



Center for Grøn Beton

Mekaniske egenskaber under brand

Udført af:

Claus Vestergaard Nielsen

Teknologisk Institut, Beton, december 2002

Titel: Mekaniske egenskaber under brand

Udført af: Claus Vestergaard Nielsen

Dato: December 2002

ISBN: 87-7756-688-2

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

Indholdsfortegnelse

0. INDLEDNING	4
1. PRØVNINGSOMFANG.....	5
2. BETONRECEPTER	6
3. FORSØG VED HØJE TEMPERATURER	7
3.1 FORMÅL.....	7
3.2 METODEBESKRIVELSE.....	7
4. RESULTATER.....	13
4.1 MEKANISKE EGENSKABERS TEMPERATURAFHÆNGIGHED	16
4.2 FRI TERMISK UDVIDELSE UDEN BELASTNING.....	20
4.3 HINDRET TERMISK UDVIDELSE UNDER OPVARMNING MED KONSTANT BELASTNING	23
4.4 FASTHOLDT PRØVEEMNE UNDER OPVARMNING.....	27
5. KONKLUSIONER.....	30
6. REFERENCER	31

Appendiks oversigt

APPENDIKS A	TEMPERATURMÅLINGER
APPENDIKS B	VARME TRYKARBEJDSLINIER
APPENDIKS C	FRIE TERMISKE DEFORMATIONER FOR BETON PR
APPENDIKS D	FRIE TERMISKE DEFORMATIONER FOR BETON P5
APPENDIKS E	FRIE TERMISKE DEFORMATIONER FOR BETON P7
APPENDIKS F	HINDREDE TERMISKE DEFORMATIONER FOR PR
APPENDIKS G	HINDREDE TERMISKE DEFORMATIONER FOR P5
APPENDIKS H	HINDREDE TERMISKE DEFORMATIONER FOR P7
APPENDIKS I	FASTHOLDT PRØVEEMNE UNDER OPVARMNING
APPENDIKS J	FOTOS FRA PRØVNING

0. Indledning

I centerkontrakten *Ressourcebesparende betonkonstruktioner* (kaldet "Grøn Beton") er der i projektfasen *udvidet pakke* gennemført fire faglige aktiviteter:

- BK1: Mekaniske egenskaber
- BK2: Brand
- BK3: Udførelse
- BK4: Holdbarhed

Denne rapport indeholder delresultater fra prøvninger udført i den faglige aktivitet BK2: Brand.

I *BK2 - udvidet pakke* udføres følgende undersøgelser:

- Afskalmingsforsøg udføres på BYG•DTU både på prøvecylindre og på vægelementer.
- Mekaniske egenskaber under høje temperaturer op til 600 °C udføres på Laboratoriet for Bærende Konstruktioner, Aalborg Universitet.

Nærværende rapport beskriver og tolker resultaterne opnået fra den udførte prøve vedr. de mekaniske egenskaber under brand, herunder termisk udvidelse målt under varierende trykspændinger.

Afskalmingsforsøgene rapporteres i en separat rapport.

1. Prøvningsomfang

På baggrund af resultater opnået i centerkontraktens første faser (*grundpakken* og *stor pakke*), har centerkontraktledelsen udvalgt et antal aggressive og passive betoner til udvidet pakke (se Tabel 1).

Beton	Cement	"Grønt" tiltag	Støbes hos
PR	NRC	-	Unicon
P3	NRC	slamaske	Unicon
P5	NRC	betonslam	Unicon
P7	Bygg C	flyveaske fra bio.	Sydsten
AR	SAC	-	Unicon
A0	NRC	(cementen)	Unicon
A1	NRC	højt flyveaskeindhold	Unicon
A3	NRC	slamaske	Unicon
A6	ANL	stenmel	Sydsten

Tabel 1: Betoner udvalgt til udvidet pakke generelt.

Af Tabel 2 ses prøvningsomfanget for BK2 – udvidet pakke.

	AR	A1	A3	PR	P3	P5	P7
Afskalmningsforsøg under brand	-	-	-	+	+	+	+
Mek. egenskaber under brand	-	-	-	+	-	+	+

Tabel 2: Brandprøvning i BK2 - udvidet pakke.

Det er besluttet at indskrænke forsøgene til kun at omfatte de passive betoner, idet det typisk er under indendørs forhold, at brandsituationen skal medtages i beregningerne. Brandforsøg er desuden både kostbare og langvarige, hvorved det har vist sig umuligt at teste alle betontyper indenfor projektets rammer.

2. Betonrecepter

Betonrecepterne for de betragtede betoner er angivet i Tabel 3. Alle prøveemner for en given beton er støbt med beton fra ét læs.

Materiale	Type	PR kg/m ³	P5 kg/m ³	P7 kg/m ³
Cement	SAC	-	-	-
	NRC	170,4	168,4	-
	Bygg C	-	-	194,0
Mikrosilica	Pulver	14,0	12,5	-
Flyveaske	Danaske B1	-	59,9	-
	Emineral B5	59,9	-	-
Restprodukt	Specialfiller	-	-	-
	Slamaske Lynetten	-	-	-
	Betonslam (tørstof)	-	18,5	-
	Stenmel 0/2 Dalby	-	-	-
	Flyveaske fra bio.	-	-	79,0
Vand	Vandværksvand	143,1	156,3	166,6
Sand	0/2 NCC Vestbirk	725	692	-
	0/8 Östervang	-	-	1008
Sten 1	4/8 NCC Århus	201	202	-
	8/16 Dalby	-	-	227
Sten 2	8/16 NCC Århus	390	403	-
	16/25 Dalby	-	-	677
Sten 3	16/32 NCC Århus	579	567	-
		-	-	-
Luftindbl.	Conplast AEA316 1:5	0,1	0,01	-
Plast	Conplast 212	0,75	0,71	-
	Peramin V	-	-	0,45
Superplast	Strukturo BA1	-	-	-
	Peramin F	-	-	0,72
Målt luft		4,2	3,5	2,0
Ækv. v/c		0,63	0,70	0,71
Støbetidspunkt		02-07-02 kl. 9:12	25-06-01 kl. 17:14	05-11-01 kl. 9:25

Tabel 3: Recepter for passive betoner afprøvet i brandforsøg. De angivne værdier er de faktiske værdier (VOT). Beton PR og P5 er støbt hos Unicon i Horsens, mens P7 er støbt hos Sydsten i Malmø.

3. Forsøg ved høje temperaturer

3.1 Formål

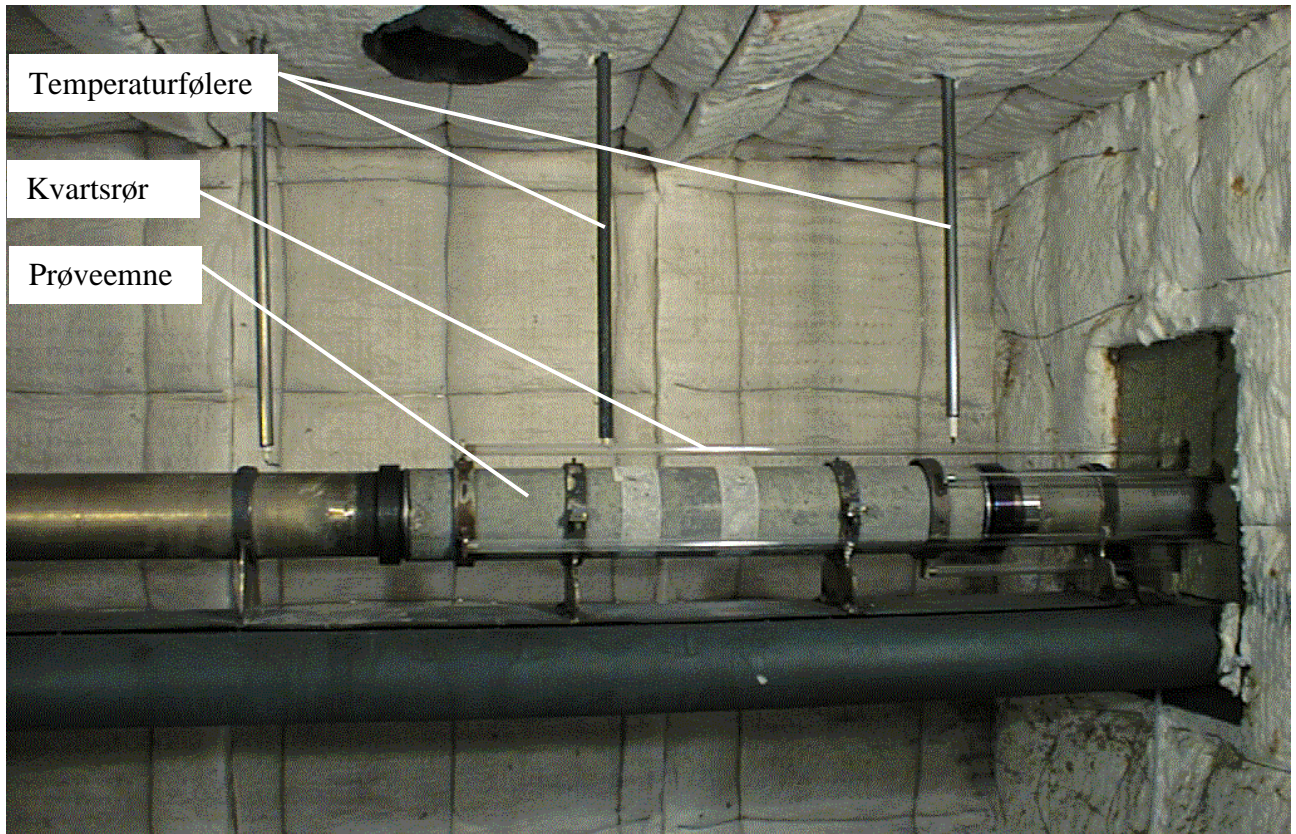
Effekten af temperaturpåvirkningen undersøges ved trykforsøg under ensartet temperaturfordeling i prøveemnet. Der udføres trykforsøg når betontemperaturen er i ligevægt med ovntemperaturen. Desuden registreres de termiske deformationer under både opvarmning og afkøling med og uden belastning.

3.2 Metodebeskrivelse

Prøveemner og forsøgsudstyr

Forsøgene udføres på støbte betoncylindre $\text{Ø}83 \times 575$ mm. Det skal i den forbindelse bemærkes, at den maksimale stenstørrelse på 32 mm er større end hvad der normalt anses for tilladeligt set i forhold til prøveemnets dimension. Normalt bør det sikres, at stenstørrelsen ikke overstiger en trediedel af prøvediameteren på 83 mm for at sikre en homogen beton i prøveemnerne. Resultaterne viser imidlertid en overbevisende ensartethed og relativt små målevariationer som det fremgår af de følgende kapitler.

To cylindre er prøvet for hver kombination af forsøgsbetingelser. Prøveemner er holdt forseglede fra afformnings- til prøvningsterminen, som er ældre end ca. 40 døgn. Selve prøvningen strækker sig over 2 - 3 måneder (Tabel 4 - Tabel 6).



Figur 1: Foto af ovns indre med temperaturfølere og kvartsrør.

Forsøgsovnens på Laboratoriet for Bærende Konstruktioner, Aalborg Universitet, er indrettet således, at prøveemnerne er placeret vandret i ovnen (Figur 1). Prøveemnet belastes via 2 kugleskåle med en håndbetjent hydraulisk donkraft placeret udenfor ovnen. Prøveemnets deformationer måles vha. 3 stk. kvartsrør monteret i hver sin ende af emnet. Kvartsrørene føres ud gennem ovnens væg, hvor 6 stk. flytningstransducere registrer betondeformationerne. Målelængden er 400 mm. Kvartsrørene udmærker sig ved at have praktisk talt forsvindende temperaturkoefficient (ca. 5×10^{-7} per °C). Der foretages således ingen ingen korrigerings herfor i de målte deformationer.

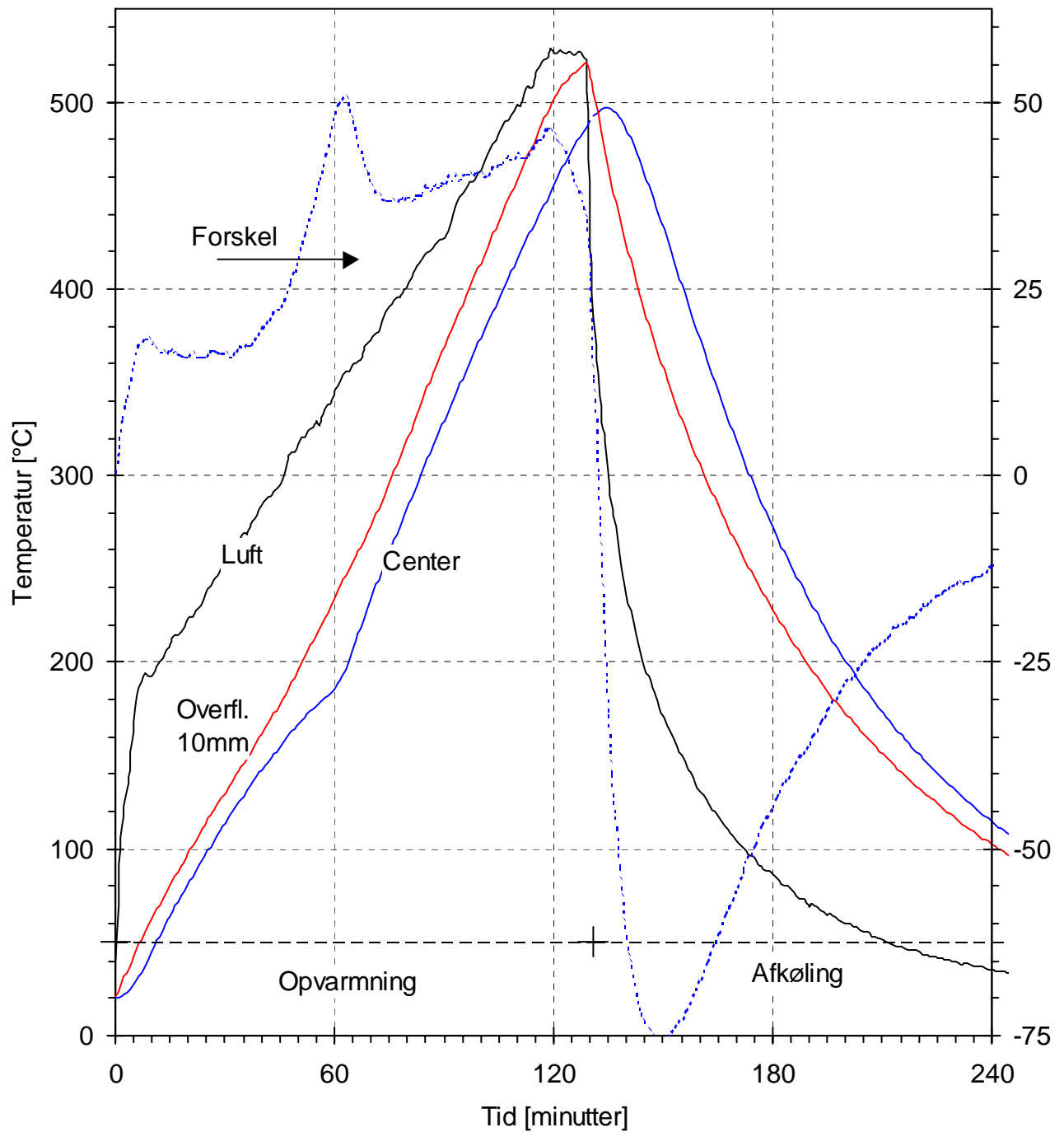
Temperaturer

Ovntemperaturen registreres vha. 3 temperaturfølere placeret omkring prøveemnet (Figur 1). Hvert prøveemne har desuden indstøbt to temperaturfølere, en der måler betontemperaturen midt i prøveemnet og en der måler 10 mm under overfladen. I Appendix A er temperaturmålingerne angivet for de forskellige forsøg, herunder også afkølingsforløbet.

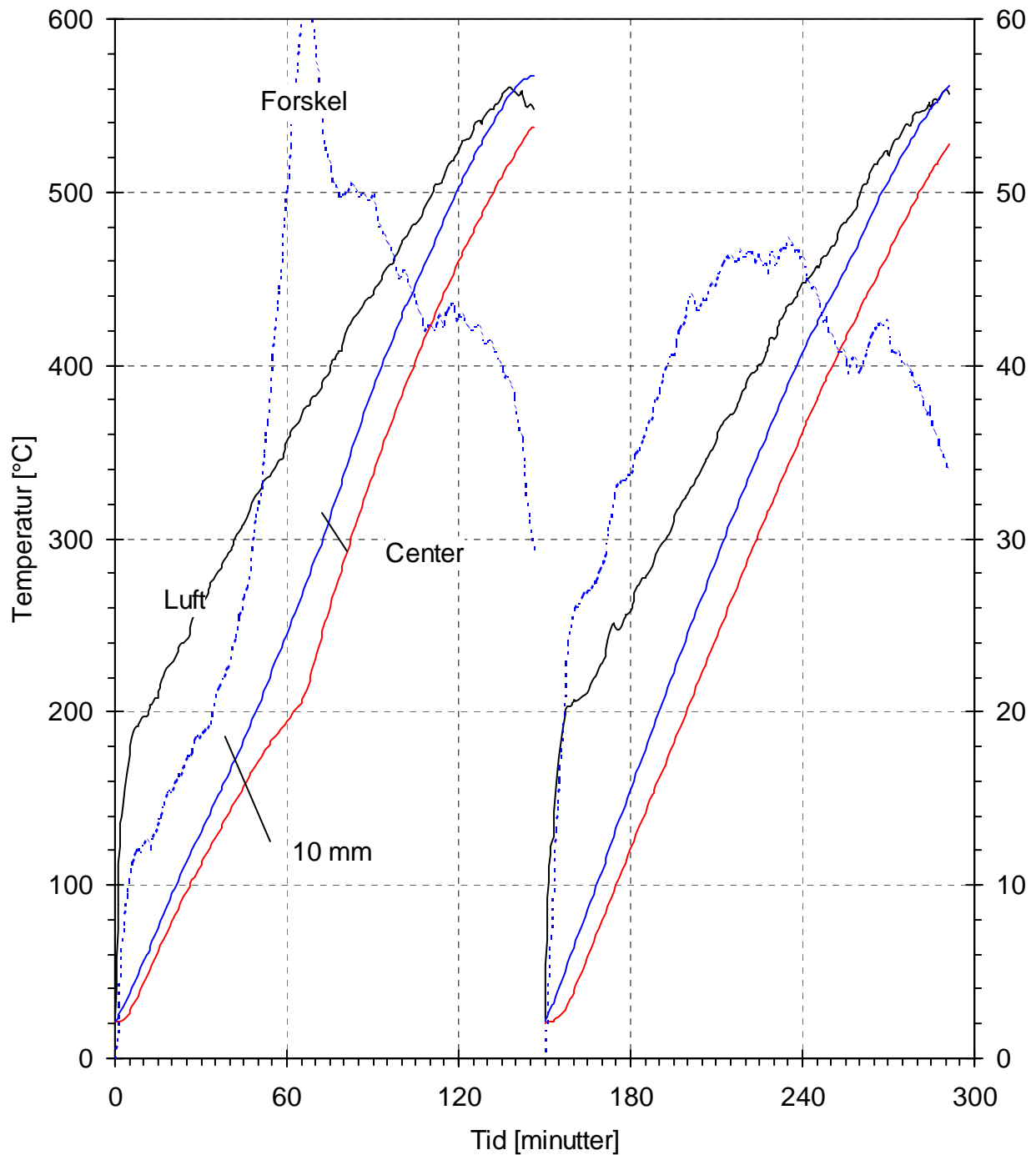
Ovntemperaturen styres manuelt vha. en gasbrænder. Ovntemperaturen øges til knap 200 °C indenfor de første 10 minutter af forsøget. Derefter følges en næsten konstant temperaturrate på 3-4 °C per minut indtil betontemperaturen når det ønskede niveau. Den indre betontemperatur stiger under denne påvirkning konstant med 3-4 °C per minut (se eksempel i Figur 2). Afkøling sker naturligt ved blot at slukke ovnen og lade den stå natten over. Som ses vender temperaturforskellen ganske voldsomt i det øjeblik hvor ovnen slukkes, hvilket naturligvis udsætter prøvemner for et chok.

Den anvendte temperaturkurven er primært valgt ud fra en afvejning mellem den maksimale varighed af forsøget (pga. bemandingen) og den temperaturgradient som prøveemnet udsættes for. Det erkendes at prøveemnet udsættes for en ikke ubetydelig temperaturgradient med en deraf følgende indre spændingsopbygning, specielt tæt på overfladen. Forsøgene er imidlertid udført indenfor de temperaturvariationer, som findes anvendt i litteraturen [2, 3].

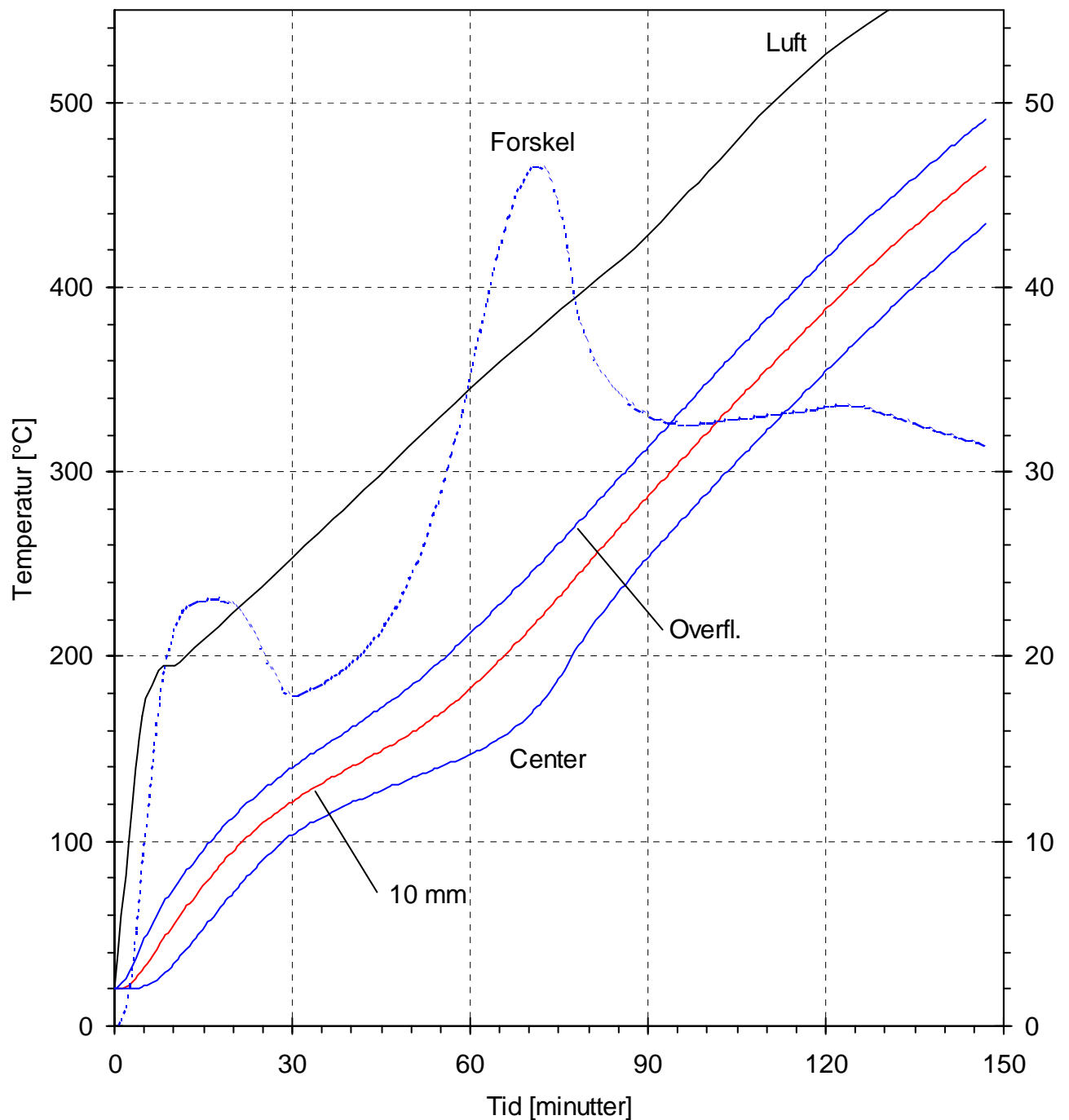
En anden observation som kan gøres af Figur 2 er variationer specielt koncentreret omkring 200 °C, hvor den centrale temperatur dykker og temperaturforskellen har et maksimum. Denne opførsel er forbundet med fordampning og uddrivning af frit vand, hvilket er yderligere demonstreret i Figur 3, hvor temperaturerne er optegnet for prøveemne PR-10, som er opvarmet 2 gange. Det ses tydeligt, at temperaturvariationerne er forsvundet fuldstændigt under den anden opvarmingscyklus.



Figur 2: Eksempel på opvarmnings-afkølingscyklus. Temperaturregistreringer taget fra prøveemne PR-12. Temperaturforskellen mellem center og 10 mm dybde refererer til den højre akse. Se andre temperaturregistreringer i Appendiks A .



Figur 3: Eksempel på 1. og 2. opvarmning af prøveemne PR-10. Temperaturforskellen mellem center og 10 mm dybde refererer til den højre akse. De to opvarmninger er forskudt indbyrdes langs tidsaksen for at lette aflæsningerne.



Figur 4: Temperatursimulering i prøveemne udført vha. beregningsprogrammet FIRE-2D. Temperaturberegning foretaget med lufttemperaturen som input. Den angivne temperaturforskelle er beregnet mellem center og 10 mm dybde og refererer til den højre akse. Kurven angivet med overfl. viser temperaturen i prøveemnets overflade. På grund af konvektionskoefficienten er denne ikke identisk med lufttemperaturen i ovnen.

Figur 4 viser et eksempel på en temperatursimulering foretaget med FIRE-2D. Input parametrene i denne numeriske beregning er betons varmeledningsevne med temperaturafhængighed som givet i DS 411:1999 og betons varmekapacitet ifølge Eurocode 2 [1]. Prøveemnets overflade er udsat for en temperaturhistorie som er lig den som benyttes i eksperimenterne med en konstant konvektionskoefficient på $25 \text{ W}/(\text{°Cm}^2)$ ifølge DS 410:1998. Se bagerst i Appendiks A for flere detaljer.

Generelt ses simuleringen at give en kvalitativ korrekt gengivelse af temperaturmålingerne. Herunder fanges det maksimum, som måles på temperaturforskellen mellem centrum og 10 mm dybde. Dog ligger de simulerede temperaturer lavere end de målte - en forskel som øges med opvarmningen. Dette kan skyldes, at konvektionskoefficienten, som styrer betonens overfladetemperatur ift. ovntemperaturen varierer med opvarmningen i stedet for at være konstant som det er forudsat i nærværende beregning. En evt. korrektion heraf ville kræve flere temperaturmålinger samt et stort datatilpasningsarbejde – en opgave som ikke er omfattet af nærværende projekt.

Mekaniske forsøg

Arbejdskurverne er bestemt ved at belaste prøveemnet vha. donkraften med en belastningshastighed på ca. 0,06 MPa per sekund. Prøveemnet er ikke belastet til brud under arbejdskurveforsøget pga. risikoen for at ødelægge kvartsrørene.

Referencetrykstyrken er bestemt på cylindre savet ud af prøveemnerne (ca $\text{Ø}83 \times 150 \text{ mm}$) og trykprøvet i en trykpresse ved 0,8 MPa per sekund. Det samme er gjort til bestemmelse af resttrykstyrken efter 200 og 400 °C bestemt på cylindre udsavet af prøveemner. Dette er også gjort efter 600 °C for beton P7.

Prøvning af resttrykstyrken er således udført på prøveemner som først er opvarmet og dernæst belastet og aflastet i et arbejdskurveforsøg. Efter afkøling opsaves emnet for endeligt at blive trykprøvet. Der er således mange parametre som kan påvirke den målte resttrykstyrke, hvilket skal holdes for øje når resultaterne tolkes.

4. Resultater

I Tabel 4 til Tabel 6 ses en oversigt over forsøgene. I afsnit 4.1 præsenteres trykarbejdskurveforsøgene udført ved konstant temperatur. I afsnit 4.2 præsenteres den termiske udvidelse målt under opvarmning forud for arbejdskurveforsøgene. I afsnit 4.3 præsenteres tøjninger målt under samtidig opvarmning og belastning (3 forskellige belastningsniveauer) I afsnit 4.4 præsenteres forsøg, hvor den termiske udvidelse er hindret.

Forsøg	Prøveemner	Prøvedato	Note
Arbejdskurve og trykstyrke ved rumtemperatur	PR-2† PR-5†	16-10-02 21-10-02	Middel $f_c = 41$ MPa.
Varme arbejdskurver ved ca. 200 °C	PR-3 PR-4†	16-10-02 17-10-02	Middel residual $f_c = 35$ MPa.
Varme arbejdskurver ved ca. 400 °C	PR-6† PR-7†	22-10-02 24-10-02	Middel residual $f_c = 19$ MPa.
Varme arbejdskurver ved ca. 600 °C	PR-8 PR-9	05-11-02 07-11-02	Prøveemner for skrøbelige til at måle resttrykstyrke.
Fastholdt deformationsforsøg	PR-18 PR-19	10-12-02 12-12-02	Hindret udvidelse under opvarmning. Opvarmet til ca. 550 °C
Konst. kraft 24 kN under opvarmning til ca. 550 °C	PR-1* PR-10 PR-11 PR-10**	14-10-02 12-10-02 21-11-02 15-11-02	Samtidig last og opvarmning/afkøling (ca. 11 % af kold trykstyrke). * Forsøg mislykkes delvist pga. brud. ** Genopvarmningsforsøg.
Konst. kraft 48 kN under opvarmning til ca. 500 °C	PR-12 PR-13	21-11-02 25-11-02	Samtidig last og opvarmning/afkøling (ca. 22 % af kold trykstyrke).
Konst. kraft 96 kN under opvarmning til ca. 400 °C	PR-14* PR-15**	26-11-02 28-11-02	Samtidig last og opvarmning/afkøling (ca. 44 % af kold trykstyrke). * Brud umiddelbart efter påbegyndt afkøling. ** Kun opvarmet til 200 °C.

Tabel 4: Oversigt over forsøgsemner for beton PR. For alle forsøg gælder, at målinger er foretaget under både opvarmning og afkøling.

Note: † Prøveemne savet i 3 dele som hver især er trykprøvet.

Forsøg	Prøveemner	Prøvedato	Note
Arbejdskurve og trykstyrke ved rumtemperatur	P5-10† P5-15 P5-14 P5-12†	09-11-01 09-11-01 14-11-01	Middel $f_c = 39$ MPa.
Varme arbejdskurver ved ca. 200 °C	P5-16† P5-13†	16-11-01 20-11-01	Middel residual $f_c = 35$ MPa.
Varme arbejdskurver ved ca. 400 °C	P5-17† P5-19†	22-11-01 26-11-01	Middel residual $f_c = 19$ MPa.
Varme arbejdskurver ved ca. 600 °C	P5-9* P5-1 P5-8	29-11-01 03-12-01 07-12-01	* Forsøg mislykket. Prøveemner for skrøbelige til at måle resttrykstyrke.
Fastholdt deformationsforsøg	P5-2 P5-20	10-01-02 16-01-02	Hindret udvidelse under opvarmning.
Konst. kraft 24 kN under opvarmning til ca. 600 °C	P5-18* P5-11*	11-04-02 23-04-02	Samtidig last og opvarmning (ca. 11 % af kold trykstyrke). * Temperatur og tøjning også registreret under afkøling.
Konst. kraft 49 kN under opvarmning til ca. 600 °C	P5-6* P5-4**	22-01-02 25-01-02	Samtidig last og opvarmning (ca. 23 % af kold trykstyrke). * Brud umiddelbart før afkøling. ** Kun opvarmet til 500 °C.
Konst. kraft 98 kN under opvarmning til ca. 400 °C	P5-7 P5-5	19-02-02 11-03-02	Samtidig last og opvarmning (ca. 46 % af kold trykstyrke).

Tabel 5: Oversigt over forsøgsemner for beton P5. For alle forsøg gælder, at målinger er foretaget under opvarmning undtagen for P5-18 og P5-11.

Note: † Prøveemne savet i 3 dele som hver især er trykprøvet.

Forsøg	Prøveemner	Prøvedato	Note
Arbejdskurve og trykstyrke ved rumtemperatur	P7-1† P7-2† P7-3† P7-5 P7-6	15-03-02 15-03-02 15-03-02 02-05-02 02-05-02	Middel $f_c = 30$ MPa.
Varme arbejdskurver ved ca. 200 °C	P7-4† P7-7	09-04-02 06-05-02	Middel residual $f_c = 23$ MPa.
Varme arbejdskurver ved ca. 400 °C	P7-8† P7-10	30-05-02 31-05-02	Middel residual $f_c = 19$ MPa.
Varme arbejdskurver ved ca. 600 °C	P7-11† P7-12	04-06-02 12-06-02	Middel residual $f_c = 10$ MPa.
Hindret udvidelse under opvarmning til ca. 550 °C	P7-19* P7-20** P7-9**	27-06-02 01-07-02 02-07-02	* Mislykket forsøg. ** Termoføler placeret i overfladepore i stedet for i 10 mm dybde.
Konst. kraft 18 kN under opvarmning til ca. 600 °C	P7-17 P7-18 P7-17*	24-06-02 25-06-02 03-07-02	Samtidig last og opvarmning/afkøling (ca. 11 % af kold trykstyrke). * Genopvarmningsforsøg.
Konst. kraft 36 kN under opvarmning til ca. 575 °C	P7-13 P7-14	13-06-02 14-06-02	Samtidig last og opvarmning/afkøling (ca. 22 % af kold trykstyrke).
Konst. kraft 72 kN under opvarmning til ca. 450 °C	P7-15 P7-16*	18-06-02 20-06-02	Samtidig last og opvarmning/afkøling (ca. 45 % af kold trykstyrke). * Termoføler i overfladen defekt.

Tabel 6: Oversigt over forsøgsemner for beton P7. For alle forsøg gælder, at målinger er foretaget under både opvarmning og afkøling.

Note: † Prøveemne savet i 3 dele som hver især er trykprøvet.

4.1 Mekaniske egenskabers temperaturafhængighed

Tabel 7 viser temperatureffekten på resttrykstyrken og begyndelses E-modulet. Appendiks B indeholder alle målte arbejdskurver samlet i et diagram for hver betontype.

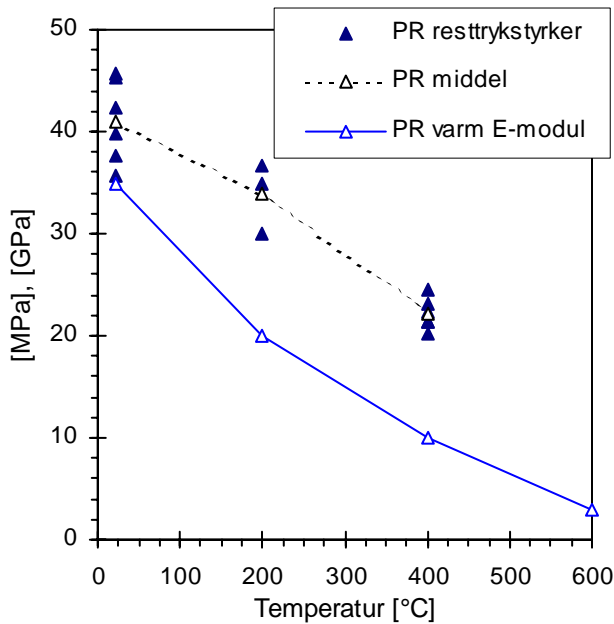
For PR og P7 er registreret både be- og aflastningsgrene. Det ses at belastningen under de varme arbejdskurveforsøg når op på 50-70 % af resttrykstyrken samt, at der registreres en vis irreversibel tøjning som følge af be- og aflastningen pga. arbejdskurvens ikke-lineære opførsel. En anden grund til de irreversible tøjninger er transiente krybetøjninger, som foregår under arbejdskurveforsøget pga., at temperaturen i prøvemnet ikke har opnået fulstændig stationær tilstand.

Det ses tydeligt af Appendiks B, at efter opvarmning til 600 °C er arbejdskurverne næsten vandrette svarende til et plastisk materiale pga. de omfattende beskadigelser som er sket i prøveemnet. Dette gør det meget uklart at tale om et E-modul ved de højeste temperaturer.

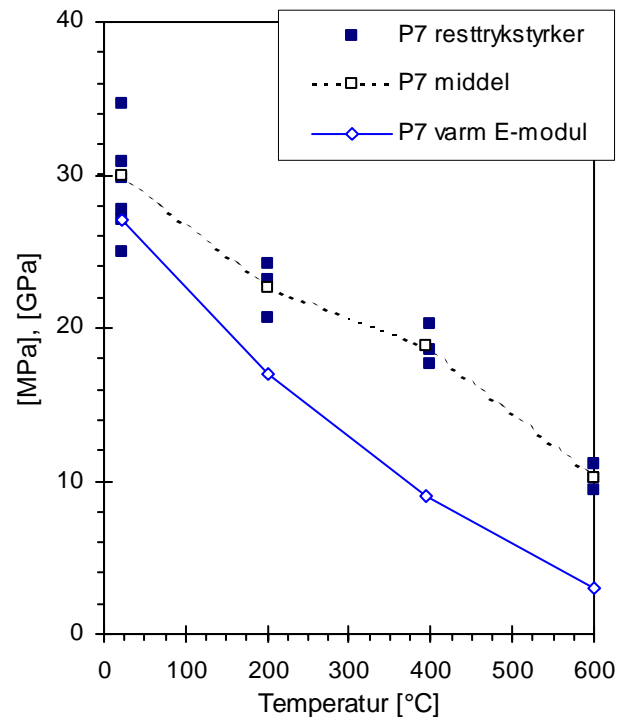
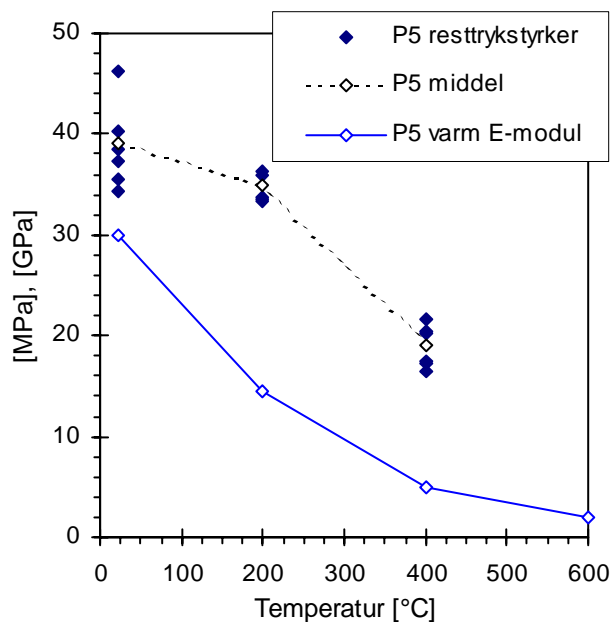
Prøveemne	Nominel temperatur [°C]	Varmt E-modul [GPa]	Resttrykstyrke [MPa]
Beton PR			
PR-2 & PR-5	Rumtemperatur	35,0	41
PR-3 & PR-4	200	20,0	34
PR-6 & PR-7	400	10,0	22
PR-8 & PR-9	600	3,0	Ej målt †
Beton P5			
P5-14 & P5-15	Rumtemperatur	30,0	39
P5-13 & P5-16	200	14,5	35
P5-17 & P5-19	400	5,0	19
P5-1 & P5-8	600	< 2,0	Ej målt †
Beton P7			
P7-5 & P7-6	Rumtemperatur	27,0	30
P7-4 & P7-7	200	17,0	23
P7-8 & P7-10	400	9,0	19
P7-11 & P7-12	600	3,0	10

Tabel 7: Oversigt over mekaniske egenskaber E-modul målt i varm tilstand og resttrykstyrke efter afkøling. Resttrykstyrken er målt efter opsavning af prøveemne i 3 cylindre og foregik nogle uger efter opvarmning. I den mellemliggende periode er prøveemnerne opbevaret i laboratoriet uforseglede. Alle data er middelværdier af de afprøvede emner.

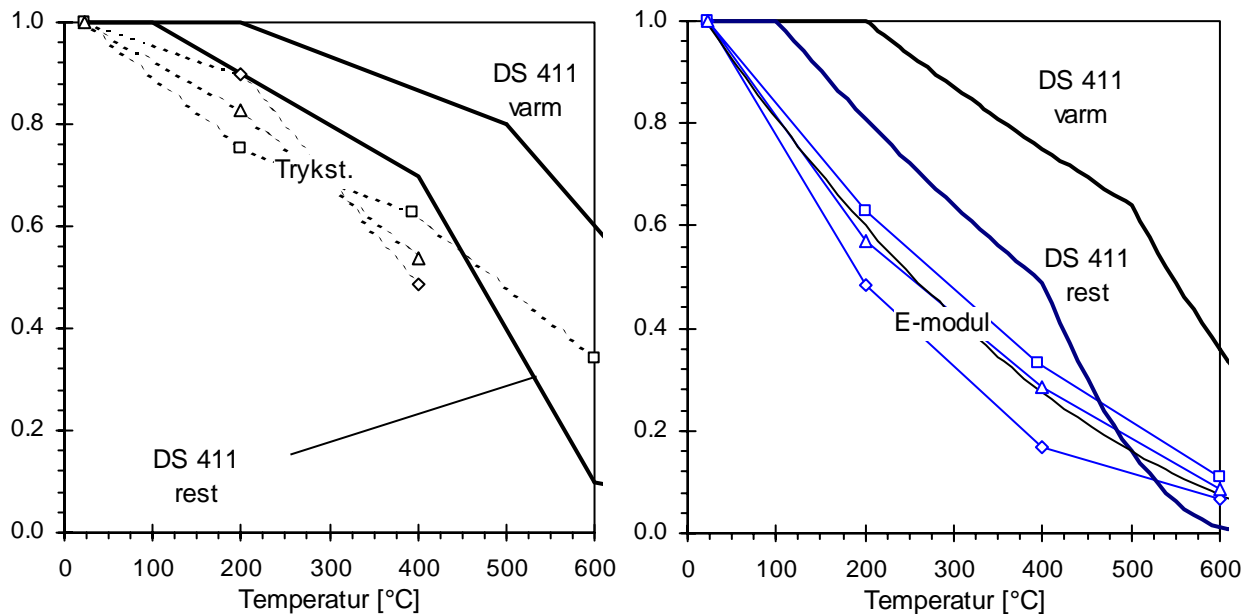
Note: † Prøveemner for skrøbelige til at save og håndtere.



Figur 5: Målte styrker og stivheder. Resttrykstyrker [MPa] (stiplet linie) målt efter afkøling fra den angivne nominelle maksimumstemperatur. Begyndelses E-modul [GPa] (fuldt optrukket linie) målt i varm tilstand. Bemærk at egenskaberne er målt på cylindre med diameter 83 mm og ikke på standardcylindre.



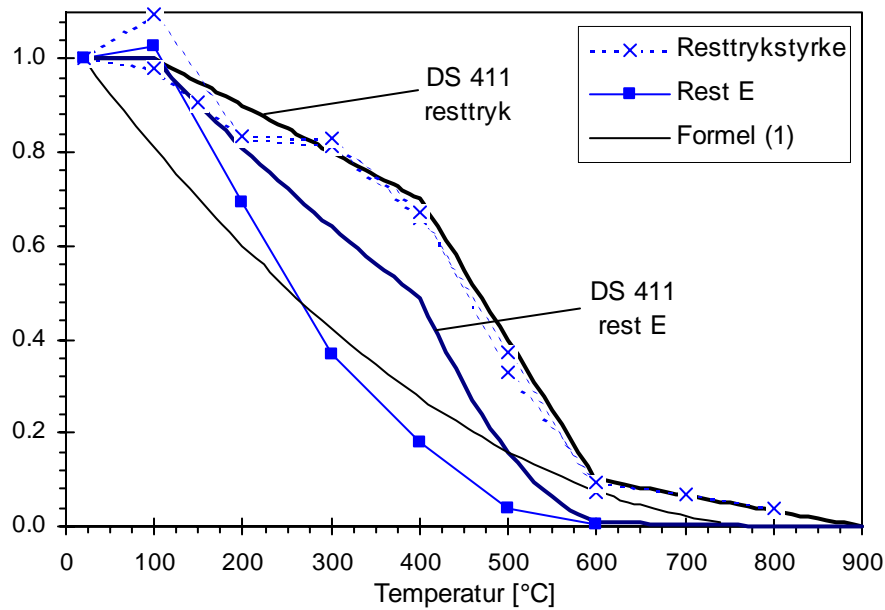
I Figur 5 og Figur 6 ses, hvordan resttrykstyrkerne aftager med voksende temperaturniveau. Desuden er optegnet de styrkereduktionsfaktorer, som er angivet i DS 411:1999. Generelt er den varme trykstyrke højere end resttrykstyrken, idet afkølingen udsætter betonen for yderligere beskadigelse. Alle tre betontyper udviser nogenlunde den samme normaliserede styrkereduktion, men det må forventes at PR og P5 er næsten uden styrke efter 600 °C, hvorimod P7 stadig har 30 % styrke efter denne opvarmning. Styrkereduktionen svarer nogenlunde til DS 411's udtryk, som dog ses at ligge over forsøgsresultaterne (Figur 6).



Figur 6: Styrke og stivhed normeret i forhold til den kolde værdi. Resttrykstyrker til venstre og varmt E-modul til højre. For de absolutte værdier se Figur 5, hvor også signaturforklaringen er givet. DS 411:1999 angiver en stykkevis lineær kurve for trykstyrkens reduktionsfaktor ξ_c og reduktionsfaktoren for E-modulet er defineret ved $\xi_E = \xi_c^2$ ifølge DS 411.

Det varme E-modul er ligeledes optegnet i Figur 6. DS 411 definerer reduktionsfaktoren på E-modulet som kvadratet på styrkereduktionsfaktoren. Dette ses imidlertid at overvurdere E-modulet betydeligt. Forsøgsresultaterne udviser et tydeligt konkavt forløb, mens DS 411's potensudtryk udviser overvejende konveks opførsel pga. de indlagte knæpunkter.

Det skal bemærkes, at reduktionsfaktoren ξ_c i Figur 6 for resttrykstyrken iht. DS 411 er baseret på en forsøgsserie af Hertz [2] udført på en dansk beton med sømaterialer (Figur 7). I samme forsøgsserie er rest E-modulet bestemt og her ses det ligeledes, at DS 411 overvurder stivheden. Endvidere kan det diskuteres hvor stor en vægt der skal lægges på værdierne målt efter opvarmning til 100 °C, hvor også indflydelsen fra uhydratiseret cement spiller en rolle, idet prøveemnerne kun er 14 dage på opvarmningstidspunktet.



Figur 7: Restværdier for styrke- og stivhedsreduktionsfaktorer rapporteret i [2] for dansk beton med sømaterialer (kold trykstyrke ca. 18 MPa).

Følgende udtryk for reduktionsfaktoren på E-modulet foreslås i form af et parabolisk funktionsudtryk:

$$\xi_E = \left(1 - \frac{T - T_0}{T_{top}}\right)^2, \quad T - T_0 \leq T_{top} \quad (1)$$

hvor T_0 = stuetemperatur og T_{top} = den temperatur regnet fra T_0 , hvor parablens toppunkt ligger og hvor reduktionsfaktoren er faldet til værdien nul. I Figur 6 og Figur 7 er udtrykket optegnet med $T_{top} = 800$ °C. Hvis princippet med, at ξ_E er kvadratet på ξ_c skal bibeholdes er ξ_c simpelthen givet ved det lineært aftagende udtryk i parantesen.

4.2 Fri termisk udvidelse uden belastning

Når beton opvarmes foregår der modsatrettede deformationer i de to faser tilslaget og pastaen. Førstnævnte udvider sig som de fleste faste stoffer, mens sidstnævnte trækker sig sammen pga. svind, når først det frie vand og dernæst det kemisk bundne vand fordrives.

De modsatrettede deformationer skaber indre spændinger i materialet som derved revner og mister sine mekaniske egenskaber såsom styrke og stivhed. Dette forhold er netop belyst i det foregående afsnit. Ud over spændinger pga. inkompatible deformationer optræder der også spændinger pga. temperaturgradienter. Disse indre spændinger vanskeliggør resultat-tolkningen.

På grund af at termisk udvidelse har en vis afhængighed af pastaens svind vil målingerne afhænge af opvarmningshastigheden samt af fugtindholdet ved opvarmningens start. En hurtigere opvarmning eller et mindre fugtindhold giver større termisk udvidelse, idet svindets indflydelse dermed mindskes. Dette er illustreret bl.a. i [3].

Opvarmning

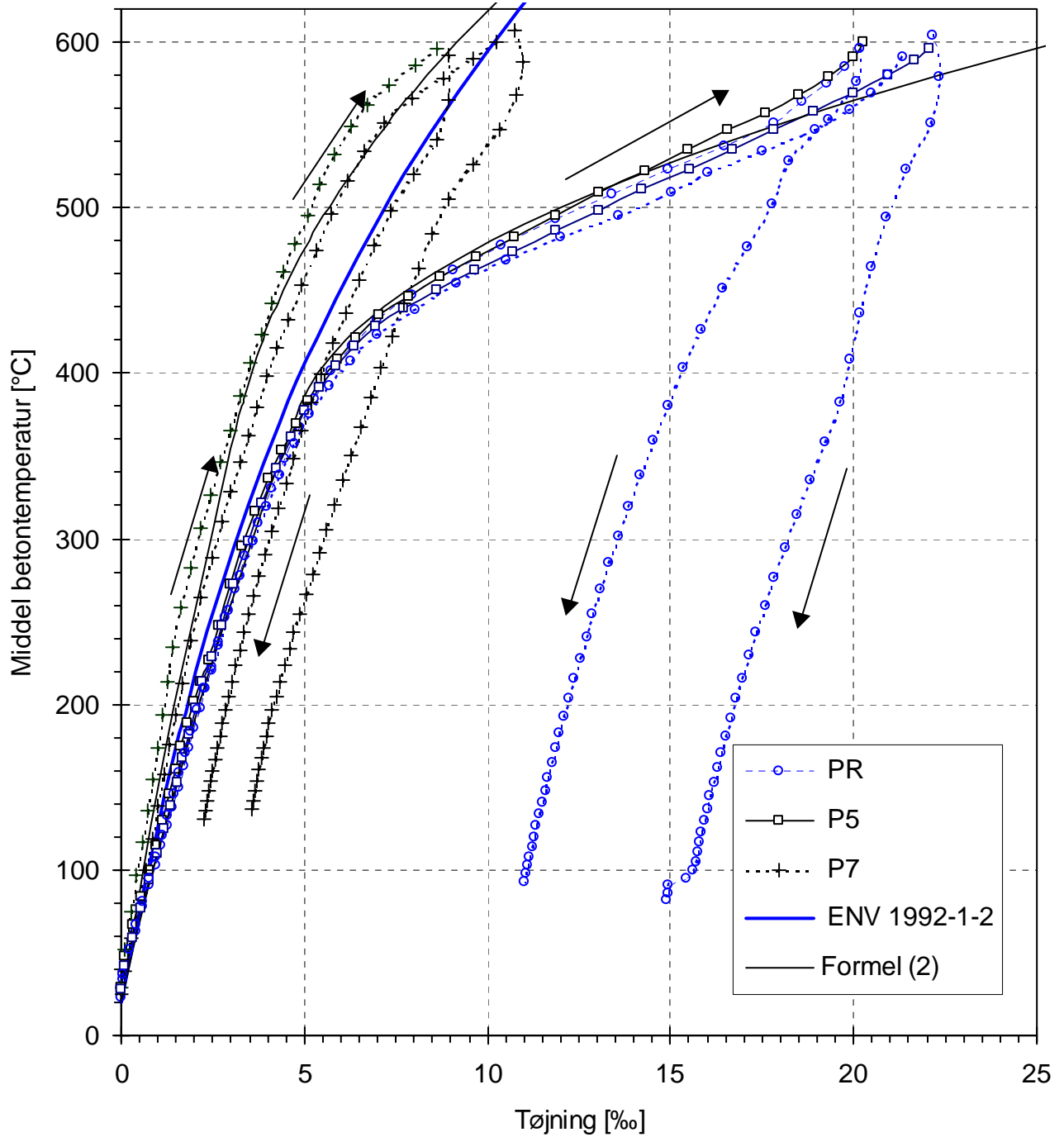
I nærværende afsnit præsenteres temperatur- og deformationsmålinger foretaget under opvarmning og afkøling i forbindelse med arbejdsurveforsøgene. Resultaterne er givet på kurveform i Appendiks C - Appendiks E for hver af de tre betontyper. De anvendte temperaturer angiver betonens middeltemperatur taget som middelværdien af de to indstøbte termofølere.

De to danske betontyper PR og P5, som benytter ens tilslag, udviser næsten fuldkommen identisk termisk udvidelse under opvarmning og afkøling (Figur 8). Indtil 400 °C er temperaturudvidelseskoefficienten ca. 15×10^{-6} per °C, hvorefter den stiger voldsomt til ca. 85×10^{-6} per °C indtil ca. 600 °C. Efter 600 °C er der ingen målinger i nærværende forsøgsserie, men udenlandske undersøgelser tyder på at udvidelseskoefficienten falder til nul [2], hvilket der også er indikationer af i målingerne.

Den svenske beton P7 udviser meget mindre termisk udvidelse end nævnt ovenfor under hele opvarmningsforløbet. Efter 600 °C ender den termiske udvidelse på ca. 10 ‰ for P7 mens PR og P5 måler 20 ‰ (Figur 8).

Den store forskel på de danske og den svenske beton kan tilskrives de flintholdige danske tilslagsmaterialer og brugen af rent quartz sand i PR og P5 i modsætning til P7, som udelukkende benytter nedknust granit som tilslag.

Figur 8 indeholder også et analytisk udtryk for den termiske udvidelse givet i Eurocode 2 [1] for quartzholdige tilslag. Udtrykket er defineret ved et 3. grads polynomium indtil 700 °C, hvorefter dentermiske tøjning holdes konstant lig 14 ‰. Som det ses er dette udtryk en udmærket middelværdi for alle betonerne indtil 400 °C.



Figur 8: Fri termisk udvidelse målt under opvarmning til ca. 600 °C samt under efterfølgende afkøling. Middel betontemperatur er middelværdi af måling i centrum af prøveemne og ca. 10 mm under overfladen. Positiv tøjning svarer til udvidelse. Se Appendiks C - Appendiks E for alle måledata.

Appendiks C - Appendiks E indeholder endvidere diagrammer, hvor temperaturudvidelseskoefficienten er beregnet på baggrund af tøjningsmålingerne både under opvarmning og afkøling. Under opvarmningen ses udvidelseskoefficienten at variere stærkt specielt i temperaturområdet op til 200 °C. Dette kan tilskrives, at det frie vand undslipper og at der foregår markante svindtøjninger i cementpastaen. Disse udsving er ikke synlige under afkølingen, hvor betonen er udtørret. Disse observationer er et tydeligt eksempel på at fugttransportmekanismer spiller en stor rolle for den termiske deformation.

Afkøling

Under afkølingsfasen trækker betonen sig sammen igen. Som det fremgår af Figur 8 foregår denne sammentrækning næsten ens for alle tre betontyper. Sammentrækningen andrager ca. 1,5 ‰ per 100 °C i gennemsnit.

Det er tydeligt at afkølingen tilbage til stuetemperatur efterlader PR og P5 med markante blivende forlængelser af størrelsesordenen 10 ‰. Denne blivende forlængelse kan direkte tolkes til primært at bestå af indre revnedannelse i prøveemnerne. Det var næsten muligt at skille prøveemner efter 600 °C ad med hænderne. Se fotos i Appendiks J .

For P7 er den blivende forlængelse efter 600 °C meget mindre og de synlige overfladerevner meget mindre i størrelse og udstrækning.

Analytisk model

Følgende sammensatte parabeludtryk foreslås til beskrivelse af den termiske udvidelse under opvarmning for beton PR og P5:

$$\varepsilon_{th}(\theta(T)) = \begin{cases} A\theta^2 + B\theta, & 0 \leq \theta \leq \theta^* \\ C(\theta - \theta^*)^2 + A(2\theta - \theta^*)\theta^* + B\theta, & \theta^* < \theta \end{cases} \quad (2)$$

hvor θ er normaliseret temperatur:

$$\theta = \frac{T - T_0}{100^\circ C}, \quad T_0 = 20^\circ C \quad (3)$$

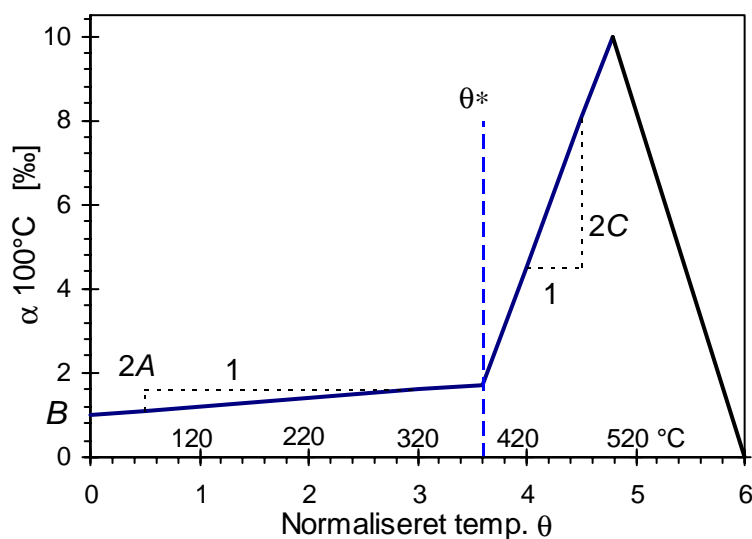
De tre parametre A , B og C fastlægges sammen med overgangstemperaturen θ^* således, at der er overensstemmelse med forsøgsdata. Temperaturudvidelseskoefficienten fås ved at differentiere (2) mht. T og er beskrevet af en bi-lineær funktion. Figur 9 viser, hvordan parametrene i (2) påvirker udvidelseskoefficienten. Af målingerne i Appendiks C og Appendiks D fremgår det, at udvidelseskoefficienten for PR og P5 topper ved ca. 100×10^{-6} per °C, hvorefter den falder. Dette er inkluderet i Figur 9 via den sidste faldende del af kurven.

Grunden til at benytte en sammensat funktion i stedet for blot at beskrive hele temperaturspektret vha. et 3. eller 4.-gradspolynomium er at dette giver mulighed for at fange det knæpunkt som er specielt tydeligt for PR og P5 omkring 400 °C.

Tabel 8 indeholder parametre tilpasset de tre betoner.

Betontype	A	B	C	θ^*
	[‰]	[‰]	[‰]	[-]
PR og P5	0,1	1,0	3,5	3,6
P7	0,06	0,7	0,7	3,6

Tabel 8: Parametre til beskrivelse af fri termisk udvidelse i (2). Se optegning af funktionsudtryk på baggrund af disse parametre i Figur 8. For at opnå overensstemmelse med forsøg skæres den termiske udvidelse af ved 20 ‰ for PR og P5.



Figur 9: Illustration af udvidelseskoefficientens variation med temperaturen iht. (2). Optegnet med data for PR og P5 i Tabel 8.

Bemærk at udvidelseskoefficienten α er normaliseret ved multiplikation med 100°C langs den lodrette akse.

4.3 Hindret termisk udvidelse under opvarmning med konstant belastning

Når prøveemnet udsættes for tryk samtidig med opvarmning kan der måles et fænomen, som betegnes transient krybning. Lasten og temperaturstigningen vil tilsammen skabe en deformationstilstand der overstiger summen af den frie termiske udvidelse og den mekanisk frembragte deformation. Mekanismen bag dette fænomen er stadig ubeskrevet. Andre termer, som benyttes i litteraturen til dette fænomen er "last-induceret termisk tøjning" eller "last-induceret svind" for ikke at forveksle det med konventionel krybning, som i øvrigt også er temperaturafhængig [3].

I nærværende forsøgsserie er dette undersøgt ved tre forskellige trykklasniveauer for hver beton. De tre niveauer svarer til ca. 11, 22 og 44 % af den kolde trykstyrke for hver beton. Tøjningsmålingerne fra disse forsøg findes i Appendiks F - Appendiks H. Målingerne viser desuden, at deformationerne under afkøling følger den termiske sammentrækning uanset om prøveemnerne er belastede eller ej. Det vil sige, at transient krybning kun forekommer under opvarmning og udgør dermed en irreversibel tøjning efter afkøling.

Modellering under opvarmning

For at kunne separere de forskellige bidrag til den målte tøjning benyttes følgende notation:

$$\varepsilon_{tot}(T, \sigma) = \varepsilon_{th}(T) + \varepsilon^{\sigma}(T, \sigma) + \varepsilon_{th}^{\sigma}(T, \sigma) \quad (4)$$

hvor de tre komponenter på højresiden er hhv. fri termisk udvidelse, mekanisk deformation og transient krybning. Den totale tøjning er den som måles under et forsøg. Bemærk i den forbindelse, at kurverne i Appendiks F - Appendiks H ikke inkluderer den mekaniske sammentrykning, der er til stede ved forsøgets start (baseret på det kolde E-modul).

På baggrund af ε_{tot} kan den transiente krybning bestemmes ved at fratække summen af ε_{th} og ε^{σ} . Den frie termiske udvidelse formuleres vha. (2) i afsnit 4.2 og den mekaniske sammentrykning som $\varepsilon^{\sigma} = \sigma / (\xi_E E(20^{\circ} C))$ med reduktionsfaktoren givet ved (1) i afsnit 4.1.

Appendiks F - Appendiks H indeholder optegning af den transiente krybning beregnet som beskrevet ovenfor. Det antages normalt at, $\varepsilon_{th}^{\sigma}$ er proportional med trykspændingen, hvorved følgende sammenhæng kan formuleres:

$$\varepsilon_{th}^{\sigma}(T, \sigma) = \frac{\sigma}{f_c^0} \xi(T) \quad (5)$$

hvor den transiente krybnings fortegn følger spændingens, dvs. tryk giver negativ tøjning og dermed sammentrykning.

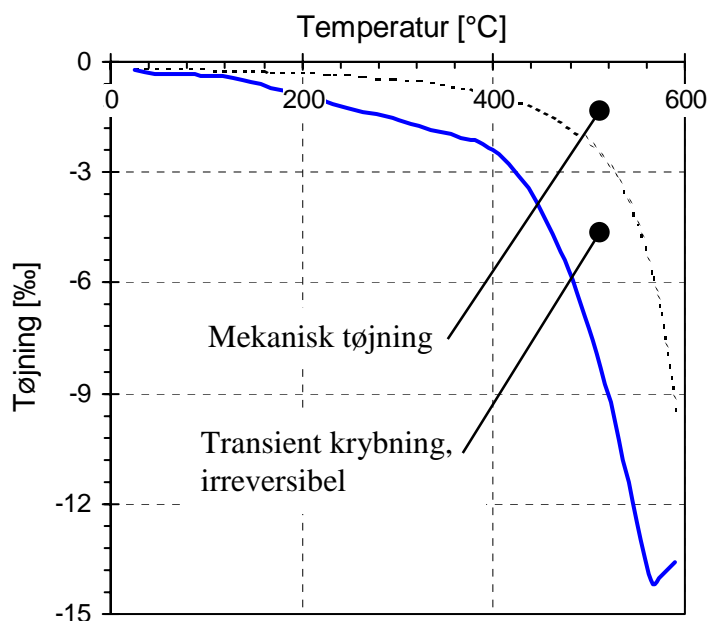
Formel (5) benyttes bl.a. i en velkendt model foreslået af Anderberg & Thelandersson [3], hvor den transiente krybning er proportional med den frie termiske udvidelse med en proportionalitetsfaktor lig $2,35\sigma/f_c^0$, hvor f_c^0 angiver den kolde trykstyrke. Det vil sige, at $\xi = 2,35\varepsilon_{th}$ i ovennævnte udtryk. Denne model foreslås bl.a. i DS 411:1999.

Figur 11 indeholder ξ som en funktion af betontemperaturen, hvorved spændingen udgår som parameter og forsøgsresultaterne bliver direkte sammenlignelige.

Følgende kommentarer kan knyttes til de normaliserede transiente krybetøjninger (Figur 11):

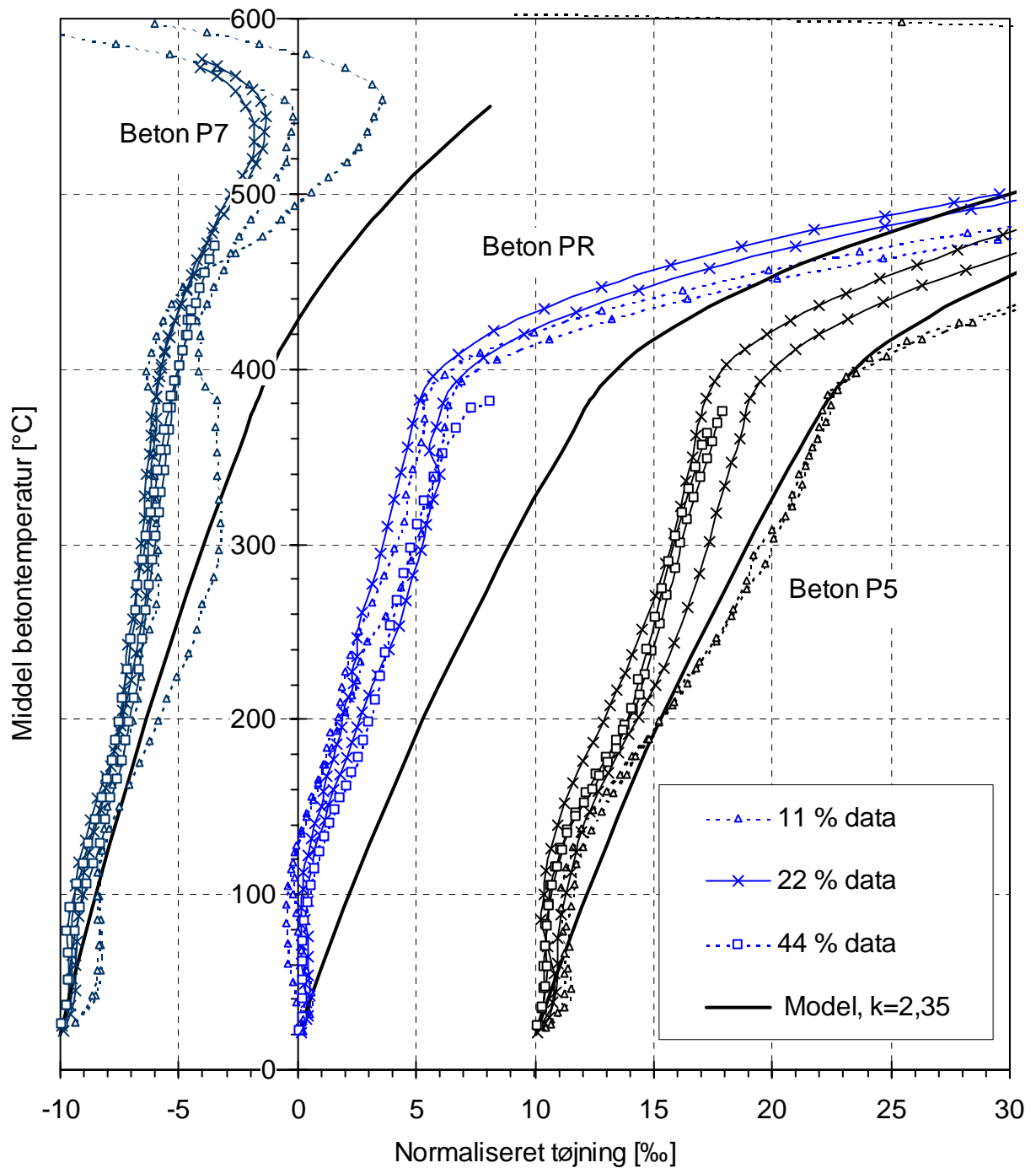
- For PR og P7 er tøjningerne fundet at være proportionale lastniveauet som normalt antaget. For P5 ligger tøjningerne mere spredt, hvilket kan være et udtryk for en større forsøgsvariation. Dette kan også skyldes, at denne forsøgsserie blev udført først med indkøring af de eksperimentelle procedurer.
- For temperaturer under 100 °C inden fugttransportmekanismerne accellererer er tøjningerne ubetydelige, men som det ses i næste afsnit kan de ikke negligeres.

- Ved temperaturer over 550 °C “vender tøjningerne” for P5 og P7, at. Dette skyldes at E-modulet bliver meget lille og derved vokser den mekaniske tøjningskomponent for en given spænding (Figur 10). Det skal holdes for øje at ved disse høje temperaturer opfører betonen sig næsten plastisk og E-modulet er ikke særligt veldefineret, jf. Appendiks B .
- Målingerne på PR og P5, som i mange henseender er identiske betoner, udviser en større transient krybning for P5 end for PR. Dette kan delvist tilskrives, at P5 indeholder beton-slam som erstatning for en del af sandfraktionen. Derved får P5 et lidt højere pastavolumen end PR. En anden mulig årsag er forskelle i fugtindholdet på prøvningstidspunktet.
- En sammenligning med Anderberg & Thelanderssons model [3] optegnet med fed i Figur 11 viser, at denne generelt overvurderer den transiente krybning på de afprøvede betoner. Derved fås en undervurdering af deformationer og tvangsspændinger, når denne model benyttes set ift. forsøgsresultaterne.
- I forlængelse af ovennævnte kan bemærkes, at der ikke er nogen plausibel grund til at hægte transient krybning og termisk udvidelse sammen, idet førstnævnte udelukkende styres af pastadelen og sidstnævnte primært styres af tilslaget.



Figur 10: Lastafhængige tøjninger målt på P7-18 under konstant tryklast og opvarmning.
 Stiplet linie = $\epsilon^\sigma = \sigma/E(T)$.
 Fed linie = $\epsilon^\sigma + \epsilon_{th}^\sigma$.
 Negativ tøjning svarer til sammentrykning.

Det skal ikke på det foreliggende grundlag forsøges at opstille et analytisk udtryk for den transiente krybnings størrelse. Dette kræver flere forsøg samt en indgående sammenligning med andre forsøg på området.



Figur 11: Transient krybning divideret med σf_c^0 iht. (5). Optegnet for PR, P5 og P7 prøveemner under opvarmning.

De fede kurver angiver modellen svarende til 2,35 gange den frie termiske udvidelse [3].

Bemærk at resultaterne for P5 og P7 er parallelforskydte langs den vandrette akse for lettere at kunne adskille kurverne.

Genopvarmningsforsøg

Der er foretaget gentagelsesforsøg med to prøveemner PR-10 og P7-17, begge belastet med ca. 11 % af f_c^0 og opvarmet til næsten 600 °C. Den anden opvarmning foregik hhv. efter en halv uge og en hel uge for PR-10 og P7-17. Mellem opvarmningsforsøgene blev prøveemnerne opbevaret uforseglet i laboratoriet.

Som det fremgår af tøjningsdiagrammerne i Bilag F-PR.1 og Bilag H-P7.1 er de målte tøjninger under begge opvarmninger fundet at være praktisk talt identiske. Dette er i modstrid med den gængse opfattelse af transient krybning, som normalt beskrives til kun at optræde i forbindelse med det første opvarmningsscenario.

Da genopvarmningsproblematikken ikke er blevet undersøgt systematisk i det foreliggende forsøgsprogram skal de to nævnte forsøg ikke bruges til at drage konklusioner andre end, at dette specialområde af betons opførsel under høje temperaturer langt fra er belyst tilstrækkeligt.

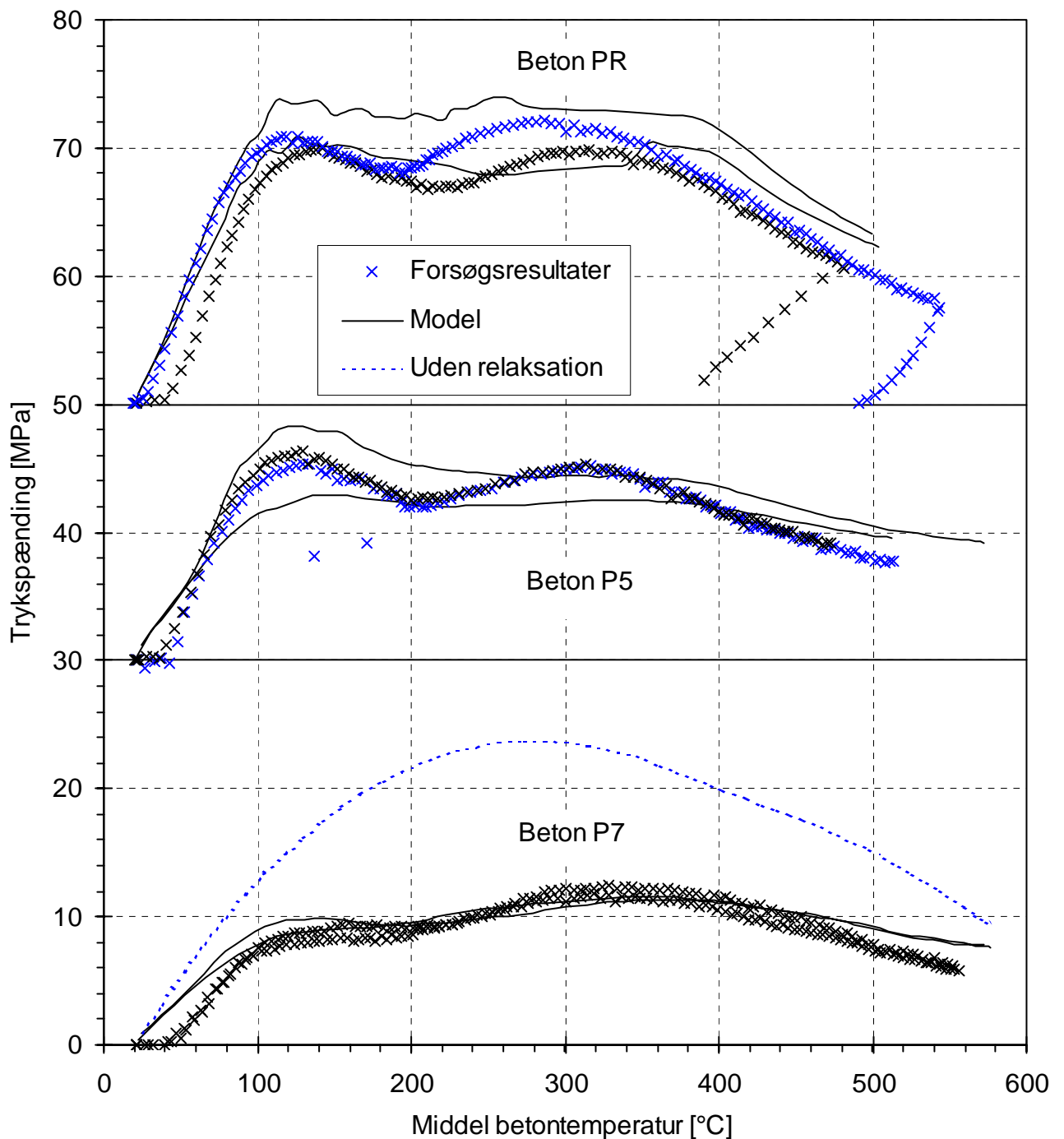
4.4 Fastholdt prøveemne under opvarmning

Dette forsøg udføres ofte for at belyse betons transiente krybning under opvarmning, hvor prøveemnets deformationer er fuldstændig hindret. Derved opstår der trykspændinger, når prøveemnet forsøger at udvide sig, men pga. den transiente krybning samt den aftagende betonstivhed vil der også foregå en relaxsation af trykspændingerne. Resultaterne i form af trykspændinger er givet i Appendiks I.

I [4] er dette fænomen beskrevet gennem et simpelt eksempel. Forsøget kan modelleres ved at omformulere (4) på følgende vis:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{tot} &= \varepsilon_{th} + \varepsilon^{\sigma} + \varepsilon_{th}^{\sigma} = 0 \\ \Downarrow & \\ -\frac{\sigma(T)}{f_c^0} &= \frac{\varepsilon_{th}(T)}{\frac{f_c^0}{\xi_E E(T_0)} + \varepsilon(T)} \end{aligned} \quad (6)$$

hvor minustegnet på venstresiden er medtaget for at operere med positive spændingsværdier i diagrammerne (Figur 12). Den frie termiske udvidelse er formuleret som (2) med parametre givet i Tabel 8. E-modulets temperaturafhængighed er modelleret vha. reduktionsfaktoren i (1). Den transiente krybetøjning er modelleret vha. (5), hvor ε er taget fra forskellige forsøg med konstant belastning (se Appendiks I). Derved er det kun den transiente krybning, som er forskellig for de to beregningskurver for hver beton i Figur 12 og kurvernes variation er en direkte indikation af følsomheden overfor en variation af den transiente krybning.



Figur 12: Trykspændinger målt under opvarmningsforsøg, hvor prøveemnet er fastholdt imod udvidelse. For PR er desuden målt spændingstabet under afkøling. Kurverne er forskudt langs spændingsaksen for at lette aflæsningen. Se også Appendiks I.

Fuldt optrukne linier = modelberegninger udført på baggrund af (6).

Stiplet linie = beregning uden hensyntagen til transient krybning.

Der er generelt fundet god overensstemmelse mellem de fastholdte deformationsforsøg og den tilhørende forudsigelse udført på baggrund af de øvrige opvarmningsforsøg. Forløbet af spændingskurverne er principielt ens og da tælleren i (6) vokser monotont med temperaturen er det nævneren som styrer opførslen:

- Indtil 100 °C stiger spændingen stærkt, idet den transiente krybning (relaksationen) i dette interval er beskeden. Hvis den transiente krybning negligeres i dette temperaturinterval fås imidlertid en markant overvurdering af trykspændingen (stiplet linie i Figur 12).
- Efter 100 °C begynder den transiente krybning at kontrollere opførslen. Specielt efter 400 °C, hvor ϵ stiger markant, fås aftagende spændinger dels pga. relaksationen herfra, men også fra det stærkt aftagende E-modul.
- Grunden til, at beregningerne ikke fanger det markante lokale spændingsminimum omkring 200 °C, som observeres for PR og P5 er, at den benyttede model for den termisk udvidelse (2) ikke medtager effekten af fugttransport. En effekt der er specielt synlig omkring denne temperatur (Appendiks C - Appendiks E).

Hvis den transiente krybning, og dermed spændingsrelaksationen, negligeres er der i Figur 12 indtegnet en stiplet linie for P7, som benytter $\epsilon = 0$ i (6). Spændingen stiger under dette tænkte eksempel til 24 MPa ved ca 280 °C, hvilket er i åbenbar modstrid med måleresultaterne.

Under afkøling medvirker de irreversible transiente krybetøjninger til, at prøveemnet er spændingsfrit allerede efter omtrent 100 °C afkøling. Dette ses af prøveresultater for PR i Figur 12. Hvis prøveemnet også var fastholdt imod sammentrækning i forsøgsopstillingen ville en yderligere afkøling betyde opbygning af trækspændinger og trækbrud/revnedannelse i prøveemnet. Et eksempel på dette er givet i [4] og har stor relevans, hvor en betonkonstruktionsdel er hindret i at deformere sig frit under brand, opvarmning og afkøling pga. tilstødende konstruktionsdele. Derved gives betonen en meget mere skadelig påvirkning under afkølingsfasen end under opvarmningen.

5. Konklusioner

Det er normalt tilslaget, som styrer betons termiske opførsel. De grønne tiltag i forsøgsseriens grønne betoner (P5 og P7) har ikke rykket markant på betonens tilslagsdel, hvorfor det forventes, at resultaterne og konklusionerne fra forsøgsserien kan knyttes generelt til normal beton.

Følgende generelle konklusioner kan drages af forsøgsresultaterne:

- Reststyrken aftager mere end hvad der normalt antages i fx. DS 411:1999. Dette kan skyldes, at afkølingen starter med en relativ stor temperaturgradient som bevirker revnedannelse, idet transient krybning ikke eksisterer under afkøling.
- For temperaturer over 400 °C giver den svenske beton P7 de bedste egenskaber både hvad angår reststyrke og varmt E-modul. Dette kan bl.a. tilskrives, at PR og P5 generelt udviser den største termiske udvidelse.
- Det varme E-modul er fundet til under halvdelen af den værdi som angives af DS 411:1999. Dette gælder alle tre betoner. Et nyt forslag til en analytisk beskrivelse af reduktionsfaktoren herfor er givet.
- Den termiske udvidelse er kvantificeret for de tre betoner inkl. en analytisk beskrivelse herfor. Forskellen i termisk udvidelse tilskrives forskellen i tilslag mellem den svenske og de to danske betoner.
- Den svenske beton P7, som er baseret på nedknust granittilslag, udviser en termisk udvidelse som er lidt mindre end udtrykket givet i Eurocode 2 [1]. Udvidelsen ved 600 °C er ca. 10 ‰. Dette stemmer endvidere overens med resultaterne i den svenske undersøgelse i [3].
- De danske betontyper PR og P5, som indeholder quartz sand og sømaterialer, udviser en markant større termisk udvidelse end P7 voksende til ca. 20 ‰ ved 600 °C. Desuden fås en blivende udvidelse på ca. 10 ‰ efter afkøling.
- De transiente krybetøjninger er bestemt og de er fundet at være proportionale med den påførte trykspænding. En sammenligning mellem forsøgsresultater og beregning med fastholdt deformation fås en tilfredsstillende overensstemmelse med den trykspænding, der opbygges under opvarmning.

6. Referencer

- [1] prEN 1992-1-2 “Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1.2: General rules – Structural fire design”, CEN, December 2001.
- [2] Hertz, K. “Betonkonstruktioners brandtekniske egenskaber”, Institutet for Husbygning, DTU, Rapport nr. 140, 1980.
- [3] Anderberg, Y. & Thelandersson, S. “Stress and deformation characteristics of concrete at high temperatures”, Lund Institute of Technology, Bulletin 54, 1976.
- [4] Nielsen, C.V., Pearce, C.J. & Bicanic, N. “Theoretical model of high temperature effects on uniaxial concrete member under elastic restraint” *Magazine of Concrete Research*, Vol. 54, No. 4, 2002, pp. 239-249.

Appendiks A Temperaturmålinger

Kan rekvireres ved henvendelse til Teknologisk Institut, Beton.

Appendiks B Varme trykarbejdslinier

Kan rekvireres ved henvendelse til Teknologisk Institut, Beton.

Appendiks C Frie termiske deformationer for beton PR

Kan rekvireres ved henvendelse til Teknologisk Institut, Beton.

Appendiks D Frie termiske deformationer for beton P5

Kan rekvireres ved henvendelse til Teknologisk Institut, Beton.

Appendiks E Frie termiske deformationer for beton P7

Kan rekvireres ved henvendelse til Teknologisk Institut, Beton.

Appendiks F Hindrede termiske deformationer for PR

Kan rekvireres ved henvendelse til Teknologisk Institut, Beton.

Appendiks G Hindrede termiske deformationer for P5

Kan rekvireres ved henvendelse til Teknologisk Institut, Beton.

Appendiks H Hindrede termiske deformationer for P7

Kan rekvireres ved henvendelse til Teknologisk Institut, Beton.

Appendiks I Fastholdt prøveemne under opvarmning

Kan rekvireres ved henvendelse til Teknologisk Institut, Beton.

Appendiks J Fotos fra prøvning

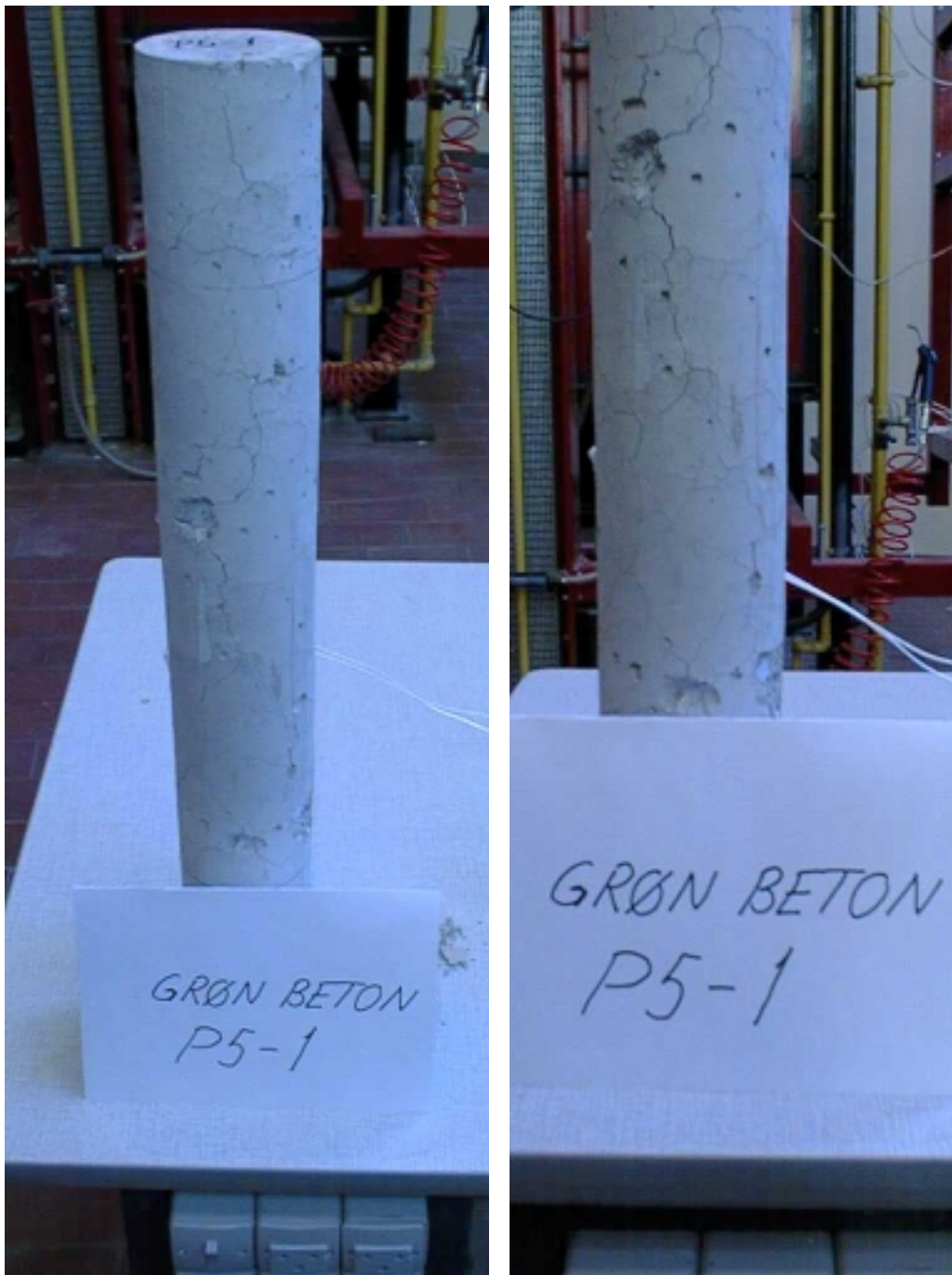


Fig. J.1: Prøveemne P5-1 efter afkøling fra ca. 600 °C.

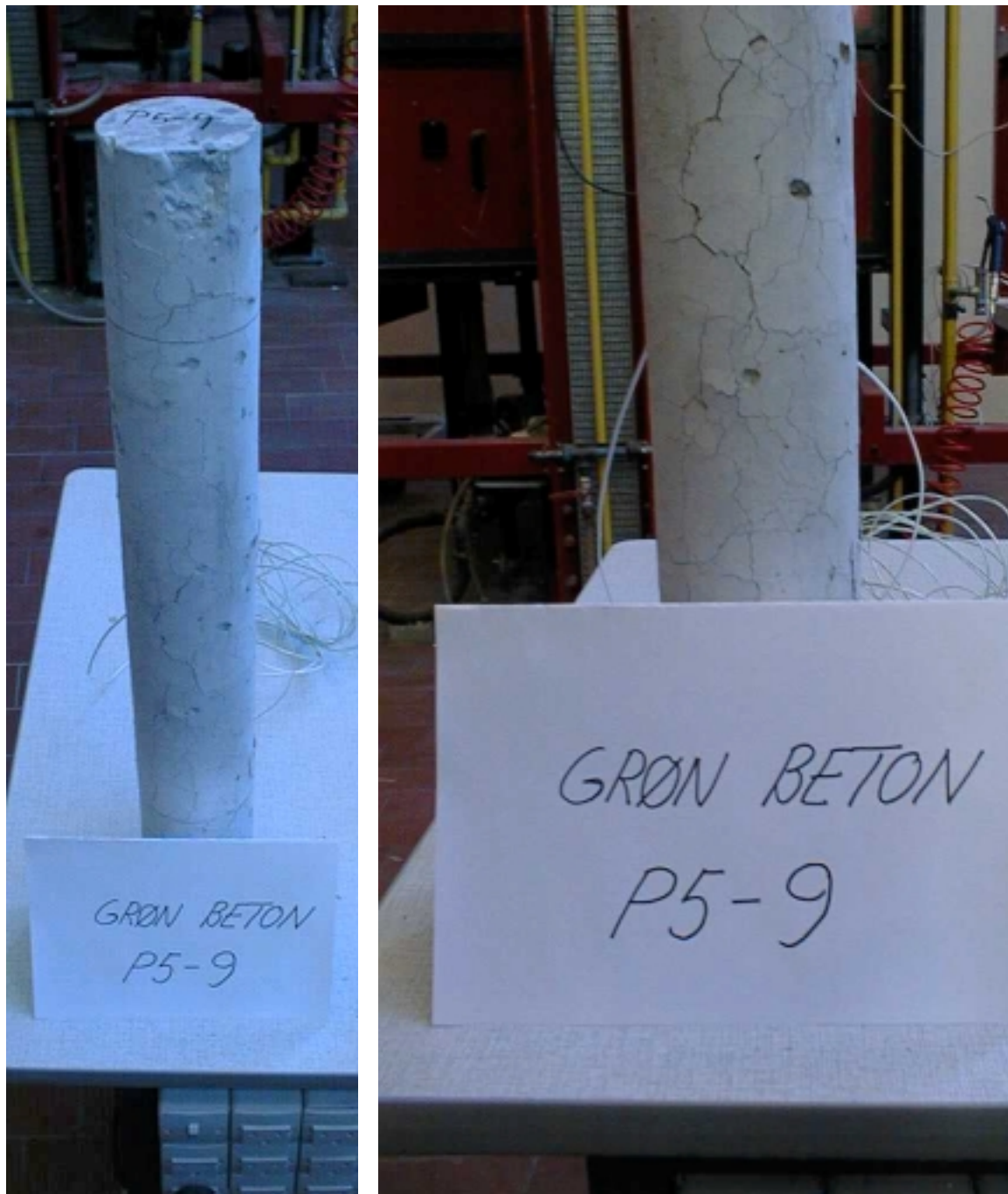


Fig. J.2: Prøveemne P5-9 efter afkøling fra ca. 600 °C.



Fig. J.3: Prøveemne P5-6 efter afkøling. Brud skete under konstant trykspænding på ca. 9 MPa ved en temperatur på ca. 570 °C.



Fig. J.4: Prøveemne PR-14 efter afkøling. Brud skete under konstant trykspænding på ca. 17 MPa ved en temperatur på ca. 340 °C.



Fig. J.5: Prøveemne PR-19 efter afkøling fra ca. 550 °C under fastholdt deformationsforsøg.



Fig. J.6: Prøveemne PR-4 og PR-7 efter afkøling fra hhv. 200 og 400 °C. Savet op i 3 cylindre til bestemmelse af resttrykstyrker.

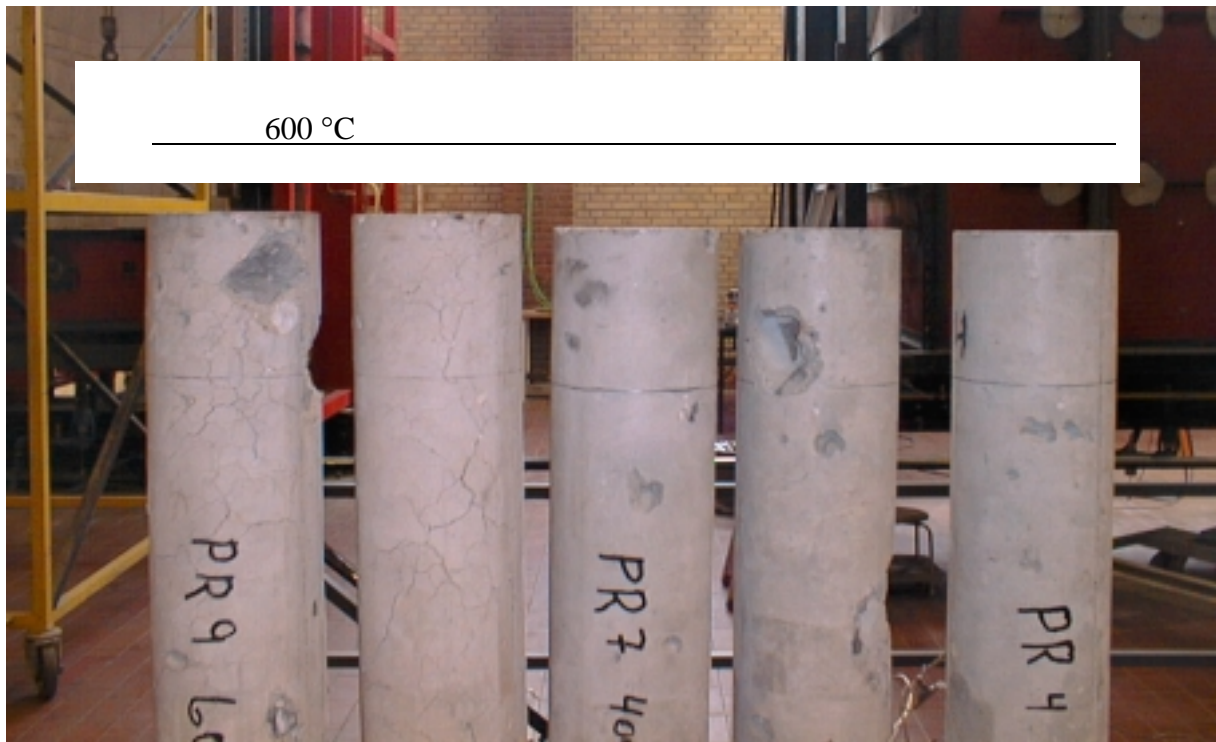


Fig. J.7: Prøveemne PR-4 PR-6, PR-7, PR-8 og PR-9 efter afkøling fra de angivne temperaturniveauer.

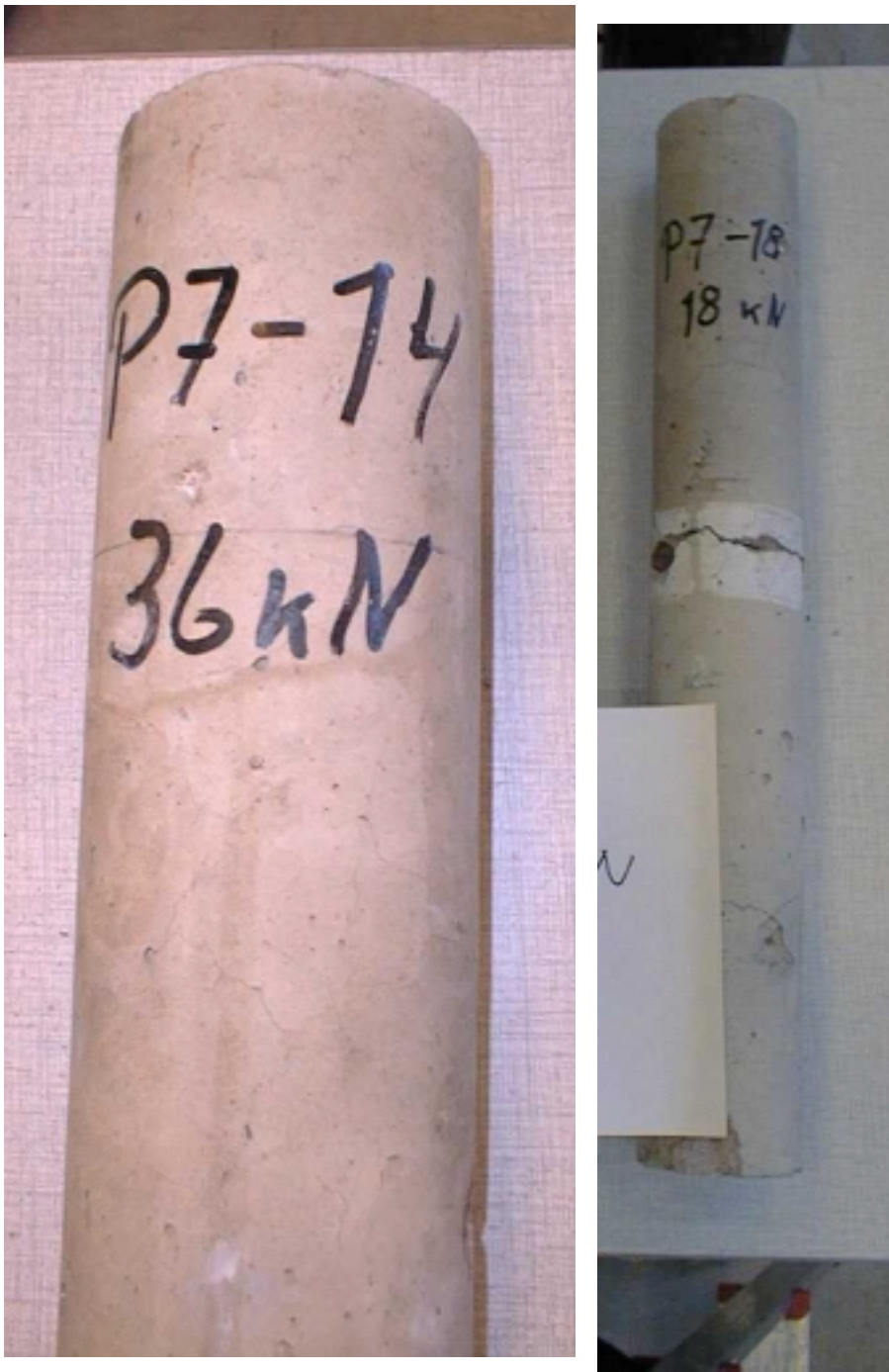


Fig. J.8: Prøveemne P7-14 og P7-18 efter afkøling fra ca. 600 °C.