ikke hensyn til størrelsesforde-

lingen af de ti øverste partikler, der anvendes i målingen. I kapitel 19 er der vist to overskårne prøvelegemer, hvor Aalborg Portlands metode giver samme separation, på trods af at der er tydelig forskel i størrelsen af de ti øverste partikler. Det er muligt, at metoden kunne gøres mere konsistent, hvis hensynet til dette inkorporeres. Yderligere blev projektgruppen gjort opmærksom på, at en let vibrering af støbeformene efter påfyldning muligvis ville forbedre nøjagtigheden af målingerne, hvilket dog ikke er efterprøvet.

Sidste metode til måling af separationen er en subjektiv visuel bedømmelse af den friske beton. Denne metode blev udviklet af projektgruppen. Metoden bygger på at betonens tilstand inddeles i tre kategorier:

- Separation
- Begyndende separation
- Stabil

Vurderingen af betonens tilstand i henhold til de tre kategorier foretages, efter målingen af flydemål er udført. Den pågældende blanding vurderes at være præget af separation, når blot ét af to fænomener er til stede. Det ene fænomen betegnes „vandig midte“ og dækker over ophobning af pasta i flydemålets midte, hvor det er tydeligt, at stenene er sunket til bunds. Det andet fænomen er når pastaen skilles fra tilslaget langs flydemålets yderkant. Herved forstås, at pastaen flyder længere end tilslaget.

På trods af at metoden er subjektiv har denne vist sig at give gode og forventelige resultater. Sammenlignes resultaterne fra alle de forsøg der er foretaget, er det denne metode, der giver den bedste indikation af, om en given recept er stabil i forhold til stabilitetskriteriet opstillet i kapitel 10. På baggrund af dette, er det denne metode til måling af separation, der er tillagt størst betydning i projektet.

I del VI er datablade for de anvendte delmaterialer. Ligeledes er der gengivet forsøgsresultater, samt de relevante betondata. Forsøg med mætning af kaolinen ligger sidst i appendiks.

DEL VI

APPENDIKS

A Delmaterialer **203**
A.1 0-2mm sand …… 203
A.2 5-8mm sten …… 204
A.3 8-16mm sten …… 205
A.4 Flyveaske, type B4…… 206
A.5 Rapid Cement…… 207
A.6 SPT - Glenium Sky 531…… 208

B Udbredelseskurver **211**
B.1 Reproducerbarhed…… 211
B.2 Bestemmelse af lermængde…… 212
B.3 Basisrecept…… 213
B.4 1% kaolin…… 214
B.5 3% kaolin…… 215
B.6 3% Bradsted lerslam…… 216
B.7 Flyveaske…… 217
B.8 Støbning…… 218

C Støbningsdata **219**

D Mørtelforsøg **221**
D.1 Recepter…… 221
D.2 Forsøgsprocedure…… 222

E Statistisk grundlag **225**

F Trykstyrke **227**
F.1 Basisrecept …… 227
F.2 Recept tilsat 5% ler…… 228

G Elasticitetskoefficient **231**
G.1 Basisrecept …… 231
G.2 Recept tilsat 5% ler…… 232

H Mætningsforsøg med kaolin **233**

Appendiks A

Delmaterialer

I dette bilag er anført datablade for de delmaterialer der er benyttet i projektet.

A.1 0-2mm sand

Kroghs A/S
Klim Strandvej 284, 9690 Fjerritslev, Tlf. 98 22 52 00
Telefax 98 22 57 37, Reg. Nr. 37452, CVR nr. 4557 1513
E-mail: kroghs@kroghs-as.dk

Dancert

Varedeklaration/Overensstemmelseserklæring

Gyldig fra: 21-01-2009 Erstatter deklaration fra: 22-10-2008

CE

1073

EN 12620 betontilslag

0/2 Sand kl. A, 18/28

Varenr. 19004

Kroghs A/S Klim Strandvej 284 9690 Fjerritslev 09 1073-CPD-G005-07			Produktionssted: **Bradsted** Bavnehøjvej 2 9541 Suldrup
Standard	Egenskab	Kategori	Deklareret værdi
EN 933-1	Kornstørrelse (tørsigtning)	d/D: 0/2 G_F: 85	Gennemfald Maskevidde: 4 mm / 2 mm / 1 mm / 0,5 mm / 0,25 mm / 0,125 mm / 0,063 mm Typisk: 100% / 98% / 86% / 63% / 23% / 4% / 0,5% Min.: 100% / 90% / 80% / 55% / 18% / 0% Max.: 100% / 99% / 95% / 75% / 28% / 10% / 3,0%
	Fillerkvalitet/renhed	f_3	
EN 1097-6	Korndensitet Vandabsorption	% VA	Typisk: 2,63 Mg/m³ / 0,3% Min.: 2,61 Mg/m³ / 0,2% Max.: 2,65 Mg/m³ / 0,6%
Teststrips og beregning	Cloridindhold Ækvivalent alkaliindhold*	% Cl % Na_2O ækv.	Typisk: 0,003% / 0,003% Max.: 0,003% / 0,003%
EN 1744-1	Syreopløselige sufater	AS_{lk}	Ikke relevant da tilslaget tidligere har været anvendt i beton i miljøklasse A i DK.(JF. DS 2426 tabel 2426-3)
EN 1744-1	Totalt svovl	% S	
EN 1367-4	Volumen stabilitet	% VS	
TI-B 52	Alkalikisel-reaktivitet Indhold af reaktive korn-Petrografi	Klasse A (DS 2426)	Typisk: 0,5% Max.: 2,0%
EN 1744-1 Afs. 15.1	Humus Organisk materiale		Lysere end standardfarven

* beregnet jf. note 3 til DS 2426 tabel 2426-3

Produktet overholder krav angivet i DS/EN 12620:2004 Anneks NB og DS 2426:2004 pkt.5.2.3

Underskrift
Lars Andersen
FPC-ansvarlig

A.2 5-8mm sten

CE 07 1537			Freiwillige Güteüberwachung Dr. Moll bup	Certified by PST Cert. No. 1537–3048–10a–BPR–08.12.2008	
Deklarert fra/Declaration from: 20.01.2009			Erstatter deklarasjon fra/ Replaces declaration from : 08.01.2009		
Produsent / Producer: Rekefjord Stone AS, Rekefjord, NO-4380 Hauge i Dalane, Office:+47 51 47 60 50, Fax: +47 51 47 70 20 **1537 – 3048 – 10a / BPR / 12.2008**			Produksjonssted/Production place: **RSA Rekefjord Stone AS N – 4380 Hauge I Dalane Rekefjord - West**		
			Type/Type: Knust og sortert anorthosit/ chrushed and sorted anorthosit Product name: **Ansit**		
DS-EN 12620 Tilsagsmaterrialer til betong / aggregates for concrete NS-EN 12620 Tilslag for betong / aggregates for concrete DS 2426 Regler for anv. af EN 206-1 i Danmark			Størrelse / Size: **5 – 8 mm** Materialeklasse: E		
Standard no:	Egenskap/ characteristic	Kategori/ Category	Sikte verdi Sieve size value	Forventa expected	Variasjonsband variation limit
EN 933-1	Kornstørrelse / Grain Size	G_C 85/20	16,0 mm	100	100
			11,2 mm	100	100
			8 mm	91	86 - 96
			5,6 mm	12	7 - 17
			4 mm	5	0 - 10
			2 mm	0,6	0 - 3
			0,25 mm	0,4	0 – 1
			0,063 mm	0,3	0 – 1
EN 933-1	Finstoff innhold / Fines content		$F_{1,5}$	0,3	0 - 1
EN 933-3	Flislighetsindeks / Flakiness index		FI_{20}	19	≤ 20
EN 933-4	Formindeks / Particel shape		SI_{20}	19	≤ 20
EN 933-5	Knuste korn Crushed and broken surface		$C_{100/0}$	100	100
EN 1097-6	Vannabsorption / Water absorption		(% WA)	0,2	0,0 - 0,4
EN 1097-6	Korndesitet / Grain density saturated-surface dry		(Mg/m³)	2,73	2,71 – 2,75
EN 1367-1	Motstand mot frysning og tinig / Resistance to freezing and thawing		F_1	0,1	≤ 1
EN 1744-1 Pkt 7	Kloridinnhold / Chloride content		%	< 0,001	≤ 0,001
EN 1744-1 Pkt11	Innhold av svovel / Sulphur Content		%	< 0,080	≤ 1
EN 1744-1 Pkt 12	Inhold av syrelig sulfat / Acid soluble sulfate content		$AS_{0,2}$	< 0,070	≤ 0,2
ASTM-C-1260	Alkali silika-reaktivitet / Alkali-silica reactivity		%	0,02	≤ 0,1
Beregnet/ Calculated	Ekvivalent alkali innhold / Equivalent alkali content		%	0,00087	< 0,00087
DS 405.4	innhold / content < 2500 kg/m³		%	0	0
Bergarter/ Petrography	Innhold av Klippemateriale/ Content of Rockmaterial		%	100	100

Samsvarserklæring: RSA Rekefjord Stone AS, erkærer herved, at overnevnte materiale er prøvet og oppfyller krav i overensstemmelse med DS 2426 og EN 12620 Tilslagsmaterialer til betong.
Declaration of conforminty: RSA Rekefjord Stone AS, hereby declares that the above material has been tested and meets the requirements of DS 2426 og EN 12620 Aggregates for concrete.

Rahel Hertig, RSA Rekefjord Stone AS

A.3 8-16mm sten

Kroghs A/S
Klim Strandvej 284, 9690 Fjerritslev, Tlf. 98 22 52 00
Telefax 98 22 57 37, Reg. Nr. 37452, CVR nr. 4557 1513
E-mail: kroghs@kroghs-as.dk

Dancert

Varedeklaration/Overensstemmelseserklæring

Gyldig fra: 21-01-2009 Erstatter deklaration fra: 14-01-2008

CE
1073

EN 12620 betontilslag

8/16 kl. M

Varenr. 19245

Kroghs A/S
Klim Strandvej 284
9690 Fjerritslev
09
1073-CPD-G005-07

Produktionssted:
Bradsted
Bavnehøjvej 2
9541 Suldrup

Standard	Egenskab	Kategori	Deklareret værdi			
EN 933-1	Kornstørrelse (tørsigtning)	d/D: 8/16 G_c: 85/20	Gennemfald Maskevidde	Typisk	Min.	Max.
			32 mm	100%	100%	
			22 mm	100%	98%	100%
			16 mm	88%	85%	99%
			8 mm	8%	0%	20%
			4 mm	1%		5%
	Fillerkvalitet/renhed	$f_{1,5}$	0,063 mm	0,2%		1,5%
EN 1097-6			Typisk	Min.		Max.
	Korndensitet		2,59 Mg/m^3	2,57 Mg/m^3		2,63 Mg/m^3
	Vandabsorption	% VA	1,3%	0,9%		1,7%
Teststrips og beregning	Cloridindhold	% Cl	Typisk 0,003%		Max. 0,003%	
	Ækvivalent alkaliindhold*	% NaO_2 ækv.	0,002%		0,003%	
EN 1744-1	Syreopløselige sufater	AS_{IK}	Ikke relevant da tilslaget tidligere har været anvendt i beton i miljøklasse M i DK.(JF. DS 2426 tabel 2426-3)			
EN 1744-1	Totalt svovl	% S				
EN 1367-4	Volumen stabilitet	% VS				
DS 405.4	Frostbestandighed Lette korn < 2400 kg/m^3	Klasse M (DS 2426)	Typisk 3,1%		Max. 5,0%	
TI-B 75	Alkalikisel-reaktivitet Kritisk absorption	Klasse M (DS 2426)	Typisk 1,6%		Max. 2,5%	

* beregnet jf. note 3 til DS 2426 tabel 2426-3

Produktet overholder krav angivet i DS/EN 12620:2004 Anneks NB og DS 2426:2004 pkt.5.2.3

Underskrift
Lars Andersen
FPC-ansvarlig

A.4 Flyveaske, type B4

Emineral a/s

Deklaration for flyveaske til betonformål

Produktbetegnelse:	**Flyveaske, Type B4**
Leverandør:	*E*mineral a/s, Nefovej 50, 9310 Vodskov
Gyldig fra:	2008-01-04 (revision 9)

Dancert har med EC certifikat 1073-CPD-B078A/Id certificeret overensstemmelse med kravene i DS/EN 450-1:2005, for flyveaske kategori A, og med certifikat nr B078 certificeret overensstemmelse med Eminerals deklarerede maksimale indhold af restkulstof* og chlorid*.

Flyveasken er tildelt overensstemmelsesmærket: **B078/B4** - Id er produktionsstedets identifikation:

AMV: Vattenfall A/S, Amagerværket, blok 3; **AVV**: Dong Energy A/S, Avedøreværket, blok 1; **ASV**: Dong Energy A/S, Asnæsværket, blok 2 & blok 5;
ELK: Dong Energy A/S, Emineral Lager Korsør; **FYV**: Vattenfall A/S, Fynsværket, blok 7 & blok 3;
ENV: Dong Energy A/S, Enstedværket, blok 3; **ESV**: Dong Energy A/S, Esbjergværket, blok 3; **SSV**: Dong Energy A/S, Studstrupværket, blok 3 & blok 4;
Vattenfall A/S, Nordjyllandsværket; blok 2 & blok 3; **ELF**: Dong Energy A/S, Emineral Lager Fredericia;
ELA: Vattenfall A/S, Emineral Lager Aalborg;

Certificeringens gyldighed kan verificeres på Dancerts hjemmeside www.dancert.dk
Gældende varedeklaration kan downloades fra www.emineral.dk

Egenskab		Metode	Krav i henhold til DS/EN 450-1:2005	Emineral har for Type B4 supplerende deklareret
Glødetab / Restkulstof (Kategori A) (1)		EN 196-2	≥ 0,0 - ≤ 5,0 (7,0)	≤ 4,0 (4,0) *
Chlorid (Cl^-)		EN 196-2	≤ 0,10 (0,10)	≤ 0,02 (0,02) *
Svovlsyre anhydrid (SO_3)		EN 196-2	≤ 3,0 (3,5)	
Fri calciumoxid (Fri CaO)		EN 451-1	≤ 1,0 / < 2,5 (2,6)	
Reaktiv calciumoxid (Reakt CaO)		EN 197-1, 3,1	≤ 10,0 (11,0)	
Finhed + 0,045 mm (Kategori N)		EN 451-2	≤ 40 (45)	
- variation			Dekl.værdi ± 10 % (± 15) % -point	(4)
Aktivitetsindeks	28 døgn	EN 196-1	≥ 75 (70) %	
	90 døgn		≥ 85 (80) %	
Volumenbestandighed (hvis krævet) (2)		EN 196-3	≤ 10 (10,0) mm	
Partikel densitet		EN 196-6	Dekl.værdi ± 200 (± 225) kg/m^3	2300 kg/m^3
Reaktivt silicium dioxid (Reakt SiO_2) (4)		EN 197-1, 3,2	≥ 25 (22)	
Sum SiO_2 / Al_2O_3 / Fe_2O_3 (4) (5)		EN 196-2 (6)	≥70 (65)	
Total alkali ($Na_2O_{ækv}$) (4) (5)		EN 196-2	≤ 5,0 (5,5)	
Magnesium oxide (MgO) (5)		EN 196-2	≤4,0 (4,5)	
Opløseligt fosfat (P_2O_5) (5)		Annex C (7)	≤ 100 (110) mg/kg	
Afbindingstid (5)		EN 196-3	+ 120 (+ 140) min	

Noter:
Ubenævnte værdier er i masseprocent.
Kravværdier er statistiske værdier; grænseværdi for enkeltværdier er angivet i parentes.
(1) Emineral bestemmer restkulstof i stedet for glødetab, med anvendelse af LECO- eller ELTRA-udstyr.
Glødetab/restkulstof for kategori A er mellem 0,0 masse- % og 5,0 masse- %,
med en grænseværdi for enkeltværdier på 7,0 masse- %
Ved leverancer fra ELK og ELF er det oplyste restkulstofindhold et beregnet gennemsnit af siloens indhold min og maks. værdier oplyses ved henvendelse til Emineral
(2) Volumenbestandighed bestemmes kun når indholdet af fri CaO er mellem 1,0 og 2,5 % -point.
(3) Middelværdien målt over en given periode.
(4) Værdier for disse egenskaber oplyses på forlangende.
(5) Disse egenskaber kræves kun bestemt for flyveaske fremstillet ved samforbrænding iht. DS/EN 450-1.
(6) Prøvningsmetoden er modificeret som angivet i DS/EN 450-1, pkt. 5.2.1.
(7) Annex C i DS/EN 450-1.

CE
1073
1073–CPD–B078A/id
EN 450-1
Flyveaske til betonformål
Finhed kategori: N – Se deklaration
Glødetab kategori: A
Partikeldensitet: Se deklaration
Farligt indhold: Ingen, DK

A.5 Rapid Cement

aalborgportland
CEMENTIR HOLDING

DEKLARATION - Oktober 2008 *erstatter maj 2007*
Gældende deklaration kan downloades fra www.aalborgportland.dk

RAPID®

BVC har, som notificeret organ, certificeret overensstemmelse med kravene i den harmoniserede standard DS/EN 197-1:2001 samt med det af Aalborg Portland deklarerede maksimale indhold af chlorid, og dermed givet adkomst til CE-mærkning. BVC har endvidere certificeret overensstemmelse med klassifikationskravene i DS/INF 135:2005.

CE
1035

Aalborg Portland A/S
Rørdalsvej 44
DK 9100 Aalborg
Danmark

1035-CPD-700541

EN 197-1
CEM I 52,5 N

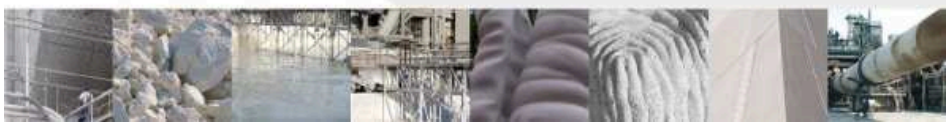
Chloridindhold højst
0,03 masse-%

RAPID® cement
Portlandcement CEM I 52,5 N (MS/LA/≤ 2)
Certifikat: 1035-CPD-700541

Aalborg Portland er desuden systemcertificeret efter DS/EN ISO 9001:2000 serien hos BVC. Certificeringens gyldighed kan verificeres på: www.BVQI.dk.

Denne deklaration omfatter de egenskaber, hvortil der stilles krav i den harmoniserede cementstandard DS/EN 197-1 samt i DS/INF 135 suppleret med 1-døgnsstyrke, 7-døgnsstyrke og absolut densitet. For hver egenskab er angivet et variations-område, som er fastlagt således, at sandsynligheden for, at en værdi falder udenfor, er mindre end 5 %.

Egenskaber	Deklarerede værdier	Krav i DS/EN 197-1/ DS/INF 135
1-døgnsstyrke	17 - 23 MPa	Ingen
2-døgnsstyrke	29 - 37 MPa	≥ 20 MPa
7-døgnsstyrke	47 - 55 MPa	Ingen
28-døgnsstyrke	63 - 71 MPa	≥ 52,5 MPa
Begyndende afbinding	90 - 150 min	≥ 45 min
Ekspansion	0 - 2 mm	≤ 10 mm
Glødetab	0,9 - 2,9 %	≤ 5,0 %
Uopløselig rest	0 - 1,0 %	≤ 5,0 %
Sulfat som SO_3	2,9 - 3,5 %	≤ 4,0 %
Chlorid	0 - 0,03 %	≤ 0,10 %
C_3A	7 - 8 %	≤ 8 %
Alkaliindhold	0,5 - 0,6 %	≤ 0,6 %
Vandopløseligt chromat	0 - 2 mg/kg	≤ 2 mg/kg
Absolut densitet	3130 - 3190 kg/m^3	Ingen



A.6 SPT - Glenium Sky 531

BASF
The Chemical Company

GLENIUM® SKY 531

Juli 08 erst. Mar. 08

Glenium SKY 531 bruges til plastificering, hvor cement indgår som bindemiddel. Særligt udviklet til højkvalitetsbeton med lavt vandcementtal og færdigbetonindustrien.

Tekniske data	
Produkt:	Superplastificeringsmiddel
Aktiv komponent:	Polycarboxylæter
Tørstofindhold:	32±1%
Chloridindhold:	<0,01%
Ækvivalent Na_2O:	<2,0%
Densitet:	1,10±0,03 kg/ltr.
pH-værdi:	5,0±1,5
Udseende:	Gullig viskøs væske

Glenium SKY 531 tilhører anden generation af superplastificeringsmidler baseret på polymerer af polycarboxylæter med lange sidekæder. Disse polymerer benytter sig både af en elektrostatisk frastødning, der kendes fra tidligere superplastificeringer, og en sterisk påvirkning, da de lange sidekæder i høj grad stabiliserer cementkornenes adskillelse og fordeling.

Det specielle Glenium® SKY-molekyle tillader en forsinkelse i adsorptionen på cementkornene og dermed en effektiv dispergering, hvilket gør det muligt at fremstille en højkvalitetsbeton med accelereret styrkeudvikling og forbedret bearbejdelighed uden at forsinke hærdeprocessen.

Total Performance Control™:
Et af nøgleelementerne i Total Performance Control (TPC) er Glenium® SKY. TPC sikrer, at færdigbetonproducenter, entreprenører og bygherrer får en beton, der er af samme høje kvalitet som oprindelig specificeret; startende fra produktion i blandeanlægget over levering til anvendelsen er gennemført og efterfulgt af hærdeprocessen. Dette sker ved på både kort og langt sigt at styre de to mest essentielle egenskaber: Bearbejdelighed og vandcementtal.

Egenskaber:
Glenium SKY 531 muliggør produktion af højkvalitetsbeton med lavt vandcementtal uden tab af bearbejdelighed, giver forbedret holdbarhed og udseende af overflader. Kort sagt et produkt til mange anvendelsesbehov.

Brugsanvisning:
Glenium SKY 531 er et brugsfærdigt, flydende tilsætningsstof, som tilsættes betonen under blandeprocessen. Produktet bør tilsættes sammen med eller efter tilsætning af mindst 80% af blandevandet.

Må ikke tilsættes tørre materialer.

Dosering:
Minimum: 0,8 vægt% af cement + puzzolan
Maximum: 1,5 vægt% af cement + puzzolan

Andre doseringer kan være aktuelle i særlige tilfælde og under særlige udførelsesomstændigheder. Kontakt venigst BASF Construction Chemicals Denmark A/S.

Adding Value to Concrete

GLENIUM® SKY 531

Kompatibilitet:
Glenium SKY 531 er ikke kompatibel med andre superplastificeringsprodukter.

Glenium SKY 531 anbefales anvendt sammen med Glenium Stream til fremstilling af rheodynakisk beton og Amex SB eller Micro Air G til forbedring af frost/tø-bestandigheden.

Opbevaring:
Glenium SKY 531 skal opbevares ved minimum +5°C og maximum +30°C.

Ved foreskreven temperatur i tæt lukket beholder er holdbarheden 12 måneder.

Produktet kræver omrøring.

Levering: 200 kg tromle
Tank

Arbejdsmiljø:
Se særskilt sikkerhedsdatablad/brugsanvisning.

Forbehold for ændringer og trykfejl.

CE
0615

BASF Construction Chemicals Denmark A/S
Hallandsvej 1, DK-6230 Rødekro
07
0615-CPD-9803/32
EN 934-2
Glenium SKY 531
High range water reducing / superplasticizing admixture
EN 934-2: T3.1/3.2
Maximum chloride content: < 0,01%
Maximum alkali content: < 2,0%
Dangerous substances: None

BASF Construction Chemicals Denmark A/S
Hallandsvej 1, DK-6230 Rødekro
Tlf.: +45 74 66 15 11, Fax +45 74 69 44 11
www.basf-cc.dk

Appendiks B

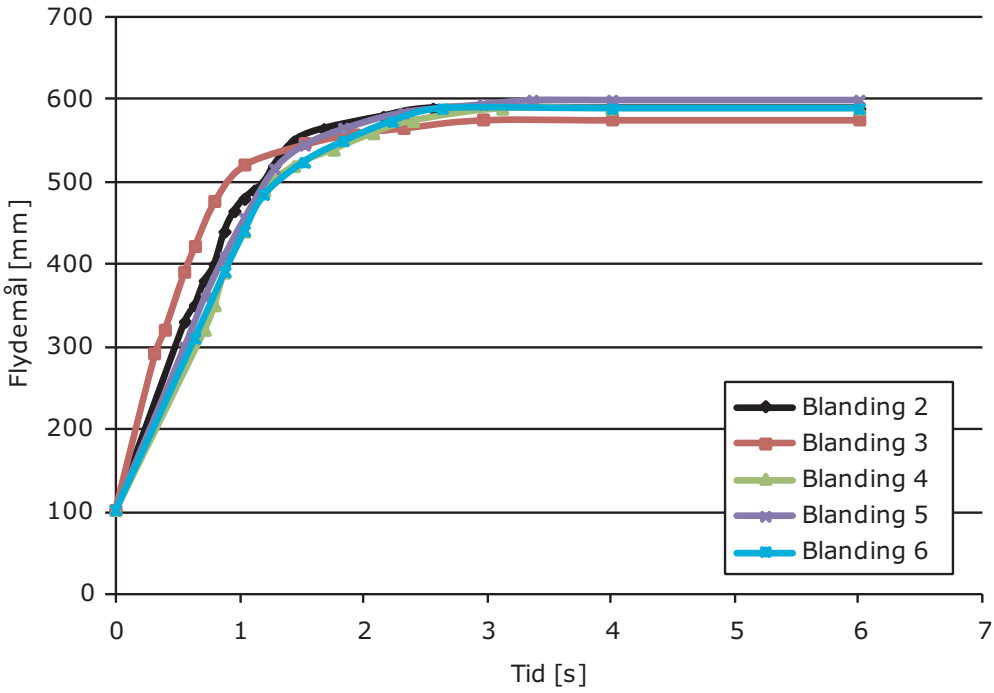
Udbredelseskurver

I dette appendiks figurerer udbredelseskurverne for samtlige blandinger der er anvendt i projektet. I udbredelseskurverne optegnes flydemålet i forhold til flydetiden. Alle udbredelseskurver er fra forsøg med beton.

Blanding 1 mangler pga. tekniske problemer med videokameraet.

B.1 Reproducerbarhed

Udbredelseskurverne hidrørende fra forsøgene med reproducerbarheden fremgår af figur B.1

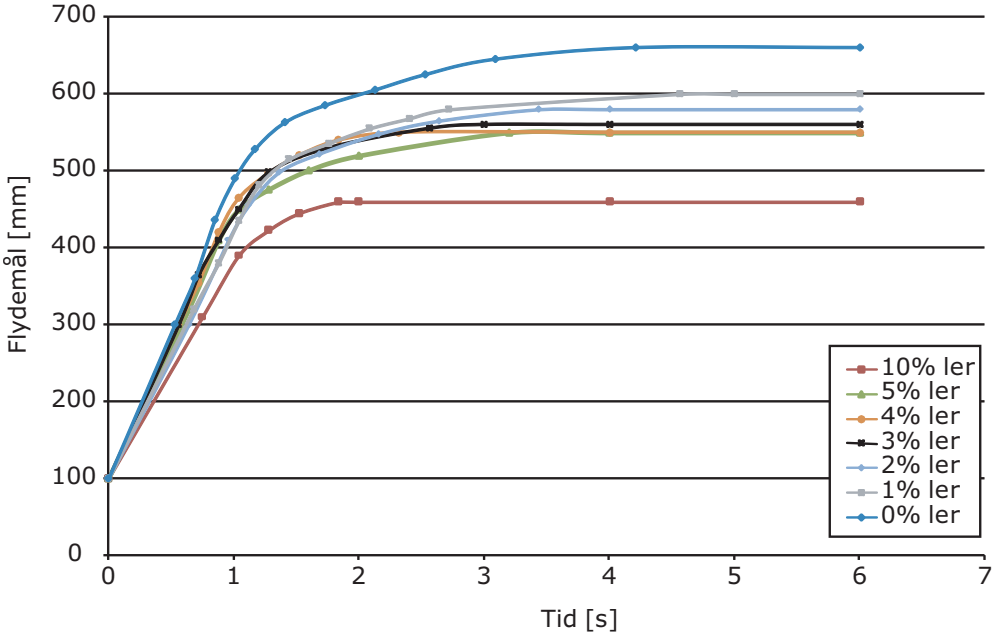


Figur B.1: Udbredelseskurverne fra forsøgene med reproducerbarhed

De fem udbredelseskurver forløber stort set ens, dog skiller blanding 3 sig ud fra de andre ved at have en lavere flydetid.

B.2 Bestemmelse af lermængde

Udbredelseskurverne for blandingerne med varierende indhold af lermineraler fremgår af figur B.2.

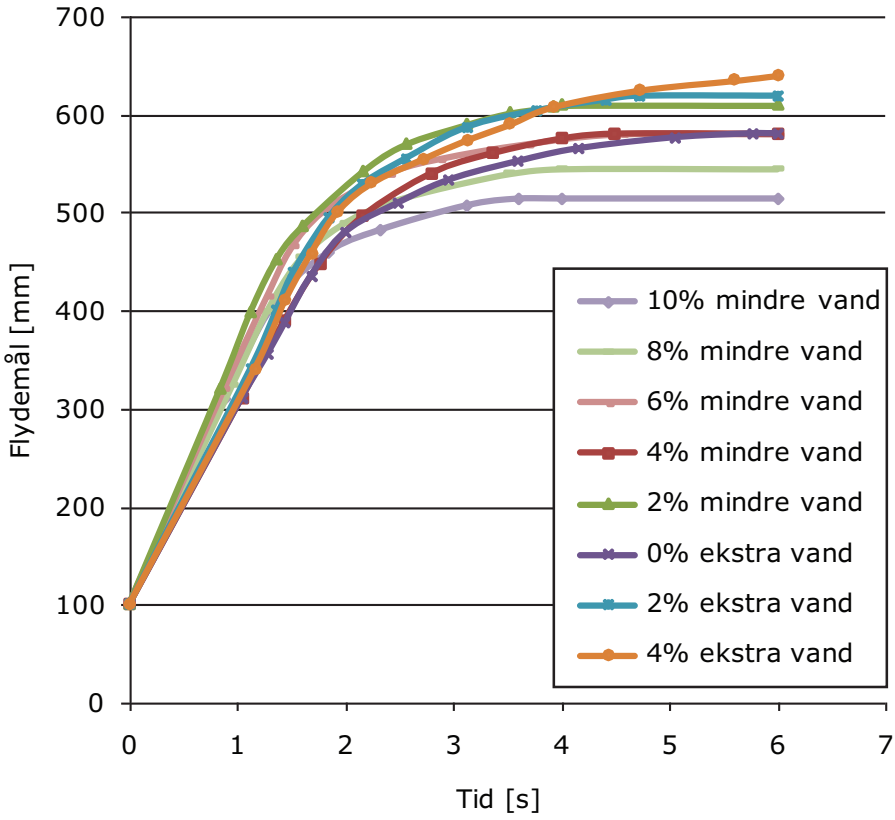


Figur B.2: Udbredelseskurverne for varierende lerindhold og med 5% ekstra vand

Udbredelseskurverne forløber som forventet, idet flydetiden stiger i takt med øget dosering af kaolin. Dette stemmer overens med teorien, da pastaen bliver tykkere.

B.3 Basisrecept

Udbredelseskurverne for de otte forsøg med basisrecepten fremgår af figur B.3

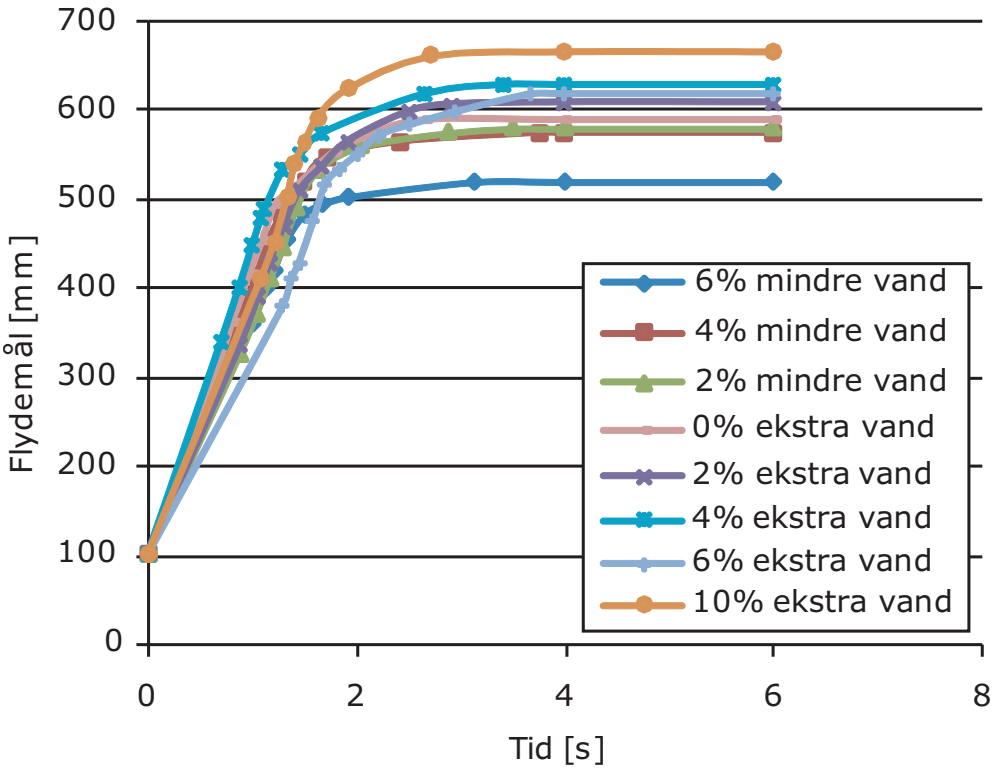


Figur B.3: Udbredelseskurver for de otte forsøg

Udbredelseskurverne for de otte forsøg forløber stort set som forventet, på nær to kurver som skiller sig ud. Udbredelseskurven for basisblandingen burde have et større flydemål samt kortere flydetid. Udbredelseskurven for blandingen med 2% mindre vand burde ud fra figur B.3 ligge lavere, dvs. flydemålet burde være mindre samt flydetiden burde være længere.

B.4 1% kaolin

Udbredelseskurverne for de otte forsøg med recepten tilsat 1% kaolin fremgår af figur B.4.

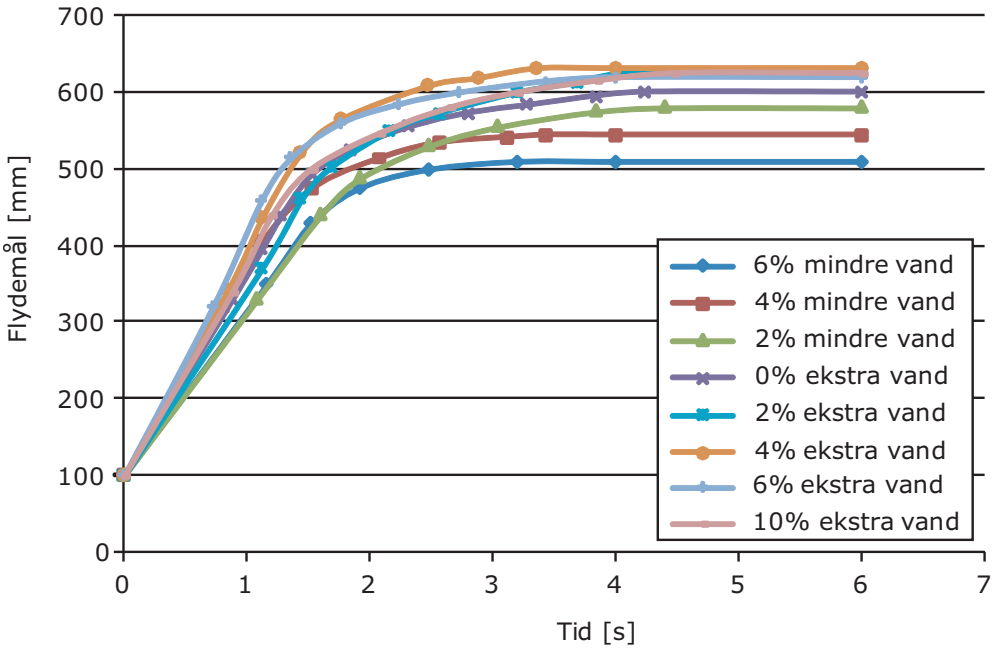


Figur B.4: Flydemålskurver for SCC indeholdende 1% kaolin med varierende vandindhold

Udbredelseskurverne for de otte forsøg forløber stort set som forventet. Blandingen tilsat 10% ekstra vand burde dog have en kortere flydetid, idet pastaen for denne er tyndere end i de resterende blandinger.

B.5 3% kaolin

Udbredelseskurverne for forsøgene fremgår af figur B.5.

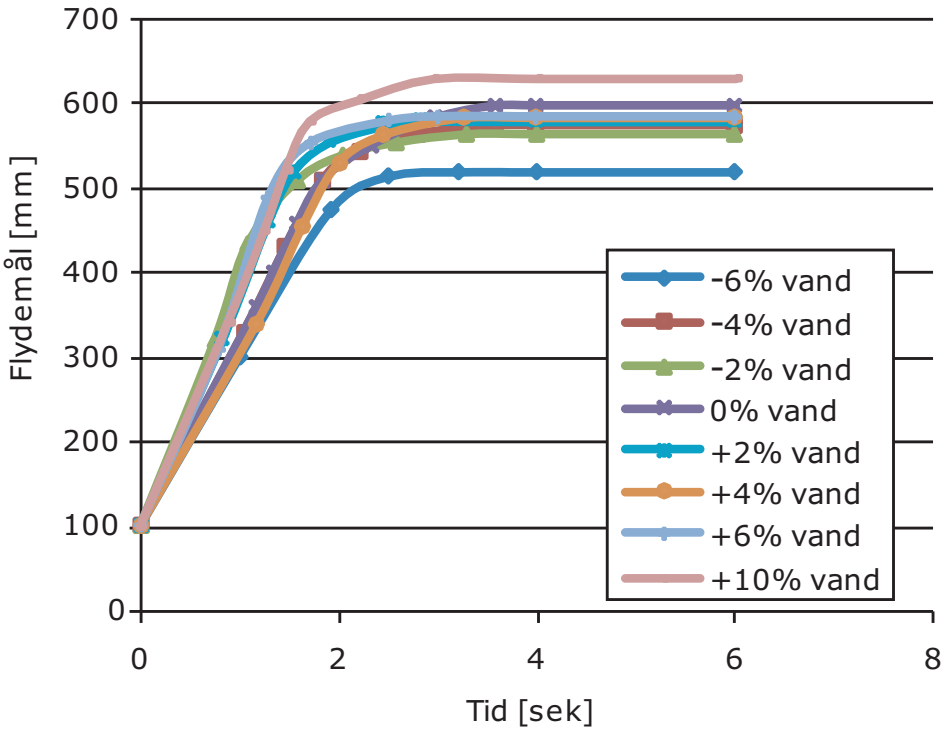


Figur B.5: Udbredelseskurver for SCC indeholdende 3% kaolin med varierende vandindhold

Udbredelseskurverne for de otte forsøg forløber som forventet.

B.6 3% Bradsted lerslam

Udbredelseskurverne for de otte forsøg med tilsætning af 3% lerslam fremgår af figur B.6.

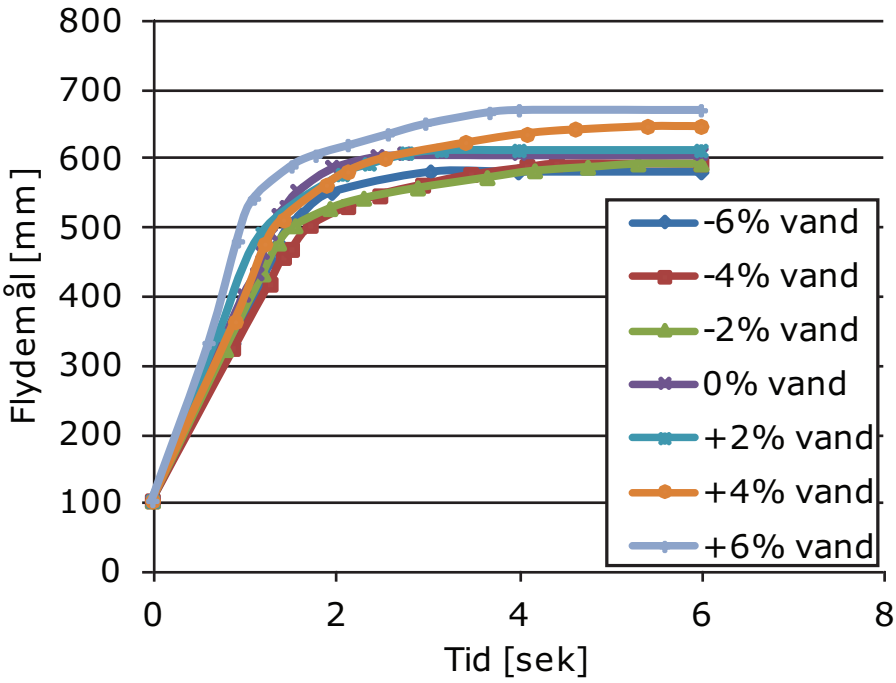


Figur B.6: Udbredelseskurver for de otte forsøg med 3% lerslam

Som det fremgår af figur B.6, forløber udbredelseskurverne som forventet med -6% og 10% ekstra vand som grænsekurver. Dog afviger to af kurverne fra det forventede, idet udbredelseskurven for -2% ekstra vand forløber hurtigere end ved +4% ekstra vand.

B.7 Flyveaske

Udbredelseskurverne for de syv forsøg fremgår af figur B.7.

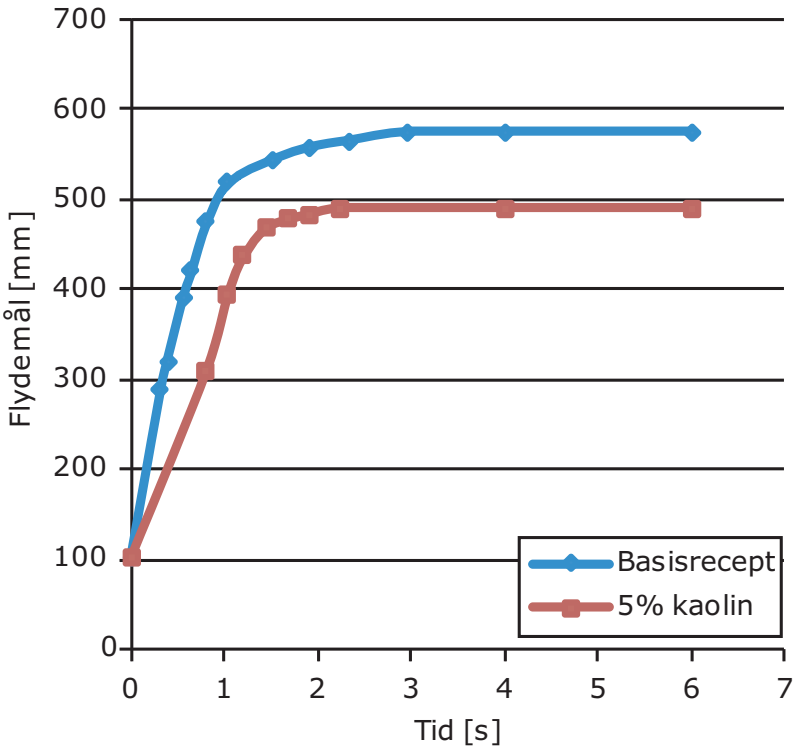


Figur B.7: Udbredelseskurver for de syv forsøg tilsat ekstra flyveaske

Størsteparten af udbredelseskurverne forløber som forventet, på nær to kurver, der afviger. Her er tale om udbredelseskurven for blandingen med 4% ekstra vand, der burde have en kortere flydetid inden den flader ud. Sidste kurve der ikke opfører sig helt som forventet, er udbredelseskurven for blandingen med 6% mindre vand. Denne blanding burde have en længere flydetid inden den flader ud.

B.8 Støbning

Udbredelseskurverne for de to betoner der er benyttet til at støbe cylindre til bestemmelse af trykstyrkeudviklingen og elasticitetskoefficienten fremgår af figur B.8.



Figur B.8: Udbredelseskurver for basisbetonen samt betonen tilsat 5% kaolin

Som det fremgår af figur B.8 forløber udbredelseskurverne som forventet, idet betonen indeholdende 5% kaolin er langsommere end basisrecepten. Dette stemmer overens med teorien, da pastaen i blandingen tilsat kaolin er tykkere.

Appendiks C

Støbningsdata

I dette appendiks findes en oversigt over de støbninger, der er foretaget samt tilhørende målinger af flydemålet, luftindholdet samt densiteten for hhv. den friske og den hærdnede beton. Densiteten for den hærdnede beton er angivet som gennemsnittet at alle 18 cylindre. Data registreret ved støbning af cylindre til bestemmelse af trykstyrke og elasticitetskoefficient fremgår af tabel C.1.

Støbning	Flydemål [mm]	Luftindhold [%]	Densitet [kg/m^3]		
			Recept	Frisk	Hærdnet
Basis	575	1,2	2123	2325	2335
5% kaolin	490	2,6	2306	2308	2302

Tabel C.1: Data registreret ved støbning

Appendiks D

Mørtelforsøg

For at eliminere fejlkilder i forbindelse med de forsøg der udføres i projektet ønskes det at finde mætningspunktet for tilsætningen af SPT. Idet mætningspunktet i teorien deslige er uafhængigt af tilslagets kornkurve er der foretaget to mørtelforsøg for at verificere dette. Til det ene mørtelforsøg benyttes en sammensat kornkurve der følger den optimale kornkurve for SCC jf. figur 16.3 i kapitel 16. Til det andet mørtelforsøg benyttes 0-2mm sand.

D.1 Recepter

For at finde mætningspunktet, er der udført seks forsøg for hver mørtel, med varierende tilsætning af SPT. SPT blev tilsat som vægt-% af pulveret (cement + flyveaske). Vandcementtallet er for begge recepter på 0,60. Recepterne for mørtelforsøgene er opstillet i tabellerne D.1 og D.2.

Mørtelrecept med sammensat kornkurve							
Cement	263,86	263,86	263,86	263,86	263,86	263,86	263,86
Flyveaske	79,35	79,35	79,35	79,35	79,35	79,35	79,35
Grov	256,94	256,94	256,94	256,94	256,94	256,94	256,94
Halvfin	305,12	305,12	305,12	305,12	305,12	305,12	305,12
Fin	160,59	160,59	160,59	160,59	160,59	160,59	160,59
Kvarts	80,30	80,30	80,30	80,30	80,30	80,30	80,30
Vand	182	181,31	180,62	179,93	179,24	178,55	177,86
SPT	0	0,69	1,38	2,07	2,76	3,45	4,14
Vægt-%	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2

Tabel D.1: Mørtelrecept med varierende tilsætning af SPT. Alle værdier i kg pr. m^3

Mørtelrecept med 0-2mm sand							
Cement	263,86	263,86	263,86	263,86	263,86	263,86	263,86
Flyveaske	79,35	79,35	79,35	79,35	79,35	79,35	79,35
0-2mm sand	802,95	802,95	802,95	802,95	802,95	802,95	802,95
Vand	182	181,31	180,62	179,93	179,24	178,55	177,86
SPT	0	0,69	1,38	2,07	2,76	3,45	4,14
Vægt-%	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2

Tabel D.2: Mørtelrecept med varierende tilsætning af SPT. Alle værdier i kg pr. m^3

D.2 Forsøgsprocedure

Til mørtelforsøgene er der anvendt en mindre tvangsblander, idet forsøgene er udført på blandinger á 4 liter. Den anvendte tvangsblander ses på figur D.1.

Figur D.1: Anvendt tvangsblander til mørtelforsøg

Blandeproceduren for mørtelforsøgene fremgår af tabel D.3.

Tilsætning	Blandetid [min]
Tilslag + halvdelen af vandet	3
Cement + flyveaske	1
Resterende vand	2
SPT	2
I alt	8

Tabel D.3: Blandeprocedure for mørtelforsøg

Minisætmålskeglen placeres i centrum af pladen med bunden op. Minisætmålskeglen der anvendes til mørtelforsøgene har dimensionerne $40 \times 90 \times 76$mm. Betonen hældes i minisætmålskeglen langs kanten, således at risikoen for indkapsling af luft reduceres. Herefter løftes minisætmålskeglen med en konstant hastighed, dog med tilstrækkelig hastighed, således at udbredelsen ikke hindres af minisætmålskeglen. Flydemålet aflæses på pladen som gennemsnittet af den største diameter og udbredelsen vinkelret derpå. Forsøgopstillingen ses på figur

D.2.

Figur D.2: Forsøgsopstilling for pasta- og mørtelforsøg

Appendiks E

Statistisk grundlag

I dette appendiks bestemmes det statistiske grundlag for at vurdere forsøgsresultaterne. Middelværdi, standardafvigelse samt variationskoefficient vil således bestemmes for hhv. trykstyrken samt elasticitetskoefficienten. Middelværdien bestemmes ved:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (x_i) \tag{E.1}$$

Hvor

x_i	er de målte værdier
n	er antallet af prøveemner

Standardafvigelsen bestemmes ved:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(x_i - \bar{X}\right)^2}{n-1}} \tag{E.2}$$

Variationskoefficienten bestemmes af:

$$Var = \frac{S}{\bar{X}} \tag{E.3}$$

Trykstyrken kan beskrives ved en logaritmisk normalfordeling. Konfidensintervallet for trykstyrken beskrives ud fra en konfidensgrad på 95%. Det vil sige, at sandsynligheden for at en stikprøve ligger uden for intervallet er 5%. Konfidensintervallet for et dobbeltsidet interval for en lognormalfordeling er i henhold til [Ayyub og McCuen, 2003] givet ved:

$$\bar{X} - t_{\alpha/2} \left(\frac{S}{\sqrt{n}} \right) \leq \mu \leq \bar{X} + t_{\alpha/2} \left(\frac{S}{\sqrt{n}} \right) \tag{E.4}$$

Hvor

μ	er forventningsværdien
$t_{\alpha/2}$	er den kritiske værdi for fordelingen
α	er signifikansniveauet

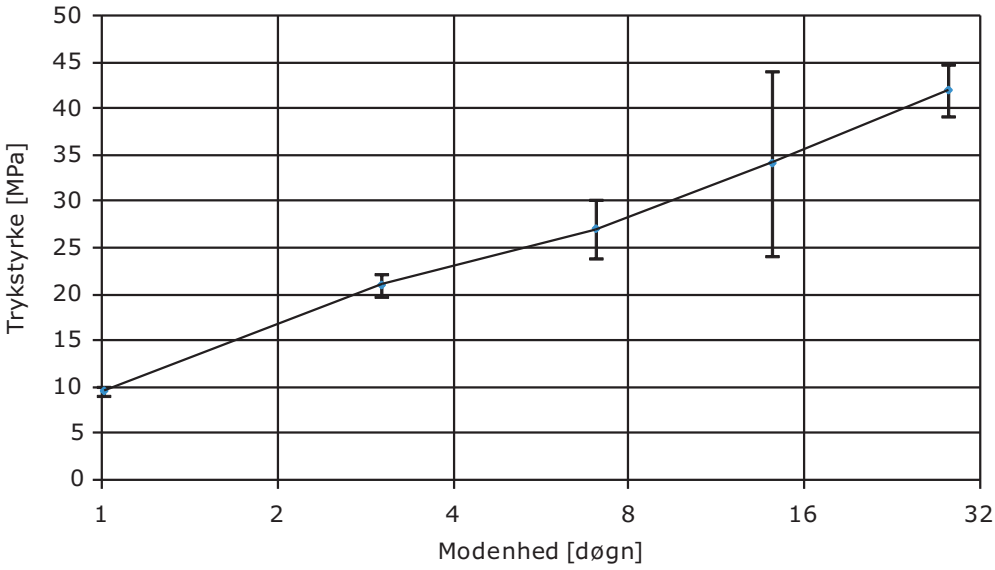
For en 95% konfidensgrad er signifikansniveauet 5%, hvorfor den kritiske værdi for en t-fordeling, $t_{\alpha/2}$, er 4,303 [Ayyub og McCuen, 2003].

Appendiks F

Trykstyrke

I dette appendiks er resultaterne for trykforsøgene opstillet. Indledningsvist findes en grafisk fremstilling hvor trykstyrkerne samt kondidensintervallet er optegnet som funktion af modenhedsdøgn. Herefter følger en tabel hvor trykstyrke, middelværdi, standardafvigelse, variationskoefficient samt konfidensinterval er opstillet. Beregningen af henholdsvis middelværdi, standardafvigelse samt variationskoefficient er foretaget ud fra de tre målte trykstyrke for hver termin.

F.1 Basisrecept

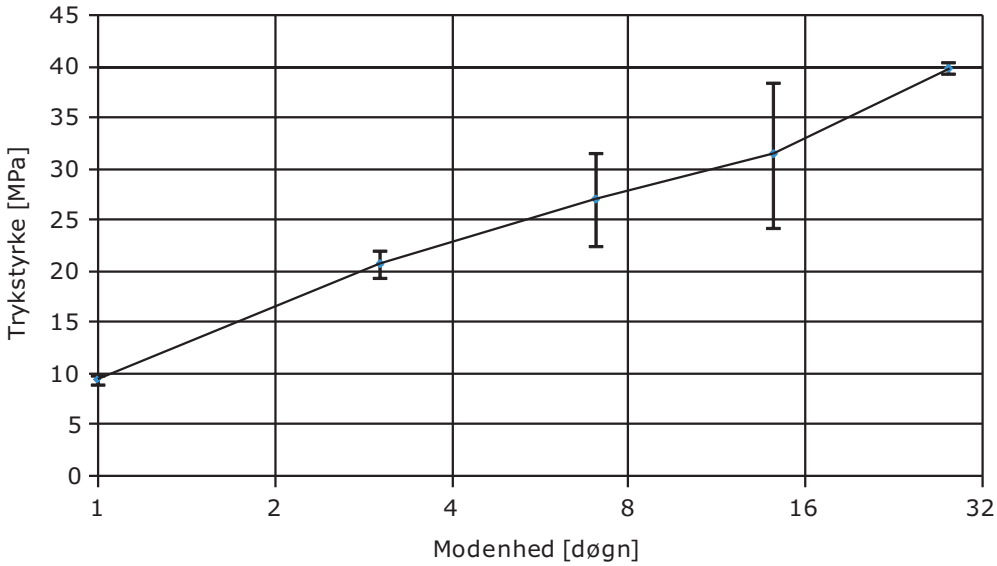


Figur F.1: Styrkeudvikling for basisrecept

Modenhed [Døgn]	Tryk-styrke [MPa]	Middel-værdi [MPa]	Spredning [MPa]	Variations-koefficient [%]	Konfidens-interval [MPa]
1	8,8 8,9 8,5	8,7	0,23	2,68	8,7±0,58
3	20,8 20,7 21,6	21,0	0,52	2,47	21,0±1,29
7	28,1 26,8 29,3	28,1	1,29	4,60	28,1±3,21
14	29,6 37,4 35,4	34,1	4,04	11,82	34,1±10,03
28	42,1 40,8 43,1	42,0	1,16	2,77	42,0±2,89

Tabel F.1: Målinger og statistik for basisrecepten

F.2 Recept tilsat 5% ler



Figur F.2: Styrkeudviklingen for recepten med 5% ler

Modenhed [Døgn]	Tryk-styrke [MPa]	Middel-værdi [MPa]	Spredning [MPa]	Variations-koefficient [%]	Konfidens-interval [MPa]
1	9,4 9,3 9,7	9,5	0,19	2,01	9,5±0,48
3	20,8 20,3 21,4	20,8	0,57	2,73	20,8±1,41
7	26,8 25,4 29,0	27,1	1,83	6,78	27,1±4,56
14	32,6 33,6 28,2	31,5	2,86	9,09	31,5±7,10
28	39,7 40,0 49,9	39,9	0,2	0,49	39,9±0,49

Tabel F.2: Målinger og statistik for recepten tilsat 5% ler

Appendiks G

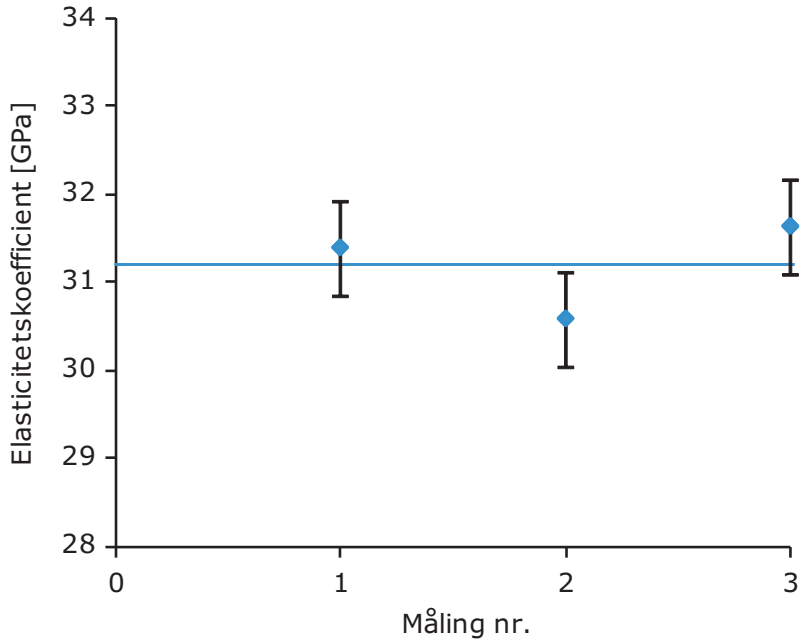
Elasticitetskoefficient

I dette appendiks er resultaterne for målingerne af elasticitetskoefficienterne opstillet. Indledningsvist findes en tabel hvor de statistiske data er opstillet, hvorefter resultaterne er vist grafisk. Graferne viser de målte elasticitetskoefficienter, middelværdien samt et interval optegnet ud fra middelværdien og standardafvigelsen.

G.1 Basisrecept

Modenhed [Døgn]	Elasticitets koefficient [GPa]	Middel-værdi [GPa]	Standard-afvigelse [GPa]	Variations-koefficient [%]
28	31,4 30,6 31,6	31,2	0,55	1,76

Tabel G.1: Målinger og statistisk grundlag for basisrecepten

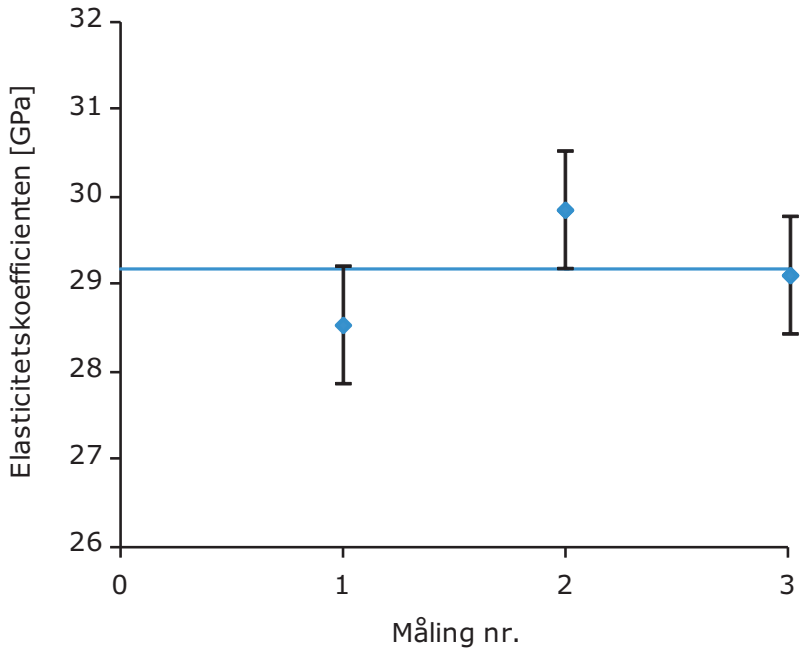


Figur G.1: Målinger og interval for standardafvigelsen for basisrecepten

G.2 Recept tilsat 5% ler

Modenhed [Døgn]	Elasticitets koefficient [GPa]	Middel-værdi [GPa]	Standard-afvigelse [GPa]	Variations-koefficient [%]
28	28,5 29,9 29,1	29,2	0,67	2,29

Tabel G.2: Målinger og statistisk grundlag for recepten tilsat 5% ler



Figur G.2: Målinger og interval for standardafvigelsen for recepten med 5% ler

Appendiks H

Mætningsforsøg med kaolin

For at undersøge hvor meget vand pulveriseret kaolin kan optage, er der foretaget et mætningsforsøg på den kaolin, der blev leveret af Aalborg Portland. Kriteriet for mætningspunktet var, at leren skulle være stabil og beholde en vis sammenhængningsevne, dvs. blandingen måtte ikke have en vandig konsistens. Bestemmelsen af hvornår mætningspunktet er nået, er således baseret på en skønsmæssig vurdering. Idet der er tale om en subjektiv vurdering, blev der foretaget to uafhængige forsøg med forskellige mængder af kaolin til bestemmelsen.

Indledningsvist er fremgangsmåden for forsøget beskrevet, hvorefter resultaterne og de dertilhørende vurderinger af opslæmningens tilstand er opstillet skematisk.

Til forsøget blev der anvendt følgende:

- Kaolin fra Aalborg Portland
- Plastbøtte
- Røreske af plastic
- Vægt med tre decimaler
- Vand

Forsøgsopstillingen fremgår af figur H.1.

Figur H.1: Forsøgsopstilling til bestemmelse af mætningspunktet for kaolin

Ved forsøgets start placeres plastbøtten med røreskeen på vægten, hvorefter vægten nulstilles. Herefter hældes kaolin i plastbøtten og vægten noteres. Dernæst tilsættes lidt vand og blandingen omrøres. Vægten noteres igen samtidigt med, at der foretages en vurdering af konsistensen. Kan det konstateres, at blandingen stadig er sammenhængende, tilsættes lidt mere vand og samme procedure som beskrevet ovenfor gentages. Denne fremgangsmåde fortsættes, indtil det kan konstateres, at blandingen begynder at blive vandig. Er blandingen blevet vandig er mætningspunktet overskredet. Mætningspunktet ligger således mellem de sidste to målepunkter og fastlægges herefter ud fra et skøn.

Resultaterne fra det første forsøg fremgår af tabel H.1.

1. Forsøg	Vægt [g]	Vurdering af konsistens
Kaolin	50,060	-
1. vejning	71,287	sammenhængende
2. vejning	73,630	sammenhængende
3. vejning	75,088	sammenhængende
4. vejning	76,164	vandig
5. vejning	77,923	lerslam

Tabel H.1: Resultater fra det første mætningsforsøg med kaolin

Som tidligere beskrevet er vurderingen af blandingens konsistens subjektiv. På baggrund af dette er der taget billeder af tilstandsfaserne „sammenhængende“ og „vandig“ for at anskueliggøre konsistensen. Disse er vist på figurene H.2 og H.3.

Figur H.2: „Sammenhængende“

Figur H.3: „Vandig“

Resultaterne fra det første forsøg viser, at mætningspunktet ligger et sted mellem 75,088g og 76,164g. Det er herefter valgt at anvende 76g som mætningspunkt. Dette resulterer i en mætningsgrad for det første forsøg på 51,82%.

Resultaterne fra det andet forsøg fremgår af tabel H.2.

2. Forsøg	Vægt [g]	Vurdering af konsistens
Kaolin	62,011	-
1. vejning	89,247	sammenhængende
2. vejning	92,287	sammenhængende
3. vejning	93,565	sammenhængende
4. vejning	94,856	vandig
5. vejning	95,637	lerslam

Tabel H.2: Resultater fra det andet mætningsforsøg med kaolin

Resultaterne fra det andet forsøg viser, at mætningspunktet ligger et sted mellem 93,565g og 94,856g. Det er herefter valgt at anvende 94g som mætningspunkt. Dette resulterer i en mætningsgrad for det andet forsøg på 51,59%.

De to forsøg med mætning af kaolin giver således mætningsgrader på hhv. 51,82% og 51,59%. Ud fra disse resultater kan det konstateres, at det leverede kaolin fra Aalborg Portland kan optage omkring 50 vægt-% vand.

Litteratur

[Aalborg Portland, 2007] Aalborg Portland (2007). *Cement og Beton*. Aalborg Portland, 18. udgave.

[Andersen, 2000] Andersen, P. (2000). *Røntgendiffraktion i krystaller*. Kemisk Institut - Københavns Universitet, 1. udgave.

[AVJ, 2008] AVJ (2008). *Branchebeskrivelse for beton- og cementvarefabrikker*. `http://www.avjinfo.dk/filer/udgivelser/brancher/19/beton.pdf`. Sidst besøgt 16.12.08.

[Ayyub og McCuen, 2003] Ayyub, B. M. og McCuen, R. H. (2003). *Probability, Statistics, and Reliability for Engineers and Scientists*. Chapman and Hall/CRC, USA, 2. udgave.

[Banfill et al., 2008] Banfill, P., Bowen, P. og Flatt, R. (2008). *Improved superplasticisers for high performance concrete: The project*. `http://infoscience.epfl.ch/record/89624/files/ICCCPaperBanfilletal.pdf`. Sidst besøgt 15.12.08.

[DS2426, Anneks U, 2004] DS2426, Anneks U (2004). *Beton - Materialer - Regler for anvendelse af EN 206-1 i Danmark*. Dansk Standard, 1. udgave.

[DS/EN 12390-1, 2002] DS/EN 12390-1 (2002). *Prøvning af hærdnet beton - Del 1: Form, dimensionering og andre krav til prøvelegemer og forme*. Dansk Standard, 2. udgave.

[DS/EN 12390-2, 2002] DS/EN 12390-2 (2002). *Prøvning af hærdnet beton - Del 2: Tilvirkning og lagering af prøvelegemer for styrkeprøvning*. Dansk Standard, 2. udgave.

[DS/EN 12390-3, 2002] DS/EN 12390-3 (2002). *Prøvning af hærdnet beton - Del 3: Trykstyrke*. Dansk Standard, 1. udgave.

[DS/EN 206-1, 2002] DS/EN 206-1 (2002). *Beton - Del 1: Specifikation, egenskaber, produktion og overensstemmelse*. Dansk Standard, 2. udgave.

[DS/EN:12350, 2004] DS/EN:12350 (2004). *Prøvning af frisk beton*. DS/EN, 2. udgave.

[DTU, 2008] DTU, D. T. U. (2008). *Skanning Elektron Mikroskop, SEM*. `http://www.fys.dtu.dk/Uddannelse/Nanoteket/Udstyr/Skanning_Elektron_Mikroskop,_SEM.aspx`. Sidst besøgt 08.01.09.

[Geiker et al., 2002] Geiker, M. R., Brandl, M., Thrane, L. N., Bager, D. H. og Wallevik, O. (2002). The effect of measuring procedure on the apparent rheological properties of self-compacting concrete. Rapport.

[Glavind et al., 1999] Glavind, M., Sørensen, I. og Thygesen, E. (1999). *Pakningsberegninger som hjælpemiddel ved betonproportionering*. Aalborg Portland.

[Hansen og Pedersen, 1982] Hansen, P. F. og Pedersen, E. J. (1982). *Vinterstøbning af beton*. Statens Byggeforskningsinstitut.

[Headwaters, 2008] Headwaters (2008). *Fly ash for concrete*. `http://www.flyash.com/flyashconcrete.asp`. Sidst besøgt 03.11.08.

[Herholdt et al., 1985] Herholdt, A. D., Justesen, C. F. P., Nepper-Christensen, P. og Nielsen, A. (2. udgave 1985). *Beton-Bogen*. Aalborg universitet.

[KU, 2008] KU, K. U. (2008). *Introduktion til metamorfe bjergarters mineralkemi og petrografir*. `http://isis.ku.dk/kurser/blob.aspx?feltid=77320`. Sidst besøgt 25.10.08.

[Munch-Petersen, 2008] Munch-Petersen, C. (2008). *Luft driller i betonen*. `http://ing.dk/artikel/14455-luft-driller-i-betonen?highlight=Unicon`. Sidst besøgt 16.12.08.

[Neville og Brooks, 1987] Neville, A. M. og Brooks, J. J. (1987). *Concrete Technology*. Longman Scientific & Technical.

[Norvell et al., 2007] Norvell, J. K., Stewart, J. G., Juenger, M. C. G. og Fowler, D. W. (2007). Influence of clays and clay-sized particles on concrete performance. Rapport.

[Office, 2000] Office, E. P. (2000). *Patent: Concrete containing superplasticiser and palygorskite.* http://v3.espacenet.com/textdes?DB=EPODOC&IDX=DK164098&F=0&QPN=DK164098. sidst besøgt 19.09.08.

[Ovesen et al., 2007] Ovesen, N. K., Fuglsang, L. og Bagge, G. (2007). *Lærebog i geoteknik.* Polyteknisk forlag, 1. udgave.

[Pade, 2008] Pade, C. (2008). *Guidelines for proportionering af SCC.* http://www.scc-konsortiet.dk/_root/media/26971_Pade,\%20C.pdf. Sidst besøgt 16.12.08.

[Pade et al., 2007] Pade, C., Thrane, L. N. og Nielsen, C. V. (2007). *Håndbog for sammensætning af SCC.* Teknologisk Institut.

[Petersen, 2008] Petersen, C. M. (2008). *Silica giver holdbar beton.* http://ing.dk/artikel/996?highlight=Aalborg+Portland. sidst besøgt 01.12.08.

[Portland, 2008] Portland, A. (2008). *Self Compacting Concrete Based on AALBORG WHITE.* http://www.aalborgwhite.pl/media/pdf_files/info_self_compacting_concrete.pdf. Sidst besøgt 02.04.09.

[SFA, 2008] SFA, S. f. A. (2008). *Silica fume in concrete.* http://silicafume.org/general-concrete.html. Sidst besøgt 16.12.08.

[Sørensen, 2008] Sørensen, E. V. (2008). Lektor ved Aalborg Universitet.

[TekInst, 2008] TekInst (2008). *Viden om SCC.* http://www.voscc.dk/. Teknologisk Institut - sidst besøgt 01.12.08.

[Thrysøe et al., 2004] Thrysøe, J., Rasmussen, T., Berrig, A., Hasholt, M. T. og Pade, C. (2004). *Selvkompakterende beton - SCC.* Aalborg Portland.

[Wallevik, 2000] Wallevik, D. O. H. (2000). *Rheological measurements on fresh cement paste, mortar and concrete by use of a coaxial cylinder viscometer.* The Icelandic Building Research Institute (IBRI).