



Center for Grøn Beton

Udførelse Hærdesimuleringer for Demobro

Udført af:

Claus Vestergaard Nielsen

Anette Berrig

Teknologisk Institut, Beton, december 2002

Titel: Udførelse
Hærdesimuleringer for Demobro

Udført af: Claus Vestergaard Nielsen
Anette Berrig

Dato: December 2002

ISBN: 87-7756-692-0

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

Indholdsfortegnelse

0.	INDLEDNING	4
1.	FORUDSÆTNINGER	5
1.1	BROENS GEOMETRI	5
1.2	BEREGNINGSMODEL.....	5
2.	MATERIALEEGENSKABER I TIDLIG ALDER	7
2.1	VARMEUDVIKLING.....	7
2.2	MEKANISKE EGENSKABER	8
2.3	SVIND, KRYBNING OG TEMPERATUR	12
3.	TEMPERATURBEREGNINGER	13
3.1	MODENHEDSUDVIKLING	15
3.2	SOMMERSCENARIO.....	15
4.	SPÆNDINGSBEREGNINGER	18
5.	KONKLUSIONER	21
5.1	TEMPERATUR OG MODENHED.....	21
5.2	HÆRDESPÆNDINGER	21
6.	REFERENCER	23

Bilagsoversigt

Bilag 1	Beregningsforudsætninger for 4C-Temp&Stress
Bilag 2	Temperaturberegninger på A1 recept
Bilag 3	Temperaturberegninger på A0 recept
Bilag 4	Tilsynets støberapport og entreprenørens temperaturmålinger
Bilag 5	Tilnærmet spændingsberegning på A1 recept
Bilag 6	Tilnærmet spændingsberegning på HETEK recept
Bilag 7	Temperaturberegning under sommerforhold på recept A0

0. Indledning

I forbindelse med Grøn Beton projektet er opført en Demobro for at afprøve de nye grønne betoner. Som en del af dokumentationen for denne bro er undersøgt de tidlige egenskaber for betontype A1. Disse egenskaber er rapporteret i [1] og indgår som inddata til nærværende rapport.

For at vurdere risici for revnedannelse i broens første leveuger er der udført hærdeberegninger, hvor indflydelsen fra følgende materialeegenskaber er medtaget:

- varmeudvikling,
- udvikling af mekaniske egenskaber,
- temperaturudvidelseskoefficient,
- autogent svind og krybning.

Denne rapport indeholder resultater fra hærdeberegninger udført vha. beregningsprogrammet 4C-Temp&Stress, ver. 2.10.

I Demobroen er indbygget forskellige grønne betoner og andre miljøvenlige tiltag [4]. Brodækket er udstøbt af følgende tre betontyper (Figur 1):

- Beton AR, referencebeton til aggressiv miljøklasse.
- Beton A0, som AR men med ny rapidcement (NRC i stedet for SAC).
- Beton A1, som A0 men med et højt flyveaskeindhold (35 % af pulver)

1. Forudsætninger

1.1 Broens geometri

Demobroen er opført ved Tørring og overfører Tørringvej over ny motortrafikvej. Broen er en konventionel 3-fags efterspændt betonbro med spændvidderne 10,7 m 16,6 m og 10,8 m (Figur 1). Der er benyttet forskellige betontyper i de forskellige konstruktionselementer. I brodækket er der indbygget 2 grønne betoner foruden referencebeton AR samt A3 som er benyttet i sætningspladerne [4].

Broens underbygning er ikke behandlet i nærværende rapport.

Brotværsnittet består af en massiv krop (ca. 0,8×3,6 m) samt vinger med en udkraget længde på 3,2 m. Dette giver en total bredde på 10 m målt mellem y.s. kantbjælker.

Spændarmeringen er placeret i tværsnittets krop, i alt 9 kabler (type 13C15).

1.2 Beregningsmodel

Der er modelleret et halvt brotværsnit i 4C-Temp&Stress pga. symmetribetragtninger. I Bilag 1 er beregningsgrundlaget vedlagt. I Tabel 1 er de termiske randbetingelser opsummeret.

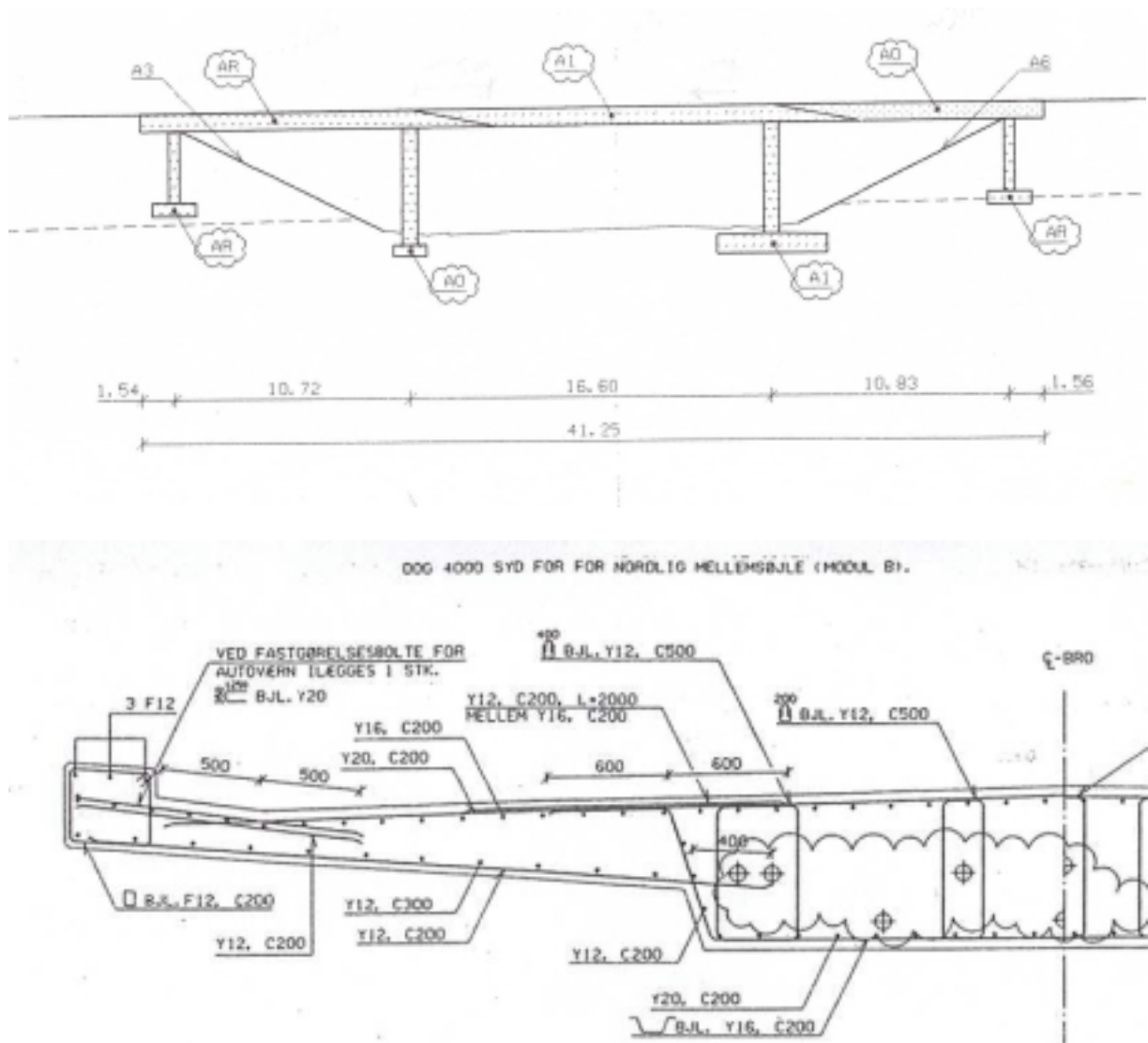
Brodækket er støbt den 20. marts 2002 og tidligt næste morgen blev det afdækket med plast og vintermåtter. Umiddelbart efter udstøbning den 20. marts blev der påført udtørningsbeskyttelse i form af curing membran. Den 26. marts 2002 blev forspændingskablerne opspændt. Den 2. april 2002 blev afdækningen fjernet og derefter blev forskalling og form fjernet.

Rand	Randbetingelse	Tidsrum [timer efter støbning]
Underside og yderside	Bræddeforskalling, 32 mm	Fra 0 til 360
Overside af vinger og kantbjælker	Vintermåtter, 55 mm	Fra 20 til 312
Overside af brodæk (central del)	Plastfolie med 5 mm mellemrum	Fra 20 til 312

Tabel 1: Termiske randbetingelser. Se også Bilag 1.

Temperaturberegningerne er foretaget med en sinusformet udetemperatur. Døgnvariationen forløber mellem 0 og 5 °C og vindhastigheden er holdt konstant lig 5 m per sekund igennem hele hærdeforløbet. Betonens udstøbningstemperatur er bestemt til mellem 10 og 12 °C i tilsynets støberapport. I temperaturberegningerne er benyttet en værdi på 11 °C.

For at illustrere effekten af randbetingelserne er der i Bilag 7 foretaget en beregning, hvor randbetingelserne modellerer et tænkt sommerscenario med udetemperaturer mellem 15 og 20 °C, og oversiden af brodækket er afdækket med plastfolie overalt fra 20 timer. Desuden er betontemperaturen sat til 18 °C ved udstøbningens start.



Figur 1: Længde- og tværsnit i Demobro med angivelse af indbyggede betontyper. Tegninger er ikke målfaste.

2. Materialeegenskaber i tidlig alder

Der er kun foretaget en fuld bestemmelse af egenskaberne i tidlig alder på beton A1, se [1]. Derfor kan en fuldstændig hærdesimulering kun foretages for denne beton. Imidlertid kendes materialedata for en lignende konventionel anlægsbeton i aggressiv miljøklasse fra tidligere projekter såsom HETEK og erfaringerne herfra bruges til at foretage en sammenligning med beton A1.

2.1 Varmeudvikling

For alle de grønne betoner er bestemt varmeudvikling vha. hækasseforsøg iht. NT Build 388:1992. Dette er tilstrækkeligt til at beregne temperaturudviklingen umiddelbart efter udstøbning.

I Tabel 2 er summeret de målte parametre for varmeudviklingen [3]. Figur 2 viser forløbet af følgende analytiske udtryk:

$$Q(M) = Q_{\infty} \cdot \exp\left(-\left(\frac{\tau_c}{M}\right)^{\alpha}\right)$$

Beton	Q_{∞} [MJ/m ³]	τ_c [timer]	α [-]
AR*	117	21,4	0,82
A0*	113	14,2	1,01
A1-1*	95	22,2	0,98
A1-2**	101	21,5	0,84
HETEK [2]	98	14,2	0,96

Tabel 2: Materialeparametre til beskrivelse af varmeudviklingen, jf. Figur 2.

Noter: * Angiver blanding udført af og hos TI, Taastrup [3]. ** Angiver blanding hos Unicon, Horsens og efterfølgende transport til Taastrup [1]. Det er A1-2 som ligger til grund for denne rapport's beregninger.

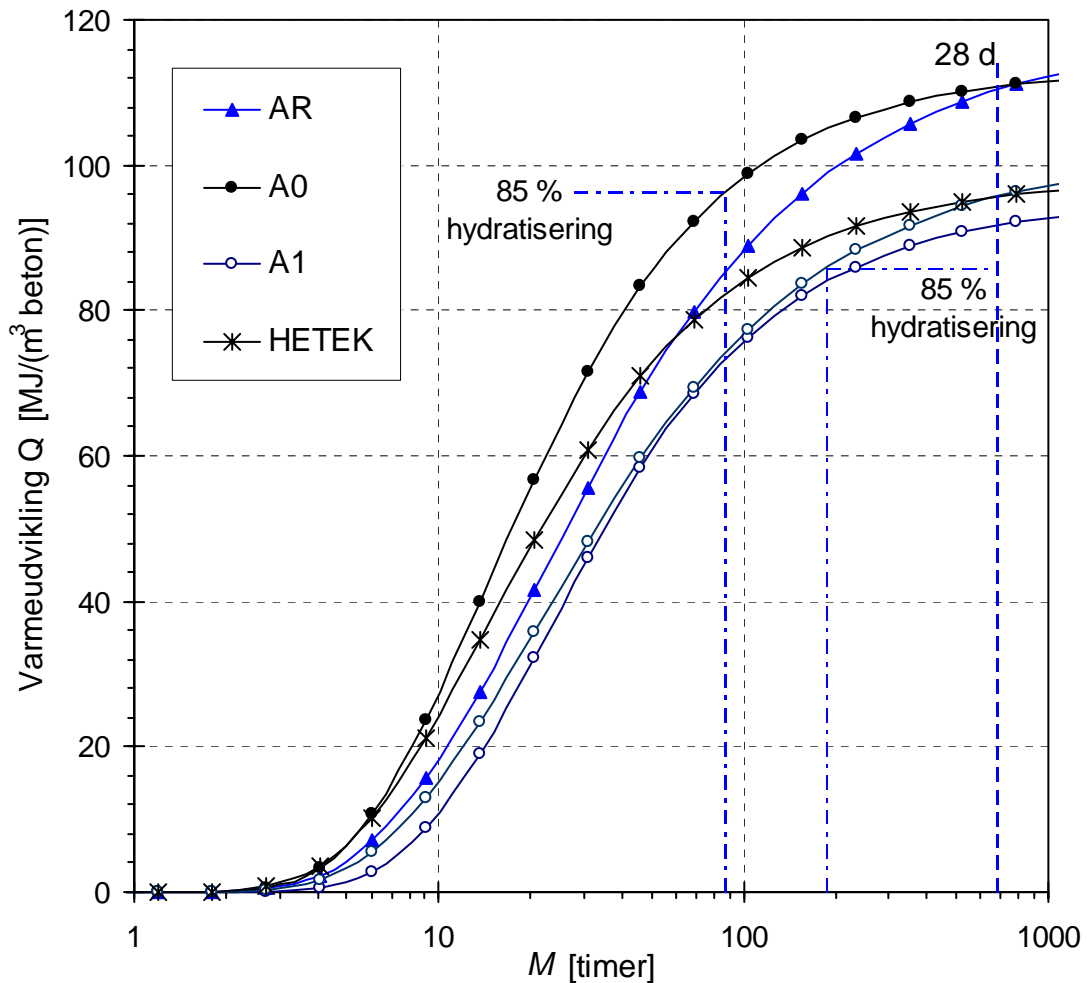
Af Figur 2 ses det, at beton A0 har den højeste varmeudvikling til alle tidspunkter primært pga. en lavere τ_c . Ligeledes ses det, at beton A1 ligger lavest til alle tidspunkter.

Modenheden M er defineret på sædvanlig vis:

$$M(t) = \int H(T(t)) dt$$

hvor hastighedsfunktionen H angiver hydratiseringsraten, der afhænger af aktiveringsenergien E og temperaturen T :

$$H(T) = \exp\left\{\frac{E(T)}{8,314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})} \left(\frac{1}{293 \text{ K}} - \frac{1}{273 \text{ K} + T}\right)\right\}$$



Figur 2: Varmeudvikling som funktion af modenhed. Bemærk at varmeudviklingen er angivet per volumen i stedet for per kg cement som det normalt er tilfældet. Dette er gjort for at lette sammenligningen mellem de forskellige betontyper. De angivne hydratiseringsgrader benyttes i afsnit 3.1.

2.2 Mekaniske egenskaber

De mekaniske egenskaber er målt ½, 1, 3, 7 og 28 døgn efter udstøbning. Hovedresultaterne ses i Tabel 3 og i Tabel 4 i form af parametre til følgende analytiske udtryk:

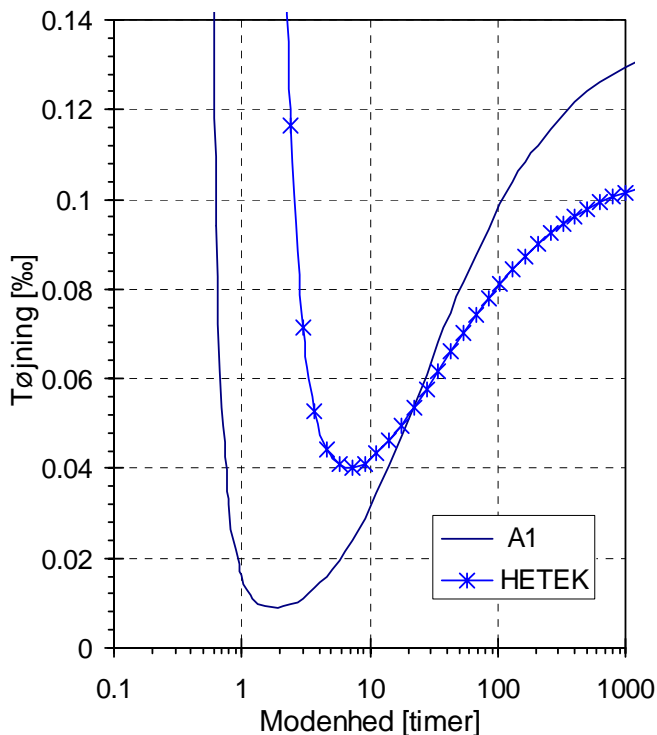
$$V(M) = V_{\infty} \exp\left(-\left(\frac{\tau_e}{M}\right)^{\alpha}\right)$$

Egenskab	V_{∞} [MPa]	τ_e [timer]	α [-]
E-modul	35000	19,59	1,0
Trykstyrke	72,4	72,6	0,8
Spaltetrækstyrke	4,85	47,1	0,8

Tabel 3: Parametre til beskrivelse af de mekaniske egenskabers udvikling for A1 beton.

Egenskab	V_{∞} [MPa]	τ_e [timer]	α [-]
E-modul	34327	12,89	1,15
Trykstyrke	60,1	65,34	0,52
Spaltetrækstyrke	3,7	29,22	0,77

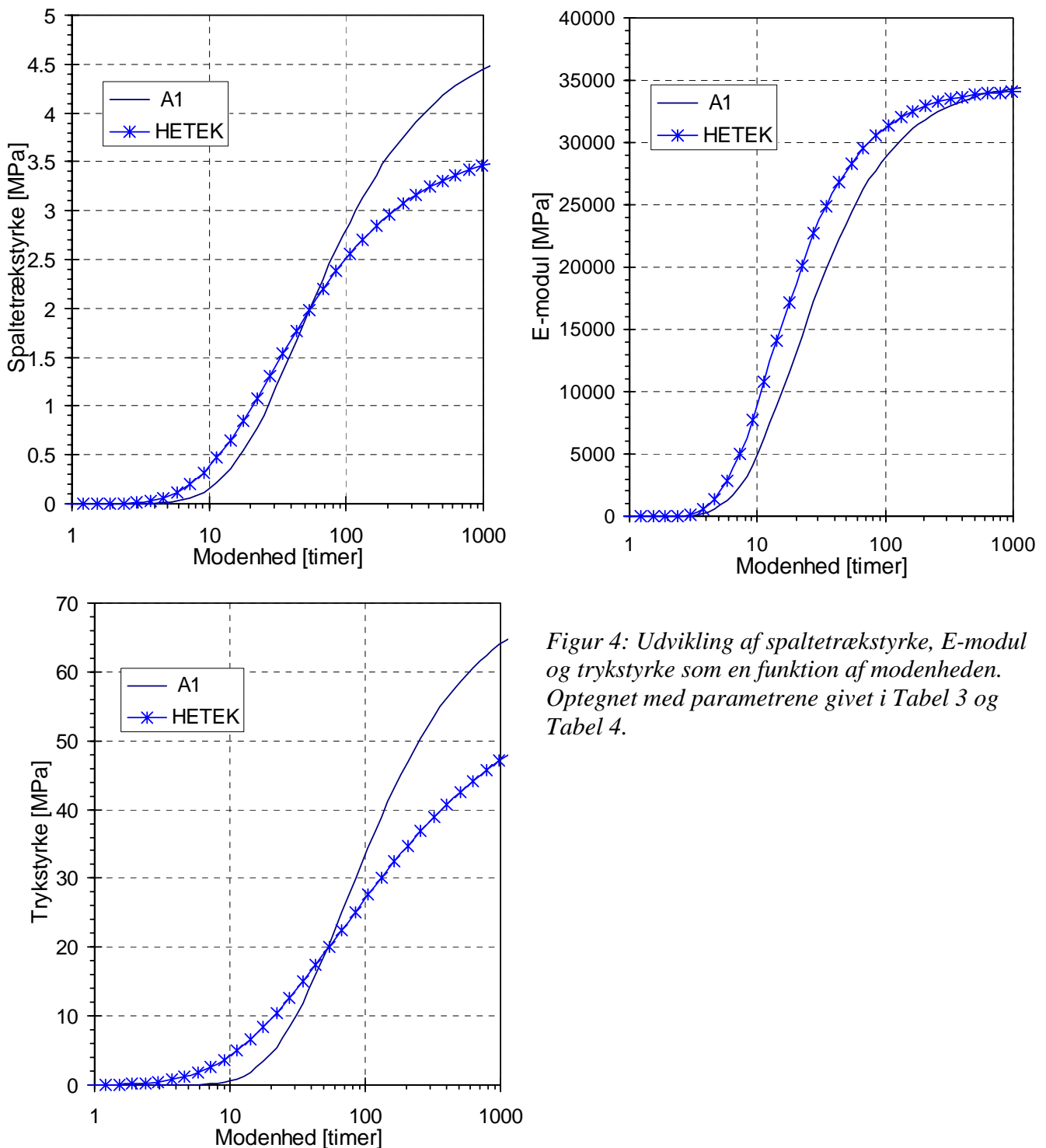
Tabel 4: Parametre til beskrivelse af de mekaniske egenskabers udvikling for HETEK beton [2].



Figur 3 viser hvordan trækbrudtøjningen først falder kraftigt, hvorefter den stiger til et niveau svarende til $M \rightarrow \infty$. Denne opførsel er velkendt i betons tidligste fase, hvor stivheden stiger hurtigere end trækstyrken og øger risikoen for revnedannelse. Det ses dog at for A1 falder brudtøjningen markant hurtigere end for HETEK og til et lavere niveau.

Figur 3: Forhold mellem spaltetrækstyrke og E-modul udtrykt som trækbrudtøjning som en funktion af modenheden. Optegnet med parametrene givet i Tabel 3.

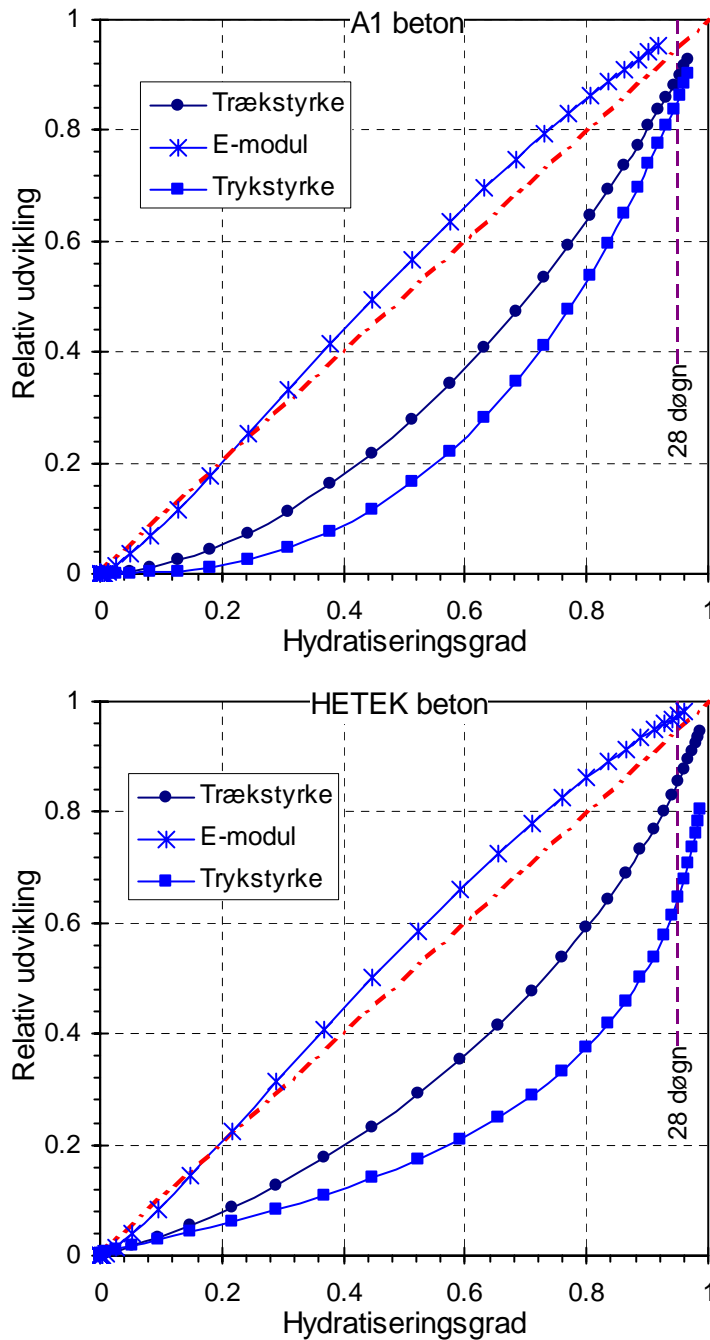
I Figur 4 er optegnet udviklingen af de mekaniske egenskaber for de to betontyper.



Figur 4: Udvikling af spaltetrækstyrke, E-modul og trykstyrke som en funktion af modenheden. Optegnet med parametrene givet i Tabel 3 og Tabel 4.

Det ses tydeligt at HETEK betonen starter opbygningen af tryk og trækstyrke tidligst, mens A1 har en hurtigere udviklingsrate efter nogen tid. For E-modulet derimod foregår udviklingen hurtigst for HETEK betonen.

Endelig er de mekaniske egenskabers udvikling optegnet i Figur 5 som en funktion af hydratiseringsgraden, baseret på varmeudviklingen.

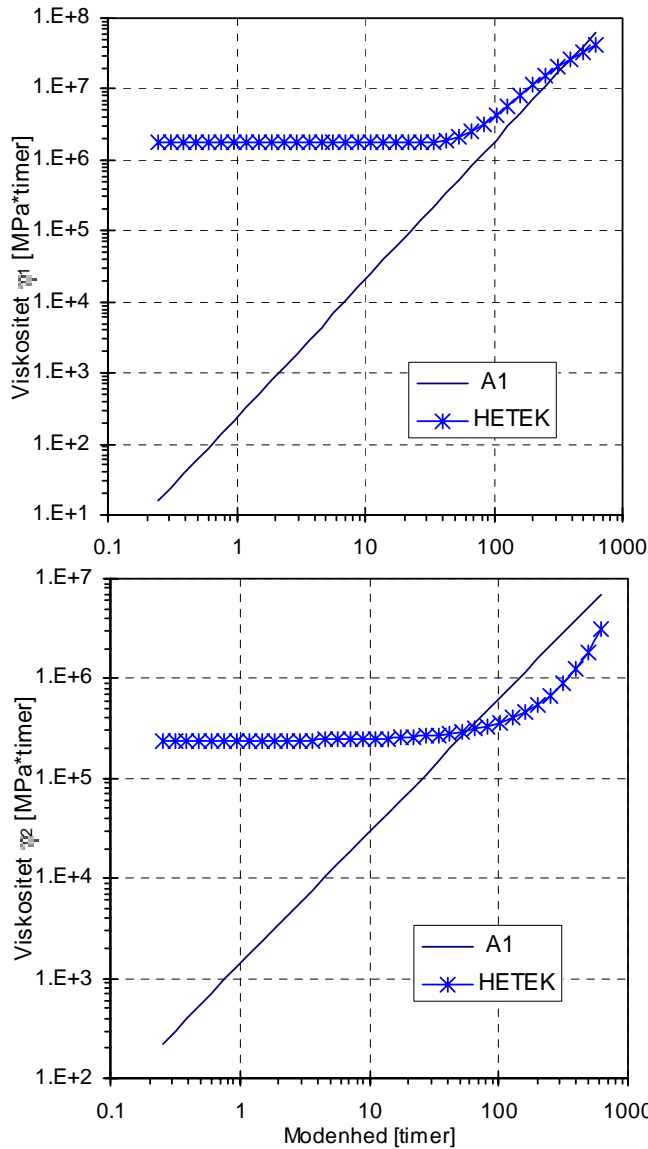


Figur 5: Udvikling af spalte-trækstyrke, E-modul og trykstyrke som en funktion af hydratiseringsgraden. Optegnet med parametrene givet i Tabel 3 og Tabel 4. Værdierne er normaliseret mht. deres slutniveau.

Det er bemærkelsesværdigt, at E-modulet i store træk følger hydratiseringsgraden, mens tryk- og trækstyrkeudviklingen hovedsagelig udvikles i den sidste halvdel af hydratiseringsprocessen.

2.3 Svind, krybning og temperatur

For de øvrige materialeegenskaber vedr. svind-, krybnings- og temperaturdeformationer henvises til [1] og [2], hvor disse er beskrevet i detaljer. I Bilag 1 er vedlagt udskrifter fra 4C-Temp&Stress, hvor egenskabernes udvikling er vist som funktion af modenheden.

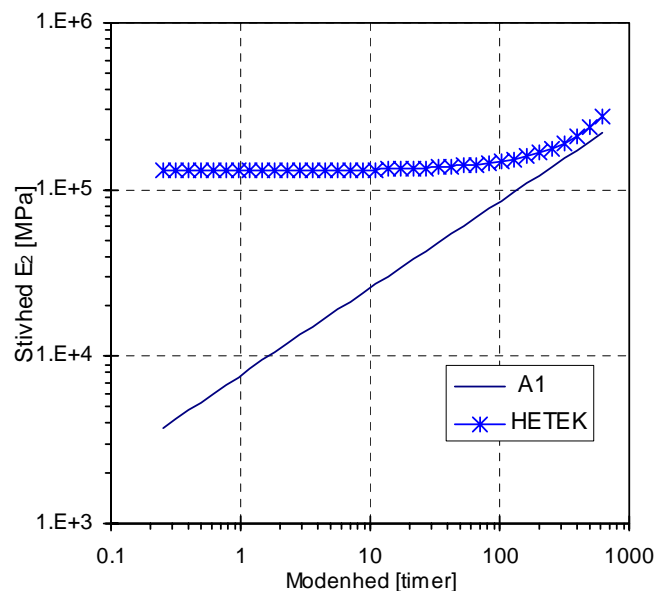


Figur 6: Udvikling af krybeegenskaber iht. [1] og [2]. Bemærk optegning af analytiske udtryk og ikke måledata. Viskositeten η_1 er en dæmper sat i serieforbindelse med et Kelvinelement bestående af η_2 og E_2 .

Temperaturudvidelseskoefficienten for A1 er bestemt i [1] og er ca. 20-30 % højere end den der er bestemt for HETEK betonen i [2]. Det autogene svind for de første 1000 modenhedstimer vokser til 0,14-0,18 ‰ for A1, mens det kun andrager ca. det halve for HETEK betonen.

For de tidlige krybeegenskaber er forskellen mellem A1 og HETEK meget tydelig især for de tidligste modenhedstimer (Figur 6). Dette skyldes en forskel i hvordan de tre parametre er udtrykt analytisk i [1] og [2] - hhv. et potensudtryk og et eksponentielt udtryk.

HETEK betonen får dermed en nedre grænse for parametrene, mens A1 betonen udgør en stigende ret linie i et dobbeltlogaritmisk koordinatsystem.



3. Temperaturberegninger

Med udgangspunkt i de termiske randbetingelser, som er anført i afsnit 1.2, og de materialedata som er anført i Bilag 1 er udført temperaturberegninger på brotværnsnittet. I Bilag 2 og 3 ses beregningsresultater med hhv. betontype A1 og A0. Disse to typer er valgt, idet de udgør ekstremssituationer iht. Figur 2.

I Figur 7 er vist forløbet af maksimums- og minimumstemperatur i brodækket for A1 og A0. Førstnævnte optræder ca. midt i kroppen, mens sidstnævnte optræder i kantbjælken. Bølgerne på minimumstemperaturen afspejler omgivelsestemperaturens døgnrytme. I Bilag 2 og 3 ses desuden isotermer optegnet til forskellige tidspunkter.

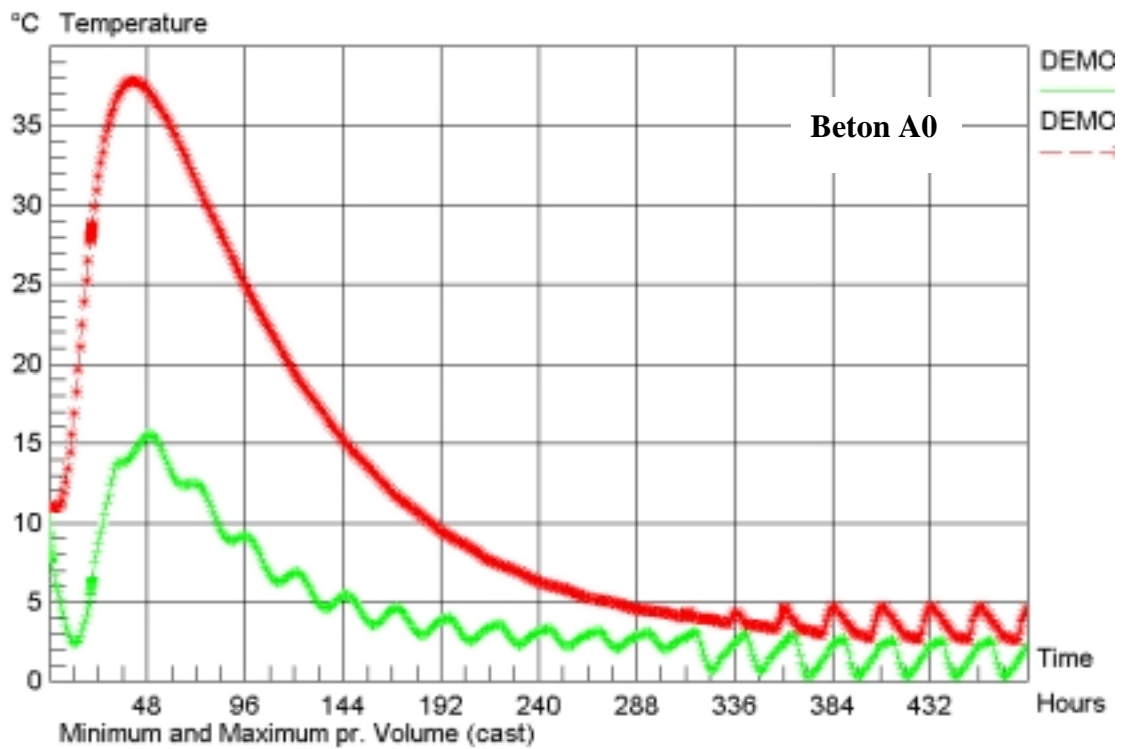
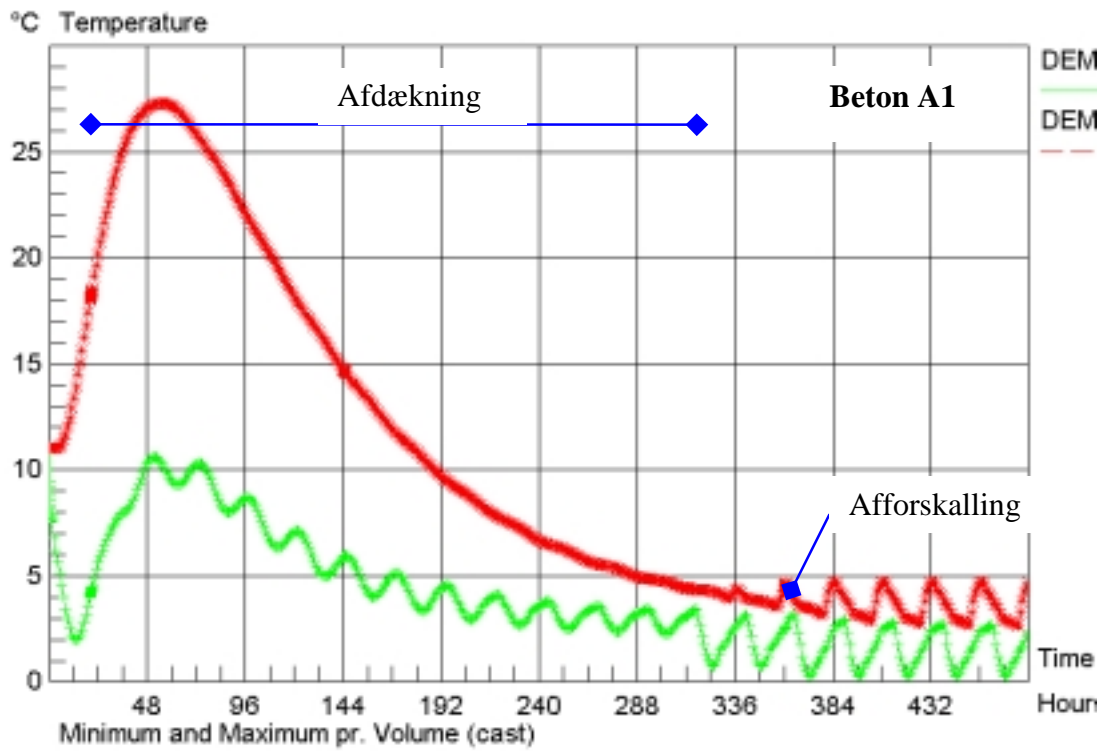
På grund af forskellen i varmeudviklingen mellem A1 og A0 bliver sidstnævnte betydeligt varmere end førstnævnte. Maksimumstemperaturen øges fra ca. 27 °C til 38 °C i brodækkets indre og minimumstemperaturen øges med ca. 5 °C i løbet af hærningens tidlige fase.

Som en del af entreprenørens kvalitetskontrol har han udført temperaturmålinger (Bilag 4). I alt er der foretaget målinger i tre tværsnit i brodækket svarende til hvert fag og hver af de tre betontyper (jf. Figur 1). I hvert af disse tre tværsnit er der indstøbt 5 termofølere:

- én placeret i den ene kantbjælke,
- tre placeret i tværsnittets symmetrilinie,
- én placeret ca. midt i den udkragede vinge.

Termofølernes er aflæst ved 4 lejligheder svarende til ca. 1, 2, 3 og 4 døgn efter støbning (Bilag 4). Det ses tydeligt af målingerne, at tværsnit D, som måler i beton A0, har markant højere temperatur end de to øvrige måletværsnit til alle tidspunkter, hvilket er i god overensstemmelse med Figur 7. Bagerst i Bilag 4 er de beregnede temperaturer optegnet for beton A0 og A1 for de første 4 døgn efter udstøbning i hvert af målepunkterne. Desuden er de målte temperaturer indtegnet. Med forbehold for usikkerheden på termofølernes placering ses en tilfredsstillende overensstemmelse mellem de målte og de beregnede temperaturer. Dog viser beregningerne generelt en højere kantbjælketemperatur end målt, hvilket sandsynligvis hænger sammen med, at denne er specielt følsom overfor afdækningsforhold samt vejr og vind.

De største temperaturgradienter optræder i symmetrilinien, hvor temperaturen falder fra maximumsværdien midt i tværsnittet til et lokalt minimum i tværsnittets overflade. DS 482 foreskriver vejledende, at temperaturforskelle i et snit gennem et tværsnit skal holdes under ca. 20 °C. I Bilag 2 og 3 er optegnet diagrammer med denne temperaturforskel i symmetrilinien. Det ses, at for A1 vokser forskellen op til 11-13 °C i løbet af de første to døgn. For A0 derimod vokser forskellen op til 20 °C indenfor det første døgn og aftager straks derefter til 16-17 °C. Dette forhold skyldes, at for A0 starter varmeudviklingen hurtigere end for A1 og derved opbygges en markant temperaturforskel den første nat, hvor brodækket ligger ubeskyttet hen. Denne temperaturforskel ligger på kanten af hvad der tillades ifølge DS 482:1999.



Figur 7: Temperaturforløb i brotværsnit for betontype A1 og A0. Øverste kurve = max. temperatur; Nederste kurve = min. temperatur.

3.1 Modenhedsudvikling

Forskellen i varmeudvikling udmønter sig ydermere i en markant forskel på hvordan de to betoners modenhed udvikles. Varmeudviklingen i Figur 2 svarer til hydratiseringsgraden, når slutniveauet tolkes som 100 % hydratisering. I henhold til DS 482:1999 skal udtørningsbeskyttelsen mindst bevares indtil betonens hydratiseringsgrad passerer 85 % ved konstruktioner i aggressiv miljøklasse.

Dette forhold er illustreret i Figur 8, hvor modenhedens udvikling er optegnet. Desuden er der angivet tidspunktet for udtørningsbeskyttelsens fjernelse ($t = 312$ timer) samt modenheden svarende til 85 % hydratisering beregnet på baggrund af parametrene i Tabel 2. For A1 er denne modenhed beregnet til 187 timer og for A0 til 87 timer (jf. Figur 2).

I Bilag 2 og 3 er vedlagt isokurver for modenheden i tværsnittet ved udtørningsbeskyttelsens fjernelse. For A0 ses modenheden ved $t = 312$ timer overalt i tværsnittet at være højere end svarende til 85 % hydratisering. For A1 derimod er modenheden til dette tidspunkt kun tilstrækkelig for den centrale del af tværsnittet. Hele overfladezonen samt de udkragede vinger og kantbjælker er under det krævede modenhedsniveau.

Ovenstående beskrivelse understreger betydningen af en hurtig og høj varmeudvikling (Figur 2), når der udføres vinterstøbning, jf. Bilag 7 vedr. et tænkt sommerscenario.

Der er ikke foretaget beregninger på AR eller HETEK betonerne, men på baggrund af Figur 2 kan det forventes, at temperaturforløbet ligger et eller andet sted mellem A1 og A0. Modenhedskravet på 85 % hydratisering kan findes at svare til 196 og 94 modenhedstimer hhv. for AR og HETEK i Tabel 2. På den baggrund må det formodes, at også den del af brodækket, som er udstøbt med beton AR har en modenhedsudvikling, der er sammenlignelig med A1.

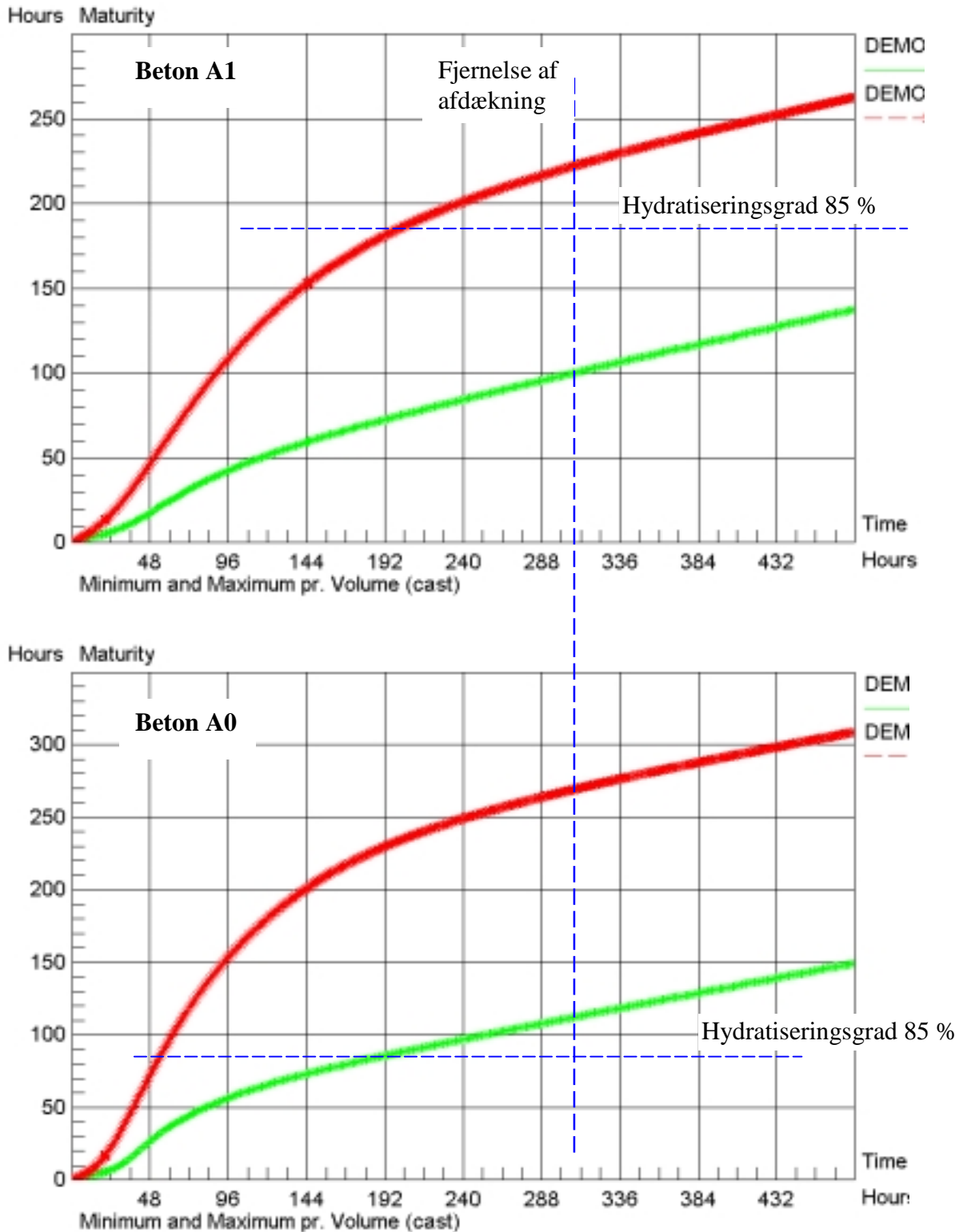
Det skal understreges, at broen er behandlet med curing membran umiddelbart efter udstøbning. Derved er der i praksis etableret en uendelig udtørningsbeskyttelse. Denne beskyttelse gælder dog ikke undersiden af brodækket, hvor brædeforskallingen fjernes i dagene efter, at plast og vintermætter er fjernet.

3.2 Sommerscenario

Bilag 7 indeholder temperaturberegninger med et tænkt eksempel, hvor brostøbningen er udført under sommerforhold. Beregningen er udført med A0 for at illustrere virkningen af en hurtig varmeudvikling, som kan udgøre en ulempe under disse forhold, jf. i øvrigt Bilag 3.

Den maximale temperatur bliver hævet ca. 15 °C og optræder allerede efter godt 1 døgn i modsætning til 2 døgn for vinterstøbningen (Figur 7). Temperaturen effekt på modenheden ses tydeligt ved sammenligning med Figur 8.

Den hurtige varmeudvikling har dog den ulempe, at markante temperaturgradienter optræder mellem det afkølede ydre og det varme indre. Bilag 7 viser, hvordan temperaturforskellen i tværsnittets symmetrilinie vokser til 23 °C indenfor de første 18 timer inden afdækningen er på plads. Dette er en lille overskridelse af DS 482-anbefalingen på max. 20 °C og kan dermed give risiko for termorevner i overfladen, mens styrkeudviklingen kun lige er startet.



Figur 8: Modenhedsudvikling i brotværsnit for betontype A1 og A0. Øverste kurve = max. Nederste kurve = min. Den lodrette stiplede linie angiver tidspunktet for fjernelse af afdækning og den vandrette modenheden ved 85 % hydratisering.

4. Spændingsberegninger

I Bilag 5 og 6 ses resultater fra tilnærmede spændingsberegninger på hhv. A1 og HETEK betonen med de materialeegenskaber, som er beskrevet i afsnittene 2.1-2.3 samt i Bilag 1.

Den tilnærmede spændingsberegning omfatter kun deformationer og normalspændinger vinkelret på tværsnittets plan, dvs. i 4C-Temp&Stress's z-retning. Det vil sige uden indflydelse fra Poissons forhold.

I den tilnærmede spændingsberegning opstår normalspændingerne dels fra temperaturgradienter i tværsnittet og dels fra en vis fastholdelse af tværsnittets imod at deformere sig frit. Friktionen langs bræddeforskallingen gør at langsgående deformationer er delvist hindret. På grund af egenvægten hindres krumning omkring den vandrette x-akse. Desuden er tværsnittets krumning omkring den lodrette y-akse hindret af symmetriårsager. Beregningerne er foretaget med hindret krumning omkring begge akser samt fri længdeudvidelse.

Det er valgt at udelade opspændingen af kablerne i spændingsberegningen. Der foretages opspænding efter 144 timer og derved overlejes den opnåede normalspændingstilstand til dette tidspunkt af en trykspænding på 3-4 MPa og revnerisikoen forsvinder.

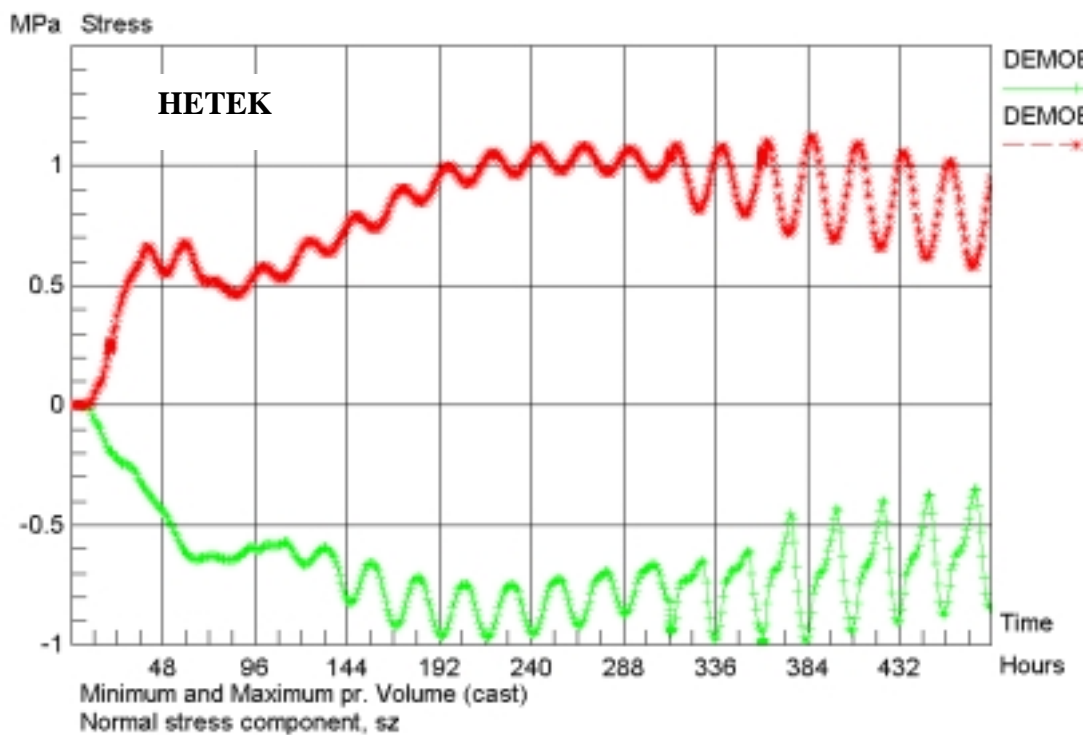
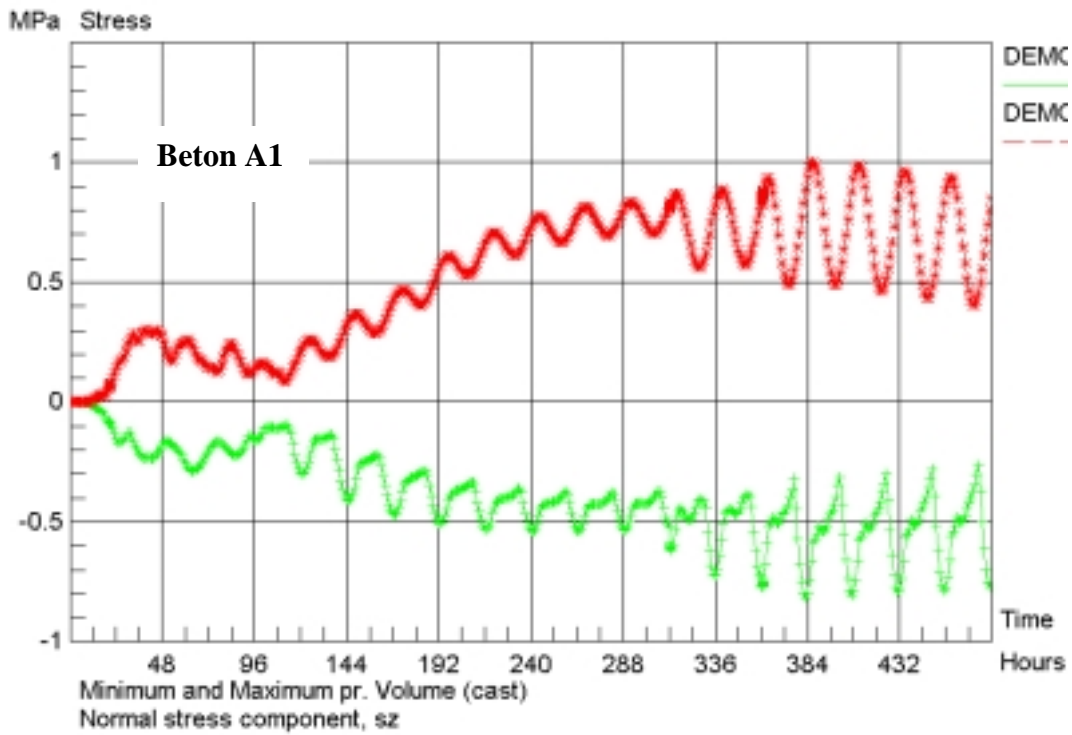
I Figur 9 ses normalspændinger beregnet ud fra ovenstående forudsætninger. Følgende karakteristika kan fremhæves.

- I løbet af de første 2 døgn, hvor tværsnittets midte opvarmes kraftigst (Figur 7) opbygges tryk i det indre af tværsnittet, mens der optræder trækspændinger i de kolde overflader og i kantbjælken.
- I løbet af den efterfølgende afkølingsfase vender billedet og det er nu i tværsnittets indre der optræder trækspændinger.

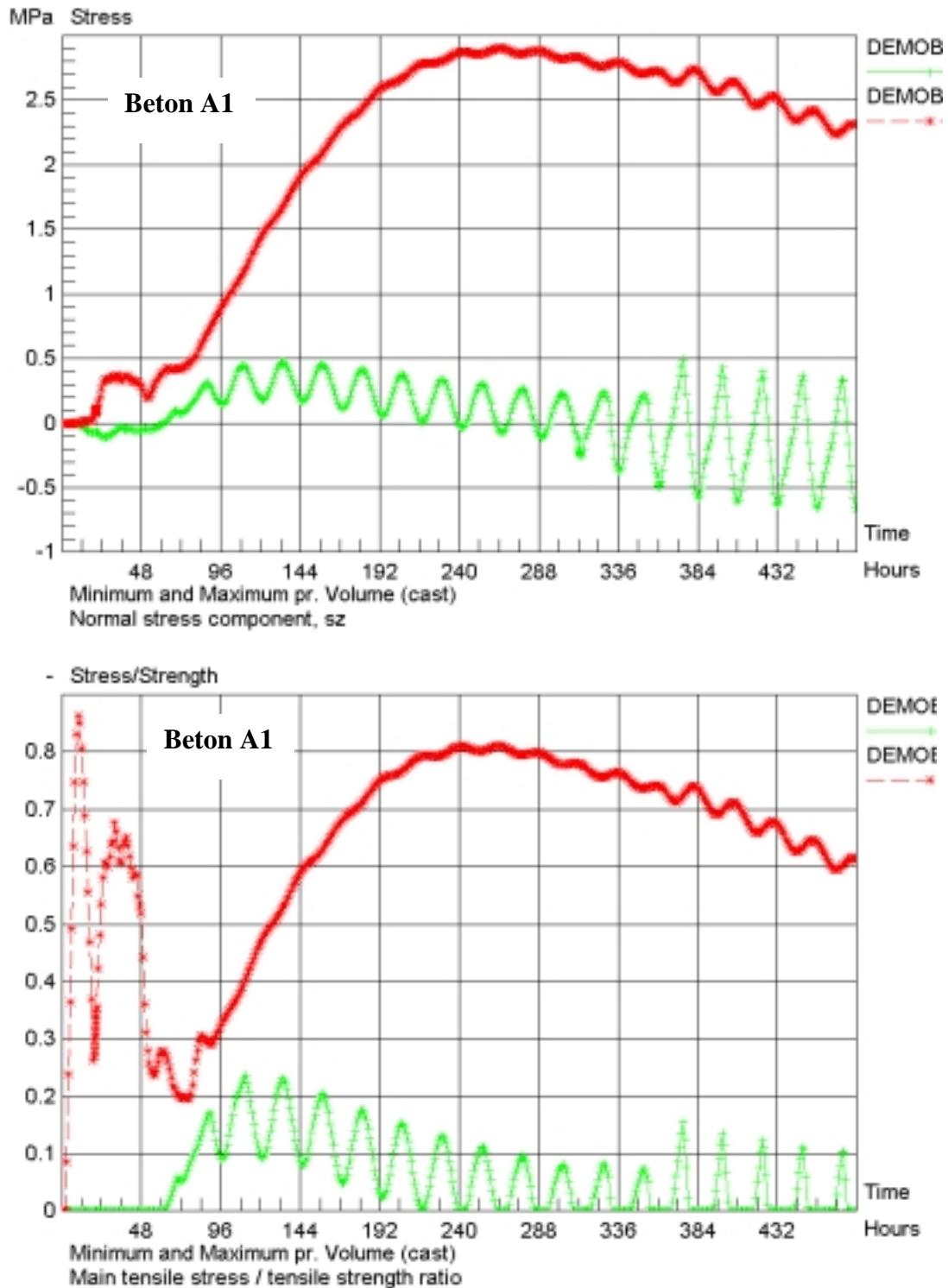
Se spændings-isokurver i Bilag 5 og 6, hvor ovennævnte er illustreret. Desuden ses i Bilag 5 og 6 spaltetrækstyrkeudnyttelsen svarende til Figur 9. Det bemærkes her, at den relative spænding stiger til omkring spaltetrækstyrken allerede efter 12 timers forløb. Dette er et udtryk for at trækstyrken på dette tidlige tidspunkt knap nok er begyndt at udvikles. Betonen må betegnes som plastisk og spændingerne giver ikke anledning til uro.

Under afkølingen vokser trækspændingerne til 20-30 % af spaltetrækstyrken, hvilket er langt fra kritisk.

En supplerende beregning er foretaget med beton A1, hvor tværsnittet er fastholdt imod længdeudvidelse ud over fastholdt krumning omkring de to akser (Figur 10). Det ses, at spændingen i tværsnittets indre under afkøling stiger til knap 3 MPa imod 1 MPa i Figur 9. Virkeligheden må formodes at ligge et sted imellem betingelserne fuldstændig fri og fuldstændig fastholdt.



Figur 9: Normalspændinger vinkelret på brotværsnittet for betontype A1 og HETEK. Øverste kurve = max. Nederste kurve = min. Spænding er positiv som træk.



Figur 10: Supplerende beregning for betontype A1 med alle frihedsgrader fastholdt. Øverste kurve = max. Nederste kurve = min. Spænding er positiv som træk.

5. Konklusioner

Der er foretaget temperatur- og spændingsberegninger for Demobroen under realistiske udstøbningsbetingelser. Varmeudviklingsdata er målt på både beton A0 og A1 repræsenterende hhv. en hurtig og en langsom varmeudvikling. Disse to betontyper er lagt til grund for temperaturberegningerne, idet de begge er benyttet i brodækket sammen med AR.

Spændingsberegningerne er udført approksimativt uden hensyntagen til Poisson's forhold. Forudsætningerne for spændingsberegningerne er ovennævnte temperaturberegninger og de mekaniske egenskabers udvikling som er bestemt eksperimentelt for beton A1. For at kunne sammenligne beregningerne med noget velkendt er der udført temperatur- og spændingsberegninger på Demobroen udført i HETEK-beton.

5.1 Temperatur og modenhed

Det er illustreret hvordan varmeudviklingens forløb influerer stærkt på temperaturberegningerne. Følgende generelle konklusioner kan gives:

- Typiske danske betontyper til benyttelse i aggressiv miljøklasse har en hydratiseringsvarme, som vokser op til 100 – 120 MJ per m³ beton.
- Det er ikke kun hydratiseringsvarmens slutniveau, som bestemmer temperaturudviklingen. De to parametre α og τ_c har stor betydning, idet de fastlægger den stigende del af varmeudviklingen, hvor betonens maximumstemperatur oftest optræder.
- Ved hjælp af de to betontyper A0 og A1 er det demonstreret, hvordan varmeudviklingen og dermed hydratiseringsgraden afhænger af varmeudviklingens forløb. A0 har en relativ hurtig varmeudvikling, mens A1 er langsom pga. den store mængde flyveaske.
- Det er ikke overraskende fundet, at A0 er fordelagtig under vinterstøbning pga. ovennævnte. Denne egenskab kan dog være en hæmsko under sommerklima, hvor den maximale temperatur i tværsnittet risikerer at blive for høj.
- Simuleringen af den udførte brodæksstøbning har endvidere vist, at hydratiseringsgraden i kantbjælke og vinger er utilstrækkelig for A1 ved fjernelsen af vintermåtterne. Det skal i den forbindelse nævnes, at temperaturmålinger udført umiddelbart efter udstøbning viste lavere temperaturer end beregnet, hvorved modenheden måske er lavere end beregnet. Temperaturmålingerne ophørte imidlertid allerede efter 4 dage og kan derfor ikke bruges til nogen sikre konklusioner.

5.2 Hærdespændinger

Der er foretaget en tilnærmet spændingsberegning af de indre spændinger som opstår i brodækket under hærdeningen pga. temperaturgradienter og delvis hindrede deformationer. Knap en uge efter udstøbningen opspændes kablerne, hvorved evt. trækspændinger i brodækket overlejres med forspændingen.

Spændingsberegningen er foretaget med de tidlige egenskaber, som er eksperimentelt bestemt for beton A1. Beregningen er desuden sammenlignet med en tilsvarende beregning udført med HETEK beton som input selvom, at denne beton ikke er benyttet i Demobroen.

Beregningerne har ikke givet anledning til at tro, at nogen kritisk spændingsopbygning har fundet sted i den tidlige fase. Dette understøttes af, at de temperaturgradienter, som opstår i tværsnittet under hærningen er moderate.

Afslutningsvis kan det bemærkes at en kortlægning af de tidlige egenskaber for beton A0 ville være interessant som modpol til A1. Det må forventes, at de to betoner opfører sig forskelligt mht. den tidlige egenskabsudvikling ligesom det er observeret med varmeudviklingen. Desuden opstår der større temperaturgradienter for A0 end for A1, hvilket generelt øger risikoen for revner.

6. Referencer

- [1] ”Demobro, Betonegenskaber i tidlig alder for beton med højt flyveaskeindhold”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, maj 2002.
- [2] Spange, H. & Pedersen, E.S.: ”Control of early age cracking in concrete”, Vejdirektoratet, HETEK-Rapport nr. 59, 1996.
- [3] ”Udførelse. Varmeudvikling og plastisk svind”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, September 2002.
- [4] ”Demobro”, Center for Grøn Beton, Teknologisk Institut, Beton, December 2002.

Bilag 1-7 kan rekvireres ved henvendelse til Teknologisk Institut, Beton.