



Center for Grøn Beton

Udførelse Varmeudvikling og plastisk svind

Udført af:

Anette Berrig

Marianne Tange Hasholt

Teknologisk Institut, Beton, september 2002

Titel: Udførelse
Varmeudvikling og plastisk svind

Udført af: Anette Berrig
Marianne Tange Hasholt

Dato: September 2002

ISBN: 87-7756-690-4

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

Indholdsfortegnelse

1.	INDLEDNING	4
2.	BETONRECEPTER	5
3.	VARMEUDVIKLING.....	6
3.1	FORMÅL	6
3.2	METODEBESKRIVELSE.....	6
3.3	RESULTATER.....	6
3.4	VURDERING	8
4.	MÅLING AF POREUNDERTRYK – PLASTISK SVIND	10
4.1	FORMÅL	10
4.2	METODEBESKRIVELSE.....	10
	4.2.1 Måleprincip.....	10
	4.2.2 Udstyr.....	10
	4.2.3 Dataopsamling.....	12
	4.2.4 Udførelse.....	13
4.3	RESULTATER.....	13
	4.3.1 Revnedannelse.....	13
	4.3.2 Beregning af fordampning	17
4.4	VURDERING	21
	4.4.1 Revnedannelse.....	21
	4.4.2 Beregning af fordampning.....	21
4.5	DS 482S KRAV TIL UDTØRRINGSBESKYTTELSE	22
5.	KONKLUSION.....	24
6.	REFERENCER.....	26

Appendiks A: Recepter

Appendiks B: Måledata fra måling af varmeudvikling

Appendiks C: Måledata fra måling af udtørring

1. Indledning

I centerkontrakten *Ressourcebesparende Betonkonstruktioner* (kaldet "Grøn Beton") er der gennemført fire faglige aktiviteter:

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

Det overordnede mål med BK3 er oprindeligt formuleret i Centerkontrakten som: *at undersøge frisk og hærdende betons egenskaber*. Den friske betons egenskaber (eksempelvis konsistensændring og mulighed for pæn finish) er tidligere undersøgt i prøvningsfasen *stor pakke*. Denne rapport indeholder resultater fra prøvning udført i den faglige aktivitet BK3 i prøvningsfasen *udvidet pakke*, hvor vægten er lagt på den hærdende betons egenskaber. Der er således udført følgende undersøgelser:

- Måling af varmeudvikling
- Måling af poreundertryk
- Måling af hærdeegenskaber

Hensigten med de to førstnævnte undersøgelser er dels at vurdere om de grønne betoners hærdeforløb afviger fra hærdeforløbet for traditionel beton, dels at få en indikation af deres følsomhed overfor plastisk svind og dermed behov for udtørningsbeskyttelse.

Hærdeegenskaberne er bestemt for en enkelt betontype (A1). De målte hærdeegenskaber er benyttet til at simulere temperatur- og spændingsudviklingen i en brokonstruktion. Såvel bestemmelse af hærdeegenskaber som simulering er beskrevet i særskilte rapporter og indgår derfor ikke i nærværende rapport.

2. Betonrecepter

Centerkontraktledelsen har på baggrund af resultater opnået i de tidligere prøvningsfaser udvalgt et antal betoner til udvidet pakke. Disse betoner og deres grønne karakteristika er angivet i Tabel 1.

Tabel 1: Betoner udvalgt til udvidet pakke.

Beton	Cement	"Grønt" tiltag	Støbes hos
Pref	NRC	-	Unicon i Horsens
P3	NRC	slamaske	Unicon i Horsens
P5	NRC	betonslam	Unicon i Horsens
P7	Bygg C	flyveaske fra biobrændsel	Sydsten i Malmö
Aref	SAC	-	Unicon i Horsens
A0	NRC	(cementen)	Unicon i Horsens
A1	NRC	højt flyveaskeindhold	Unicon i Horsens
A3	NRC	slamaske	Unicon i Horsens
A6	ANL	stenmel	Sydsten i Malmö

Betonerne til de øvrige faglige aktiviteter, BK1, BK2 og BK4, er støbt på fabrik. Da undersøgelserne i BK3 imidlertid er afhængige af, at den friske beton umiddelbart efter blanding kan placeres i forsøgsopstillinger på Teknologisk Institut, er betonerne til BK3s forsøg blandet i Teknologisk Instituts Betonlaboratorium. BK3s forsøg er alle udført, efter betonerne er blevet blandet på fabrikkerne. Det er tilstræbt, at BK3s blandinger skal ligne de blandinger, der blev blandet på fabrikken, så meget som muligt. Derfor er *bør*-recepterne i BK3s forsøg identisk med *er*-recepterne fra fabrikken, dvs. med recepterne for de faktisk blandede betoner.

Recepter til BK3s forsøg fremgår af appendiks A.

3. Varmeudvikling

3.1 Formål

Måling af varmeudvikling er en måde at registrere det tidsmæssige forløb af betonens hærkning på. Formålet med denne del af BK3s undersøgelse er at måle varmeudviklingen for forskellige grønne betoner og derefter at sammenligne med varmeudviklingen for referencebetonerne. På den baggrund er det muligt at vurdere, om de grønne betoners hærdeforløb afviger væsentligt fra det tilsvarende forløb for referencebetonerne.

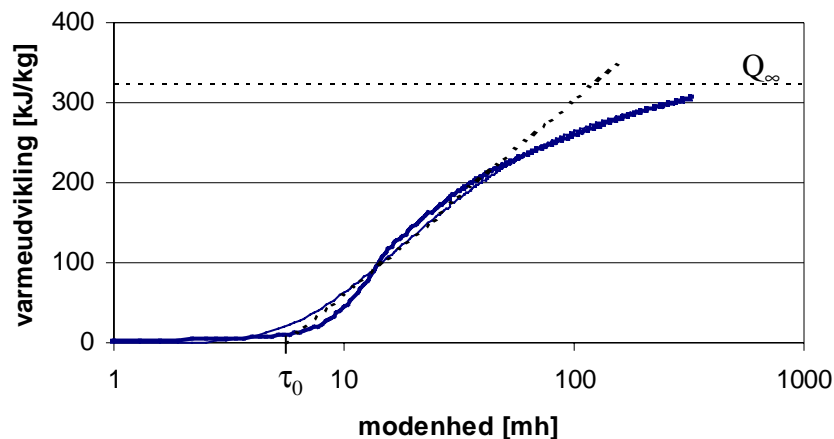
På baggrund af varmeudviklingen beregnes en parameter, τ_0 , der omtrentligt svarer til betonens afbindingstid, se afsnit 3.3. Denne parameter benyttes i kapitel 4, idet plastisk svind er kritisk frem til afbindingstidspunktet.

3.2 Metodebeskrivelse

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

3.3 Resultater

Et typisk varmeudviklingsforløb ser ud som Pref's varmeudvikling, der er vist i Figur 1.



Figur 1: Varmeudvikling for Pref (angivet pr. kg pulver). Fed kurve: målte værdier. Tynd kurve: tilnærmet eksponentialfunktion. Stiplede linier: se forklaring i teksten nedenfor.

Varmeudviklingskurven kan tilnærmes med en eksponentialfunktion som angivet i nedenstående formel:

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

hvor

- M er betonens modenhed
- Q er den akkumulerede varme som funktion af betonens modenhed M
- Q_{∞} ,er den akkumulerede varme efter uendelig lang tids hærkning. I Tabel 2 og Tabel 3 angives Q_{∞} både pr. kg cement og pr. kg. pulver.
- τ_e er en karakteristisk tidskonstant
- α er en dimensionsløs krumningsparameter

Parametrene Q_{∞} , τ_e og α bestemmes på baggrund af den målte varmeudvikling. Desuden bestemmes en parameter, τ_0 , der er skæringen mellem den vandrette akse og den beregnede kurves tangent i punktet med den største hældning, dvs. i punktet, der skiller den konvekse del af kurven fra den konkave del. På den S-formede eksponentialkurve svarer det til punktet, hvor Q er lig 50% af Q_{∞} .

Som det imidlertid også ses af Figur 1, er den matematiske eksponentialfunktion kun en forholdsvis grov tilnærmelse. Mange af kurverne har et knæk på S'ets midterstykke. Det betyder, at beregningen af τ_0 bliver noget misvisende, fordi den indlagte tangents hældning bliver for lille. Den bestemte τ_0 er således en nedreværdi.

Hvis der i stedet tegnes en tangent i punktet med størst tangenthældning, uanset at dette punkt ikke er sammenfaldende med 50%-fraktilen, fås et mere retvisende billede. Dette svarer til at antage, at det kun er den første del af kurven indtil et eventuelt knæk, der er skal lægges til grund for beregningerne af τ_0 . Afbindingstiden fundet ved denne fremgangsmåde er en øvreværdi.

Samtlige varmeudviklingskurver er vist i appendiks A. De bestemte parametre er vist for henholdsvis P- og A-betoner i Tabel 2 og Tabel 3.

Tabel 2: Parametre bestemt ved måling af varmeudvikling for P-betoner.

	cement [kg/m ³]	Q_{∞} [kJ/m ³ beton]	Q_{∞} (pulver) [kJ/kg pulver]	τ_e [mh]	α [-]	τ_0 , 50% fraktil [mh]	τ_0 , tangent [mh]
Pref	168	79.900	326	17,6	0,89	5,7	8,9
P3	142	66.238	333	27,9	0,99	10,2	12,5
P5	166	83.810	348	17,6	0,58	3,2	6,8
P7	194	90.155	320	12,1	1,34	5,7	6,8

Tabel 3: Parametre bestemt ved måling af varmeudvikling for A-betoner.

	cement [kg/m ³]	Q_{∞} [kJ/m ³ beton]	Q_{∞} [kJ/kg pulver]	τ_e [mh]	α [-]	τ_0 , 50% fraktil [mh]	τ_0 , tangent [mh]
Aref	310	116.981	322	21,4	0,82	6,3	7,5
A0	312	112.779	309	14,2	1,01	5,3	7,4
A1	204	94.910	265	22,2	0,98	8,0	11,6
A3	313	100.107	274	17,2	1,34	8,1	9,7
A6	351	115.292	324	18,6	0,98	6,7	7,8

3.4 Vurdering

P-betoner

Varmeudvikling Q_{∞} målt pr. m³ beton varierer. Variationen følger de enkelte betoners cementindhold. Således har P3 en lavere varmeudvikling pga. lavere cementindhold, mens P7 har en større varmeudvikling. P7 er støbt med en anden type cement end de øvrige betoner, men resultaterne tyder på, at cementtyperne mht. varmeudvikling ligner hinanden.

Den totale varmeudvikling pr. kg pulver er næsten ens. Cementen i alle P-betoner udgør ca. 70% af pulveret, mens resten er en eller anden form for flyveaske og eventuelt mikrosilica. Når varmeudviklingen pr. kg pulver er næsten ens, tyder det således på, at de forskellige puzzolaner bidrager lige meget til varmeudviklingen. P5s varmeudvikling pr. kg pulver er dog en anelse højere. Dette skyldes måske, at betonslamet indeholder en rest uhydratiseret cement, som reagerer i betonen, men som ikke er regnet med i pulverbemængden.

Der er imidlertid stor forskel på afbindingstiden (udtrykt ved τ_0). Således er afbindingstiden for P3 signifikant længere end referencebetonens afbindingstid. Dette kan skyldes slamasken, men det er dog mere sandsynligt, at det skyldes de store mængder tilsætningsstoffer (plastificerende og superplastificerende midler), der er tilsat P3 for at opnå den ønskelige bearbejdighed. P5s afbindingstid er til gengæld noget kortere end referencebetonens, hvilket givetvis skyldes, at de hydratiserede cementkorn i betonslammen virker som kimdannere, så cementhydratiseringen kommer hurtigere i gang. P7 er fremstillet med en svensk rapid-cement, hvorfor dens afbindingstid ikke umiddelbart kan sammenlignes med referencebetonen.

A-betoner

A1-betonen har en markant lavere varmeudvikling (Q_{∞} målt pr. m³ beton) end de øvrige betoner, hvilket er forventeligt med den høje mængde flyveaske. A3s varmeudvikling er ligeledes lavere end referencebetonens varmeudvikling. A6s varmeudvikling er på niveau med Aref og A0s varmeudvikling, til trods for at A6 indeholder ca. 40 kg mere cement pr m³ beton. Der er således markant forskel på varmeudviklingen for på den ene side den svenske og på den anden side de to danske cementtyper. Den svenske Anlægningscement har da også betegnelsen *lav-varmecement*.

Mht. afbindingstid (igen udtrykt ved τ_0) viser resultaterne, at A0 binder en anelse hurtigere af end Aref, men ikke meget. Det har således ikke særlig stor betydning for

afbindingstidspunktet, om cementtypen er lavalkali-, sulfatbestandig cement (Aref) eller rapid-cement (A0). De store mængder flyveaske i A1 har forlænget afbindingstiden markant i forhold til A0. Afbindingstiden er også forlænget for A3, men dog ikke nær så meget som for P-beton med slamaske. Forlængelsen af afbindingstiden kan tilskrives pulverkombinationerne i A1 og A3, men det er påfaldende, at alle de tre betoner, der har forlænget afbindingstid (P3, A1, og A3) indeholder superplastificeringsstoffet Strukturo BA1, hvilket ingen af de andre betoner gør. Den forlængede afbindingstid skyldes derfor formentlig primært de store mængder plastificerende og superplastificerende tilsætningsstoffer, der er anvendt.

4. Måling af poreundertryk – plastisk svind

4.1 Formål

Formålet med forsøget er at undersøge dels hvor følsomme betonene er overfor dannelse af plastiske svindrevner, dels at vurdere en gængs beregningsmodels rigtighed.

4.2 Metodebeskrivelse

Metoden til undersøgelse af plastisk svind er udviklet på Teknologisk Institut, og beskrives i det følgende.

4.2.1 Måleprincip

Når frisk beton er i direkte kontakt med luft, hvor den relative fugtighed er lavere end 100%, vil der ske en udtørring af betonen. Det betyder, at den relative fugtighed falder i betonens kapillarporer, og der dannes væskemeniskener. Frem til afbindingstidspunktet har den friske beton praktisk taget ingen styrke, og derfor vil selv svage kræfter forårsaget af overfladespænding i meniskenerne i kapillarporerne kunne føre til revnedannelse.

Det valgte måleprincip går ud på at udstøbe den friske beton i en vindtunnel i et klimarum, hvor det er muligt at styre de parametre, der har størst betydning for udtørringen: Temperaturen, den relative fugtighed og vindhastigheden omkring betonen.

I betonen monteres et antal kunstige kapillarporer, hvor det er muligt at måle trykket. I begyndelsen af udtørringsforløbet vil trykket i disse porer falde (dvs. der dannes undertryk) som følge af overfladespændingens indvirkning. Hvis der sker revnedannelse omkring kapillarrøret, udlignes undertrykket. Revnedannelsen vil således kunne detekteres som pludselige spring på en kurve, hvor trykket er afbilledet som funktion af tiden.

Foruden klimaparametrene og trykket i de kunstige kapillarporer registreres også betonens vægttab (fordampning) og temperatur. Betonens temperatur benyttes til at beregne størrelsen af fordampning, der så kan sammenlignes med den målte værdi. Desuden registreres eventuelle plastiske svindrevner visuelt (evt. ved hjælp af lup).

4.2.2 Udstyr

Forsøget udføres parallelt med to prøver anbragt i hver sin vindtunnel.

Klimarum

Ved forsøgene i dette projekt er der styret efter en lufttemperatur på 20°C og en relativ luftfugtighed på 50%. Disse værdier er valgt som et i praksis forekommende klima ved støbning af gulve i større bygninger.

Vindtunnel

Vindtunnelerne er opbygget af plexiglas, således at der dannes en 1,5 m lang spalte med tværsnittet 700 x 52 mm, hvorigennem luften suges af en ventilator. Ventilatorens

omdrejningshastighed kan varieres, så vindhastigheden kan styres fra 0 til ca. 10 m/s. Vindhastigheden måles 30 mm over betonfladen med et vingehjulsanemometer.

Vægt

Den friske beton anbringes i en form (se nedenfor) på en vægt i vindtunnelen. De anvendte vægte er Mettler ID5, KC 120 med signaludtag. Vægtene kan veje op til 120 kg med udtareringsmulighed og opløsning på 3 decimaler dvs. 1 gram nøjagtighed.

Den samlede opstilling med form anbragt på vægt i en (endnu ikke lukket) vindtunnel ses på Figur 2.



Figur 2: Vindtunnel, hvori den støbeblære form er placeret. For at undgå betonspild omkring vægten, er området tildækket med plast. Til højre for tunnelen ses tryktransducerne monteret i stativ.

Form

Formen er sammensat af

- en bundplade af 19 mm Plywood
- en ydre kvadratisk stålramme 300 x 300 mm med tykkelse 9 mm
- en indre stålring med diameteren 170 mm og tykkelsen 26 mm.

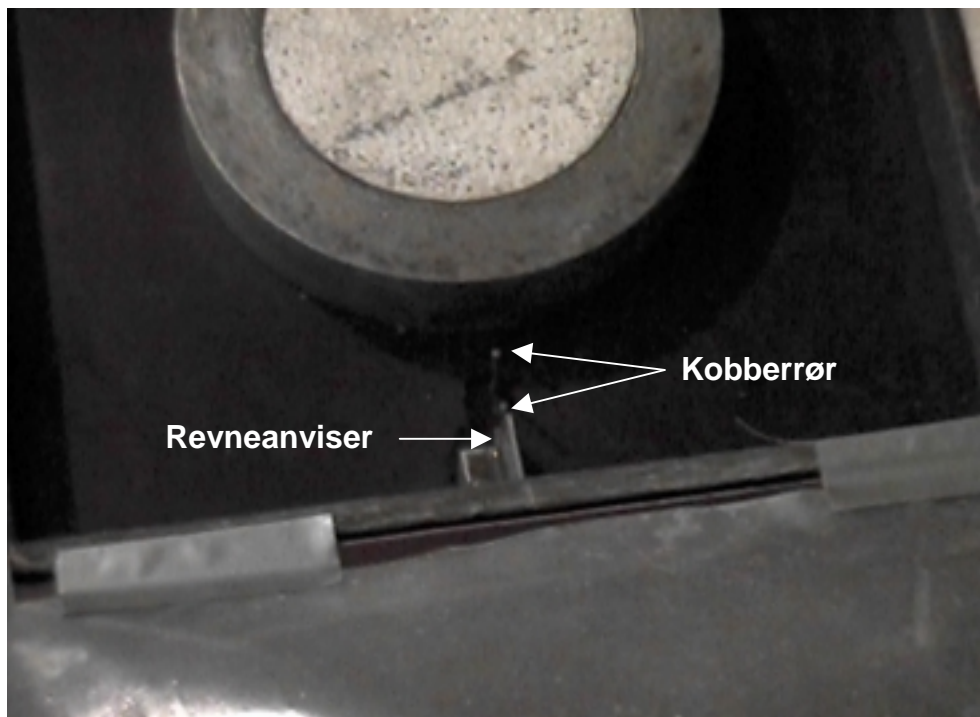
Det fri beton areal er således 0.067 m². Stålramme og stålring passer ned i en not i bundpladen, så højden af formen bliver 40 mm.

For at fremprovokere en eventuel revnedannelse til at ske omkring de kunstige kapillarporer, er der ud for disse anbragt en revneanviser vinkelret midt på den ene sideflade på det sted, hvor betontværsnittet er mindst. Revneanviseren er en 1 mm tynd stålskive, som har højden 29 mm. Skiven rager 22 mm ind fra formens yderside.

Kunstige kapillarporer med tryktransducere

I forlængelse af revneanviserne er der anbragt to kapillarrør med afstanden 3 mm og 23 mm fra revneanviseren. Der er anvendt to rør for at observere, hvornår en revne udbreder sig fra anviseren og ud i betonen. Kapillarrørene monteres gennem bundpladen, så de sidder lodret med munden ca. 3 mm under betonoverfladen. Kapillarrørene er af kobber med udvendig diameter 2,1 mm og indvendig diameter 0,6 mm. Kapillarrørene er forbundet til tryktransducere med klare plastslanger, så det er muligt at observere evt. luftbobler i systemet. Tryktransducerne er af typen Transinstruments BHL 4250 - 00 område 0 - 1 bar. 3 stk. Og 1 stk. Bell&Howell BHL 4050 - 0 - 03MO område 0 - 1 bar.

Figur 3 viser form med revneanvisere og kobberrør til måling af poretryk.



Figur 3: Form til registrering af plastiske svindrevner - klar til udstøbning. Nederst i billedet ses revneanviseren og ud for den ses de to kobberrør til måling af poreundertryk.

Det er væsentligt at udføre trykmålingerne ved konstant temperatur for at undgå at skulle kompensere for temperaturudvidelse i rør og slanger.

4.2.3 Dataopsamling

Følgende data registreres automatisk ved hjælp af Dataloggeren CR10 og Teknologisk Institut, Betons program TMS (Temperaturmålesystem) også kaldet Guardian:

- Tid
- Lufttemperatur og relativ luftfugtighed i kammeret
- Vindhastighed
- Temperatur i beton
- Vægtændring - under vejning standses og startes ventilatorer automatisk
- Poreundertryk

De nævnte parametre registreres hvert 5. minut med undtagelse af vægten, der kun registreres hvert 20. minut for ikke at påvirke klimaet for meget.

4.2.4 Udførelse

Formene anbringes på vægtene og kapillarrør forbindes til tryktransducere. Via en slange over transducerkammeret kan vand trykkes gennem systemet, så luftbobler undgås. Der fyldes så meget vand i systemet, at der dannes en konveks vandflade ved rørmundingen, så der her kan skabes forbindelse til vandet i betonens porer.

Betonen udstøbes ved vibrering med stavvibrator (diameter 20 mm), så beton flyder fra hver sin side ind over kapillarrørene. Derefter afrettes overfladen, og termoelementet til måling af betontemperaturen anbringes i modsatte side i forhold til revneanviseren.

Vægtene nulstilles, og vindpåvirkning startes, hvorefter dataopsamlingen begynder. Visuel overvågning af evt. revnedannelse sker, når der er nået et vist vægttab, eller hvis der sker bratte ændringer i forløbet af poreundertrykket. Hvis der dannes en revne over kapillarrørene, vil trykket udlignes til atmosfæretrykket.

Observationen af revner sker visuelt. Der er tale om plastiske svindrevner, når revnerne breder sig ud fra revnelederen eller evt. opstår andre steder ude i betonoverfladen. Poreundertryksmålingen er kun effektiv som revnedetektor, hvis revnedannelsen forløber stort set lige hen over kapillarrørene, og åbner sig helt ned til deres munding.

For nogle betontyper er det muligt at observere revner direkte, for andre betontyper er det kun muligt at observere revner ved anvendelse af en lup.

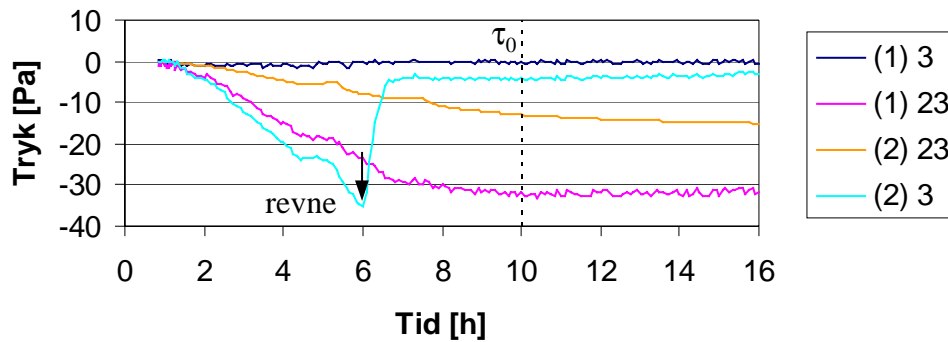
4.3 Resultater

4.3.1 Revnedannelse

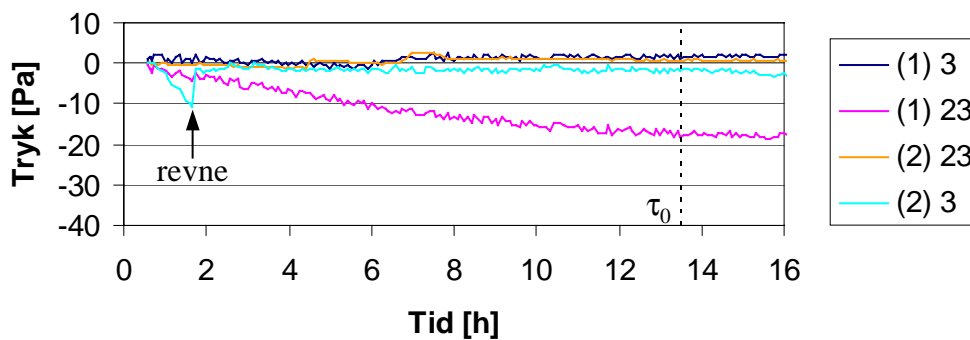
Revnedannelsen registreres som tidligere nævnt som ”knæk” på kurverne for poreundertryk. Poreundertryksmålingerne for P-betonerne er vist i Figur 4-Figur 7. Signaturforklaringen læses således: (1) 3 referer til poreundertryk målt i prøveemne nr. 1, 3 mm fra revneanviseren.

Bemærk! I de enkelte figurer er τ_0 markeret, hvor τ_0 den afbindingstid, der er fundet ved at indlægge tangenten med størst hældning på den pågældende betons varmeudviklingskurve. Dette giver en indikation af, hvornår betonen binder af og efterfølgende ikke er følsom for dannelse af plastiske svindrevner. τ_0 er imidlertid målt i modenhedstimer, mens den vandrette

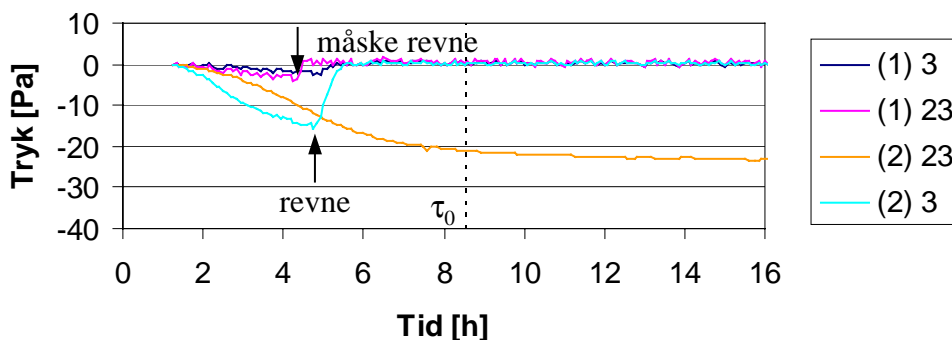
akse på graferne måler tiden i klokketimer. Betontemperaturen er ca. 15°C de første 4-6 timer efter forsøgets start. I figurene er τ_0 omregnet til klokketimer ved hjælp af kendskab til den aktuelle betontemperatur. Således fremgår det af Tabel 2, at Prefs afbindingstid er 8,9 modenhedstimer, mens afbindingstiden i Figur 4 er markeret ved 10,0 timer, fordi den er korrigeret for det aktuelle temperaturforløb.



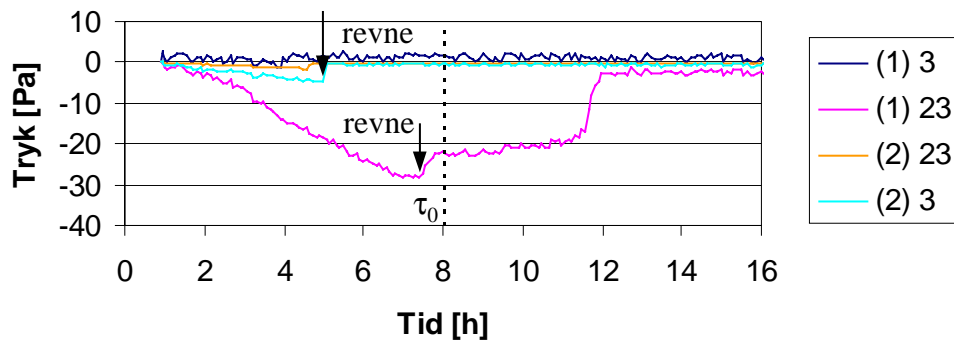
Figur 4: Poreundertryksmåling for Pref.



Figur 5: Poreundertryksmåling for P3.

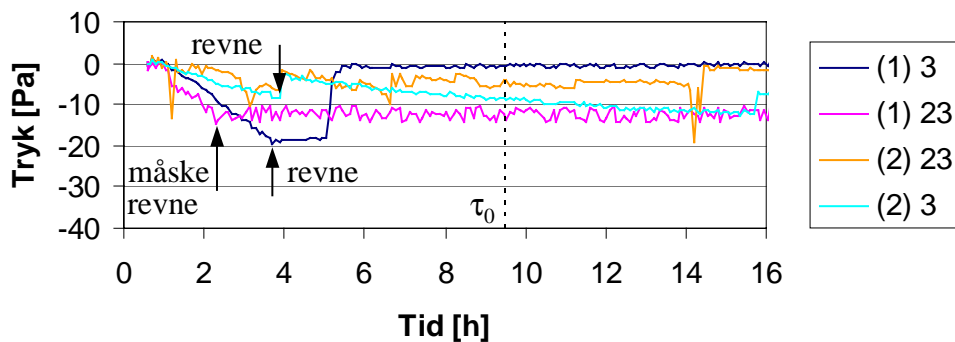


Figur 6: Poreundertryksmåling for P5.

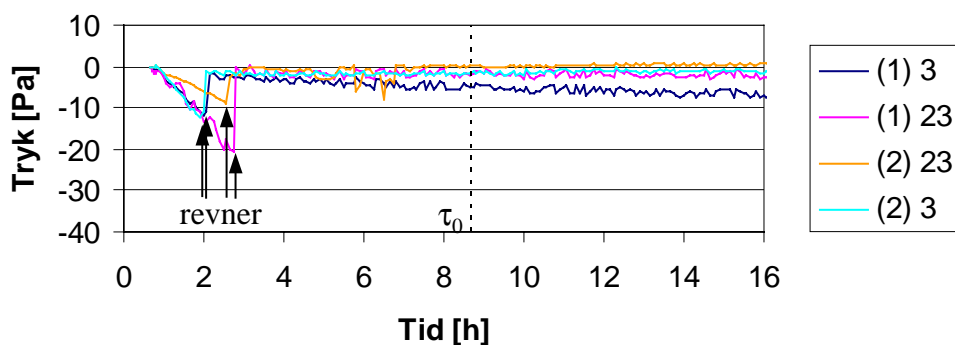


Figur 7: Poreundertryksmåling for P7.

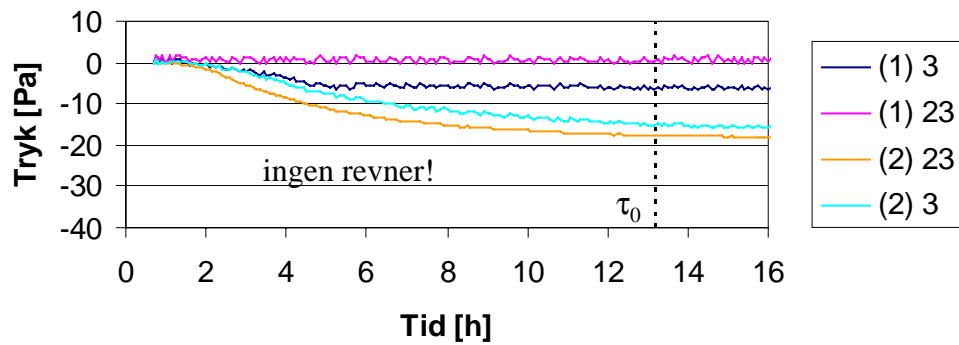
Poreundertryksmålingerne for A-betonerne er vist i Figur 8-Figur 12



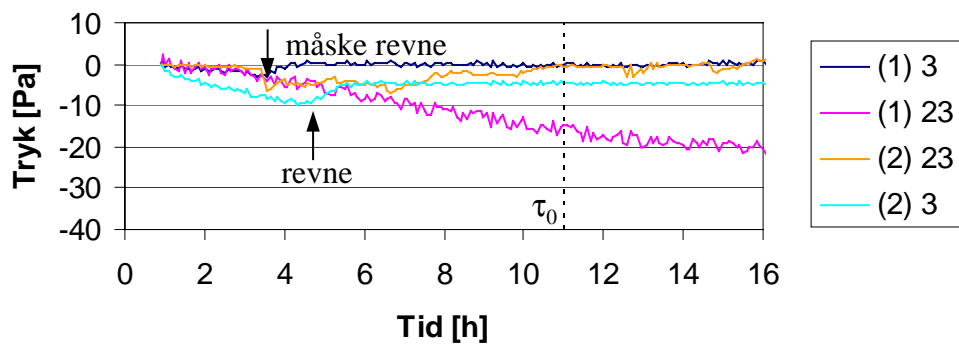
Figur 8: Poreundertryksmåling for Aref.



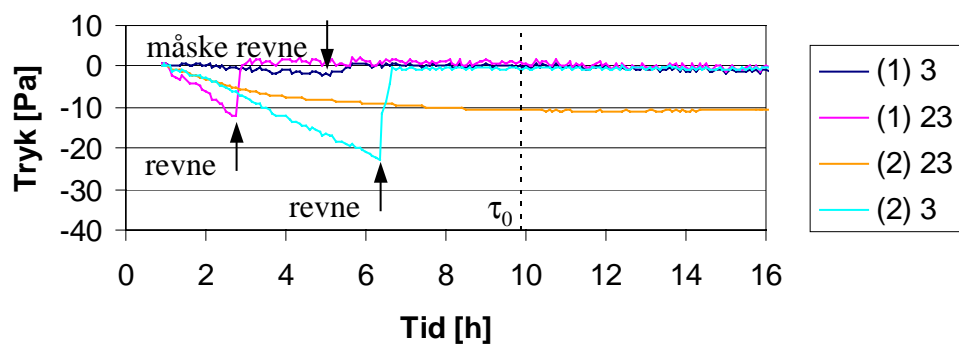
Figur 9: Poreundertryksmåling for A0.



Figur 10: Poreundertryksmåling for A1.



Figur 11: Poreundertryksmåling for A3.



Figur 12: Poreundertryksmåling for A6.

De aktuelle tidspunkter for revnedannelse fremgår af Tabel 4 og Tabel 5.

Tabel 4: Tidspunkt for revnedannelse efter vindbelastningens start for P-betoner. Resultater i parentes angiver, at betonen kun er "måske revnet".

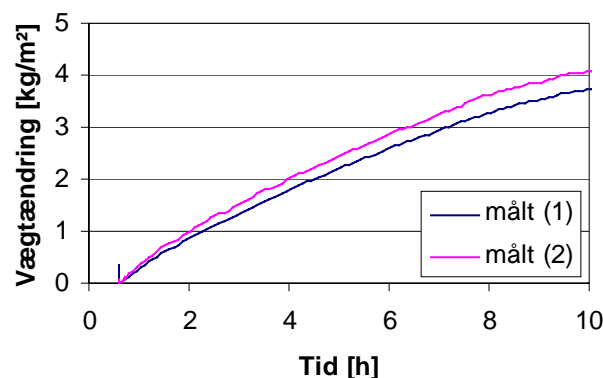
Emne	Afstand fra revneanviser [mm]	PR	P3	P5	P7
nr. 1	3	-	-	-	-
	23	-	-	(3,0)	6,5
nr 2	3	5,2	1,1	3,5	3,9
	23	-	-	-	-

Tabel 5: Tidspunkt for revnedannelse efter vindbelastningens start for A-betoner. Resultater i parentes angiver, at betonen kun er "måske revnet".

Emne	Afstand fra revneanviser [mm]	AR	A0	A1	A3	A6
nr. 1	3	3,1	1,3	-	(2,4)	(4,0)
	23	(1,7)	2,1	-	-	1,9
nr 2	3	3,2	1,2	-	3,4	5,4
	23	-	1,9	-	-	-

4.3.2 Beregning af fordampning

Figur 13 viser et typisk fordampningsforløb. Registreringen af fordampning starter samtidigt med vindbelastningen. De første timer er fordampningen nogenlunde konstant, hvorefter den gradvist klinger af.



Figur 13: Fordampning målt for Aref.

Det er muligt at beregne fordampningen som funktion af vindhastigheden og damptryksforskellen mellem luft og beton. Hansen og Pedersen [2] har angivet følgende udtryk for fordampningshastigheden:

$$\begin{aligned}\dot{w} &= (0,015 + 0,011 \cdot v) \cdot \Delta P, & \text{hvor } \Delta P \text{ er målt i mmHg} \\ &= (1,13 + 0,83 \cdot v) \cdot 10^{-4} \cdot \Delta P, & \text{hvor } \Delta P \text{ er målt i Pa}\end{aligned}$$

hvor:

- \dot{w} er fordampningshastigheden [$\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}$]
- v er vindhastigheden [m/s]
- ΔP er damptryksforskellen [mmHg eller Pa]

Et tilsvarende udtryk af ældre dato findes i Beton-Bogen [3]:

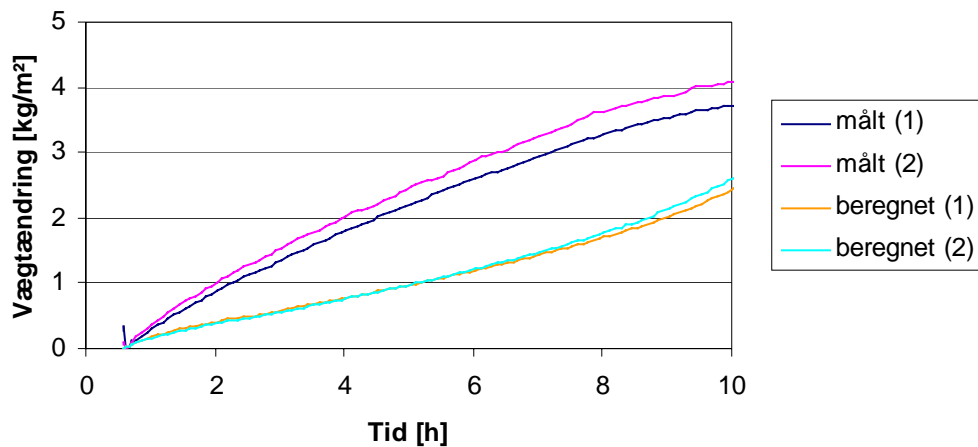
$$\dot{w} = (0,00008 + 0,00007 \cdot v) \cdot \Delta P$$

hvor symbolerne er de samme som ovenfor, og hvor ΔP er angivet i enheden Pa.

Det ses, at principperne i beregningsudtrykkene er de samme, men at koefficienterne varierer lidt. Det vælges i det følgende at benytte Hansen og Pedersens udtryk, der er det nyeste.

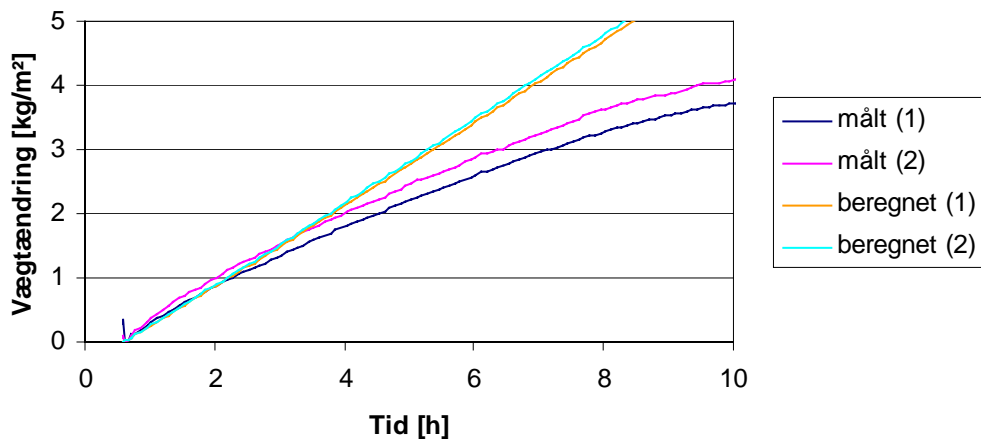
Ved beregning antages luftens relative fugtighed at variere svarende til det, der er målt. Den relative fugtighed i betonen er ukendt, men det antages, at den er 100%, svarende til at fordampningen sker fra våd overflade. Dette begrænser dog beregningsudtrykkets gyldighed, så det kun gælder, når denne betingelse er opfyldt. Når temperaturen måles løbende i både beton og luft, kan de absolutte damptryk i luft og beton herefter bestemmes vha. en tabel for mætningsdamptryk. I dette projekt er der benyttet mætningsdamptryktabellen i [4]. For at kunne foretage beregningerne i et regneark, er tabelværdierne i temperaturintervallet 0-40°C tilnærmet med et andengradspolynomium.

Damptrykkene bestemmes hvert 5. minut svarende til måleintervallerne, og herefter kan ΔP bestemmes. Den samlede fordampning til et givet tidspunkt findes ved at summere fordampningen i alle de forudgående intervaller. Resultatet, ved brug af Hansen og Pedersens beregningsudtryk for fordampningshastighed, er vist i Figur 14.



Figur 14: Målt og beregnet fordampning fra Aref. Beregningsforudsætning: Betontemperaturen er som målt.

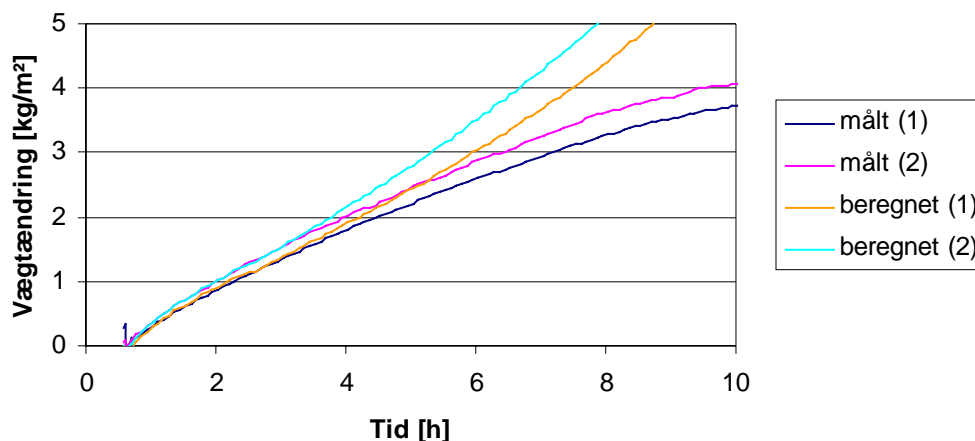
Det ses, at der er en meget dårlig overensstemmelse mellem målte og beregnede værdier. Dette skyldes muligvis, at beregningsudtrykkene for fordampningshastighed er udviklet i 1960'erne og 1970'erne, hvor automatisk dataopsamling ikke var mulig, og hvor det derfor blev antaget, at betonen havde konstant temperatur lig temperaturen umiddelbart efter blanding. Med denne antagelse ser de beregnede værdier noget anderledes ud, se Figur 15.



Figur 15: Målt og beregnet fordampning for Aref. Beregningsforudsætning: Konstant betontemperatur.

Det ses, at når der regnes med konstant betontemperatur, passer beregningerne nogenlunde de første ca. 4 timer, indtil fordampningen begynder at klinge af. Fremgangsmåden, hvor betontemperaturen regnes konstant, tager imidlertid ikke højde for, at selve fordampningen fjerner energi fra betonen og dermed sænker betontemperaturen. Med den anvendte klimabelastning sker der en sænkning af betontemperaturen på ca. 5°C i forhold til lufttemperaturen.

Et andet alternativ er at korrigere konstanterne i beregningsudtrykket, så den målte og beregnede kurve får samme hældning i fordampningens tidlige fase, hvor forudsætningen om våd overflade er opfyldt. I det følgende er det valgt at korrigere begge konstanter med samme proportionalitetsfaktor. Korrektionerne er foretaget vha. målinger i intervallet ½-2½ time efter vindbelastningens start, for at eventuelle uregelmæssigheder i forsøgets start ikke påvirker korrektionen. For Aref ses resultatet i Figur 16. Den beregnede fordampningshastighed er nu ikke længere konstant som i Figur 15, men følger den aktuelle betontemperatur.



Figur 16: Målt og beregnet fordampning for Aref. Beregningsforudsætning: Den beregnede fordampning er korrigeret, så den målte og beregnede fordampningshastighed er ens ½-2½ efter vindbelastningens start.

I Pedersen og Hansens beregningsudtryk antages det, at fordampning er den samme for alle betontyper, da der ikke indgår parametre, der afhænger af den aktuelle betontype. Når beregningsudtrykket korrigeres, ses det imidlertid, at der ikke kan benyttes samme proportionalitetsfaktor for alle betoner, svarende til at deres fordampningshastighed er forskellig. Det ses også, at kurverne for henholdsvis målt og beregnet fordampning slipper hinanden efter et stykke tid. Dette tidspunkt svarer formodentligt til, at forudsætningen om våd overflade ikke længere er opfyldt, hvorfor den faktiske fordampning bliver mindre end den beregnede. I Figur 16 indtræffer dette tidspunkt ca. 3 timer efter vindbelastningens start. Proportionalitetsfaktorer og deraf afledte fordampningshastigheder samt tidspunkterne for hvornår overfladerne ophører med at være våde fremgår af Tabel 6 og Tabel 7

Tabel 6: P-betonernes fordampningshastighed samt observeret tidsrum, hvor overfladen forbliver våd.

	PR	P3	P5	P7
Proportionalitetsfaktor	2,1	2,2	2,3	1,7
Fordampningshastighed ¹ [kg/(m ² ·h)]	0,6	0,6	0,6	0,5
Ophør af våd overflade [h]	5	4	5	4-5

1. Beregnet når luftens temperatur er 20°C, luftens relative fugtighed er 50% vindhastigheden er 5 m/s og betonens temperatur er 15°C.

Tabel 7: A-betonernes fordampningshastighed samt observeret tidsrum, hvor overfladen forbliver våd.

	AR	A0	A1	A3	A6
Proportionalitetsfaktor	2,9	2,0	3,2 ²	1,5	2,5
Fordampningshastighed ¹ [kg/(m ² ·h)]	0,8	0,6	0,9 ²	0,4	0,7
Ophør af våd overflade [h]	3	4	3 ²	4	4-5

1. Beregnet når luftens temperatur er 20°C, luftens relative fugtighed er 50% vindhastigheden er 5 m/s og betonens temperatur er 15°C.
2. Usikkerheden er stor pga. fejlbehæftede målinger af vægtændringer.

4.4 Vurdering

4.4.1 Revnedannelse

Bestemmelsen af revnedannelsestidspunktet er meget usikker. Således er der flere betoner, hvor der kun registreres revner i det ene prøveemne. En anden indikation af usikkerheden er tidsrummet mellem at første og anden revne registreres. Det mest iøjnefaldende eksempel er A6, hvor der er 3½ times forskel på de to tidspunkter, hvor de to revner opstår.

Desuden har der ved flere af forsøgene været problemer med at opretholde konstante forsøgsbetingelser (lufttemperatur og relativ fugtighed). Dette gør direkte sammenligning af revnedannelsestidspunkter problematisk. De betoner, hvor dette gør sig gældende er Pref, P5, P7, A1 og A6.

Med de nævnte usikkerhedsmomenter in mente, ser det ud til, at P-betonernes tendens til dannelse af plastiske svindrevner er på samme niveau. For P3 dannes den første revne dog ca. 1½ time efter vindbelastningens start. Det kan således ikke afvises, at P3 er mere følsom, men det kan også være et udslag af uheldige omstændigheder.

Med hensyn til A-betonerne ser det ud til, at A0 er mere følsom overfor plastisk svind end Aref, til trods for at fordampningshastigheden var mindre. A1 er tilsyneladende mindre følsom overfor plastisk svind end Aref. Således blev der slet ikke registreret revner i A1, men denne beton var også udsat for et mindre udtørrende klima, idet den relative fugtighed ved forsøgets start var ca. 65%. Herefter faldt den relative fugtighed, men 4 timer efter forsøgets start var den stadigvæk over de tilstræbte 50%.

4.4.2 Beregning af fordampning

Principperne i det benyttede beregningsudtryk opstillet af Pedersen og Hansen er brugbare, men når fordampningen beregnes løbende for den aktuelle betontemperatur, bliver resultatet signifikant mindre end den virkelige fordampning. Når den friske betons temperatur er ca. 20°C, og klimabelastningen svarer til den, der er anvendt i nærværende forsøg (luftens temperatur er 20°C, fugtigheden 50% og vindhastigheden 5 m/s), opnås rimelige resultater ved at gennemføre beregningerne med en konstant betontemperatur svarende til betonens begyndelsestemperatur, selvom betontemperaturen reelt falder ca. 5°C. Denne

fremgangsmåde er dog ikke generelt anvendelig, fx hvis der udstøbes varm beton en vinterdag, da betontemperaturen da vil falde langt mere, men det er en udmærket håndregel.

Ved beregning forudsættes det, at betonoverfladen er våd. Med den benyttede vindhastighed på 5 m/s, der ikke er urealistisk høj for fx en indendørs gulvstøbning, er denne forudsætning typisk kun opfyldt 3-5 timer efter vindbelastningens start. P-betonernes overflade er våd længere end A-betonernes. Det er dog på den sikre side at fortsætte beregningerne med denne forudsætning, også efter betonens overflade er ophørt med at være våd, da der i givet fald beregnes en for stor fordampning, jf. Figur 15 og Figur 16.

Desuden forudsættes det, at fordampningen ikke afhænger af betontypen. Forsøgene i dette projekt har imidlertid vist, at fordampningen er endog særdeles afhængig af betontypen. Således er det for identiske klimabetingelser beregnet, at fordampningshastigheden for eksempelvis Aref er $0,8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, mens den kun er det halve, dvs. $0,4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, for A3.

4.5 DS 482s krav til udtørningsbeskyttelse

DS 482 [5] stiller følgende krav til seneste tidspunkt for etablering af udtørningsbeskyttelse, se Tabel 8:

Tabel 8: Maksimal tilladelig vandfordampning før etablering af udtørningsbeskyttelse, jf. tabel 9.7.1.1a i DS 482.

Betonens samlede indhold af flyveaske og mikrosilica $X = \frac{FA + MS}{C + FA + MS}$	Betonens indhold af mikrosilica $Y = \frac{MS}{C + FA + MS}$	Maks. fordampet vandmængde fra overflade
$X > 15\%$	$Y > 5\%$	$1,5 \text{ kg}/\text{m}^2$
$15\% \geq X > 5\%$	$5\% \geq Y > 0\%$	$3,0 \text{ kg}/\text{m}^2$
$5\% \geq X$	$Y = 0\%$	$6,0 \text{ kg}/\text{m}^2$

Bemærk! Kravene i Tabel 8 gælder for konstruktionsdele med en tykkelse på 0,2 m eller mere. Ved mindre tykkelser skal fordampningsmængderne reduceres proportionalt. I de udførte forsøg er formens højde 40 mm. De maksimalt tilladelige fordampningsmængder er således henholdsvis $0,3 \text{ kg}/\text{m}^2$, $0,6 \text{ kg}/\text{m}^2$ og $1,2 \text{ kg}/\text{m}^2$ i de tre klasser. Det er dog næppe helt realistisk at reducere proportionalt ned til så små tykkelser som 40 mm.

De registrerede fordampede vandmængder ved første sikre tegn på revnedannelse fremgår af Tabel 9 og Tabel 10 for henholdsvis P- og A-beton:

Tabel 9: Fordampning ved første tegn på revnedannelse i P-beton. Fordampningen er angivet i $[\text{kg}/\text{m}^2]$.

Pref	P3	P5	P7
2,03	0,65	1,74	1,73

Alle P-betonerne har flyveaskeindhold på ca. 30% af pulvervægten og skal således beskyttes mod udtørring inden fordampningen overstiger $1,5 \text{ kg/m}^2$ (krav for 0,2 m tykke konstruktioner). Det ses, at hvis afdækning var etableret i overensstemmelse med DS 482, ville hverken Pref, P5 eller P7 have fået plastiske svindrevner. P3 ville muligvis have fået plastiske svindrevner, selvom afdækningen var etableret korrekt. Dette er dog svært at vurdere, da det som allerede nævnt er uklart om fordampningen skal sammenlignes med et krav på $0,3 \text{ kg/m}^2$ eller $1,5 \text{ kg/m}^2$.

Tabel 10: Fordampning ved første tegn på revnedannelse i A-betoner. Fordampningen er angivet i $[\text{kg/m}^2]$.

Aref	A0	A1	A3	A6
1,46	0,72	ingen tegn på revnedannelse	1,44	0,82

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

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

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

DS 482s krav tager højde for, at flyveaske øger risikoen for plastiske svindrevner. Nærværende forsøg understøtter ikke denne tendens, idet A1 med det højeste flyveaskeindhold ikke viser tegn på revner, og A6 uden flyveaske revner ved en lavere fordampning end Aref med et moderat indhold af flyveaske.

5. Konklusion

Der er opnået følgende resultater, se Tabel 11 og Tabel 12.

Tabel 11: Sammendrag af resultater for P-betoner.

	PR	P3	P5	P7
Afbindingstid, nedre-/øvre værdi [modenhedstimer]	5,7 /8,9	10,2 /12,5	3,2 /6,8	5,7 6,8
Fordampningshastighed ¹ [kg/(m ² h)]	0,6	0,6	0,6	0,5
Fordampning ved første tegn på revnedannelse [kg/m ²]	2,0	0,7	1,7	1,7
Ophør af våd overflade [h]	5	4	5	4-5

1. Beregnet når luftens temperatur er 20°C, luftens relative fugtighed er 50% vindhastigheden er 5 m/s og betonens temperatur er 15°C.

Tabel 12: Sammendrag af resultater for A-betoner.

	AR	A0	A1	A3	A6
Afbindingstid, nedre-/øvre værdi [modenhedstimer]	6,3 /7,5	5,3 /7,4	8,0 /11,6	8,1 /9,7	6,7 /7,8
Fordampningshastighed ¹ [kg/(m ² h)]	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7
Fordampning ved første tegn på revnedannelse [kg/m ²]	1,5	0,7	- ²	1,4	0,8
Ophør af våd overflade [h]	3	4	³	4	4-5

1. Beregnet når luftens temperatur er 20°C, luftens relative fugtighed er 50% vindhastigheden er 5 m/s og betonens temperatur er 15°C.

2. Ingen tegn på revner.

3. Vægtmåling fejlbehæftet, så tidspunkt for ophør af våd overflade kan ikke bestemmes.

Det kan kort konkluderes at

- afbindingstiden for nogle af de grønne betoner afviger fra referencebetonernes afbindingstid. Således har beton med betonslam en kortere afbindingstid end referencen, mens beton med højt flyveaskeindhold samt begge betoner med slamaske har længere afbindingstid end de respektive referencer. Den forlængede afbindingstid skyldes sandsynligvis at netop disse tre betoner er blandet med store mængder plastificerings- og superplastificeringsmidler, der retarderer afbindingen.
- de grønne betoners følsomhed overfor dannelsen af plastiske svindrevner er på niveau med referencebetonerne. Grundet stor forsøgsusikkerhed er det svært at differentiere betonerne. Der er en tendens til, at P-beton med slamaske (P3) er mere følsom end P-referencen. Der ses imidlertid ikke samme forhold mellem A-beton med slamaske (A3) og A-referencen. Desuden ser beton med rapidcement ud til at være mere følsom end beton med lavalkali-, sulfatbestandig cement (A0 i forhold til AR) og beton med stenmel (A6) har også en forøget risiko for dannelse af plastiske svindrevner. Til gengæld ser beton med højt flyveaskeindhold (A1) ud til at være mindre sårbar overfor plastisk svind.
- det er muligt at beregne fordampningen fra en betonoverflade, men med de gængse beregningsformler vil den beregnede fordampning blive for lille, hvis der regnes med det faktiske temperaturforløb i betonen.

- at ved gængs praksis, hvor betonen regnes våd, er beregningsforudsætningen kun opfyldt få timer efter udstøbning. I nærværende forsøg med en vindhastighed på ca. 5 m/s ophørte betonoverfladen med at være våd 3-5 timer efter vindbelastningens start. Det er dog på den sikre side at regne med en våd overflade frem for at prøve at estimere den faktiske relative fugtighed i betonoverfladen.
- DS 482s krav tager højde for, at flyveaske øger risikoen for plastiske svindrevner. Forsøg i forbindelse med dette projekt tyder ikke på, at risikoen for plastiske svindrevner stiger, når cement erstattes af flyveaske, snarere tværtimod, da beton med højt flyveaskeindhold som den eneste beton ikke viste tegn på revnedannelse. DS 482 stiller ikke tilstrækkeligt restriktive krav til udtørningsbeskyttelse af beton med stenmel.

6. Referencer

- [1] NT Build 388: Heat Development. Haybox calorimeter.
- [2] Pedersen, Erik Jørgen, og Hansen, Per Freiesleben: Udtørring af frisk beton. Fordampning fra våd overflade (nomogram), BKI, bestillingsnummer B6 (1978).
- [3] Beton-Bogen, redigeret af Aage D. Herholdt et al., 2. udgave, CtO (1985).
- [4] Hansen, Per Freiesleben: Materialefysik for bygningsingeniører. Beregningsgrundlaget, Institutet for Bygningsteknik, Aalborg Universitet (1993).
- [5] DS 482: Udførelse af betonkonstruktioner, Dansk Standard (1999).