



## **Center for Grøn Beton**

**Fugttransport, svind- og temperatur-  
deformationer samt krybning**

***Udført af:***

*Claus Vestergaard Nielsen*

*Teknologisk Institut, Beton, december 2002*

Titel: Fugttransport, svind- og temperaturdeformationer samt krybning

Udført af: Claus Vestergaard Nielsen

Dato: December 2002

ISBN: 87-7756-686-6

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

## Indholdsfortegnelse

<b>0. INDLEDNING .....</b>	<b>4</b>
<b>1. PRØVNINGSOMFANG.....</b>	<b>5</b>
<b>2. BETONRECEPTER .....</b>	<b>6</b>
<b>3. FUGTTRANSPORT OG SVIND.....</b>	<b>8</b>
3.1 FORMÅL.....	8
3.2 METODEBESKRIVELSE.....	8
3.3 RESULTATER.....	10
<b>4. TEMPERATURUDVIDELSE .....</b>	<b>14</b>
4.1 FORMÅL .....	14
4.2 METODEBESKRIVELSE.....	14
4.3 RESULTATER.....	15
<b>5. KRYBNING.....</b>	<b>16</b>
5.1 FORMÅL .....	16
5.2 METODEBESKRIVELSE.....	16
5.3 RESULTATER.....	18
<b>6. KONKLUSIONER.....</b>	<b>19</b>
6.1 SVIND.....	19
6.2 TEMPERATURUDVIDELSE .....	19
6.3 KRYBNING .....	20
<b>7. REFERENCER .....</b>	<b>21</b>

## Appendiks oversigt

APPENDIKS A SVINDMÅLINGER

APPENDIKS B MÅLINGER AF TEMPERATURDEFORATIONER

APPENDIKS C MÅLINGER AF KRYBNING FOR BETON AR

APPENDIKS D MÅLINGER AF KRYBNING FOR BETON A1

APPENDIKS E MÅLINGER AF KRYBNING FOR BETON A3

APPENDIKS F SAMMENLIGNING AF KRYBE- OG SVINDTØJNINGER

## 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 prøvning udført i den faglige aktivitet BK1: Mekaniske egenskaber.

I *BK1, udvidet pakke* udføres følgende undersøgelser:

### Materialeundersøgelser

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

### Konstruktionsundersøgelser

- Armerings forankringsevne
- Bøjningsbæreevne af bjælker
- Forskydningsbæreevne af bjælker
- Instabilitet af bjælkesøjler

For en given beton vil det være relevant at udføre alle ovennævnte prøvninger afhængigt af det tiltænkte anvendelsesområde. Det er imidlertid ikke muligt indenfor rammerne af Grøn beton at gennemføre samtlige prøvninger for alle betoner udvalgt til stor pakke. Det er derfor valgt at begrænse prøvningerne for de enkelte betoner.

Denne rapport beskriver resultater fra den udførte prøvning vedr. fugtbevægelser, svind- og temperaturdeformationer samt krybning under moderat lastniveau.

De øvrige forsøgsresultater fra BK1 er rapporteret i Grøn Beton fagrapporterne:

- "BK1 – Stor Pakke, Mekaniske Egenskaber", Februar 2001.
- "Arbejdskurver, spaltetræksstyrke og udmattelsesundersøgelse", December 2002.
- "Forskydningsbæreevne af bjælker. Forankring af gevindstænger", December 2002.
- "Bøjning af armerede bjælker. Instabilitet af søjler", December 2002.

## 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, Horsens
P3	NRC	slamaske	Unicon, Horsens
P5	NRC	betonslam	Unicon, Horsens
P7	Bygg C	flyveaske fra bio.	Sydsten, Malmø
AR	SAC	-	Unicon, Horsens
A0	NRC	(cementen)	Unicon, Horsens
A1	NRC	højt flyveaskeindhold	Unicon, Horsens
A3	NRC	slamaske	Unicon, Horsens
A6	ANL	stenmel	Sydsten, Malmø

Tabel 1: Betoner udvalgt til udvidet pakke generelt.

I BK1, udvidet pakke er det valgt helt at udelade prøvning af betonerne A0 og A6 af økonomiske og tidsmæssige årsager. A0 er udeladt da denne umiddelbart er lovlig at anvende i henhold til gældende normer. A6 er udeladt, da det er besluttet at denne ikke indgår i demobroen. Desuden er P3 udeladt af økonomiske og tidsmæssige årsager, da den ikke indgår i Demobroen.

Fugtbevægelser bestemmes for alle øvrige betoner, mens temperaturudvidelser og krybning kun er undersøgt for A-betonerne, jf. Tabel 2. Årsagen til at krybning og temperaturudvidelse er forbeholdt betoner til aggressiv miljøklasse er at disse benyttes udendørs under markante temperaturudsving samt under forspænding, hvor krybeegenskaberne er specielt væsentlige.

	AR	A0	A1	A3	A6	PR	P3	P5	P7
Fugttransport og svind	+	-	+	+	-	+	-	+	+
Temperaturudvidelse	+	-	+	+	-	-	-	-	-
Krybning	+	-	+	+	-	-	-	-	-

Tabel 2: Prøvning af svind- og temperaturdeformationer samt krybning i BK1, udvidet pakke.

## 2. Betonrecepter

Betonrecepterne for de betragtede betoner er angivet i Tabel 3 og Tabel 4. Alle prøveemner for en given beton er støbt med beton fra ét læs.

Materiale	Type	AR-1 kg/m <sup>3</sup>	AR-2 kg/m <sup>3</sup>	A1-1 kg/m <sup>3</sup>	A1-2 kg/m <sup>3</sup>	A3 kg/m <sup>3</sup>
cement	SAC	308,2	309,9	-	-	-
	NRC	-	-	206,9	202	304,1
mikrosilica	Pulver	17,7	17,4	17,2	17	17,3
flyveaske	Emineral B5	-	-	-	136	-
	Danaske B1	30,6	31,4	137,3	-	-
restprodukt	Slamaske, Avedøre	-	-	-	-	30,9
	Betonslam (tørstof)	-	-	-	-	-
vand	Vandværksvand	147,6	150,0	132,0	124	137,1
sand	0/2 A Vestbirk	650	642	662	648	613
sten 1	4/8 A Eikefet	230	229	230	232	227
sten 2	8/16 A Eikefet	368	343	339	322	329
sten 3	16/32 A Eikefet	546	572	577	540	566
Luftindbl.	Conplast AEA316 1:5	0,02	0,02	0,02	2,12	0,01
Plast	Conplast 212	0,90	0,91	0,88	2,48	1,11
Superplast	Strukturo BA1	-	-	0,81	3,53	-
	Conplast SP610	-	-	-	-	1,46
Målt luft		6,8 %	6,8 %	6,2 %	8,8 %	10,5 %
Ækv. v/c		0,411	0,416	0,426	0,43	0,387
Støbetidspunkt		20.03.01 kl. 13:56	21.03.01 kl. 15:00	06.06.01 kl. 11:56	06.02.02 kl. 13:49	28.06.02 kl. 13:16

*Tabel 3: Recepter for aggressive betoner. De angivne værdier er de faktiske værdier (VOT). Alle de aggressive betoner er støbt hos Unicon i Horsens. Beton A1-1 er benyttet til svindforsøg og temperaturudvidelsesforsøg. Beton A1-2 er benyttet til krybeforsøg.*

Materiale	Type	PR kg/m <sup>3</sup>	P5 kg/m <sup>3</sup>	P7 kg/m <sup>3</sup>
cement	SAC	-	-	-
	NRC	166,1	168,4	-
	Bygg C	-	-	194,0
mikrosilica	Pulver	12,4	12,5	-
flyveaske	Danaske B1	59,8	59,9	-
restprodukt	Specialfiller	-	-	-
	Slamaske Lynetten	-	-	-
	Betonslam (tørstof)	-	18,5	-
	Stenmel 0/2 Dalby	-	-	-
	Flyveaske fra bio.	-	-	79,0
vand	Vandværksvand	147,6	156,3	166,6
sand	0/2 SC Vestbirk	737	692	-
	0/8 Östervang	-	-	1008
sten 1	4/8 SC Århus	199	202	-
	8/16 Dalby	-	-	227
sten 2	8/16 SC Århus	398	403	-
	16/25 Dalby	-	-	677
sten 3	16/32 SC Århus	545	567	-
Luftindbl.	Conplast AEA316 1:5	-	0,01	-
Plast	Conplast 212	0,70	0,71	-
	Peramin V	-	-	0,45
Superplast	Strukturo BA1	-	-	-
	Peramin F	-	-	0,72
Målt luft		4,6 %	3,5 %	2,0 %
Ækv. v/c		0,669	0,699	0,713
Støbetidspunkt		23.04.01	25.06.01	05.11.01
		kl. 12.43	kl. 17.14	kl. 9.25

*Tabel 4: Recepter for passive betoner. De angivne værdier er de faktiske værdier (VOT). PR og P5 er støbt hos Unicon i Horsens, mens P7 er støbt hos Sydsten i Malmø.*

### 3. Fugttransport og svind

#### 3.1 Formål

Det undersøges om fugtbevægelserne af de grønne betoner afviger fra traditionelle betoner. Der foretages ikke en egentlig kortlægning, men blot en simpel sammenligning mellem referencebetonen og de grønne betoner.

#### 3.2 Metodebeskrivelse

Bestemmelsen af svindet sker efter principperne i DS 434.6:1989.

Forsøgene udføres på prismer 100×100×400 mm. I hver ende af prismerne monteres tappe til montering af deformationsmåleudstyr. Der måles på 3 prøveemner per beton.

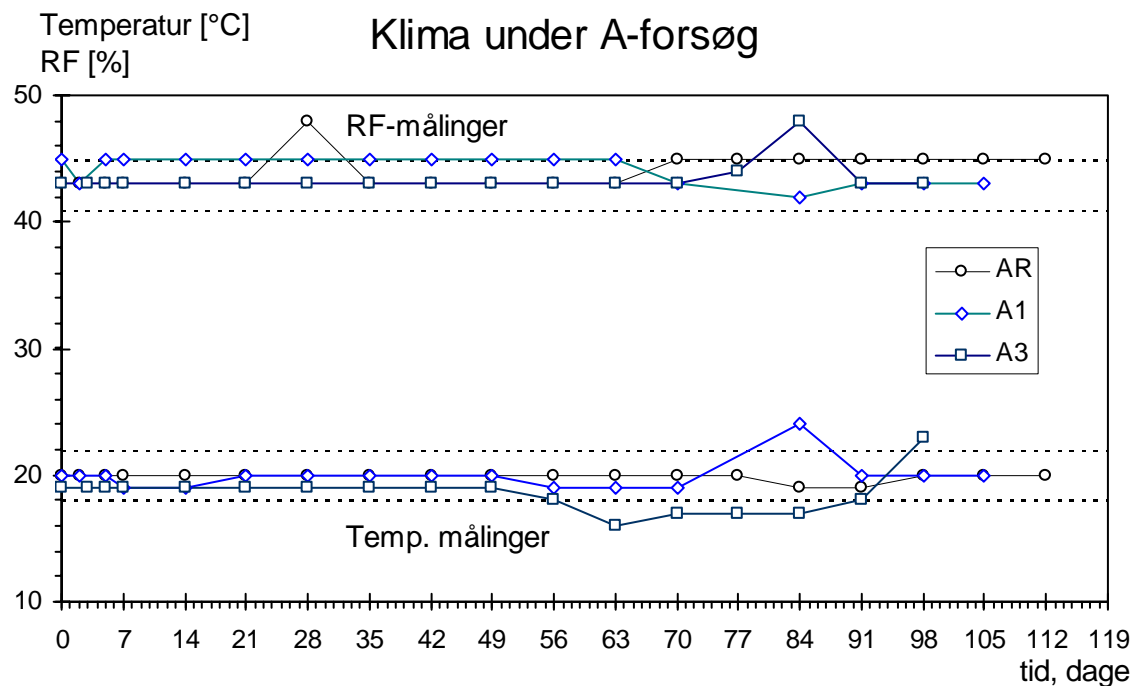
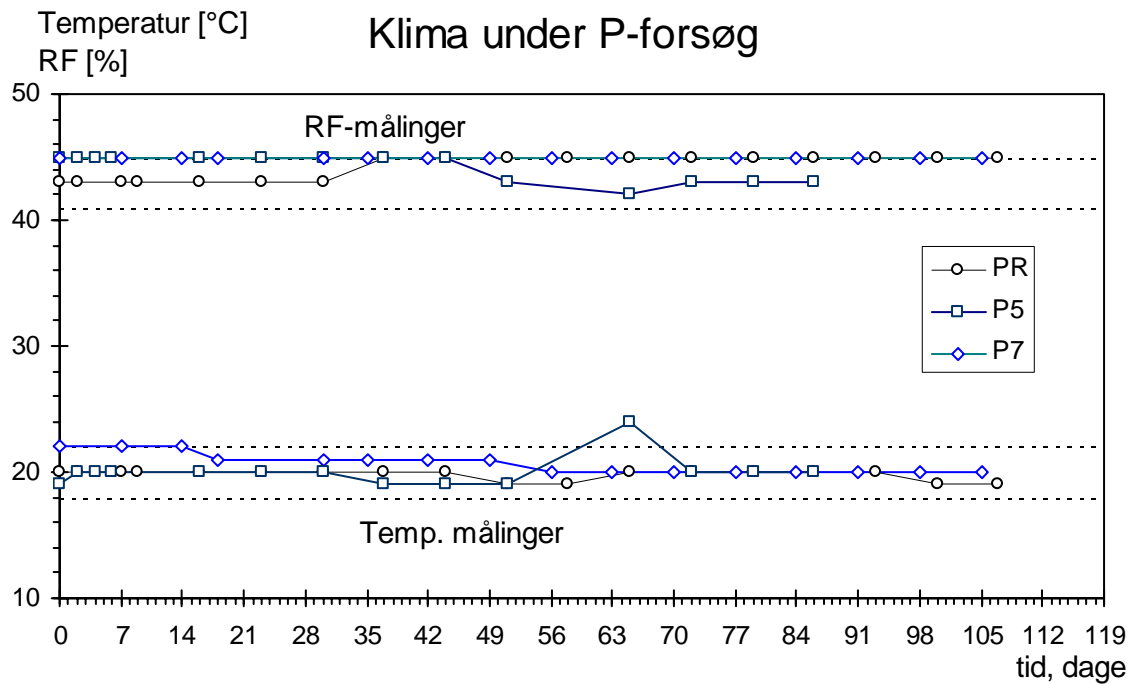
Emnerne holdes forseglede fra afformning til målingerne påbegyndes 28 døgn efter udstøbning. Prismernes længde og vægt registreres ca. hver anden dag i den første uge. Derefter måles 1 gang om ugen over en 3 måneders periode.

Under prøvningen holdes klimaet konstant med en temperatur på  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  og en relativ luftfugtighed på  $43 \pm 2\%$ . Ved modtagelsen på Teknologisk Institut blev emnerne placeret i laboratoriet ved ca.  $20^\circ\text{C}$ , således at temperaturligevægt var opnået ved prøvningens start.

I Figur 1 ses målinger foretaget i klimakammer under forsøg til dokumentation af at ovenstående klimakrav er opfyldt. Det ses at temperaturen ved et par tilfælde er vokset over den øvre grænse på  $22^\circ\text{C}$  samt at den relative fugtighed ved et enkelt tilfælde var over de tilladte  $45\%$ . Disse enkeltstående overskridelser vurderes ikke at have influeret svindmålingerne mærkbart.

For A3 derimod falder temperaturen til ca.  $17^\circ\text{C}$  over flere uger henimod slutningen af forsøget.





Figur 1: Temperatur og relativ fugtighed målt i klimakammer under svindforsøg. De stiplede linier angiver øvre og nedre grænser iht. DS 434.6.

### 3.3 Resultater

I dette afsnit præsenteres og sammenlignes svind- og væggtabsmålingerne for alle betontyperne. I Appendiks A er de individuelle målinger angivet for alle betontyperne og i Figur 2 og Figur 3 ses middelværdier af målingerne.

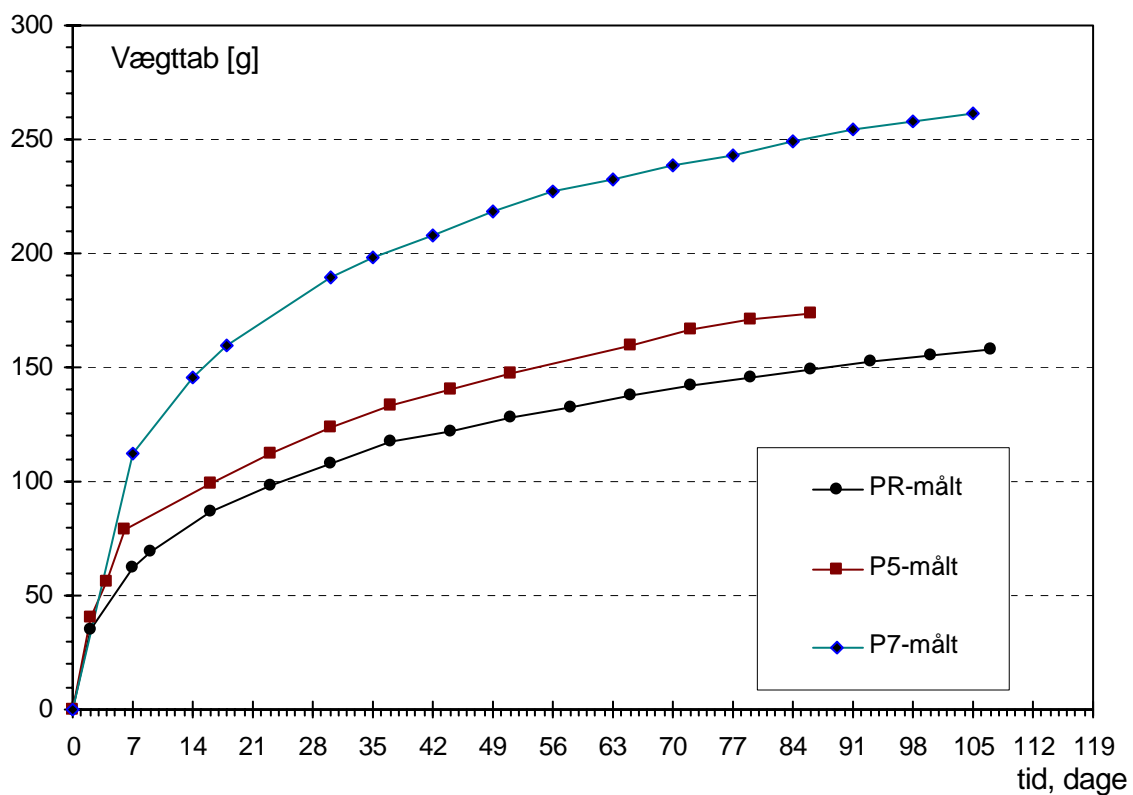
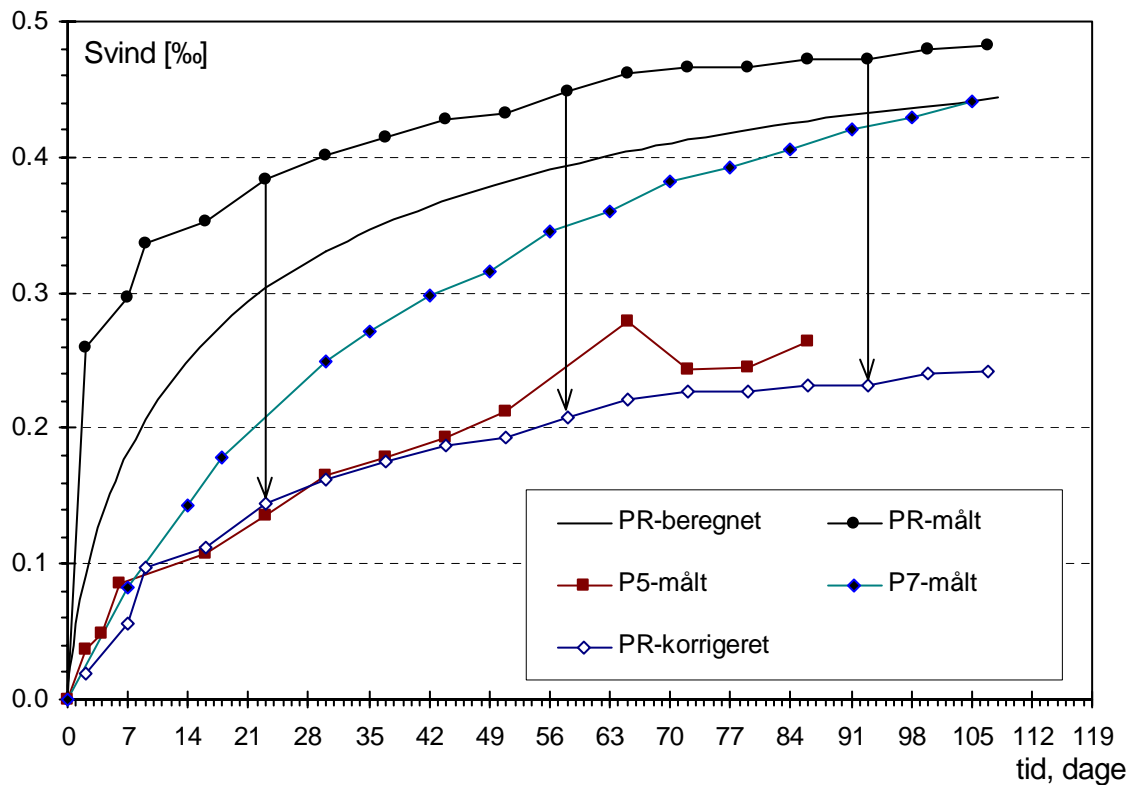
For P5 og A3 er registreringerne ophørt efter ca. 13 uger, mens de øvrige er fortsat yderligere ca. 4 uger. Desuden er der for P5 registreret et unormalt højt svind efter 63 døgn, hvilket falder sammen med at temperaturen på dette tidspunkt oversteg den øvre grænse på 22 °C (jf. Figur 1 og Figur 2). Den samme situation ses at ske for A1 (jf. Figur 1 og Figur 3).

I Beton-Bogen [1] er angivet en metode til at estimere svinddeformationerne i beton vha. en række faktorer, som afhænger af klima, v/c-forhold, cementindhold og eksponeret overflade. En beregning af svindet udfra denne metode er vist i svinddiagrammerne for hhv. en normal P-beton og en A-beton. For førstnævnte fås et estimeret slutsvind på ca. 0,56 ‰ og for sidstnævnte 0,38 ‰.

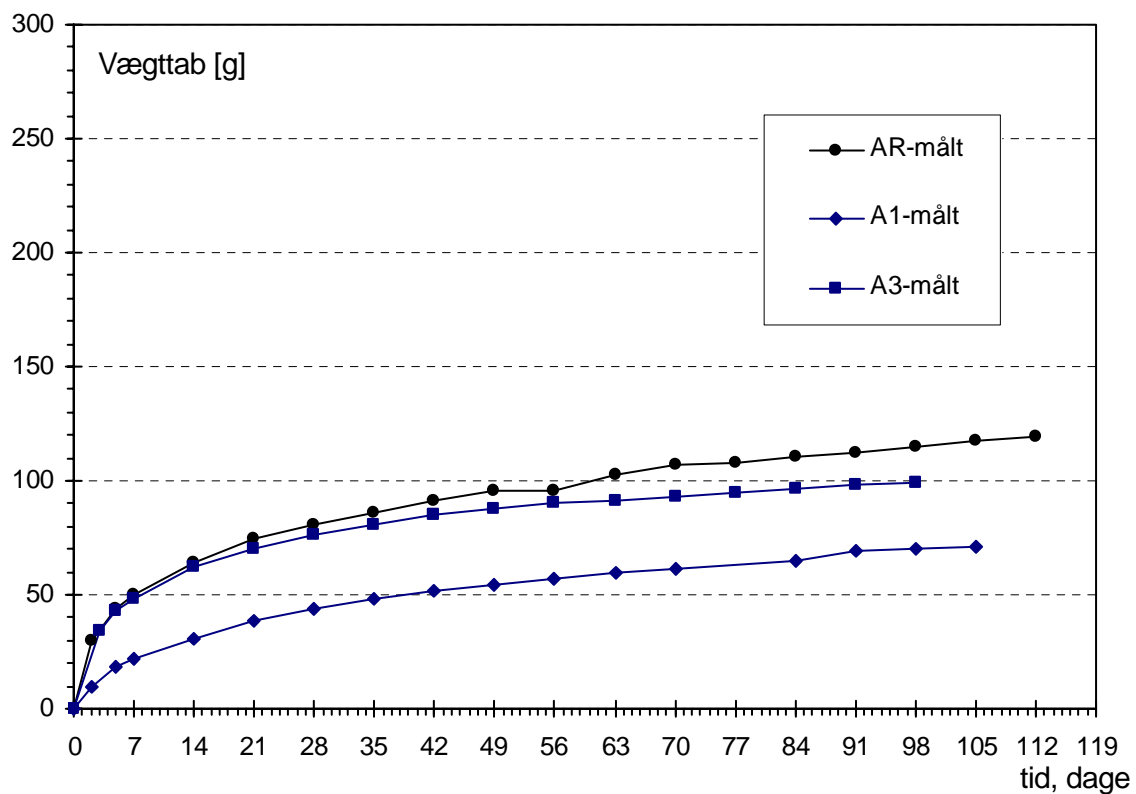
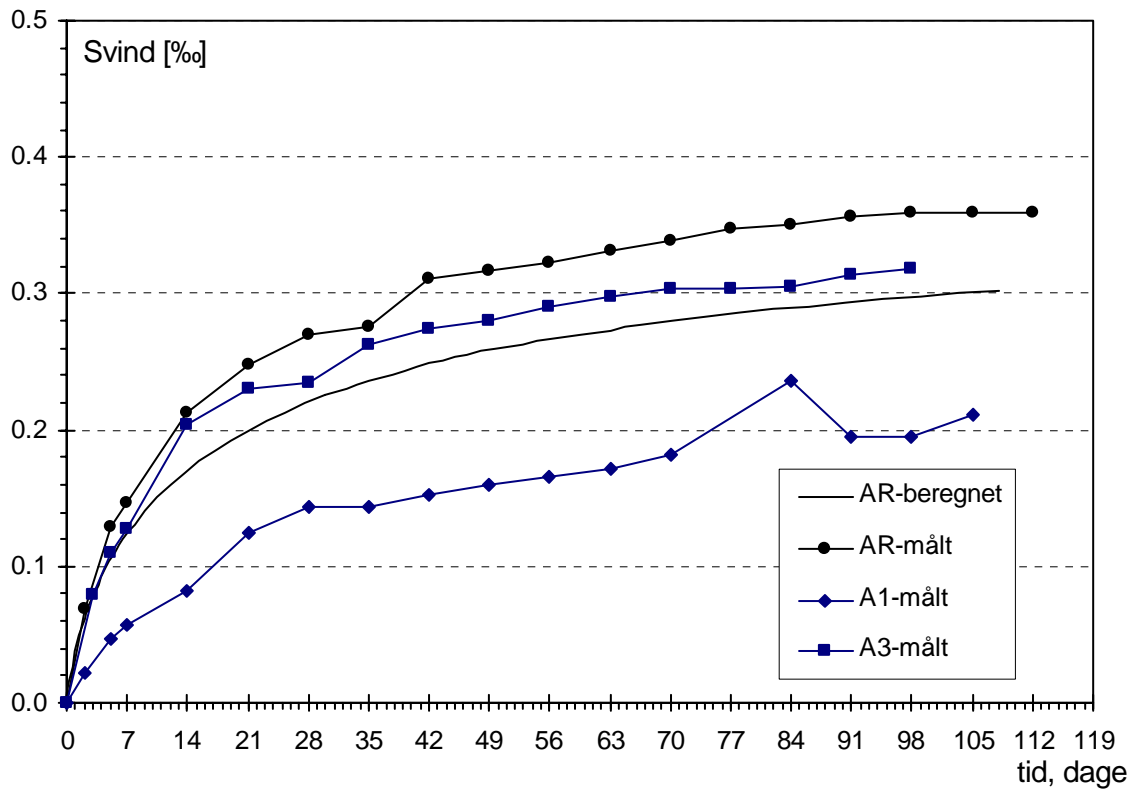
For beton PR er der beklageligvis foretaget en systematisk målefejl af svindet. Fejlen er opstået ved forsøgets start i forbindelse med aflæsning af referenceemnets længde. Desværre kan fejlen ikke korrigeres, men ved at se på den første svindmåling på ca. 0,26 ‰ formodes det at hele kurven skal forskydes nedad svarende til ca. 0,24 ‰ således, at den falder nogenlunde sammen med målingerne for P5. Dette er understøttet af Figur 4, hvor svindet er optegnet som funktion af vægttabet. På både Figur 2 og Figur 4 er den korrigerede kuve angivet for PR og pilene angiver parallelforskydningen.

Efter denne korrigering ses den svenske beton P7 at udvise ca. 50 % mere svind og væggtab end PR og P5. Desuden er der ikke noget der tyder på, at P7 har nået sit slutniveau efter 16 ugers målinger i modsætning til registreringerne for de øvrige betoner. Dette kan delvist forklares ved, at P7 indeholder mest cement og mest vand af de tre passive betontyper (Tabel 4). Den teoretiske svindkurve ses desuden at ligge langt over PR og P7, hvilket kan forklares ved at disse to betoner indeholder cementerstatninger i form af mikrosilika og flyveaske, hvilket ikke er tilfældet for beregningsgrundlaget givet i [1].

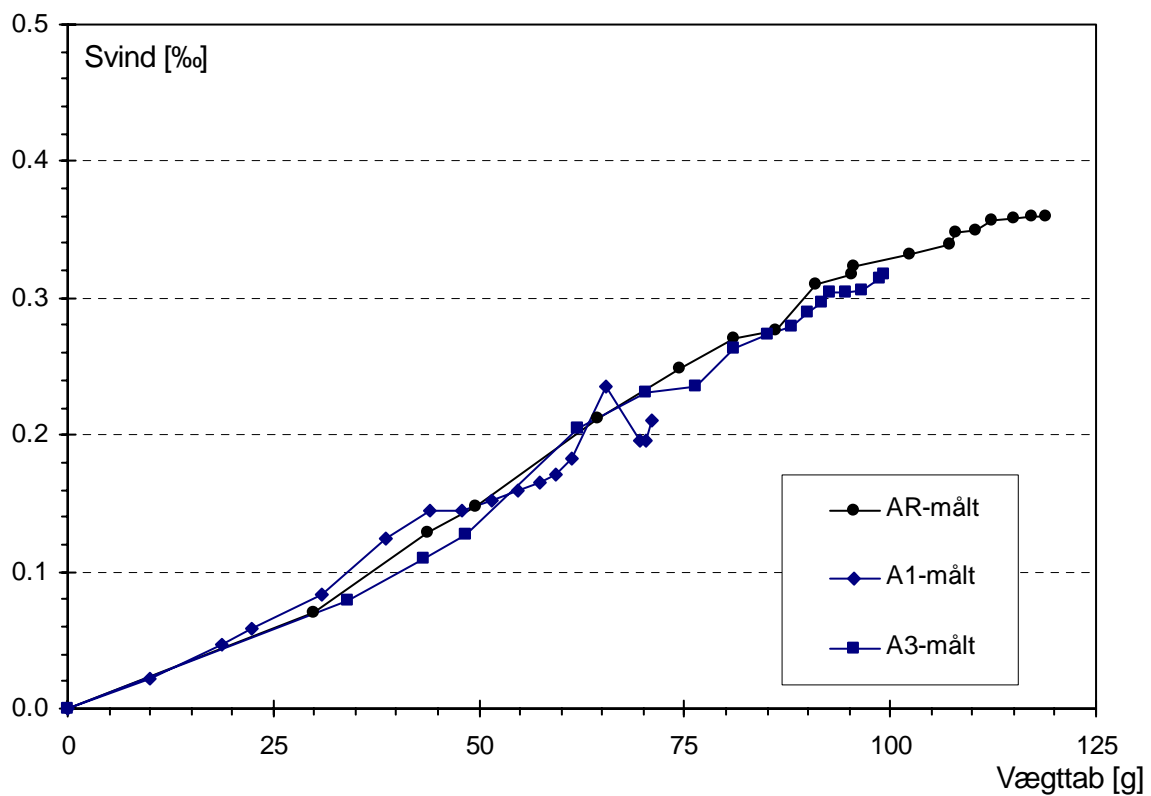
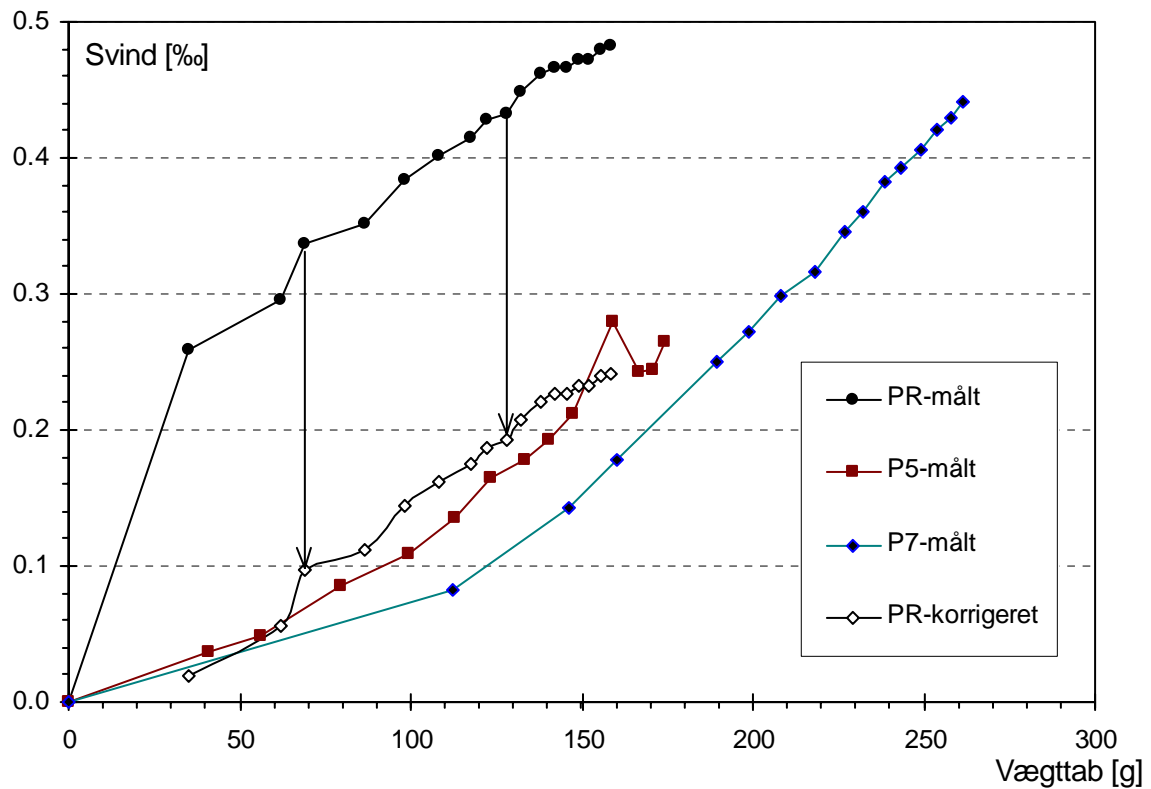
For A-betonerne (Figur 3 og Figur 4) ses AR og A3 at ligge på det samme svindniveau, hvilket er i god overensstemmelse med den teoretiske kurve. Beton A1 udviser kun en svindtøjning på ca. 2/3 heraf, hvilket må tilskrives det extra høje indhold af flyveaske.



Figur 2: Svind- og vægttabsmålinger for P-betoner. Målinger er middelværdi af 3 prismer. Bemærk at svindet målt på P7 er behæftet med en systematisk fejl og den målte kurve skal forskydes nedad (angivet med pile og åbne symboler).



Figur 3: Svind- og vægttabsmålinger for A-betoner. Målinger er middelværdi af 3 prismes.



Figur 4: Korrelation mellem målt svind og vægttab. Målinger er middelværdi af 3 prismer. Bemærk at vandret akse er forskellig for de to diagrammer.

## 4. Temperaturudvidelse

### 4.1 Formål

Det undersøges om de grønne betoner afviger fra traditionelle betoner mht. temperaturrelaterede deformationer. Der foretages ikke en egentlig kortlægning men blot en simpel sammenligning mellem referencebetonen og de grønne betoner.

### 4.2 Metodebeskrivelse

Bestemmelsen af temperaturudvidelseskoefficienten sker ved hjælp af et målearrangement som vist på Figur 5. Målingerne startes, når betonens alder er ca. 28 døgn og foregår derefter i ca 3 døgn. Der benyttes 2 stk. standardcylindre Ø100×200mm per beton. Cylindrene pakkes ind i plastfolie for at hindre fugttab under forsøget. Dernæst monteres cylindrene i en måleramme, som placeres et klimaskab (Figur 5).

Temperaturen i klimaskabene måles og styres ved hjælp af en CR10-datalogger. Temperaturen skifter periodisk mellem 10 og 30 grader med hver periode af ca. et halvt døgnns varighed. Ved hjælp af deformationsmålere monteret på målerammen måles cylindrenes deformationer under gentagne temperaturskift og vha. indborede termofølere måles den tilsvarende betontemperatur.

I tilknytning til en måling på betoncylindre gennemføres en kalibrering af målerammerne. Denne kalibrering foregår ved, at betonemnet erstattes af invar stålstænger med en kendt og deklareret temperaturudvidelseskoefficeint. På basis af målingen på betoncylindrene og den tilhørende kalibrering beregnes betonens temperaturudvidelseskoefficient.

Alle måleresultater er gengivet i Appendiks B.



*Figur 5: Prøveemner i klimaskab (billedet til venstre). På begge cylindre er monteret en måleramme med en deformationstransducer placeret nederst (billedet til højre). De lodrette afstandsstænger i målerammen er fremstillet af invarstål, der har en temperaturudvidelseskoefficient på ca 10 % af betons.*

### 4.3 Resultater

Resultaterne af de gennemførte målinger fremgår af Tabel 5.

Det ses at antallet af prøveemner ikke giver belæg for at behandle resultaterne statistisk. Middelværdien for de enkelte betontyper ligger på ca.  $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  med målingerne beliggende mellem  $10 \times 10^{-6}$  og  $13 \times 10^{-6}$  per  $^{\circ}\text{C}$ . Det skal bemærkes, at alle tre betontyper er blandet med den samme tilslagstype, hvorved en oplagt faktor til variation er elimineret (Tabel 3).

I DS 411:1999 er der vejledende angivet, at betonens temperaturudvidelseskoefficient kan sættes til  $10 \times 10^{-6}$  per  $^{\circ}\text{C}$ . Dermed synes DS 411 at undervurdere den termiske udvidelse med ca. 20 %.

	Temperaturudvidelseskoefficient [ $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ]		
	AR	A1	A3
Emne 1	9,8	11,0	12,7
Emne 2	13,6	13,0	11,8
<b>Middelværdi</b>	<b>11,7</b>	<b>12,0</b>	<b>12,2</b>

*Tabel 5: Temperaturudvidelseskoefficienter baseret på målinger angivet i Appendiks B. Middelværdien for alle 6 prøveemner er fundet til  $12,0 \times 10^{-6}$  per  $^{\circ}\text{C}$  med en variationskoefficient på 12 %.*

## 5. Krybning

### 5.1 Formål

Det undersøges om de grønne betoners krybeegenskaber afviger fra traditionelle betoners. Der foretages ikke en egentlig kortlægning men blot en simpel sammenligning mellem referencebetonen og de grønne betoner i aggressiv miljøklasse.

### 5.2 Metodebeskrivelse

Krybeforsøgene er udført efter en special metode.

Forsøgene udføres på 3 standardcylindre  $\text{Ø}100 \times 200 \text{ mm}$ , der er holdt forseglede fra afformning indtil prøvningen påbegyndes. Prøvningen foregår i en speciel opstilling under laboratorieklimaforhold, dvs. i prøvehallen, hvor porten åbnes og lukkes og hvor temperaturen varierer mærkbart. Lufttemperaturen måles kontinuert omkring opstillingen via to termofølere.

To af cylindrene belastes identisk, mens den sidste cylinder forbliver ubelastet for at kunne kompensere for frit svind og temperaturbevægelser. Lasten påføres vha. en hydraulisk donkraft via en kugleskål og holdes konstant i ca. 3 måneder inden aflastning (Figur 6). Den påførte last måles med en indbygget lastcelle. Deformationerne måles vha. 3 flytnings-transducere over de midterste 100 mm. Transducerne er placeret som under et arbejdskurveforsøg (Figur 6). For det ubelastede svindemne måles deformationerne kun med def1 og def2.

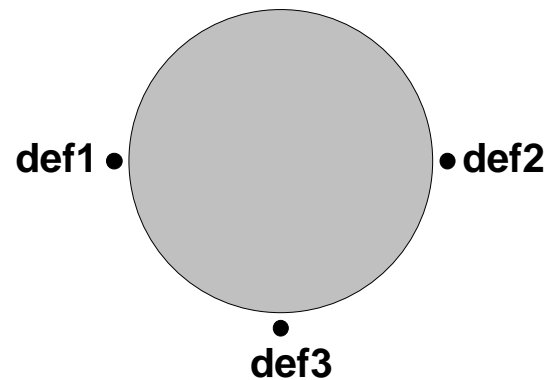
Lasten påføres når betonstyrken er ca. 85 % af 28 døgns styrken. Dette svarer til en termin på ca. 14 dage. Til denne termin påføres en last på 50 % af trykstyrken bestemt ved belastningstidspunktet (Tabel 6).

Efter ca. 3 måneder med konstant last aflastes cylindrene og målingerne fortsættes ca. en uges tid for at registrere tilbagekrybningen. Tilbagekrybningen blev dog ikke registreret for beton AR.



Tidspunkt	Egenskab	AR	A1	A3
Ved lastpåførsel	Trykstyrke [MPa]	35,2	33,1	35,9
	Densitet [ $\text{kg/m}^3$ ]	2348	2243	2217
28 døgn	Trykstyrke [MPa]	41,5	39,1	43,5
	Densitet [ $\text{kg/m}^3$ ]	2331	2239	2221
	Relativ styrke ved lastpåførsel ift. 28 døgnsstyrken	85 %	85 %	83 %
	Belastningsperiode	14 uger	14 uger	11 uger

Tabel 6: Materialeegenskaber målt ved start af krybeforsøg (14 døgn for AR og A3, 15 døgn for A1). De angivne værdier er middelværdier af 3 stk. standardcylindre  $\text{Ø}100 \times 200 \text{mm}$ . Den påførte krybelast svarer til ca. 50 % af styrken på lasttidspunktet.



Figur 6: Forsøgsopstilling til krybeforsøg. Prøveemnet er placeret på en trykcelle via en kugleskål og en lastfordelende plade. Ovenpå emnet er ligeledes placeret en lastfordelende plade og en kugleskål. Den bløde masonitplade, der ses bag hver transducer, står løst og har ingen indvirkning på de målte deformationer. Formålet med masonitten er at skubbe transducerne væk fra emnet i tilfælde af brud, for at undgå at de ødelægges.

### 5.3 Resultater

Måleresultaterne er givet i tidsdiagrammer i Appendiks C - Appendiks E for hver af de tre betontyper. I Appendiks F er målingerne samlet i diagrammer for sammenligning.

For hver betontype er givet lufttemperaturens variation under forsøget med angivelse af årstid. Det bemærkes at temperaturen i det store hele befinder sig indenfor det område, som er benyttet under svindforsøgene i kapitel 3. Desuden ses de momentane tøjninger registreret under be- og aflastning samt svind- og krybetøjninger målt på hvert enkelt forsøgsemne. De anvendte tøjninger i diagrammerne er middeltøjninger baseret på def1 og def2 (Figur 6).

Et krybeforsøg kan enten udføres forsegle eller uforsøget. I førstnævnte tilfælde hindres svindet i at foregå og den registrerede krybning betegnes grundkrybning [1]. Udføres krybeforsøget derimod således at fugt kan udvekles med omgivelserne måles i stedet sorptionskrybning og det er denne type krybning, som er registreret i nærværende forsøg.

Sorptionskrybningen vil normalt være større end grundkrybningen, men er også mere realistisk i forbindelse med udendørs konstruktioner.

De målte svindtøjninger ses at være af samme størrelsesorden for alle tre betoner (Appendiks F). Der registreres ikke den markante forskel mellem A1 og de øvrige betontyper, som ses i Figur 3.

Krybetøjningen i Appendiks F ses ligeledes at være af samme størrelsesorden for de tre betoner med AR beliggende i den mindste del af tøjningsmålingerne. Antallet af forsøg og den registrerede forsøgsspredning giver ikke mulighed for at rangordne betonerne mht. deres krybeegenskaber.

I DS 411:1999 er betons krybning indregnet ved at reducere dets E-modul i langtidstilstanden. Dette gøres vha. elasticitetsmodulforholdet  $\alpha$  mellem armeringsstål og beton. DS 411 angiver  $\alpha_0$  til værdien 7 i korttidstilstanden (uden krybeeffekter) for betonstyrker over 40 MPa. I langtidstilstanden kan følgende sammenhæng benyttes [1]

$$\alpha = (1 + \phi)\alpha_0$$

hvor  $\phi$  betegnes krybetallet defineret som krybetøjningen i forhold til den momentane elastiske tøjning. DS 411 angiver langtids  $\alpha$  til 25, hvilket svarer til et krybetal på ca. 2,5.

Den momentane elastiske sammentrykning registreret i Appendiks C - Appendiks E er af størrelsesordenen 0,6 ‰ og hvis denne værdi multipliceres med et krybetal på 2,5 fås en krybetøjning efter lang tids belastning på 1,5 ‰. I Appendiks F ses slutkrybningen efter 3 måneders belastning at udgøre fra 1,2 – 1,4 ‰ og en asymptotisk slutværdi på ca. 1,5 ‰ er ikke urealistisk.

## 6. Konklusioner

### 6.1 Svind

Der er udført 3 svindforsøg efter DS 434.6:1989 for hver af betonerne PR, P5, P7, AR, A1 og A3. Prøveemnernes svindtøjninger er registreret under relativt konstante klimaforhold over en periode på næsten 3 måneder. Det skal bemærkes, at variationen mellem de 3 prøveemner for hver beton er bemærkelsesværdig lille.

Observationen for de tre P-betoner er, at svindtøjningen vokser op til ca. 0,25 ‰ for PR og P5, mens P7 vokser til ca. 0,45 ‰ indenfor den samme periode uden i øvrigt at udvise faldende svindrate. Denne forskel skyldes formentlig dels en forskellig cementtype (P7 er svensk) og dels, at P7 indeholder ca. 30 kg mere pulver per m<sup>3</sup> beton end PR og P5. Cementindholdet udgør i alle tilfælde ca. 70 % af pulverbemængden. Endelig har P7 det højeste vand/cement tal af de tre.

For de tre A-betoner, som er baseret på samme cementtype, vokser svindtøjningen op til ca. 0,35 ‰ for AR og A3, mens A1 kun opnår ca. 0,2 ‰ indenfor den samme periode. Denne forskel må tilskrives, at i A1 er ca. 100 kg cement erstattet af flyveaske per m<sup>3</sup> beton, sammenlignet med AR og A3. Derved fås et cementindhold på ca. 85 % af pulverbemængden for AR og A3 og kun 57 % for A1.

### 6.2 Temperaturudvidelse

For hver af A betonerne er der udført 2 forsøg med kontrolleret temperaturvariation mellem 10 og 30 °C. På baggrund af målte deformationer er temperaturudvidelseskoefficienten beregnet til ca.  $12 \times 10^{-6}$  per °C. Der er ikke fundet nogen forskel i målingerne for AR, A1 og A3, hvilket kan tilskrives, at de indeholder den samme tilslagstype.

Den fundne værdi er 20 % højere end hvad der anbefales i DS 411:1999. På den baggrund kunne det foreslås, at DS 411 angiver et interval i stedet for en værdi således, at rådgiveren selv kan vurdere hvad der er mest ugunstigt for beregningerne.

### 6.3 Krybning

Der er udført to krybeforsøg for hver af betontyperne AR, A1 og A3. Forsøgene er udført under uforseglede laboratorieforhold med konstant last over en periode af ca. 3 måneder. Lasten svarer til ca. 40 % af 28 døgnsstyrken. For at kompensere for svind- og temperaturdeformationer er der foretaget målinger på et ubelastet forsøgsemne.

En sammenligning af de målte krybetøjninger viser at der ikke er nogen signifikant forskel mellem de tre betoners opførsel. Krybetøjningerne vokser til et niveau på omkring 1 ‰ i løbet af de første 4 ugers belastning og i løbet af den resterende belastningsperiode vokser krybetøjningerne yderligere med ca. 0,2 ‰.

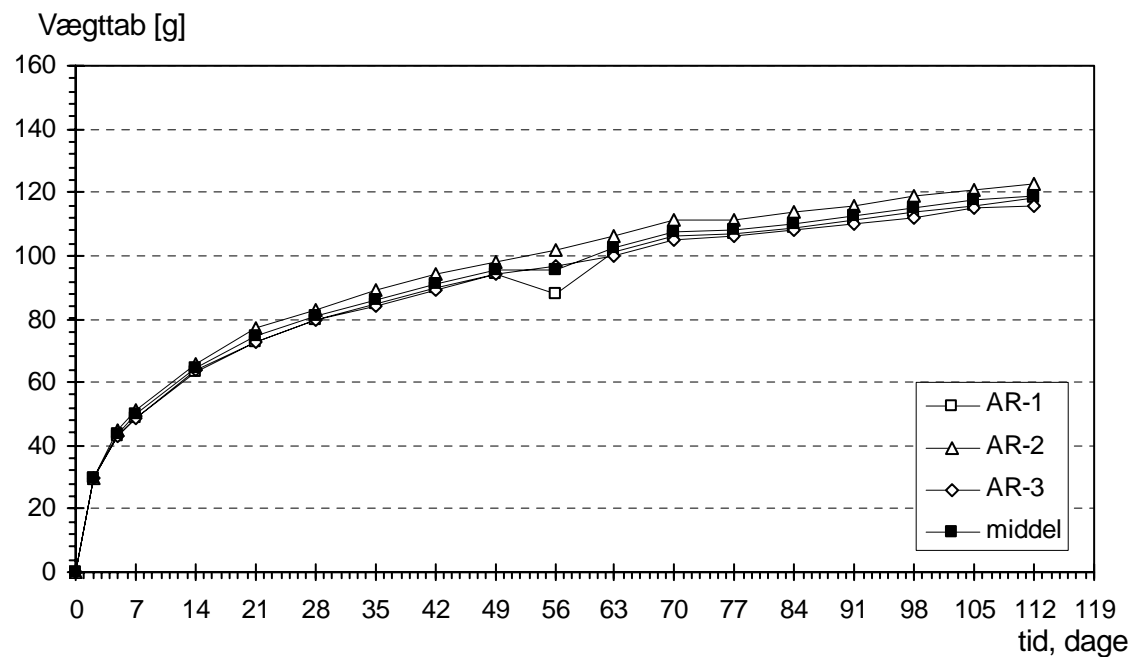
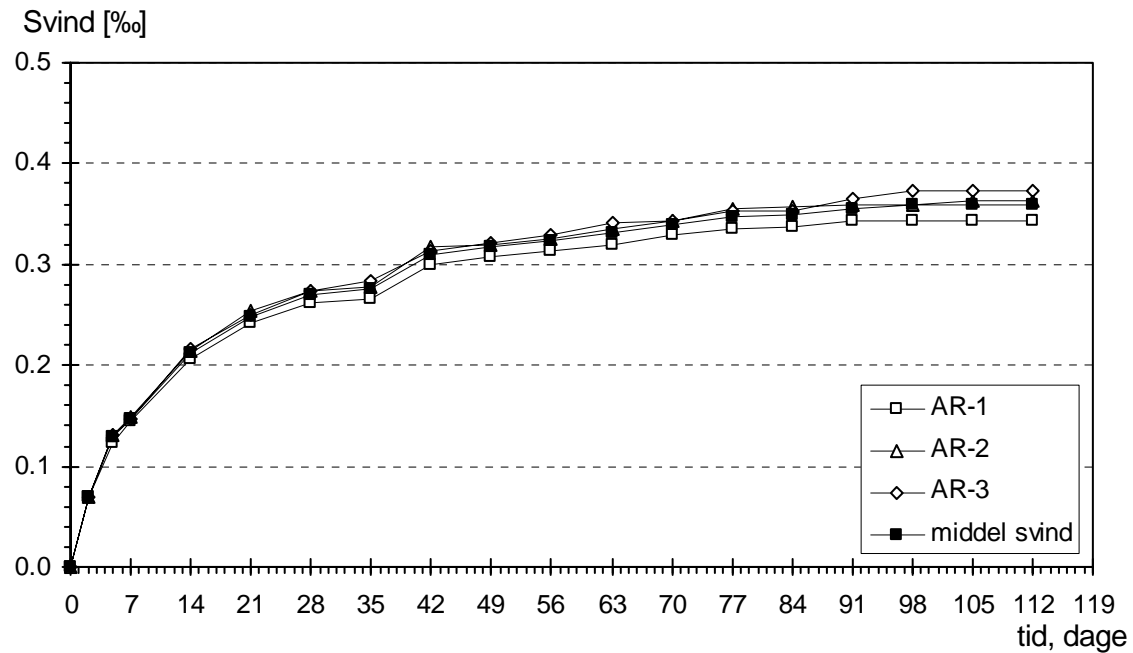
Krybningen er fundet i overensstemmelse med de anvisninger som er givet i DS 411:1999, hvor et krybetal af størrelsesordenen 2,5 benyttes for betoner i aggressiv miljøklasse. Dermed kan det konkluderes, at krybeforsøgene ikke giver anledning til at mene, at der er nogen markant forskel på de undersøgte betoners opførsel.

## 7. Referencer

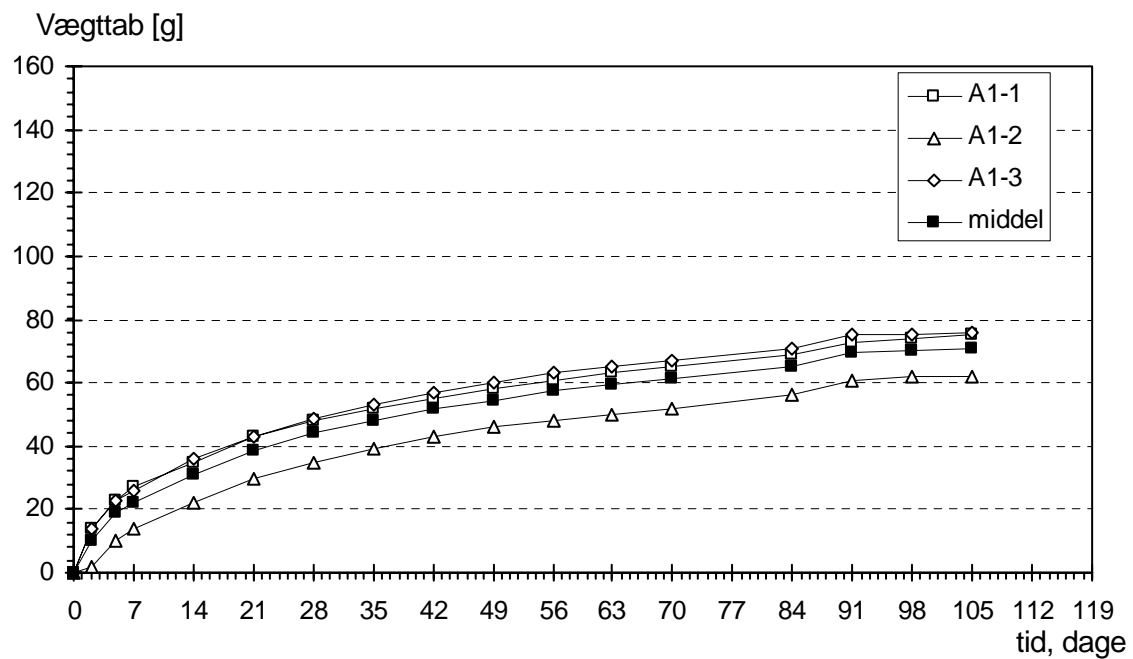
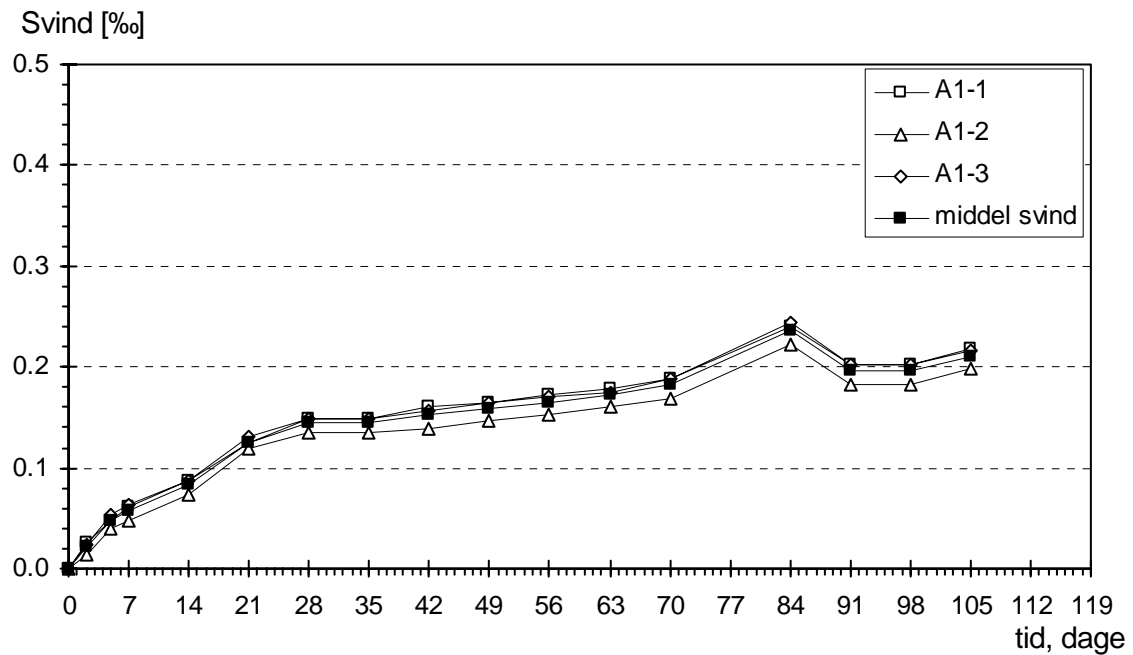
- [1] “Beton-Bogen”, 2. udgave (Redigeret af Herholdt, Justesen, Nepper-Christensen & Nielsen), Cementfabrikkernes Tekniske Oplysningskontor, Aalborg Portland A/S, 1985.

## Appendiks A Svindmålinger

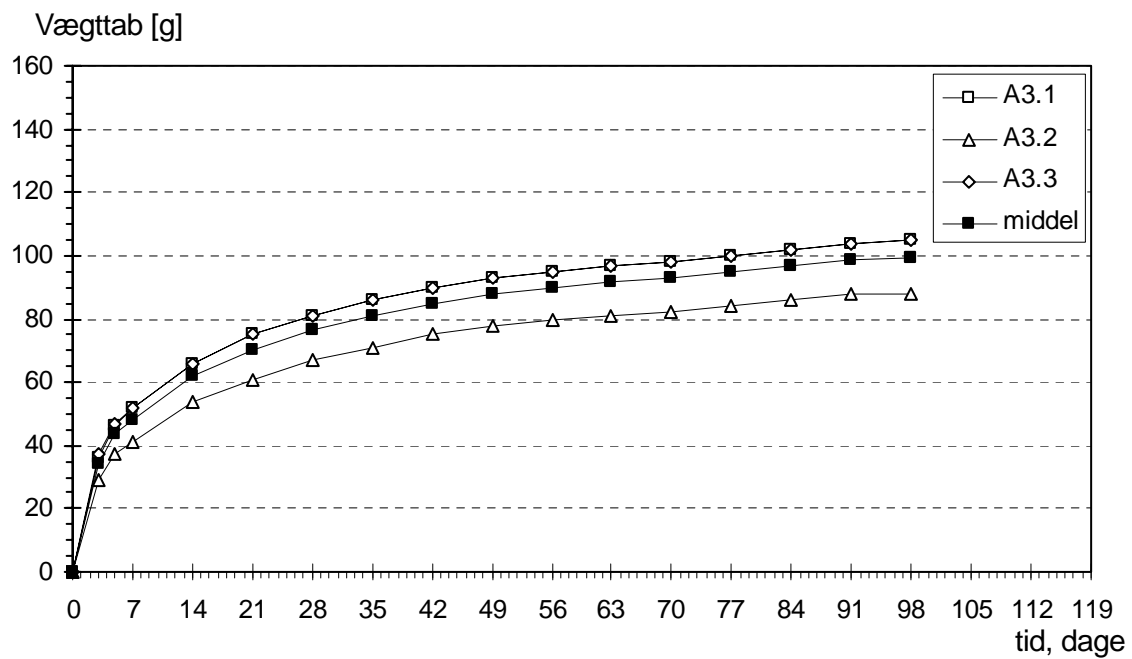
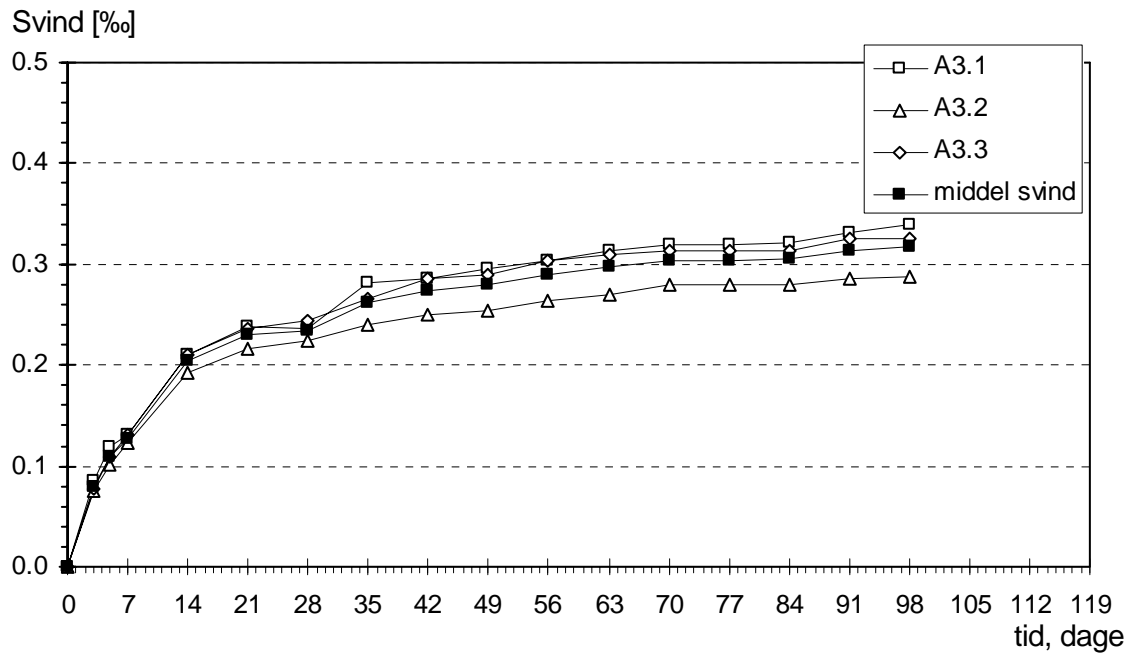
Målt svind og vægttab for beton AR:



## Målt svind og vægttab for beton A1:

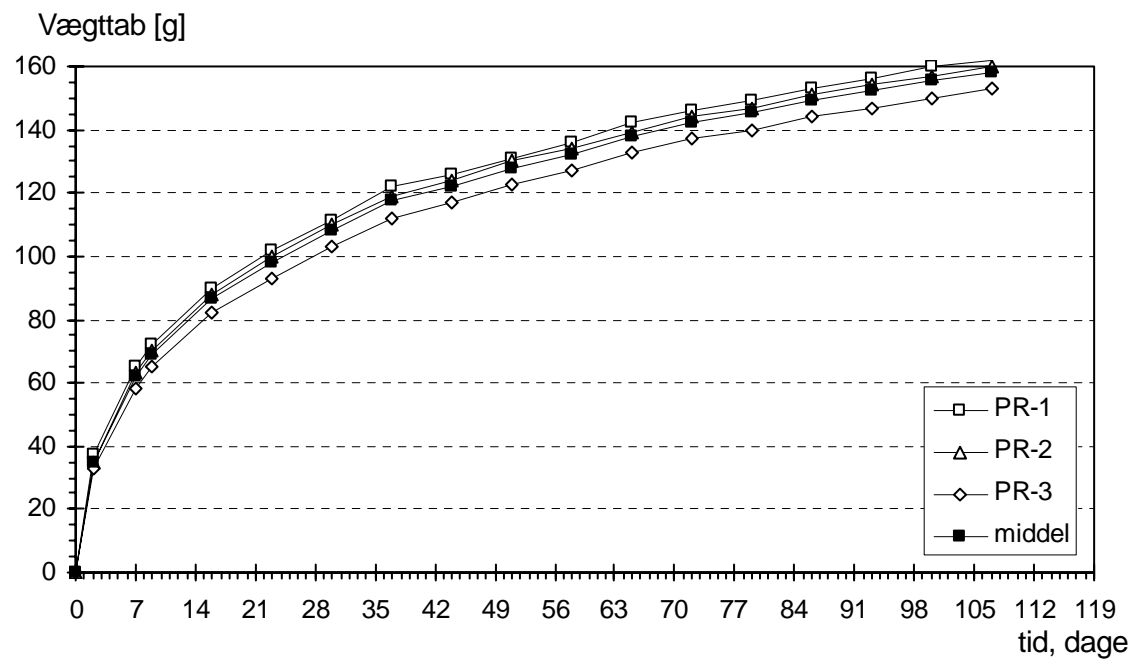
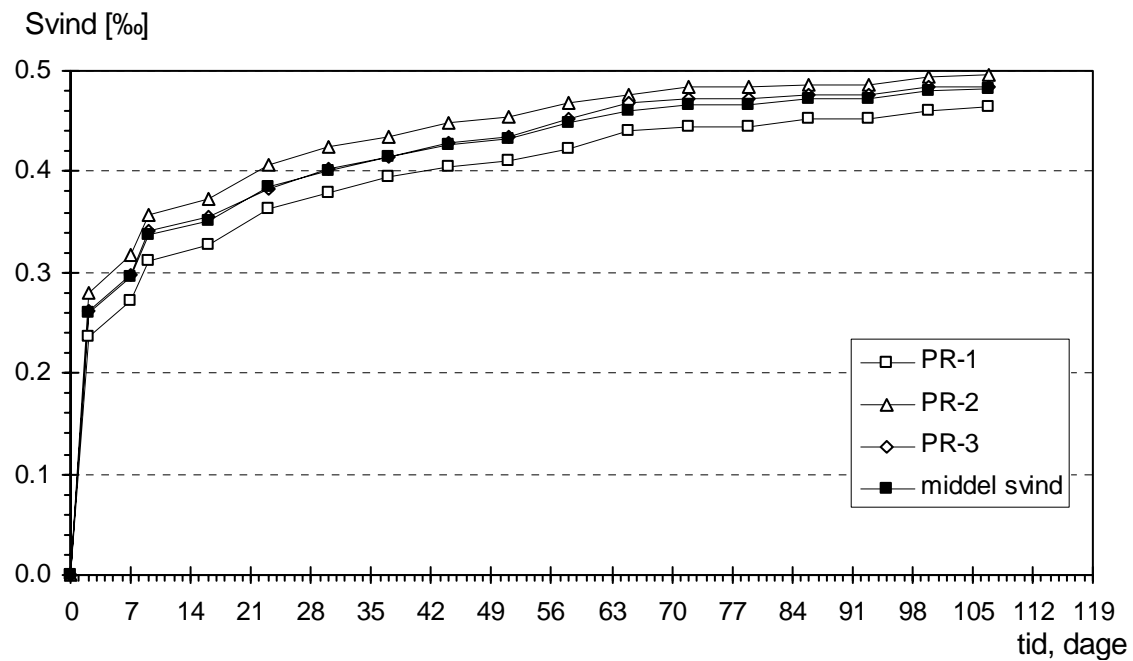


## Målt svind og vægttab for beton A3:

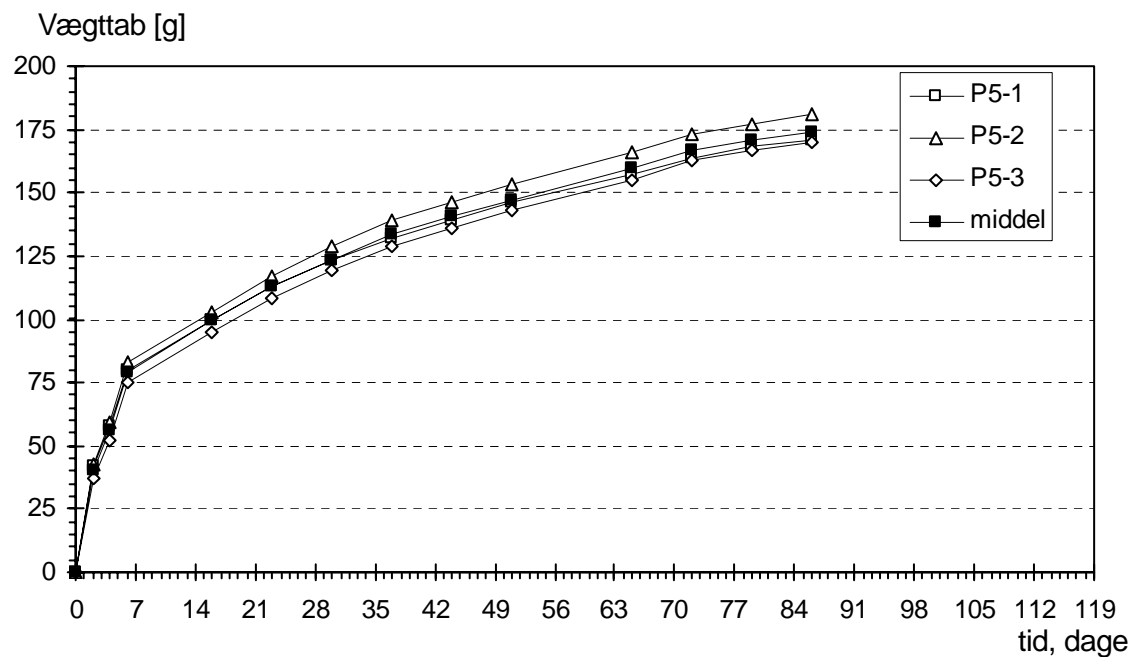
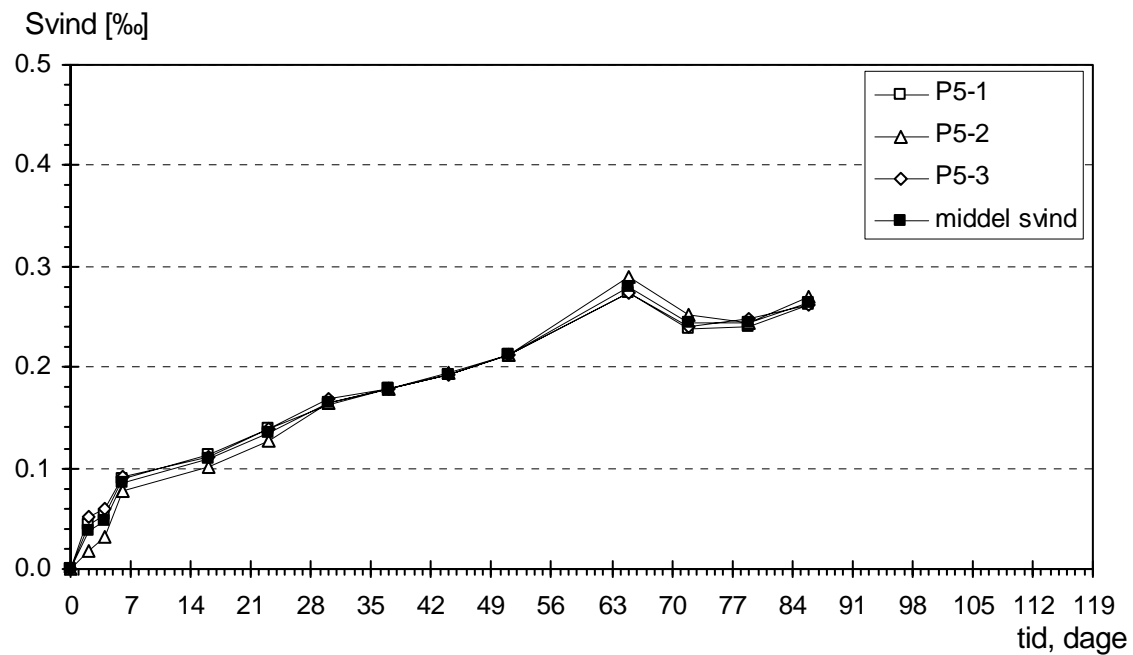




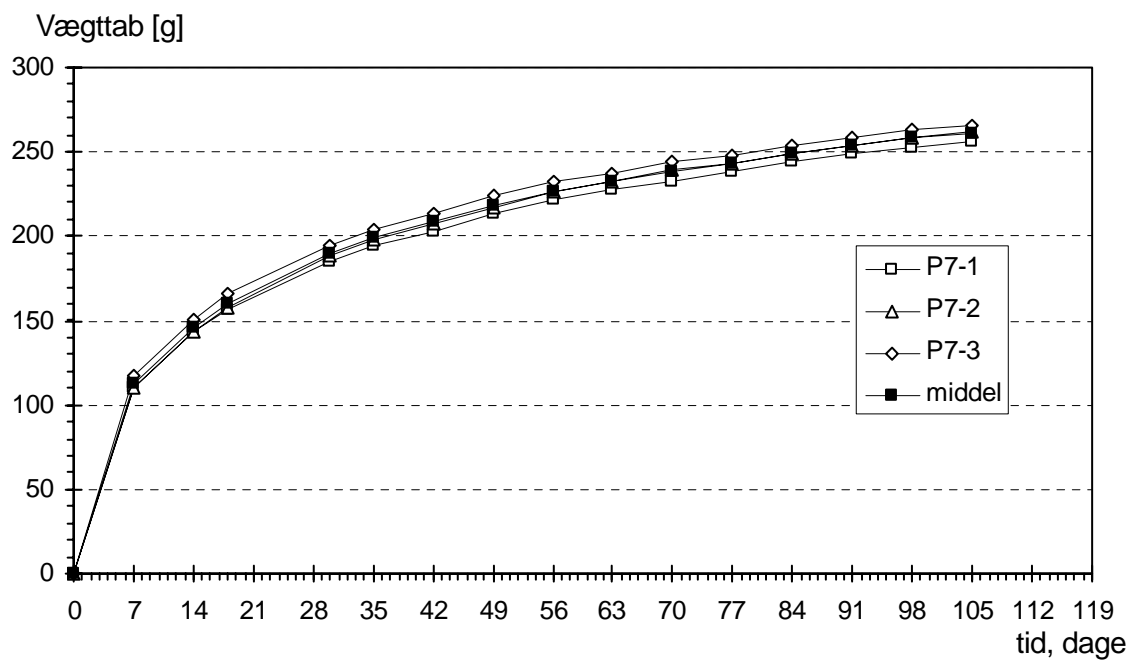
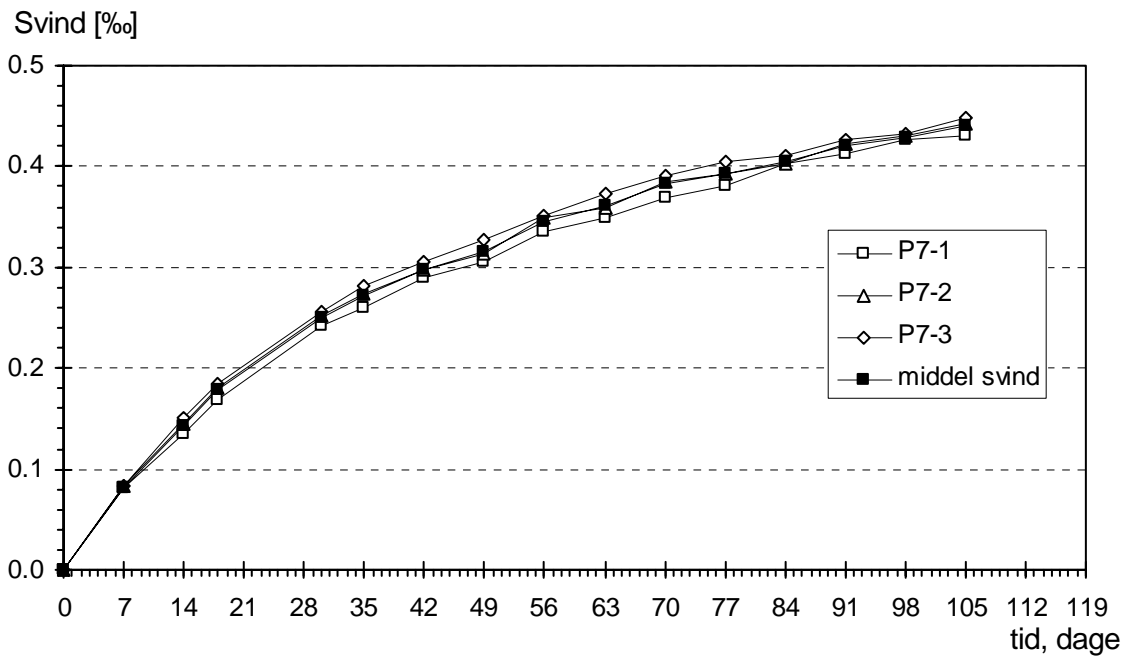
## Målt svind og vægttab for beton PR:



## Målt svind og vægttab for beton P5:



## Målt svind og vægttab for beton P7:



## Appendiks B Målinger af temperaturdeformationer

Temperaturudvidelseskoefficienten  $\alpha$  bliver beregnet på basis af dels en måling af to betoncylindres deformationer ved en temperaturbelastning på ca. 20°C (fra 10 til 30°C), og dels en tilsvarende måling på to stænger af invar-stål. Målelængden er 200 mm. Invarstålet har en temperaturudvidelseskoefficient på  $1,28 \times 10^{-6}$ , og på basis heraf beregnes en kalibreringsfaktor for de to anvendte målerammer.

Resultaterne af målingerne er vist i nedenstående tabeller. De efterfølgende sider viser måleresultater på kurveform, ligesom de bestemte deformationer og temperaturbelastninger findes af kurverne. Både temperaturbelastning og deformationer bestemmes i slutningen af en periode med konstant temperatur.

I forhold til de to målinger på beton AR og A1 er der byttet om på både målerammer og transducer 1, og derfor er der gennemført en ny kalibrering..

	$\Delta$ Temp. °C	$\Delta$ Def. 1/100 mm	$\alpha$ (målt) $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\alpha$ (sand) $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\alpha$ (korrektion) $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Emne 1	20,1	1,39	3,46	1,28	-2,18
Emne 2	20,1	1,78	4,43	1,28	-3,15

Tabel 1: Kalibrering for måling på AR og A1.

	$\Delta$ Temp. °C	$\Delta$ Def. 1/100 mm	$\alpha$ (målt) $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\alpha$ (sand) $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\alpha$ (korrektion) $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Emne 1	19,7	2,81	7,13	1,28	-5,85
Emne 2	19,7	1,70	4,31	1,28	-3,03

Tabel 2: Kalibrering for måling på A3 (se bilag).

	$\Delta$ Temp. °C	$\Delta$ Def. 1/100 mm	$\alpha$ (målt) $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\alpha$ (korrektion) $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\alpha$ (korrigeret) $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Emne 1	19,7	4,72	11,98	-2,18	9,8
Emne 2	19,7	6,58	16,70	-3,15	13,6
Middel					11,7

Tabel 3: Målinger på AR prøveemner

	$\Delta$ Temp. °C	$\Delta$ Def. 1/100 mm	$\alpha$ (målt) $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\alpha$ (korrektion) $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\alpha$ (korrigeret) $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Emne 1	19,8	5,20	11,13	-2,18	11,0
Emne 2	19,8	6,41	16,19	-3,15	13,0
Middel					12,0

Tabel 4: Målinger på A1 prøveemner

	$\Delta$ Temp. °C	$\Delta$ Def. 1/100 mm	$\alpha$ (målt) $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\alpha$ (korrektion) $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$\alpha$ (korrigeret) $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
Emne 1	19,6	4,68	18,5	-5,85	12,7
Emne 2	20,0	6,50	14,8	-3,03	11,8
Middel					12,2

Tabel 3: Målinger på A3 prøveemner

## **Appendiks C Målinger af krybning for beton AR**

Bilag kan rekvireres ved henvendelse til Teknologisk Institut, Beton.

## **Appendiks D Målinger af krybning for beton A1**

Bilag kan rekvireres ved henvendelse til Teknologisk Institut, Beton.

## **Appendiks E Målinger af krybning for beton A3**

Bilag kan rekvireres ved henvendelse til Teknologisk Institut, Beton.

## **Appendiks F Sammenligning af krybe- og svindtøjninger**

Bilag kan rekvireres ved henvendelse til Teknologisk Institut, Beton.