



# **Center for Grøn Beton**

## **Implementering af Grøn Beton i normer og standarder**

### ***Udført af:***

*Anette Berrig*

*Claus Vestergaard Nielsen*

*Dorthe Mathiesen*

*Teknologisk Institut, Beton, december 2002*

Titel: Implementering af Grøn Beton  
i normer og standarder

Forfatter: Anette Berrig  
Claus Vestergaard Nielsen  
Dorthe Mathiesen

ISBN: 87-7756-693-9

Reproduktion af dele af rapporten er tilladt, hvis kilde angives.

## Indholdsfortegnelse

1.	Indledning.....	4
1.1	Læsevejledning .....	4
2.	DS 411 – Norm for Betonkonstruktioner .....	6
2.1	Resumé.....	6
2.2	Materialeegenskaber .....	8
2.3	Brudgrænsetilstande.....	12
2.4	Anvendelsesgrænsetilstande .....	14
2.5	Brand.....	16
2.6	Referencer .....	18
3.	EN 206-1 – Beton – Del 1: Specifikation, egenskaber, produktion og overensstemmelse.....	19
3.1	Forslag til ”grøn” tekst i det danske tillæg til EN 206-1.....	19
3.2	Baggrund for forslag til ”grøn” tekst .....	20
3.3	Referencer .....	26
4.	DS 482 – Udførelse af Betonkonstruktioner .....	27
4.1	Resumé.....	27
4.2	Bearbejdighed .....	29
4.3	Afbindingstid .....	30
4.4	Plastisk svind .....	32
4.5	Varmeudvikling og varighed af udtørningsbeskyttelse .....	35
4.6	Referencer .....	38
	Appendiks A – Indflydelse af reduceret E-modul på brodesign .....	39

# 1. Indledning

I centerkontrakten *Ressourcebesparende betonkonstruktioner* (populært kaldet "Grøn Beton") er der i løbet af projektperioden 1998 – 2002 gennemført en lang række undersøgelser af nye grønne betontyper. Desuden er der udført vurderinger af drift og vedligehold af grønne betonkonstruktioner og grønne konstruktionstekniske tiltag. Centerkontraktens deltagere og overordnede resultater er beskrevet i vedlagte anvisning.

Der er i Grøn Beton projektet arbejdet med følgende forskellige måder at fremstille ressourcebesparende beton på:

- beton baseret på en mere miljøvenlig cement (reducerede udledninger under cementproduktionen),
- beton med højt indhold af flyveaske som erstatning for cement,
- beton med industrielle restprodukter, bl.a. slammaske fra forbrænding af spildevandsslam,
- beton med betonslam som erstatning for drikkevand og sand,
- beton med stenmel som erstatning for naturligt forekommende sand.

For hver af disse måder er der undersøgt en række betontyper til henholdsvis passiv og aggressiv miljøklasse. Disse betontyper er blevet sammenlignet med kendte referencebetoner, der har været vel indkørt i normal fabriksbetonproduktion. De anvendte referencebetoner har været en beton til passiv miljøklasse, styrkeklasse 20 samt en beton til aggressiv miljøklasse, styrkeklasse 35.

Der er i centerkontrakten gennemført følgende faglige aktiviteter for de forskellige betontyper:

- Kortlægning af de mekaniske egenskaber.
- Undersøgelse af materialeopførsel under brandpåvirkning.
- Undersøgelse af de udførelsesmæssige egenskaber.
- Undersøgelse af de holdbarhedsmæssige egenskaber.

Desuden er der opført en vejbro som et fuldskalaforsøg, hvor forskellige grønne betontyper til aggressiv miljøklasse er anvendt, hvor grønne konstruktive tiltag er blevet afprøvet samt hvor drifts- og vedligeholdsmæssige aspekter er blevet vurderet.

## 1.1 Læsevejledning

Nærværende rapport indeholder dokumentation for de opnåede resultater og erfaringer i Grøn Beton projektets faglige aktiviteter. Det er centerkontraktens håb at standardiseringsudvalgene vil notere sig disse resultater og have dem i bagehovedet i det fremtidige arbejde med at implementere miljøaspekter i normer og standarder.

Dokumentationen omfatter dels de erfaringer, der er opnået med de grønne betontyper, der er undersøgt i projektet, dels sjældent undersøgte egenskaber for de konventionelle referencebetoners egenskaber. Dette gælder i særlig grad for de mekaniske og brandtekniske egenskaber.

Grøn Beton projektet har arbejdet med udvalgte grønne strategier og giver derfor ikke et fuldstændigt billede af, hvad der bør stilles af krav til grønne betoner i al almindelighed. De forslag, der er indeholdt i dette dokument, bygger udelukkende på de typer af grønne betoner, der er undersøgt i Grøn Beton projektet.

Dokumentationen er præsenteret i kapitlerne 2, 3 og 4 svarende til, hvad der er relevant for hhv. DS 411:1999, EN 206-1:2000 og DS 482:1999. Disse tre kapitler kan læses uafhængigt af hinanden.

Kapitel 2 henvender sig således til Dansk Standards udvalg S 411 med det, der kan være relevant for DS 411. Kapitel 3 henvender sig til DS-udvalget S 328 med det, der kan være relevant for det nationale tillæg til EN 206-1. Endelig henvender kapitel 4 sig til DS-udvalget S 329 med det, der kan være relevant for DS 482.

Hvert af de tre kapitler indeholder en kort indledning. Herefter er resultaterne sammenfattet i et resumé, der giver de overordnede konklusioner. Specielt for kapitel 3 vedrørende EN 206-1, er der givet konkrete tekstforslag til indarbejdelse i det nationale tillæg. Mere uddybende dokumentation fremgår af de efterfølgende afsnit og endelig er hvert af de tre kapitler afsluttet med en liste over de vigtigste referencer, hvor yderligere dokumentation kan findes.

De anførte referencer samt flere rapporter fra projektet kan frit hentes fra hjemmesiden [www.gronbeton.dk](http://www.gronbeton.dk).

## 2. DS 411 – Norm for Betonkonstruktioner

I dette kapitel gøres der rede for de erfaringer, der er gjort vedr. de konstruktive egenskaber af grøn beton. Erfaringerne er primært opnået gennem eksperimenter udført på Teknologisk Institut.

Grøn betons mekaniske egenskaber er undersøgt og dokumenteret i henhold til følgende undersøgelsesrække:

Materialeundersøgelser:

- Trykarbejdskurver
- Spaltetrækstyrke
- Temperaturudvidelseskoefficient
- Fugtbevægelser/svind
- Udmattelsesstyrker
- Krybning ved moderat lastniveau

Konstruktionsundersøgelser:

- Forankringsevne
- Bøjning af bjælker
- Forskydningsbæreevne af bjælker
- Instabilitet af søjler

Disse undersøgelser er dokumenteret i en række rapporter (jf. referencer i afsnit 2.6). Det skal bemærkes, at ikke alle eksperimenter er udført på alle de forskellige betontyper, som er undersøgt i projektet.

Dermed skal det også gøres klart, at undersøgelsen ikke kan forveksles med en fuldstændig kortlægning af alle relevante parametre og egenskaber indeholdt i DS 411:1999. Der er nærmere tale om en stikprøvevis dokumentation af nogen af de væsentligste materialeegenskaber.

I de følgende afsnit gennemgås de enkelte undersøgelser og resultaterne sammenlignes med de relevante anvisninger i DS 411:1999.

### 2.1 Resumé

De væsentligste resultater og anbefalinger er opsummeret nedenfor. I afsnit 2.2 - 2.5 findes der yderligere oplysninger om egenskaberne samt henvisninger til de rapporter, hvor undersøgelserne er beskrevet mere indgående (afsnit 2.6).

#### **Trykarbejdslinier**

Følgende oplysninger er udledt af de eksperimentelt bestemte trykarbejdslinier for både referencebetonerne og de grønne betoner i passiv og aggressiv miljøklasse:

- Arbejdsliniens form er tilfredsstillende beskrevet som angivet i CEB-FIP Model Code 1990 [2.5], dvs. at højere styrke medfører mindre sejhed. Denne observation er i overensstemmelse med normal praksis.
- Arbejdsliniens toppunkt ligger omkring 2 ‰, som det normalt observeres for beton.
- Arbejdsliniens slutpunkt er observeret større end 3,5 ‰.
- Arbejdsliniens begyndeshældning  $E_0$  er generelt fundet at ligge lavere end forudsagt af DS 411:1999, pkt. 3.2.5 (4)P.

På baggrund af den sidstnævnte observation anbefales det, at udtrykket for  $E_0$  i DS 411:1999, underkastes en nærmere undersøgelse for at verificere om nærværende forsøgsresultater er udtryk for en generel trend. Jævnfør i øvrigt kommentarerne i afsnit 2.4.

### **Trækstyrke**

Sammenhængen mellem træk- og trykstyrke er undersøgt og der er fundet en tilfredsstillende overensstemmelse med kvadratrodsudtrykket givet i DS 411:1999, pkt. 3.2.4 (3)P.

### **Temperaturudvidelse og svind**

Målingerne på tre betontyper i aggressiv miljøklasse viser en middelværdi af udvidelseskoefficienten på  $12 \times 10^{-6}$  per °C både for reference- og grøn beton. Dette kunne evt. give anledning til at der i vejledningen i DS 411:1999, pkt. 4 (2) anføres, at temperaturudvidelseskoefficienten kan variere afhængig af betonsammensætning og specielt tilslagstype. Der kan eventuelt henvises til Beton-Bogen eller lignende.

Svindmålingerne viser at betonen med højt flyveaskeindhold udviser et markant mindre svind end referencebetonen.

### **Bjælke- og søjleforsøg**

Bøjningsforsøg på armerede bjælker viser, at den konstruktive opførsel indtil brud (flydning i armering) kan beskrives ved at benytte arbejdslinierne for hhv. beton og armering. Dette gælder også for søjleforsøg, hvor bæreevnen er styret af tillægsmenter pga. udbøjninger.

### **Forskydning og forankring**

Forskydningsforsøg med varierende bøjlearmering viser, at generelt for alle betonerne giver anvendelsen af effektivitetsfaktoren i DS 411:1999, pkt. 6.2.2.1 (15)P, for høje bæreevner ift. de eksperimentelle værdier. Dette er fundet for alle styrkeklasser.

Forankringsevnen af de grønne betoner er fundet mindst lige så god som referencebetonerne.

### **Krybning**

Krybning er undersøgt for betoner til aggressiv miljøklasse og krybetallet for de grønne betoner er fundet at være af samme størrelsesorden som referencebetonen.

### **Brand**

Brandegenskaber af tre betoner til passiv miljøklasse er undersøgt. Afskalningsforsøg udført på BYG-DTU viste ingen udpræget risiko for eksplosiv afskalning under en standardbrand, gældende for både referencebetonen og de grønne betoner.

De mekaniske egenskaber og deformationsegenskaberne under opvarmning og afkøling er kortlagt eksperimentelt. Konklusionerne herfra baserer sig primært på forskellen mellem en svensk beton med knust klippetilslag og to danske betoner med kvartssand og søsten. De grønne tiltag vedrører kun pulverdelen og har ikke nogen målbar effekt på brandegenskaberne. Set ift. DS 411:1999, pkt. 10, er de vigtigste observationer (jf. afsnit 2.5):

- En markant større termisk udvidelse for de danske betoner end for den svenske beton samt væsentlig højere end hvad Eurocode 2 foreskriver. Under afkøling fra 600 °C bevirker dette en betydelig blivende deformation fra revnedannelse.
- Det varme E-modul aftager væsentligt hurtigere med temperaturen end angivet i DS 411. Det bør overvejes om reduktionsfaktoren for trykstyrke og E-modul skal separeres.

## **2.2 Materialeegenskaber**

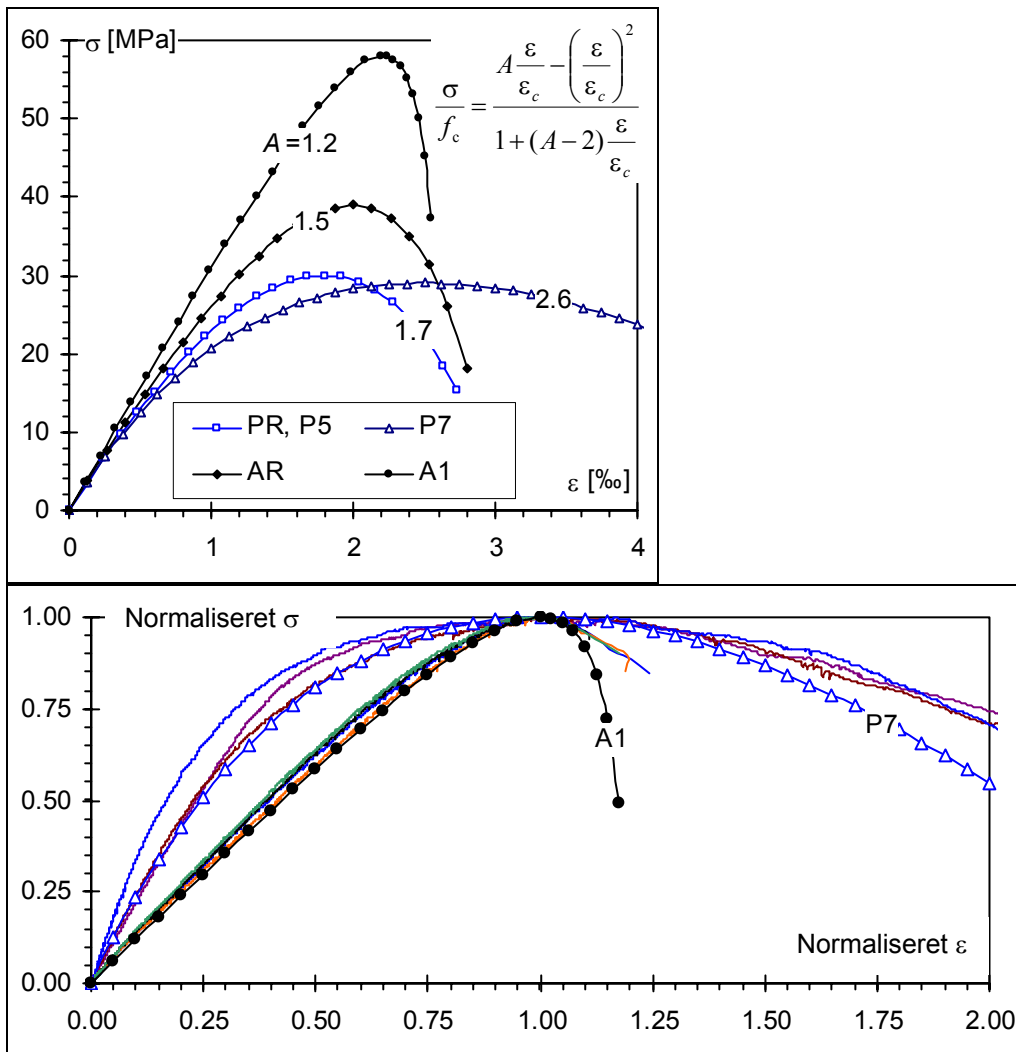
### **Trykarbejdslinier**

Bestemmelsen af betonernes trykarbejdslinier giver information om E-modulet (begyndelsehældningen) og trykstyrken (toppunktet). Brudtøjningen defineret ved slutpunktet på arbejdsliniens nedadgående del, er ikke målt direkte, men forsøgene viser tydeligt, at brudtøjningen er væsentlig højere end maksimumsværdien på 3,5 %, som angivet i DS 411:1999.

De registrerede trykstyrker ligger i intervallet 25 – 35 MPa for betonerne i passiv miljøklasse. For betonerne i aggressiv miljøklasse varierer styrkerne fra ca. 40 til godt 60 MPa [2.1].

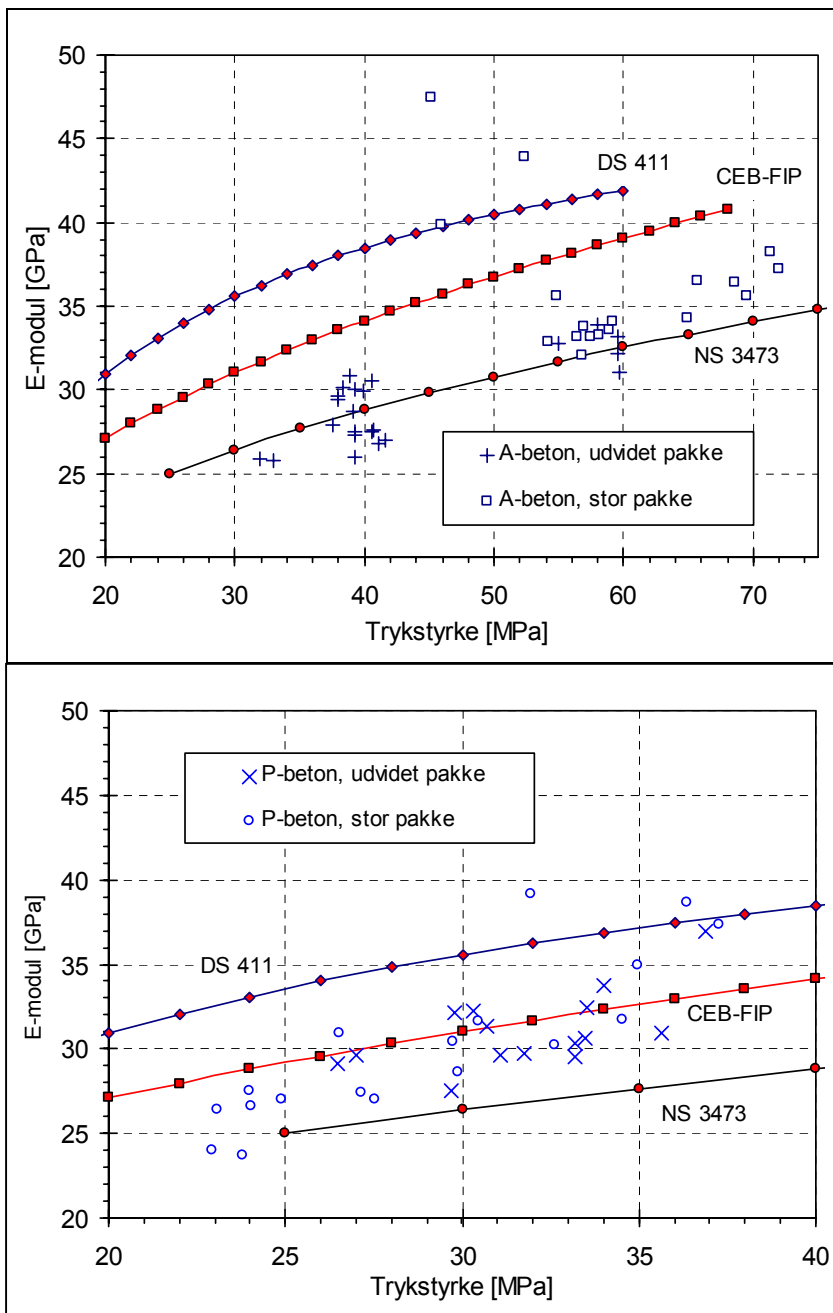
De målte arbejdslinier er sammenlignet med et analytisk udtryk angivet af CEB-FIP Model Code 1990 [2.5]. Den velkendte sammenhæng mellem voksende styrkeniveau og faldende sejhed er også observeret. I Figur 1 er dette forhold illustreret med forsøgsdata for to betoner med vidt forskellig trykstyrke.





Figur 1: Eksempler på trykarbejdslinier. Akserne på det nederste diagram er normaliseret mht. kurvernes toppunkt. Kurverne med symboler er optegning af det analytisk udtryk fra [2.5] gengivet øverst. Signaturforklaring for betontyper: PR = reference, P5 = betonslam, P7 = alternativ flyveaske; AR = reference; A1 = flyveaske.

Toppunktet for arbejdslinierne ligger for alle de afprøvede betoner ved en tøjning  $\varepsilon_c$  på ca. 2 ‰, hvilket er den normale størrelsesorden for beton. Alt i alt må det konkluderes, at med kendskab til begyndeshældningen og toppunktet er det muligt at forudsige trykarbejdslinien vha. det analytiske udtryk givet i Figur 1.

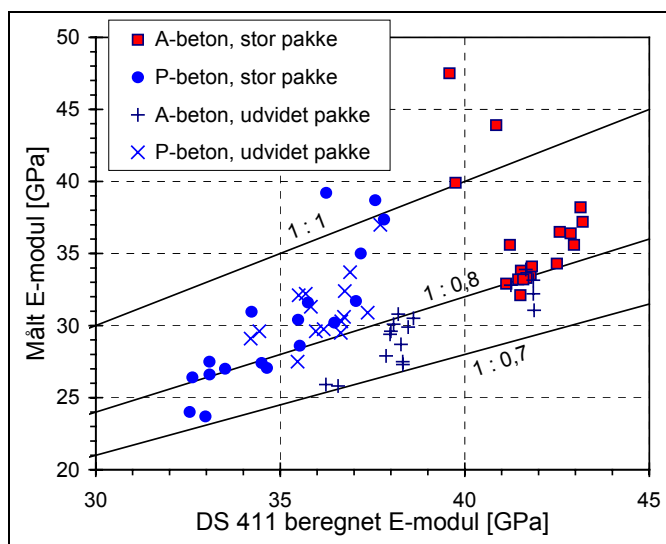


Figur 2: Sammenhæng mellem målt begyndelses E-modul og trykstyrke. Kurverne angiver analytisk normudtryk. Udtrykket fra DS 411:1999 lyder  $E_0 = f_c / (f_c + 13 \text{ MPa})$ . Udtrykkene fra CEB-FIP Model Code og Norsk Standard er begge af typen potensudtryk. Stor pakke og udvidet pakke angiver to forskellige forsøgsserier. A-beton = aggressiv miljøklasse; P-beton = passiv miljøklasse.

Begyndeshældningen betegnes i DS 411:1999 for  $E_0$  og er angivet som en funktion af betonens trykstyrke. En sammenligning mellem de målte trykstyrker og begyndelses E-moduler, bestemt på baggrund af arbejdslinierne, er givet i Figur 2.

Det ses at selvom korrelationen mellem trykstyrke og E-modul ikke er særlig entydig, er der en klar tendens til, at DS 411:1999 overvurderer  $E_0$  ift. de målte værdier. Dette gælder både de grønne betoner og referencebetonerne.

I Figur 3 ses det, at målingerne fra Figur 2 generelt ligger på ca. 80 % af den værdi, som er forudsagt af DS 411 ud fra den målte trykstyrke.



Figur 3: Sammenhæng mellem beregnet og målt begyndelses E-modul. Hvert datapunkt svarer til et arbejdsurveforsøg.

### Trækstyrke

Der er udført spaltetrækforsøg til bestemmelse af betonernes trækstyrke [2.1]. Spaltetrækstyrken konverteres til enakset trækstyrke ved at multiplicere med 0,6. Sammenhængen mellem træk- og trykstyrke er undersøgt og der er fundet en tilfredsstillende overensstemmelse med kvadratrodsudtrykket givet i DS 411:1999.

### Temperaturudvidelse og svind

Bestemmelse af temperaturudvidelseskoefficienten er foretaget indenfor temperaturintervallet 10 – 30 °C. DS 411:1999 angiver vejledende, at værdien  $10 \times 10^{-6}$  per °C kan benyttes. Målingerne på tre betontyper i aggressiv miljøklasse viser en middelværdi på  $12 \times 10^{-6}$  per °C [2.2]. Temperaturvariationer er at opfatte som en belastning i anvendelsesgrænsetilstanden og en forøgelse på 20 % af denne vil skabe ugunstige betingelser i visse situationer.

DS 411:1999 indeholder ikke direkte anvisninger til svindtøjningernes størrelse, da det afhænger af såvel betonens sammensætning som af omgivelsernes klimaforhold. Svind er at opfatte som en belastning på linie med temperaturvariationer.

Svindmålinger foretaget på prøveemner under kontrollerede klimaforhold viser, at betonene til passiv miljøklasse udviser identisk opførsel undtaget for den svenske beton med et relativt højt cementindhold og flyveaske fra biobrændsel som har en væsentlig højere svindtøjning. For betonene i aggressiv miljøklasse fås, at betonen med et højt flyveaskeindhold kun udviser ca. 2/3 af referencebetonens svind.

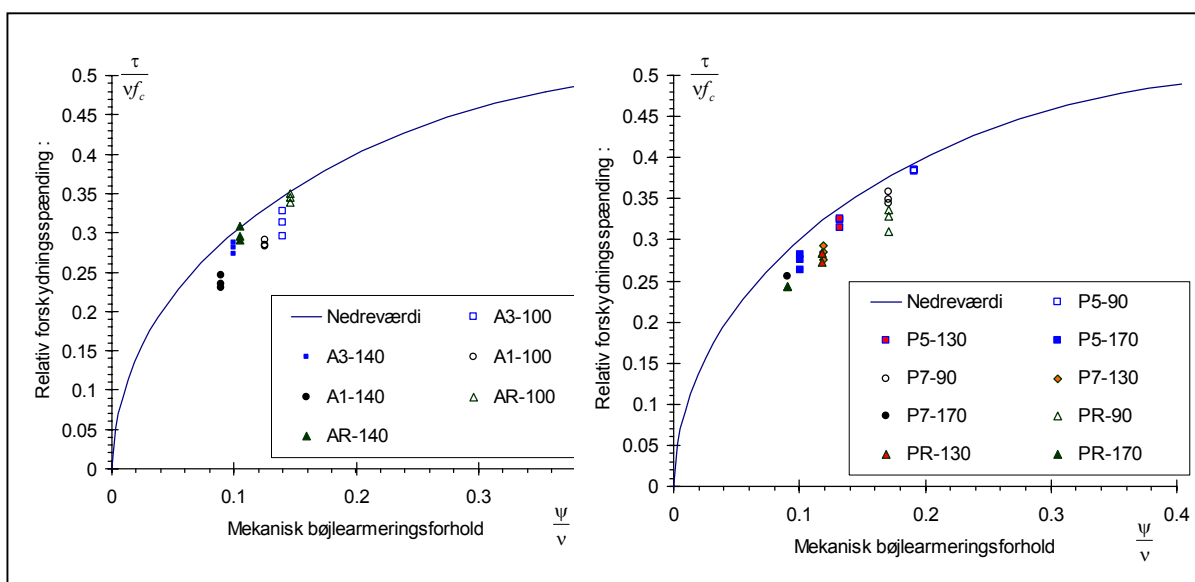
For alle målinger gælder, at svindtøjninger og vægttab følges ad [2.2].

## 2.3 Brudgrænsetilstande

De undersøgelser som er gennemført vedr. brudgrænsetilstande omfatter bøjnings- og forskydningsbæreevnen af armerede bjælker, instabilitet af søjler, betonernes forankringsevne målt på en gevindstang samt udmattelsesforsøg med varierende trykbelastning.

### Bøjning

Bjælkeforsøg er gennemført med to vidt forskellige betoner hvad angår styrkeklasse og sejhed (middeltrykstyrke 61 og 30 MPa). Bjælkerne er udsat for ren bøjning indtil trækarmeringen begynder at flyde. Det er konstateret, at DS 411 metode A og B til bestemmelse af bjælketværsnittets bæreevne giver tilfredsstillende overensstemmelse med det målte flydemoment, når betonens og armeringens målte tryk- og trækstyrke benyttes [2.4].



Figur 4: Målte forskydningsbæreevner sammenlignet med nedreværdiløsning.

Notation:  $\psi$  = mekanisk bøjlearmeringsforhold; effektivitetsfaktoren  $v = 0,7 \cdot f_c / 200$  ifølge DS 411:1999. Signaturforklaring for betontyper: PR = reference, P5 = betonslam, P7 = alternativ flyveaske; AR = reference; A1 = flyveaske; A3 = slamaske. Tallene i signaturforklaringen angiver bøjleafstanden i mm. Resultater fra [2.3].

### **Forskydning**

Forskydningsforsøg er gennemført med varierende bøjlearmering og resultaterne er sammenlignet med DS 411's diagonaltrykmetode (Figur 4). Det ses at de målte bæreevner generelt ligger i underkanten af diagonaltrykmetodens nedreværdiløsning, hvilket er udtryk for, at den anvendte effektivitetsfaktor er for høj og dermed giver for høje forskydningsbæreevner ift. forsøgsresultaterne. Det skal bemærkes, at ovennævnte er observeret for alle betonene og dermed også for referencebetonerne.

### **Instabilitet af søjler**

Søjleforsøg er udført på to betonere ligesom bøjningsforsøgene. Søjlelasten er påført med en given excentricitet indtil et udbøjningsbrud indtræffer. Forsøgsresultaterne er sammenlignet med numeriske beregninger, hvor betonernes målte trykarbejdslinier samt tillægsmomenter fra udbøjningen er inkluderet. Det er fundet, at søjlerne opfører sig som ventet på baggrund heraf og der er udmærket overensstemmelse mellem forsøg og beregninger [2.4].

### **Forankring**

Der er udført forankringsforsøg, hvor en gevindstang trækkes ud af et standardforsøgsprisme udstøbt af den betontype, der afprøves. Der foretages således en sammenligning af de grønne betoneres forankringsevne set ift. referencebetonerne og ikke nogen egentlig kvantificering af de enkelte betoneres vedhæftningsevne [2.3].

Resultatet af denne undersøgelse viser, at de grønne betonere har mindst lige så god forankringsevne som referencebetonen, når effekten af betonens trækstyrke tages i regning. Dette giver grund til at antage, at DS 411's anvisninger mht. forankringslængder ligeledes er gyldige for de grønne betonere.

### **Udmattelse**

Udmattelsesforsøgene er kun udført på to betontyper og uden nogen gentagelser. På grund af den store forsøgsusikkerhed, der traditionelt findes indenfor denne forsøgstype er konklusionerne meget sparsomme. I ét tilfælde med beton A1 opnåedes et udmattelsesbrud efter kun 130000 lastcykler, hvorimod de resterende 3 forsøg alle klarede 2 mio. cykler [2.1]. Dette kan indikere, at beton med højere styrke er mere følsom overfor udmattelse end normalstyrkebeton. Det kan dog også blot være en konsekvens af målemetodens store usikkerhed.

## 2.4 Anvendelsesgrænsetilstande

### **Nedbøjninger og revnevidder**

De udførte bøjningsforsøg [2.4] viser, at de normale teknikker til at forudsige deformationer og nedbøjninger er gyldige også for grønne betoner. Det vil sige, at begreber såsom transformeret tværsnit og urevnet/revnet inertimoment benyttes baseret på betonens og armeringens E-moduler.

De kommentarer, der er knyttet til DS 411's kvantificering af E-modulet ud fra trykstyrken (jf. Figur 2) har naturligvis direkte indflydelse på anvendelsestilstandens beregninger af nedbøjninger, revnevidder, etc.

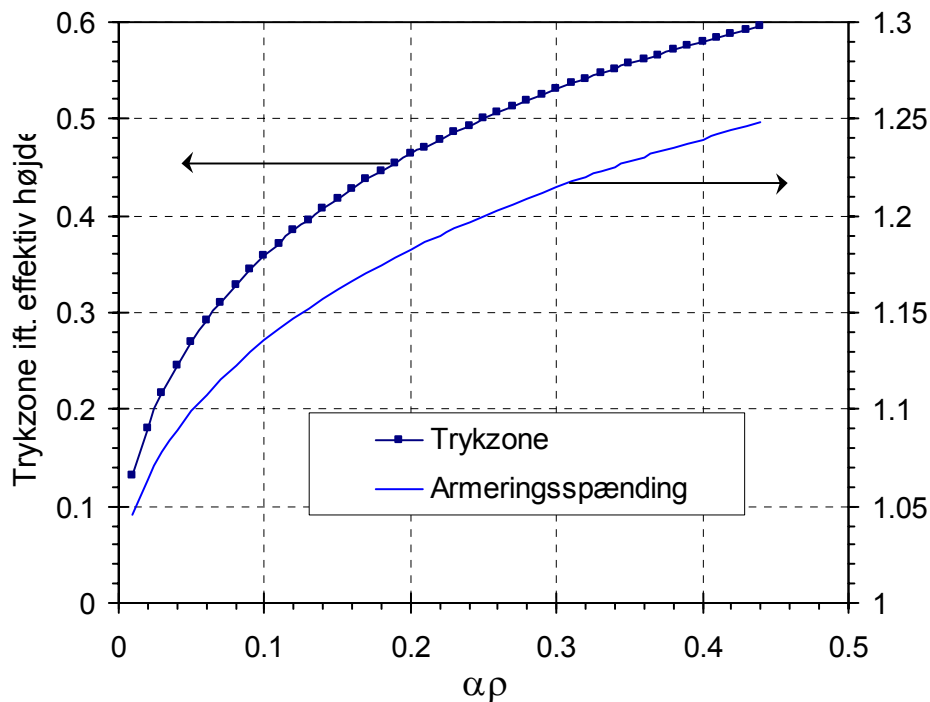
Det skal dog bemærkes, at DS 411:1999, pkt. 6.3.1 anbefaler, at E-modulet i anvendelsestilstanden sættes til 70% af  $E_0$ , hvorved der opnås overensstemmelse med de målte værdier (Figur 3).

For at vurdere effekten af at reducere E-modulet i beregningerne på en broplade er der i Appendiks A vedlagt et regneeksempel med en simpel følsomhedsanalyse for en 2-fags pladebro i spændbeton. For at kunne registrere markante ændringer er der udført en referenceberegning med E-modulet fastlagt iht. DS 411:1999 samt en beregning, hvor E-modulet er halveret. For begge disse beregninger er angivet udnyttelsesgrader i både brud- og anvendelsesgrænsetilstanden.

Konklusionerne i Appendiks A er, at brudgrænsetilstanden kun ændres marginalt af denne variation, mens anvendelsestilstanden påvirkes mere markant. Nedbøjningerne er ikke vurderet, idet de er direkte omvendt proportionale med betonens E-modul. Revnevidderne derimod er fundet til at følge E-modulet, hvor en reduktion medfører mindre revnevidder.

Ydermere er der udført beregninger efter  $\alpha\rho$ -metoden, hvor et bjælketværsnit, kun armeret i træksiden, er udsat for ren bøjning. Som en funktion af  $\alpha\rho$  (som er omvendt proportionalt med betonens E-modul) viser Figur 5, hvordan trykzonehøjden og armeringsspændingen varierer (begge øges med  $\alpha\rho$ ), når geometrien og det påførte snitmoment holdes konstant.

En reduktion af betonens E-modul svarer til at bevæge sig mod højre i Figur 5, hvorved det ses, at armeringsspændingen og dermed revnevidden øges - alt andet lige.



Figur 5: Resultat af beregning iht. DS 411:1999, metode B ( $\alpha\rho$ -metoden).  $\alpha$  = forhold mellem armerings og betons E-modul;  $\rho$  = trækarmeringsforhold. Ren bøjning uden normalkraft. Alle talværdier er normaliserede.

Som det ses peger den simple analyse af ren bøjning i Figur 5 og den komplicerede beregning af en statisk ubestemt konstruktion med forspænding (Appendiks A) i hver sin retning, hvad angår effekten på revnevidden af at reducere E-modulet. Dette viser, at der ikke er nogen entydig sammenhæng, men at effekten afhænger af alle de implicerede faktorer.

### Krybning

Krybning tages i regning ved at reducere E-modulet til en langtidsværdi. Der er udført krybeforsøg på 3 betoner i aggressiv miljøklasse [2.2]. Prøveemnerne er konstant belastet over en 3 måneders periode med godt 40 % af trykstyrken. De målte krybetøjninger, korrigeret for svind- og temperaturtøjninger, er fundet at være i tilfredsstillende overensstemmelse. Derved kan det konkluderes, at krybetallet, som benyttes i DS 411:1999 til at reducere E-modulet fra korttids- til langtidstilstanden kan benyttes for alle de afprøvede betoner.

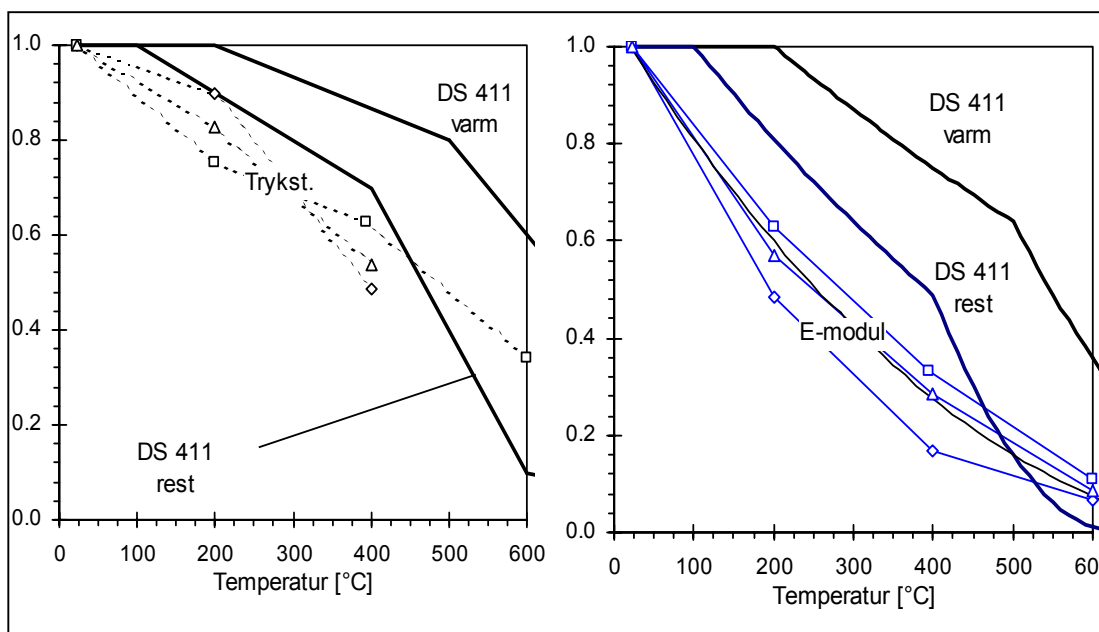
## 2.5 Brand

For tre betoner til passiv miljøklasse, der iblandt referencebetonen, er der udført forsøg med kontrolleret opvarmning til ca. 600 °C og efterfølgende afkøling [2.6]. Der er ikke fundet nogen indflydelse fra de grønne tiltag, idet opførslen under opvarmning primært er styret af tilslaget.

Det skal bemærkes, at mængden af forsøgsresultater for danske betoner udsat for høje temperaturer er sparsomme, hvilket vanskeliggør en sammenligning.

### Resttrykstyrke og E-modul målt ved høj temperatur

Resttrykstyrken er registreret på prøveemner opvarmet til ca. 200, 400 og 600 °C og efterfølgende afkølet (Figur 6). E-modulen i tryk er målt på prøveemner ved høj temperatur inden afkøling.



Figur 6: Temperaturafhængighed for resttrykstyrker (til venstre) og E-modul målt i varm tilstand (til højre). Værdier normeret mht. kolde værdier.

De fede linier angiver vejledende reduktionsfaktorer i DS 411:1999, Fig. V 9.2.1b og Fig. V 9.2.1c.

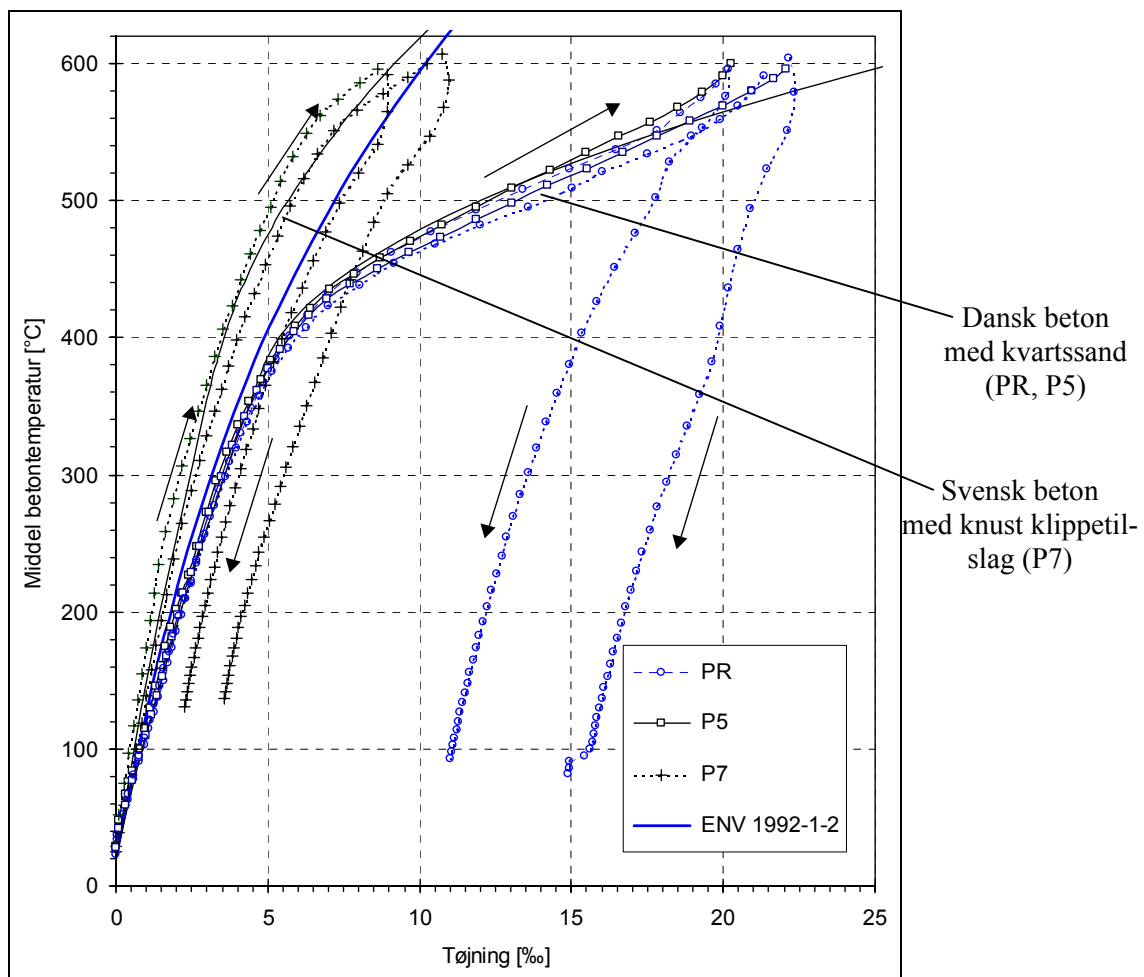
Resttrykstyrken ses at aftage med temperaturen nogenlunde i overensstemmelse med DS 411.

For E-modulen derimod angiver DS 411 en konveks temperaturkurve med knækpunkter, hvorimod forsøgene beskriver en konkav kurve (til højre i Figur 6). Den tynde linie uden symboler følger funktionsudtrykket  $(1 - (T - 20^\circ\text{C})/800^\circ\text{C})^2$ . Dette simple parabeludtryk ses at beskrive E-modulens temperaturafhængighed (middelværdier) i god overensstemmelse med forsøgene.



### Termisk udvidelse

Under opvarmning udvider betonen sig primært styret af tilslagets termiske udvidelseskoefficient. Figur 6 viser målinger af de termiske tøjninger under både opvarmning og afkøling.



Figur 7: Termisk udvidelse målt på 3 betoner til passiv miljøklasse opvarmet til ca. 600 °C og afkølet [2.6]. Anbefalingen fra Eurocode 2 er også vist i diagrammet. Signaturforklaring for betontyper: PR = reference, P5 = betonslam, P7 = alternativ flyveaske.

Målingerne i Figur 7 grupperer sig i to danske betontyper med tilslag af kvartssand og søsten, som udviser en relativ stor termisk udvidelse, og en svensk beton med knust klippetilslag som udviser langt mindre udvidelse.

Under afkøling fra 600 °C ses betonerne at trække sig sammen med ca. 1,5 ‰ per 100 °C. Dette betyder, at de danske betoner har en blivende forlængelse på godt 10 ‰ efter afkøling, hvilket kan tilskrives revnedannelse. Dette er ikke tilfældet for den svenske beton, hvor hele udvidelsen stort set er reversibel.

DS 411:1999 indeholder ingen kvantificering af temperaturudvidelsen. Indtil 400 °C følger de danske betoner funktionsudtrykket givet i Eurocode 2, hvorefter der sker en næsten momentan mangedobling af udvidelseskoefficienten fra  $15 \times 10^{-6}$  til over  $85 \times 10^{-6}$  per °C. Denne markante ændring fanges ikke af Eurocode-udtrykket (Figur 7).

## 2.6 Referencer

- [2.1] ”Arbejdskurver, spaltetrækstyrke og udmattelsesundersøgelse”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [2.2] ”Fugttransport, svind- og temperaturdeformationer samt krybning”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [2.3] ”Forskydningsbæreevne af bjælker. Forankring af gevindstænger”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [2.4] ”Bøjning af armerede bjælker. Instabilitet af søjler”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [2.5] ”CEB-FIP Model Code 1990”, CEB-Bulletin No 213/214, Comite Euro-International du Beton, 1993.
- [2.6] ”Mekaniske egenskaber under brand”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [2.7] ”Eksplisiv afskalning af beton – nyudviklet prøvningsmetode”, Center for Grøn Beton, BYG-DTU, Rapport R-050, Februar 2003.

### 3. EN 206-1 – Beton – Del 1: Specifikation, egenskaber, produktion og overensstemmelse

I dette kapitel beskrives muligheden for at implementere brugen af grøn beton i det nationale tillæg til den kommende europæiske betonstandard EN 206-1.

I afsnit 3.1 er der givet forslag til de konkrete tekster, der kunne specificeres i det danske tillæg til EN 206-1. Der bliver i overskrifterne i dette afsnit henvist til afsnitsnumrene i EN 206-1. I kapitel 3.2 er begrundelserne for de forslåede tekster diskuteret svarende til de enkelte grønne betontyper, der er arbejdet med i Grøn Beton projektet.

Der foreligger således en omfattende dokumentation for disse grønne betoners egenskaber, som kan studeres i en række rapporter, se afsnit 3.3.

#### 3.1 Forslag til "grøn" tekst i det danske tillæg til EN 206-1

##### **EN 206-1 – afsnit 5.1.6 Tilsætninger**

"Generel egnethed som type I tilsætning, se 3.1.23, er etableret for:

- betonslam, der er et restprodukt fra betonindustrien, der fremkommer ved vask af blandeanlæg og betonbiler. Tørstofindholdet i betonslammet skal opfylde kravene til filler tilslag i overensstemmelse med EN 12620."

"Generel egnethed som type II tilsætning, se 3.1.23, er etableret for:

- slammaske, der er et restprodukt fra forbrænding af spildevandsslam på danske anlæg. Egnethed for anvendelse af slammaske er nationalt etableret for anvendelse i eksponeringsklasse X0 og XC1."

Forslag til vejledende NOTE tekst:

*"Dokumentation for anvendelse af slammaske til beton i passiv miljøklasse (eksponeringsklasse X0 og XC1) er etableret i Centerkontrakten Ressourcebesparende Betonkonstruktioner."*

##### **EN 206-1 – afsnit 5.2.2 Valg af cement**

Forslag til vejledende NOTE tekst:

*"Det anbefales, at anvende den cementtype, der fremstilles med mindst miljøbelastninger og som opfylder de specificerede krav. For eksempel kan CEM I 52,5 (MS/LA/  $\leq 2$ ) anvendes i de tilfælde, hvor det er hensigtsmæssigt, som erstatning for CEM I 42,5 (HS/EA/  $\leq 2$ ), idet den førstnævnte cementtype fremstilles med mindre miljøbelastninger end den sidstnævnte."*

**EN 206-1 – afsnit 5.2.5 Brug af tilsætninger**

Afsnit 5.2.5.2.2 K-værdimetoden for flyveaske i overensstemmelse med EN 450:

”I alle eksponeringsklasser undtagen XF skal den maksimale mængde flyveaske der tillades regnet med i k-værdimetoden opfylde kravet:

$$\begin{aligned} \text{Flyveaske/cement} &\leq 0,67 \text{ svarende til} \\ \text{Flyveaske/pulver} &\leq 0,40 \text{ som vægtforhold ”} \end{aligned}$$

**EN 206-1 – afsnit 5.3.2 Grænseværdier for betonsammensætning**

Det anbefales at sætte værdien for min. ækv. cement til 150 kg i alle eksponeringsklasser med undtagelse af X0 og XC1, hvor der ikke skal være krav til min. cementindhold.

## 3.2 Baggrund for forslag til ”grøn” tekst

**Beton med mere miljøvenlig cement**

Der er i Grøn Beton projektet arbejdet med at anvende mere miljøvenlige cementtyper som erstatning for de cementtyper, der traditionelt anvendes. Fx er konsekvenserne for betonegenskaberne af at anvende CEM I 52,5 (MS/LA/≤2) som erstatning for CEM I 42,5 (HS/EA/≤2) til beton i aggressiv miljøklasse undersøgt. Dette er tilladt i henhold til den danske betonstandard DS 481 og ligeledes i henhold til EN 206-1.

Undersøgelserne i Grøn Beton projektet dokumenterer, at betoner med denne cementerstatning har fuldt ud lige så gode holdbarheds- og styrkeegenskaber, og der er en relativ stor miljømæssig gevinst ved at gennemføre denne erstatning. Derfor anbefales det at implementere en notetekst, der indeholder en anbefaling om at vælge de cementtyper med den laveste miljøpåvirkning.

**Beton med højt indhold af flyveaske**

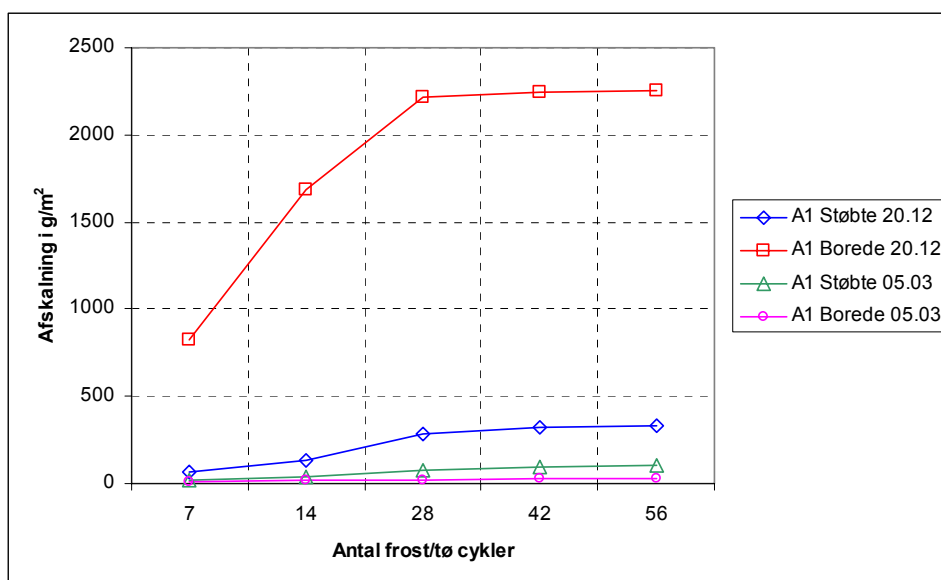
Flyveaske har i mere end 20 år været anvendt til beton som delvis erstatning for cement, dels for at anvende et industrielt restprodukt, der ellers skulle i deponi, dels for reducere forbruget af cement som er en ”tung” bestanddel i beton både mht. til pris og miljøbelastning.

Der er i DS 481 og i EN 206-1 krav til maksimalt indhold af flyveaske. I Grøn Beton projektet er der arbejdet med beton, hvor indholdet af flyveaske overskrider dis-

se maks. grænser, og konsekvenserne for sådanne betontypers egenskaber er undersøgt.

Grøn Beton projektet viste, at det til beton i passiv miljøklasse er muligt at tilsætte op til 50 % flyveaske af den totale pulverbemængde og i aggressiv miljøklasse op til 40 % uden at betonegenskaberne forringes. Der er dog en generel tendens til, at beton med meget højt indhold af flyveaske er sværere at afrette og glitte.

En af de egenskaber der har været arbejdet meget med at dokumentere, for betoner med højt flyveaskeindhold, er frostbestandigheden. Det har vist sig, at afskalningen i forbindelse med frost/tø test (SS 13 72 44) af sådanne betontyper er større sammenlignet med traditionelle betoner. Det har dog vist sig muligt at foretage de nødvendige justeringer af lufttilsætning, der skulle til for at opnå tilstrækkelig frostbestandighed. På Figur 8 er afskalningen for 2 forskellige støbninger med beton med højt flyveaskeindhold optegnet.



Figur 8: Afskalningen ved frost/tø prøvning (SS 13 72 44) af beton med højt flyveaskeindhold.

Det ses, at A1 betonen støbt d. 20.12.01 målt på borekerner har en meget stor afskalning, og kravet i DS 481 er ikke opfyldt for denne beton. På baggrund af disse resultater blev der arbejdet med at forbedre luftporestrukturen i denne betontype. Det fremgår af figuren, at dette lykkedes, idet A1 beton støbt d. 05.03.02, som det fremgår af figuren, havde en væsentlig mindre afskalning, og resultaterne opfyldte kravene i DS 481.

På baggrund af den dokumentation der er fremkommet i projektet Grøn Beton foreslås det at bibeholde de eksisterende krav til flyveaskeindhold i de eksponeringsklasser, hvor der er risiko for frost (XF), men øge grænseværdien for flyveasketilsætning i de øvrige eksponeringsklasser.

Når der arbejdes med højt indhold af flyveaske må cementindholdet i betonen nødvendigvis blive mindre. I det danske tillæg til EN 206-1 skal der specificeres krav til minimum cementindhold. Det anbefales på baggrund af resultaterne fra Grøn Beton projektet at specificere et minimumskrav til ækvivalent cementindhold på 100 kg i alle eksponeringsklasser med undtagelse af X0 og XC1 (svarende til passiv miljøklasse).

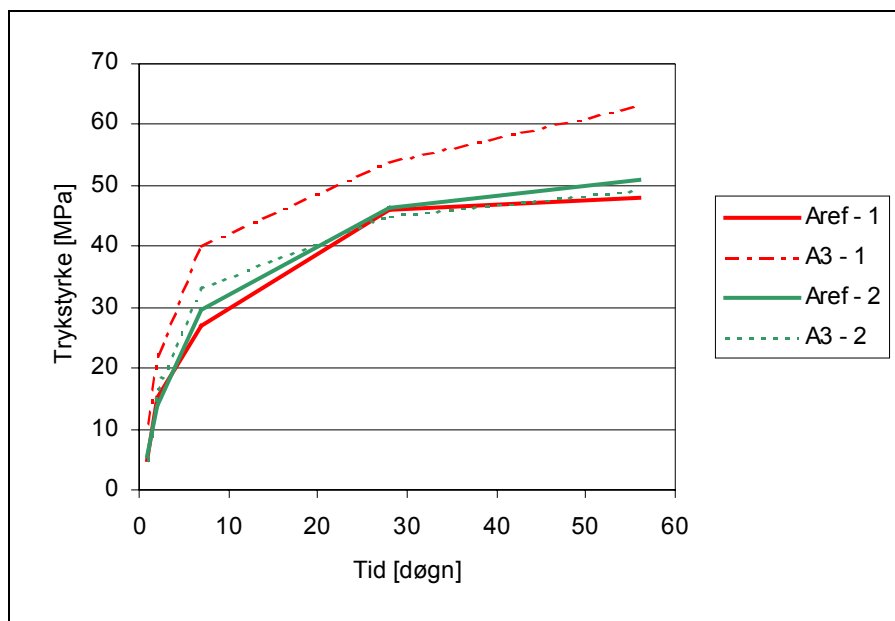
### **Beton med industrielle restprodukter**

#### Beton med slammaske

Grøn Beton projektet har arbejdet med tilsætning af nye industrielle restprodukter tilsat som puzzolaner, herunder slammaske.

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

Anvendelse af slammaske har været afprøvet til beton i passiv og aggressiv miljøklasse, og det har været muligt at fremstille beton med slammaske, der lever op til de krav, der stilles til beton i disse miljøklasser. Der er primært arbejdet med slammaske tilsat til betonen som delvis eller hel erstatning for flyveaske. Figur 9 viser som eksempel styrkeudviklingen for 2 forskellige betoner med slammaske sammenholdt med traditionelle betoner. Det skal bemærkes, at referencebetonerne A-ref er fremstillet med lavalkali sulfatbestandig cement, og slammaskebetonerne er fremstillet med rapidcement, hvilket forklarer den lidt højere styrke for slammaskebetonerne (A3) specielt til de tidlige terminer.



Figur 9: Styrkeudvikling for beton med slammaske.

Slamasken er ikke omfattet af DS/EN 450, der kun omhandler aske fra kulfyrede værker. Slamasken kan således ikke umiddelbart anvendes på lige fod med flyveaske til betonproduktion, da de nuværende bestemmelser i DS 481 fordrer, at asken er omfattet af DS/EN 450. Endvidere adskiller slamasken sig fra traditionel flyveaske på en række kemiske egenskaber, se eksempel på analyser i Tabel 1. Det skal ligeledes bemærkes, at det er uvist hvorledes den kemiske sammensætning af slamaske varierer over året, fx om kraftig regn kan medføre markante ændringer som følge af ekstraordinær rensning af vejoverflader.

Tabel 1: Kemisk analyse af forskellige slamasketyper sammenholdt med en typisk dansk flyveaske der opfylder DS/EN 450.

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

Konklusion på undersøgelserne af beton med slamaske er, at slamaske vil kunne anvendes i beton og bidrage til puzzolanreaktionerne i betonen, dog er konsekvenserne af slamaskens lidt anderledes kemiske sammensætning ikke undersøgt detaljeret nok til, at der på baggrund af resultaterne fra projektet kan opstilles krav til slamasken. Derfor anbefales det at begrænse brugen af slamaske til beton i passiv miljøklasse (eksponeringsklasserne X0 og XC1).

### Beton med alternativ flyveaske fra biobrændselsanlæg

Foruden slamaske er der arbejdet med aske fra biobrændselsanlæg som industrielt restprodukt.

Resultaterne er meget spændende og indikerer, at det er et restprodukt, der bør arbejdes videre med.

Aske fra biobrændsel er dog væsentligt anderledes end flyveaske, og det tekniske grundlag etableret i Centerkontrakten vurderes ikke at være tilstrækkeligt til at kunne foreslå tekst til indarbejdelse i det nationale tillæg til EN 206-1.

### **Beton med betonslam**

Betonslam er et restprodukt, der stammer fra vask af biler og blandeanlæg mm. Det består således af hydratiserede cementpartikler, flyveaske og mikrosilica, rester af tilsætningsstoffer samt fint sand opslemmet i vand, idet stenfraktionen skilles fra og genbruges separat.

Anvendelse af betonslam kan give anledning til styringsmæssige problemer, dels fordi tørstofindholdet varierer både over tid og lokalt i beholderen, dels fordi resterne af tilsætningsstofferne kan påvirke bearbejdelse og luftindholdet i den beton, hvor betonslammen anvendes.

De typer af betonslam, der er arbejdet med i Grøn Beton projektet, opfylder kravene til procesvand i DS 481 Annex D svarende til materialeklasse P og M. Her er kravet, at tørstofindholdet ikke må overstige 35 %. Tørstofindholdet i det betonslam, der er arbejdet med, har været varierende op til ca. 30 %.

DS 481 tillader i miljøklasse P og M anvendt procesvand, hvor det totale tørstofindhold i blandevandet ikke overstiger 10 %, og i miljøklasse A og E må tørstofindholdet i blandevandet ikke overstige 2 %. I Grøn Beton projektet er konsekvenserne for betonegenskaberne ved at overskride dette krav undersøgt.

I EN 206-1 er definitionen på procesvand lidt anderledes. Der henvises til produktstandard for vand prEN 1008, der siger, at procesvand maksimalt må indeholde 1 % tørstof i forhold til den totale tilslagsmængde pr m<sup>3</sup> beton (svarende til ca. 18 kg pr. m<sup>3</sup>). Det betyder, at de typer af betonslam med højt tørstofindhold, der er arbejdet med i Grøn Beton projektet, ikke kan klassificeres som procesvand i henhold til prEN1008.



De betontyper med betonslam, der er undersøgt i projektet, opfylder de samme krav til holdbarhed og styrke, der stilles til traditionelle betontyper. Det eneste der kan fremhæves, er at afbindingstiden for beton med betonslam reduceres, se Tabel 2, hvilket tyder på, at en del af tørstofindholdet stadig er reaktivt eller, at det virker kindannende.

Tabel 2: Afbindingstiden for 4 forskellige betontyper med betonslam i varierende mængder og med varierende tørstofindhold sammenlignet med en traditionel passiv beton.

Betontype	Afbindingstid målt ved proctormåling [timer]
Referencebeton til passiv miljøklasse	7,3
P-beton med 28 kg betonslam pr. m <sup>3</sup>	4,8
P-beton med 36 kg betonslam pr. m <sup>3</sup>	4,5
P-beton med 52 kg betonslam pr. m <sup>3</sup>	3,8
P-beton med 36 kg betonslam pr. m <sup>3</sup>	5,0

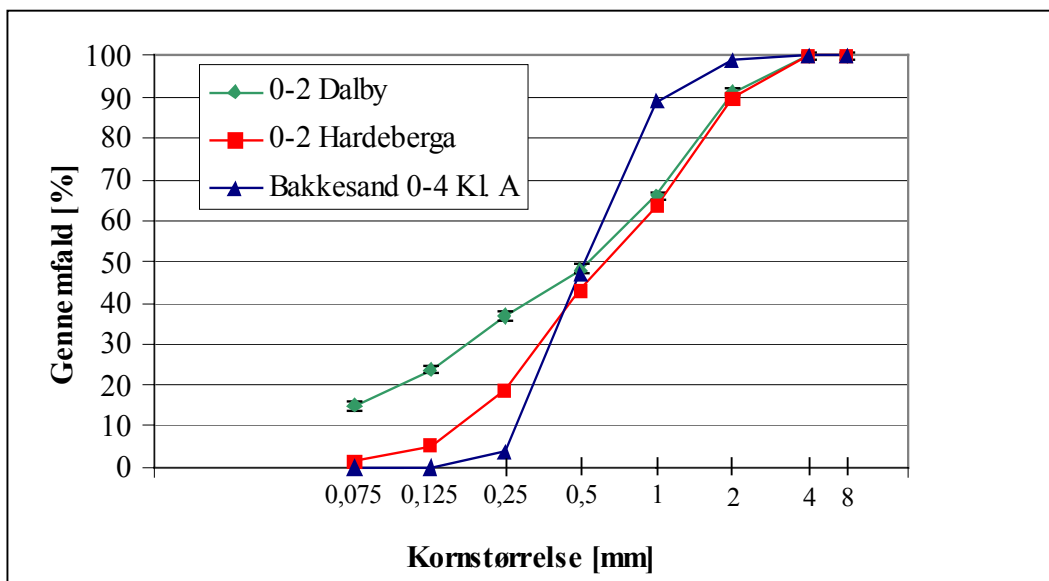
### **Beton med stenmel**

Der er i Grøn Beton projektet arbejdet med at anvende stenmel som erstatning for sand i beton.

Stenmel er et restprodukt, der stammer fra knusning af klippemateriale til blandt andet tilslag til beton. Det stenmel, der er arbejdet med i Grøn Beton projektet, minder mere om sand end det, der traditionelt betegnes stenmel. På grund af en meget kantet kornform og forholdsvis store variationer af kornstørrelsesfordelinger er denne stenmel dog hidtil kun anvendt i meget begrænset omfang til betonproduktion i forhold til de mængder stenmel, der er til rådighed.

Der findes mange typer af stenmel. I Grøn Beton projektet er der arbejdet med 2 typer. Den ene type (Hardeberga) stammer fra en vådknusningsproces, der gennemføres af hensyn til indholdet af respirabelt kvarts. I vådknusningsprocessen vaskes de meget fine fraktioner fra, hvilket betyder, at den stenmel (0-2mm), der bliver tilbage som restprodukt faktisk ligner sand meget, dog med mere kantet kornform. Det har i projektet Grøn Beton vist sig, at det er muligt at anvende denne type stenmel uden problemer.

Den anden type stenmel (Dalby), der er arbejdet med, er et restprodukt fra en tørknusningsproces. Dette materiale indeholder derfor væsentligt mere finstof, hvilket gør det mere vanskeligt at anvende denne type. Det har dog vist sig muligt i projektet at anvende den som delvis erstatning for sand, dog med større mængder superplastificerende tilsætningsstoffer for at opnå tilstrækkelig bearbejdelighed. Figur 10 viser de to typer stensemels kornstørrelsesfordelinger sammenholdt med et traditionelt sandmateriale.



Figur 10. Kornkurver for 2 typer stenmel sammenholdt med et traditionelt bakkesand kl. A.

Den førstnævnte type stenmel (Hardeberga) er således anvendelig til betonproduktion, og der er ikke noget i hverken det danske eller kommende europæiske regelgrundlag, der forhindrer at anvende denne type, hvorfor det ikke er nødvendigt at komme med forslag til tekst til EN 206-1 på området.

### 3.3 Referencer

- [3.1] ”Udførelse. Hovedrapport”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [3.2] ”Holdbarhed. Hovedrapport”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [3.3] ”Beton med reducerede CO<sub>2</sub>-emissioner”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [3.4] ”Beton med slamaske”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [3.5] ”Beton med betonslam”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [3.6] ”Beton med stenmel”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [3.7] ”Beton med alternativ flyveaske”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.

## 4. DS 482 – Udførelse af Betonkonstruktioner

I dette kapitel redegøres der for de udførelsesmæssige erfaringer, der er opnået gennem projektet Grøn Beton.

Afsnit 4.1 giver et kortfattet resumé af de opnåede erfaringer indenfor følgende emner:

- Bearbejdelighed
- Afbindingstid
- Plastisk svind
- Varmeudvikling
- Udtørningsbeskyttelsens varighed

En mere detaljeret gennemgang er givet i afsnit 4.2, og endelig kan den samlede omfattende dokumentation af de udførte undersøgelser findes i en række rapporter, som er refereret i afsnit 4.3.

I det følgende benyttes betegnelsen ”P-betoner” for betontyper til passiv miljøklasse og ”A-betoner” til aggressiv miljøklasse.

### 4.1 Resumé

#### **Generelt**

Det er muligt at producere grønne betoner med gode udførelsesmæssige egenskaber. Dog skal man være opmærksom på, at hvis betonens bearbejdelighed udelukkende styres ved hjælp af tilsætningsstoffer, kan resultatet blive en beton med et højt indhold af tilsætningsstoffer, der kan have en række negative bivirkninger:

- betonen opfattes som klistret
- øget arbejdsindsats ved udstøbning
- forlænget afbindingstid
- forsinket udvikling af styrke mm.

Det kræver et seriøst stykke arbejde at indkøre en grøn betonrecept således at, der er en god balance mellem de udførelsesmæssige egenskaber. Dette gælder i øvrigt også, når en konventionel beton skal indkøres. Det kan i den forbindelse være nødvendigt at variere på en lang række parametre (indhold af tilsætningsstoffer, pastaprocent, indhold af det pågældende restprodukt mm.) samtidig. De i Centerkontrakten afprøvede grønne recepter var under projektet endnu ikke fuldt indkørt således, at den optimale balance mellem egenskaberne var opnået. Det er derfor en skrap prøve, når disse betontyper sammenlignes med referencerecepter, der er justeret på baggrund af mange års erfaringer, og dermed er så godt optimeret som muligt.

### **Bearbejdelighed**

Ud fra undersøgelser af sætmålstab målt indenfor de første 2 timer kan det konstateres, at der ikke generelt er noget, der indikerer, at de afprøvede grønne betoner kræver kortere tid til indbygning end konventionelle betoner. Dog ses en tendens til, at beton med betonslam har større sætmålstab end de øvrige afprøvede betoner.

### **Afbindingstid**

Der er målt afbindingstider både i form af proctormålinger og ved hjælp af varmeudviklingsmålinger. Ud fra disse målinger er det dokumenteret, at afbindingstiden beregnet ud fra den målte varmeudvikling er et tilstrækkelig nøjagtigt mål i praksis, når der er tale om *normale* afbindingstider, dvs. op til ca. 10 timer.

Det er endvidere dokumenteret for de i projektet anvendte tilsætningsstoffer, at en samlet dosering af plastificerende og superplastificerende tilsætningsstoffer på op til ca. 4 kg/m<sup>3</sup> ikke påvirker afbindingstiden nævneværdigt, mens doseringer på over 4 kg/m<sup>3</sup> har stor indvirkning på denne. Undtagelsen fra denne regel er beton med betonslam, hvor alle betoner med betonslam har afbindingstider på under 5 timer uanset mængden af plastificerende tilsætningsstoffer.

### **Plastisk svind**

Ifølge DS 482 afhænger kravene til udtørningsbeskyttelse for at undgå plastiske svindrevner af, hvor meget flyveaske og mikrosilica betonen indeholder i forhold til den samlede pulvermængde. Jo mere flyveaske / mikrosilica, jo mindre fordampning kan der tillades, før betonen dækkes af eller på anden måde beskyttes mod udtørring. Forsøgene i dette projekt kan ikke understøtte, at flyveaske øger risikoen for plastiske svindrevner, jf. resultater opnået med betontypen A1.

I DS 482s krav til udtørningsbeskyttelse tages der ikke hensyn til, om betonen indeholder stenmel. Det ser ud til, at stenmelet øger betonens behov for udtørningsbeskyttelse, men det bør dog bemærkes, at betontypen A6 også er den eneste beton, der er støbt med den svenske Anlægningscement, og derfor kan behovet for tidligere udtørningsbeskyttelse alternativt skyldes cementtypen.

### **Varmeudvikling**

Ud fra de målte varmeudviklinger kan det registreres, at A-betonerne generelt har en højere total varmeudvikling end P-betonerne, hvilket naturligvis skyldes A-betonerne højere cement- og puzzolanindhold.

For P-betonerne kan der registreres en relativ stor variation i kurveforløbene for varmeudvikling, idet der både er grønne betoner med højere og lavere total varmeudvikling end referencen.

For A-betonerne ses ligeledes en stor variation på starten af varmeudviklingen, og på den totale varmeudvikling.

Generelt kan det konkluderes, at grønne betoner giver anderledes hærdeforløb end traditionelle betontyper, hvorfor dette er et område, hvor etablerede håndregler muligvis ikke altid vil være på den sikre side.

### **Udtørningsbeskyttelsens varighed**

Den store variation i betonernes varmeudvikling får ligeledes indflydelse på kravet om udtørningsbeskyttelsens varighed.

Det er i DS 482, tabel 9.7.1.2.b angivet, at for A-beton med ækvivalent v/c-forhold i intervallet 0,40-0,45 er det normalt tilstrækkelig at udtørningsbeskytte indtil betonens modenhed overstiger 120 timer.

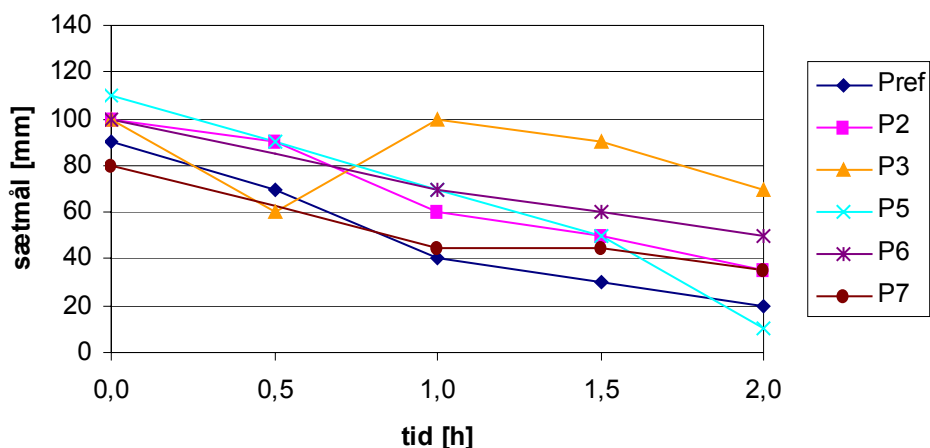
Denne vejledningstekst er imidlertid ikke på den sikre side, hvis der benyttes en grøn beton med store mængder flyveaske. Den undersøgte betontype med ca. 40 % flyveaske kræver fx en modenhed på 187 timer, før hydratiseringsgraden på 85 % er opnået, dvs. ca. 50 % længere tid målt som modenhed end anført i vejledningsteksten.

## **4.2 Bearbejdelighed**

Hvor de danske referencebetoner er blandet med plastificeringsmiddel som eneste vandreducerende tilsætningsstof, er det for flertallet af de grønne betoner, som er blandet på danske fabrikker, tillige nødvendigt at benytte et superplastificeringsmiddel for at opnå det ønskede sætmål. For de svenske betoner gælder, at hvor udgangsrecepten uden restprodukt indeholder superplastificeringsmiddel, så har det været nødvendigt enten at supplere med plastificeringsmiddel eller at øge doseringen af superplastificering. Således er mængden af tilsætningsstoffer øget i:

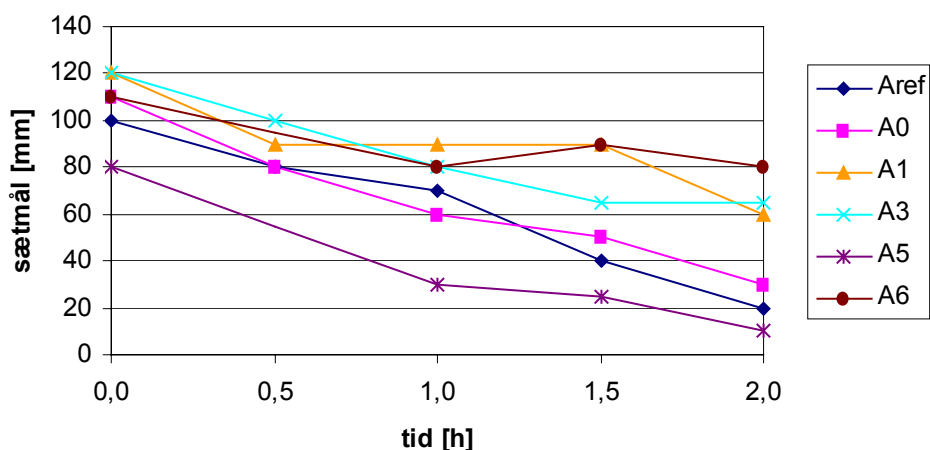
- beton med store mængder flyveaske
- beton med slamaske
- beton med betonslam
- beton med stensmel
- beton med 30% alternativ flyveaske fra biobrændsel

Ændringen af betonernes bearbejdelighed er målt hver halve time frem til 2 timer efter blanding. Resultaterne fremgår af Figur 11 og Figur 12.



Figur 11: Sætmålstab for P-betoner. Signaturforklaring for betontyper: Pref = reference, P2 = store mængder flyveaske, P3 = slamaske, P5 = betonslam, P6 = stenmel, P7 = alternativ flyveaske.

Det ses, at de grønne P-betoner har nogenlunde samme forløb af sætmålstabt som referencebetonen. Dog ser beton med betonslam, P5, ud til at miste bearbejdeligheden markant mellem 1½ og 2 timer efter blanding.



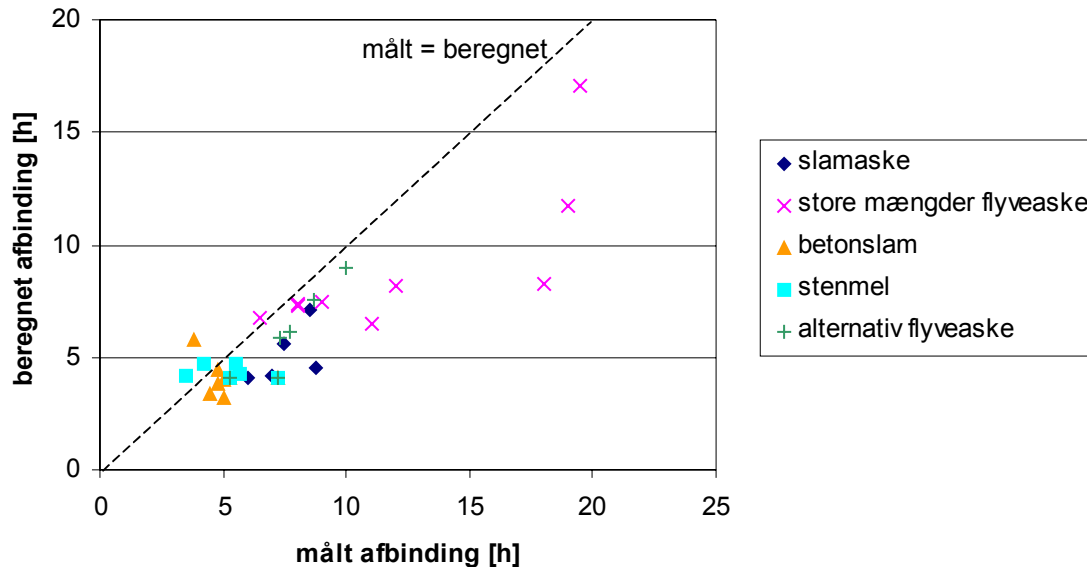
Figur 12: Sætmålstab for A-betoner. Signaturforklaring for betontyper: Aref = reference, A0 = rapidcement, A1 = store mængder flyveaske, A3 = slamaske, A5 = betonslam, A6 = stenmel.

A-betonerne har ligeledes nogenlunde samme forløb af sætmålstabt som referencebetonen. Beton med betonslam, A5, har et lavere udgangssætmål end de øvrige, hvorfor det ikke er muligt at vurdere om sætmålstabt efter 1 time ligesom for P-betonen reelt er større end for de øvrige betoner.

### 4.3 Afbindingstid

Der er blevet målt afbindingstid på en lang række af forskellige betonsammensætninger, både i form af proctormålinger og ved hjælp af måling af varmeudvikling,

hvor den beregnede parameter  $\tau_0$  er en indikation af afbindingstiden. Resultaterne fremgår af Figur 13.

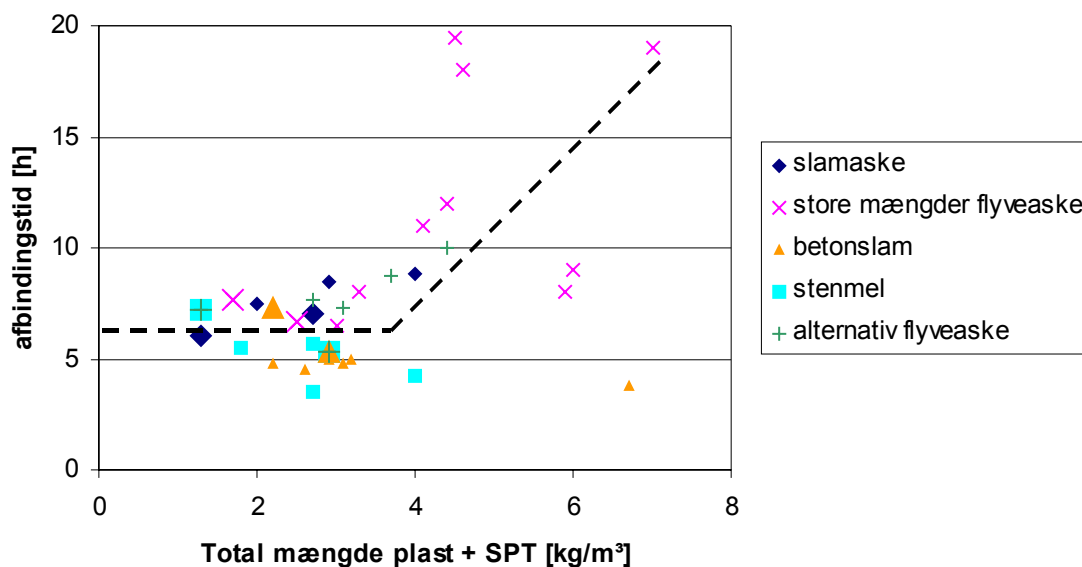


Figur 13: Afbindingstid. Beregnet afbindingstid på baggrund af varmeudviklingsresultater, som funktion af afbindingstiden målt ved hjælp af proctor.

Det ses, at der tydeligvis er en sammenhæng mellem den målte og den beregnede afbindingstid. Når forholdet mellem de to ikke er 1:1, skyldes det blandt andet, at den beregnede afbindingstid refererer til modenhedstimer ved en temperatur på 20 °C, mens den målte afbinding referer til klokketimer. Da betonens udstøbningstemperatur for de fleste betoner er lavere end 20 °C, bliver den målte afbindingstid længere. I praksis er den beregnede afbindingstid et tilstrækkelig nøjagtigt mål for afbindingstiden, når der er tale om *normale* afbindingstider, dvs. afbindingstider op til ca. 10 timer.

Det ses også, at betonens afbindingstid tilsyneladende afhænger kraftigt af anvendelsen af restprodukter. For nogle af flyveaskebetonerne er der målt afbindingstider på op imod 20 timer. Det ser således ud til, at anvendelsen af store mængder flyveaske kraftigt forsinker betonens afbinding. Det samme er tilfældet for beton med slamaske og alternativ flyveaske, dog ikke i nær så udtalt grad. Før restprodukterne tilskrives hele den forlængede afbindingstid, skal det dog nævnes, at de grønne betoner generelt har et højere indhold af tilsætningsstoffer, og at disse er kendt for at kunne virke retarderende.

I Figur 14 er den målte afbindingstid afbilledet som funktion af den samlede mængde af plastificerende og superplastificerende tilsætningsstoffer i den pågældende beton.



Figur 14: Afbindingstid (proctormåling) som funktion af mængden af plastificerende og superplastificerende tilsætningsstoffer. I hver serie er referencen fremhævet ved at forstørre symbolet.

Selvom de enkelte plastificerende stoffer ikke kan sammenlignes direkte, viser Figur 14 en klar effekt på afbindingstiden. Ved en dosering af plastificerende tilsætningsstoffer på op til ca.  $4 \text{ kg/m}^3$ , påvirkes afbindingstiden ikke nævneværdigt, mens doseringer på over  $4 \text{ kg/m}^3$  har stor indvirkning på afbindingstiden.

Undtagelsen fra denne regel er beton med betonslam. Betonslammet ser ud til at fremskynde afbindingen, og selvom større mængder betonslam også kræver større mængder tilsætningsstoffer, ser betonslammet ud til at have den største effekt, så alle betoner med betonslam har afbindingstider på under 5 timer.

I Figur 14 er referencebetonerne markeret med forstørrede symboler, hvoraf det ses, at referencebetonerne alle har doseringer af plastificerende tilsætningsstoffer under  $4 \text{ kg/m}^3$ . I Grøn Beton projektet er det besluttet at fastholde pastaprocenten i alle betoner, bl.a. for at gøre det nemmere at sammenligne miljøbesparelser. Men det ses, at for de grønne betoner giver dette et noget ulige sammenligningsgrundlag med hensyn til afbindingstid og andre egenskaber, der påvirkes som en bivirkning af tilsætningsstofferne.

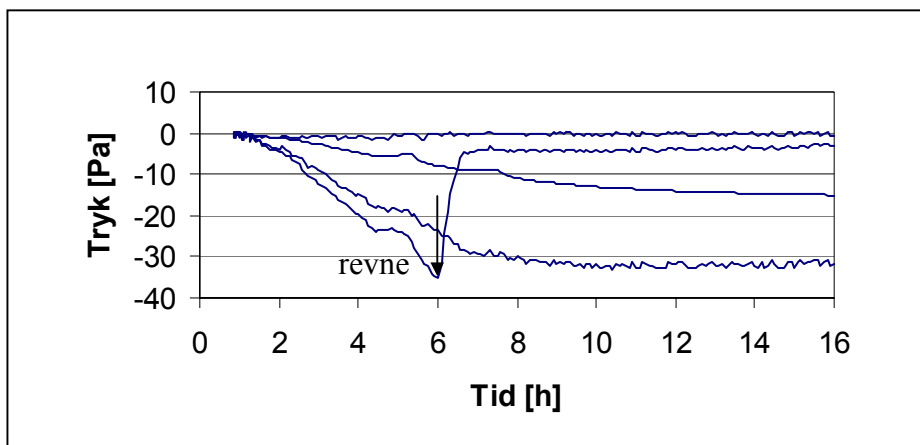
#### 4.4 Plastisk svind

Det er blevet undersøgt, om der nemmere opstår plastiske svindrevner i grønne betoner end i konventionelle betoner, og om der derfor er behov for at skærpe kravene til udtørningsbeskyttelse.

Undersøgelserne er udført ved at påvirke betonprøveemner i en vindtunnel under kontrollerede klimaforhold. I hvert prøveemner monteres et antal kunstige kapillarporer, hvor trykket måles. I begyndelsen af udtørningsforløbet falder trykket i disse



porer på grund af overfladespændingens indvirkning, men ved revnedannelse omkring den kunstige kapillarporer, udlignes trykforskellen. På den måde er det muligt at detektere plastiske svindrevner som pludselige trykændringer, se Figur 15. Samtidigt registreres betonens vægt løbende, så den fordampede vandmængde kan beregnes.



Figur 15: Poreundertryk målt for referencebetonen Pref (i alt 4 kunstige kapillarporer).

Resultaterne er sammenfattet i Tabel 3 og Tabel 4.

De anførte fordampningsmængder kan ikke direkte sammenlignes med DS 482, tabel 9.7.1.1.a vedr. krav til maksimalt tilladelig fordampning før etablering af udtøringsbeskyttelse, idet prøveemnerne kun har en tykkelse på 40 mm, og det vurderes ikke at være forsvarligt at reducere de maksimale vandmængder proportionalt svarende til denne lille tykkelse.

Tabel 3: Sammendrag af resultater fra forsøg med plastisk svind (P-betoner). Signaturforklaring for betontyper: Pref = reference, P3 = slamaske, P5 = betonslam, P7 = alternativ flyveaske.

	Pref	P3	P5	P7
Fordampningshastighed <sup>1</sup> [kg/(m <sup>2</sup> h)]	0,6	0,6	0,6	0,5
Fordampning ved første tegn på revnedannelse [kg/m <sup>2</sup> ]	2,0	0,7	1,7	1,7
Ophør af våd overflade [h]	5	4	5	4-5
Krav til maks fordampning iht. DS 482 [kg/m <sup>2</sup> ]	1,5	1,5	1,5	1,5

1. Forsøgsbetingelserne varierede lidt ved de enkelte forsøg. Her er alle resultater omregnet til følgende betingelser: lufttemperatur 20°C, relativ luftfugtighed 50%, vindhastighed 5 m/s og betontemperatur 15°C. Fordampningshastigheden gælder frem til ophør af våd overflade.

Det ses, at P-betonerne har nogenlunde ens fordampningshastighed og at overfladerne ophører med at være våde nogenlunde samtidig. Det ses, at hvis afdækning var etableret i overensstemmelse med DS 482, ville hverken Pref, P5 eller P7 have fået plastiske svindrevner. P3 (beton med slamaske) ville muligvis have fået plastiske svindrevner, selvom afdækningen var etableret korrekt. Dette er dog svært at

vurdere, da det som allerede nævnt er uklart om fordampningen skal sammenlignes med et krav på  $1,5 \text{ kg/m}^2$  eller et proportionalt reduceret på  $0,3 \text{ kg/m}^2$ .

Tabel 4: Sammendrag af resultater fra forsøg med plastisk svind (A-betoner). Signaturforklaring for betontyper: Aref = reference, A0 = rapidcement, A1 = store mængder flyveaske, A3 = slammaske, A6 = stenmel.

	Aref	A0	A1	A3	A6
Fordampningshastighed <sup>1</sup> [kg/(m <sup>2</sup> h)]	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7
Fordampning ved første tegn på revnedannelse [kg/m <sup>2</sup> ]	1,5	0,7	- <sup>2</sup>	1,4	0,8
Ophør af våd overflade [h]	3	4	<sup>3</sup>	4	4-5
Krav til maks fordampning iht. DS 482 [kg/m <sup>2</sup> ]	3,0	3,0	1,5	3,0	6,0

1. Forsøgsbetingelserne varierede lidt ved de enkelte forsøg. Her er alle resultater omregnet til følgende betingelser: lufttemperatur 20°C, relativ luftfugtighed 50%, vindhastighed 5 m/s og betontemperatur 15°C. Fordampningshastigheden gælder frem til ophør af våd overflade.
2. A1 viste ingen tegn på revnedannelse.
3. På grund af målefejl på vægtregistrering er det ikke muligt at bestemme, hvornår overfladen ophørte med at være våd

Fordampningshastigheden er lidt større for A-betonerne og overfladerne bliver hurtigere tørre end for P-betonerne. Desuden er der større indbyrdes forskelle mellem A-betonerne end mellem P-betonerne.

Aref, A0 og A3 har puzzolanindhold (indhold af mikrosilica, flyveaske og slammaske) på ca. 14 % og mikrosilicaindhold lidt under 5 %, og derfor skal betonerne udtøringsbeskyttes i henhold til kravet om maksimal fordampning på  $3,0 \text{ kg/m}^2$  (svarende til  $0,6 \text{ kg/m}^2$  for en 40 mm tyk konstruktion). Det er vanskeligt at vurdere, om disse betoner med mere realistiske konstruktionstykkelser ville være revnet, da fordampningen ved første revnedannelse for alle tre betoner ligger i intervallet  $0,6\text{-}3,0 \text{ kg/m}^2$ .

A1 skal på grund af det høje flyveaskeindhold på ca. 40 % af pulverbælgningen opfylde det skrappeste krav på  $1,5 \text{ kg/m}^2$ . Der stilles således skrappe krav til denne betons beskyttelse end til nogle af de andre A-betoner. Dette til trods for, at denne beton som den eneste ikke viste tegn på revnedannelse.

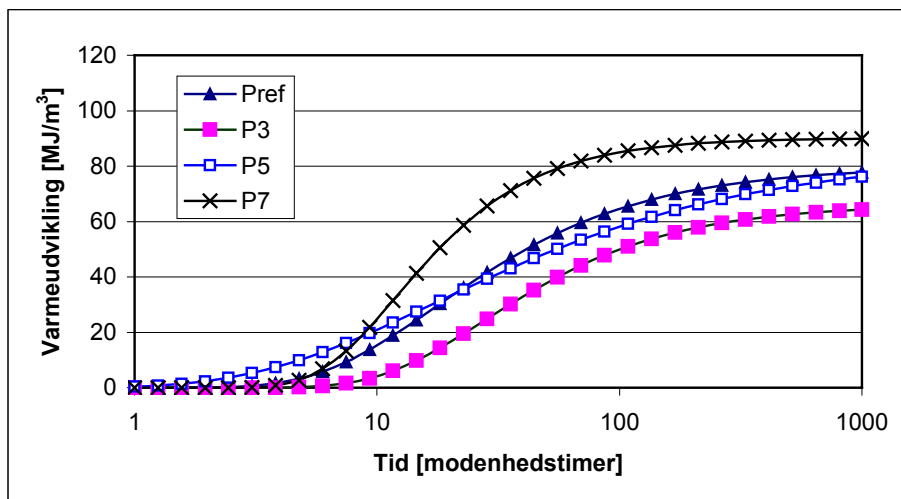
A6 er den eneste beton uden flyveaske og mikrosilica. Derfor foreskriver DS 482, at A6 først skal udtøringsbeskyttes, når fordampningen når  $6,0 \text{ kg/m}^2$  ( $1,2 \text{ kg/m}^2$  for den 40 mm tykke konstruktion). Det ses, at selvom kravet til den tynde konstruktion var anvendt, ville det ikke være nok til at undgå plastiske svindrevner, da første revne indtraf efter en fordampning på  $0,82 \text{ kg/m}^2$ . Dette skyldes muligvis, at stenmel indeholder mere finstof end traditionelt betonsand. A6 indeholder ca. 785 kg filler (dvs. partikler mindre end 0,25 mm) pr. m<sup>3</sup> mørtel, hvor de øvrige A-betoner indeholder 650-670 kg filler pr. m<sup>3</sup> mørtel (beregningsforudsætning: fillerindhold i stenmel: 19 %, fillerindhold i sand: 3 %). Resultaterne peger således på, at kravene til udtøringsbeskyttelse af beton med stenmel bør skærpes, evt. ved at sidestille stenmelets fillerindhold med puzzolanske tilsætninger. Det skal dog lige bemærkes,

at A6 indeholder svensk Anlægningscement, hvorfor det ikke kan udelukkes at grunden til at kravene ikke passer til denne betontype er at kravene er baseret på erfaringer med danske cementtyper.

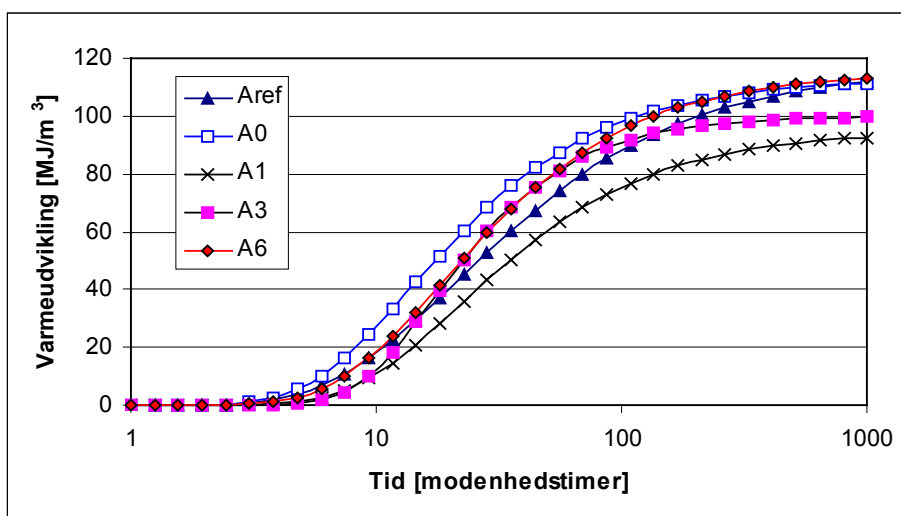
## 4.5 Varmeudvikling og varighed af udtørningsbeskyttelse

Bestemmelse af varmeudvikling er foretaget i henhold til standarden NT BUILD 388. Den friske beton placeres i en såkaldt hokasse, der fungerer som et semi-adiabatisk kalorimeter. Herefter måles betonens temperatur og varmetabet fra hokassen løbende, så varmeudviklingen kan beregnes.

Figur 16 og Figur 17 viser varmeudviklinger bestemt på hhv. P- og A-betoner.



Figur 16: Varmeudvikling på P-betoner. Signaturforklaring for betontyper: Pref = reference, P3 = slammaske, P5 = betonslam, P7 = alternativ flyveaske.



Figur 17: Varmeudvikling på A-betoner. Signaturforklaring for betontyper: Aref = reference, A0 = rapidcement, A1 = store mængder flyveaske, A3 = slammaske, A6 = stenmel.

Som det ses på figurerne har A-betonerne generelt en højere total varmeudvikling end P-betonerne, hvilket naturligvis skyldes A-betonernes højere cement- og puz-zolanindhold per m<sup>3</sup> beton.

For P-betonerne kan der registreres en relativ stor variation i kurveforløbene, idet der både er grønne betoner med højere og lavere total varmeudvikling end referencen, og de grønne betoner har ligeledes både en hurtigere og langsommere start på varmeudviklingen end referencen.

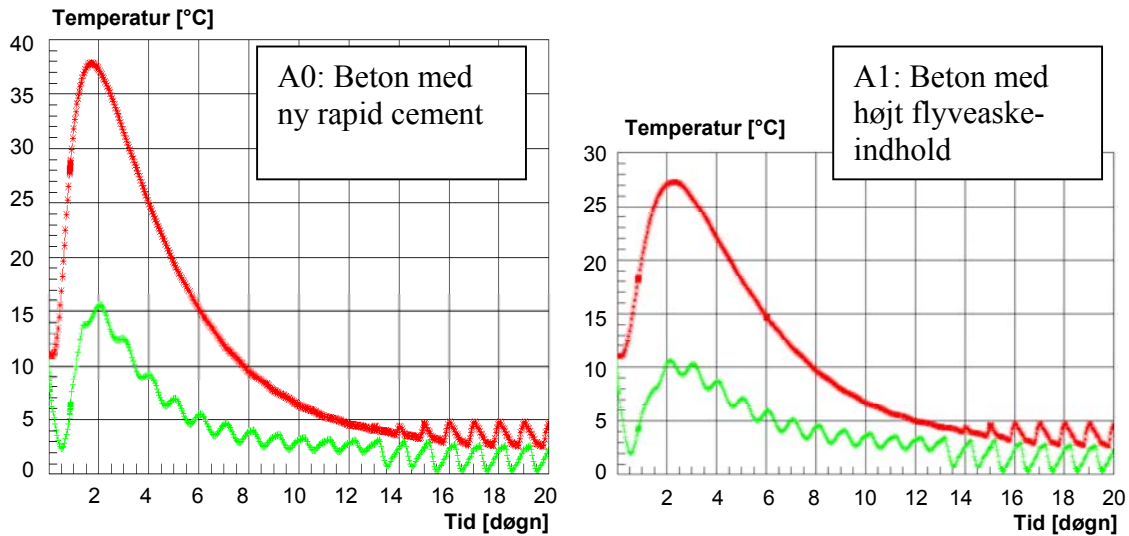
For A-betonerne ses ligeledes en stor variation på starten af varmeudviklingen, og der er flere af de grønne betoner der har lavere total varmeudvikling end referencen.

Generelt kan det konkluderes, at grønne betoner giver anderledes hærdeforløb end traditionelle betontyper, hvorfor dette er et område hvor etablerede håndregler, muligvis ikke altid vil være på den sikre side.

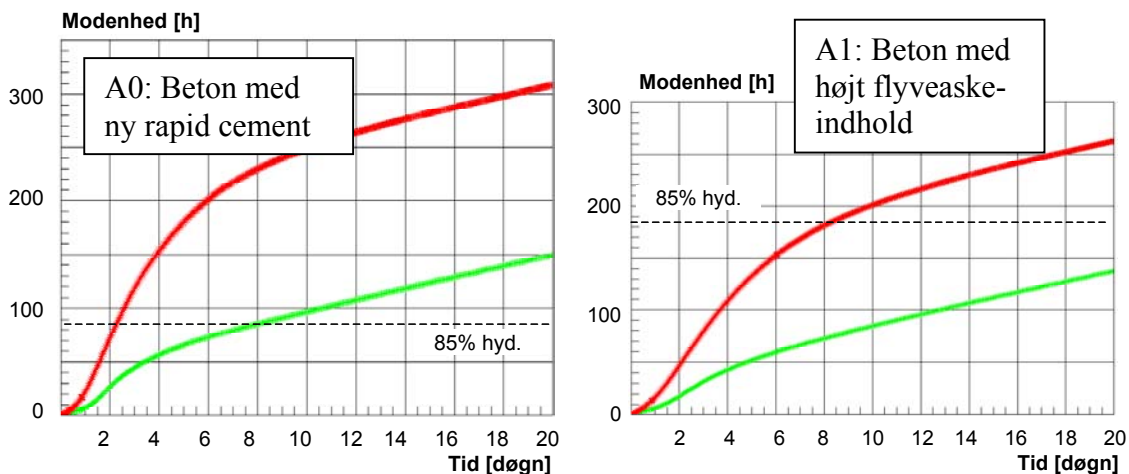
For eksempel er varmeudviklingen for betonen med store mængder flyveaske, A1, markant langsommere end referencen, hvilket medfører at denne beton ligeledes har en langsommere hydratisering.

Dette har både fordele og ulemper. Det er en fordel med hensyn til risiko for revnedannelse, men det er en ulempe specielt om vinteren, at betonen kræver meget lang tid til at opnå en hydratiseringsgrad på 85%, hvor udtørningsbeskyttelsen i henhold til DS 482, tabel 9.7.1.2.a, kan fjernes.

En simulering af en brostøbning om vinteren er udført, hvor lufttemperaturen i hele simuleringsperioden svinger mellem 0 og 5°C, og hvor der afformes efter 13 døgn (samme afformningstidspunkt som for demonstrationsbroen). De beregnede temperatur- og modenhedsudviklinger, når der anvendes hhv. beton med ny rapid cement, A0, og beton med højt flyveaskeindhold, A1, ses i Figur 18 og Figur 19.



Figur 18: Simuleret temperaturudvikling i brodæk støbt med A0 (til venstre) og A1 (til højre). De øverste kurver svarer til brodækkets centertemperatur, mens de nederste kurver beskriver temperaturen i kantbjælkens overflade.



Figur 19: Simuleret modenhedsudvikling i brodæk støbt med A0 (til venstre) og A1 (til højre). De øverste kurver svarer til modenheden i brodækkets midte, mens de nederste kurver beskriver kantbjælkens modenhed.

Ved vinterstøbningen slår A1s langsomme varmeudvikling dobbelt igennem. A0s hurtige varmeudvikling sætter en kædereaktion i gang: Varmeudviklingen får temperaturen til at stige, hvilket øger reaktionshastigheden, så der udvikles mere varme. Således når broens centertemperatur ved støbning med A0 op på 38°C, mens kantbjælkens maksimumtemperatur når op på ca. 15°C. Med A1s langsomme varmeudvikling, når centertemperaturen kun op på 27°C og temperaturen i kantbjælken når op på 10°C. Som tommelfingerregel fordobles reaktionshastigheden, når temperaturen stiger 10°C, og derfor betyder disse temperaturforskelle meget for modenhedstilvæksten. Det ses da også i Figur 19, at A1s modenhed sakker bagefter A0 i de første døgn efter støbning.

I DS 482 er krav til varighed af udtørningsbeskyttelse angivet i forhold til betonens hydratiseringsgrad, udtrykt på basis af betonens adiabatisk varmeudvikling. Udtørningsbeskyttelsen må således for beton i miljøklasse A først fjernes, når betonens hydratiseringsgrad overstiger 85%. De målte varmeudviklinger i Grøn Beton-projektet har vist, at det svarer til 87 modenhedstimer for A0 og 187 modenhedstimer for A1 (disse grænser er indtegnet med stiplede linier i Figur 19). Kombinationen af, at A1 skal opnå en større modenhed og at modenhedensudviklingen samtidigt er langsommere, betyder, at kantbjælken ved de simulerede temperaturforhold kræver mere end 20 døgns udtørningsbeskyttelse, mens afdækningen for A0-kantbjælken kan fjernes efter blot 8 døgn.

I øvrigt bør det bemærkes, at det i DS 482's vejledningstekst er angivet, at for A-beton med ækvivalent v/c-forhold i intervallet 0,40-0,45 kan kravet om en hydratiseringsgrad på 85% anses for opfyldt, når betonens modenhed overstiger 120 timer.

En sådan vejledningstekst, der kan benyttes, når der ikke foreligger en måling af varmeudvikling, bør være på den sikre side. Det er den imidlertid ikke, hvis der benyttes beton med store mængder flyveaske. A1 kræver en modenhed på 187 timer, før hydratiseringsgraden på 85% er opnået, dvs. ca. 50% længere tid målt som modenhed end anført i vejledningsteksten.

## 4.6 Referencer

Denne rapport bygger på resultater fra følgende rapporter:

- [4.1] "Udførelse. Varmeudvikling og plastisk svind", Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, September 2002.
- [4.2] "Udførelse. Hærdesimuleringer for Demobro", Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [4.3] "Udførelse. Hovedrapport", Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.
- [4.4] "Demobro", Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.

## Appendiks A

### Indflydelse af reduceret E-modul på brodesign

#### Formål

At gennemføre en beregning for analyse af indflydelsen af betonens E-modul på:

- brudberegning af et betontværsnit.
- Revneviddeberegning af et betontværsnit.

Beregningerne er udført med et finite elementmetode program (FEM) af COWI.

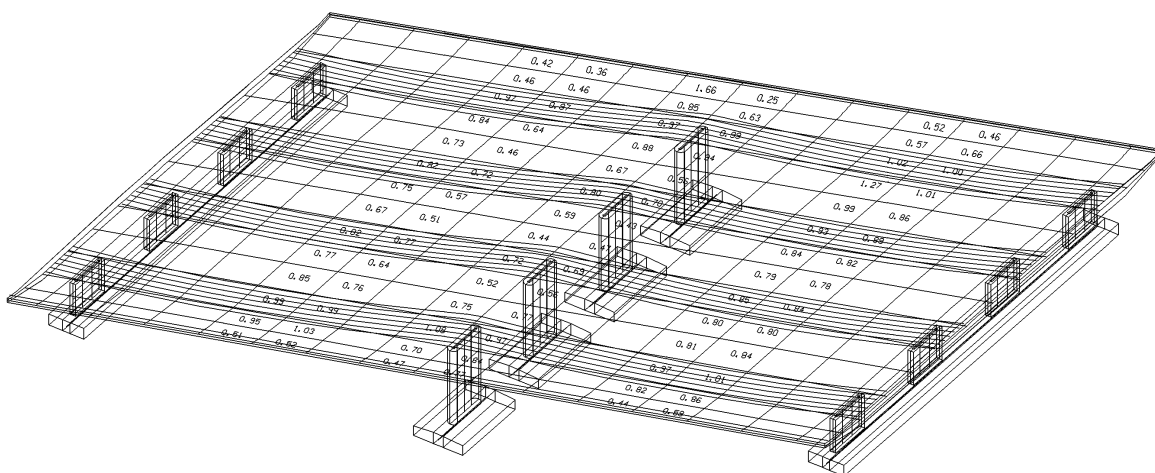
#### Beskrivelse af bro og beregningsmetode

En almindelig 2-fags pladebro er udvalgt som objekt for analysen. Broen er efter-spændt på langs, dvs. i retning parallel med den overførte vej, mens den er slapt armeret i tværetningen. Se bagest i teksten for broens hovedmål.

Der er regnet med egenvægt af konstruktionsmaterialer og af belægning. Som bevægelig last er valgt et klasse 100 køretøj ("Beregningsregler for eksisterende broers bæreevne", Vejdirektoratet, 1996), dvs. et køretøj, der er lettere end den egentlige designkøretøjer iht. Vejdirektoratets designforskrifter.

Normgrundlaget er DS 411:1999.

Der er angivet variation for middelværdier af udnyttelsesgrader, regnet på 2x2 snit i fag samt 1x2 snit langs mellemunderstøtningen, se nedenstående figur for angivelse af snit. Ved udnyttelsesgrad forstås for f.eks. den beregnede spænding i armeringen i forhold til den regningsmæssige flydespænding. Ligeledes for revnevidder, hvor den aktuelt beregnede revnevidde sættes i forhold til den tilladelige revnevidde.



## Resultater

### Brudgrænsetilstande - ULS

I brudberegningerne ses det, at en reduktion af E-modulet til 50 % af referenceværdien (iht. DS 411:1999) medfører følgende resultater:

	A reference	B
$E_{0k}$ , reduktionsfaktor	1.00	0.50

I midten af fag 23.1 (middelværdi af 2x14 udnyttelsesgrader)

Udnyttelsesgrad	A reference	B	reduktion [%]
Beton, total	0.64	0.63	1.6
Tvær-TOP, slap arm.	0.38	0.39	2.6 ↑
Tvær-BOT, slap arm.	0.41	0.41	0
Langs-TOP, slap arm.	0.00	0.00	0
Langs-BOT, slap arm.	0.46	0.49	6.5 ↑
Forspænding	0.64	0.65	1.5 ↑

Ved mellemunderstøtning (middelværdi af 2x14 udnyttelsesgrader)

Udnyttelsesgrad	A reference	B	reduktion [%]
Beton, total	0.73	0.68	6.8
Tvær-TOP, slap arm.	0.58	0.59	1.7 ↑
Tvær-BOT, slap arm.	0.11	0.11	0
Langs-TOP, slap arm.	0.44	0.47	6.8 ↑
Langs-BOT, slap arm.	0.04	0.04	0
Forspænding	0.59	0.59	0

I midten af fag 23.5 (middelværdi af 2x14 udnyttelsesgrader)

Udnyttelsesgrad	A reference	B	reduktion [%]
Beton, total	0.73	0.72	1.4
Tvær-TOP, slap arm.	0.38	0.39	2.6 ↑
Tvær-BOT, slap arm.	0.49	0.49	0
Langs-TOP, slap arm.	0.00	0.00	0
Langs-BOT, slap arm.	0.63	0.65	3.2 ↑
Forspænding	0.63	0.64	1.6 ↑

#### I fag:

- stiger udnyttelsesgraden af den trækpåvirkede, langsgående slappe armering i undersiden af tværsnittet med ca. 3-7 % (Langs-BOT)
- stiger udnyttelsesgraden af den forspændingen i undersiden af tværsnittet med ca. 1,5 % (forspænding)
- stiger udnyttelsesgraden af den trækpåvirkede, tværgående slappe armering i oversiden af tværsnittet med ca. 2,6 % (Tvær-TOP)
- udnyttelsesgraden af den trækpåvirkede, tværgående slappe armering i undersiden af tværsnittet er uændret (Tvær-BOT)
- den samlede udnyttelsesgrad af betonen (bøjning, vridning og forskydning) reduceres med ca. 1,5%

#### Over mellemunderstøtning:

- stiger udnyttelsesgraden af den trækpåvirkede, langsgående slappe armering i oversiden af tværsnittet med ca. 6,8 % (Langs-TOP)
- er udnyttelsesgraden af den forspændingen i oversiden af tværsnittet uændret
- stiger udnyttelsesgraden af den trækpåvirkede, tværgående slappe armering i oversiden af tværsnittet med ca. 1,7 % (Tvær-TOP)
- den samlede udnyttelsesgrad af betonen (bøjning, vridning og forskydning) reduceres med 6,8% (Beton)

Generelt er en reduktion angivet positiv i ovenstående tabeller, mens en forøgelse af udnyttelsesgraden er angivet ved en pil.



En konklusion på beregningerne for brudgrænsetilstanden er, at selv en halvering af betonens E-modul ikke har nogen signifikant indflydelse på gennemsnitsværdierne for et pladebro-tværsnits bæreevne. Over for denne konklusion for gennemsnitsværdierne skal det dog erindres, at der for enkeltværdier skal forventes en noget større variation.

**Anvendelsestilstande - SLS**

I beregningen af revnevidder ses det, at en reduktion af E-modulet til 50 % af referenceværdien (iht. DS 411:1999) medfører følgende indikationer:

	<b>A</b> reference	<b>B</b>
E <sub>0k</sub> , reduktionsfaktor	1.00	0.50

I midten af fag 23.1 (middelværdi af 2x14 udnyttelsesgrader)

<b>Udnyttelsesgrad</b>	<b>A</b> reference	<b>B</b>	<b>reduktion</b> [%]
Tvær-TOP, slap arm.	0.42	0.41	2
Tvær-BOT, slap arm.	0.34	0.29	15
Langs-TOP, slap arm.	0.00	0.00	0
Langs-BOT, slap arm.	0.18	0.12	33

Ved mellemunderstøtning (middelværdi af 2x14 udnyttelsesgrader)

<b>Udnyttelsesgrad</b>	<b>A</b> reference	<b>B</b>	<b>reduktion</b> [%]
Tvær-TOP, slap arm.	0.74	0.66	11
Tvær-BOT, slap arm.	0.08	0.06	25
Langs-TOP, slap arm.	0.48	0.30	38
Langs-BOT, slap arm.	0.02	0.01	50

I midten af fag 23.5 (middelværdi af 2x14 udnyttelsesgrader)

<b>Udnyttelsesgrad</b>	<b>A</b> reference	<b>B</b>	<b>reduktion</b> [%]
Tvær-TOP, slap arm.	0.44	0.44	0
Tvær-BOT, slap arm.	0.54	0.48	11
Langs-TOP, slap arm.	0.00	0.00	0
Langs-BOT, slap arm.	0.54	0.47	13

**I fag:**

- reduceres revnevidden for den trækpåvirkede, langsgående slappe armering i undersiden af tværsnittet med 13-33 % (Langs-BOT)
- reduceres udnyttelsesgraden af den trækpåvirkede, tværgående slappe armering i oversiden af tværsnittet med ca. 0-2 % (Tvær-TOP)
- reduceres udnyttelsesgraden af den trækpåvirkede, tværgående slappe armering i undersiden af tværsnittet med ca. 11-15 % (Tvær-TOP)

**Over mellemunderstøtning:**

- reduceres udnyttelsesgraden af den trækpåvirkede, langsgående slappe armering i oversiden af tværsnittet med ca. 38 % (Langs-TOP)
- reduceres udnyttelsesgraden af den trækpåvirkede, tværgående slappe armering i oversiden af tværsnittet med ca. 11 % (Tvær-TOP)

Konklusionen på beregningerne for anvendelsesgrænsetilstanden er, at en halvering af betonens E-modul har en signifikant indflydelse på gennemsnitsværdierne for et pladetværsnits revnevidde med udnyttelsesgrader, der reduceres med op til ca. 40 %.

Forklaringen på denne mindskelse af revnevidden er, at når E-modulet reduceres vil der ske en ændring af tværsnittets tøjningsplan således, at trækarmeringen udsættes for en mindre spænding.

