



LUND UNIVERSITY

Plastisk krympning hos självkompakterande betong utan byggfukt

Persson, Bertil

2003

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Persson, B. (2003). *Plastisk krympning hos självkompakterande betong utan byggfukt*. (Rapport TVBM (Intern 7000-rapport); Vol. 7176). Avd Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola.

Total number of authors:

1

General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117
221 00 Lund
+46 46-222 00 00

**Plastisk krympning hos
självkomprimerande betong
utan byggfukt**

Bertil Persson

ISRN: LUTVDG/TVBM--03/7176--SE (1-70)

ISSN: 0348-7911 TVBM

Lunds Tekniska Högskola
Byggnadsmaterial
Box 118
221 00 LUND

Tel: 046-2227415
Fax: 046-2224427
www.byggnadsmaterial.lth.se

FÖRORD

I självkompakterande betong används vanligtvis stora tillsatser av fillermaterial. Dessa tillsatsmaterial innebär att betongytan kan torka mycket snabbt med tidig sprickbildning som följd. Då betongen dessutom görs byggfuktfri blir fuktprofilen annorlunda än i normal betong vilket är gynnsamt från uttorkningssynpunkt. Vid husbyggnad kan självkompakterande betong utan byggfukt nå en mycket stor användning. Förutsättningen är att betongen kan gjutas utan problem samt att ytsprickor kan undvikas. Byggfuktfri betong används numera allmänt vid gjutning av bjälklag till bostadshus. Den snabba utvecklingen kunde ej förutses vid det nationella projektet HÖGPRESTERANDE BETONGKONSTRUKTIONER. Framgent kommer den byggfuktfria betongen förmodligen att utnyttjas till större spännvidder. Med K120-betong kan man mycket väl tänka sig att utnyttja ett slankhetstal (spännvidd/tjocklek) av 40 vid betongvalv, pelardäck, etc. Föreliggande projektet inriktades helt på tidiga egenskaper, plastisk deformation, hållfasthet hos självkompakterande betong utan byggfukt avsedd för husbyggnad samt dess fuktutveckling efter olika typer av härdning. Föreliggande projekt syftade vidare till att ge riktlinjer för val av lämpliga delmaterial, betongrecept och produktionssätt vid tillverkning av en självkompakterande betong utan byggfukt.

Projektet har genomförts med finansiering från och Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF, och PEAB Sverige AB. Till finansierarna framföres ett varmt tack. Färdig Betong, Malmö, samt SACAC AG, CH-Lenzburg, har stått för ballastmaterial till försöket, Heidelberg Cement, Malmö, och SACAC AG har bistått med allt cement som nyttjats i försöket, Modern Betongteknologi, Täby, samt Perstorp Kemi AB, Perstorp, har bistått med allt flytmedel. Till dessa företag och organisationer riktas också ett varmt tack.

I projektets styrgrupp har Lars Östberg, PEAB Sverige AB, Förslöv, Lars Eriksson, PEAB Sverige AB, Malmö, samt Professor Göran

Fagerlund, LTH, Lund, ingått. Referensgruppen har bestått av Anders Sjöberg, CTH, Göteborg, och LTH, Lund, Lars Östberg, PEAB Sverige AB, Förslöv, samt Göran Hedenblad, LTH, Lund, och Boverket, Karlskrona. I slutfasen av projektet har viktiga resultat erhållits från ett liknande projekt genomfört av Professor Lars-Olof Nilsson, CTH, Göteborg, och LTH, Lund, och Mats Rohde, CTH, Göteborg, 2002. Till alla dessa personer riktas ett varmt tack.

Knut Andersson, Jonex Coordinator, Landskrona, har ansvarat för precisionstillverkning av krympriggar och krympplattor till försöket, Stefan Andersson, Färdig Betong AB, Malmö, har bistått med grundrecept för de provade betongerna, Stefan Backe, LTH, har byggt vindtunneln till försöket, kalibrerat fuktgivare, termoelement och LVDT-givare samt ställt i ordning datorer, fläktar, krympplattor, krympriggar vid försöket, Stefan Backe har vidare svarat för all dataredovisning från försöket, Peter Friberg har, efter ett examensarbete beträffande plastisk krympning hos självkompakterande betong, separat från detta utfört gjutningar, avformning och formrengöring samt jämförande mätningar av förseglad krympning hos de aktuella betongerna vid varierande omgivningsklimat, Per Folkesson har genomfört gjutningarna, rengöring samt avformning av betong vid försöket, Ingemar Larsson har genomfört två avdunstningsförsök, Thord Lundgren, LTH, har bistått med överföring av mätdata från DATA CONV och PICLOG till EXCEL-format med gemensam tidsaxel för deformationer och temperatur, Bengt Nilsson ansvarat för förförsök och gjutningar, avformningar och rengöringar vid försöket. Bengt Nilsson har slutligen också ansvarat för mätningar av gjutbarhet, hållfasthet, relativ fuktighet, etc. Till alla dessa personer riktas ett varmt tack.

Lund i december, 2003

Bertil Persson

INNEHÅLL	
FÖRORD	i
INNEHÅLL	ii
DEFINITIONER OCH SYMBOLER	v
SAMMANFATTNING OCH REKOMMENDATIONER	v
SUMMARY AND CONCLUSIONS	vii
1. INTRODUKTION, BEGRÄNSNINGAR OCH MÅL	1
1.1 Introduktion	1
1.2 Begränsningar	1
1.3 Mål	1
2. TIDIGARE FORSKNING	2
2.1 Mekanismer	2
2.2 Mätning av undertryck i porvatten	2
2.3 Plastisk krympning i normal betong, NB och i SKB	8
2.4 Fältstudier av plattor på mark	8
2.5 Sprickbildning på grund av plastisk krympning	10
2.5.1 Allmänt	10
2.5.2 Plattor utan inre tvång	10
2.5.3 Plattor med inre tvång	10
2.6 Blödningsvatten och avdunstning	12
2.7 Fiberinblandning för minskad plastisk krympning	15
2.8 Beräkning av uttorkning med TorkaS	15
2.8.1 Allmänt	15
2.8.2 Uttorkning i luft, vatten eller försegling	15
2.8.3 Uttorkning i fält	16
2.8.4 Självuttorkning	17
2.8.5 Inverkan av temperatur	17
2.8.6 Kvalitetssäkring med TorkaS	19
2.8.7 Golvsystem på betong	20
2.8.8 Inverkan av regn och lufthastighet	21
3. MATERIAL OCH METODER	24
3.1 Delmaterial	24
3.2 Betong	24
3.3 Provkroppar och mätrustning	25
3.4 Mätmetoder	25
4. RESULTAT	26
4.1 Betongsammansättning	26
4.2 Hållfasthet och relativ fuktighet	26
4.3 Krympning och temperaturutveckling	27
4.3.1 Betong 35max2	27
4.3.2 Betong 38max8	28
4.3.3 Betong 38max8ideal	29
4.3.4 Betong 38max18	31
4.3.5 Betong 38max18ideal	32
4.3.6 Betong 43max18	35
4.3.7 Betong 53max18	36
4.4 Plastisk krympning	38
4.5 Avdunstning	38
5. FELKÄLLOR OCH NOGGRANNHET	39
5.1 Fukt i delmaterial och fuktförluster	39
5.2 Uppvägningsfel och gjutfel	40
5.3 Lufthastighet	40
5.4 Mätstart	41
5.5 Blockering av rörelser	41
5.6 Kalibrering	42

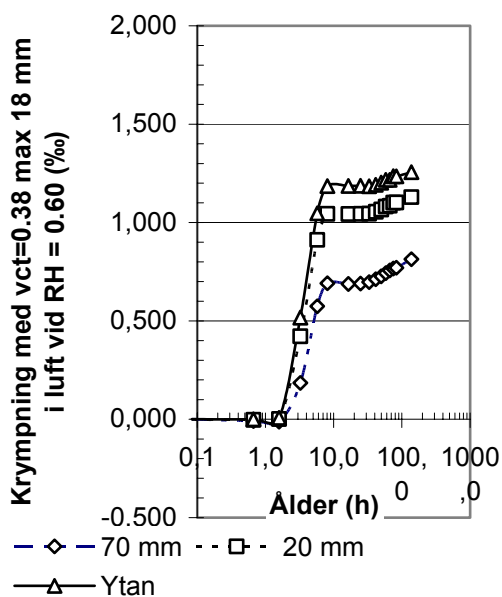
5.7 Temperaturutvidgningskoefficienten	42
6. ANALYS OCH DISKUSSION	43
6.1 Betong, hållfasthet och RF	43
6.2 Hållfasthet och relativ fuktighet	43
6.3 Fri krympning och plastisk	44
6.3.1 Betong 35max2	44
6.3.2 Betong 38max8	44
6.3.3 Betong 38max8ideal	45
6.3.4 Betong 38max18	45
6.3.5 Betong 38max18ideal	46
6.3.6 Betong 43max18	46
6.3.7 Betong 53max18	47
6.3.8 Samband mellan fri och plastisk krympning	47
6.4 Inverkan av hållfasthet och RF	48
6.5 Inverkan av betongsammansättning på krympning vid ung ålder	49
6.5.1 Försegling (autogen krympning)	49
6.5.2 Lufthårdning (plastisk krympning)	49
6.5.3 Vaxhärdning (plastisk krympning)	50
6.6 Uttorkningsberäkning med TorKaS	50
7. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER	51
7.1 Mätteknik	51
7.2 Betongteknik	51
7.3 Hållfasthet och RF	51
7.4 Plastisk krympning före tillstyvnad	51
7.5 Autogen och total krympning	52
7.6 Rekommendationer	52
7.7 Eventuella fortsatta försök	52
REFERENSER	53
APPENDIX	56-60

DEFINITIONER OCH SYMBOLER

a, b	konstanter för betongens partikelfördelning enligt ek. (4.1)
auogen deformation	deformation under konstant temperatur och vikt
byggfukt	fukt från byggprocessen som endera direkt vållar bristfälligheter eller på sikt, genom mögelpåväxt eller nedbrytning av delmaterial/kombinat, vållar skador
byggfuktfri betong	snabbtorkande med vbt < 0.38 eller självtorkande med vbt < 0.32
d	kornstorlek ($0.063 < d < 10$ mm)
d	plastisk sprickvidd (mm)
d	dygn
f	flytmedel, 1% beräknat på cementmängden
f_c	tryckhållfasthet (MPa)
f_1	1-dygnshållfastheten (MPa)
h	timme
kritisk RF	med lågalkalisk avjämningsmassa och alkalibeständigt lim: RF = 90% på ekvivalent mättdjup; utan lågalkalisk avjämningsmassa: RF = 85% för gummi-, homogen PVC-, tät polyolefinbeläggning, etc. (ej för betong med vbt < 0.38)
plastisk deformation	deformation före tillstyvnadtidens slut (viktändring och konstant temperatur)
s	passerande material
s	20% silikastoft beräknat på cementmängden
sf	betecknar stålfibrer (%)
ung betong	betong med ålder ≤ 5 dygn
vattenglas	märkesbeteckning EverCrete [®] ™)
vax	märkesbeteckning DIETERMANN Heidelberg Group Europlan 10 W
vbt	vattenbindemedelstal
vct	vattencementtal
ASTM	the American Society for Testing and Materials
B	Byggcement
CCR	Cement and Concrete Research
CEM I-42.5 R	NORCEM Std cement
CEMII/A-D-52.5	Blandcement Fortico 5R
CEM II/A -L 42.5 R	Byggcement Slite
D	Degerhamncement
Limus 40	kristallint kalkstensfiller med medelkornstorlek 0.040 mm
LVDT	induktiv rörelsegivare
NB	normal betong
Pm	pormättnadsgraden (-)
PPF	polypropylenfibrer
R	regn, 1 eller 7 dygn – därefter torkning i RF = 60% (20 °C)
RF	relativ fuktighet
S	sannolikheten (-)
S	Slite Std cement
SGÅ	Svensk Glasåtervinning, Askersund
SH	snabbhärdande
SKB	självkompakterande betong som ej kräver någon energi för att fylla ut formen
T	torr betongyta vid RF = 60% (20 °C)
VAW	volymandel vatten
VAW50	volymandel vatten, 50%
25D	cementpasta med Degerhamncement, vbt = 0.25
38max18id	betong med vbt = 0.38, max 18 mm ballastdiameter, ideal partikelfördelning
α	temperaturutvidgningskoefficienten (%/°C)
ϵ_{a1}	krympning i luft efter 1 dygn (‰)
ϵ_{p1}	plastisk krympning efter 1 dygn (‰)
ϵ_{s1}	förseglad krympning efter 1 dygn (‰)
ϵ_{v1}	krympning efter 1 dygn för vaxbelagd betong (‰)

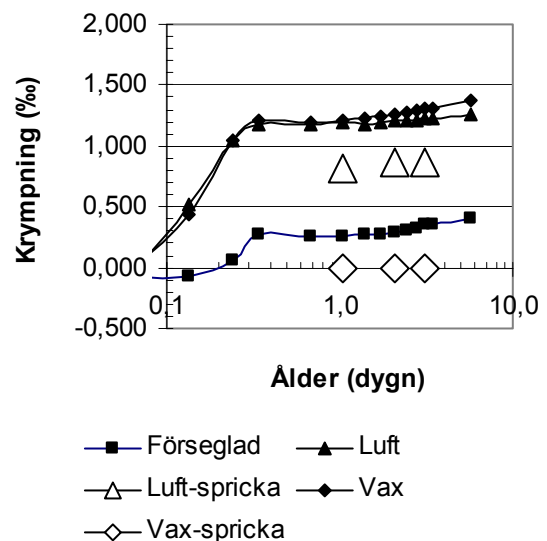
SAMMANFATTNING OCH REKOMMENDATIONER

Denna rapport omfattar en redogörelse för försök med plastisk krympning hos självkompakterande betong, SKB, inklusive sammanhörande, tidig krympning, hållfasthetsutveckling och självuttorkning. Tyngdpunkten för försöken innefattar betonger med lågt vattenbindemedelstal, $vbt = 0.35$ (2 st.), $vbt = 0.38$ (4 st.), $vbt = 0.40$, $vbt = 0.43$ samt $vbt = 0.53$ (2 st.). Försöken företogs under kontrollerade förhållanden, endera förseglade prover, vaxbelagda eller torkade i relativ fuktighet, $RF = 60\%$. Försöken genomfördes i allmänhet under 5 dygn med en efterföljande mätning av hållfasthetsutveckling och RF även vid 28 dygns ålder. Unik mätteknik användes i försöken, dels kunde den plastiska krympningsprofilen ända upp till betongytan fastställas, dels kunde parallell mätning av erhållen sprickvidd ske, Figur 4.28. För att erhålla liten plastisk sprickvidd var det en fördel att använda SKB med stor ballaststorlek. En tendens till partikelsprång i gradering hos den färska betongen gav mer blödningsvatten vilket i sin tur minskade uppkomst av plastiska krympsprickor jämfört med en ideal, linjärlogaritmisk, partikelfördelning. Betong till försök med plastisk krympning bör tillverkas i en sats i syfte att undvika tidsförskjutningar vid försökets start. Två fläktar bör användas i en vindtunnel med plastiska krympförsök för att minska variationer i lufthastighet. Plastiska krympsprickor uppstod ej hos betong med 28-dygns hållfasthet < 60 MPa ($vbt \geq 0.43$, 4 m/s, $RF = 60\%$, $20^\circ C$).



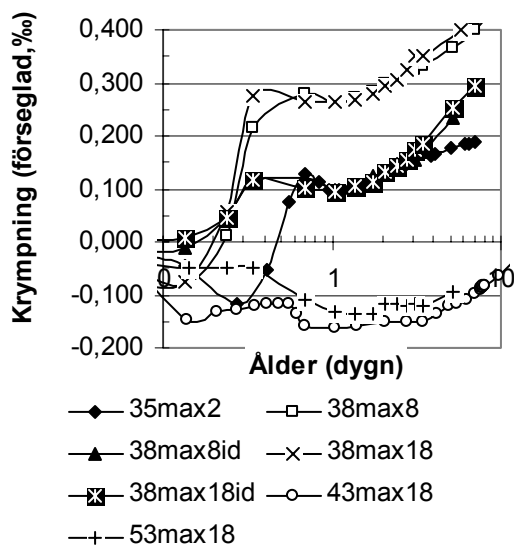
Figur 4.28 – Krympning, 38 max 18, $RF = 60\%$.

När plastiska krympsprickor uppstod begränsades sprickvidden med en snabb hållfasthetstillväxt. Autogen och total krympning ökade med högre hållfasthet och minskade med högre RF hos betongen. Resultat av en beräkning med TorkaS2.0 gav ca 7% för hög beräknad RF vid uppmätt $RF = 85\%$ samt ca 3.5% för hög beräknad RF vid uppmätt $RF = 90\%$. För att plastiska krympsprickor skulle uppstå krävdes att vbt var < 0.40 hos betongen. Med lufthastigheten 4 m/s, $RF = 60\%$ och $20^\circ C$ uppstod plastiska krympsprickor ca 3 h efter gjutning. Med hänsyn till arbetstidens längd bör därför av plastisk sprickvidd mätas automatiskt t.ex. med en beröringsfri laserutrustning mellan speglar vilka placeras på små plattor på betongytan på ömse sidor om den förväntade plastiska krympsprickan. Plastisk sprickvidd kunde minskas genom användning av 18 mm maximal ballast i stället för 8 mm ballast. Ideal partikelfördelning i betongen gav en fördubblad plastisk sprickvidd jämfört med en partikelfördelning i betongen med ett smärre partikelsprång i graderingen eftersom mängden blödningsvatten då blev större. Lägre vbt ökade den plastiska krympningen. Plastisk krympning före tillstyvnadstidens slut, ca 8 h ålder, utgjorde en stor del av den totala krympningen, ca 1.1 ‰ för betong med $vbt = 0.38$ även om autogen krympning (förseglad provkropp) först subtraherades, Figur 6.8. För betong med $vbt = 0.43$ uppgick den plastiska krympningen till ca 0.5‰, för $vbt = 0.53$ till ca 0.25‰ då autogen expansion vid förseglad härdning adderas. Vaxbeläggning hade ingen/liten inverkan på plastisk krympning vid $vbt = 0.38$, liten vid $vbt = 0.43$ och stoppade sprickor vid $vbt = 0.53$.

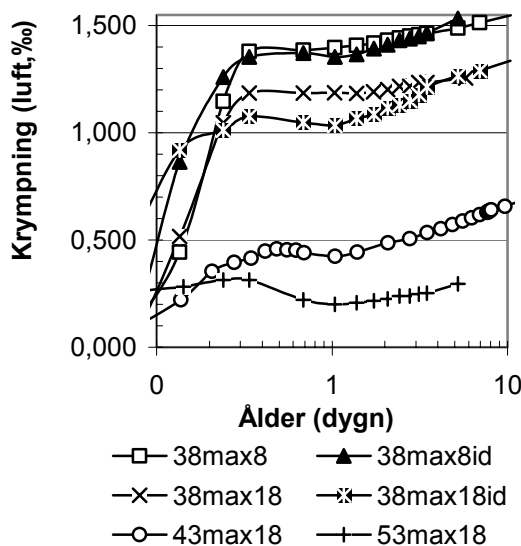


Figur 6.8 – Krympning, betong 38max18.

I ett fall förhindrades dock sprickor med vax vid $vbt = 0.38$, Figur 6.8. Bra sätt att undvika plastisk krympning vid $vbt = 0.38$ var att försegla betongen effektivare än med vax eller att bevattna betongen tidigt om detta är möjligt med hänsyn till krav på god ytfinish. Betongsammansättningen påverkade den autogena (förseglade) krympningen kraftigt vid ung ålder, Figur 6.15. Betongsammansättningen inverkar även på den plastiska krympningen. Den plastiska krympning före tillstyvnadstidens slut, ca 8 h ålder, utgjorde en mycket stor av den totala krympningen, ca 1.1 ‰ för betong med $vbt = 0.38$, Figur 6.17. Följande påverkan av sammansättningen hos betongen på krympning hos ung betong kunde särskiljas:



Figur 6.15 - Förseglad krympning versus ålder. 35 = vbt (%), max8 = maximalt 8 mm ballaststorlek, id = ideal partikelfördelning.



Figur 6.17 - Krympning i luft versus ålder.

1. SKB med $vbt \leq 0.38$ erhöill stor autogen krympning före tillstyvnadstidens slut
2. SKB med > 0.38 fick autogen expansion
3. SKB med högre finhalt eller större tendens till partikelsprång erhöill större autogen krympning före tillstyvnadstidens slut.

Efter tillstyvnadstidens slut var krympningen i stort sett lika för betonger med $vbt = 0.38$. Följande rekommendationer kunde ges:

- SKB med så stor ballaststorlek som är gjutteknisk möjligt att använda, är att föredra i syfte att minska den plastiska sprickvidden
- Ett smärre partikelsprång i gradering hos den färska betongen ger mer blödningsvattnet vilket i sin tur minskar uppkomsten av plastiska krympsprickor
- Uppkomst av plastiska krympsprickor begränsas genom användning av betong med 28-dygnshållfasthet < 60 MPa ($vbt \geq 0.43$)
- När plastiska krympsprickor väl har uppstått kan sprickvidden begränsas med en snabb hållfasthetstillväxt hos betongen
- Vaxbeläggning har ingen inverkan på plastisk krympning för betong med $vbt = 0.38$, liten inverkan med $vbt = 0.43$ samt förhindrar plastisk krympning med $vbt = 0.53$
- Plastisk krympning $vbt = 0.38$ undviks bäst genom effektivare försegling av betongen än med vax eller genom bevattning tidigt.

Eventuella fortsatta försök borde inriktas på att med hjälp av den här framtagna, unika mättekniken mäta den plastiska krympningsprofilen ända upp till betongytan och, parallellt, mäta den plastiska sprickvidden, helst då med lasertechnik. Betong till försök med plastisk krympning bör tillverkas i en sats i syfte att undvika tidsförskjutningar vid försökets start. Två fläktar bör användas i en vindtunnel med plastiska krympförsök för att minska variationer i luft-hastigheten. Följande parametrar bör studeras vid fortsatta försök med plastisk krympning:

- Avdunstning
- Blödningsvattnet
- Fibertillsats
- Fillerhalt/typ
- Vbt
- Vindhastighet
- Viskositetsmedel

Även fältförsök bör utföras.

SUMMARY AND CONCLUSIONS.

Concrete that does not require any drying time influencing on the construction time of the building has from obvious reasons attended a great interest from the market especially when it is cast without any vibrating tools, so called self-compacting concrete, SCC. However, as for ever and a day, some problems remain unsolved such as early age performance, especially in the surface zone, and measurement for moisture, for self-compacting concrete without construction moisture to be generally introduced. This report emphasis a description of research on plastic shrinkage of SCC including the close related early shrinkage, strength development and self-desiccation. The major part of the research contain concrete with low water-binder ratio, $w/b = 0.35$ (2 concrete), $w/b = 0.38$ (4 concrete), $w/b = 0.40$, $w/b = 0.43$ and $w/b = 0.53$. The research was performed in environmental controlled conditions, either sealed specimen, wax treated or drying specimen in a relative humidity, $RH = 60\%$. Generally the research was performed over 5 days with a final measurement of strength and RH also at 28 days' age. Unique measurement technique was used in the tests with measuring of the shrinkage profile all up to the surface of the concrete together with parallel measuring of the plastic crack width, Figure 4.28. In order to obtain low plastic crack width it was an advantage to use SCC with large aggregate size. A tendency of gap grading of the particles in the fresh concrete provided more bleeding water which in turn decreased the development of plastic cracking as compared with a ideal, linear logarithmical distribution of the particles. Concrete for tests with plastic shrinkage is to be manufactured in one batch in order to avoid displacements of the start of the tests.

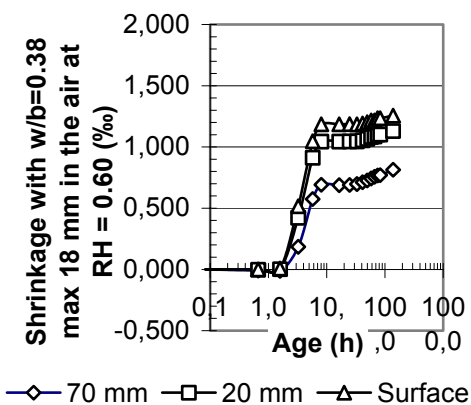


Figure 4.28 - Unique technique with measuring of shrinkage profile up to the concrete surface.

Two fans are to be used at tests of plastic shrinkage in a wind tunnel in order to avoid differences in wind speed at the entrance and the exit of the tunnel. Plastic cracking was not observed of concrete with 28-day strength < 60 MPa ($w/b > 0.43$ at 4 m/s, $RH = 60\%$, $20\text{ }^\circ\text{C}$). In case of plastic cracking the size of the cracks were limited by early strength development. Autogenous and total shrinkage increased with higher RH of the concrete. A calculation with TorkaS2.0 gave about 7% too high RH at $RH = 85\%$ and about 3.5% too high RH at $RH = 90\%$. For plastic cracking to occur required $w/b < 0.40$. With 4 m/s, $RH = 60\%$ and $20\text{ }^\circ\text{C}$ the cracking appeared after 3 h. Due to the working hours it is an advantage to measure the crack automatically with laser equipment between mirrors that are placed on the surface of the fresh concrete on both sides of the planned crack. The plastic shrinkage decreased with 18 mm aggregate in the concrete instead of 8 mm size. Ideal distribution of the particle in the fresh concrete caused twice the size of the crack with compared with a small gap grading of the concrete particles. Lower w/b increased the plastic cracking. Plastic shrinkage before the final setting time of the concrete, about 8 h' age, became a great part of the total shrinkage, about 1.1 ‰ for concrete with $w/b = 0.38$ even though autogenous shrinkage first was subtracted (sealed specimen), Figure 6.8. For concrete with $w/b = 0.43$ the plastic shrinkage became about 0.5‰, for $w/b = 0.53$ about 0.25‰ since autogenous expansion at sealed curing first was added. Wax treatment had no/little influence on plastic shrinkage at $w/b = 0.38$, little at $w/b = 0.43$ and stopped cracking at $w/b = 0.53$.

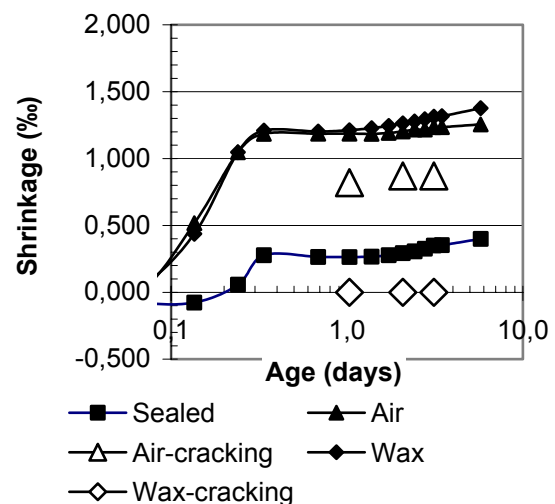


Figure 6.8 – Shrinkage of concrete 38max18.

In one case plastic shrinkage was prevented at $w/b = 0.38$ by use of wax, Figure 6.8. Feasible ways to avoid plastic shrinkage at $w/b = 0.38$ was to seal the concrete more efficiently than with wax or to water the concrete at early age if this measure was possible due to the surface finishing. The concrete mix proportions had a main influence on the autogenous (sealed) shrinkage at early ages, Figure 6.15. The mix proportions also affected the plastic shrinkage. The plastic shrinkage before the final setting time, about 8 h' age, became a great part of the total shrinkage, about 1.1 ‰ for concrete with $w/b = 0.38$, Figure 6.17. The following affecting factors of the mix proportions of the concrete on the shrinkage may be deduced:

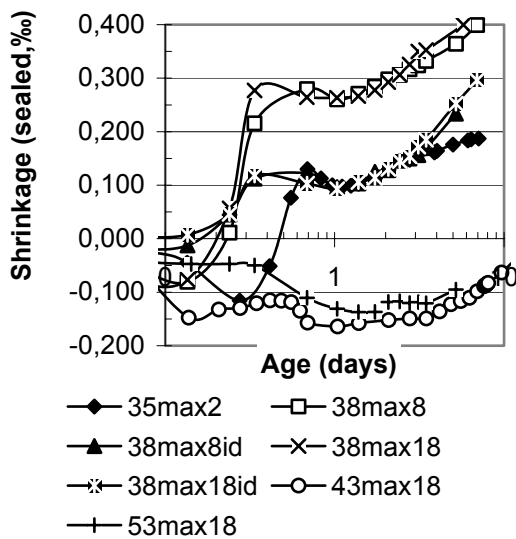


Figure 6.15 – Sealed shrinkage versus age. 35 = w/b (%), max8 = maximum 8 mm aggregate size, id = ideal particle distribution.

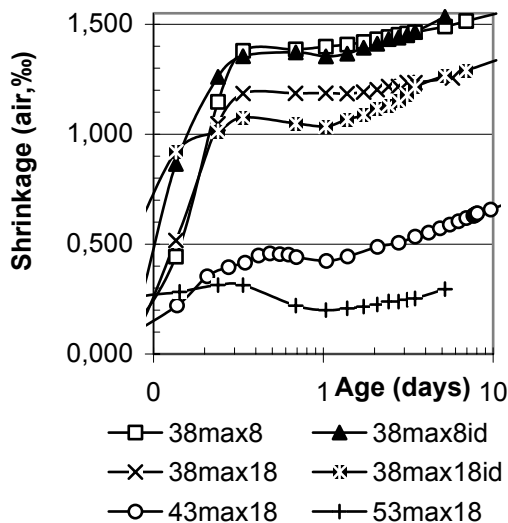


Figure 6.17 – Shrinkage in the air versus age.

1. SCC with $w/b \leq 0.38$ obtained large autogenous shrinkage before final setting time
2. SCC of $w/b > 0.38$: autogenous expansion
3. SCC with higher filler content or larger tendency of gap grading obtained larger autogenous shrinkage before the final set

After final set the shrinkage developed more or less equally for the concrete with $w/b = 0.38$. The following recommendations may be given:

- In order to obtain low plastic crack width it was an advantage to use SCC with as large aggregate size as possible (due workability)
- A tendency of gap grading of the particles in the fresh concrete provided more bleeding water which decreased plastic cracking
- Plastic cracking was not observed of concrete with 28-day strength < 60 MPa ($w/b > 0.43$ at 4 m/s, RH= 60% and 20 °C)
- In case of plastic cracking the size of the cracks were limited by early rapid strength development of the concrete
- Wax treatment had little/no influence on plastic shrinkage at $w/b = 0.38$, little at $w/b = 0.43$ and stopped cracking at $w/b = 0.53$
- Feasible ways to avoid plastic shrinkage with $w/b = 0.38$ was to seal the concrete more efficiently than with wax or to water the concrete at early age if this measure was possible due to the surface finishing.

Possible upcoming research, with the developed unique measurement technique, may be concentrated on measurement on the shrinkage profile all up to the surface of the concrete, and, in parallel, measurement of the plastic shrinkage width. The concrete for the upcoming research may be manufactured in one batch in order to avoid time differences at the start of testing. Two fans ought to be used in a wind tunnel at test of plastic shrinkage in order to decrease the variations of the wind speed. The following parameters are essential in the study:

- Bleeding water
- Evaporation
- Fibre additives
- Fibre/type
- Viscosity agent
- Wind speed
- w/b

In addition full scale test may be performed.

1. INTRODUKTION, BEGRÄNSNINGAR OCH MÅL

1.1 Introduktion

Fukt och arbetsmiljö är dominerande frågor inom sektorn betongbyggande. Kan dessa problem lösas blir samhällsvinsterna mycket stora, såväl vad gäller arbetsskador (från vibreringsdon och ljud) som vad gäller fuktskador (inbyggd fukt kostar samhället ca 1000 milj kr per år). Att så är möjligt visar ett pilotförsök i Malmö, 1999 [1-15]. Provbygget visade sig dessutom bli Sveriges hitintills billigaste bostadshus, uppmärksammat av Byggnadskostnadsdelegationen.

I självkompakterande betong, SKB, används vanligtvis stora tillsatser av fillermaterial. Dessa tillsatser innebär att betongytan kan torka mycket snabbt med tidig sprickbildning som följd. Då betongen dessutom görs byggfuktfri blir fuktprofilen annorlunda än i normal betong, NB, vilket är gynnsamt från uttorknings-synpunkt. Vid husbyggnad kan SKB utan byggfukt nå en mycket stor användning. Förutsättningen är att betongen kan gjutas utan pro-

blem samt att ytsprickor kan undvikas. Föreliggande projekt inriktas helt på tidiga egenskaper hos SKB utan byggfukt avsedd för husbyggnad samt dess fuktutveckling efter olika typer av härdning.

1.2 Begränsningar

Försöket begränsades till studium av följande parametrar:

1. Vbt ($0.35 < vbt < 0.53$)
2. Härdningsförhållande (försegling, luft eller vaxbehandling)
3. Fyllertyp (glasfiller eller sand)

1.3 Mål

Föreliggande projekt syftade till att ge riktlinjer för val av lämpliga delmaterial, betongrecept och produktionssätt vid tillverkning av en SKB utan byggfukt. Detta gjordes genom att undersöka betongens tidiga egenskaper, gjutbarheten hos SKB samt hållfasthet och inre fuktutvecklingen inklusive en undersökning av orsakerna till variationer i sprickbildning hos självkompakterande betong.

2. TIDIGARE FORSKNING

2.1 Mekanismer

Mekanismen för plastisk krympning är att ett undertryck uppstår i porvattnets menisk, dels (i huvudsak) till följd av avdunstning från betongytan, dels (bisak) till följd av en kemisk krympning hos hydratvattnet [16]. Uppkomst av plastisk krympning indelas i tre faser [16]:

1. Betongytan är fortfarande blöt till följd av blödning. Plastisk krympning uppstår ej.
2. Betongytan torkar och ett komplicerat system av vattenmekanismer uppstår mellan ballastkorn och cement. Vattnemeniskens radie minskar då uttorkningen fortskrider vilket leder till ett ökande undertryck i porvattnet, p_c .
3. Efter några h har härdningen nått så lång att tillstyvnad skett av betongen och den plastiska krympningen har upphört (undertrycket i porvattnet går då inte att mäta).

Undertrycket beskrivs av Laplace ekvation:

$$p_c = (p_l - p_w) / 2 = \sigma / r_m \quad (2.1)$$

p_c betecknar undertryck i porvattnet (Pa)

p_w betecknar vattentrycket (Pa)

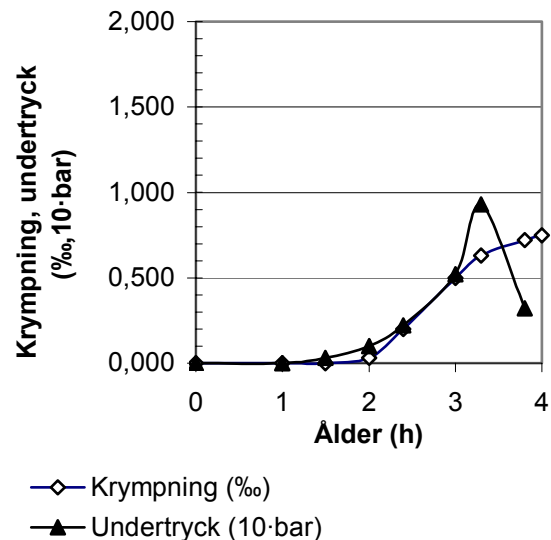
p_l betecknat lufttrycket (Pa)

r_m betecknar meniskens krökningsradie (m)

σ betecknar ytspänning (N/m)

Undertrycket i porvattnet och den plastiska krympningen hos betong korrelerades genom omfattande försök, Figur 2.1 [16,17]. Följande sammanfattning kan ges beträffande mekanismen för plastisk krympning [17]:

1. Klimatförhållande och betongens blödning bestämmer utvecklingen av meniskerna och undertrycket i porvattnet.
2. Tryckfallet och den plastiska krympningen styrs av avdunstningen, betongens permeabilitet och partiklarnas rörlighet.
3. Då avdunstningen blir större än krympningen uppstår en diskontinuitet i menisken.



Figur 2.1 - Undertrycket i porvattnet och den plastiska krympningen hos betong.

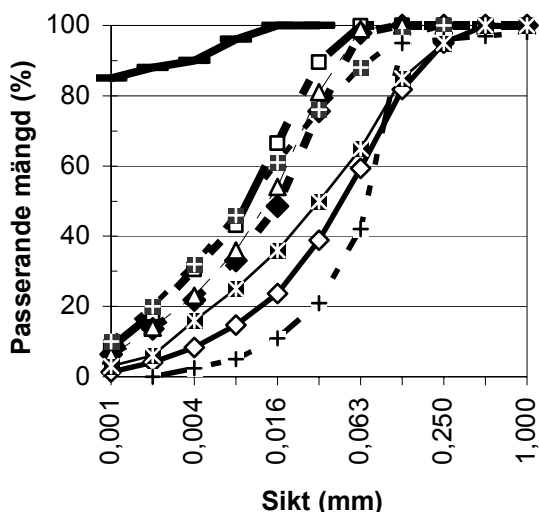
Eftersom rörligheten mellan partiklarna är mindre i SKB än i NB, till följd av tillförsel av filler i SKB, blir risken för plastiska krympsprickor större i SKB än i NB. Plastisk krympning hos NB styrs av följande parametrar [17]:

1. Cementtyp
2. Härdningssätt
3. Tillsatsmaterial och tillsatsmedel
4. V_{bt}

För SKB tillkommer partikelfördelningen för den färska betongen som väsentlig parameter.

2.2 Mätning av undertryck i porvatten

Undertryck i porvatten hos cementpasta mättes med en nål vilken var placerad i ett rostfritt rör med diametern 0,38 mm [17]. Det var viktigt för mätningen att nålen placerades inifrån trycksidan av röret för att mätningen skulle kunna ske på ett korrekt sätt. Det var även väsentligt att mätvattnet var fritt från luftbubblor varför kokning och vakuumbehandling skedde av vattnet till mätröret före det att mätningen påbörjades. Kalibrering av mätaren skedde i vatten i en form med exakt samma dimensioner som provkroppen, diameter 150 mm samt höjd 50 mm [17]. Nålspetsar till mätanordningar placerades på mätdjupen 10 mm och 40 mm under vattenytan. Undertrycket beräknades som tryckskillnaden mellan lufttrycket och trycket på nålspetsen. Cement Slite Std, De-gerhamn, flygaska och silikastoft blandat med vatten undersöktes, Figur 2.2.

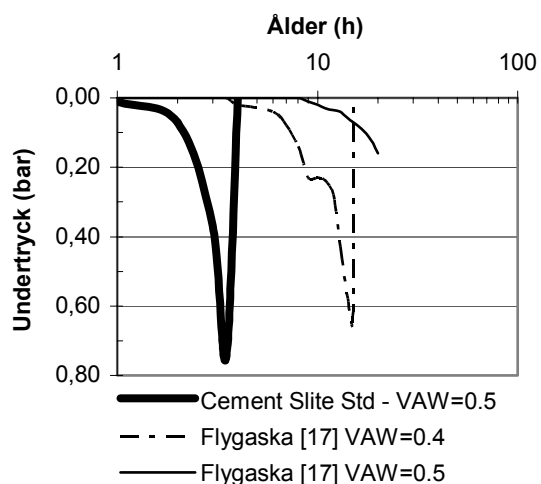


Figur 2.2 – Partikelfördelning hos cement Slite Std, Degerhamncement, flygaska och silikastoft

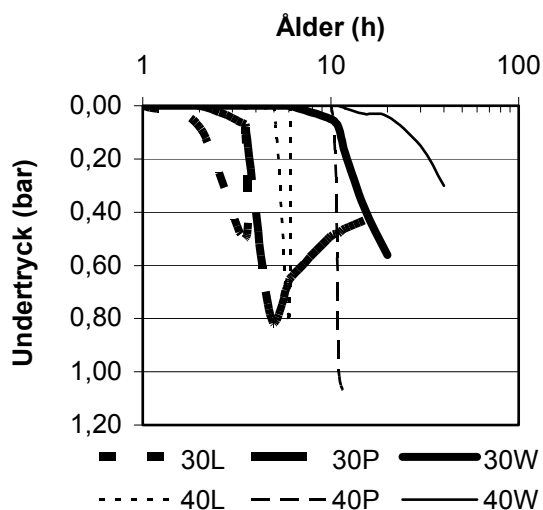
Modern flygaska (Danmark) är betydligt finare än den som användes i [17]. Tabell 2.1 visar medelcorn för cement, glasfiller, flygaska, kalkstensfiller och silikastoft. Dansk flygaska har partikelfördelning mellan partikelfördelning för Slite Std cement och partikelfördelning för Byggcement. Flygaska enligt [17] hade störst medelcorn. Av denna anledning gav flygaska enligt [17] upphov till lägre undertryck och senare uppkomst av undertryck i en blandning med 49% volymandel vatten, VAW, än vad flygaska gav upphov till, Figur 2.3. Före det att hydratationen genom kemisk krympning påverkat undertrycket i den färska blandningen fanns det troligen ett samband mellan meniskens krökningsradie och medelcorn. Figur 2.4 visar undertryck i blandningar med varierande vbt och härdningsbetingelser, L = luft, P = paraffinolja och W = vatten. Mät djup = 40 mm. Vid högre vbt = 0.40 utvecklades undertrycket senare med högre värde som följd och mindre risk för sprickbildning. Högre hållfasthet erhöles vid vbt = 0.40 än vid vbt = 0.30, Figureerna 2.5-2.7 [17].

Tabell 2.1 - Medelcorn för cement, glasfiller, flygaska, kalkstensfiller och silikastoft (μm).

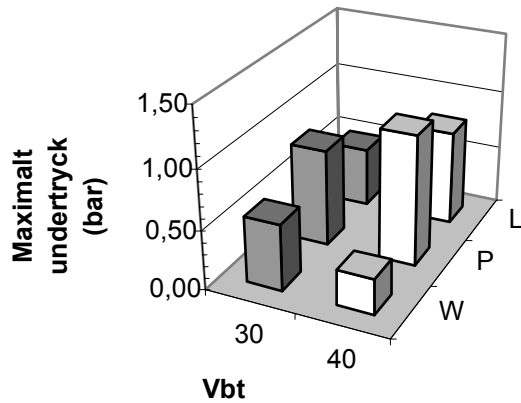
Material	Medelcorn (μm)
Cement, Bygg, CEM II/A-L-42.5 R	0.010
Cement, Degerhamn, CEM I 42.5 BV/SR/LA	0.017
Cement, Slite Std CEM I 52.5 R	0.014
Glassfiller Microfiller 2001	0.044
Flygaska från Danmark	0.010
Flygaska enligt [17]	0.072
Kalkstensfiller Limus 40	0.032
Silikastoft Elkem	<0.001



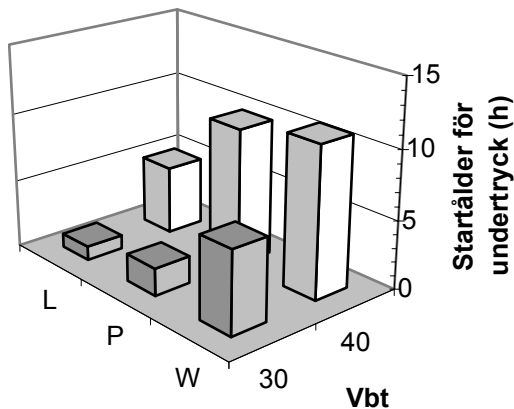
Figur 2.3 - Undertryck i blandningar med varierande volymandel vatten, VAW. Mät djup = 40.



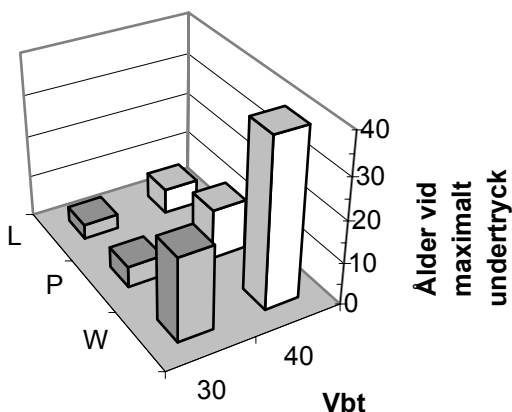
Figur 2.4 - Undertryck i blandningar med varierande vbt och härdningsbetingelser. L = luft, P = paraffinolja, W = vatten. Mät djup = 40 mm.



Figur 2.5 – Maximalt undertryck i blandningar med varierande vbt och härdningsbetingelser. L = luft RF = 50%, P = paraffinolja, W = vatten. Mätdjup = 40 mm.

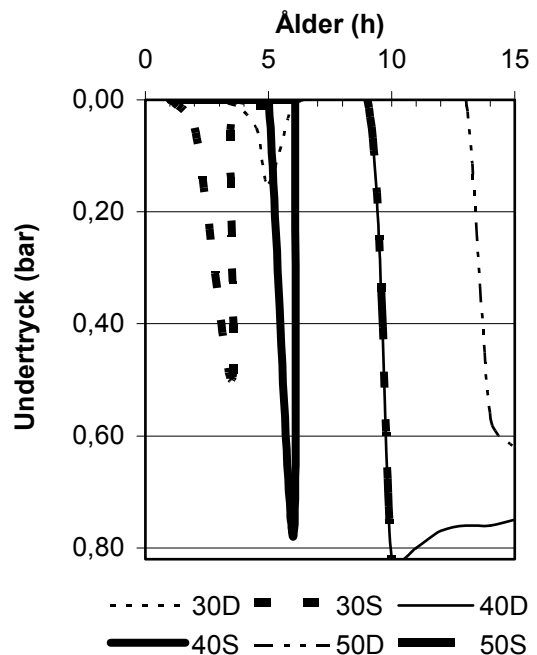


Figur 2.6 – Startålder för undertryck i blandningar med varierande vbt och härdningsbetingelser. L = luft RF = 50%, P = paraffinolja, W = vatten. Mätdjup = 40 mm.

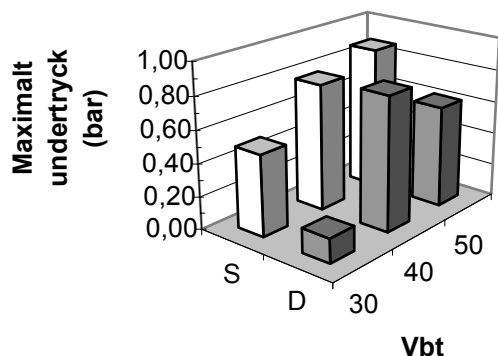


Figur 2.7 –Ålder för maximalt undertryck. L = luft RF = 50%, P = paraffinolja, W = vatten. Mätdjup = 40 mm.

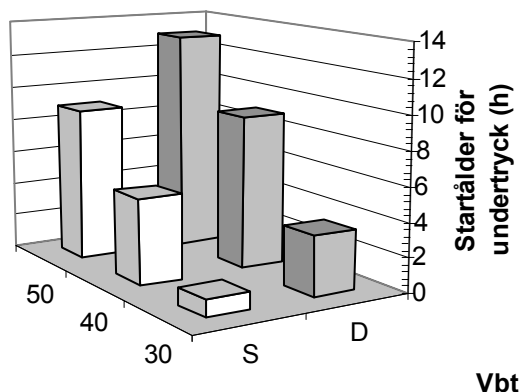
För vbt = 0.40 blev dock undertrycket vid vattenlagring mindre än för vbt = 0.30 i och med att den kemiska krympningen har mindre effekt på porvattentrycket vid högre vbt, Figur 2.5. Figur 2.6 visar klart problemställningen: vid lägre vbt = 0.30 finns ingen draghållfasthet då undertrycket utvecklades och den färska cementpastan gick därför till brott – för vbt = 0.40 fanns viss draghållfasthet i cementpastan varför strukturen ej gick till brott. I och med att strukturen ej gick till brott kunde ett större undertryck utvecklas i uttorkande cementpasta med högre vbt efter en längre tid än för cementpasta med lägre vbt = 0.30, Figur 2.7 [17]. Figur 2.8 visar undertryck som funktion av ålder hos cementpasta av Degerhamncement, D, och cement Slite Std, S, vid varierande vbt, 30% - 50% [17]. Undertrycket utvecklades mycket tidigare hos cement Slite Std än hos Degehamncement vilket var en direkt följd av Slitecementets mindre medelkorn = 0.014 mm mot 0.017 mm för Degerhamncement. Som tidigare utvecklades undertrycket tidigare för lägre vbt = 0.30 än för högre, vbt = 0.50. Maximala undertrycket var större för cementpasta med Slitecement än för cementpasta med Degerhamncement, vilket torde innebära en större sprickrisk om Slitecement används än om Degerhamncement nyttjas, Figureerna 2.9-2.11 [17].



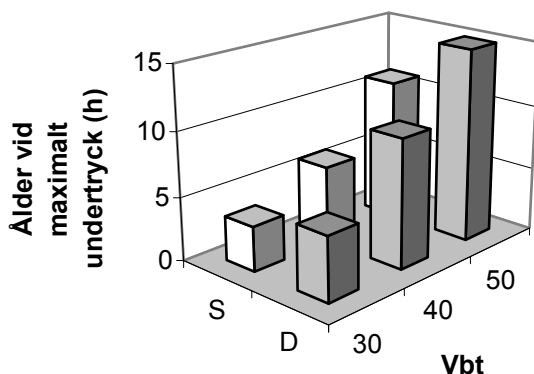
Figur 2.8 - Undertryck som funktion av ålder hos cementpasta av Degerhamncement, D, och cement Slite Std, S, vid olika vbt, 30% - 50%.



Figur 2.9 - Maximala undertrycket för cementpasta med Slitecement, S, och för cementpasta med Degerhamncement, D. 30 = vbt (%). Mät djup = 40 mm.

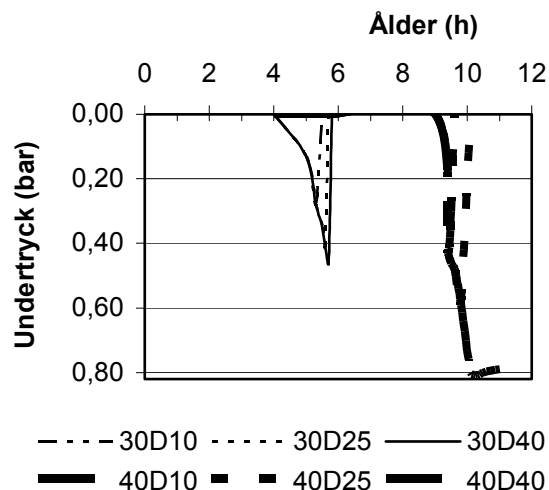


Figur 2.10 – Startålder för undertrycket för cementpasta med Slitecement, S, och för cementpasta med Degerhamncement, D. 30 = vbt (%). Mät djup = 40 mm.

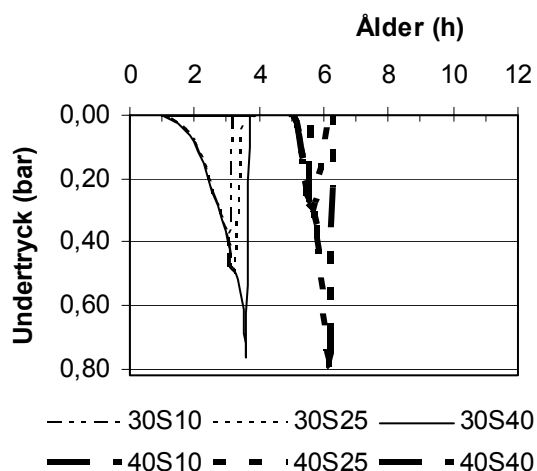


Figur 2.11 –Ålder vid maximalt undertryck för cementpasta med Slitecement, S, och för cementpasta med Degerhamncement, D. 30 = vbt (%). Mät djup = 40 mm.

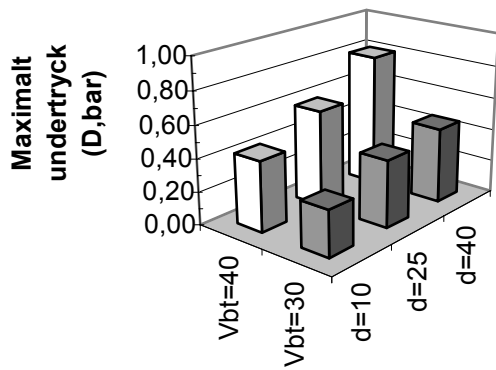
Figurerna 2.12-2.15 visar undertryck på mätdjup varierande mellan 10 och 40 mm i cementpasta med Degerhamncement, vbt = 0.30 och vbt = 0.40. Vid högre vbt = 0.40 blev startåldern för undertryck större än vid vbt = 0.30 eftersom mänden blödningvatten var mindre och ytan på cementpasta därmed började torka tidigare [17]. Skillnaden var avsevärt mellan starttiden för undertryck för cementpasta med vbt = 0.30, 4 h, och cementpasta med vbt = 0.40, 9 h. dessutom ökade undertrycket med mätdjupet under ytan eftersom det tog längre tid för trycket att utjämnas på mätdjupet 40 mm än på mätdjupet 10 mm. På samma sätt som i Figurerna 2.12-2.15 visar i Figurerna 2.16-2.19 undertrycksförhållandena för cementpasta med Slitecement [17].



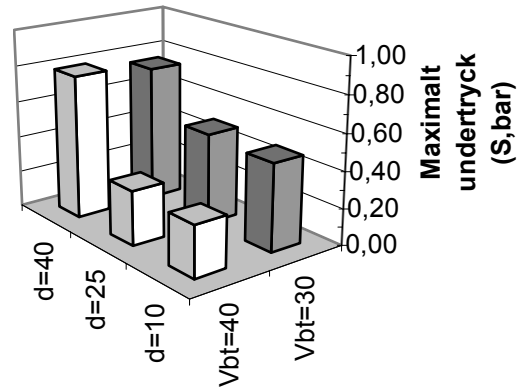
Figurerna 2.12 - Undertryck på mätdjup varierande mellan 10 och 40 mm i cementpasta med Degerhamncement, vbt = 0.30 och vbt = 0.40.



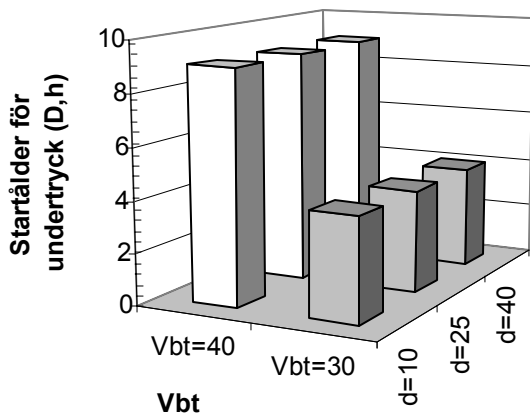
Figurerna 2.16 - Undertryck på mätdjup varierande mellan 10 och 40 mm i cementpasta med Slitecement, vbt = 0.30 och vbt = 0.40.



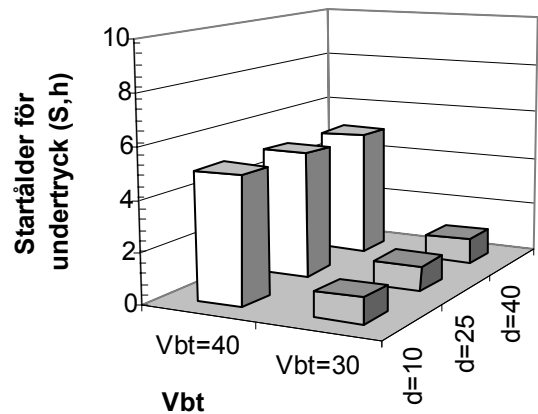
Figurerna 2.13- Maximalt undertryck på mätdjup, d, varierande mellan 10 och 40 mm i cementpasta med Degerhamncement, D, vbt = 0.30 och = 0.40.



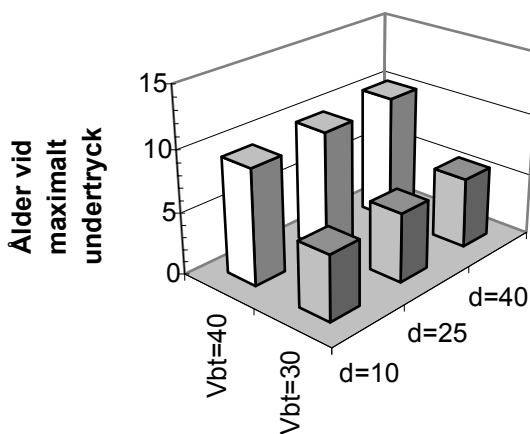
Figurerna 2.17- Maximalt undertryck på mätdjup, d, varierande mellan 10 och 40 mm i cementpasta med Slitecement, S, vbt = 0.30 och = 0.40.



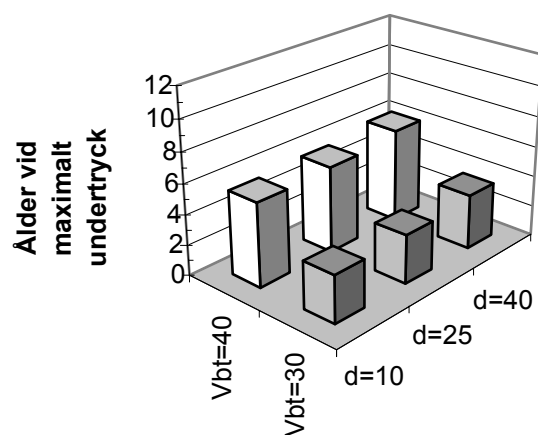
Figurerna 2.14- Startålder för undertryck på mätdjup, d, varierande mellan 10 och 40 mm i cementpasta med Degerhamncement, D, vbt = 0.30, 0.40.



Figurerna 2.18- Startålder för undertryck på mätdjup, d, varierande mellan 10 och 40 mm i cementpasta med Slitecement, S, vbt = 0.30, 0.40.

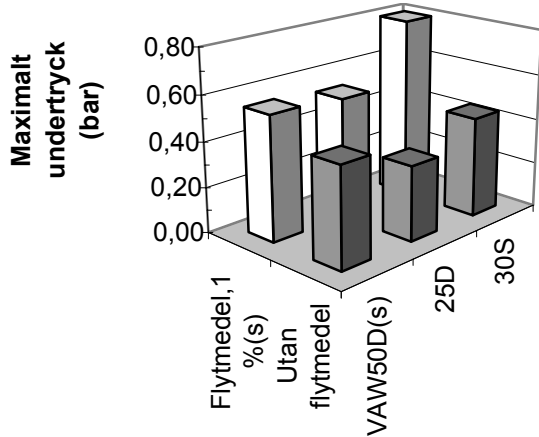


Figurerna 2.15- Ålder vid maximalt undertryck på mätdjup, d, varierande mellan 10 och 40 mm i cementpasta med Degerhamncement, vbt = 0.30 och vbt = 0.40.

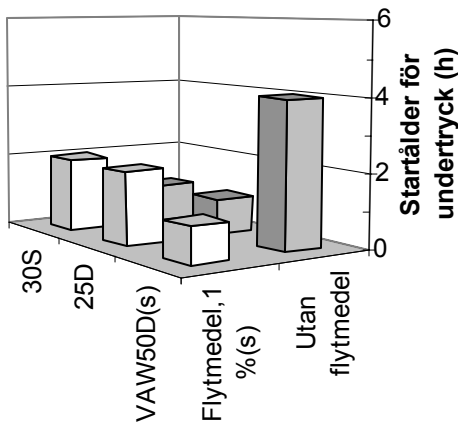


Figurerna 2.19- Ålder vid max undertryck på mätdjup, d, mellan 10 och 40 mm i cementpasta med Slitecement, S, vbt = 0.30 och 0.40.

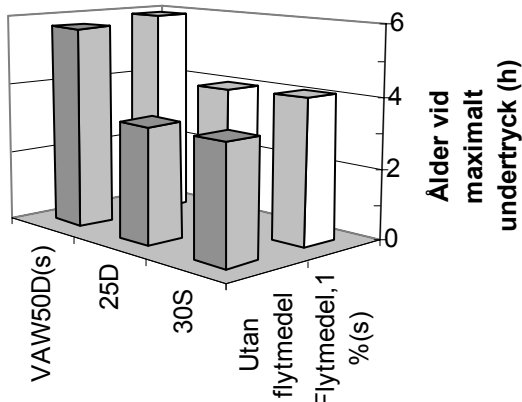
Figurerna 2.20-2.23 visar att flytmedel hade en retarderad effekt på tidpunkten för utveckling av undertryck i cementpasta. Silikastoft i cementpasta gjorde däremot, till följd av sin finhet, att undertryck utvecklades redan efter 1 h även om flytmedel användes att jämföra med åldern 4 h för undertryck i en cementpasta utan silikastoft och flytmedel.



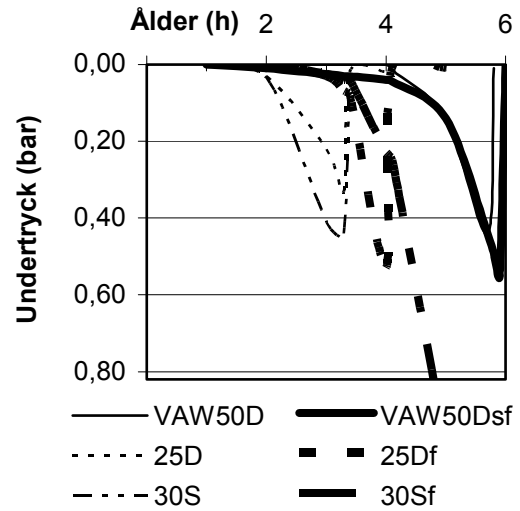
Figur 2.20 – Maximalt undertryck.



Figur 2.21 – Startålder för undertryck.



Figur 2.22 – Ålder vid maximalt undertryck.

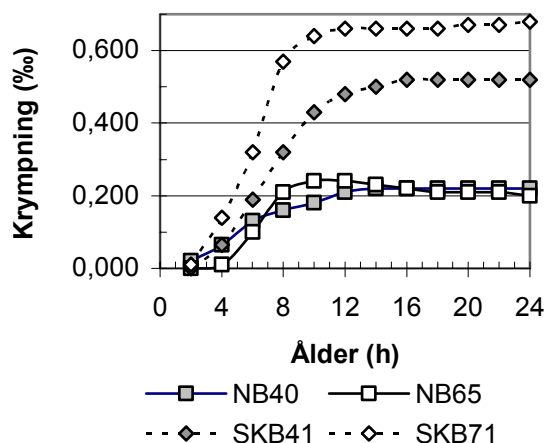


Figur 2.23 – Undertryck i cementpasta med flytmedel. $f = 1\%$ flytmedel, $s = 20\%$ silikastoft. D = Degerhamncement, S = Slite Std cement, VAW50 = 50% vatten (volym), 25 = vbt (%).

Generellt erhöles större undertryck i cementpasta med flytmedel än i cementpasta utan flytmedel eftersom strukturen hann utvecklas mer och kunde uppta större dragpåkänning i en cementpasta med flytmedel än i en cementpasta utan flytmedel före det att uppsprickning skedde. Ålder för uppkomst av undertryck var större för cementpasta med flytmedel, vilket ligger i saken natur: flytmedel skall repellera cementkornen till att börja med för att öka gjutbarheten. Därmed kommer också de menisker som styr den plastiska krympningen att utbildas senare i en cementpasta med flytmedel än i en cementpasta utan flytmedel. Tillsats av 20% silikastoft eliminerade emellertid effekten av flytmedel på startålder för undertryck: medelkorn för silikastoft är försumbart jämfört med cementkornets varför medelkornsstorleken blir så liten att undertryck uppstår så gott som direkt efter blandning då en stor mängd silikastoft används (normalt används endast upp till ca 7.5% silikastoft i betong). Slutligen blev åldern vid maximalt undertryck större i cementpasta med flytmedel än i cementpasta utan flytmedel till följd av flytmedlets retarderande effekt, jfr ovan. Man också konstatera att startålder för undertryck och maximalt undertryck för cementpasta med Degerhamncement och vbt = 0.25 blev lika stort som för cementpasta med Slitecement och vbt = 0.30. Effekt av vbt och medelkornstorlek tog således utan varandra.

2.3 Plastisk krympning i normal betong, NB och i SKB

Tidig krympning hos betong uppmättes, dels för brobetong med Degerhamncement och vbt = 0.40, dels för husbyggnadsbetong med vbt = 0.65-0.70 och Slitecement, Figur 2.24 [18]. Recept för betongerna ges i Tabell 2.2. Omgivnings-RF var 50% samt 20 °C. Tidig krympning var större i SKB än i normal betong, NB, dels (i huvudsak) till följd av en minskad medelkorndiameter hos partiklarna i färsk SKB jämfört medelkorndiameter hos partiklarna i färsk NB, dels (till mindre del) till följd av en minskad ballastandel i SKB jämfört med NB. Mängden cement + filler ökade 50% i SKB jämfört med NB, vilket påverkade plastisk krympning i betongen.



Figur 2.24 – Plastisk krympning i normal betong, NB och självkompakterande, SKB. 40 = vbt.

Tabell 2.2 - Recept för betonger (kg/m³, etc.)

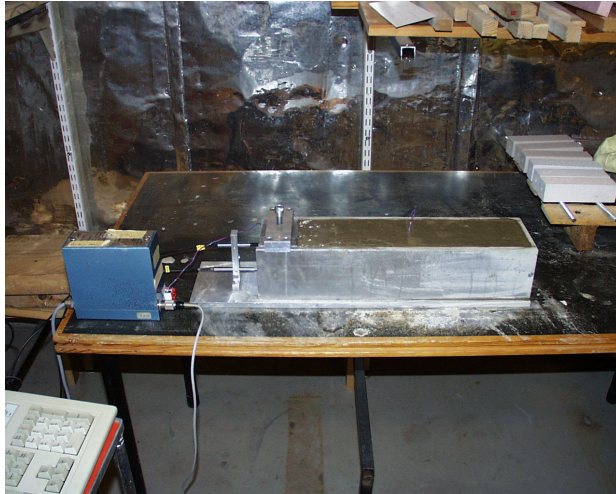
Material, etc.	NB40	NB65	SKB41	SKB71
Makadam 8-16 mm	882	931	678	714
Sand 0-8	882	931	872	940
Degerhamncement	402		368	
Slite Std cement		300		267
Filler			218	248
Cement + filler	402	300	586	515
Vatten	158	194	150	185
Flytmedel	6.3	3	3	6.7
Densitet	2328	2358	2288	2358
Vbt	0.40	0.65	0.41	0.71
Andel ballast	0.81	0.86	0.73	0.76
Lufthalt (%)	5.5		7.5	
Hållfasthet (28d, MPa)	61	41	72	46

2.4 Fältstudier av plattor på mark

I ett nyligen genomfört examensarbete vid LTH studerades olika åtgärder för att förhindra plastisk krympning hos självkompakterande betong. Tidig krympning studerades i laboratorium för ett antal kommersiella betonger med varierande vbt och omgivningsklimat, Figur 2.25, följt av fältstudier på samma betonger [19]. I fält studerades den plastiska krympningen på sex småhusgrunder, s.k. platta på mark, vid tre gjuttillfällen. I arbetet studerades även tillstyvnadstiden. Samtliga betonger baserades på Slite snabbhärdande cement, SH, eller Byggcement, B, med vbt = 0.40, 0.56 och 0.67, Tabell 2.3. Effekt av härdning i luft studerades med varierande hastighet från stillastående till 4 m/s. Effekt av vatten, vattenglas (EverCrete®™) och vax (DIETERMANN Heidelberg Group Europlan 10 W) ingick i försöken [19]. I laboratorium utfördes även ett försök med betong baserad på Byggcement i stället för Slite snabbhärdande, SH, cement, som användes i fält. Resultaten visade att tillstyvnadstiden ökade med minskande vbt troligen till följd av en retarderande effekt hos flytmedlet (Glenium 51), jfr ovan. Plastisk krympning ökade även med minskande vbt i betongen vilket troligen berodde på en mindre mängd blödningsvatten vid lägre vbt, Figur 2.26.

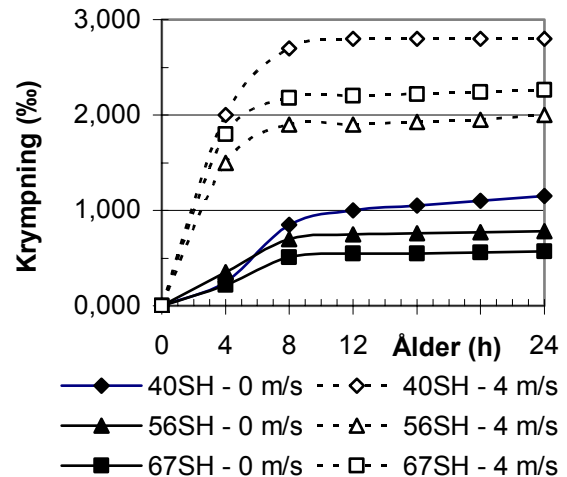
Tabell 2.3 – SKB med Slite snabbhärdande cement, SH, eller Byggcement, B. 40 = vbt [19].

Material, etc.	40SH	56B	55SH	67SH
Makadam 8-16	520	489	489	593
Makadam 4-8	136	140	140	
Krossgrus 0-4	1020	1018	1018	1055
Kalkstensfiller (Limus 15)	25	136	136	203
Cement (Slite SH)	480	360	360	300
Vatten	190	200	200	200
Flytmedel (Glenium 51)	4.3	3.2	3.2	2.4
Densitet	2374	2345	2345	2353
Cement + filler	505	496	496	503
Vbt	0.40	0.56	0.56	0.67
Ballastandel	0.77	0.77	0.77	0.77
Tillstyvnadstid (h)	3.5	5.5	4.5	6.3
Hållfasthet (28d, MPa)	81	49	62	51

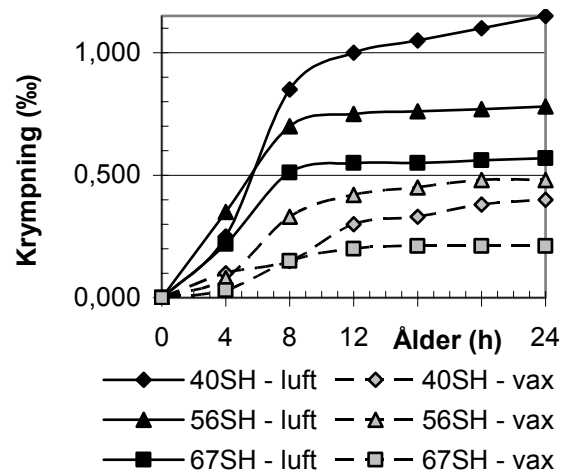


Figur 2.25 – Mätning av krympning med 2 LVDT-givare, placerade 20 och 70 mm från ytan (tre identiska utrustningar användes parallellt).

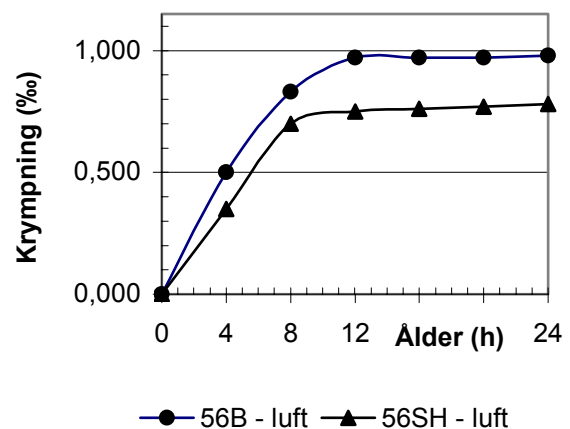
Resultaten från såväl fältförsöken som laboratorieförsöken visade att vattenhärdning var den bästa metod för att förebygga plastisk sprickbildning följt av vaxbeläggning (i stillastående luft kvarstod endast ca 25% av krympningen jämfört med krympningen utan vaxbeläggning), Figur 2.27. I fält visade sig beläggning med vattenglas kunna ge plastisk sprickbildning hos betongen även under regn. Lufthastigheten hade en mycket kraftig inverkan på krympningen storlek (ca 3 ggr större krympning med vindbelastning på ytan än utan) och på mängden uppkomna plastiska krympsprickor [19], Figur 2.26. I verkligheten torde vind råda på de allra flesta arbetsplatser utomhus, åtminstone i Sydsverige. Användning av Byggcement, som hade en längre tillstyvnads-tid än Slite SH, gav upphov till ca 25% större plastisk krympning än den som erhöles i betong med Slite SH cement vid i övrigt exakt lika förhållanden, Figur 2.28 [19]. Den längre tillstyvnadstiden i betong med Byggcement jämfört med betong med Slite SH cement innebar även att strukturen i betongen bildades senare i betong med Byggcement än i betong med Slite SH cement med en långsammare tillväxt av draghållfastheten i betong med Byggcement än i betong med Slite SH cement som följd [19]. Ett sätt att minska risken för plastisk sprickbildning torde således vara att välja rätt typ av cement.



Figur 2.26 - Plastisk krympning för SKB med Slite SH cement och varierande vbt. Lufthastighet 0 m/s eller 4 m/s. 40 = vbt (%).



Figur 2.27 - Plastisk krympning för SKB med Slite SH cement i stillastående luft eller med ytbeläggning av vax. 40 = vbt (%).



Figur 2.28 - Plastisk krympning för SKB med Byggcement, B, och Slite SH cement i stillastående luft. 56 = vbt (%).

2.5 Sprickbildning på grund av plastisk krympning

2.5.1 Allmänt

I ett försök med sprickbildning på grund av plastisk krympning i plattor av brobetong (vbt = 0.40) konstaterades först att plastisk krympning anses bero av följande parametrar [20]:

1. Plattstorlek
2. Förändring av inre tvång i betongen
 - a. förändring av betongsammansättning
 - b. förändring av plattjockleken
 - c. ingjutning av armering
3. Förändring av yttre betingelser
 - a. lufthastighet
 - b. temperatur
 - c. RF
4. Förändring av yttre tvång
 - a. formväggarnas geometri
 - b. friktion mot form
 - c. inre mothåll i formen

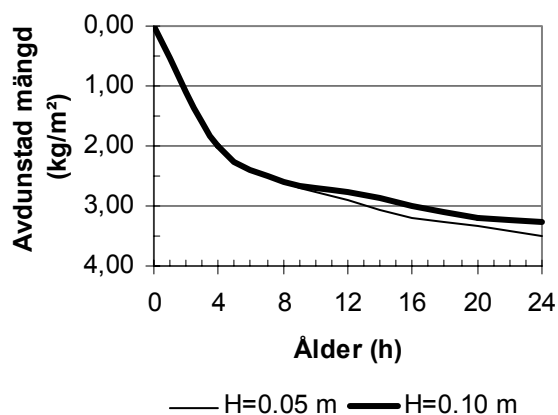
2.5.2 Plattor utan inre tvång

Plattor utfördes 2 x 2 m, dels med tjockleken 0.06 m, dels med tjockleken 0.12 m. Temperatur var 21 °C samt RF = 75%. Lufthastigheten från fläkten, vilket startades 2 h efter gjutning, varierade mellan 0.5 m/s och 2 m/s. Efter 2 h fanns inga sprickor i betongytan men väl efter 4 h i form av ett fint sprickmönster, s.k. "crazing", dock troligen inte plastiska krympsprickor [20]. Anledningen till att plastiska krympsprickor ej uppkom ansågs vara för låg friktion mot underlaget [20]. I verkligheten torde alltför hög RF vid provningstillfället ha varit anledningen till att plastiska krympsprickor av större storlek uteblev. "Crazing" kan dock anses som en typ av plastisk sprickbildning som endast sträcker sig någon mm ned från betongytan.

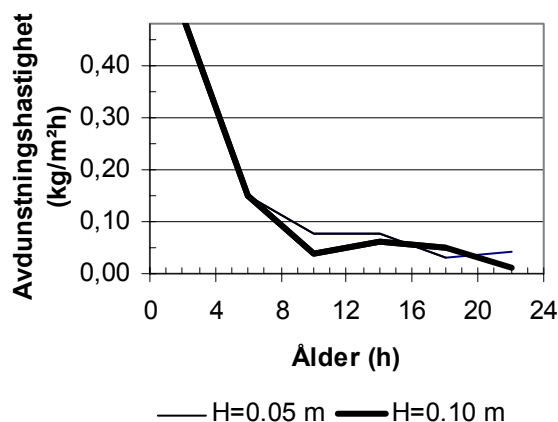
2.5.3 Plattor med inre tvång

Försöken med plattor om 2 x 2 m upprepades, tjocklek 0.06 m och 0.12 m, men med ett så kallat inre tvång bestående av träramar, 0.5 x 0.5 m mitt i den stora plattan. Temperaturen i betongen var lägre än i försöket utan tvång, 17 °C vid gjutning och 27 °C efter 13 h. Lokaltemperaturen var 20 °C och RF = 40% dvs. betydligt lägre än i försöken utan tvång. Resultaten för försök utan och med inre tvång är därför ej direkt jämförbara. Lufthastigheten över plattan varierade mellan 0.3-0.6 m/s i ena kanten av plattan och 2-3 m/s i andra kanten. Störst plastisk spricka i hörnet av det inre

tvånget (träramen) uppkom i den kant av plattan där lufthastigheten var som störst. Första sprickan visade sig efter 2 h. Samtliga plastiska krympsprickor överhuvudtaget hade uppkommit inom 4 h efter gjutning [20]. Ingen skillnad fanns i fråga om sprickförekomst och sprickvidd beroende av betongens tjocklek [20]. Största sprickvidd kan uppskattas till 1 mm utgående från hörnet av träramen. Samtidigt mättes avdunstningen från parallellt gjutna plattor av brobetongen, dels med tjockleken, H = 0,05 m, dels H = 0,10 m. Ytan av betongen utsattes för en likvärdig lufthastighet, dock okänd [20]. Samma omgivningsförhållanden rådde som för de större plattorna, dvs. 20 °C, RF = 40%. Praktiskt taget ingen skillnad kunde konstateras i avdunstning beroende av plattjocklek, Figur 2.29 [20]. Avdunstningshastigheten minskade med åldern för att upphöra vid betongens tillstyvnad. Till att börja med är avdunstning från betong att jämföra med avdunstning från en fri vattenyta till följd av betongens blödningsvatten.

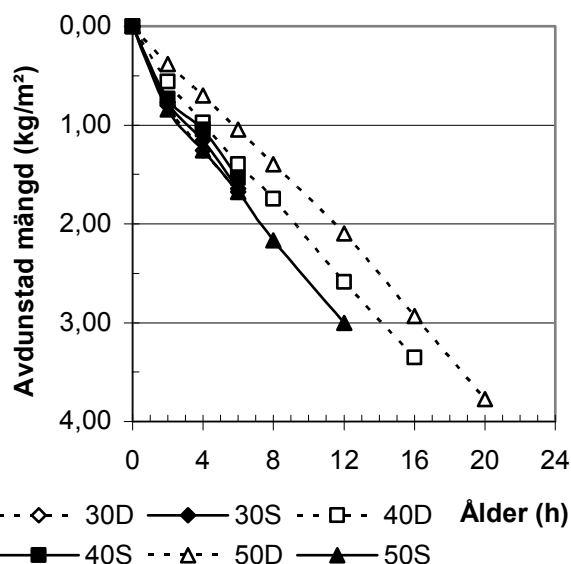


Figur 2.29 - Avdunstning från brobetong beroende av plattjocklek, H. Lufthastighet ca 2 m/s.

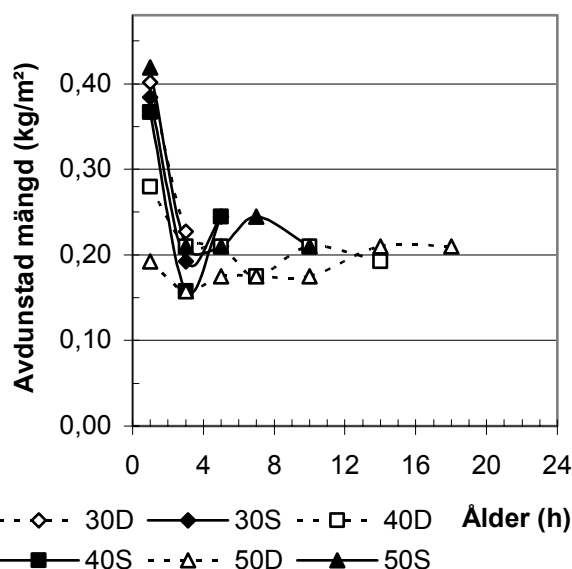


Figur 2.30 - Avdunstningshastighet från brobetong beroende av plattjocklek, H. Lufthastighet ca 2 m/s. RF = 40%.

Figur 2.31 visar avdunstningen från cementpastor med plattjocklek $H = 0,05$ m och varierande vbt. D = Degerhamn cement, S = Slite Std cement, 30 = vbt. Lufthastighet ca 0.5 m/s [17]. Figur 2.32 visar avdunstningshastigheten från cementpastor med plattjocklek $H = 0,05$ m och varierande vbt. D = Degerhamn cement, S = Slite Std cement, 30 = vbt. Lufthastighet ca 0.5 m/s [17].

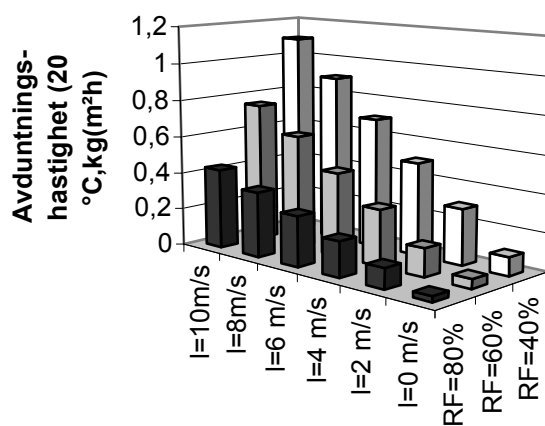


Figur 2.31 - Avdunstning från cementpastor med plattjocklek $H = 0,05$ m och varierande vbt. D = Degerhamn cement, S = Slite Std cement, 30 = vbt. Lufthastighet ca 0.5 m/s [17]. RF=50%.



Figur 2.32 - Avdunstningshastighet från cementpastor med plattjocklek $H = 0,05$ m och varierande vbt. D = Degerhamn cement, S = Slite Std cement, 30 = vbt. Lufthastighet ca 0.5 m/s [17].

Sprickrisken ansågs som mycket stor då avdunstningshastigheten översteg $1 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h})$ men sprickor ansågs kunna uppstå redan vid $0.1 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{h})$ [21]. Vid bägge undersökningarna (utom vid $\text{RF} = 75\%$) förelåg således sprickrisk [17,20]. Figur 2.33 visar avdunstning från en fri vattenyta vid 20°C samt varierande RF och lufthastighet [22].



Figur 2.33 - Avdunstningshastighet från en fri vattenyta vid 20°C och varierande RF och lufthastighet.

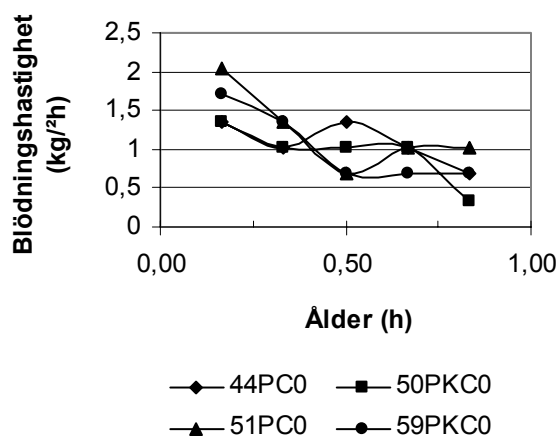
Man kan således konstatera att avdunstningshastigheten ej var tillräckligt stor enligt försök redovisade i avsnitt 2.5.2 även om tvång förelåg. I avsnitt 2.5.3, där $\text{RF} = 80\%$ minskats till $\text{RF} = 40\%$ blev avdunstningshastigheten tillräckligt stor för att plastiska krympsprickor skulle uppstå, troligen även utan det inre tvånget. Ovannämnda försök med inre tvång upprepades med en mindre vindtunnel i syfte att öka lufthastigheten men resultatet blev det motsatta [20].

2.6 Blödningsvatten och avdunstning

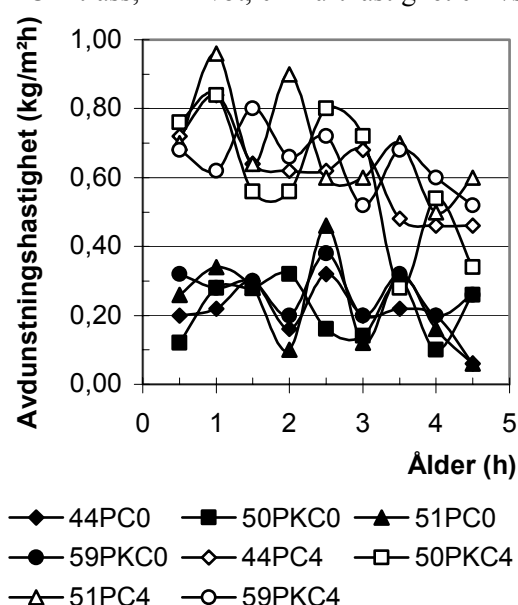
En undersökning av blödningsvatten och avdunstning från betong omfattade två cementtyper, dels ett trasscement, PKC/B 32.5R (spec. yta = 355 m²/kg), dels att Portlandcement, PC 42.5 (spec. yta = 293 m²/kg) [23]. Trass är en form av vulkanisk aska med puzzolaneffekt, att användas i miljövänlig betong i syfte att minska utsläpp av koldioxid i samband med cementtillverkning. Betonger med vbt = 0.44, 0.50 och 0.57 undersöktes [23]. Ökad mängd cement, silikastoft, eller en ökad finhet hos cementet minskade mängden blödningsvatten [23]. Även en ökad mängd C₃A-klinker i cementet föreföll minska mängden blödningsvatten [24]. Alltför stor mängd blödningsvatten försämrar betongens beständighet [25]. En ökad mängd plastiska krympsprickor försämrar också betongens beständighet. Följande omgivningsvillkor ansågs öka risken för plastisk sprickbildning hos betong [23]:

1. hög betongtemperatur
2. hög lufthastighet
3. hög lufttemperatur
4. hög relativ fuktighet hög solinstrålning
5. låg relativ fuktighet,

eftersom avdunstningshastigheten från ytan på betongytan då ökar. Generellt inträffar plastisk sprickbildning då avdunstningshastigheten från betongytan överstiger hastigheten för mängden blödningsvatten som lämnar betongen [23]. Då avdunstningshastigheten uppgår till 1 kg/(m²h) inträffar sannolikt plastisk sprickbildning i normal betong. Avdunstningshastigheten bör därför begränsas till ca 0.5 kg/(m²h) för att plastisk sprickbildning skall undvikas i normal betong [26]. Figur 2.34 visar blödningshastigheten hos betong vid 28 °C, RF = 50%. Beteckningar: PC = Portlandcement, PKC = trass, 44 = vbt, 0 = lufthastighet 0 m/s. Det kan konstateras att blödningshastigheten minskade med ca 15% med ökande spec. yta hos cementet, ca 17%. Då vbt ökade med ca 0,08 eller ca 16%, ökade också blödningshastigheten, ca 10%. Figur 2.35 visar avdunstningshastigheten vid varierande vbt, lufthast och cementtyp - 28 °C, RF = 50% [23]. Det kan konstateras att 4 m/s lufthastighet i stort sett ökade avdunstningshastigheten av betongen med faktor 3 och därmed också uttorkningshastigheten, Tabell 2.4.



Figur 2.34 – Blödningshastighet hos betong vid 28 °C, RF = 50%. PC = Portlandcement, PKC = trass, 44 = vbt, 0 = lufthastighet 0 m/s.



Figur 2.35 - Avdunstningshastighet vid varierande vbt, lufthast och cementtyp - 28 °C, RF = 50%. PC = Portlandcement, PKC = trass, 44 = vbt, 4 = lufthastighet 4 m/s.

Resultaten enligt Figur 2.35 och Tabell 2.4 visar en lägre avdunstningshastighet än vad som visas i Figur 2.33, där ca 6 ggr större avdunstningshastighet ges vid 4 m/s än vid 0 m/s [22]. Då vbt för betongen ökades med ca 0.08, ökade även avdunstningshastigheten, i stort sett i förhållande till vbt-ökningen, ca 15%, dock något mer för stillastående luft än för luft med hastigheten 4 m/s, Tabell 2.5. Slutligen var blödningshastigheten vid 28 °C, RF = 50%, fram till 1 h ålder, Figur 2.34, större än avdunstningshastigheten, Figur 2.35, varför risken för plastisk sprickbildning var liten fram åldern 1 h [23].

Tabell 2.4 - Avdunstningshastighet vid 4 m/s lufthastighet i förhållande till avdunstningshastighet vid stillastående luft - 28 °C, RF = 50%.

Betong	44PC	44PKC	51PC	51PKC	
Faktor	2.94	2.76	2.95	2.38	2.75

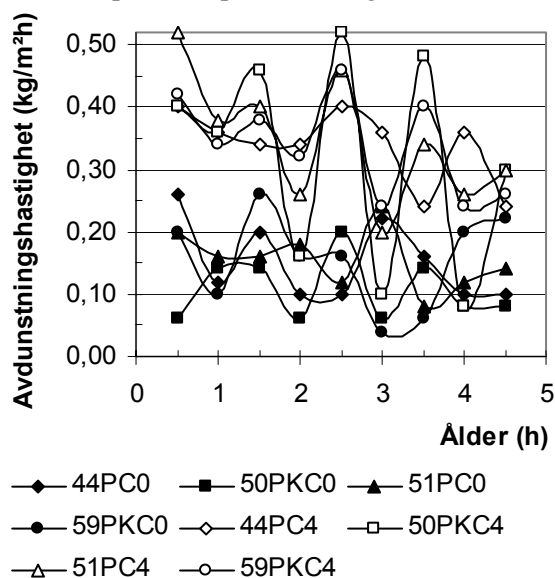
Beteckningar: M.v. = medelvärde, PC = Portlandcement, PKC = trassbetong, 44 = vbt.

Tabell 2.5 - Avdunstningshastighet vid vbt = 0.51 i förhållande till avdunstningshastighet vid vbt = 0.44 - 28 °C, RF = 50%.

Betong	PC0	PKC0	PC4	PKC
Faktor för vbt	1.12	1.26	1.07	1.14

M.v. = medelvärde, PC = Portlandcement, PKC = trass, 4 = lufthastighet 4 m/s.

Figur 2.36 visar avdunstningshastigheten vid varierande vbt, lufthast och cementtyp - 28 °C, RF = 80% [23]. Avdunstningshastigheten vid 4 m/s lufthastighet ökade med faktor 2.5, Tabell 2.6. Resultaten enligt Figur 2.36 och Tabell 2.4 är mindre än vad som visas i Figur 2.33, där ca 6 ggr större avdunstningshastighet ges vid 4 m/s än vid 0 m/s [22]. Då vbt för betongen ökades med ca 0.08, ökade även avdunstningshastigheten, i stort sett i förhållande till vbt-ökningen, ca 15%, dock något mer för stillastående luft än för luft med hastigheten 4 m/s, Tabell 2.5. Slutligen kan det konstateras att blödningshastigheten fram till 1 h ålder vid 28 °C och RF = 80%, Figur 2.34, var större än avdunstningshastigheten, Figur 2.35, varför risken för plastisk sprickbildning var liten [23].



Figur 2.36 - Avdunstningshastighet vid varierande vbt, lufthast och cementtyp - 28 °C, RF = 80%. PC = Portlandcement, PKC = trass, 44 = vbt, 4 = lufthastighet 4 m/s.

Tabell 2.6 - Avdunstningshastighet vid 4 m/s lufthastighet i förhållande till avdunstningshastighet vid stillastående luft - 28 °C, RF = 80%.

Betong	44PC	44PKC	51PC	51PKC	
Vindfaktor	2.24	2.98	2.23	2.19	2.43

Beteckningar: M.v. = medelvärde, PC = Portlandcement, PKC = trassbetong, 44 = vbt.

Tabell 2.7 - Avdunstningshastighet vid vbt = 0.51 i förhållande till avdunstningshastighet vid vbt = 0.44 - 28 °C, RF = 50%.

Betong	PC0	PKC0	PC4	PKC4	
Faktor för vbt	1.03	1.46	1.03	1.07	1.15

Beteckningar: M.v. = medelvärde, PC = Portlandcement, PKC = trass, 4 = lufthastighet 4 m/s.

Tabell 2.8 – Avdunstningshastighet utan vind.

Betong	44PC0	50PKC0	51PC0	59PKC0
RF = 50%, 28 °C:				
[22]	0.15	0.15	0.15	0.15
[23]	0.21	0.22	0.23	0.27
RF = 80%, 28 °C:				
[22]	0.05	0.05	0.05	0.05
[23]	0.15	0.11	0.16	0.16

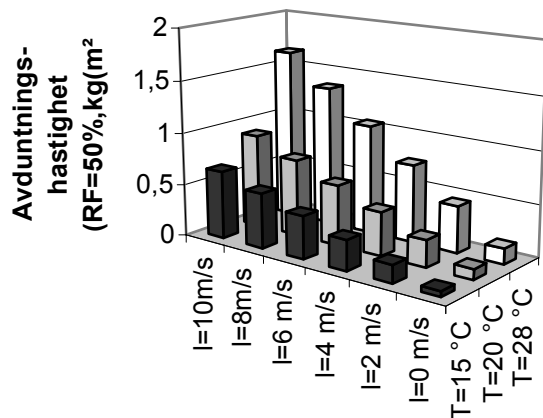
Tabell 2.9 – Avdunstningshastighet vid ca 2 m/s.

Betong	C=0.05 m	C=0.1 m	H=0.05 m	H=0.1 m
RF = 40%. 20 °C:				
[20]	0.15	0.17	0.15	0.14
[22]	0.30	0.30	0.30	0.30

Tabell 2.10 – Avdunstningshastighet, vind: 4 m/s.

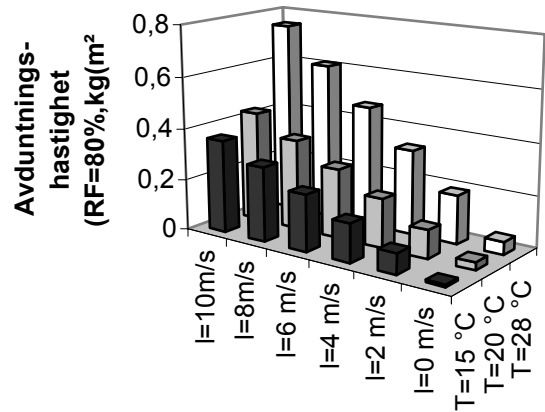
Betong	44PC0	50PKC0	51PC0	59PKC0
RF = 50%, 28 °C:				
[22]	0.75	0.75	0.75	0.75
[23]	0.61	0.60	0.69	0.64
RF = 80%, 28 °C:				
[22]	0.33	0.33	0.33	0.20
[23]	0.34	0.32	0.35	0.34

Generellt sett för samtliga undersökta prover var avdunstningshastigheten ca 33% större vid RF = 50% än vid RF = 80%, övriga parametrar konstanta. En jämförelse gjordes även mellan resultat från tidigare försök, Figurerna 2.37-2.38 och Tabellerna 2.8-2.10 [20,22-23]

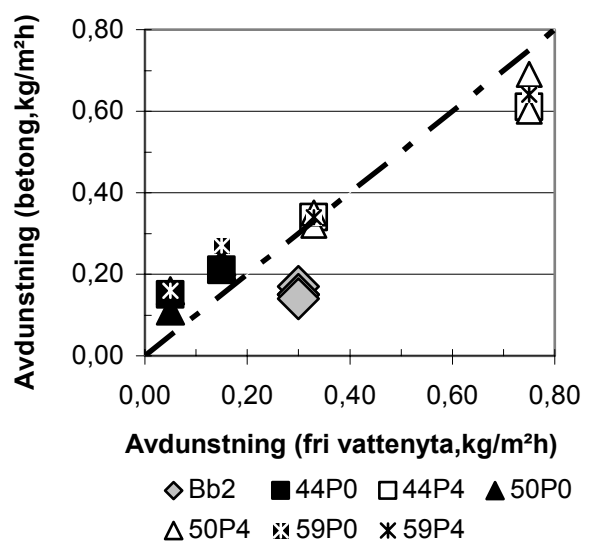


Figur 2.37 - Avdunstningshastighet från vattenyta vid RF = 50%, varierande lufthastighet och temperatur.

Figur 2.39 visar att uppmätt avdunstningshastighet vid en lufthastighet av 4 m/s i allmänhet stämde väl överens med avdunstning från en fri avdunstning från en vattenyta [22,23]. Vid vindstilla mättes däremot betydligt större avdunstning från betongytan än från en fri vattenyta [22,23], vilket kan bero på att vissa luft-rörelser trots allt förekommit. Slutligen, för brobetong mättes bara hälften så stor avdunstning från betongytan som från den fria vattenytan [20,23], vilket endera kan bero på att brobetongen förmodligen har ett lågt vbt eller på att lufthastigheten varit betydligt mindre än 2 m/s. Avdunstningshastigheten och blödningshastigheten för avdunstat vatten bör således mätas parallellt med deformationerna i samband med plastisk krympning i syfte att förklara dessas natur.



Figur 2.38 - Avdunstningshastighet från vattenyta vid RF = 80%, varierande lufthastighet och temperatur.



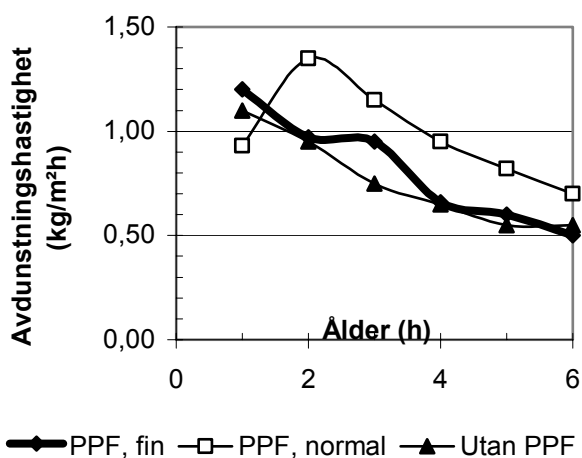
Figur 2.39 – Avdunstningshastighet från fri betongyta vs avdunstningshastighet från en fri vattenyta.

2.7 Fiber och plastiska krympsprickor

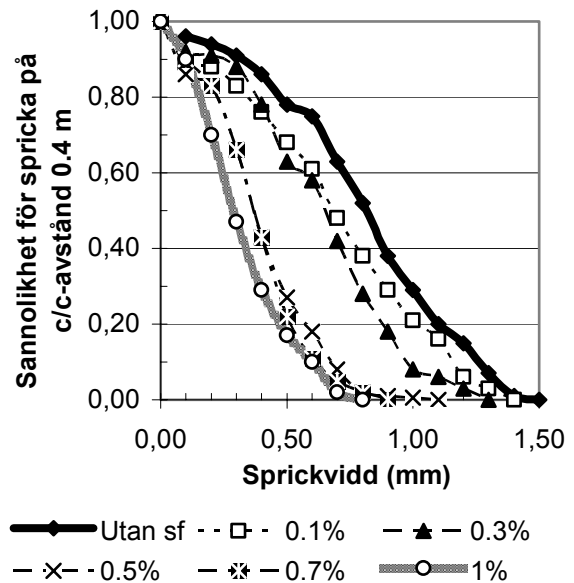
Vid en studie i syfte att minska plastisk krympning hos betong användes fiberinblandning, dels av polypropylen, dels av stål [27]. Som provningsmetod användes en nyutvecklad ASTM-standard test [28]. Figur 2.40 visar avdunstningshastigheten för betong med och utan 0.2% polypropylenfibrer, PPF, dels finfördelade, dels normala [27]. Det föreföll som om avdunstningshastigheten blev större med PPF än utan vilket torde ge en större risk för sprickbildning för betong med PPF än utan PPF. Resultaten styrks också av praktiska erfarenheter från golv med PPF [29]. Orsaken sägs vara att fina kanaler utbildas parallellt med PPF vilket skulle öka ned kapillära vattentransporten från betongen till dess yta [23]. Figur 2.41 visar sannolikheten för sprickbildning enligt [28] i samband med försök med varierande inblandning av stålfibrer, sf [27]. Det krävs ca 0.5% stålfibrer i syfte att begränsa sprickvidden till ca 0.4 mm [27]. Även med 1% stålfibrer erhålls med sannolikt en spricka som är 0,3 mm vid vilket visar att stålfibrer ej heller är någon rationell lösning för att eliminera problemet med plastiska krympsprickor. Under förutsättning av lufthastighet 4 m/s beräknades sannolikheten, S, för plastisk sprickvidd, d (mm), på c/c avståndet 0.4 m vid mängden stålfibrer, sf (%), se även Appendix):

$$S = (1.4 \cdot sf - 0.132) \cdot d^2 - (1.84 \cdot sf + 0.641) \cdot d - 0.669 \cdot sf^3 + 0.995 \cdot sf^2 - 0.345 \cdot sf + 1.08 \quad (2.2)$$

- d betecknar plastisk sprickvidd (mm)
 sf betecknar stålfibrer (%)
 S betecknar sannolikheten för spricka (-)



Figur 2.40 - Avdunstningshastigheten för betong med och utan 0.2% PPF, finfördelade/normala.



Figur 2.41 - Sannolikhet för sprickbildning på c/c avstånd 0.4 m enligt försök med varierande halt av stålfiber, sf.

2.8 Beräkning av uttorkning med TorkaS

2.8.1 Allmänt

I syfte att beräkna den tidiga uttorkningen hos provade betonger användes beräkningsprogrammet TorkaS1.0. Tidig uttorkning har ingen betydelse för betongens plastiska krympning eftersom denna sker före det att tillstyvnad skett och före det att någon uttorkning av betongen ägt rum. Betongen är fortfarande fuktmatad (RF = 100%) under det plastiska krympskedet. Uttorkning av betongen har emellertid stor betydelse för betongens tidiga krympning, från betongens ålder vid tillstyvnad fram till, i detta fall 3 dygns ålder. I synnerhet för en byggfuktfrö betong med vbt < 0.38 sker en tidig autogen krympning i sin tur beroende av en kemiska krympning då vatten binds till cement med påföljande självuttorkning. Eftersom TorkaS1.0 nyttjades för beräkningar inom projektet var viktig att först göra en genomgång av erfarenheter av beräkningsprogram.

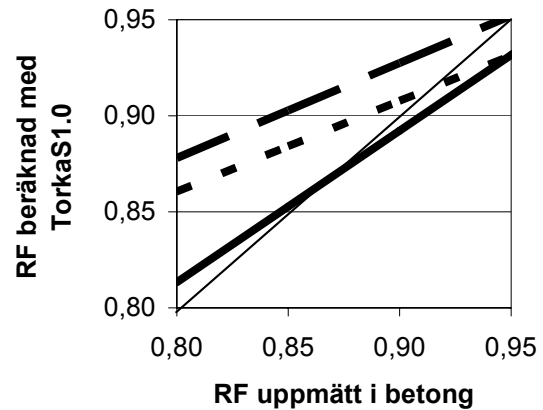
2.8.2 Uttorkning i luft, vatten eller försegling

I syfte att välja korrekt sammansättning av betongen samt kontrollera dess uttorkning användes beräkningsprogrammet TorkaS1.0. En experimentell jämförelse utfördes med ett beräkningsprogram TorkaS1.0. Programmet baseras på försök med betong med Slite Stc-cement. För ändamålet tillverkades betongprover i stålcyllindrar med diametern 100 mm och längden 200 mm. Efter 1 dygn skedde avform-

ning varefter en aluminiumfolie applicerades runt om provet. Ändytorna var fria från aluminiumfolie. Hälften av proverna härdades direkt med ena änden i 10 mm vatten och andra änden i luft, RF = 60%, hälften av proverna förvarades direkt i RF = 60% (dubbelsidig uttorkning). Även förseglade prover togs med i beräkningen varvid omgivnings-RF passades till den RF som erhölls med TorkaS1.0. Rutiner enligt ovan användes dvs. vid 1 månads ålder togs prover ut och RF-mättes enligt Nordtest 490 [32-36]. Figur 2.42 visar enligt TorkaS1.0 beräknad RF som funktion av experimentellt uppmätt RF. Vid självuttorkning överensstämde enligt TorkaS1.0 beräknad RF (tunn linje) och uppmätt RF väl. Vid såväl vattenlagring som lufthårdning överskattades RF kraftigt med TorkaS1.0 jämfört med de värden som uppmättes vid försöket, speciellt för betong med lågt vct [35]. Vid vct = 0.38 överskattades TorkaS1.0 RF med ca 5-6%. Vid högre vct = 0.80 underskattades RF något för förseglad härdning [36]. Uttorkning av betonger med vct = 0.46 och vbt = 0.50 studerades i laboratorium. Recept och hållfasthet för betongerna ges i tabell 2.11 [37]. Uttorkningen skedde dubbelsidigt på en 150 mm tjock provkropp med diametern 275 mm, gjuten i plaströr. Torkklimatet var 22 °C och RF = 60%. RF uppmättes med Humi-Guard RF-givare. Efter 2 mån. uttorkning uppmättes ungefär 4% lägre RF på 20% av betongtjockleken än vad som beräknades med TorkaS1.0, Figurerna 2.43-2.44 [37]. Mitt i provkroppen uppmättes ca 2% lägre RF än vad som beräknades med TorkaS1.0.

Tabell 2.11 - Recept och hållfasthet för betonger (kg/m³).

Material	Vct=0.46	Vbt=0.50
Ballast 8-16	760	758
Ballast 4-8	324	328
Sand 0-4	713	712
Flygaska		59
Silikastoft		15
Flytmedel	1.9	1.8
Luftporbildare	1.4	1.9
Snabbcement	307	221
Vatten	139	136
Densitet	2245	2231
Hållfasthet, 28 dygn (MPa)	32	36



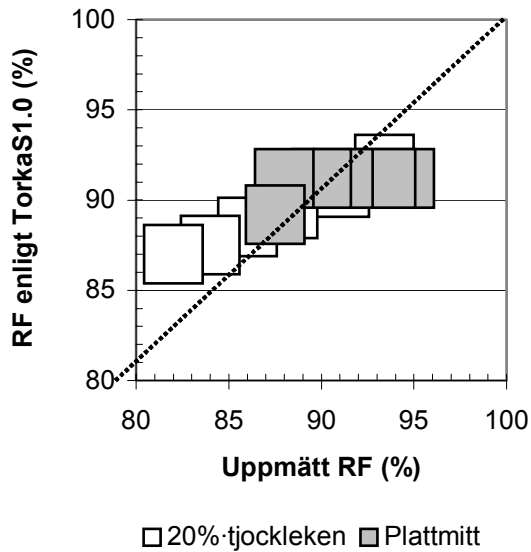
— Förseglad — Luft — Vatten

Figur 2.42 - RF enligt TorkaS1.0 versus uppmätt RF. RF enligt TorkaS1.0 (tunn linje) stämde med uppmätt RF vid självuttorkning

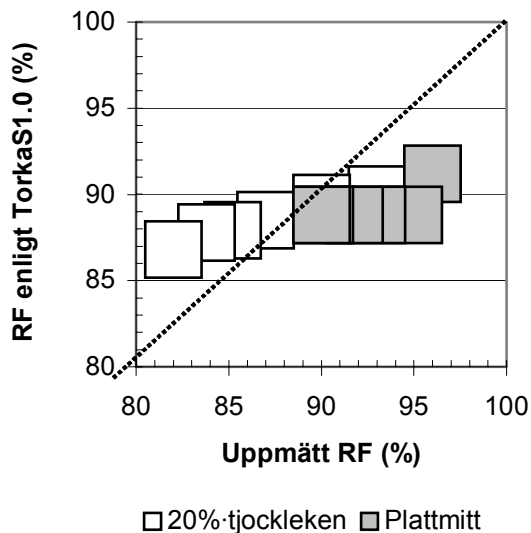
Detta betyder att med TorkaS1.0 beräknad uttorkningstid var mer än dubbelt så lång som den som uppmättes i verkligheten. Det var i huvudsak C₃A-innehållet i cementet samt innehållet av C₄AF (1/10-del mycket som C₃A) som betingade uttorkningen av betongen [38]. För Slite Std cement som TorkaS1.0 baseras på ingår 8% av klinkerkomponenten C₃A och 7% C₄AF. I dansk snabbcement ingår 7% av klinkerkomponenten C₃A och 11% C₄AF, dvs. en liten skillnad mellan cementen i detta avseende. Resultaten i Figurerna 2.43-2.44 överensstämmer väl med de i Figur 2.42, dvs. TorkaS1.0 överskattade RF vid RF < 90% uppmätt i verkligheten samt underskattade RF vid RF > 90% uppmätt i verkligheten [37]. I själva verket var underskattningen upp till 5% vid RF = 95% samt överskattningen ca 5% vid RF = 85%. Vid RF = 90% gav TorkaS1.0 korrekt värde [37].

2.8.3 Uttorkning i fält

Figur 2.45 visar en jämförelse mellan en beräkning av RF i betong enligt TorkaS1.0 och RF enligt ett mycket stort antal fuktmätningar i laboratorium utförda på prover uthuggna på en byggsplats [14]. Även i detta fall överskattades RF kraftigt med TorkaS1.0, ca 6% vid betong med vct = 0.38 - 0.44. Figur 2.45 visar att TorkaS1.0 överskattade RF med ca 6% vid uppmätt RF = 85%. I TorkaS1.0 utförs beräkningen med transportkoefficienter som troligen ej tar tillräcklig hänsyn till den fördröjande effekt vid uppfuktning som erhålls till följd av självuttorkning [39,40].



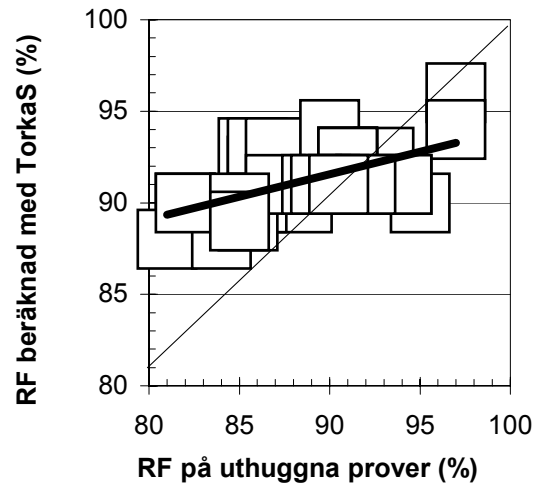
Figur 2.43 - RF i betong med vct = 0.46 beräknad med TorKaS1.0 versus uppmätt RF.



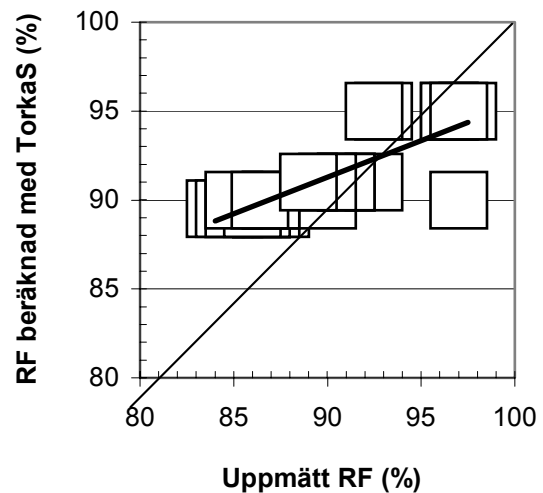
Figur 2.44 - RF i betong med vbt = 0.50 beräknad med TorKaS1.0 versus uppmätt RF.

2.8.4 Självtorkning

RF-resultat från självtorkning jämfördes med en beräkning med TorKaS1.0 [39,40] enligt Nordtest 490 [36]. Vid beräkningen med TorKaS1.0 sattes yttre RF lika med inre RF (självtorkning). Slutresultat erhöles efter ca 3 passningsberäkningar. Figur 2.46 visar med TorKaS1.0 beräknad RF som funktion av uppmätt RF på uthuggna betongprover vid självtorkning [40]. Beräknade RF-värden vid självtorkning överensstämde ej med uppmätta värden på prover från försök [14], Figur 2.46. Vid RF = 90% överensstämde beräknad RF med uppmätt men vid RF = 85% överskattade TorKaS1.0 RF-värdena kraftigt (upp till 5%). För RF > 90% underskattades RF, Figur 2.46.



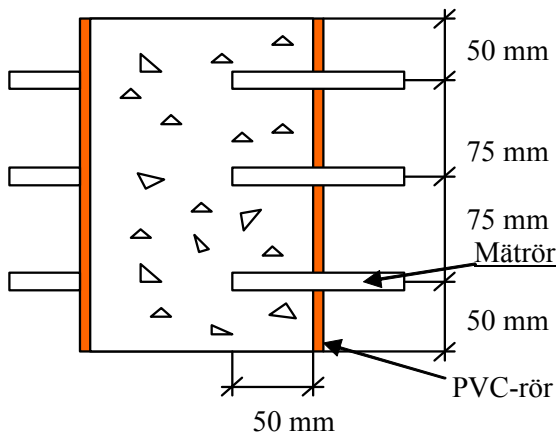
Figur 2.45 - RF i betong enligt TorKaS1.0 och RF på prover uthuggna på en byggsplats.00



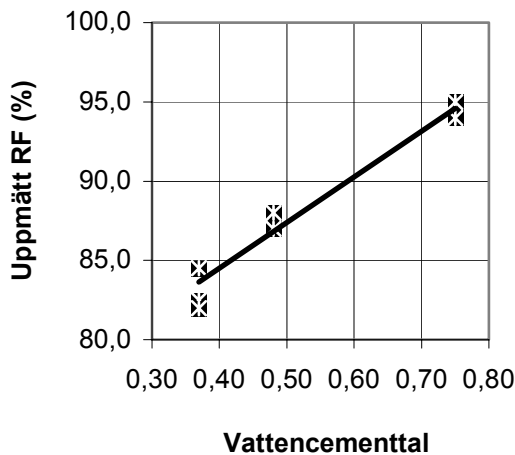
Figur 2.46 - Med TorKaS1.0 beräknade RF vid självtorkning versus uppmätta värden.

2.8.5 Inverkan av temperatur

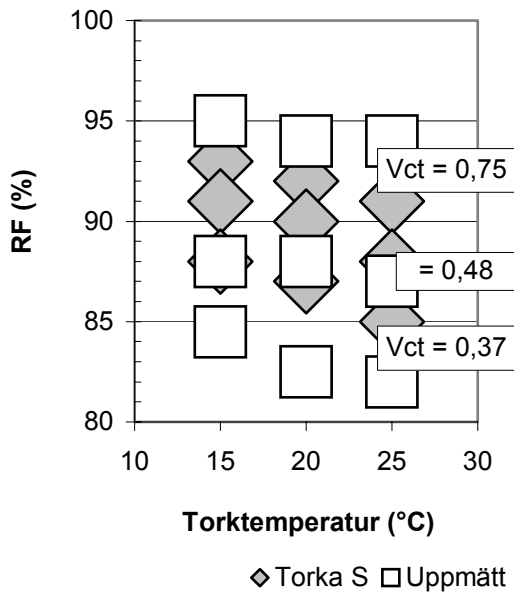
Uttorkningen mättes för tre olika betonger med vattencementtal, vct = 0.37, vct = 0.48 och vct = 0.75 [41,42]. Tre provkroppar tillverkades av vardera betong, höjd 250 mm, diameter 150 mm. Proverna förseglades fram till 4 dygns ålder. Därefter härdades provkropparna en månad vid 15 °C, 20 °C resp. 25 °C. RF i omgivning var 60% för samtliga fall. Fuktmätningarna utfördes vid 20 °C med Vaisala fuktgivare HMP 44. Uttorkningen var dubbelsidig [41,42], Figur 2.47. De uppmätta värdena jämfördes med beräknade värden från TorKaS1.0. Resultaten visade bland annat att temperaturen hade mycket liten inverkan på uttorkningen i intervallet 15 °C -25 °C, Figur 2.49 [39,40]. RF blev ca 1.5% högre vid 15 °C än vid 25 °C.



Figur 2.47 - Mätning med dubbla Vaisala HMP 44 sensorer på varje mätdjup.

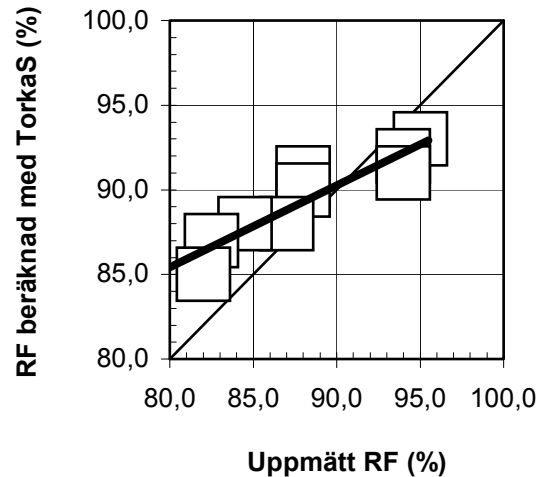


Figur 2.48 - Uppmätt RF i betong versus vct. Övre värden: 15 °C; nedre 25 °C.



Figur 2.49 - Temperatur mellan 15 -25 °C på uttorkningsförloppet. RF blev i genomsnitt ca 1.5% högre vid 15 °C än vid 25 °C.

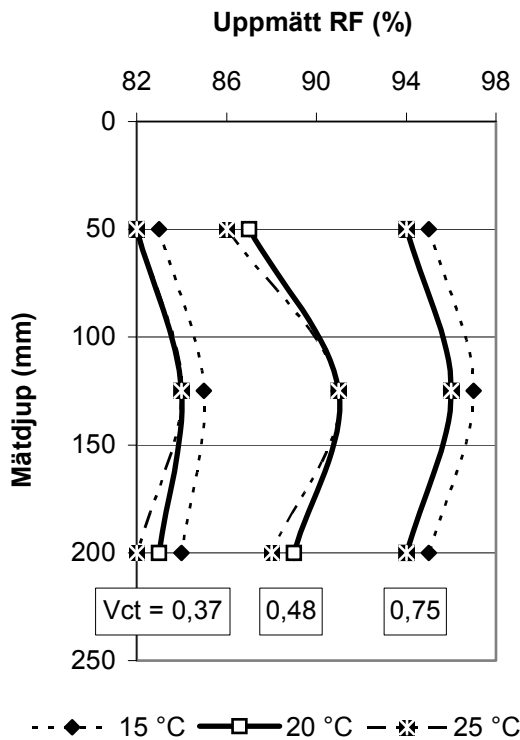
Beräkning med TorkaS1.0 visade en dubbelt så stor inverkan av temperaturen jämfört med vad RF-mätningarna gav vid handen, ca 3% högre RF vid 15 °C än vid 25 °C, Figur 2.49. Jämförelsen mellan mätningarna och beräkningsresultaten från TorkaS1.0 visar att det finns en signifikant skillnad mellan beräkningarna och mätningarna, ca 4% högre RF i snitt med TorkaS1.0 jämfört med uppmätta värden [41,42]. För RF < 90% visar TorkaS1.0 högre värden än vad som uppmättes. För RF > 90% visar TorkaS1.0 värden som var lägre än vad som uppmättes. Detta tyder på att TorkaS1.0 visade värden som var ogynnsamma för val av betong med vct < 0,50, Figur 2.50. Å andra sidan föreföll TorkaS1.0 ge värden på osäkra sidan för betong med vct = 0,75 [41,42]. Orsaken till skillnaden mellan uppmätta RF-värden och beräknade kan vara att TorkaS1.0 ej tog hänsyn till betongens självtorkning vid låga vct [43,44]. I Figur 2.51 visas fuktprofiler för provkropparna vid 20 °C mättemperatur. I provkroppens mitt var inverkan av ändringar i yttre temperatur särskilt stor, ca 1.5% lägre RF efter härdning vid 25 °C jämfört med härdning vid 15 °C, således en liten skillnad. En ökning av temperaturen med 10 °C från 15 °C till 25 °C motsvarade en minskning av vct med 0,05, jfr Figureerna 2.51 och 2.52. I bägge fallen erhöles en skillnad på 1.5% RF mellan 15 °C och 25 °C härdningstemperatur.



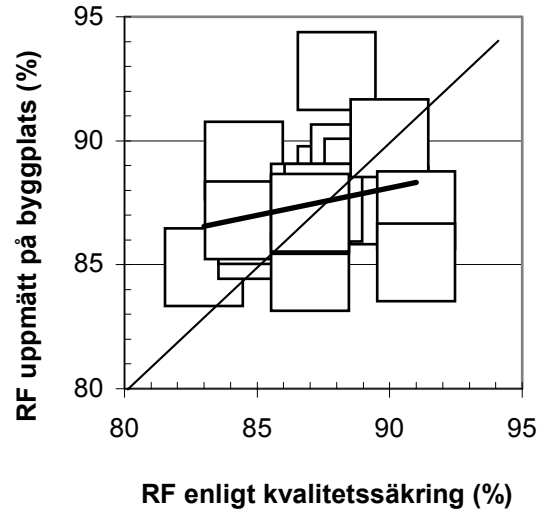
Figur 2.50 - För höga värden med TorkaS1.0 för betong med vct < 0,50. För låga värden med TorkaS1.0 för vct = 0,75.

2.8.6 Kvalitetssäkring med TorkaS

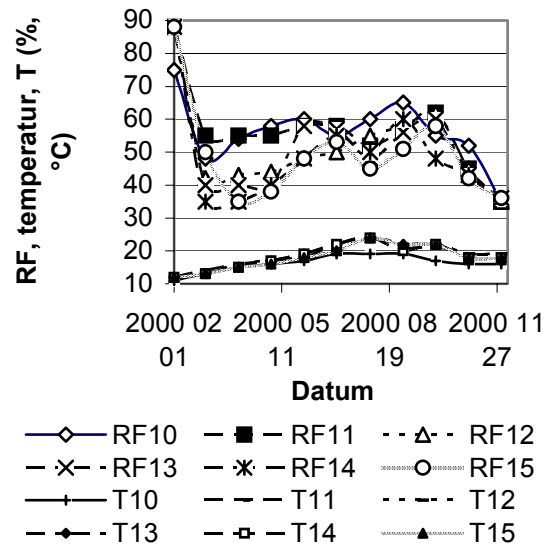
Vid ett nytt Barn- och Ungdomssjukhus, Lund, utfördes en kvalitetssäkring av byggplatsens fuktmätningar [45]. Kvalitetssäkringen innebar att byggplatsens fuktmätningar kontrolleras genom fuktmätning i laboratorium av fukten i på byggplatsen utbilade bitar av betong [45]. Figur 2.52 visar att RF enligt byggplatsens mätning och RF uppmätt inom kvalitetssäkringen överensstämde väl [45]. I genomsnitt var RF inom platsmätningarna 0.3% lägre än vad som uppmättes inom kvalitetssäkringen. Standardavvikelsen var 2.7% och variationskoefficienten 9%. På byggplatsen utfördes även mätningar av temperatur och RF i luften, klimatuppgifter som var ingångsdata för en beräkning med i TorkaS1.0, Figur 2.53 [45]. Där-efter utfördes beräkningar med TorkaS1.0, Figur 2.54 [45]. Med en genomsnittlig uttorkningshastighet av 0.05 %/dygn gav TorkaS1.0 50 dygns länge uttorkningstid än den som förekom i verkligheten, såväl enligt byggplatsens mätningar som enligt kvalitetssäkringen av RF [45]. I synnerhet vid låg RF (vct = 0.38) över-skattades RF kraftigt med TorkaS1.0, upp till 11% vid vct = 0.38. TorkaS1.0 gav ett syste-matiskt fel på + 2.5%, dvs. TorkaS1.0 över-skattade RF med 2.5% [45]. Detta innebar att TorkaS1.0 spådde längre uttorkningstid än vad fallet blev i verkligheten.



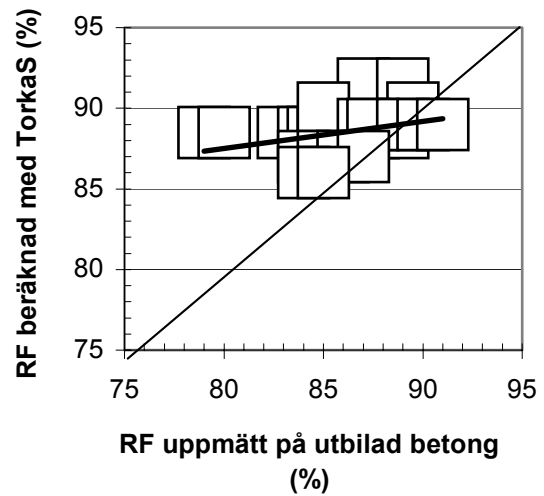
Figur 2.51 - Fuktprofil för betong (20 °C).



Figur 2.52 - RF på byggplatsen versus RF inom kvalitetssäkringen.



Figur 2.53 - Temperatur, T, och RF [43]. T10 = temperatur på våningsplan 10.



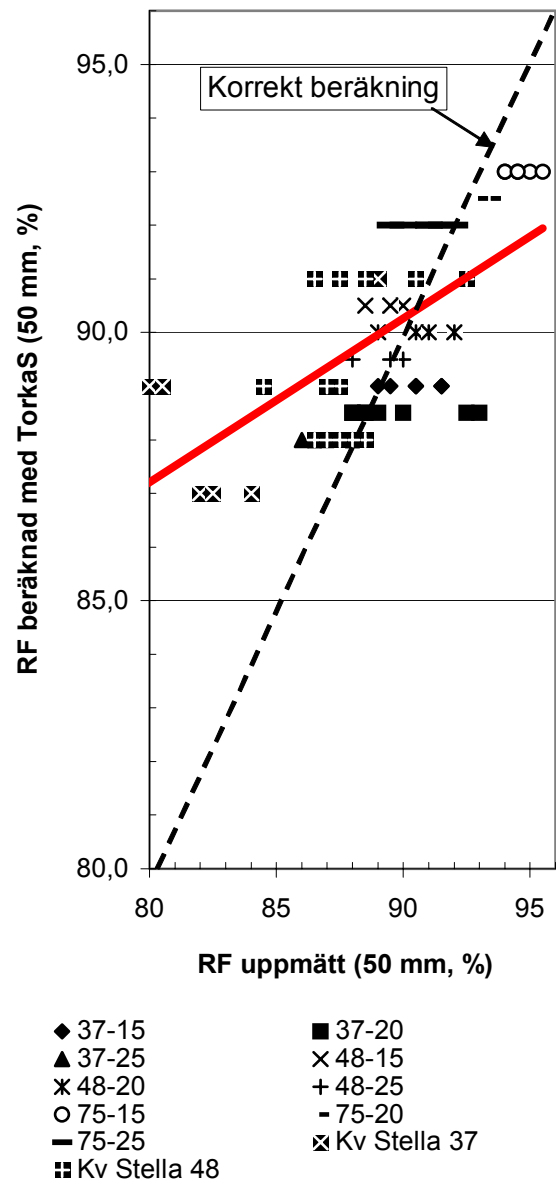
Figur 2.54 - RF med TorkaS1.0 versus uppmätt RF (ca 2.5% lägre än beräknad RF) [43].

2.8.7 Golvsystem på betong

Inom projektets ram jämfördes uttorkningen hos de studerade betongerna med resultat av beräkningar enligt TorkaS1.0. Följande mätdata nyttjades [46]:

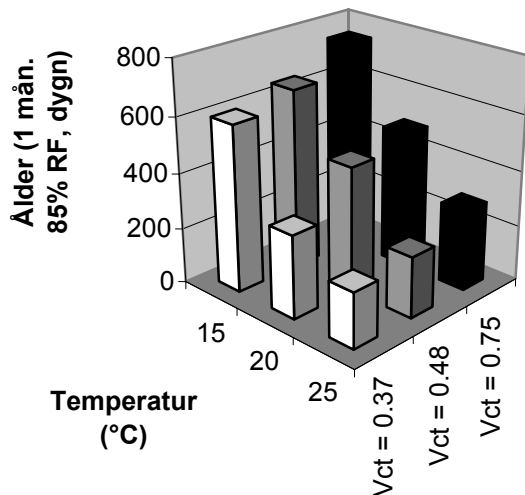
1. Från fält (Kv Stella, Svedala) med ålder varierande från 80 till 240 dygn
2. Från laboratorium från 30 till 240 dygn ålder.

Figur 2.55 visar med TorkaS1.0 beräknad RF som funktion av uppmätt RF. Samma tendens erhöles som tidigare: TorkaS1.0 överskattade RF vid låga vct samt underskattade RF (något) vid vct = 0.75. Genomsnittligt uppgick överskattningen med TorkaS1.0 till ca 1%, men var stor, speciellt i fält, vid låga vct. Orsakerna till de stora skillnaderna mellan uttorkningstider beräknade med TorkaS1.0 och de som uppmäts i fält kan förmodligen spåras i försöksupställningen. TorkaS1.0 bygger i huvudsak på fukt-mätning av betong i rörformade prover med tjockleken 0.18 m (dubbelsidig uttorkning). Numera utförs betongbjälklag ca 0.25 m tjocka med hänsyn till ljudkrav. En annan anledning till att TorkaS1.0 beräknar för lång uttorkningstid skulle kunna vara den rörformiga provkroppen. Rörret hindrar tredimensionell uttorkning med längre uttorkningstider som följd [47]. Å andra sidan skulle rörformigheten ha inverkat lika mycket på uttorkningstider för betong med lågt vct som högt, vilket ej är fallet då en beräkning sker med TorkaS1.0. Det var enbart vid låga vct som TorkaS1.0 kraftigt överskattar RF och därmed uttorkningstiden. I verkligheten är bjälklaget tjockare än de provkroppar som ligger till grund för en beräkning med TorkaS1.0. Därmed blir värmeutvecklingen kraftigare i fält direkt efter gjutning än vad den blir hos de prover som legat till grund för en beräkning TorkaS1.0. Betong med lågt vct erhåller således en kraftigare självuttorkning i fält än vad som beräknas av TorkaS1.0. I och med att de bjälklag som studerats i fält var tjockare än den provkroppstjocklek som låg till grund för en beräkning med TorkaS1.0 blir också inverkan av yttre fukt mindre i fält. Fukten tränger in som mest 2-3 cm i betong med lågt vct. Detta innebar att ca 15 % av provtjockleken påverkades enligt en beräkning med TorkaS1.0 baserad på 0.18 m betongprover. I fält inverkade yttre fukt endast på 10% av bjälklagets tjocklek. Betong med lågt vct (byggfuktfri betong) torkar även i vatten [48].

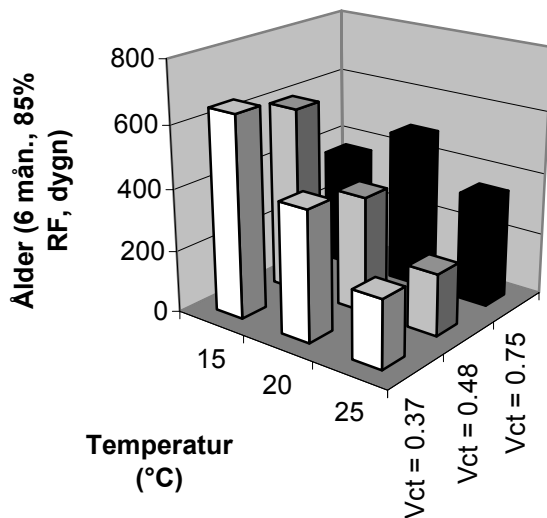


Figur 2.55 - Med TorkaS1.0 beräknad RF som funktion av uppmätt. 37-15 betecknar betong med vct = 0.37 torkad vid 15 °C. Alla RF avsåg 20 °C.

Provkroppstjockleken och värmeutvecklingen bör då få en större inverkan vid en beräkning med TorkaS1.0 än vad som nu är fallet, Figurer 2.50-2.51. I Figurer 2.56-2.57 utförs beräkningar av ålder vid RF = 85% för 0.25 m betong. Betongen göts på kvarsittande form av betong samt härdades med 1 mån. eller 6 mån. regn vid temperaturer varierande mellan 15 °C till 25 °C och RF = 60%. Vid 15 °C visar TorkaS1.0 kortare uttorkningstider för betong med vct = 0.75 än för betong med vct = 0.37, vilket ej observerats i verkligheten. Figur 2.58 visar med TorkaS1.0 beräknad uttorkningstid versus i projektet uppmätt uttorkningstid [46].



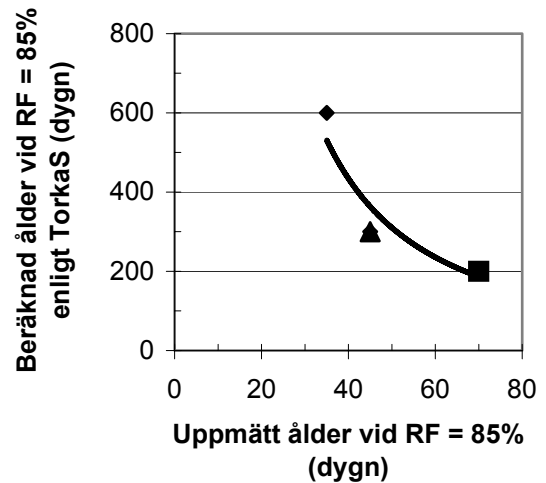
Figur 2.56 - Ålder vid RF = 85% beräknad med TorkaS1.0 (0.25 m betong med kvarsittande betongform, 1 mån regn, luft, RF = 60%)



Figur 2.57 - Ålder vid RF = 85% beräknad med TorkaS1.0 (0.25 m betong med kvarsittande betongform, 6 mån regn, luft, RF = 60%).

2.8.8 Inverkan av lufthastighet och regn

En uppgraderad version av beräkningsprogrammet användes, TorkaS2.0, där Byggcement använts som underlag för beräkningarna i stället för Slite Std cement. TorkaS2.0 nyttjades i ett nyligen avslutat examensarbete [49,50]. Uppgraderingen innebar att effekten av självuttorkning minskades något i programmet TorkaS2.0 eftersom cementet hade erhållit en 10%-ig ökning av inblandad mängd kalkstensfyller (kalkstensfyller självuttorkar verterligt ej) [10].



◆ Ung betong ■ Mogen betong ▲ Kv Stella

Figur 2.58 - Med TorkaS1.0 beräknad ålder vid RF = 85% versus uppmätt ålder vid RF = 85%.

Ändringen av TorkaS2.0 innebar att mindre hänsyn togs till betongens självuttorkning än i tidigare versionen TorkaS1.0. Examensarbetet innefattade ett mycket stort antal mätningar, 100 st., av RF med tillhörande beräkningar av RF enligt TorkaS2.0 upp till ca 100 dygn ålder [50]. Examensarbetet var således jämförbart med ovan redovisade kvalitetssäkring. Betong med tjockleken 120 mm, ensidigt uttorkad, studerades (motsvara ett dubbelsidigt uttorkat bjälklag med tjockleken 240 mm) [50]. Fem betonger med vct varierande mellan 0.35 och 0.70 ingick [46]. Figurerna 2.59-2.62 visar med TorkaS2.0 beräknad RF som funktion av uppmätt RF oberoende av betongens ålder [50], endera med ≤ 1 veckas regn följt av lufttorkning med RF = 60% eller härdat direkt med lufttorkning med RF = 60%. Med TorkaS2.0 beräknad RF var avsevärt högre än uppmätt RF utom för RF > 93% där det omvända förhållandet gällde. Följande ekvationer beräknades för uppmätt RF_{mätt} och med TorkaS2.0 beräknad RF_{ber}:

Regn ≤ 1 vecka plus RF = 60%:

$$RF_{mätt} = (RF_{ber} + 20,8 \cdot vct - 74,6) / (0,265 \cdot vct + 0,184) \quad (2.3)$$

Lufthärdning direkt vid RF = 60%:

$$RF_{mätt} = (RF_{ber} + 9,55 \cdot vct - 67) / (0,122 \cdot vct + 0,284) \quad (2.4)$$

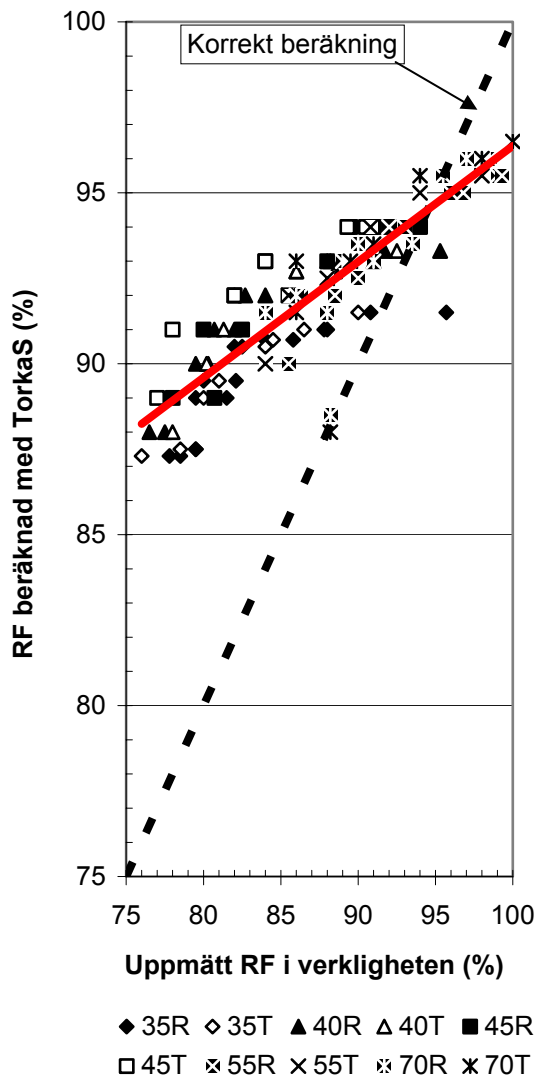
Följande medelvärde erhöles med TorkaS:

$$RF_{TorkaS} = 0.339 \cdot RF_{uppmätt} + 62.5 \quad \{R^2=0.83\} \quad (2.5)$$

I Tabel 2.12 ges medelvärde av RF beräknad med TorkaS [50]. Resultaten stämde väl överens med alla tidigare mätningar [30-37, 39-47].

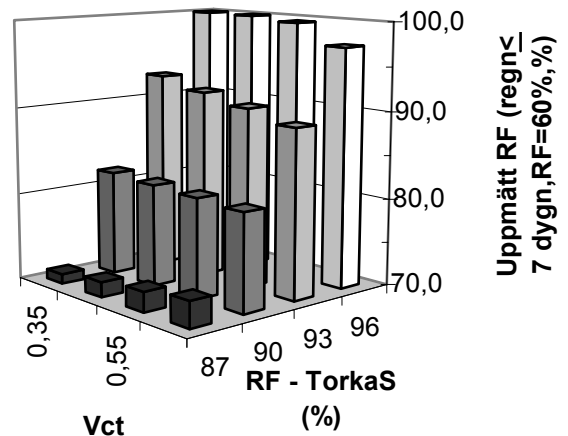
Tabell 2.12 - RF med TorkaS och uppmätt RF.

Uppmätt RF (%)	75	80	85	90	95
RF med TorkaS2.0 (%)	88	90	91	93	95
Fel med TorkaS (%)	13	10	6	3	0

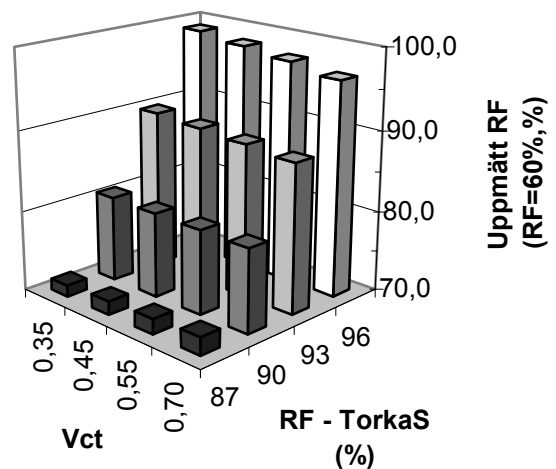


Figur 2.59 – RF beräknad med TorkaS2.0 som funktion av uppmätt RF. R ≤ 1 veckas regn följt av lufttorkning med RF = 60%, T = torrt klimat, RF = 60%, 35 = vbt (%).

På samma sätt beräknades kvot mellan uppmätt RF och RF beräknad med TorkaS2.0, 100 st. mätningar och beräkningar versus ålder, Figurerna 2.62-2.63. I detta fall var inverkan av regn försumbart. Beräkningsfelen, som var stora, då TorkaS2.0 användes, ökade med ökande ålder samt med ökande hållfasthet hos betongen (felen ökade med minskande vct).



Figur 2.60 – Uppmätt RF som funktion av RF beräknad med TorkaS2.0 och vct. Härdning: ≤ 1 veckas regn följt av lufttorkning med RF = 60%.

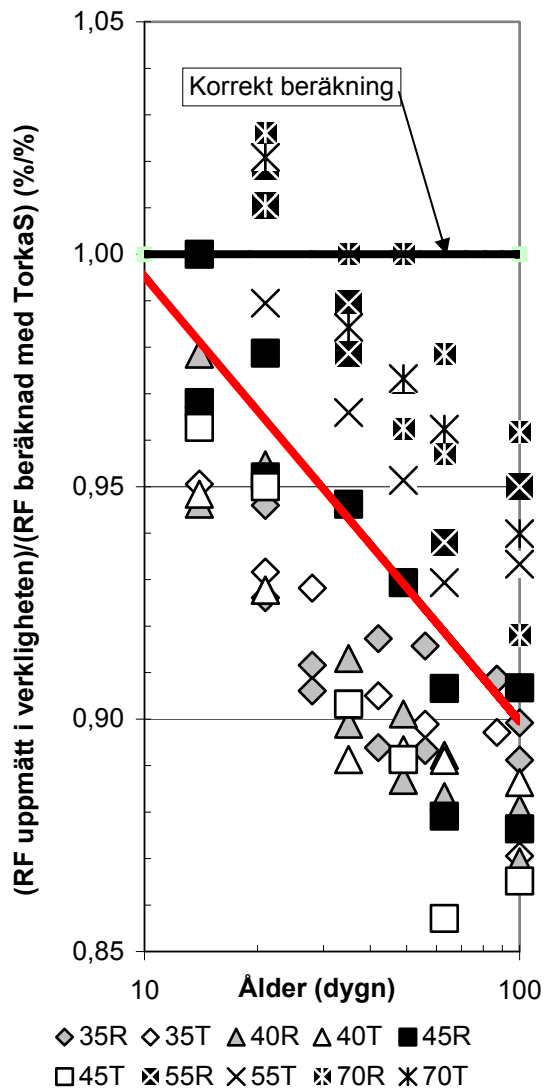


Figur 2.61 – Uppmätt RF som funktion av RF beräknad med TorkaS2.0 och vct. Luft, RF = 60%.

Följande ekvation beräknades för uppmätt RF_{mätt} och med TorkaS2.0 beräknad RF_{ber}:

Regn ≤ 1 vecka plus RF = 60%:

$$RF_{mätt}/RF_{ber} = (-0,243 \cdot vct^2 + 0,234 \cdot vct - 0,0092) \cdot \ln(t) - 0,886 \cdot vct^2 + 1,08 \cdot vct + 0,796 \quad (2.6)$$

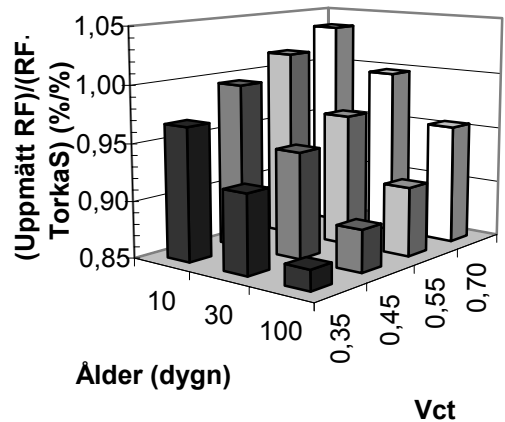


Figur 2.62 – Kvot mellan verklig uppmätt RF och RF beräknad med TorkaS2.0 versus ålder. R ≤ 1 veckas regn följt av lufttorkning med RF = 60%, T = luft, RF = 60%, 35 = vbt (%). (%).

Följande ekvation beräknades för kvoten mellan RF uppmätt i verkligheten och RF beräknad med TorkaS2.0 (%/%):

$$RF_{\text{uppmätt}} = 26.2 \cdot (1 - \ln(RF_{\text{TorkaS}})) \{R^2 = 0.51\} \quad (2.7)$$

I Tabell 2.13 ges fel med TorkaS2.0 beräknad RF vid varierande ålder hos betongen [50]. Felet var dock större för betong med lågt vct ≤ 0.40 än för betong med vct > 0.40, vilket kan verka hämmande på bruk av byggfuktfrif betong. En beräkning med TorkaS ger rent för lång uttorkningstid även om byggfuktfrif betong användes varför andra lösningar ofta väljs helt i onödan då i verkligheten byggfuktfrif betong skulle ha uppfyllt kraven på snabb uttorkning väl. Något som helt bortses i TorkaS2.0 är



Figur 2.63 – Kvot mellan uppmätt RF och RF beräknad med TorkaS2.0 versus ålder och vct.

Tabell 2.13 - Fel med TorkaS2.0 beräknad RF vid varierande ålder hos betongen [50].

Ålder (dygn)	10	30	60	100
(RF uppmätt i verkligheten)/(RF beräknad med TorkaS2.0) (%/%)	1.00	0.95	0.92	0.90

inverkan av lufthastighet på uttorkningen. Avdunstningen från en betongytan ökar med lufthastigheten över ytan. I verkligheten blåser det alltid mer eller mindre på en byggplats före det att inklädnad sker och uppvärmningen sätts igång. Vindstilla under denna del av byggprocessen torde vara ovanligt. Även efter det att inklädnad skett och uppvärmningen satts igång kan viss lufthastighet förekomma i form av fläktning. Ovan i Figurerna 2.33 samt 2.37-2.38 har visats att lufthastigheten har stor betydelse för den tidiga uttorkningen av betongen [22]. Så torde även vara fallet för ung betong, att lufthastigheten över betongen påverkar uttorkningstiden. Detta vara ett annat skäl till att TorkaS2.0 visar för höga RF-värden, att lufthastigheten ej alls beaktas. Sammantaget kunde TorkaS2.0 ej användas som beräkningsmetod i projektet utan mätning fick ske av RF.

3. MATERIAL OCH METODER

3.1 Delmaterial

Följande ballasttyper användes i försöken:

1. Makadam 11-18 mm (Blentarp)
2. Makadam 4-8 mm (Blentarp)
3. Singel 4-8 mm (Lenzhard)
4. Makadam 2-4 mm (Lenzhard)

Följande sandsorter användes i försöken:

1. Sand 0-4 mm (Lenzhard)
2. Sand 2 mm (Norge)
3. Sand 0-2 mm (Bösarp) Sand 0-1 mm (Önnestad)
4. Sand 0.1-1 mm (kvarter)

Följande filler användes i försöken:

1. Glasfiller (SGÅ) Kalkstenfiller
2. Limus 40 (Nordkalk)

Följande cement användes i försöken:

1. Blandcement Fortico 5R (CEMII/A-D-52.5)
2. Byggcement Slite (CEM II/A -L 42.5 R)
3. NORCEM Std cement (CEM I-42.5 R)

Följande tillsatsmedel användes i försöken:

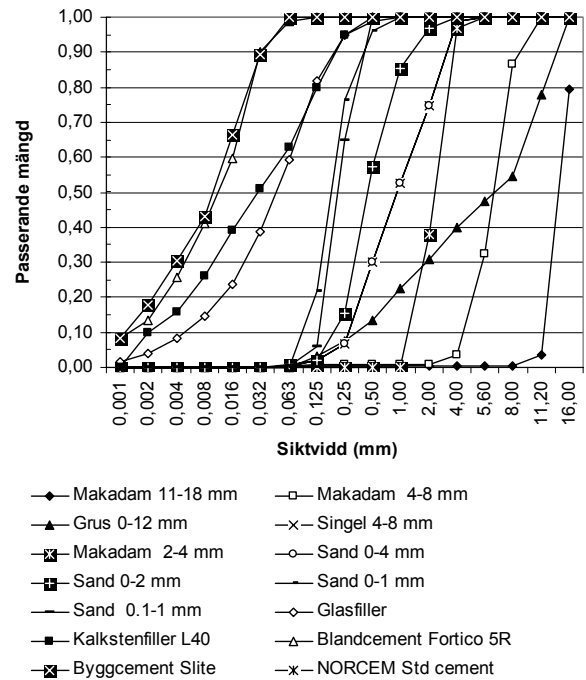
Flytmedel (Conpac)
Flytmedel (Glenium)
Flytmedel AD18 (Scanflux) Viskositetsmedel (Glenium)

Partikelfördelning för delmaterial ges i Figur 3.1 och i Appendix.

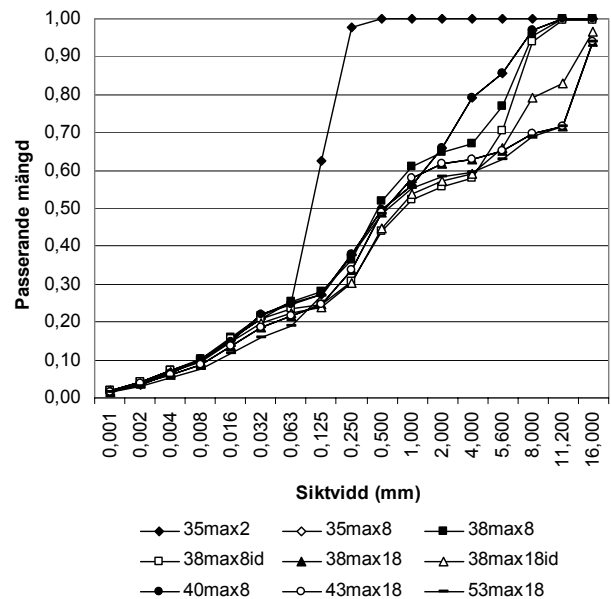
3.2 Betong

Tio betonger studerades varav 7 härrörde från industrin [51-56], två betonger med sandfiller optimerades enligt en princip om ideal partikelfördelning [57-61] samt en betong ingick i en internationell Round Robin-test inom RILEM beträffande plastisk krympning hos betong [62]. Betongrecept ges i Appendix samt partikelfördelning för betong i Figur 3.2. Vid betongtillverkningen användes följande ordning:

1. Uppvägning av allt material med kompensation för all fukt i delmaterial.



Figur 3.1 - Partikelfördelning i delmaterial.



Figur 3.2 - Partikelfördelning i betong.

2. Blandning med vatten under en ½ min. Blandning med flytmedel under 2½ min.
3. Flytsättningsmått, densitet och lufthalt mätes.
4. Omedelbar betonggjutning i klimatrum.
5. Härdning av betong med endera försigling (aluminiumfolie), luft (RF = 60% eller RF = 92%) eller vax (0.250 kg/m²).
6. Härdning vid RF = 60% i en tunnel med lufthastighet 3.6 m/s, Figur 3.3.

3.3 Provkroppar och mätutrustning

Följande provkroppar tillverkades, Figurer 3.4 [28,58]:

1. Två krympplattor 102 x 356 x 559 mm i rostfritt stål med betong (härdning vid RF = 60% eller med vax).
2. Tre krympriggar 100 x 100 x 400 mm i rostfritt stål - mätblock i aluminium (försegling vid RF = 60% eller RF = 92%, i luft eller med vax vid RF = 60%)
3. Tolv kuber 100 x 100 mm (försegling, i luft eller med vax vid RF = 60%).



Figur 3.3 – Provkroppar i form av krympplattor, krympriggar och kuber.



Figur 3.4 - Tunnel med lufthastighet 3.6 m/s.

3.4 Mätmetoder

Följande mätningar utfördes:

1. Sprickvidd i krympplattor, Figur 3.5.
2. Krympning på mätdjupen 20 och 70 mm med kalibrerade LVDT-givare, Figur 3.6.
3. Tryckhållfasthet vid 1- 28 dygns ålder.
4. Relativ fuktighet i betongbitar från provning av tryckhållfasthet, Figur 3.7.
5. Temperatur i krympplattor och -riggar.
6. Lufthastighet i vindtunnel.



Figur 3.5 - Sprickvidd i krympplatta (3 platser).



Figur 3.6 - Krympning 20-70 mm från ytan.



Figur 3.7 - Relativ fuktighet i betongfragment.

4. RESULTAT

4.1 Betongsammansättning

Tabell 4.1 och Figur 4.1 visar konstanter a och b för betongens partikelfördelning enligt ekvationen:

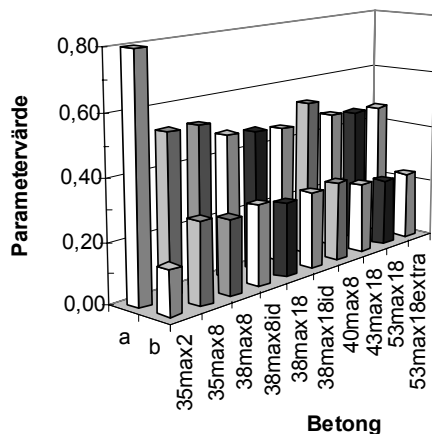
$$s = a \cdot d^b \quad (4.1)$$

s betecknar passerande mängd

d betecknar kornstorlek ($0.063 < d < 10 \text{ mm}$)

Tabell 4.1 - Konstanter a och b för betongens partikelfördelning enligt ekvation (4.1).

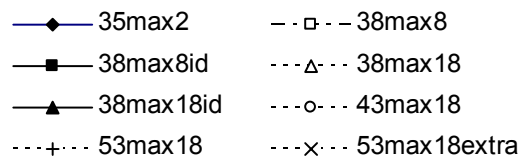
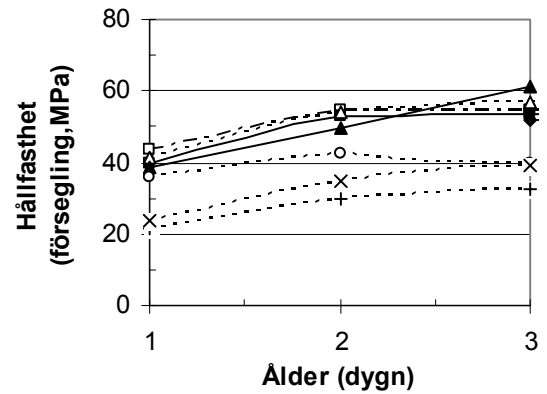
Konstant	a	b
35max2	0.81	0.17
35max8	0.53	0.27
38max8	0.53	0.26
38max8id	0.48	0.28
38max18	0.46	0.23
38max18id	0.46	0.26
40max8	0.53	0.27
43max18	0.46	0.23
53max18	0.46	0.23
53max18extra	0.46	0.23
Medelvärde max 8	0.53	0.26
Medelvärde max 18	0.46	0.24



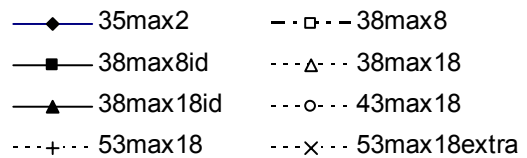
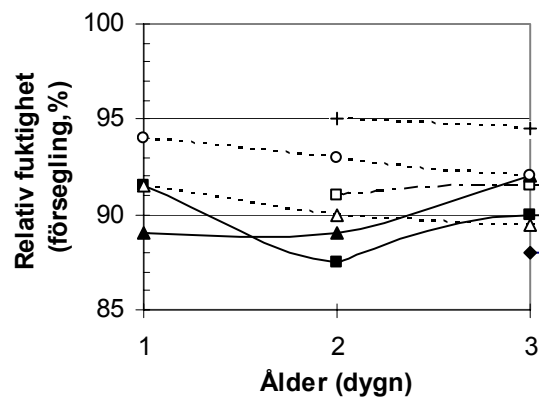
Figur 4.1 - Konstanter a och b för betongens partikelfördelning enligt ekvation (4.1).

4.2 Hållfasthet och relativ fuktighet

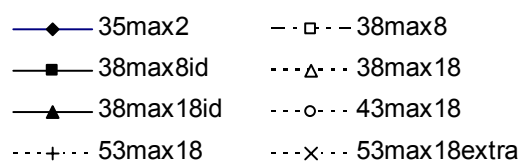
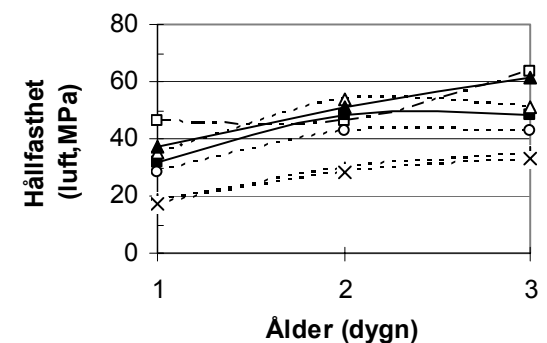
Figurerna 4.2-4.7 visar hållfasthet och relativ fuktighet, RF, fram till 3 dygns ålder.



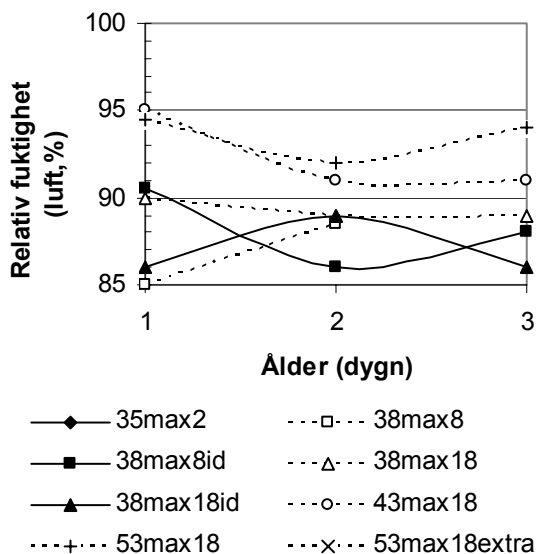
Figur 4.2 - Hållfasthet (försegling,MPa).



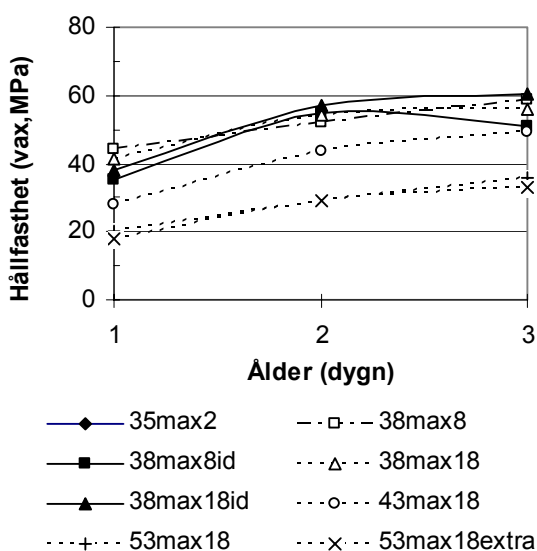
Figur 4.3 - Relativ fuktighet (försegling,%).



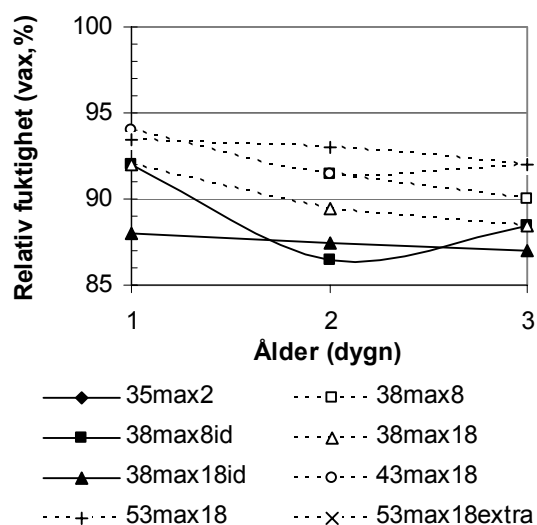
Figur 4.4 - Hållfasthet (luft,MPa).



Figur 4.5 - Relativ fuktighet (luft,%).



Figur 4.6 - Hållfasthet (vax,MPa).

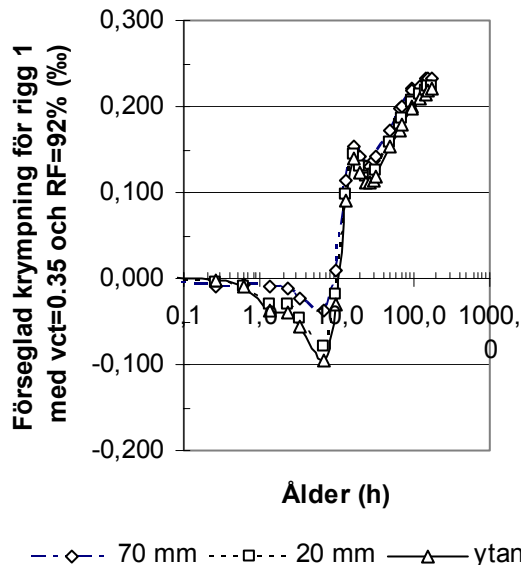


Figur 4.7 - Relativ fuktighet (luft,%).

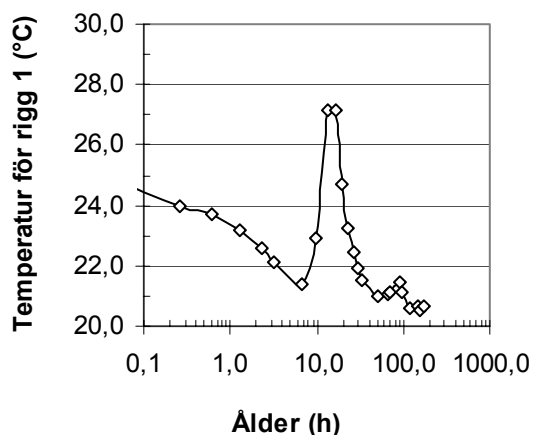
4.3 Krympning och temperaturutveckling

4.3.1 Betong 35max2

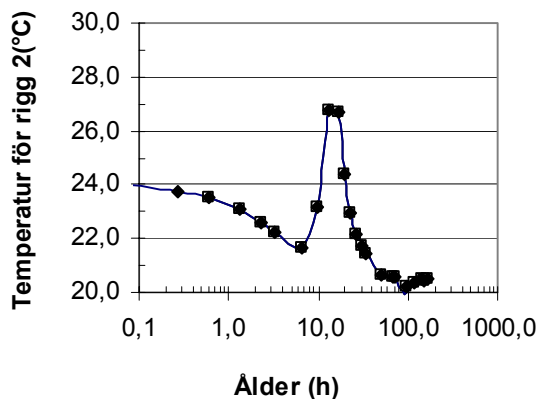
Tre förseglade försök utfördes i RF = 92% på exakt samma betong, Figurerna 4.8-4.13. Temperaturkompensation skedde med 0.01%/°C. Deformationen i ytan beräknades lineärt.



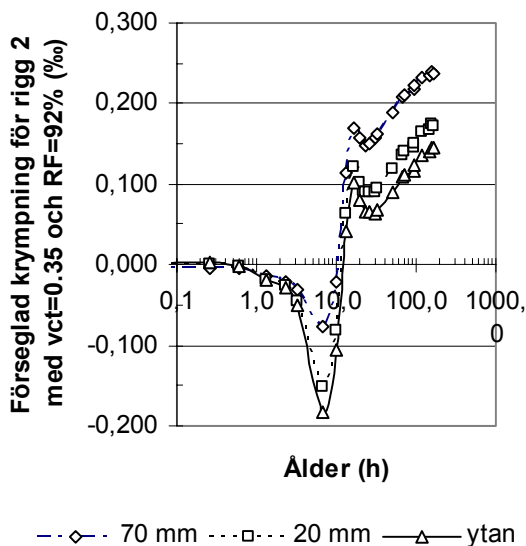
Figur 4.8 - Förseglad krympning för rigg 1 med betong med vct=0.35 och RF=92% (‰).



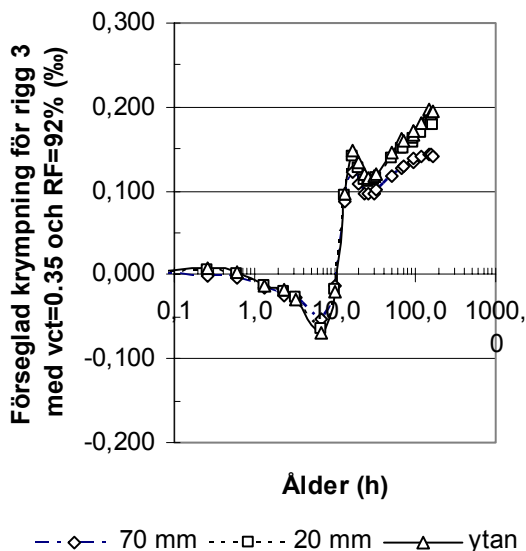
Figur 4.9 - Temperatur för rigg 1 (°C).



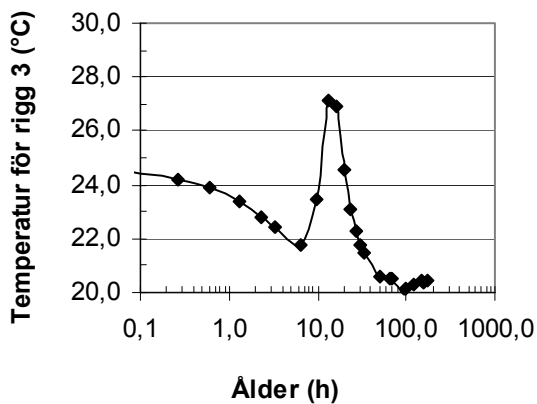
Figur 4.10 - Temperatur för rigg 2 (°C).



Figur 4.11 - Förseglad krympning för rigg 2 med betong med vct=0.35 och RF=92% (‰).



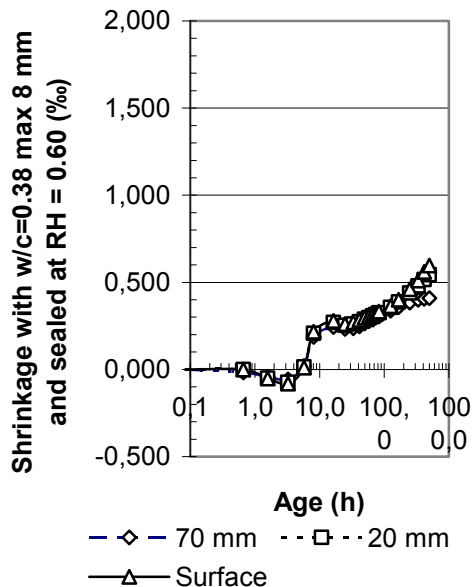
Figur 4.12 - Förseglad krympning för rigg 3 med betong med vct=0.35 och RF=92% (‰).



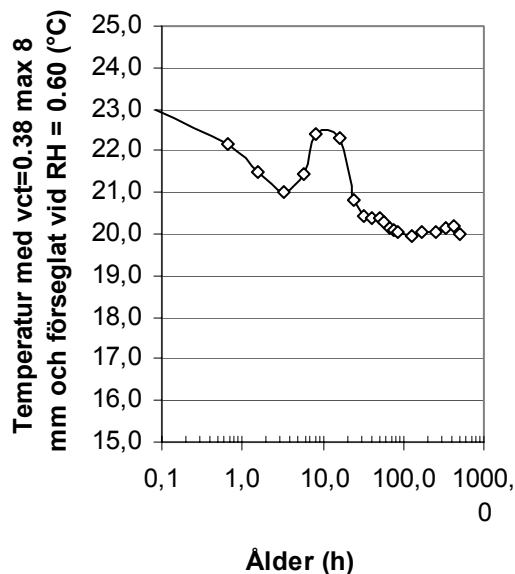
Figur 4.13- Temperatur för rigg 3 (°C).

4.3.2 Betong 38max8

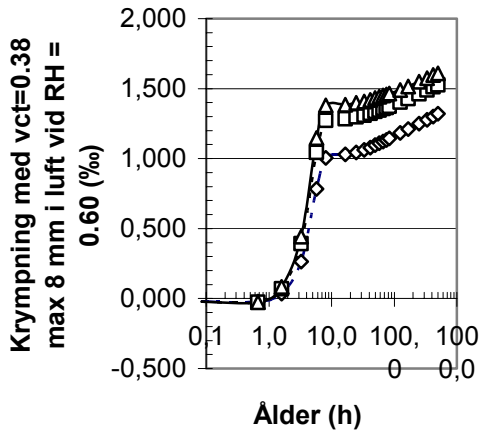
Figur 4.14 visar krympning och figur 4.15 temperatur med vct=0.38, max 8 mm ballast, förseglat vid RH = 0.60. Även i dessa fall har krympningen kompenserats för temperaturrörelsen med 0.01 ‰/°C. Figur 4.16 visar krympning och figur 4.17 temperatur med vct=0.38, max 8 mm ballast, i luft vid RH = 0.60. Figur 4.18 visar krympning och figur 4.19 temperatur med vct=0.38, max 8 mm ballast, med vax vid RH = 0.60.



Figur 4.14 - Krympning med vct=0.38 max 8 mm och förseglat vid RH = 0.60.

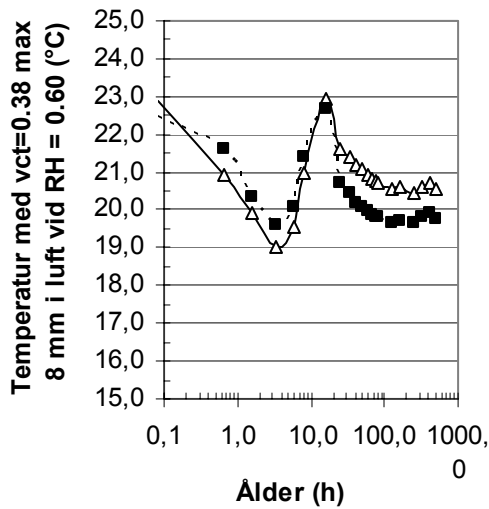


Figur 4.15 - Temperatur med vct=0.38, max 8 mm ballast, förseglat vid RH = 0.60.



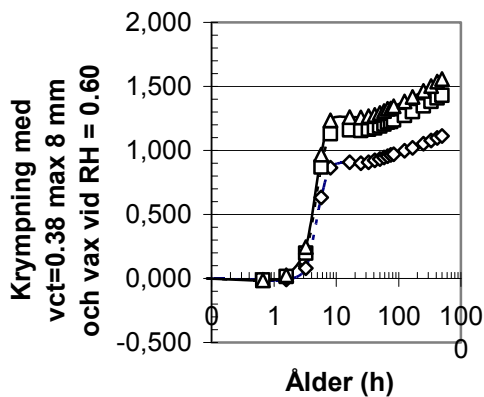
—◇— 70 mm —■— 20 mm —△— Ytan

Figur 4.16 – Krypning, vct=0.38 max 8 i luft vid RH = 0.60.



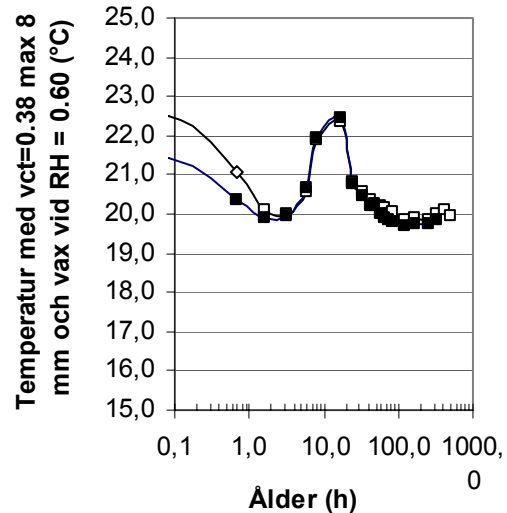
—△— Rigg —■— Platta

Figur 4.17 - Temperatur med vct=0.38, max 8 mm ballast i luft vid RH = 0.60.



—◇— 70 mm —■— 20 mm
—△— Ytan

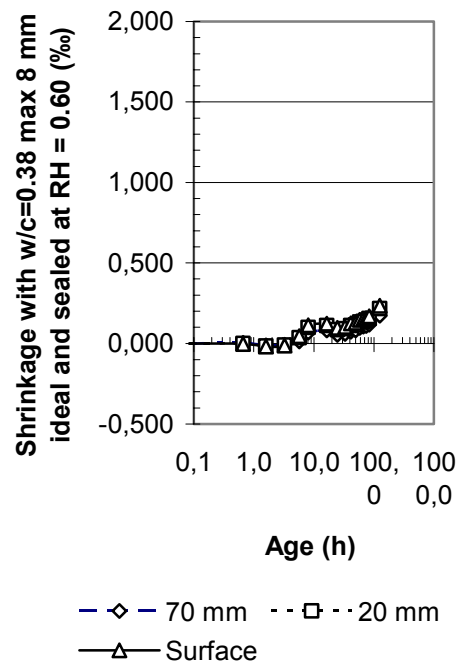
Figur 4.18 – Krypning, vct=0.38 max 8, vax.



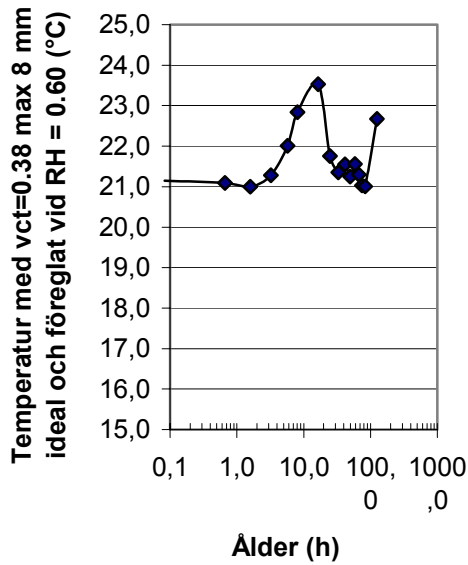
Figur 4.19 - Temperatur med vct=0.38, max 8 mm ballast med vax vid RH = 0.60.

4.3.3 Betong 38max8ideal

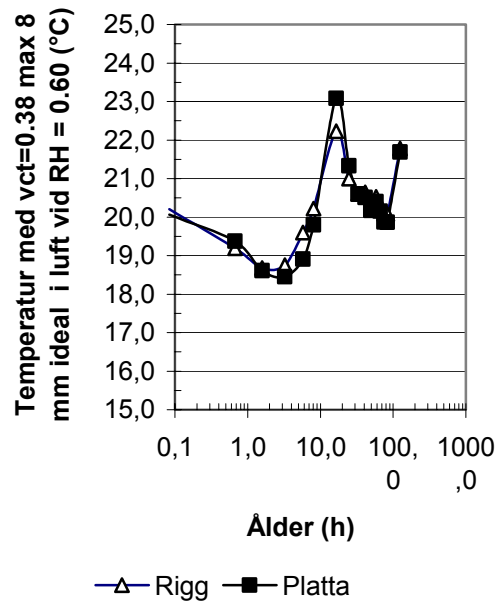
Figur 4.20 visar krypning och Figur 4.21 temperatur med vct=0.38, max 8 mm ideal ballast, förseglat vid RH = 0.60. Även i dessa fall har krypningen kompenserats för temperaturrörelsen med 0.01 ‰/°C. Figur 4.22 visar krypning och figur 4.23 temperatur med vct=0.38, max 8 mm ideal ballast, i luft vid RH = 0.60. Figur 4.24 visar krypning och figur 4.25 temperatur med vct=0.38, max 8 mm ideal ballast, med vax vid RH = 0.60.



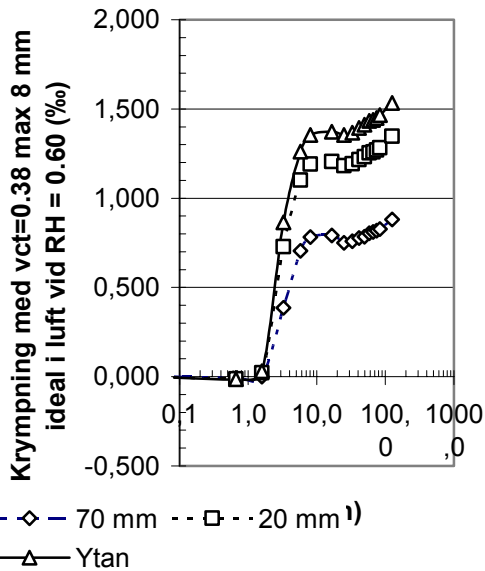
Figur 4.20 - Krypning med vct=0.38 max 8 mm ideal och förseglat vid RH = 0.60.



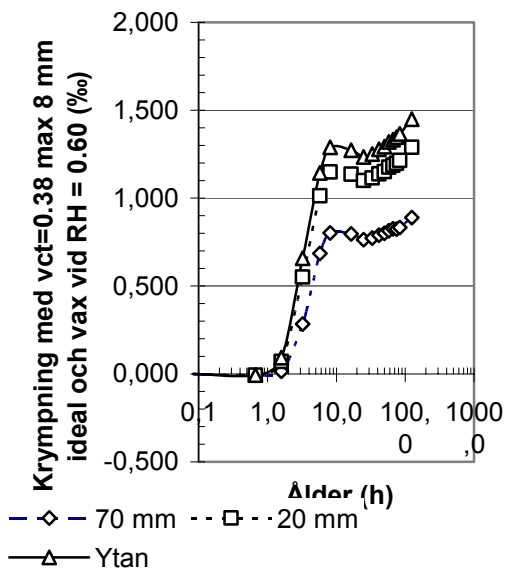
Figur 4.21 - Temperatur med vct=0.38, max 8 mm ideal ballast, föreglat vid RH = 0.60.



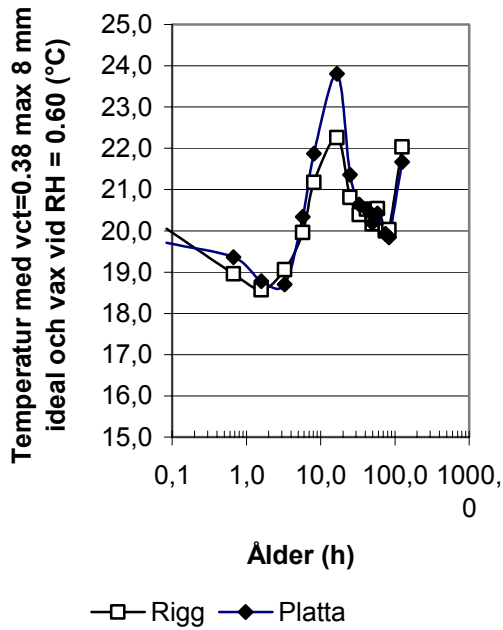
Figur 4.23 - Temperatur med vct=0.38, max 8 mm ideal ballast i luft vid RH = 0.60.



Figur 4.22 - Krympning, vct=0.38 max 8 mm ideal i luft vid RH = 0.60.



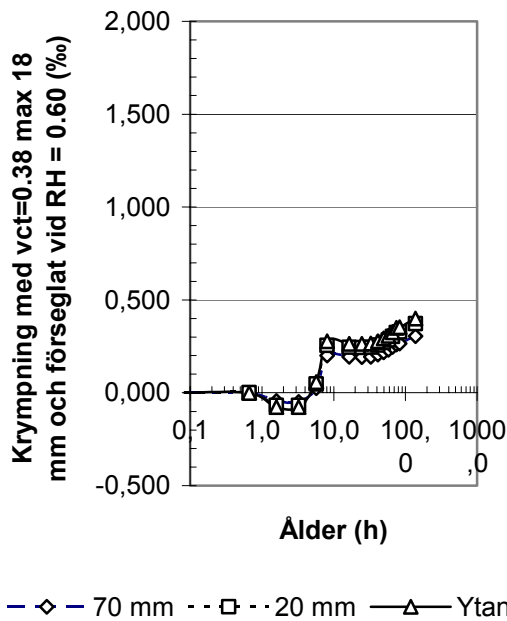
Figur 4.24 - Krympning, vct=0.38 max 8 mm ideal, vax.



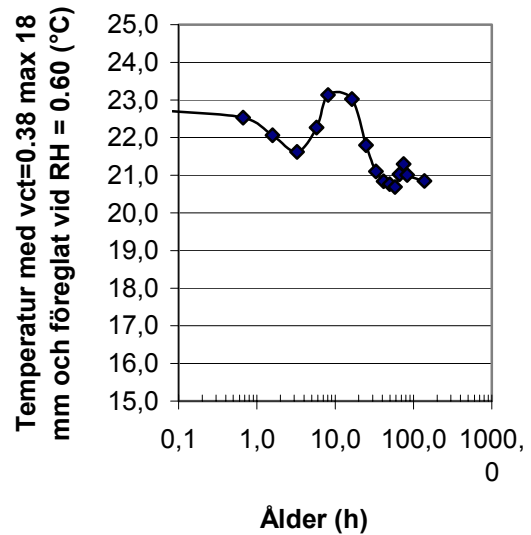
Figur 4.25 - Temperatur med vct=0.38, max 8 mm ideal ballast med vax vid RH = 0.60.

4.3.4 Betong 38max18

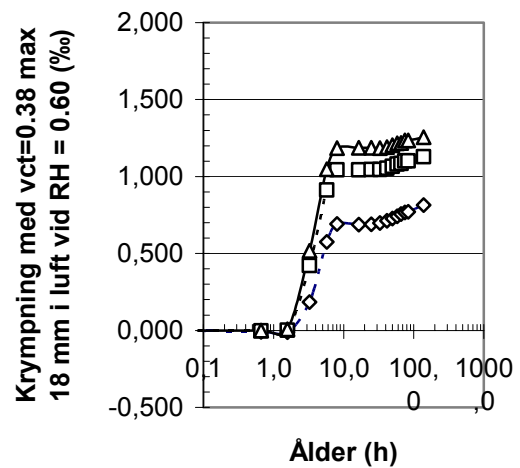
Figur 4.26 visar krympning och figur 4.27 temperatur med vct=0.38, max 8 mm ballast, förseglat vid RH = 0.60. Även i dessa fall har krympningen kompenserats för temperaturrörelsen med 0.01 ‰/°C. Figur 4.28 visar krympning och figur 4.29 temperatur med vct=0.38, max 8 mm ballast, i luft vid RH = 0.60. Figur 4.30 visar krympning och figur 4.31 temperatur med vct=0.38, max 8 mm ballast, med vax vid RH = 0.60.



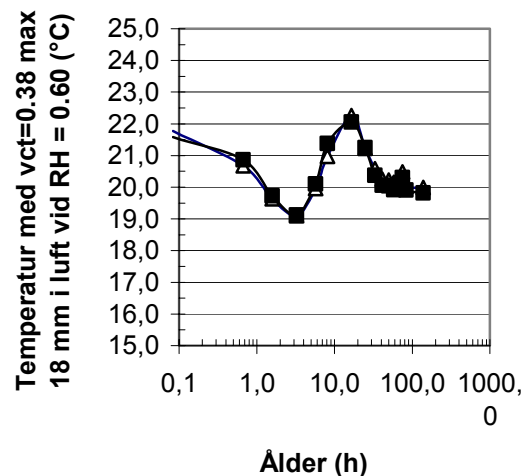
Figur 4.26 - Krympning med vct=0.38 max 18 mm och förseglat vid RH = 0.60.



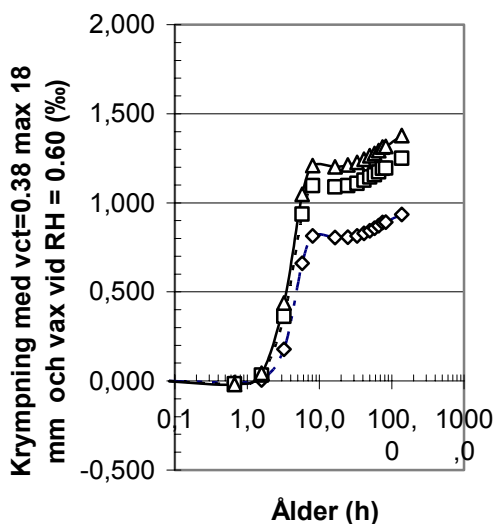
Figur 4.27 – Temperatur, 38max18, förseglat.



Figur 4.28 – Krympning, 38 max 18, RF=60%.

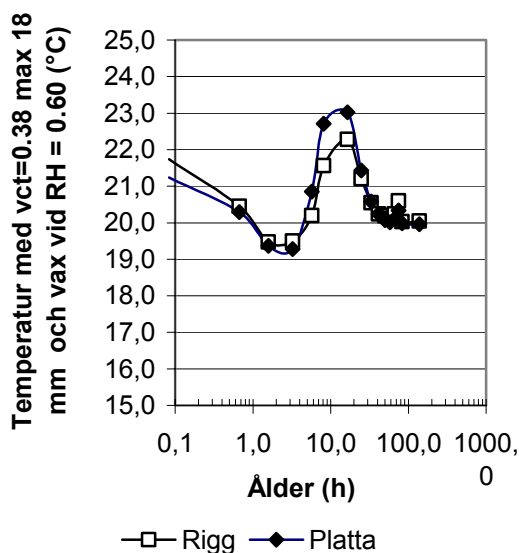


Figur 4.29 – Temperatur, 38max18, RF=60%.



—◇— 70 mm —□— 20 mm —△— Ytan

Figur 4.30 – Krympning, vct=0.38 max 18 mm ballast och vax.

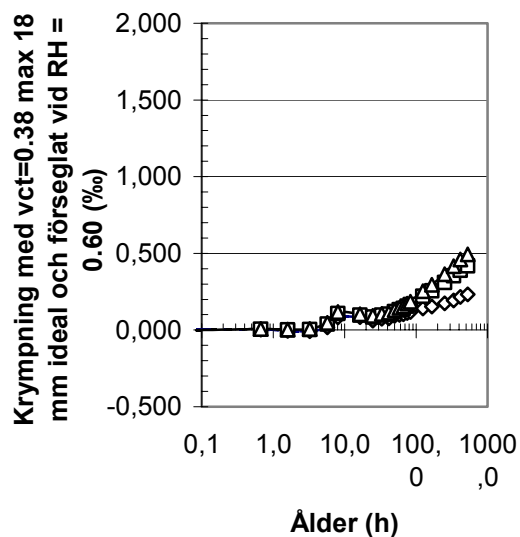


Figur 4.31 - Temperatur med vct=0.38, max 18 mm ballast med vax vid RH = 0.60.

4.3.5 Betong 38max18ideal

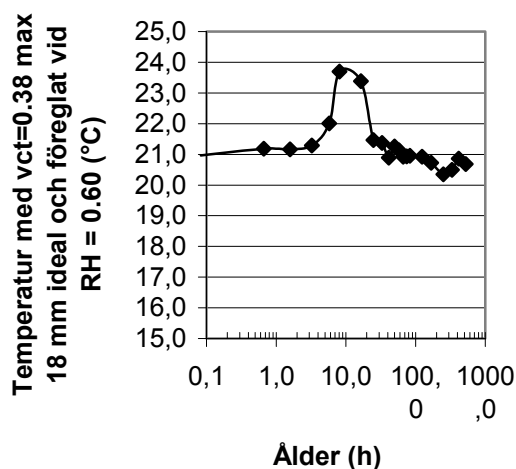
Figur 4.32 visar krympning och Figur 4.33 temperatur med vct=0.38, max 18 mm ideal ballast, förseglat vid RH = 0.60. Även i dessa fall har krympningen kompensrats för temperaturrörelsen med 0.01 %/°C. Figur 4.34 visar krympning och figur 4.35 temperatur med vct=0.38, max 18 mm ideal ballast, i luft vid RH = 0.60. Figur 4.36 visar krympning och figur 4.37 temperatur med vct=0.38, max 18 mm ideal ballast, med vax vid RH = 0.60. Eftersom ytkrympningen för lufthärdad betong var obetydlig (ca 0%) i förhållande till ytkrympningen för vaxhärdad betong (ca 1.5 %)

förelåg en felmätning, vilken berodde på att kvarlämnad betong på ytan av mätblocket för lufthärdad betong hindrade rörelsen av detta, Figur 4.38. Figur 4.38 visar kvarglömnd betongrest på högra mätblocket. Mätningen gjordes därför om med exakt samma betong men för tre parallella riggar, Figurerna 4.39-4.41. Samtidigt erhöles reproducerbarheten för mätmetoden vid lufthärdade prover. Figurerna 4.42-4.44 visar medelvärden för deformationerna i ytan, 20 mm under ytan samt på mätdjup 70 mm. Det var uppenbarligen så att rigg 2 ej fungerade tillfredställande utan deformationen låste sig även i detta fall i ytan, men efter ca 10 h, p. g. a. betongspill längs sidorna ovanpå riggen. Deformationen för rigg 2 har därför tagit bort från medelvärdet, Figurerna 4.42-4.44.

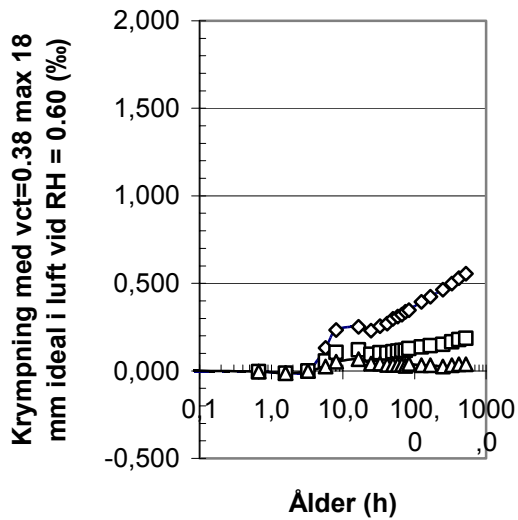


—◇— 70 mm —□— 20 mm —△— Ytan

Figur 4.32 - Krympning med vct=0.38 max 18 mm ideal och förseglat vid RH = 0.60.

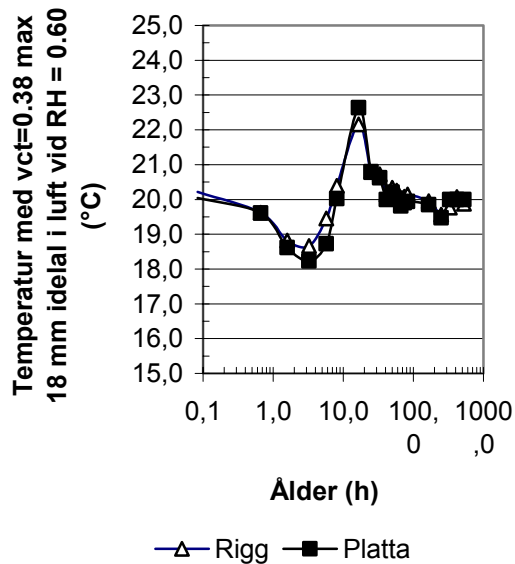


Figur 4.33 - Temperatur med vct=0.38, max 18 mm ideal ballast, förseglat vid RH = 0.60.



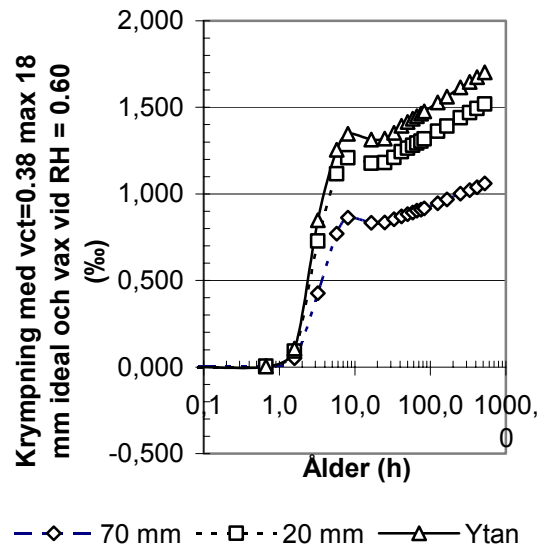
—◇— 70 mm —□— 20 mm —△— Ytan

Figur 4.34 – Krypning, vct=0.38 max 18 mm ideal ballast i luft vid RH = 0.60.

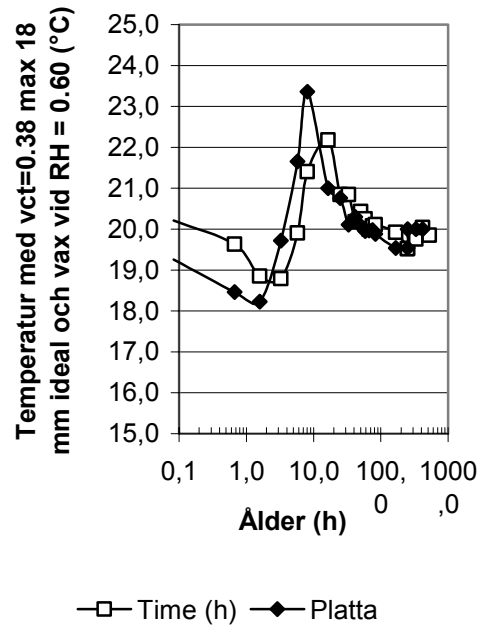


—△— Rigg —■— Platta

Figur 4.35 - Temperatur med vct=0.38, max 18 mm ideal ballast i luft vid RH = 0.60.



Figur 4.36 – Krypning, vct=0.38 max 18 mm ideal ballast med vax.

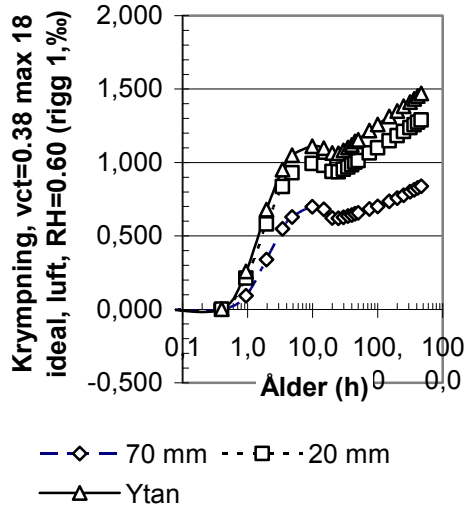


—□— Time (h) —◆— Platta

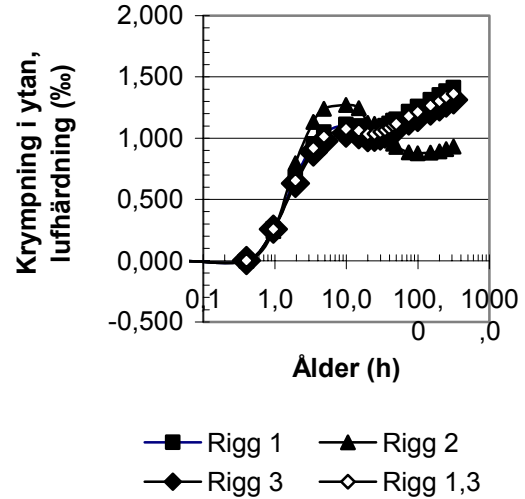
Figur 4.37 - Temperatur med vct=0.38, max 18 mm ideal ballast med vax vid RH = 0.60.



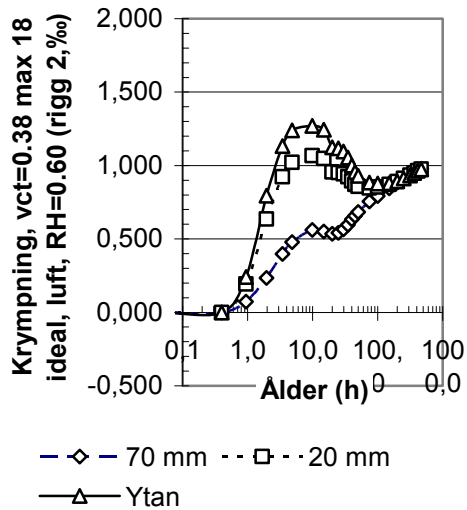
Figur 4.38 – Betongrest på högra mätblocket.



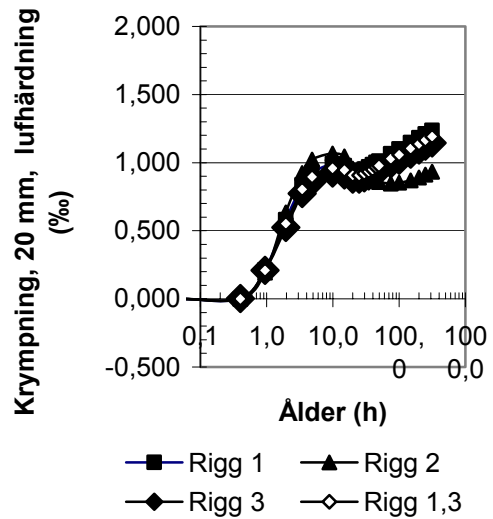
Figur 4.39 - Krypning, vct=0.38 max 18 ideal i luft vid RH = 0.60. Omprovning rigg 1.



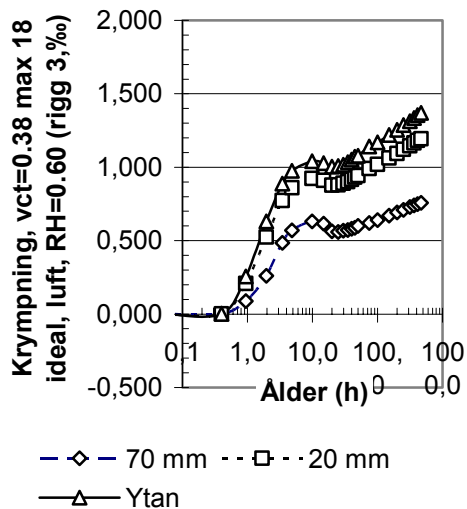
Figurerna 4.42 - Ytdeformation vid omprovning, vct=0.38 max 18 ideal i luft, RH = 0.60.



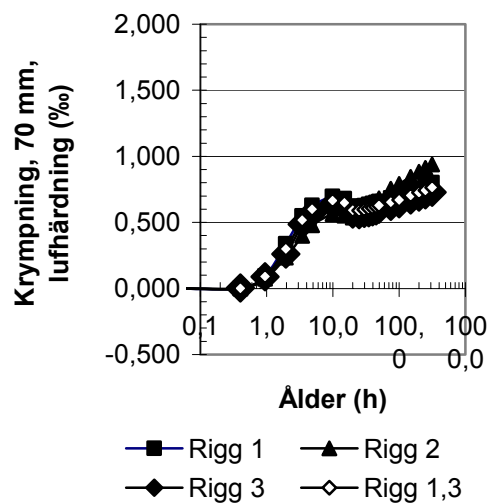
Figur 4.40 - Krypning, vct=0.38 max 18 ideal i luft vid RH = 0.60. Omprovning rigg 2.



Figurerna 4.43 – Deformation, 20 mm, omprov, vct=0.38 max 18 ideal, luft, RH = 0.60.



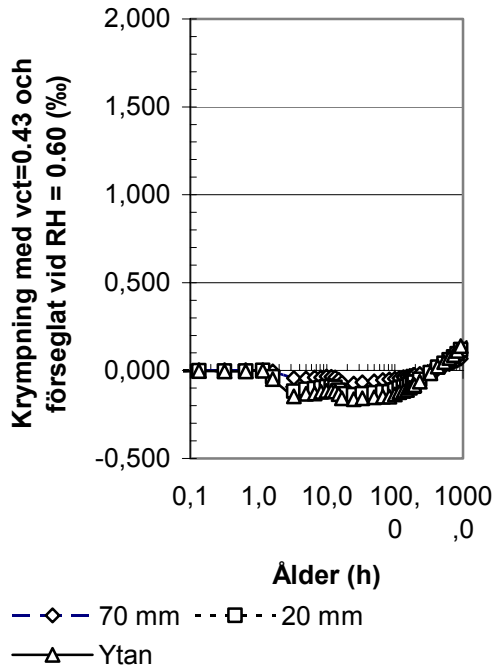
Figur 4.41 - Krypning, vct=0.38 max 18 ideal i luft vid RH = 0.60. Omprovning rigg 3.



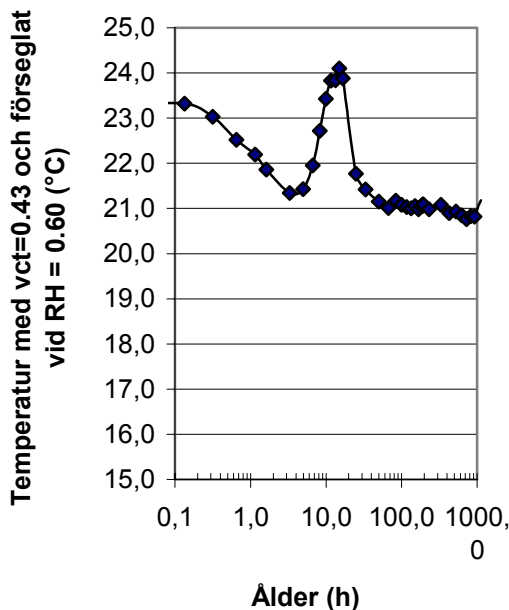
Figurerna 4.44 Deformation, 70 mm, omprov, vct=0.38 max 18 ideal i luft vid RH = 0.60.

4.3.6 Betong 43max18

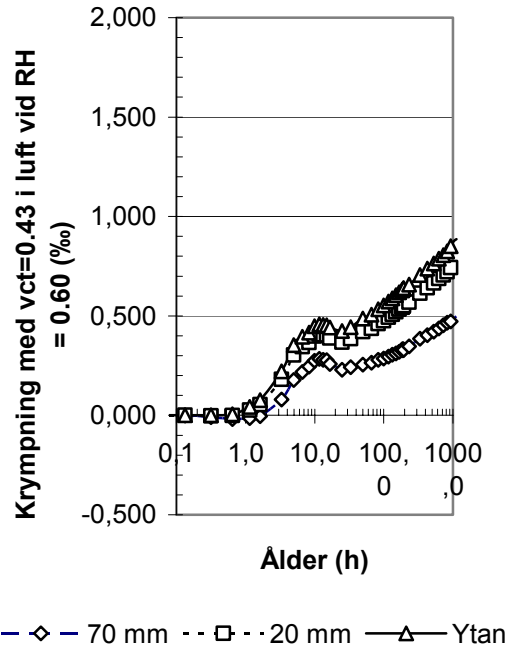
Figur 4.45 visar krympning och Figur 4.46 temperatur med $v_{ct}=0.43$, max 18 mm ballast, förseglat vid $RH = 0.60$. Även i dessa fall har krympningen kompenserats för temperaturrörelsen med $0.01 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$. Figur 4.47 visar krympning och figur 4.48 temperatur med $v_{ct}=0.43$, max 18 mm ballast, i luft vid $RH = 0.60$. Figur 4.49 visar krympning och figur 4.50 temperatur med $v_{ct}=0.43$, max 18 mm ballast, med vax vid $RH = 0.60$.



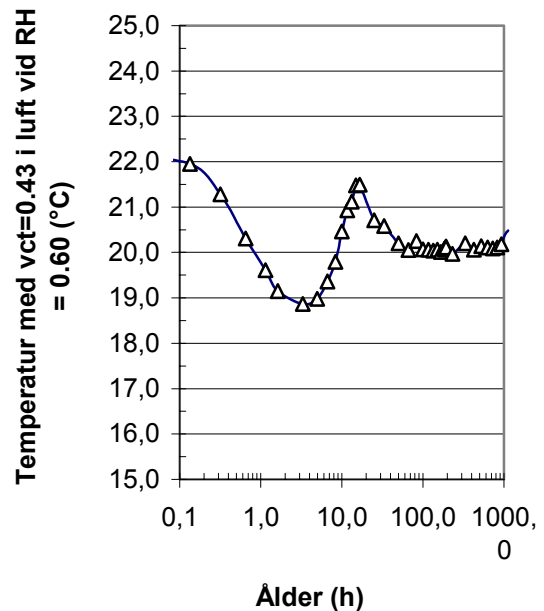
Figur 4.45 - Krympning med $v_{ct}=0.43$ max 18 mm ideal och förseglat vid $RH = 0.60$.



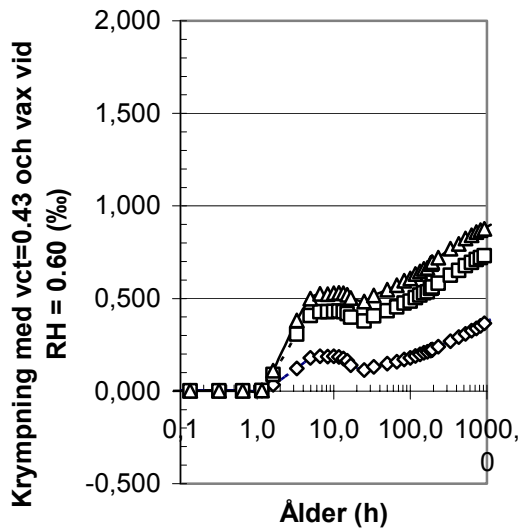
Figur 4.46- Temperatur med $v_{ct}=0.43$, max 18 mm ideal ballast, förseglat vid $RH = 0.60$.



Figur 4.47 – Krympning, $v_{ct}=0.43$ max 18 mm ideal i luft vid $RH = 0.60$.

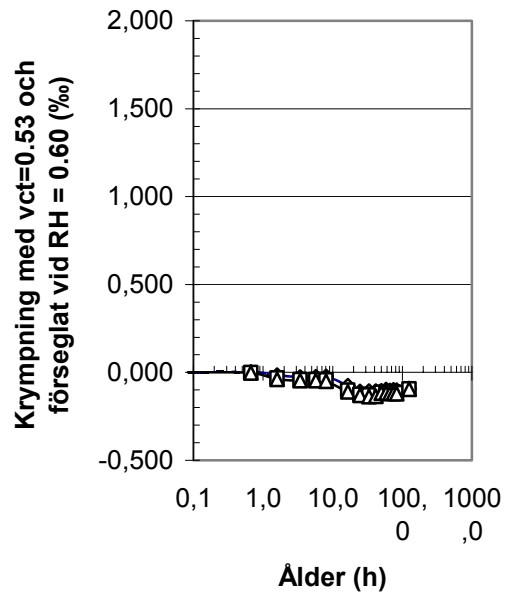


Figur 4.48 - Temperatur med $v_{ct}=0.43$, max 18 mm ideal ballast i luft vid $RH = 0.60$.



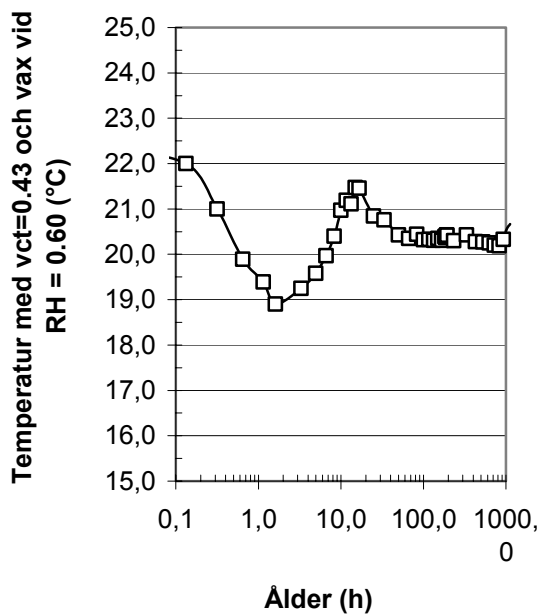
—◇— 70 mm —□— 20 mm —△— Ytan

Figur 4.49 – Krympning, vct=0.43 max 18 mm ideal, vax.

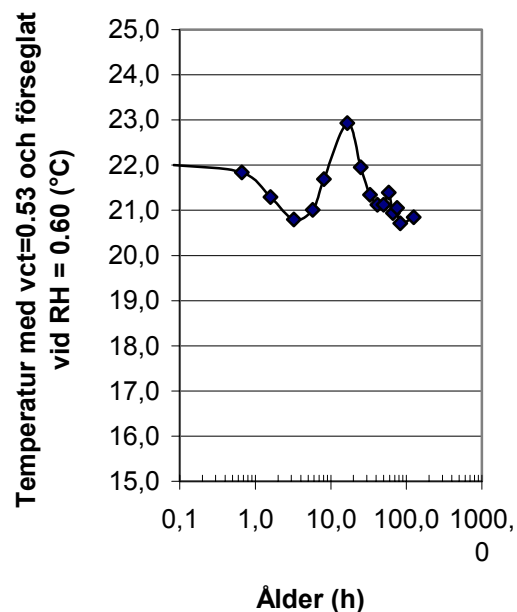


—◇— 70 mm —□— 20 mm —△— Ytan

Figur 4.51 - Krympning med vct=0.53 max 18 mm ideal och förseglat vid RH = 0.60.



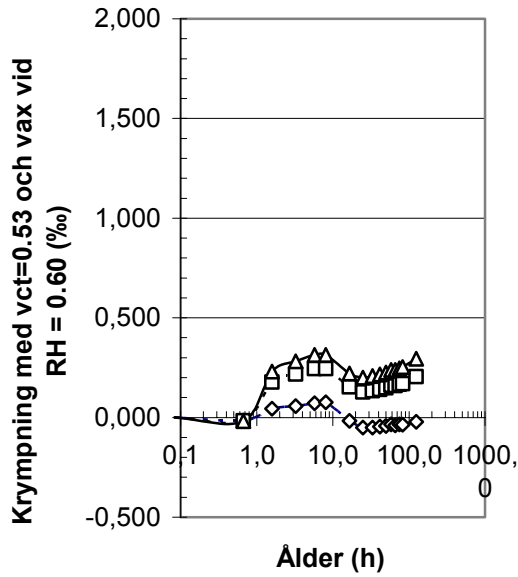
Figur 4.50 - Temperatur med vct=0.43, max 18 mm ideal ballast med vax vid RH = 0.60.



Figur 4.52- Temperatur med vct=0.53, max 18 mm ideal ballast, förseglat vid RH = 0.60.

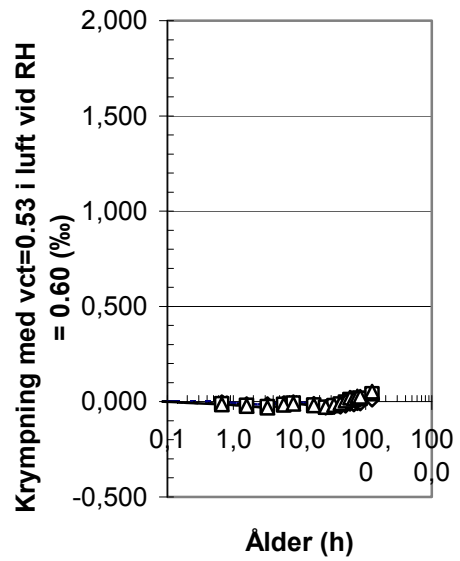
4.3.7 Betong 53max18

Figur 4.51 visar krympning och Figur 4.52 temperatur med vct=0.53, max 18 mm ballast, förseglat vid RH = 0.60. Även i dessa fall har krympningen kompenserats för temperaturrörelsen med 0,01 ‰/°C. Figur 4.53 visar krympning och figur 4.54 temperatur med vct=0.53, max 18 mm ballast, i luft vid RH = 0.60. Figur 4.55 visar krympning och figur 4.6 temperatur med vct=0.53, max 18 mm ballast, med vax vid RH = 0.60.



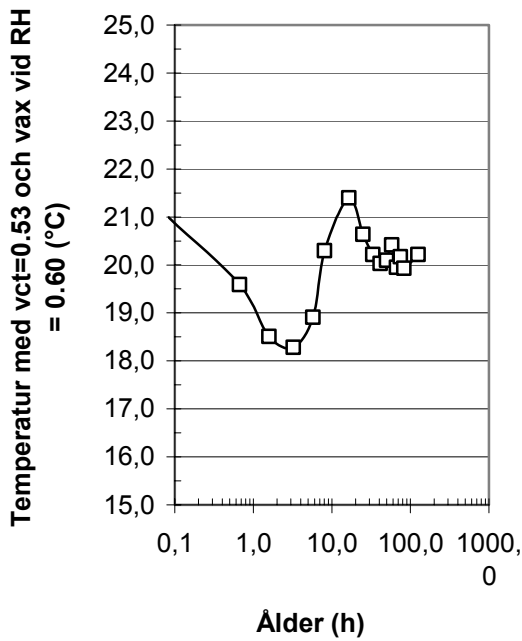
—◇— 70 mm —□— 20 mm —△— Ytan

Figur 4.53 – Krympning, vct=0.53 max 18 ideal i luft vid RH = 0.60.

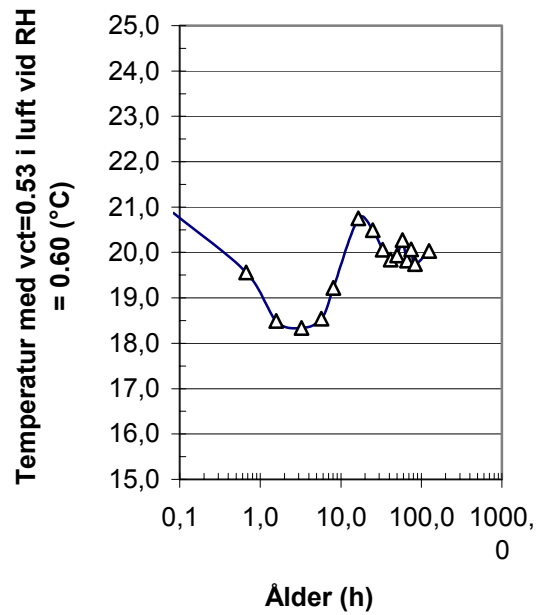


—◇— 70 mm —□— 20 mm —△— Ytan

Figur 4.55 – Krympning, vct=0.53 max 18 ideal, vax.



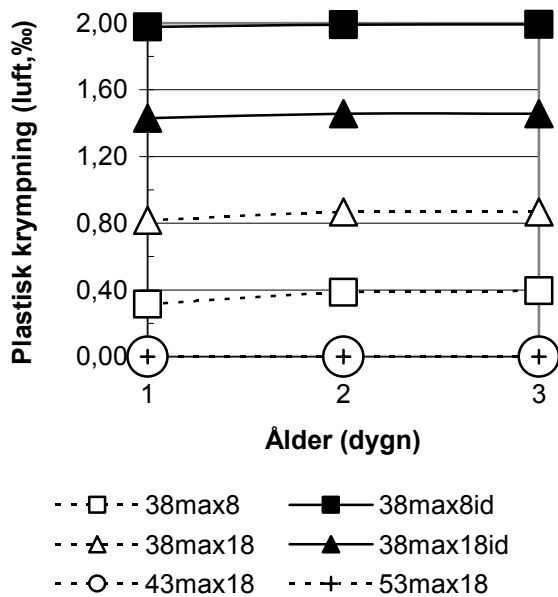
Figur 4.54 - Temperatur med vct=0.53, max 18 mm ideal ballast i luft vid RH = 0.60.



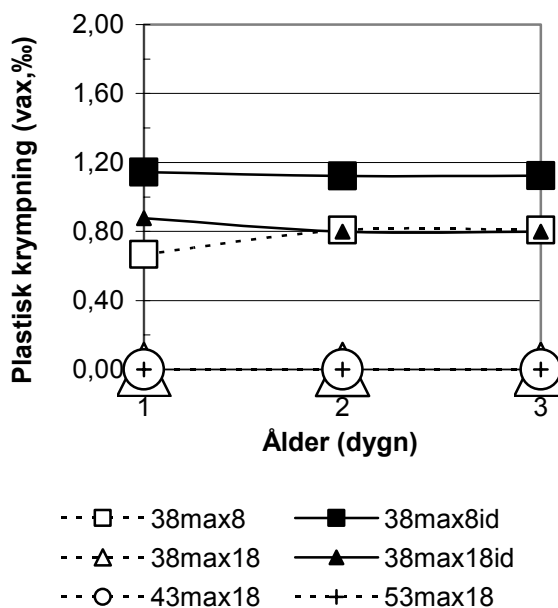
Figur 4.56 - Temperatur med vct=0.53, max 18 mm ideal ballast med vax vid RH = 0.60.

4.4 Plastisk krympning

Figur 4.57-4.58 visar plastisk krympning beräknad som uppmätt sprickvidd dividerad med längden mellan förankringseggarna i krympplattan efter temperaturkompensation med $0.01 \text{ } \mu\text{m}/\text{m}/\text{C}$. Den plastiska krympningen var större i luft än med vaxbeläggning. Plastisk sprickbildning undveks dock inte med vaxbeläggning utom i ett fall (betong38max18). Vidare var den plastiska krympningen större med en ideal partikelfördelning i betongen än med partikelsprång (glasfiller i det senare fallet). Plastisk sprickbildning undveks helt med $v_{ct} = 0.43$ och $v_{ct} = 0.53$ i stället för $v_{ct} = 0.38$.



Figur 4.57 - Plastisk krympning i luft (0.38 m).

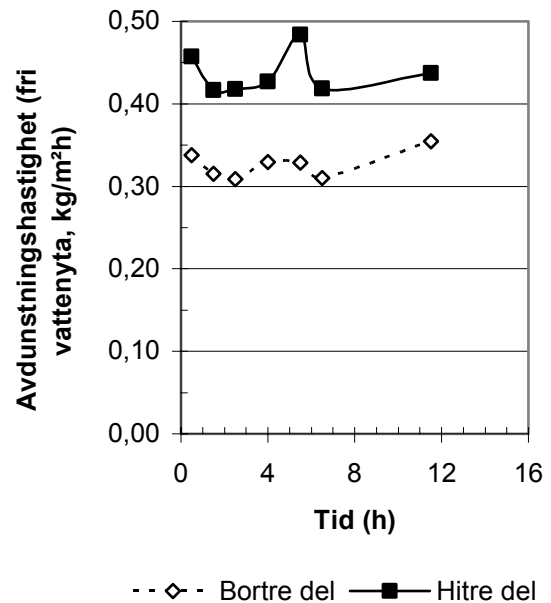


Figur 4.58 - Plastisk krympning, vax (0.38 m).

4.5 Avdunstning

Avdunstningen från en fri vattenyta med diametern 137 mm mättes i bägge ändar av vindtunneln i en glasskål med 20 mm höjd, placerad på en våg. Skålen var bräddfyllt med vatten vid mätstart. Mätningen pågick under 16 h. Figur 4.59 visar avdunstning i borte och i hitre delen av vindtunneln från fläkten räknat (målsättningen var att använda två fläktar men endast en av dess kom i bruk). Den fläkt som användes blåste luft in i tunneln. En reflektion var att två fläktar borde ha använts vid försöket, en vid inloppet och en i utloppet av vindtunneln i syfte att erhålla en så jämn lufthastighet som möjligt i tunneln. Vidare bör om möjligt avdunstning från aktuell betong mätas genom att en mindre betongmängd placeras på en våg med kontinuerlig mätning av betongvikten. Slutligen bör även mängden blödningsvatten mätas parallellt på separata provkroppar eftersom plastisk krympning uppstår först då denna mängd blödningsvatten per tidsenhet understiger avdunstningshastigheten. Följande medelvärden av avdunstningshastigheten från en fri vattenyta uppmättes i vindtunneln:

- Borte del från fläkt: $0.33 \text{ kg/m}^2\text{h}$
- Hitre del från fläkt: $0.44 \text{ kg/m}^2\text{h}$



Figur 4.59 - Avdunstningshastighet i borte och i hitre delen av vindtunneln från fläkten räknat.

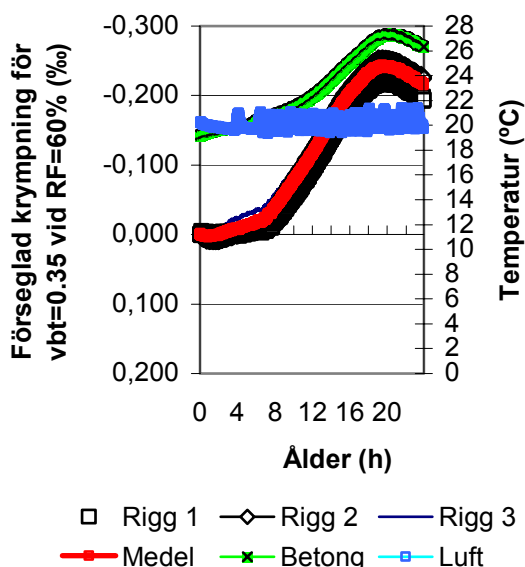
5. FELKÄLLOR OCH NOGGRANNHET

5.1 Fukt i delmaterial och fuktförluster

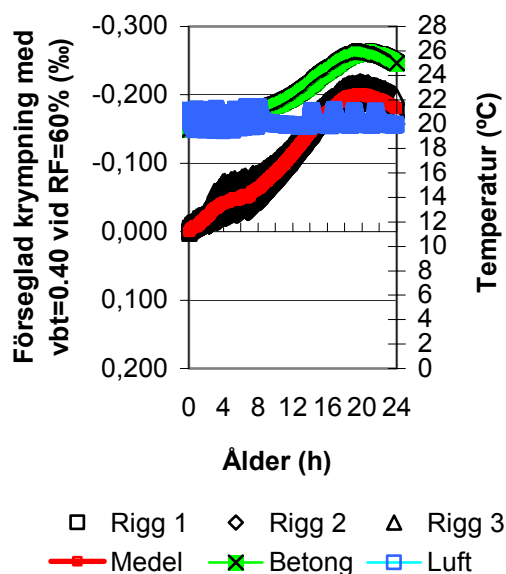
Följande felkällor kan bedömas uppstå:

1. Fukt i delmaterial och fuktförluster
2. Uppvägnings- och gjutfel
3. Lufthastighet
4. Mätstart
5. Blockering av rörelser
6. Kalibrering

All fukt i delmaterial har beräknats och används som del av blandningsvattnet. Av ballast, grus och sand har endast sanden innehållit fukt, fuktkvot = 1.35%, under hela tillverkningsperioden. Fuktkvoten i sanden har kontrollerats före varje gjutning. Ett fel i uppmätt fuktkvot på som mest 0.25% skulle ha resulterat i ett fel mindre än 0.01 i vbt. Efter uppvägning fram till blandning samt mellan blandning och gjutning har givetvis fukt avgått från materialet men denna fuktförlust har ej värderats. Förseglad (autogen) krympning har dock mätts vid såväl RF = 92% som i RF = 60% varvid stora skillnader i uppmätt krympning kan konstateras beroende av tidig fuktavgång från betongblandningen före försegling, Figureerna 5.1-5.5. Recept för betongerna ges i Appendix. Härdning under försegling av proverna skedde, dels i RF=60%, dels i RF = 92%. Figur 5.1 visar förseglad 1-dygnskrympning för betong 35max8 preparerad i RF = 60%: 0.240‰. Beteckningar: 35 = vbt (%), max8 = ballast 8 mm. Figur 5.2 visar förseglad 1-dygnskrympning för betong 40max8 preparerad i RF = 60%: 0.220‰. Figur 5.3 visar förseglad 1-dygnskrympning för betong 35max8 preparerad i RF = 90%: 0.240‰. Figur 5.4 visar förseglad 1-dygnskrympningen före betong 40max8 preparerad i RF = 92%: 0.110‰. Tabell 5.1 visar förseglad 1-dygnskrympning för betonger preparerade i RF = 60% och i RF = 92%. För betong med vbt = 0.40 fördubblades krympningen till följd av fuktförluster under preparering. Autogen krympning utgjorde endast hälften av uppmätt krympning under försegling – hälften utgjordes av plastisk krympning under försegling till följd av att vatten tidigt torkat ut från ytan. För betong med vbt = 0.35 var prepareringsfelet mindre, ca 10% större uppmätt autogen krympning vid preparering i RF = 60% än den som skedde vid RF = 95%.



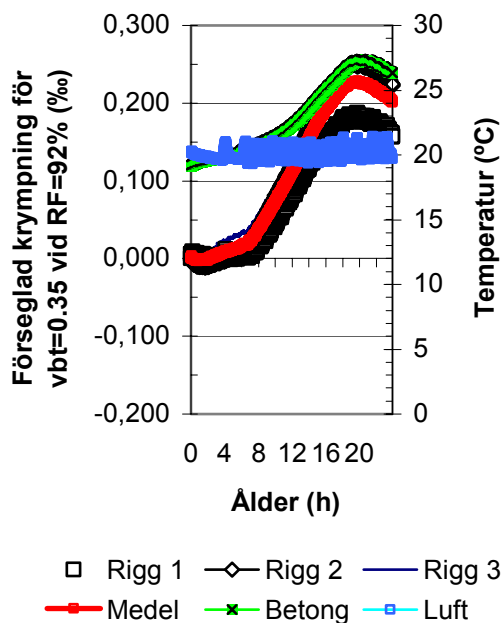
Figur 5.1 – Förseglad 1-dygnskrympning för betong 35max8 preparerad i RF = 60%. Beteckningar: 35 = vbt (%), max8 = ballast 8 mm.



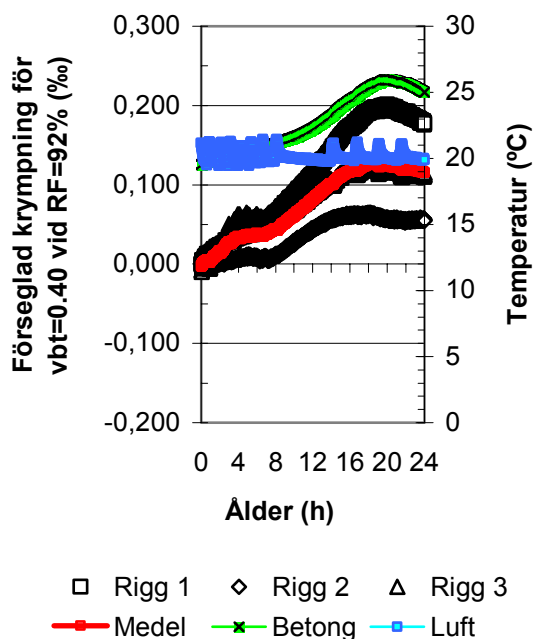
Figur 5.2 - Förseglad 1-dygnskrympning för betong 40max8 preparerad i RF = 60%. Beteckningar: 40 = vbt (%), max8 = ballast 8 mm.

Tabell 5.1 - Förseglad 1-dygnskrympning för betong preparerad i RF = 60% och RF = 92%.

Preparering	35max8	40max8
RF = 60%	0.240	0.220
RF = 92%	0.220	0.110
Skillnad	0.020	0.110



Figur 5.3 - Förseglad 1-dygnskrympning för betong 35max8 preparerad i RF = 92%. 35 = vbt (%), max8 = ballast 8 mm.



Figur 5.4 - Förseglad 1-dygnskrympning för betong 40max8 preparerad i RF = 92%. 40 = vbt (%), max8 = ballast 8 mm.

5.2 Uppvägningssfel och gjutfel

Tillverkning skedde i tre omgångar om 25 l eftersom en Sandby tvångsblandare ej kunde användas vid tillverkning av SKB (avståndet mellan skovlarna och blandarbotten var för stort på Sandby tvångsblandare varför fyller lade sig på botten med en bristfällig homogenitet i betongen som följd). Två operatörer kontrollerade uppvägd mängd delmaterial varför

risken för felvägning var liten mellan gjutningarna. Provkropparna göts i följande ordning:

1. En krymplatta med vax
2. Trekrympriggar
3. En krymplatta utan vax

Givetvis har det uppstått en tidsutdräkt mellan gjutningarna eftersom den använda Zyklos tvångsblandaren haft för liten kapacitet för ändamålet. Det hade således varit en fördel om en justering av skovlarna på Sandby tvångsblandaren hade kunnat komma till stånd, för att undvika skillnader mellan provkropparna. Som nu blivit fallet har den plastiska krympning startat ca 1 h tidiga för den vaxbelagda provkroppen jämfört med den lufthärdade krymplattan. Vidare var lufthastigheten noll ca 1 h (upp till ca 3 h) efter gjutning för den vaxbelagda provkroppen vilket givetvis var ett försöksbetingat fel beroende av den låga blandarekapaciteten hos den Zyklos 25 l som användes. En slutsats var att Sandby tvångsblandare med tillräcklig kapacitet borde ha justerats och använts för att undvika blandningstekniska fel.

5.3 Lufthastighet

Lufthastigheten i vindtunneln kontrollerades med en pivotmätare vid varje försök. Lufthastigheten uppmättes med pivotmätare till 3.6 m/s i hela vidtunnelns längd. Pivotmätaren var emellertid inte kalibrerad varför anledning fanns att mäta lufthastigheten med en annan metod i detta fall via avdunstningen från en fri vattenyta. Glasskålar med diameter 137 mm och höjd 20 mm placerade bräddfyllda på vågar vid inloppet och utloppet av vindtunneln. Vikten av vattenskålen mättes efter 1, 2, 3, 5, 6, 7 och 17 h varefter avdunstningshastigheten beräknades, Figur 4.59. Därefter beräknades lufthastigheten med Figurerna 2.31, 2.35 samt 2.36, Figurerna 5.5-5.7 [22]. Från Figurerna 5.5-5.7 beräknades följande ekvationer:

$$A_{20\text{ }^{\circ}\text{C}} = 0.15 \cdot (1.07 - \text{RF}) \cdot V + 0.019 \cdot \text{RF}^{-1.76} \quad (5.1)$$

$$A_{50\%} = (0.00104 \cdot T^{1.48}) \cdot V + 0.16 \cdot \ln(T) - 0.38 \quad (5.2)$$

$$A_{80\%} = (0.00155 \cdot T^{1.13}) \cdot V + 0.064 \cdot \ln(T) - 0.16 \quad (5.3)$$

- A betecknar avdunstning (kg/m²h)
 RF betecknar RF (-)
 T betecknar temperatur (°C)
 V betecknar lufthastighet (m/s)

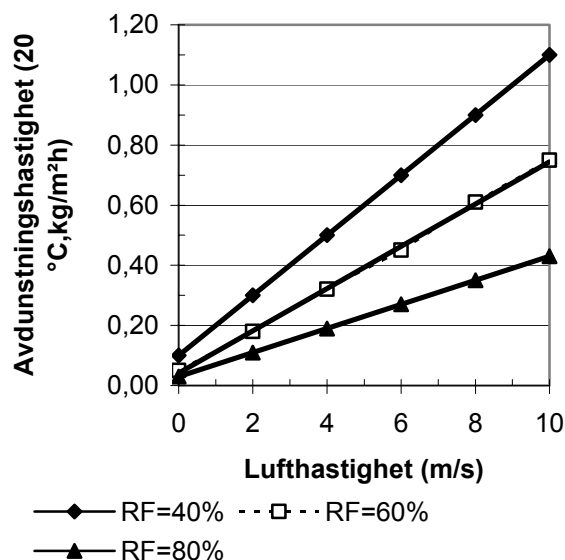
Vid 20 °C torde lufthastigheten vid inloppet av vindtunneln ha varit 5.5 m/s (avdunstningen 0.44 kg/m²h) samt vid utloppet 4 m/s (avdunstningen 0.33 kg/m²h), i genomsnitt ca 1 m/s högre lufthastighet än uppmätt med pivotmätaren. Förmodligen skulle mer en jämn lufthastighet erhållits med två fläktar vid tunneln, vilka fanns på plats men endast en nyttjades. Vaxbelagd provkropp var placerad närmast utloppet av vindtunneln varför något mindre plastisk krympning kan förväntas ha skett hos vaxbelagd provkropp än hos övriga prover. Å andra sidan göts vaxbelagd provkropp ca 1 h (ibland 3 h) före lufthärdad provkropp varför den fria avdunstningen startade tidigare för den vaxbelagda provkroppen än för den lufthärdade. Krympriggarna var placerade mitt i vindtunneln varför dessa kan förväntats ha erhållit samma påverkan av lufthastigheten.

5.4 Mätstart

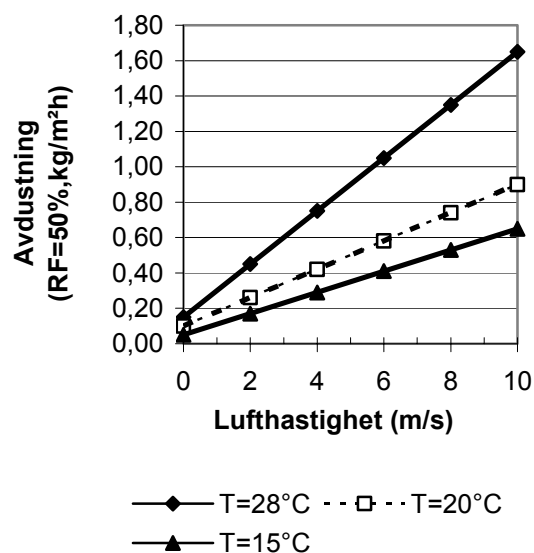
Mätningar av temperatur och krympning startades då lufthärdad krympplatta hade gjutits och fläkten hade startats dvs. vaxbelagd betong hade då torkat ca 1 h, dock utan någon lufthastighet, samt krympt ca 1 h (ibland upp till 3 h) längre än den lufthärdade betongen. Åldern för vaxbelagd betong och lufthärdad var därför olika i detta försök. Detta fel i tidpunkt för mätstart torde ha undvikits om Sandby tvångsblandare kunnat användas i försöket, men denna var ej justerad för att kunna nyttjas för SKB. Mätningen av plastisk krympning startades för sent, efter 1 dygn, med hänsyn till arbetsdagens längd. Stickprovsvis konstaterades dock att en plastisk krympspricka uppstod efter 3 h, annars inte alls. En reflektion var att det med hänsyn till arbetstidens längd vore bättre att använda beröringsfria lasergivare för att mäta plastisk krympning. Beröringsfria givare kunde i sånt fall mäta deformationen medelst speglar som placeras på små konsoler på plastplattor på den färskna nygjutna betongytan på ömse sidor om det förväntade läget för sprickan.

5.5 Blockering av rörelser

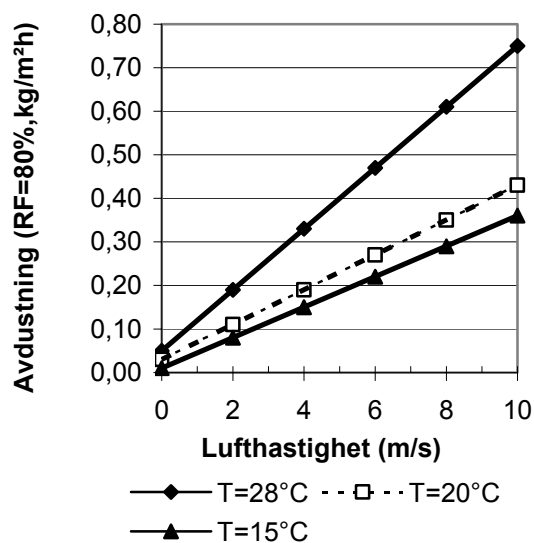
I samband med gjutning av krympriggarna låstes mätblocket i änden av riggen mekaniskt med en skruv för att förhindra att betongen plastiskt sköt på mätblocket i riktning mot LVDT-givarna. En timme efter gjutning lossades den mekaniska skruvförankringen av mätblocket i änden av krympriggen. I samband med att skruven lossades uppstod en liten vibration och en liten horisontell rörelse hos mätblocket.



Figur 5.5 – Avdunstning vid 20 °C.



Figur 5.6 – Avdunstning vid RF = 50%.



Figur 5.7 – Avdunstning vid RF = 80%.

Rörelse då mätblocket lossades komparerades vid den påföljande datorbehandlingen så att läget för mätblocket blev detsamma före som efter det att skruven hade lossats (mätintervall 5 min.). Av ett rent förbiseende låstes dessutom ett mätblock vid ett tillfälle av betongspill på dess yta. Detta kan även ha inträffat vid nästkommande gjutning till följd av att betongrester kan ha kommit in mellan mätblocket och dess bygel. En reflektion var således att det krävs ett skydd av mätutrustningen under gjutning så att utrustningen inte utsätts för betongspill, vilket förhindrar de deformationer som riggen är avsedd att mäta. Även deformationen av betongen i mättriggen kan ha blockerats. Vid ett tillfälle spilldes betong även på sidorna av riggen ovanpå denna varför rörelser hos betongen i riggen förmodligen delvis hindrades genom att betongen häftade vid riggen. Detta är dock inte säkerställt eftersom en spricka samtidigt utbildades i kanten mellan riggen och den utspillda betongen. Mättriggen var i övrigt inklädd med teflon för att minska friktionen mot riggens kanter. Slutligen skedde troligen även en blockering av betong i krympplattan. Krympplattor kläddes ej in med teflon varför rörelsen mellan förankringseggarna på avståndet 0.38 m kan ha hindrats efterhand som krympplatta erhöll defekter i ytan. Även krympplattor bör således kläs med teflon (utom förankringseggarna). I annat fall blir längden på vilken den plastiska krympningen utvecklas inte 0.38 m utan mindre, vilket ger en större krympning i förhållande till sprickvidden än om förankringen sker på avståndet 0.38 m.

5.6 Kalibrering

Tryckpressen kalibrerade tre år före provningen med mätnoggrannheten +2, -0 MPa. Tryckpressen visade således ca 1 MPa för hög påkänning hos betongen vid brott vilket fel försumrades. RF och temperatur mättes kontinuerligt med en fast RF- och temperaturmätare i klimatrummet. Denna utrustning hade i sin tur inte kalibrerats på flera år. Det var ej heller möjligt att beräkna medelvärdet på uppmätt temperatur utan denna erhöles medelst ett diagram till $19.5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vidare bedömdes uppmätt RF medelst ett mätdiagram till $\text{RF} = 60\% \pm 5\%$ i det aktuella klimatrummet. Mättekniskt var klimatrummet mycket stabilt över året mätt med samma okalibrerade RF-givare. RF-givare för betong, Vaisala, HMP44, kalibrerades rutinmässigt i en ånggenerator inom tre

mån. före det att mätningen utfördes. Ånggeneratorn var i sin tur kalibrerad hos tillverkaren i Phoenix inom 1 år från kalibreringstillfället. Noggrannheten i RF-mätningarna anses vara $\pm 1.5\%$ RF. Slutligen kalibrerades LVDT-givarna med en Mitutoyo mikrometer inom ett halvt år från mättillfället. Noggrannheten i LVDT-mätningen låg på $\pm 5\text{ }\mu\text{m}$, dvs. vid mätlängden 0.3 m på $\pm 0.017\%$, eller vid mätlängden 0.38 m på $\pm 0.013\%$, vilket får anses vara tillräckligt.

5.7 Temperaturutvidgningskoefficienten, α

Temperaturutvidgningskoefficienten, $\alpha = 0.01\%/^{\circ}\text{C}$, antogs vid detta försök baserat på omfattande mätningen mellan $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ och $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\alpha = 0.095\%/^{\circ}\text{C}$) [63]. Senare försök har dock visat att α för cementpasta och betong var olika beroende av pormättnadsgraden, P_m , ålder och RF, Tabell 5.2 [64-67]. Av en tillfällighet låstes ett mätblock i en mättrigg i ytan vid dessa försök, Figur 4.34. Deformationen mättes på 20 mm och 70 mm djup från ytan. Beräknat med $\alpha = 0.01\%/^{\circ}\text{C}$ erhöles en mycket liten deformation i ytan under förutsättning av plana tvärsnitts bibehållande. Beräknat med såväl $\alpha = 0.007\%/^{\circ}\text{C}$ som $\alpha = 0.013\%/^{\circ}\text{C}$ erhöles större avvikelser från ett låst läge i ytan än med $\alpha = 0.01\%/^{\circ}\text{C}$ varför $\alpha = 0.01\%/^{\circ}\text{C}$ torde ha varit tillämpligt i dessa försök med aktuell betong (38max18ideal, Appendix). Det bör understrykas att såväl mätblocket (utfört i aluminium) som mättriggen (utförd i rostfritt stål) kylde effektivt av luften med en hastighet av 4 m/s samt temperaturen $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Utvidgning av mättriggen i sig själv eller mätblocket i sig självt torde således inte ha givit upphov till fel i uppmätt deformation utan storleken på α var avgörande för eventuella fel.

Tabell 5.2 - Temperaturutvidgningskoefficienten, α , för cementpasta och betong versus pormättnadsgraden, P_m , ålder ($d = \text{dygn}$) och RF.

Material	$P_m = 0.88$	$P_m = 0.95$	$P_m = 1$
Cementpasta, 1 d			0.010
Cementpasta, 40 d	0.022	0.013	
Betong, 1 d			0.007
Betong, 80 d	0.011		0.007

6. ANALYS OCH DISKUSSION

6.1 Betong, hållfasthet och RF

Om optimal partikelfördelning används kan SKB proportioneras med datorhjälp i stort sett i slutgiltig form. Det är endast mängden flytmedel som måste kompletteras genom praktiska försök [57-58,61]. Traditionellt definieras betongsammansättningen som fördelningen mellan grus och sten vilket dock inte är tillämpligt för SKB. Ett bättre sätt att definiera SKB var med partikelfördelningen i den färska betongen. Tabell 6.1 och Figur 6.1 visar konstanter för partikelfördelning enligt ekv. (4.1) för NB, SKB och SKB med fibrer (polypropylenfibrer, 2 kg/m³,f) [68-77]. Medelkornstorlek är mindre för NB än för SKB, 38% passerande mängd vid 1 mm för NB mot 48% passerande mängd vid 1 mm för SKB. Även exponenten för en potentiell lutning på passerande mängd material i partikelfördelningen var större för SKB än för NB, 0,22 vid passerande mängd för NB mot 0,25 vid passerande mängd för SKB. Det krävs nämligen mer fint material i SKB än i NB i syfte att undvika separation.

Tabell 6.1 - Konstanter för partikelfördelning enligt ekv. (4.1) för NB, SKB och SKB med fibrer (polypropylenfibrer, 2 kg/m³,f)

Konstant	a	b
NB K30	0.38	0.32
NB K60	0.38	0.24
NB K90	0.38	0.2
NB K120	0.38	0.18
NB K150	0.38	0.16
SKB max 8	0.53	0.26
SKB max 18	0.46	0.24
SKB K30	0.47	0.27
SKB K60	0.47	0.24
SKB K30f	0.48	0.26
SKB K60f	0.48	0.23
Medelvärde NB	0.38	0.22
Medelvärde SKB	0.48	0.25

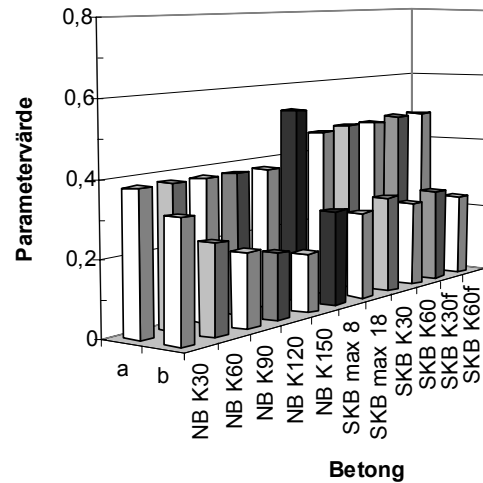
6.2 Hållfasthet och relativ fuktighet

Figureerna 6.2-6.3 visar hållfasthet och relativ fuktighet, RF, vid 28 dygns ålder. Följande generella samband erhöles för förseglade prover (f_c betecknar tryckhållfasthet (MPa)):

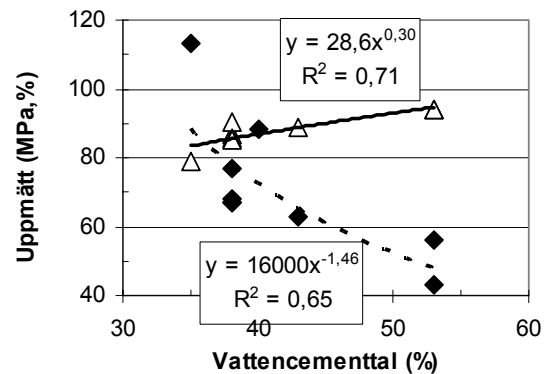
$$f_c = 16000 \cdot (vbt)^{-1.46} \quad \{35 < vbt < 55\% \} \quad (6.1)$$

$$RF = 28.6 \cdot (vbt)^{0.30} \quad \{35 < vbt < 55\% \} \quad (6.2)$$

$$RF = 200 (f_c)^{-0.19} \quad \{40 < f_c < 120 \text{ MPa} \} \quad (6.3)$$

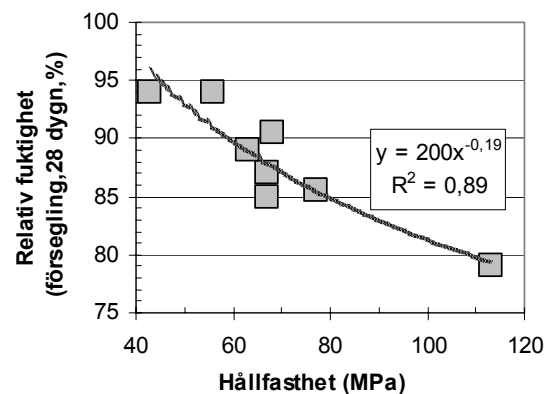


Figur 6.1 - Konstanter för partikelfördelning enl. ekv. (4.1). f = polypropylenfibrer, 2 kg/m³.



◆ Hållfasthet (MPa) △ Relativ fuktighet (%)

Figur 6.2 - Hållfasthet och temperatur vid 28 dygns ålder för förseglade prover.



Figur 6.3 - Relativ fuktighet versus hållfasthet vid 28 dygns ålder för förseglade prover.

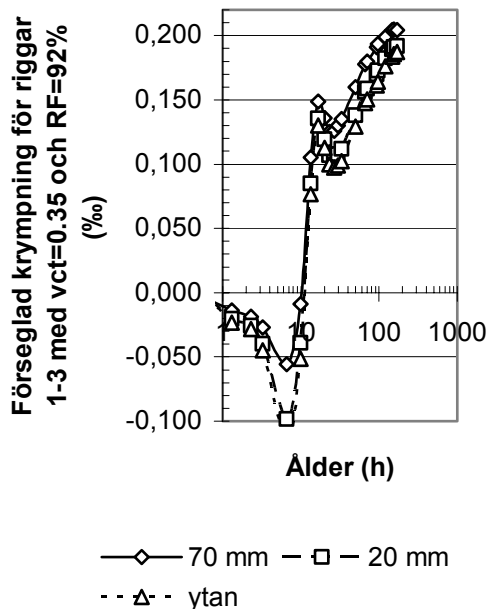
6.3 Fri krympning och plastisk

6.3.1 Betong 35max2

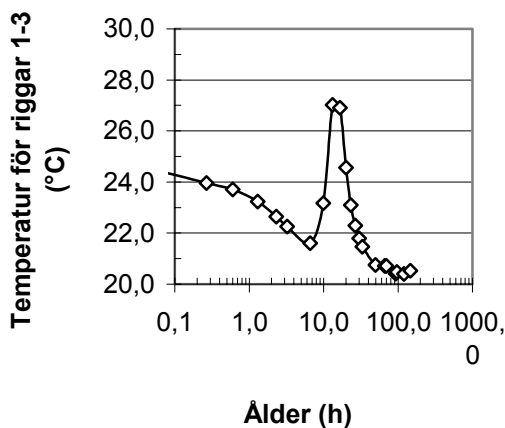
Figur 6.4 visar förseglad medelkrympning för riggar 1-3 för betong med $v_{ct}=0.35$ vid $RF=92\%$. Figur 6.5 visar medeltemperaturen. Inledningsvis expanderade betongen i ytan till följd av att blödningsvatten ansamlades under förseglingen. Först efter 10 h uppstod autogen krympning med resultat enligt Tabell 6.2.

Tabell 6.2 –Krympning hos betong 35max2.

Ålder (dygn)	Förseglat (‰)
1.0	0.100
2.1	0.129
2.9	0.150
4.0	0.164
5.0	0.176
6.1	0.184
7.1	0.187



Figur 6.4 - Förseglad medelkrympning.



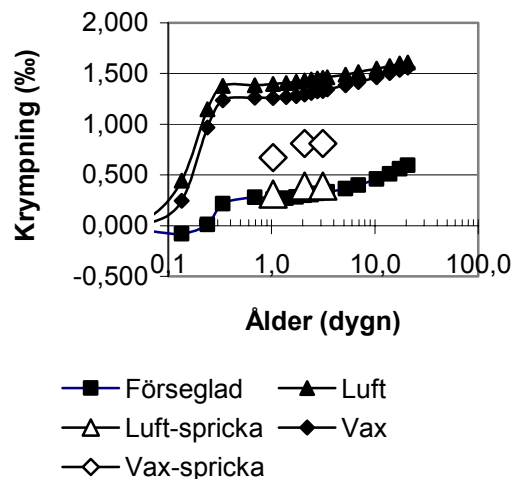
Figur 6.5 - Medeltemperaturen.

6.3.2 Betong 38max8

Tabell 6.3 och Figur 6.6 visar en sammanställning av krympning fram till 21 dygns ålder. Vaxbeläggning hade en obetydligt inverkan på krympningen på sikt men även efter 1 dygn. En jämförelse mellan Tabellerna 6.2 och 6.3 visar detta. Vid $v_{bt} = 0.35$ erhöles krympningen 0.100‰ efter 1 dygn (omgivnings- $RF=92\%$) medan 0.232‰ erhöles med $v_{bt}=0.38$ efter 1 dygn. Resultatet borde ha varit det omvända dvs. större förseglad (autogen) krympning vid $v_{bt} = 0.35$ än vid $v_{bt} = 0.38$. Uppmätt krympning i platta (plastisk) och rigg (fri) stämde ej alls överens. Troligen var krympningen i plattan mycket mindre än i riggen eftersom plattan ej hade infordrats med teflon vilket var fallet för riggen. Plastisk krympning startade tidigare för den vaxbelagda provkroppen vilket kan förklara varför sprickan blev större än för det lufthärdade provet.

Tabell 6.3 – Krympning, till 3 dygn (‰).

Ålder (dygn)	Förseglad	Luft	Luft-spricka	Vax	Vax-spricka
0.003	0.000	-0.023		0.000	
0.03	0.000	-0.027		-0.015	
0.07	-0.053	0.083		0.025	
0.14	-0.081	0.443		0.245	
0.24	0.011	1.147		0.966	
0.34	0.216	1.379		1.236	
0.69	0.280	1.385		1.261	
1.0	0.260	1.398	0.310	1.259	0.67
1.4	0.271	1.408		1.266	
1.7	0.284	1.419		1.276	
2.1	0.298	1.432	0.390	1.293	0.81
2.4	0.306	1.442		1.308	
2.8	0.317	1.452		1.325	
3.1	0.324	1.458	0.390	1.328	0.81



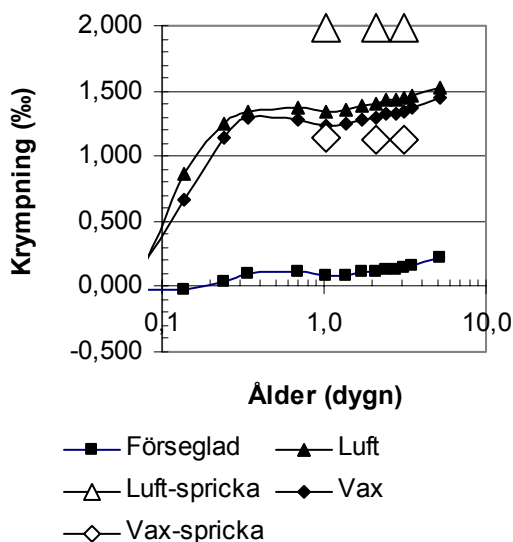
Figur 6.6 - Krympning hos betong 38max8.

6.3.3 Betong 38max8ideal

Tabell 6.4 och Figur 6.7 visar krympning fram till 5 dygns ålder. Vaxbeläggning hade liten inverkan på den fria krympningen. Förseglingen var mer effektiv i detta fall eftersom krympningen ökade obetydligt med tiden, jfr Tabellerna 6.2 och 6.4. Vid vbt=0.35 erhöles krympningen 0.100‰ efter 1 dygn (RF=92%) och 0.083‰ vid vbt=0.38. Resultatet är logiskt dvs. större förseglad (autogen) krympning vid vbt = 0.35 än vid vbt = 0.38. Jämfört med autogen krympning vid vbt = 0.38 var denna mindre med ideal partikelfördelning i betongen än hos en betong med partikelsprång. Krympning i platta (plastisk) och rigg (fri) stämde väl överens med tanke på mätnoggrannheten.

Tabell 6.4 - Krympning till 5 dygns ålder (‰).

Ålder (dygn)	Förseglad	Luft	Luft-spricka	Vax	Vax-spricka
0.003	0.000	-0.006		0.000	
0.03	-0.002	-0.013		-0.007	
0.07	-0.018	0.030		0.092	
0.14	-0.013	0.865		0.659	
0.24	0.045	1.261		1.144	
0.34	0.112	1.355		1.289	
0.69	0.122	1.372		1.273	
1.0	0.097	1.354	1.980	1.234	1.140
1.4	0.103	1.366		1.251	
1.7	0.125	1.393		1.278	
2.1	0.128	1.411	1.990	1.292	1.120
2.4	0.146	1.433		1.320	
2.8	0.150	1.439		1.333	
3.1	0.156	1.450	1.990	1.347	1.120
3.5	0.169	1.465		1.366	
5.2	0.234	1.533		1.449	



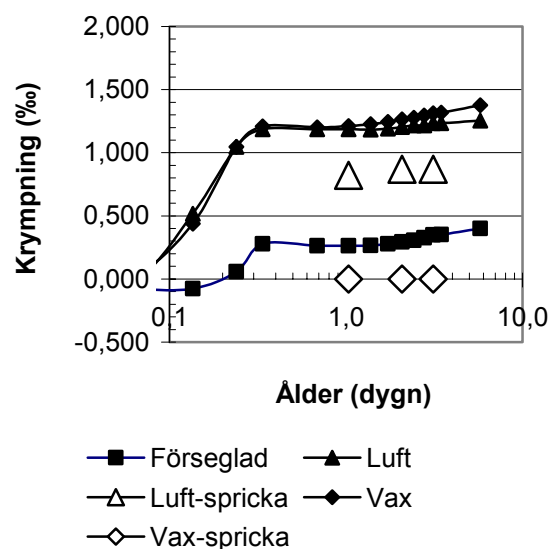
Figur 6.7 – Krympning, betong 38max8ideal.

6.3.4 Betong 38max18

Tabell 6.5 och Figur 6.8 visar krympning fram till 6 dygns ålder. Vaxbeläggning hade liten inverkan på den fria krympningen. Förseglingen var troligen inte effektiv i detta fall eftersom krympningen ökade betydligt med tiden, jfr Tabellerna 6.2 och 6.5. Vid vbt = 0.35 erhöles krympningen 0.100‰ efter 1 dygn (omgivnings-RF=92% samt 0.264‰ vid vbt=0.38. Resultatet är ologiskt dvs. större förseglad krympning vid samma vbt = 0.38 och större ballastdiameter, 18 mm resp. 8 mm. Uppmätt krympning i platta och rigg stämde väl överens med tanke på noggrannheten, när spricka uppstod. Vax föreföll dock att förhindrade sprickuppkomst i detta fall, jfr Figurerna 6.7 och 6.8.

Tabell 6.5 - Krympning till 6 dygns ålder (‰).

Ålder (dygn)	Förseglad	Luft	Luft-spricka	Vax	Vax-spricka
0.010	0.000	0.000		-0.001	
0.03	-0.001	0.000		-0.019	
0.07	-0.077	0.007		0.044	
0.14	-0.077	0.517		0.437	
0.24	0.057	1.047		1.047	
0.34	0.277	1.185		1.210	
0.69	0.264	1.186		1.202	
1.0	0.264	1.187	0.820	1.213	0
1.4	0.266	1.185		1.227	
1.7	0.278	1.192		1.245	
2.1	0.293	1.203	0.870	1.264	0
2.4	0.306	1.217		1.277	
2.8	0.326	1.217		1.294	
3.1	0.350	1.235	0.870	1.314	0
3.5	0.353	1.235		1.317	
5.8	0.400	1.256		1.377	



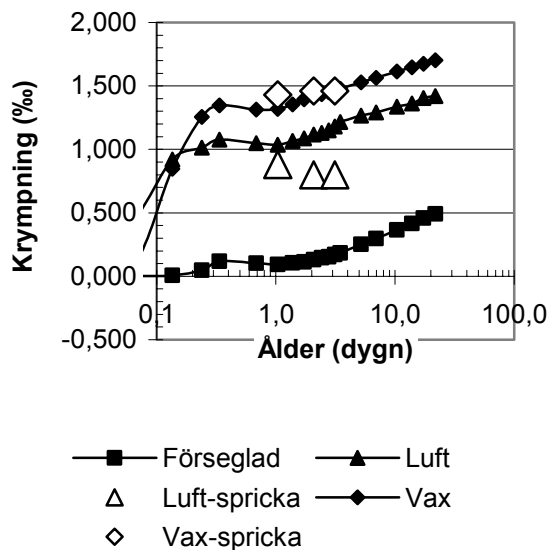
Figur 6.8 – Krympning, betong 38max18.

6.3.5 Betong 38max18ideal

Tabell 6.6 och Figur 6.9 visar krympning fram till 6 dygns ålder. Vaxbeläggning hade liten inverkan på den fria krympningen. Förseglingen var effektiv i detta fall eftersom krympningen ökade obetydligt med tiden, jfr Tabellerna 6.4 och 6.6. Vid vbt=0.38 erhöles krympningen 0.083‰ efter 1 dygn (max 8 mm ballast) och 0.062‰ med max 18 mm ballast. Resultatet är logiskt dvs. mindre förseglad (autogen) krympning med 18 mm ballast än med 8 mm ballast vid vbt = 0.38. Autogen krympning vid vbt = 0.38 och 18 mm ballast var mindre med ideal partikelfördelning i betongen än med partikelsprång. Plastisk krympning och fri stämde väl överens med tanke på mätnoggrannheten.

Tabell 6.6 - Krympning till 6 dygns ålder (‰).

Tid (dygn)	Förseg-lad	Luft	Luft-spricka	Vax	Vax-spricka
0.003	-0.001	0.000		-0.001	
0.03	0.006	0.130		0.003	
0.07	0.003	0.456		0.107	
0.14	0.007	0.920		0.848	
0.24	0.046	1.013		1.256	
0.34	0.118	1.076		1.347	
0.69	0.103	1.049		1.314	
1.0	0.093	1.036	0.880	1.320	1.430
1.4	0.106	1.068		1.354	
1.7	0.114	1.086		1.394	
2.1	0.130	1.116	0.800	1.415	1.460
2.4	0.145	1.130		1.435	
2.8	0.154	1.150		1.449	
3.1	0.172	1.179	0.800	1.463	1.460
3.5	0.185	1.214		1.477	
5.2	0.252	1.267		1.528	



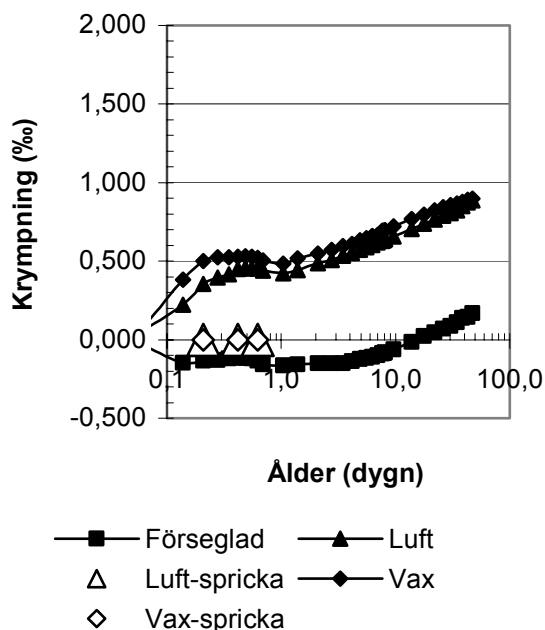
Figur 6.9 – Krympning, betong 38max18ideal.

6.3.6 Betong 43max18

Tabell 6.7 och Figur 6.10 visar krympning fram till 47 dygns ålder. Viss expansion uppstod inledningsvis vid förseglad krympning till följd av att blödningsvatten fanns kvar på ytan av betongen före försegling. Blödningsvattnet gjorde att plastiska krympsprickor undveks.

Tabell 6.7 - Krympning till 47 dygn (‰).

	Förseg-lad	Luft	Luft-spricka	Vax	Vax-spricka
0.001	-0.010	0.000		0.000	
0.01	-0.003	0.001		0.000	
0.01	-0.006	0.000		-0.013	
0.03	-0.006	0.006		-0.029	
0.05	-0.001	0.042		-0.035	
0.07	-0.048	0.077		0.066	
0.14	-0.148	0.221		0.342	
0.21	-0.132	0.354	0.000	0.465	0.000
0.28	-0.130	0.395		0.496	
0.35	-0.121	0.416		0.500	
0.42	-0.115	0.448	0.000	0.512	0.000
0.49	-0.116	0.458		0.518	
0.55	-0.119	0.454		0.515	
0.62	-0.135	0.452	0.000	0.511	0.000
0.69	-0.157	0.441		0.494	
1.0	-0.164	0.424		0.466	
1.4	-0.158	0.444		0.498	
2.1	-0.152	0.487		0.525	
2.8	-0.149	0.506		0.547	
3.5	-0.149	0.534		0.572	
4.2	-0.136	0.552		0.583	
4.9	-0.122	0.572		0.607	
5.6	-0.117	0.589		0.622	
6.3	-0.110	0.604		0.636	
6.9	-0.098	0.619		0.641	
7.6	-0.089	0.630		0.664	
7.7	-0.087	0.628		0.669	
7.8	-0.086	0.634		0.663	
7.8	-0.086	0.635		0.666	
7.9	-0.085	0.635		0.671	
8.0	-0.083	0.639		0.670	
8.1	-0.083	0.640		0.673	
9.7	-0.063	0.657		0.695	
13.9	-0.016	0.705		0.746	
17.8	0.023	0.737		0.769	
21.9	0.047	0.764		0.798	
26.1	0.071	0.787		0.816	
30.3	0.088	0.806		0.832	
34.5	0.111	0.824		0.842	
38.6	0.139	0.851		0.852	
42.8	0.143	0.875		0.869	
47.0	0.167	0.886		0.878	



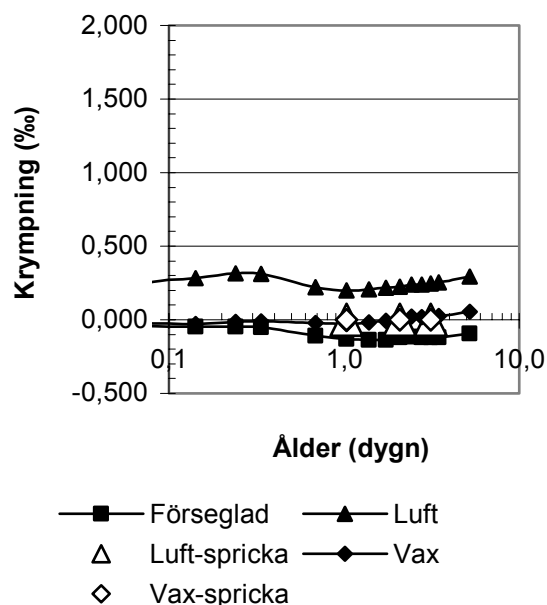
Figur 6.10 – Krympning, betong 43max18.

6.3.7 Betong 53max18

Tabell 6.8 och Figur 6.11 visar krympning fram till 5 dygns ålder. Expansion uppstod vid förseglad krympning till följd av att blödningsvatten fanns kvar på ytan av betongen före förseglning. Blödningsvattnet gjorde också att plastiska krympsprickor helt undveks.

Tabell 6.8 - Krympning till 47 dygn (%).

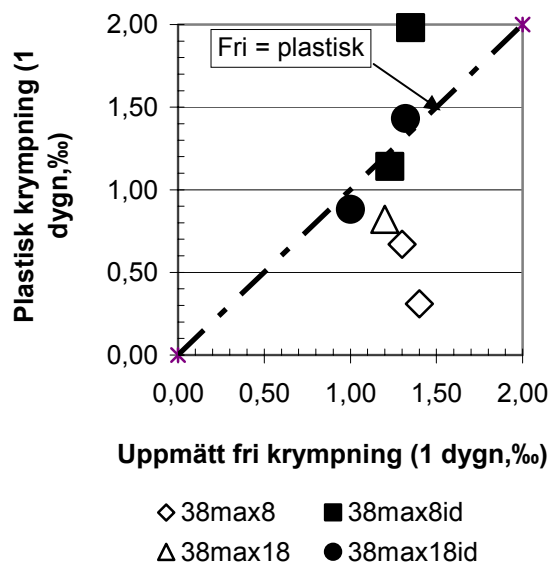
Ålder (dygn)	Förseglad	Luft	Luft-spricka	Vax	Vax-spricka
0,00	0,000	0,001		0,000	
0,03	-0,003	-0,018		-0,014	
0,1	-0,039	0,231		-0,022	
0,1	-0,047	0,283		-0,031	
0,2	-0,047	0,314		-0,016	
0,3	-0,050	0,313		-0,011	
0,7	-0,110	0,220		-0,020	
1,0	-0,131	0,200	0,000	-0,028	0,000
1,4	-0,137	0,208		-0,018	
1,7	-0,137	0,216		-0,008	
2,1	-0,118	0,226	0,000	0,005	0,000
2,4	-0,117	0,239		0,020	
2,8	-0,120	0,239		0,018	
3,1	-0,119	0,247	0,000	0,028	0,000
3,5	-0,121	0,253		0,027	
5,2	-0,095	0,295		0,053	



Figur 6.11 – Krympning, betong 53max18.

6.3.8 Samband mellan fri och plastisk krympning

Plastisk krympning uppstod mycket tidigt, efter ca 3 h, och föreföll sedan inte ha påverkats av uttorkning/fri krympning. Figur 6.12 visar plastisk krympning versus fri krympning efter 1 dygn. Visst samband mellan fri och plastisk krympning och störst krympning erhöles för betonger med ideal partikelfördelning. För betong med ideal partikelfördelning var mängden blödningsvatten var mindre än för betong med partikelsprång vilket troligen gjorde att krympningen startade tidigare och blev större då inge blödningsvatten fanns. Det fanns således inget signifikant samband mellan fri och plastisk krympning vid dessa försök.



Figur 6.12 - Plastisk krympning versus fri.

6.4 Inverkan av hållfasthet och RF

Det bör framhållas att uppmätt total krympning för studerad SKB (från gjutning) var stor i förhållande till vad som erhålls för normal betong, NB (från 1 dygns ålder). Total krympning för NB härdad i luft varierar mellan 0.4 och 0.7 ‰ medan här uppmättes dubbelt så höga värden efter 1 dygn! Detta berodde dels på att krympning normalt mäts från 1 dygns ålder, dels på en ökad pastamängd för SKB jämfört med NB – det finns lägre andel ballast i betongen för att motverka krympning. Figur 6.13 visar krympning som funktion av 1-dygns hållfastheten, f_1 . Förseglad krympning vid 1 dygn, ϵ_{s1} , erhöll följande samband (‰):

$$\epsilon_{s1} = 0.018 \cdot f_1 - 0.59 \quad \{R^2 = 0.58\} \quad (6.4)$$

För krympning i luft vid 1 dygn, ϵ_{a1} (RF = 60%), erhölls följande samband med 1-dygns hållfastheten, f_1 (‰):

$$\epsilon_{a1} = 0.046 \cdot f_1 - 0.57 \quad \{R^2 = 0.72\} \quad (6.5)$$

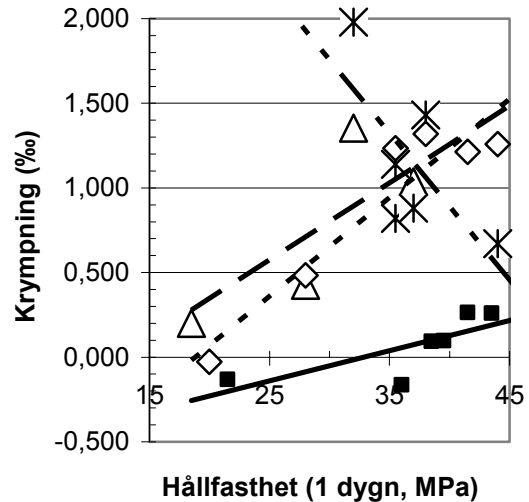
Plastisk krympning, ϵ_{p1} , var omvänt proportionell mot 1-dygns hållfastheten, f_1 :

$$\epsilon_{p1} = -0.087 \cdot f_1 + 4.36 \quad \{R^2 = 0.66\} \quad (6.6)$$

Det krävs en viss hållfasthet f_1 för att plastisk sprickbildning skall uppstå, $f_1 > ca 25$ MPa. Tidig hållfasthetstillväxt ger mindre plastisk sprickvidd eftersom tillstyvnad sker tidigare med tidig hållfasthetstillväxt än vid sen hållfasthetstillväxt. En retarderad hållfasthetstillväxt, t.ex. mycket flytmedel i betongen, ger därför större plastiska krympsprickor än en mindre mängd flytmedel i betongen [19]. Ett omvänt samband mellan hållfasthet och plastisk krympning är också en logisk förklaring till varför inget samband fanns mellan fri och plastisk krympning. För vaxbelagd betong erhöles något mindre krympning efter 1 dygn, ϵ_{v1} , i förhållande till 1-dygns hållfastheten, f_1 , vilket är logiskt (‰):

$$\epsilon_{v1} = 0.058 \cdot f_1 - 1.09 \quad \{R^2 = 0.89\} \quad (6.7)$$

- f_1 betecknar 1-dygns hållfastheten (MPa)
- ϵ_{a1} krympning i luft efter 1 dygn (‰)
- ϵ_{p1} plastisk krympning efter 1 dygn (‰)
- ϵ_{s1} förseglad krympning efter 1 dygn (‰)
- ϵ_{v1} krympning efter 1 dygn för vaxbelagd betong (‰).



■ Förseglad Δ Luft × Plastisk ◇ Vax

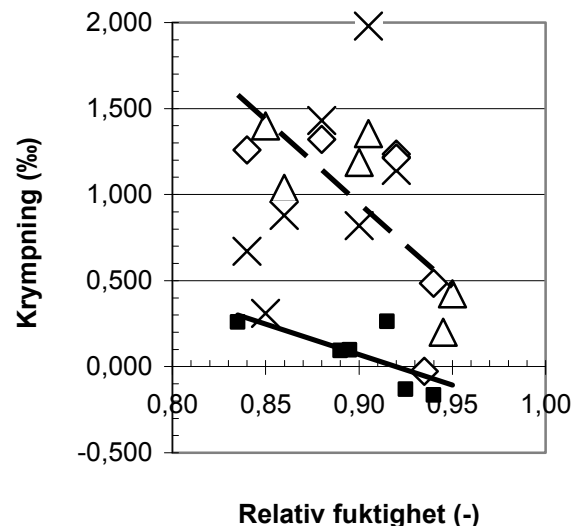
Figur 6.13 – Krympning vs 1-dygns hållfasthet.

Figur 6.14 visar tendenssamband mellan krympning och RF i betong efter 1 dygn (‰):

$$\epsilon_{s1} = -3.55 \cdot RF + 3.27 \quad \{R^2 = 0,51\} \quad (6.8)$$

$$\epsilon_{a1} = -9,695 \cdot RF + 9,675 \quad \{R^2 = 0,64\} \quad (6.9)$$

- RF betecknar relativa fuktigheten (-)
- ϵ_{a1} krympning i luft efter 1 dygn (‰)
- ϵ_{s1} förseglad krympning efter 1 dygn (‰)



■ Förseglad Δ Luft × Plastisk ◇ Vax

Figur 6.14 - Samband mellan krympning och RF i betongen efter 1 dygn (‰):

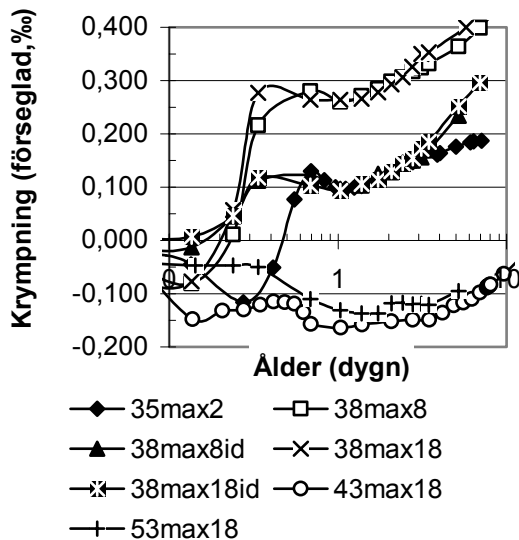
Krympningen blev mindre vid högre RF vilket är välkänt. Plastisk krympning äger rum vid RF = ca 97%, före RF-mätningen hade startats.

6.5 Inverkan av betongsammansättning på krympning vid ung ålder

6.5.1 Försegling (autogen krympning)

Figur 6.15 visar förseglad krympning versus ålder. Figur 6.15 visar att betongsammansättningen påverkade förseglad krympning vid ung ålder. Figur 6.16 och Tabell 6.9 visar partikelfördelning för betongerna, konstanter a och b enligt ekv. (4.1) samt tillstyvnadstidens slut. Betong 35max2 var säregen med annan ballasttyp och annat flytmedel. Denna betong togs därför ej med i analysen. Följande påverkan av betongsammansättningen på krympning hos ung betong kan särskiljas ur Figur 6.15:

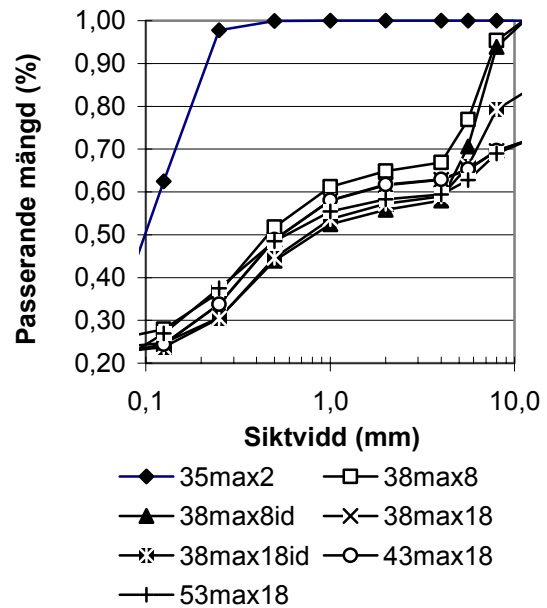
1. Betong med vbt ≤ 0.38 erhöll stor autogen krympning före tillstyvnadstidens slut
2. Betong med > 0.38 erhöll expansion
3. Betong med större finhalt (större konstant a) eller större tendens till partikelsprång (lägre konstant b) erhölls större autogen krympning före tillstyvnadstidens slut
4. Efter tillstyvnadstidens slut var krympningen i stort sett lika för betongerna.



Figur 6.15 - Förseglad krympning versus ålder. 35 = vbt (%), max8 = maximal ballaststorlek, id = ideal partikelfördelning.

Tabell 6.9 - Konstanter a och b enl. ekv. (4.1)

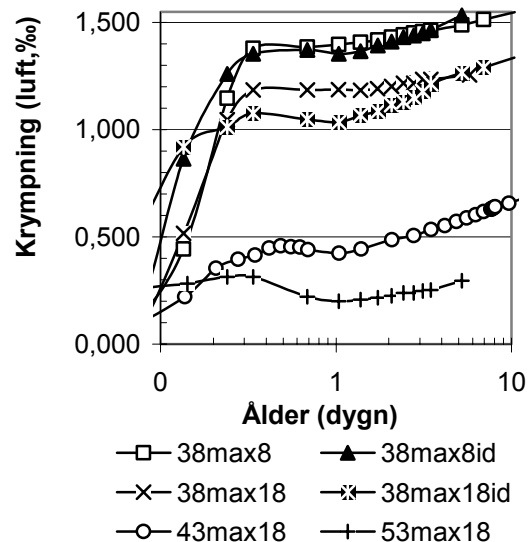
Betong	a	b	Tillstyvnadstid (h)
35max2	0.81	0.17	16
38max8	0.53	0.26	8
38max8id	0.48	0.28	8
38max18	0.46	0.23	8
38max18id	0.46	0.26	8
43max18	0.46	0.23	8
53max18	0.46	0.23	8



Figur 6.16 - Partikelfördelning för studerade betonger. 35 = vbt (%), max8 = maximal ballaststorlek, id = ideal partikelfördelning.

6.5.2 Lufthårdning (plastisk krympning)

Figur 6.17 visar krympning i luft versus ålder.

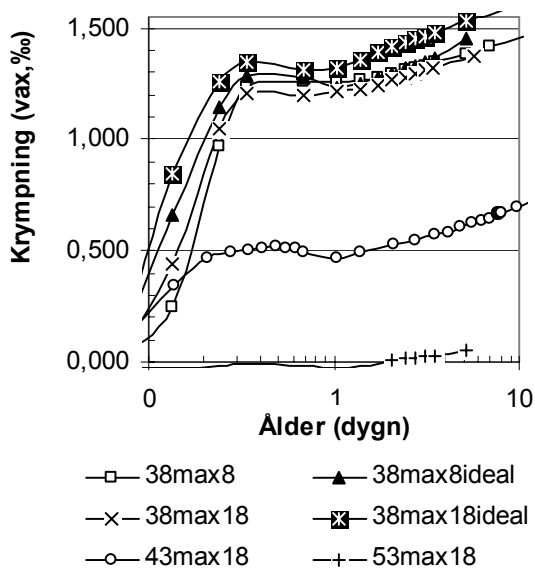


Figur 6.17 - Krympning i luft versus ålder.

Vbt inverkade på den plastiska krympningen. Enligt Figur 6.17 utgjorde plastisk krympning före tillstyvnadstidens slut, ca 8 h ålder, en stor av den totala krympningen, ca 1.1 ‰ för betong med vbt = 0.38 om autogen krympning enligt Figur 6.15 subtraheras. För betong med vbt = 0.43 uppgick plastisk krympning till ca 0.5‰ och för vbt = 0.53 till ca 0.25‰ eftersom expansion enligt Figur 6.15 skall adderas till värden enligt Figur 6.17. Vid vbt = 0.38 gav 8 mm ballast större krympning än 18 mm ballast.

6.5.3 Vaxhärdning (plastisk krympning)

Det fanns en klar inverkan av vbt på plastisk krympning även vid härdning med vax. Enligt Figur 6.18 utgjorde plastisk krympning före tillstyvnadstidens slut, ca 8 h ålder, en mycket stor av den totala krympningen, ca 1.1 ‰ för betong med vbt = 0.38 om autogen krympning enligt Figur 6.15 först subtraheras. För betong med vbt = 0.43 uppgick den plastisk krympningen till ca 0.5‰ eftersom expansion enligt Figur 6.15 skall adderas till värden enligt Figur 6.18. För vbt = 0.53 uppmättes ingen plastisk krympning eftersom vaxet i detta fall i viss mån hindrade fuktavgång från betongens yta, vilket kompenserade den expansion som annars skedde vid försegling av ytan. Uppmätt plastisk sprickvidd var större än uppmätt krympning både för luft- och vaxhärdning eftersom sprickvidden genom eggen i mätanordningen endast mättes i ytan av betongen, 25 mm ned. Krympningen mättes över hela tvärsnittshöjden på mätdjupen 20 mm och 70 mm för att sedan extrapoleras till ytan under förutsättning av plana tvärsnitts bestånd under krympförloppet. Sannolikt hade krympningsprofilen formen av ett andragsgradspolynom i likhet med en uttorknings-(RF)-profilen genom betong. En krympprofil genom betong skulle kunna mätas om tre LVDT-givare användes i stället för två med ett delat mätblock. Om krympningen beräknades i ytan enligt ett andragsgradspolynom skulle en större krympning erhållas i ytan än då plana tvärsnitt beräknades. Beräknad plastisk krympning i ytan torde med en krympningsprofil lik en uttorkningsprofil överensstämma med en uppmätt ytsprickvidd.



Figur 6.18 - Krympning med vax versus ålder.

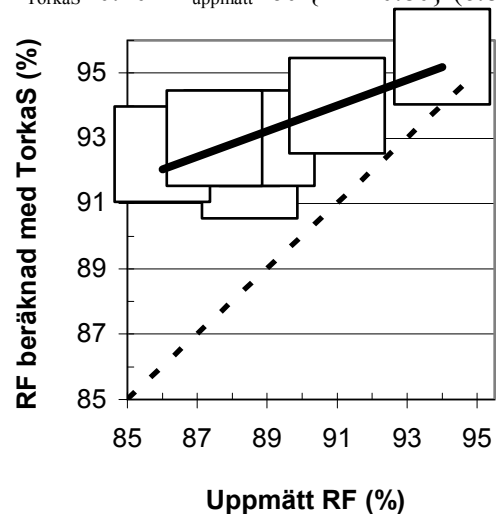
6.6 Uttorkningsberäkning med TorkaS

Även i detta fall gjordes parallella beräkningar av uttorkning med TorkaS och därefter en jämförelse med uppmätt krympning, i detta fall på halva plattjockleken vid ensidig uttorkning i stället för på 40% av betongen tjocklek. Resultaten borde således ge längre uttorkningstid (högre RF) vid mätningarna än de RF som beräknades. Följande förutsättningar användes för beräkningen med TorkaS:

- Mellanbjälklag
- Fukttätt underlag
- Gjutning 1/7-03
- Tätt hus den 1/7-03
- Styrd torkning 1/7-03
- Slut 4/7-03
- Betongtjocklek 10 cm
- Vbt och vattenhalt enligt Appendix 1
- Silikastoft 0%
- Torktemperatur, T 20 °C
- Torkklimat dygn 1 RF=60%, T=22 °C
- Torkklimat dygn 2 RF=60%, T=21 °C
- Torkklimat dygn 3 RF=60%, T=20 °C
- TorkRF 60%
- Vindhastighet 4 m/s (ingår ej i TorkaS)

Resultat av en beräkning med TorkaS ges i Figur 6.19, nämligen ca 7% för hög beräknad RF vid uppmätt RF = 85% samt ca 3,5% för hög beräknad RF vid uppmätt RF = 90%. Följande ekvation beräknades för avvikelser:

$$RF_{\text{TorkaS}} = 0.40 \cdot RF_{\text{uppmätt}} + 60 \quad \{R^2 = 0.80\} \quad (6.8)$$



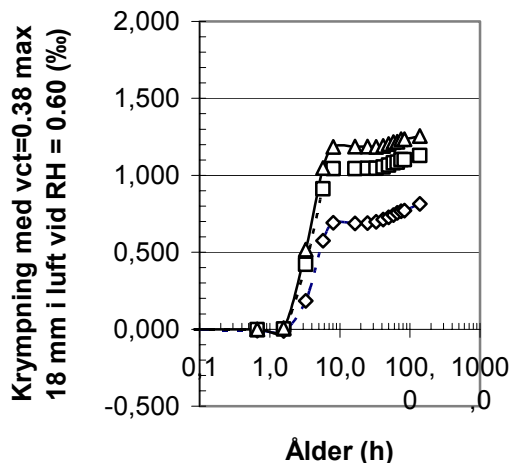
Figur 6.19 - Resultat av TorkaS-beräkning. Ca 7% för hög beräknad RF vid uppmätt RF = 85%. Ca 3,5% för hög beräknad RF vid uppmätt RF = 90%. Korrekt vid RF = 95%.

7. SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Följande slutsatser kunde dras av försöken och rekommendationer ges:

7.1 Mätteknik

Unik mätteknik användes i försöken, dels kunde den plastiska krympningsprofilen ända upp till betongytan fastställas, dels kunde parallell mätning av erhållen sprickvidd ske, Figur 4.28.



—◇— 70 mm —□— 20 mm —△— Ytan

Figur 4.28 – Krympning, 38 max 18, RF=60%.

7.2 Betongteknik

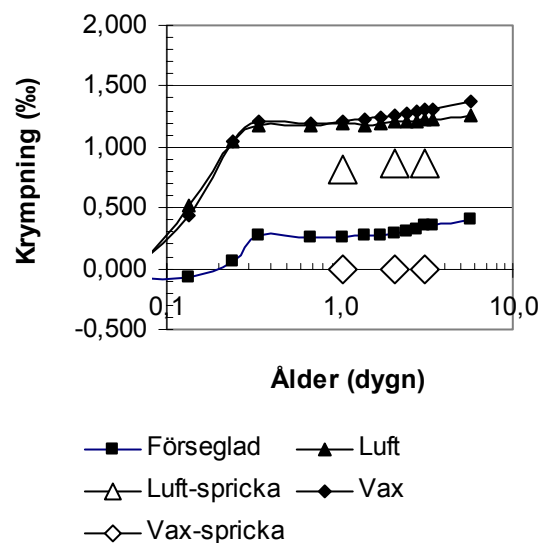
För att erhålla liten plastisk sprickvidd var det en fördel att använda SKB med stor ballaststorlek. En tendens till partikelsprång i gradering hos den färiska betongen gav mer blödningsvatten vilket i sin tur minskade uppkomst av plastiska krympsprickor jämfört med en ideal, lineärlogaritmisk, partikelfördelning. Betong till försök med plastisk krympning bör tillverkas i en sats i syfte att undvika tidsförskjutningar vid försökets start. Två fläktar bör användas i en vindtunnel med plastiska krympförsök för att minska variationer i lufthastighet.

7.3 Hållfasthet och RF

Plastiska krympsprickor uppstod ej hos betong med 28-dygns hållfasthet < 60 MPa (vbt \geq 0.43, 4 m/s, RF = 60%, 20 °C). När plastiska krympsprickor uppstod begränsades sprickvidden med en snabb hållfasthetstillväxt hos betongen. Övriga typer av krympning, autogen och total ökade med högre hållfasthet och minskade med högre RF hos betongen. Resultat av en beräkning med TorKaS gav ca 7% för hög beräknad RF vid uppmätt RF = 85% samt ca 3.5% för hög beräknad RF vid uppmätt RF = 90%.

7.4 Plastisk krympning före tillstyvnad

För att plastiska krympsprickor skulle uppstå krävdes att vbt var < 0.40 hos betongen. Med lufthastigheten 4 m/s, RF = 60% och 20 °C uppstod plastiska krympsprickor ca 3 h efter gjutning. Med hänsyn till arbetstidens längd bör därför av plastisk sprickvidd mätas automatiskt t.ex. med en beröringsfri laserutrustning mellan speglar vilka placeras på små plattor på betongytan på ömse sidor om den förväntade plastiska krympsprickan. Plastisk sprickvidd kunde minskas genom användning av 18 mm maximal ballast i stället för 8 mm ballast. Ideal partikelfördelning i betongen gav en fördubblad plastisk sprickvidd jämfört med en partikelfördelning i betongen med ett smärre partikelsprång i graderingen eftersom mängden blödningsvatten då blev större. Vbt inverkar på den plastiska krympningen. Plastisk krympning före tillstyvnadstidens slut, ca 8 h ålder, utgjorde en stor del av den totala krympningen, ca 1.1 ‰ för betong med vbt = 0.38 även om autogen krympning (förseglad provkropp) först subtraherades, Figur 6.8. För betong med vbt = 0.43 uppgick den plastiska krympningen till ca 0.5‰, för vbt = 0.53 till ca 0.25‰ eftersom expansion vid förseglad härdning först adderades (autogen expansion). Vaxbeläggning hade liten eller ingen inverkan på plastisk krympning vid vbt = 0.38, liten inverkan vid vbt = 0.43 samt förhindrade plastisk deformation vid vbt = 0.53. I ett fall förhindrades dock sprickor med vax, Figur 6.8. Bra sätt att undvika plastisk krympning vid vbt = 0.38 var att försegla betongen effektivare än med vax eller att bevattna betongen tidigt om detta är möjligt med hänsyn till krav på god ytfinish.

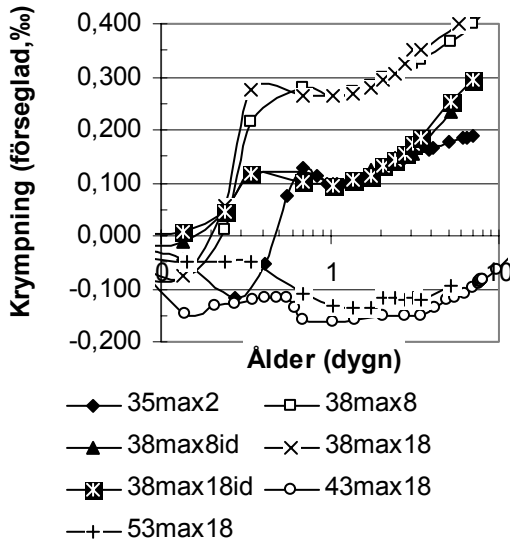


Figur 6.8 – Krympning, betong 38max18.

7.5 Autogen och total krympning

Betongsammansättningen påverkade den autogena (förseglade) krympningen kraftigt vid ung ålder, Figur 6.15. Betongsammansättningen inverkar även på den plastiska krympningen. Den plastiska krympning före tillstyvnadstidens slut, ca 8 h ålder, utgjorde en mycket stor av den totala krympningen, ca 1.1 ‰ för betong med vbt = 0.38, Figur 6.17. Följande påverkan av sammansättningen på krympning hos ung betong kunde särskiljas:

1. Betong med vbt ≤ 0.38 erhöll stor autogen krympning före tillstyvnadstidens slut
2. Betong med > 0.38 får autogen expansion
3. Betong med större finhalt eller större tendens till partikelsprång erhöll större autogen krympning före tillstyvnadstidens slut
4. Efter tillstyvnadstidens slut var krympningen i stort sett lika för betongerna.

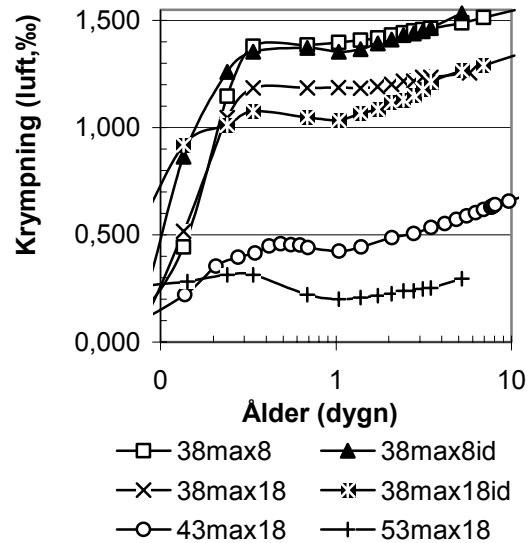


Figur 6.15 - Förseglad krympning versus ålder. 35 = vbt (%), max8 = maximal ballaststorlek, id = ideal partikelfördelning.

7.6 Rekommendationer

Följande rekommendationer kunde ges:

- SKB med så stor ballaststorlek som är gjutteknisk möjligt att använda, är att föredra i syfte att minska den plastiska sprickvidden
- Ett smärre partikelsprång i gradering hos den färska betongen ger mer blödningsvatten vilket i sin tur minskar uppkomsten av plastiska krympsprickor
- Uppkomst av plastiska krympsprickor begränsas genom användning av betong med 28-dygnshållfasthet < 60 MPa (vbt ≥ 0.43)



Figur 6.17 - Krympning i luft versus ålder.

- När plastiska krympsprickor väl har uppstått kan sprickvidden begränsas med en snabb hållfasthetstillväxt hos betongen
- Vaxbeläggning har liten eller ingen inverkan på plastisk krympning för betong med vbt = 0.38, liten inverkan för betong med vbt = 0.43 samt förhindrar plastisk deformation för betong med vbt = 0.53
- Plastisk krympning vbt = 0.38 undviks bäst genom effektivare förseglning av betongen än med vax eller genom bevattning tidigt.

7.7 Eventuella fortsatta försök

Eventuella fortsatta försök borde inriktas på att med hjälp av den här framtagna, unika mättekniken mäta den plastiska krympningsprofilen ända upp till betongytan och, parallellt, mäta den plastiska sprickvidden, helst då med lasertechnik. Betong till försök med plastisk krympning bör tillverkas i en sats i syfte att undvika tidsförskjutningar vid försökets start. Två fläktar bör användas i en vindtunnel med plastiska krympförsök för att minska variationer i luft-hastigheten. Följande parametrar bör studeras vid fortsatta försök med plastisk krympning:

- Avdunstning
- Blödningsvatten
- Fibertillsats
- Fillerhalt/typ
- Vbt
- Vindhastighet
- Viskositetsmedel

Även fältförsök bör utföras.

REFERENSER

1. Bertil Persson. Compatibility between Flooring Materials and Concrete. *Materials and Structures*. 35. 2002, 170-182.
2. Bertil Persson. *Bygg & Teknik 7/99*. Stockholm. 1999, 26-28.
3. Bertil Persson. Modern betong och filigranform förutsättningarna för ett rekordbygge i Malmö. *Husbyggaren 6/99*. 1999, 34-43.
4. Bertil Persson. Flytmedelsfri betong med glasfillerinblandning i snabbyggt malmöhus, *Husbyggaren 1/2000*. 2000, 26-29.
5. Bertil Persson. Självkompakterande betong – en tyst revolution inom byggandet. *Husbyggaren 2/2000*. 2000, 20-24.
6. Bertil Persson. SBUF-projektet: Samverkan mellan golvsystem och betong. *Betong 4/2000*. 2000, 22.
7. Bertil Persson. Sveriges billigaste bostadshus byggdes i betong. *Betong 2/2001*, 14-15.
8. Bertil Persson. Fel materialval leder till fukt och mögel. *Bygg & Teknik 5/01*. Stockholm. 2001, 58-59.
9. Bertil Persson. Undvik svartmögel och fukt – bygg med byggfuktfri betong. *Byggindustrin*. Stockholm. 19/2001, 12.
10. Bertil Persson. Hög lönsamhet med högpresterande betong. *Bygg & Teknik 07/2001*, 22-25.
11. Bertil Persson. Byggfuktfri betong 10 år. Föreningen Sveriges Byggnadsinspektörer. 2/2001, 27-28.
12. Bertil Persson. Hög betongkvalitet utesluter fuktproblem. *Husbyggaren 5/2001*, 10-14.
13. Bertil Persson. Självkompakterande betong ger kort omloppstid och rationell produktion. *Husbyggaren 6/2001*, 10-13.
14. Bertil Persson. Kompatibilitet mellan golvmaterial och betong – Effekt av produktionsmetoder på emissioner, fukt och karbonatisering. Rapport TVBM-7149. LTH Byggnadsmaterial, Lund. 2000, 133 sid.
15. Bertil Persson. Golvsystem på betong – fuktpåverkan, kemisk emission och vidhäftning. Rapport TVBM-7165, ISBN 91-631-1993-5, LTH Byggnadsmaterial, Lund, 2003, 157 sid.
16. Folker Wittmann, On the action of capillary pressure in fresh concrete, *CRR 6*, 1976.
17. Adrian Radocea. Porvattentryckförhållanden i ung cementpasta. Metoder, preliminära modeller och parameterstudier. Publikation, P-91:5. CTH Byggnadsmaterial. Göteborg, 1991, 139 sid.
18. Hans-Erik Gram, Properties of SCC - especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance, Första internationella RILEM-symposiet om SKB. Stockholm. Red.: Skarendahl och Peterson. 1999, 211-226.
19. Peter Friberg. Plastisk krympning hos självkompakterande betong. Rapport TVBM-5051, LTH Byggnadsmaterial, 2002, 60 sid.
20. Mats Rohde, Lars-Olof Nilsson, Sprickbildning på grund av plastisk krympning. Arbetsrapport, CTH Byggnadsmaterial. Göteborg, 2002.
21. Christer Ljungkrantz et al, § 6.1, § 9.1, § 9.2, *Betonghandboken Material*, 1994.
22. Jan Byfors, Plain Concrete at Early Ages. Report FO 3:80. The Swedish Cement and Concrete Research Institute, CBI. Stockholm. 1980.
23. İlker Bekir Topçu, Veysel Baran Elgün, Influence of concrete properties on bleeding and evaporation, *Cement and Concrete Research*, 2003 (godkänd för publicering).
24. Adam Neville, *Properties of Concrete*, Longman, 1981.
25. ACI Committee 201-2R, *Guide to Durable Concrete, Manual of Concrete Practice, Part 1*, 2000.
26. ACI Committee 305, Hot Weather Concreting, *ACI Material Journal*, 1991, 417-436.
27. Chengqing Qi, Jason Weiss. Improving the Plastic Shrinkage Cracking Resistance of Concrete through Using Fiber Reinforcement. *ACI Fall Meeting, Phoenix*, 2002.
28. ASTM C09.42.XX, Standard Test Method for Evaluating Plastic Cracking of Restrained Concrete, 2002, 17 pp.
29. Bertil Persson. Kvarvarande krympning i oarmerat betonggolv. Rapport U95.18 LTH Byggnadsmaterial, Lund. 1995, 5 sid.
30. Bertil Persson. A Nordtest Method for Verification of Self-desiccation in Concrete. *Cement and Concrete Research*. 31. 2001, 199-203.
31. Göran Hedenblad, Jesper Arfvidsson, TorikaS 1.0, SBUF och LTH Byggnadsfysik, Lund, 1999.

32. Bertil Persson. Nordtest för kontroll av självuttorkning hos betong. Bygg & Teknik 5/99. Stockholm. 1999, 5: 49-52
33. Bertil Persson. Nordtest för kontroll av självuttorkning hos betong. Bygg & Teknik 56/99. Stockholm. 1999, 6: 58-60.
34. Bertil Persson. Betonguttorkning med Byggcement. Bygg & Teknik 07/2000, 30-32.
35. Andreas Allansson, Dan Gren, Petter Flodén-Nilsson. Självuttorkning och torkning av betong. Laborationsuppgift. LTH Byggnadsmaterial. 2000, 19 sid.
36. E. J. Hansen; Kurt Kielsgaard Hansen; Bertil Persson, Concrete, hardened: Self-desiccation. Nordtest Method NT Build 490, Nordtest OY, Espoo, Finland. 1999, 8 sid.
37. Kurt Kielsgaard Hansen, Mette Geiker, A. Kjeldsen, P. Nygaard. Drying of Concrete. NCR. Helsingör. Utgivare Norsk betongförening. Box 2312. Solli. Oslo. Red.: Bager och Glavind. 2002, 283-285.
38. François Beltzung, Folker Wittmann. Influence of Cement Composition on Endogenous Shrinkage. Self-desiccation and Its Importance in Concrete Technology. Report TVBM3104. ISBN 9163119935. LTH Byggnadsmaterial. Red.: Bertil Persson, Göran Fagerlund. 2002, 113-126.
39. Bertil Persson. Deformationer hos husbyggnadsbetong – inverkan av produktionsmetoder på elasticitetsmodul, krypning och krympning. Rapport U99.19. LTH Byggnadsmaterial. 1999, 26 sid.
40. Bertil Persson. Deformationer hos husbyggnadsbetong – inverkan av produktionsmetoder på elasticitetsmodul, krypning och krympning”. Rapport TVBM3088 LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1999, 71 sid.
41. Peter Friberg, Peter Weywardt. Självuttorkning och torkning av betong. FK 2001. LTH Byggnadsmaterial. 2001, 11 sid.
42. Bertil Persson. Hög betongkvalitet utesluter fuktproblem. Husbyggaren 5/2001, 10-14.
43. Bertil Persson. Self-desiccation and Its Importance in Concrete Technology. Materials and Structures 30. 1997, 293-305.
44. Bertil Persson. Moisture in Concrete Subjected to Different Kinds of Curing. Materials and Structures 30. 1997, 533-544.
45. Petter Flodén-Nilsson. Kvalitetssäkring av fuktmätningar samt uttorkning av betong vid Barnkliniken, Universitetssjukhuset, Lund. Rapport TVBM-5047. LTH Byggnadsmaterial. 2000, 49 pp.
46. Bertil Persson. Golvsystem på betong – fuktpåverkan, kemisk emission och vidhäftning.” Rapport TVBM-7165, ISBN 91-631-1993-5, LTH Byggnadsmaterial, Lund, 2003, 157 sid.
47. David Lange. Personlig information. dlange@uiuc.edu .
48. Bertil Persson. Högrepresterande betong torkar även i vatten. Betong 92/1, 14-16.
49. Göran Hedenblad, Jesper Arfvidsson, TorikaS 2.0, SBUF och LTH Byggnadsfysik, Lund, 2002.
50. Andreas Abrahamsson, Kristian Tammo, Inverkan av regn och avjämningsmassa på uttorkning av betong, Rapport TVBM-5053, LTH Byggnadsmaterial, Lund, 48 sid.
51. Stefan Andersson, Grundrecept SKB3518650, SKB4518650, SKB5008650 och SKB5018650, Färdig Betong, Malmö, 2003.
52. Bertil Persson. Shrinkage and Creep of High-Performance Self-Compacting Concrete, HPSCC. ACI Journal. 2002, 17 sid. (insänd för publicering).
53. Bertil Persson. High Performance Self-Compacting Concrete (medförfattare). Proceedings of the 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete. University of Leipzig. Leipzig. 2002, 1273-1290.
54. Bertil Persson. Self Compacting Concrete with High Performance. Proceedings of the 18th Symposium on Nordic Concrete Research. Helsingör. Utgivare: Norsk betongförening. Oslo. 2002, 327-330.
55. Bertil Persson. Självkompakterande betong ger kort omloppstid och rationell produktion. Husbyggaren 6/2001, 10-13.
56. Bertil Persson, Shrinkage and Creep of High-Performance Self-Compacting Concrete, HPSCC. Uppdragsrapport U02.06. LTH Byggnadsmaterial. Lund, 32 sid.
57. Richard Andersson and Lars-Göran Sjökvist, Självkompakterande betong i prefabriceringsindustrin – en teknisk och ekonomisk analys. Rapport TVBM-5039. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1999, 48 sid.
58. Christer Dieden, Självkompakterande husbyggnadsbetong – sammansättning, hållfasthet och krympning. Rapport TVBM-

5040. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1999, 50 sid.
59. Augustin Pujol (Hugas), Mix Proportions and Properties of Self-Compacting Concrete. "Sammansättning och egenskaper hos självkompakterande betong." Rapport TVBM-5041. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1999, 56 sid.
 60. Mahmoud Charkas and Waad Fayli, Material- och produktionstekniska studier av självkompakterande betong med glasfiller. Rapport TVBM-5042. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1999, 80 sid.
 61. Bertil Persson. Ideal partikelfördelning i högpresterande betong. *Betong* 95/3. 1995. Stockholm, 6-8, 39.
 62. Øyvind Bjøntegaard, Tor Arne Hammer, Recommendation for Test Methods for AD and TD of Early Age Concrete, RILEM Technical Committee TC-DTD, 2003.
 63. Bertil Persson. Quasi-instantaneous and Long-term Deformations of High-Performance Concrete with Some Related Properties. Rapport TVBM-1016. ISBN 91-630-6969-5. LTH Byggnadsmaterial. Lund. 1998. 500 sid.
 64. Erik J. Sellevold, Øyvind Bjøntegaard, Coefficient of Thermal Expansion of Concrete: Effects of moisture, Bertil Persson. Self-desiccation and Chloride Migration. Proceedings of the Third International Seminar on Self-desiccation and Its Importance in Concrete Technology. Co-editor. Rapport TVBM-3104, LTH Byggnadsmaterial, Lund 2002, 67-76.
 65. Øyvind Bjøntegaard, Thermal Dilation and Autogenous Deformation as Driving Forces to Self-Induced Stresses in HPC, Doktorsavhandling, NTNU, Dec. 1999.
 66. Øyvind Bjøntegaard, Erik Sellevold, Interaction between Thermal Dilation and Autogenous Deformation in HPC, Materials and Structures, Vol.34, June 2001, pp 266-272.
 67. Øyvind Bjøntegaard, Erik J. Sellevold, Thermal Dilation and Autogenous Deformation, Proc. of the RILEM Int. Conf. on Early Age Cracking in Cementitious Systems, Red.: Konstantin Kovler, Arnon Bentur, Haifa, Israel, March 12 - 14, 2001, pp.63-70.
 68. Bertil Persson. Self-compacting Concrete at Fire Temperatures. Nordic Mini-Seminar on Concrete at Fire Temperatures. Ed.:C. Nielsen. 2003.
 69. Bertil Persson, Self Consolidating Concrete, SCC, subjected to environmental or mechanical loading, *ACI Journal*, 2003, 21 sid. (insänd för publicering).
 70. Bertil Persson, Self-Compacting Concrete at Fire Temperature, *Cement and Concrete Research*, 2003, 21 sid. (insänd för publicering).
 71. Bertil Persson. Shrinkage and Creep of High-Performance Self-Compacting Concrete, HPSCC. *ACI Journal*. 2002, 17 pp. (insänd för publicering).
 72. Bertil Persson. Fire Resistance of Self-Compacting Concrete, SCC, Materials and Structures, 2002, 20 sid. (godkänd för publicering).
 73. Bertil Persson. Självkompakterande betong, SKB, vid brandtemperatur. *Betong* 3/2003, 27-28.
 74. Bertil Persson. Hög fukt- och fillerhalt bakom brandspjälkning hos självkompakterande betong. *Bygg & Teknik*2003/06, 34-36.
 75. Bertil Persson. Brandspjälkning i betong kan undvikas. *Husbyggaren* 2/2003, 18-28.
 76. Bertil Persson. Självkompakterande betong motståndskraftig mot sprickbildning och brand. *Husbyggaren* 4/2002, 10-16.
 77. Bertil Persson. Förebygger plastfibrer brandspjälkning även hos självkompakterande betong? *Husbyggaren* 2/2002, 26-30.

APPENDIX

Appendix 1 – Partikelfördelning för delmaterial

Appendix 2 –Recept och vissa egenskaper för provade betonger

Appendix 3 – Partikelfördelning för betong

Appendix 4 – Risk för sprickor med avstånd 0.4 m vid varierande sprickvidd och innehåll av stålfibrer [27-28].

Appendix 5 – Mätanordning för plastisk krympsprickvidd hos betong [27].

Appendix 1 – Partikelfördelning för delmaterial

Siktvidd (mm)	16	11.2	8	5.6	4	2	1	0.50	0.25	0.125	0.063	0.032	0.016	0.008	0.004	0.002	0.001
Makadam 11-18 mm	0.80	0.04															
Makadam 4-8 mm	1	1	0.87	0.33	0.04	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01							
Grus 0-12 mm	1	0.78	0.55	0.48	0.40	0.31	0.23	0.14	0.08	0.03							
Singel 4-8 mm	1	1	1	1	0.99	0.75	0.53	0.30	0.07	0.02							
Makadam 2-4 mm	1	1	1	1	0.97	0.38											
Sand 0-4 mm	1	1	1	1	0.99	0.75	0.53	0.30	0.07	0.02							
Sand 0-2 mm	1	1	1	1	1	0.97	0.85	0.57	0.15	0.02	0.01						
Sand 0-1 mm	1	1	1	1	1	1	1	0.96	0.76	0.22							
Sand 0.1-1 mm	1	1	1	1	1	1	1	1	0.65	0.06							
Glasfiller	1	1	1	1	1	1	1	1	0.95	0.82	0.59	0.39	0.24	0.15	0.08	0.04	0.01
Kalkstenfiller L40	1	1	1	1	1	1	1	0.99	0.95	0.80	0.63	0.51	0.39	0.26	0.16	0.10	
Blandcement Fortico 5R	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.99	0.90	0.60	0.41	0.26	0.14	0.08
Byggement Slite	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.90	0.67	0.43	0.31	0.18	0.08

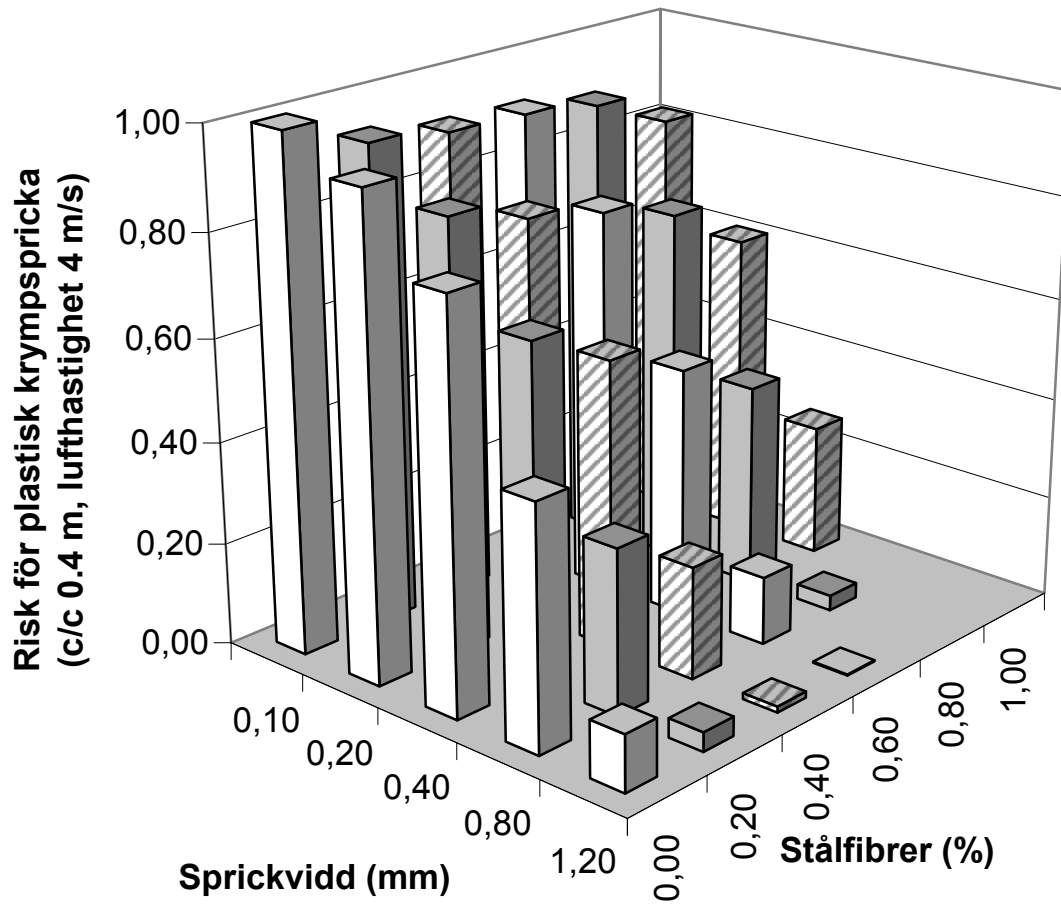
Appendix 3 – Partikelfördelning för betong

Siktvidd (mm)	16	11.2	8	5.6	4	2	1	0.5	0.25	0.125	0.063	0.032	0.016	0.008	0.004	0.002	0.001
35max2	1	1	1	1	1	1	1	0.999	0.978	0.624	0.255	0.208	0.154	0.100	0.071	0.042	0.020
35max8	1	0.968	0.856	0.790	0.658	0.649	0.560	0.495	0.378	0.274	0.249	0.221	0.150	0.102	0.064	0.035	0.018
38max8	1	0.954	0.769	0.669	0.628	0.616	0.580	0.488	0.365	0.279	0.252	0.217	0.160	0.103	0.072	0.042	0.020
38max8id	0.997	0.939	0.706	0.580	0.558	0.558	0.524	0.439	0.306	0.247	0.235	0.207	0.154	0.100	0.071	0.041	0.019
38max18	0.939	0.717	0.696	0.652	0.628	0.616	0.580	0.488	0.337	0.244	0.216	0.187	0.137	0.089	0.062	0.036	0.017
38max18id	0.964	0.831	0.792	0.661	0.589	0.573	0.537	0.446	0.305	0.237	0.224	0.197	0.146	0.095	0.067	0.039	0.019
40max8	1	0.968	0.856	0.790	0.658	0.658	0.560	0.495	0.378	0.272	0.246	0.218	0.148	0.101	0.063	0.035	0.017
43max18	0.940	0.718	0.697	0.653	0.629	0.617	0.581	0.489	0.337	0.244	0.216	0.187	0.137	0.089	0.062	0.036	0.017
53max18	0.940	0.716	0.690	0.627	0.594	0.583	0.554	0.485	0.375	0.269	0.189	0.159	0.116	0.075	0.053	0.031	0.014
53max18extra	0.940	0.716	0.690	0.627	0.594	0.583	0.554	0.485	0.375	0.269	0.189	0.159	0.116	0.075	0.053	0.031	0.014

Appendix 2 –Recept och vissa egenskaper för provade betonger (kg/m³, etc.)

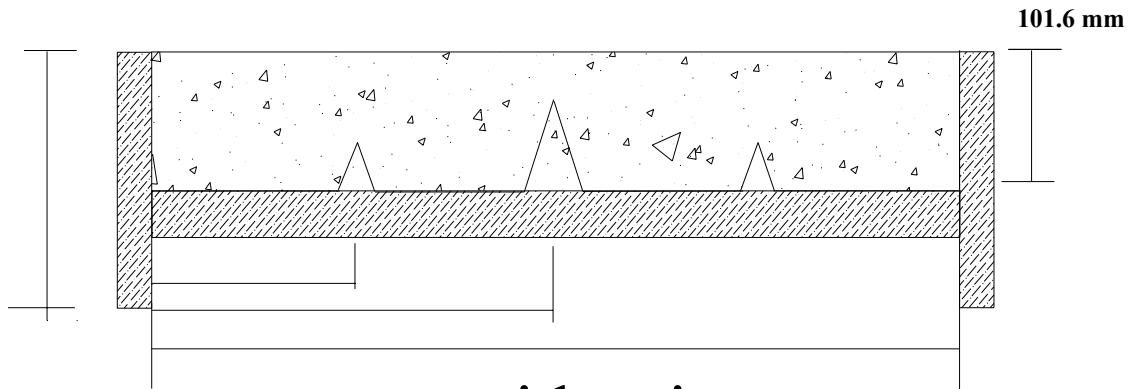
Beteckning (vbt – max partikelstorlek – fördelning)	35m2	35m8	38m8	38m8id	38m18	38m18id	40m8	43m18	53m18	53m18extra
Makadam 11-18 mm (Blentarp)					643	385		631	639	631
Makadam 4-8 mm (Blentarp)		747	952		178	538		174	251	248
Grus 0-2 mm (Norge)	1733									
Singel 4-8 mm (Lenzhard)		475					472			
Makadam 2-4 mm (Lenzhard)		206					205			
Sand 0-4 mm (Lenzhard)		627					621			
Sand 0-2 mm (Bösarp)		712	662	695	695	695		683	537	531
Sand 0-1 mm (Önnestad)		146	76	186	186	98		183	320	317
Sand 0.1-1 mm (kvarts)	303						302			
Glasfiller		78		59				58	61	60
Kalkstenfiller L40 (Nordkalk)	140						158			
Blandcement Fortico 5R	466						443			
Byggcement Slite		494	510	432	484	484		424	357	353
NORCEM Std cement	524									
Vatten	183	168	188	194	186	184	177	182	189	187
Flytmedel (Compac)		12.9	13.3	12.1	12.1	12.6		14.2	10	10
Flytmedel (Glenium)		9.1					16.4			
Flytmedel AD18 (Scanflux)	10.4									
Viskositetsmedel (Glenium)							5.1			
Densitet	2442	2388	2369	2398	2383	2388	2384	2339	2357	2330
Torr densitet	2260	2220	2181	2204	2197	2204	2207	2157	2168	2143
Cement + filler	524	606	572	510	491	484	601	482	418	413
Ballasandel	0.77	0.73	0.74	0.77	0.78	0.78	0.73	0.78	0.81	0.81
Flytmedel (%/cement)	1.98	1.50	2.26	2.61	2.46	2.60	3.58	2.95	2.39	2.42
Flytsättmått (mm)		740	665	750	635	720	740	670	670	670
Hållfasthet (förseglat,28d,MPa)	59	113	67	68	77	67	88.5	63	43	56
RF (förseglat,28d,%)	89.5	79	87	90.5	85.5	85	-	89	94	94

Appendix 4 – Risk för sprickor med avstånd 0.4 m vid varierande sprickvidd och innehåll av stålfibrer [27-28].

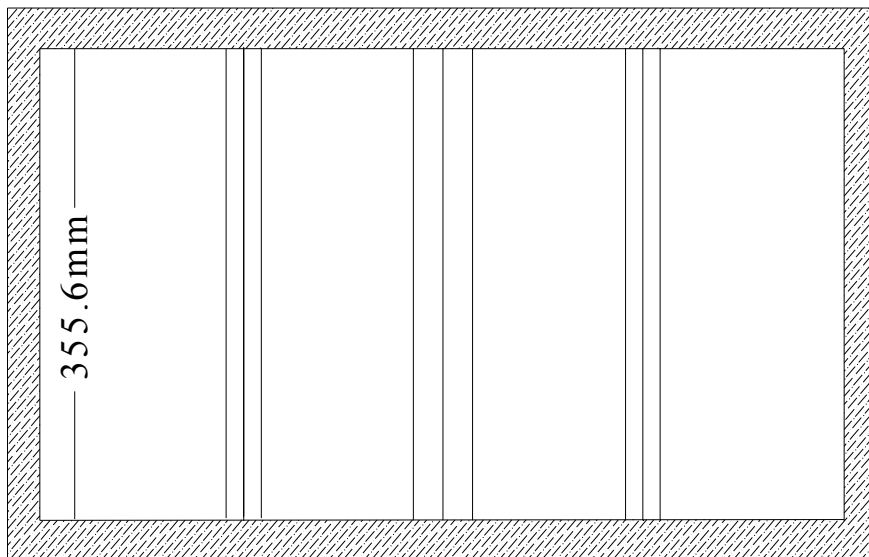




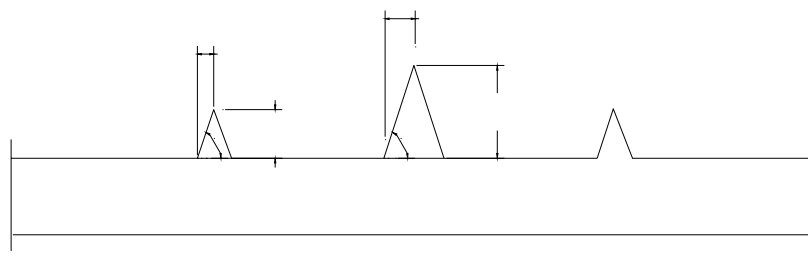
Appendix 5 – Mätanordning för plastisk krympsprickvidd hos betong [27].



side view



top view



stress riser geometry