



LUND UNIVERSITY

Deformationer hos husbyggnadsbetong : inverkan av produktionsmetoder på elasticitetsmodul, krympning och krypning

Persson, Bertil

1999

[Link to publication](#)

Citation for published version (APA):

Persson, B. (1999). *Deformationer hos husbyggnadsbetong : inverkan av produktionsmetoder på elasticitetsmodul, krympning och krypning*. (Rapport TVBM; Vol. 3088). 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

DEFORMATIONER HOS HUSBYGGNADSBETONG

**Inverkan av produktionsmetoder
på elasticitetsmodul, krympning
och krypning**

Bertil Persson

ISRN: LUTVDG/TVBM--99/3088--SE (1-71)

ISSN 0348-7911 TVBM
ISBN 91-630-9097-X

Lunds Tekniska Högskola
Byggnadsmaterial
Box 118

221 00 LUND

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

FÖRORD

Byggfuktfri betong används numera allmänt vid gjutning av bjälklag till bostadshus. Den snabba utvecklingen kunde ej förutses vid starten av delprojektet långtidsdeformationer inom det nationella projektet HÖGPRESTERANDE BETONGKONSTRUKTIONER år 1991. Därför studerades ej normal husbyggnadsbetong eller byggfuktfri betong med Slite Standard cement i nämnda projekt. Problem med deformationer i bjälklag har dock ej noteras beroende på att man ej utnyttjar betongen spänningsmässigt. Däremot har sprickbildning förekommit i väggar beroende av att dessa göts i normal betong vilken krympte senare än den högpresterande betongen i bjälklagen. Framgent kommer den byggfuktfria betongen förmodligen att utnyttjas till större spännvidder. Med K100-betong kan man mycket väl tänka sig att utnyttja ett slankhetstal (spännvidd/tjocklek) av 40 vid betongvalv, pelardäck, etc. Frågan är vad som händer med deformationerna hos valvet på sikt? Hur länge bör stöd för bjälklaget stå kvar utan att olägenheter skall uppstå? Hur tidigt kan valvet avformas? Hur stor är självuttorkningskrympning i byggfuktfri betong? Nuvarande metoder för beräkning av deformationer hos normal betong baseras på inaktuella cementsorter. Krypformlerna togs fram för ca 50 år sedan. Krypningen hos normal husbyggnadsbetong har därför studerats som en referens. Det var målsättningen för projektet, att experimentellt och teoretiskt klargöra hur långtidsdeformationer hos betong påverkar produktion inom husbyggnadstekniken, vilka möjligheter som ges till att bemästra deformationer med tillämpning av ny betongteknik, samt att med fältförsök verifiera de i laboratorium framtagna resultaten.

Projektet har genomförts med finansiering från Byggnadsforskningsrådet, BFR, och Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF. Till finansiärerna framföres ett varmt tack.

Lund, december 1999

Bertil Persson

SAMMANFATTNING OCH SLUTSATSER

Allmänt

I denna rapport beskrivs ett stort antal laboratorieförsök beträffande deformationer hos husbyggnadsbetong. För krypstudierna tillverkades 8 st. betongtyper varav hälften med hög lufthalt och hälften med självkompakterande egenskaper. Parallellt utfördes studier av hållfasthet, krympning och inre relativa fuktigheten. Laboratorieförsöken omfattade studier av krympning och krypning på 88 st. cylindrar samt hållfasthet och inre relativ fuktighet på 250 st. kuber, bägge provkroppstyperna utförda i modern betong, endera normalkompakterande med luftporbildare eller av självkompakterande kvalitet. Fältförsök utfördes på bjälklag i ett bostadshus i Malmö. Fältmätningarna omfattade studium av nedböjning på 7 st. bjälklag utförda i byggfuktfri betong.

Kryptal, krympning och elasticitetsmodul

Resultaten visar att såväl krympningen som kryptalet var av samma storleksordning i normalkompakterande betong och i självkompakterande betong vid konstant 28-dygns hållfasthet. Efter 1 år uppgick uttorkningskrympningen till ca 0.6‰ medan den förseglade krympningen var mindre än 0.2‰. Ej heller vad gällde elasticitetsmodulen kunde någon signifikant skillnad observeras mellan normalkompakterande betong och självkompakterande betong. Även kryptalsutvecklingen (med tiden) var av samma storleksordning hos normalkompakterande och självkompakterande betong. Kryptalet, efter 1 år, för mogen förseglad betong varierade från ca 3 vid hållfastheten 30 MPa till ca 1 vid 120 MPa. Vid lägre hållfasthet var kryptalet ca 50% större för uttorkande betong än för förseglad. Val av produktionsmetod hade stor inverkan, dvs. högre hållfasthet i resp. försegling av betongen gav mindre deformationer hos konstruktionen.

Inverkan av belastningsålder

Belastningsåldern hade stor inverkan på kryptalet. Belastning vid ung ålder dubblerade kryptalet jämfört med belastning vid 28 dygns ålder medan motsatsen gällde vid 90 dygns belastningsålder (en halvering av kryptalet således jämfört med belastning vid 28 dygns ålder). Sen belastning är en produktionsmetod med vars hjälp krypningens storlek kan minskas. Tidsutvecklingen av krypningen var snabbare hos uttorkande betong än hos förseglad. Laboratorieförsöken visade att en försenad torkstart till 90 dygns ålder mer än halverade såväl krympningen som kryptalet jämfört med motsvarande parametrar vid torkstart omedelbart efter avformning. Försenad torkstart är en produktionsmetod med vars hjälp en stor del av deformationerna kan bemästras. Den försenade elasticiteten minskade, i likhet med tidigare rön, kryptalet med ca 10%.

Fältförsök

Fältmätningarna omfattade studium av nedböjning på 7 st. bjälklag utförda i byggfuktfri betong. Fältnresultaten visade något mindre kryptal, ca 20%, än laboratorieresultaten troligen beroende av att hållfasthetsutvecklingen var snabbare på byggplatsen än vid betongstationen samt av att spänningsnivån troligen var betydligt lägre i fält än i laboratorium.

ABSTRACT

An experimental and numerical study on elastic modulus, creep and shrinkage of Self Compacting Concrete, SCC, is outlined in this report. The study included eight mix proportions of sealed or air-cured specimens with water-cement ratio, w/c , varying between 0.27 and 0.80. Half of the mixes studied were based on Normal Concrete, NC (reference mixes). The age at loading varied between 2 and 90 days. Four different stress to strength levels, σ/f_c , were studied. Parallel studies were performed on strength, f_c , and relative humidity, RH. The results show that elastic modulus, creep and shrinkage of SCC did not differ significantly from the corresponding properties of NC. Furthermore the age at start of the shrinkage studies and at loading of the creep specimen had a substantial influence on the result. A more mature concrete exhibited less creep and shrinkage in comparison to a concrete that was young when the studies started. Results of field studies on 7 concrete slabs in Malmö showed reasonably good correlation to the results of the laboratory studies. The study was performed in 1997-1999.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

| | |
|---|----|
| 1. BAKGRUND OCH SYFTE | 1 |
| 1.1 Bakgrund | 1 |
| 1.2 Målsättning | 1 |
| 2. TIDIGARE FORSKNINGSRISULTAT | 1 |
| 2.1 Allmänt | 1 |
| 2.2 Krympning | 2 |
| 2.3 Elasticitet | 2 |
| 2.4 Krypning | 3 |
| 2.5 Tryckhållfasthet | 4 |
| 2.6 Självtorkning | 4 |
| 2.7 Resultat från tidigare fullskaleförsök | 4 |
| 3. LABORATORIEFÖRSÖK | 4 |
| 3.1 Allmänt | 4 |
| 3.2 Material | 5 |
| 3.2 Gjutning av provkroppar | 5 |
| 3.3 Härdning och ytbeläggning | 7 |
| 3.4 Mätning av krympning | 7 |
| 3.5 Mätning av krypning | 7 |
| 3.6 Hållfasthet | 7 |
| 3.7 Inre relativ fuktighet, RF | 7 |
| 3.8 Fuktförluster | 7 |
| 4. RESULTAT | 8 |
| 4.1 Hållfasthet | 8 |
| 4.2 Fuktmätning | 8 |
| 4.3 Krympning | 8 |
| 4.4 Krypning | 8 |
| 4.5 Krypning vid försenad torkstart | 8 |
| 4.6 Fuktförluster - materialkostnader | 8 |
| 5. FELKÄLLOR OCH NOGGRANNHET | 8 |
| 6. ANALYS OCH DISKUSSION | 9 |
| 6.1 Hållfasthet | 9 |
| 6.2 Fuktmätning | 10 |
| 6.3 Krympning | 10 |
| 6.4 Elasticitetsmodul | 12 |
| 6.5 Krypning | 14 |
| 6.6 Krypning vid försenad torkstart | 18 |
| 6.7 Försenad elasticitet | 20 |
| 6.8 Krypning vid försenad torkstart | 21 |
| 7. FÄLTFÖRSÖK | 22 |
| 7.1 Allmänt | 22 |
| 7.2 Resultat från fältförsök | 22 |
| 7.3 Felkällor och noggrannhet | 23 |
| 7.4 Jämförelse mellan fältmätningar och laboratorieresultat | 23 |
| 8. SAMMANFATTNING OCH SLUTSATSER | 24 |
| 8.1 Allmänt | 24 |
| 8.2 Krytpal, krympning och elasticitetsmodul | 24 |
| 8.3 Inverkan av belastningsålder | 24 |
| 8.4 Fältförsök | 24 |
| REFERENSER | 25 |
| APPENDIX | 27 |

DEFORMATIONER HOS HUSBYGGNADSBETONG - INVERKAN AV PRODUKTIONSMETODER PÅ ELASTICITETSMODUL, KRYMPNING OCH KRYPNING

I denna rapport beskrivs ett stort antal laboratorieförsök beträffande deformationer hos husbyggnadsbetong. För krypstudierna tillverkades 8 st. betongtyper varav hälften med hög lufthalt och hälften med självkompakterande egenskaper, totalt 88 st. provkroppar. Parallellt utfördes studier av hållfasthet, krympning och inre relativa fuktigheten. Fältförsök utfördes på bjälklag i ett bostadshus i Malmö. Resultaten visar att såväl krympning som krypning är av samma storleksordning hos betong med hög lufthalt som i självkompakterande betong förutsatt konstant hållfasthet. Fältresultaten visade god överensstämmelse med de i laboratorium framtagna resultaten. Projektet finansierades av Byggnadsforskningsrådet, BRF och Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF, och genomfördes åren 1997-1999.

1. Bakgrund och syfte

1.1 Bakgrund

Byggfuktfri betong används numera allmänt vid gjutning av bjälklag till bostadshus (fram till år 1995 ca 1 miljoner m² bjälklag [1]). Den snabba utvecklingen kunde ej förutses vid starten av delprojektet långtidsdeformationer inom det nationella projektet HÖGPRESTERANDE BETONG år 1991. Därför studerades ej normal husbyggnadsbetong eller byggfuktfri betong med Slite Standard cement i nämnda projekt. Exempelvis vid Kv. Potatisåkern i Malmö göts 22 000 m² byggfuktfri betong (vattencementtallet, vct= 0.35 med luftporbildare) med tidig avformning, i allmänhet efter 2 dygns härdning. Tryckhållfastheten hade då endast uppnått ca 40% av 28-dygnshållfastheten. Problem med deformationer i bjälklag kunde dock ej noteras beroende på att man ej utnyttjade betongen spänningsmässigt mer än till ca K20. Däremot förekom sprickbildning i väggar beroende av att dessa göts i

betong K25 vilken krympte senare än den högpresterande betongen i bjälklagen [2]. Framgent kommer den byggfuktfria betongen förmodligen att utnyttjas till större spännvidder. Med K100-betong kan man mycket väl tänka sig att utnyttja ett slankhetstal (spännvidd/tjocklek) av 40 vid betongvalv, pelardäck, etc. Frågan är vad som händer med deformationerna hos valvet på sikt? Hur länge bör stöd för bjälklaget stå kvar utan att olägenheter skall uppstå? Hur tidigt kan valvet avformas? Hur stor är självvuttorkningskrympning i byggfuktfri betong? Detta är bara ett axplock på frågor inom den byggfuktfria betongen som bör utredas innan byggtreprenörerna kan utnyttja betongen fullt ut dvs. även spänningsmässigt! Nuvarande metoder för beräkning av deformationer hos normal betong baseras på inaktuella cementsorter. Krypformlerna togs fram för ca 50 år sedan. Det var därför som krypningen hos normal husbyggnadsbetong studerades som en referens.

1.2 Målsättning

Målsättningen var att experimentellt och teoretiskt klargöra hur långtidsdeformationer hos betong påverkar produktion inom husbyggnadstekniken, vilka möjligheter som ges till att bemästra deformationer med tillämpning av ny betongteknik, samt att med fältförsök verifiera de i laboratorium framtagna resultaten.

2. Tidigare forskningsresultat

2.1 Allmänt

Ett projekt med högpresterande anläggningsbetong genomfördes 1991-1997 [3]. Följande delstudier genomfördes beträffande deformationsegenskaper hos betong med vct varierande mellan 0.25 och 0.38:

1. Korttidsdeformationer hos betong upp till 3 dygn med tillämpning av mätteknik och extremt hög noggrannhet i en klimatstyrd MTS maskin. Såväl elastisk deformation, uttorkningskrympning och krympning under förseglade förhållanden studerades vid ca 70 försök.
2. Långtidsdeformationer hos betong, såväl med som utan last, studerades i klimatrum under minst 4 års tid vid ca 110 försök.
3. Självtuttorkning hos betong samt yttre uttorkning vid ett stort antal försök i klimatrum.

Ett stort antal rapporter från projektet HÖGPRESTERANDE BETONG har publicerats. Som tidigare nämnts avsåg dessa endast anläggningsbetong baserad på anläggningscement med silikastoft. Ett datorprogram finns att tillgå [4]. Två artiklar har publicerats från föreliggande projekt [5,6].

2.2 Krympning

Krympningen för högpresterande betong beskrevs i förhållande till vct, figur 1 [3]:

$$\varepsilon = k \cdot 34 \cdot [(w/c)^2 - 0.68 \cdot (w/c) + 0.13] \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_B = k_B \cdot 1.5 \cdot [0.43 - (w/c)] \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_C = 0.85 \cdot [(w/c) - 0.25] \quad (2.3)$$

$$\varepsilon_D = 33 \cdot [(w/c)^2 - 0.654 \cdot (w/c) + 0.115] \quad (2.4)$$

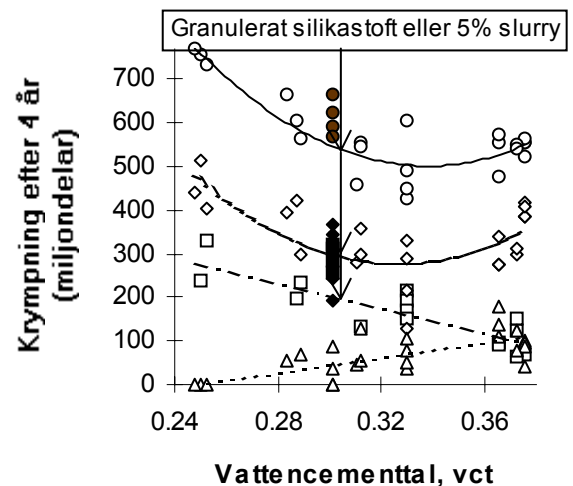
Beteckningar:

$k = 1.1$ med 10% silikastoft slurry; $k=1$ med 10% granulerat silikastoft eller 5% slurry

$k_B = 1.5$ med 10% silikastoft slurry; $k_B=1$ med 10% granulerat silikastoft eller 5% slurry

w/c vattencementtalet, vct $\{0.2 < w/c < 0.4\}$

$\varepsilon, \varepsilon_B, \varepsilon_C, \varepsilon_D$
total (-), förseglad (B), karbonatiserings- (C) och uttorkningskrympning (D) $\{0.24 < vct < 0.40\}$ (%).



- Förseglad betong med granulerat silikastoft eller 5% slurry
- Förseglad betong med 10% slurry
- ◇ Uttorkande betong med granulerat silikastoft eller 5% slurry
- ◆ Uttorkande betong med 10% slurry
- △ Karbonatiseringskrympning
- Total krympning med granulerat silikastoft eller 5% slurry
- Total krympning med 10% slurry

Figur 2.1 - Krympning hos högpresterande betong som funktion av vattencementtal [3].

2.3 Elasticitet

Betongens elasticitet jämförs ofta med tryckhållfastheten. Elasticiteten såväl som tryckhållfastheten beror bägge på porositeten hos betongen vid lika andel och typ av ballast. Elasticitetsmodulen (55 mm cylinder) erhöles för uttorkande resp. förseglad betong [3] (bestämd vid 30% av tryckhållfastheten:

$$E_B = 5.3 \cdot (f_{cc})^{0.44} \quad (2.5)$$

$$E_D = 6.9 \cdot (f_{cc})^{0.36} \quad (2.6)$$

Beteckningar:

f_{cc} tryckhållfastheten, 100 mm kub $\{50 < f_{cc} < 150 \text{ MPa}\}$

E_B elasticitetsmodul, försegling (GPa)

E_D elasticitetsmodul, uttorkning (GPa)

2.4 Krypning

Kryptalet, φ , definierades enligt följande:

$$\varphi = \varepsilon_l / \varepsilon_E - 1 \quad (2.7)$$

ε_l deformation, långtid

ε_E deformation, elastisk

Exempel på kryptal för mogen högpresterande betong ges i figur 2.2 [3]. För förseglad betong ökade kryptalet, φ_{B28} , med vct, från ca 0.5 (vct = 0.25) till 1.5 (vct = 0.38). För uttorkande betong med 10% silikastoft (cylindrar 55 mm) finns en tendens till minskande kryptal, φ_{D28} , med vct, från 1.5 (vct = 0.25) till 1.0 (vct = 0.38). Detta beror troligen på att cylindern med högre vct torakat ut snabbt varvid krypningen blir liten enligt Picketts effekt [7]. Betong med luftporbildare erhöll högre kryptal. Kryptalen efter 4 år vid pålastning vid 28 dygns ålder erhöles enligt följande:

$$\varphi_{B28} = 15 \cdot (w/c)^{2.33} \quad (2.8)$$

$$\varphi_{D28} = 0.5 \cdot (w/c)^{-0.74} \quad (2.9)$$

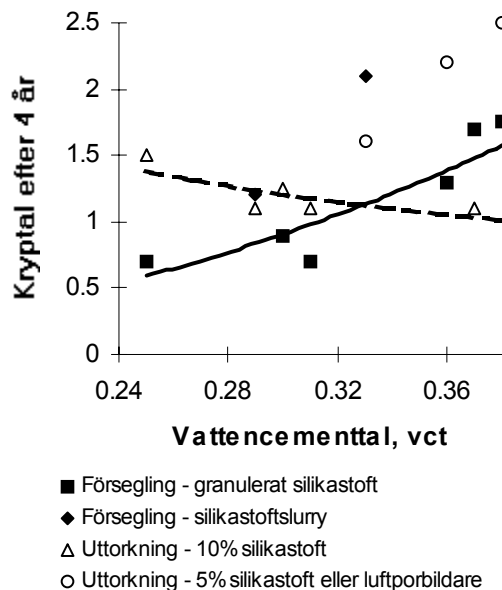
w/c vattencementtal {0.2 < w/c < 0.4}

φ_{B28} kryptalet efter 4 år för förseglad betong vid pålastning vid 28 dygns ålder

φ_{D28} kryptalet efter 4 år för uttorkande betong vid pålastning vid 28 dygns ålder

Betongens ålder vid pålastning hade stor betydelse för kryptalets storlek. Vid låg mognadsgrad vid pålastning ökade kryptalet flerfält. Främst den plastiska delen av kryptalet, p, ökade medan ökningen för det viskösa kryptalet var liten. Följande samband erhöles för kryptalet efter 4 år vid tidig pålastning [3]:

$$\varphi_{pB} = 82 \cdot k_{msl} \cdot [(w/c)^2 - 0.544 \cdot (w/c) + 0.0824] + 49 \cdot (\sigma/f_c) \cdot k_{ysl} \cdot e^{-6.77 \cdot k \cdot [(\sigma/f_c) + 0.451] \cdot (f_c/f_{c28})} \quad (2.10)$$



Figur 2.2 - Kryptal efter 4 år för högpresterande betong som funktion av vct [3].

$$\varphi_{pD} = 50 \cdot k_{mai} \cdot k_{m5} \cdot [(w/c)^2 - 0.68 \cdot (w/c) + 0.1372] - 7.8 \cdot k_{yai} \cdot k_{ysl} \cdot (\sigma/f_c) \cdot \ln(f_c/f_{c28}) \quad (2.11)$$

$$\varphi_v = 0.75 \cdot k_{mD} \cdot [(w/c) - 0.25] - k_{yD} \cdot \ln(f_c/f_{c28}) \quad (2.12)$$

ai 5% luftporbildare

m mogen högpresterande betong

f_{cc} tryckhållfastheten vid pålastning, 100 mm kub {50 < f_{cc} < 150 MPa}

f_{c28} tryckhållfastheten vid 28 dygns ålder, 100 mm kub {50 < f_{cc} < 150 MPa}

[k, k_{mai} , k_{msl} , k_{mD} , k_{m5} , k_{yai} , k_{ysl} , k_{yD}]

konstanter enligt tabell 2.1 (k=1 i övrigt).

p plastisk del av kryptalet

sl silikastoftslurry

y ung betong vid pålastning

w/c vattencementtal {0.2 < w/c < 0.4}

B, D förseglad respektive uttorkning

φ kryptal vid tidig belastning

σ tryckspänning (MPa)

5 betong med 5% silikastoft

| Konstant | Försegling | Uttorkning |
|------------------|------------|------------|
| k (slurry) | 1.1 | - |
| k _{mai} | - | 1.38 |
| k _{msl} | 1.56 | - |
| k _{nD} | 1 | 1.66 |
| k _{m5} | - | 1.33 |
| k _{vai} | - | 0.52 |
| k _{vsl} | 2 | 1.48 |
| k _{vD} | -0.06 | 0 |

2.5 Tryckhållfasthet

Tryckhållfastheten hos betong med samma typ av ballast och cement som använts inom projektet HÖGPRESTERANDE BETONG, dels utan, dels med 10% silikastoft ges av följande ekv. [8]:

$$f_{cc}(w/c) = A \cdot (w/c) + B \quad (2.13)$$

f_{cc} tryckhållfasthet för 40 mm förseglad cylinder med längden 80 mm
 w/c vattencementtal $\{0.2 < w/c < 0.6\}$
 A, B konstanter enligt tabell 2.2

| Ålder (mån.) | Silikastoft | A | B |
|--------------|-------------|---------|--------|
| 1 | 10% | -186.26 | 167.06 |
| 1 | - | -166.23 | 133.53 |
| 3 | 10% | -206.5 | 176.67 |
| 3 | - | -187.06 | 152.71 |
| 15 | 10% | -259.46 | 201.96 |
| 15 | - | -231.05 | 181.02 |
| 90 | 10% | -221.42 | 184.54 |
| 90 | - | -229.88 | 181.29 |

2.6 Självtorkning

Självtorkningen hos betong med samma typ av ballast och cement som använts inom projektet HÖGPRESTERANDE BETONG ges av följande ekv. [6]:

$$\begin{aligned} \emptyset_S(t, w/c) = & 1.13 \cdot [1 - 0.065 \cdot \ln(t)] \cdot (w/c)^{0.24 \cdot [1 - 0.1 \cdot \ln(t)]} \\ & \{1 < t < 15 \text{ mån.}; 0.22 < w/c < 0.48\} \quad (2.14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \emptyset(t, w/c) = & 1.09 \cdot (w/c)^{0.17 \cdot (1 + 0.0451 \cdot t)} \\ & \{1 < t < 15 \text{ mån.}; 0.25 < w/c < 0.58\} \quad (2.15) \end{aligned}$$

t ålder (mån.)

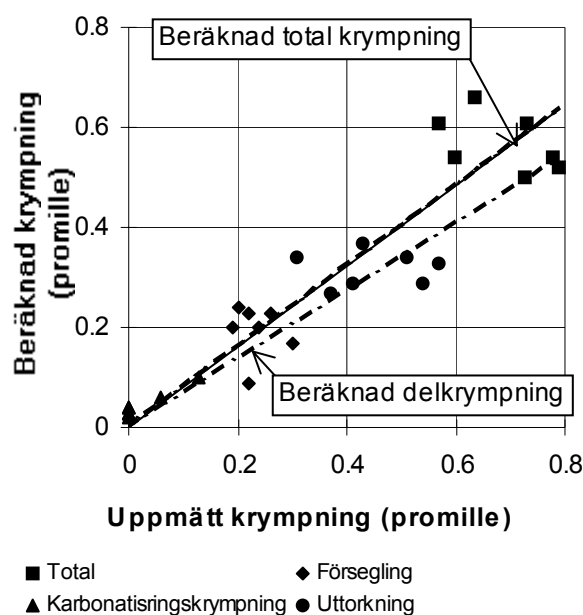
w/c vattencementtal $\{0.2 < w/c < 0.6\}$

S 10% silikastoft

Ø självtorkning hos betong

2.7 Resultat från tidigare fullskaleförsök

Inom projektet HÖGPRESTERANDE BETONG jämfördes krympning och krypning efter ½ år hos 27 st. förspända betongbalkar med laboratorieresultaten enligt ovanstående ekvationer [3]. Överensstämmelsen var god mellan laboratorieresultaten och fältförsöket, se figurerna 2.3 och 2.4.

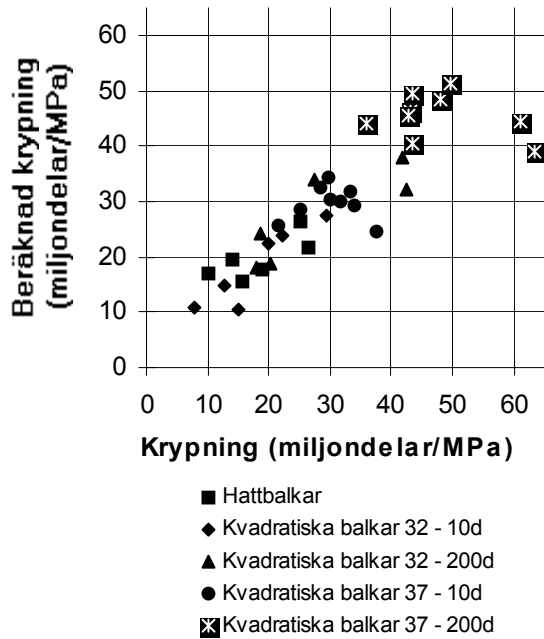


Figur 2.3 – Beräknad krympning som funktion av för balkar uppmätt krympning [3].

3. Laboratorieförsök

3.1 Allmänt

Laboratorieförsöken inom detta projekt genomfördes år 1997-1999 vid Lunds Tekniska Högskola, Lund. Vid försöken studerades 8 st. betongtyper, dels normal, N, dels självkompakterande, S. Betongproverna i krypförsöken pålastades från 2 upp till 90 dygns ålder. Parallellt utfördes försök på krympning, hållfasthet och RF, såväl för uttorkande som för förseglad betong.



Figur 2.4 – Beräknad krypning versus krypning för balkar [3]. d = dygn; 32 = vct (%).

3.2 Material

Tabell 3.1 ger en kemisk analys av cement och klinker [3], tabell 3.2 ballastens egenskaper [9] och tabell 3.3 betongrecept med egenskaper i färskt och härdat tillstånd [10].

| Material/mineral (%) - | A | B |
|------------------------------------|------|------|
| CaO | 64.6 | 63.8 |
| SiO ₂ | 21.8 | 20.2 |
| Al ₂ O ₃ | 3.34 | 4.65 |
| Fe ₂ O ₃ | 4.39 | 2.46 |
| MgO | 0.84 | 3.01 |
| K ₂ O | 0.62 | 1.13 |
| Na ₂ O | 0.07 | 0.27 |
| Alkali | 0.48 | 1.01 |
| SO ₃ | 2.23 | 3.29 |
| CO ₂ | 0.14 | 2.0 |
| Fri CaO | 1.13 | 0.88 |
| C ₂ S | 22.5 | 14.8 |
| C ₃ S | 53.0 | 65.8 |
| C ₃ A | 1.42 | 6.7 |
| C ₄ AF | 13.4 | 7.6 |
| Glödgningsförluster (%) | 0.64 | 2.71 |
| Finhet (m ² /kg Blaine) | 325 | 384 |
| Densitet (kg/m ³) | 3180 | 3120 |

| Egenskap | Grus | Kvartsit | Sand |
|---------------------------|------|----------|------|
| Tryckhållfasthet (MPa) | - | 331 | - |
| Spräckhållfasthet (MPa) | - | 15 | - |
| Elasticitetsmodul (GPa) | - | 61 | - |
| Glödgningsförlusten 2.3%. | 0.8 | 0.3 | 0.3 |

Silikastoft (granulat) hade specifika ytan 17.5 m²/g samt glödgningsförlusten 2.3%.

3.2 Gjutning av provkroppar

Cylindrar med diameter 100 mm och längd 500 mm används för studier av krympning och krypning, kuber med sidan 100 mm för bestämning av tryckhållfasthet och inre relativ fuktighet, RF. I tabell 3.4 ges en sammanställning av de använda provkropparna.

| Försök | Cylindrar | Kuber |
|-----------------------------|-----------|-------------------|
| <u>Krypning</u> : 2 dygn | 18 | |
| 7 dygn | 2 | |
| 28 dygn | 2 | |
| 90 dygn | 2 | |
| <u>Krypning</u> : 2 dygn | 16 | |
| 7 dygn | 16 | |
| 28 dygn | 16 | |
| 90 dygn | 16 | |
| <u>Hållfasthet</u> : 2 dygn | | 50 |
| 7 dygn | | 50 |
| 28 dygn | | 50 |
| 90 dygn | | 50 |
| 1 år | | 25 |
| 2 år | | 25 |
| RF ¹⁾ : 2 dygn | | 50 |
| 7 dygn | | 50 |
| 28 dygn | | 50 |
| 90 dygn | | 50 |
| 1 år | | 25 |
| 2 år | | 25 |
| Summa | 88 | 250 ¹⁾ |

1) Vissa kuber samma som för hållfastheten

| Tabell 3.3 - Recept (kg/m³ torrt material) egenskaper i färskt och härdat tillstånd [6]. | | | | | | | | |
|--|-------|------|------|-------|------|-------|------|--------|
| Material/Blandning, vct (%) | 27S | 32N | 38N | 38S | 50N | 50S | 80N | 80S |
| Kvartsit 11-16 mm | 800 | 660 | 560 | 620 | 420 | 525 | 600 | 270 |
| Kvartsit 8-11 mm | 60 | 135 | 270 | 305 | 330 | 285 | 300 | 395 |
| Sand 0-8 mm, Åstorp | 880 | 694 | 780 | 790 | 860 | 840 | 1000 | 1000 |
| Sand, Baskarp, B7 + B6 | 50 | 106 | 68 | 145 | 33 | 165 | | 135+50 |
| Cement, Degerhamn Standard | 500 | | | | | | | |
| Cement, Slite Standard | | 389 | 360 | 400 | 285 | 340 | 250 | 260 |
| Silikastoft | 50 | | | | | | | |
| Luftporbildare, L14 (g/m ³) | | 50 | 45 | | 27 | 24 | | |
| Flytmedel, Cementa 92M | | 3.6 | 2.6 | | 0.93 | | | |
| Flytmedel, Glenium 51 | 5.0 | | | 2.0 | | 1.2 | | 1.0 |
| Vattenreducerare, LP40 | | 1.7 | 0.90 | | 1.1 | | | |
| Vatten | 133 | 126 | 137 | 153 | 142 | 170 | 200 | 207 |
| Ballastandel | 0.72 | 0.75 | 0.77 | 0.77 | 0.79 | 0.78 | 0.81 | 0.80 |
| Densitet | 2478 | 2115 | 2178 | 2415 | 2072 | 2325 | 2350 | 2318 |
| Lufthalt (%) | 1.3 | 12 | 12 | 1.4 | 13 | 3.5 | 1.2 | 1.9 |
| Sättningsmått (cm) | | 11 | 16 | | 22 | | 8 | 25 |
| Flytsättningsmått (cm x cm) | 70x72 | | | 53x54 | | 56x60 | | 54x57 |
| Tryckhållfasthet (försegl., MPa): | | | | | | | | |
| 1 dygn | 19 | 36 | | 26 | | 23 | | 9 |
| 2 dygn | 63 | 59 | 45 | 65 | 23 | 43 | 14 | 18 |
| 7 dygn | 110 | | 46 | 76 | 27 | 52 | 24 | 27 |
| 28 dygn | 141 | | 42 | 86 | 30 | 61 | 28 | 32 |
| 90 dygn | 158 | 55 | 43 | 98 | 38 | 67 | 32 | 34 |
| 1 år | 171 | 61 | 58 | 108 | | 76 | | 36 |
| 2 år | | 68 | 59 | | 42 | | 30 | |
| Hållfasthet (luft, MPa) (2 dygn): | | | | | | | | |
| 7 dygn | 103 | 54 | 56 | 79 | 27 | 55 | 24 | 27 |
| 28 dygn | 124 | | 54 | 86 | 35 | 63 | 30 | 32 |
| 90 dygn | 134 | 55 | 60 | 94 | 38 | 67 | 26 | |
| 1 år | 120 | 64 | 60 | 93 | | 70 | | 35 |
| 2 år | | 62 | | | 40 | | | 35 |
| RH, 1 dygn (försegling): | | | | | | | | |
| 2 dygn | 0.91 | 0.91 | | 0.87 | | 0.95 | | 0.96 |
| 7 dygn | 0.88 | | | 0.86 | 0.92 | 0.92 | | 0.92 |
| 28 dygn | 0.86 | | | 0.88 | | 0.93 | | 0.96 |
| 90 dygn | 0.78 | | 0.84 | 0.85 | | 0.88 | | 0.98 |
| 1 år | 0.82 | 0.78 | 0.86 | 0.84 | | 0.90 | | 0.97 |
| 2 år | | 0.82 | 0.81 | | 0.87 | | 0.96 | |
| RH, 2 dygn (lufthärdning): | | | | | | | | |
| 7 dygn | 0.84 | | | 0.81 | 0.92 | 0.91 | | 0.92 |
| 28 dygn | 0.82 | 0.82 | | 0.85 | | 0.83 | | 0.88 |
| 90 dygn | 0.71 | | 0.69 | 0.73 | | 0.82 | | 0.67 |
| 1 år | 0.62 | 0.70 | 0.66 | 0.66 | | | | 0.56 |
| 2 år | | 0.60 | 0.60 | | 0.60 | 0.77 | 0.60 | |

Följande rutiner användes i samband med tillverkning av provkropparna:

1. Allt material blandades utan flytmedel under ½ min. samt därefter med flytmedel under 3 min.
2. Ur samma sats betong göts 10 cylindrar och 32 kuber
3. Den normala betongen göts med vibration under 1 min.; den självkompakterande betongen vibrerades ej
4. Cylindrar göts stående under 3 min. varefter en ändplåt placerades på formen.

3.3 Härdning och ytbeläggning

Följande metoder användes för härdning och ytbeläggning:

1. Omedelbart efter det att formen hade tillslutits med en ändplåt, förvarades cylindern liggande 1 dygn vid 20 °C
2. Även kuberna förvarades 1 dygn vid 20 °C, inneslutna i dubbla tjocka plastpåsar
3. Avformning och preparering skedde i ett klimatrum med RF = 95% vid 20 °C i syfte att minska fuktförluster
4. Mätstift av 6 st. precisionssvarvade rostfria skruvar monterades på provkropparnas sidor med avståndet 300 mm
5. Förseglade prover försågs med bred överlappande självhäftande aluminiumtejp
6. Samtliga ändytor på cylindrarna försågs också med självhäftande aluminiumtejp
7. Samtliga prover härdades därefter i klimatrum med RF = 60% vid 20 °C.

3.4 Mätning av krympning

Krympningen mättes enligt följande rutiner:

1. Första mätningen av krympning utfördes omedelbart efter montage av mätstift eller efter det att förseglingen hade utförts
2. Temperaturen i provkroppen (högst 28 °C) fastställdes med termoelement

3. Vid temperaturskillnader utfördes en kompensation med 10 miljondelar/°C
4. Kalibrering av det mekaniska mätinstrumentet skedde mot en rostfri stång
5. Kalibrering av mätinstrumentet skedde även mot en Mitomyia mikrometer

3.5 Mätning av krypning

Rutinmässigt utfördes följande i samband med mätning av krypning:

1. Cylindrarna monterades i mekaniska fjäderkryppriggar omedelbart efter preparering med mätskruvar och försegling
2. Pålastningsålder var 2, 7, 28 och 90 dygn
3. Pålastningshastighet var 1 MPa/s
4. Deformationerna mättes på 3 sidor av provkroppen före pålastning samt 1 min. efter pålastning, 15 min. efter, 1, 2, 4, 16 timmar efter följt av mätningar vid 1, 2, 4, 7, 14, 28, 56 osv. dygn efter pålastning upp till 1-2 år
5. Före varje mätning kontrollerades lasten med en precisionslastcell
6. Mätningen utfördes omedelbart före och efter avlastning av cylindrarna samt 40 dygn efter avlastning av cylindrarna.

3.6 Hållfasthet

Mätningen utfördes på såväl lufthärdad (RF = 60%) som med aluminiumfolie förseglad kub med sidan 100 mm. Pålastningshastigheten var 1 MPa/s.

3.7 Inre relativ fuktighet, RF

Omedelbart efter mätningen av tryckhållfastheten stoppades fragment av betong i 200 mm långa glasrör, vilka i sin tur förseglades med gummipropp. Efter temperering vid 20 °C under 1 dygn mättes RF med daggpunktgivare. Givaren stacks in i röret med betongfragment och tätades mot glaset med en expanderande gummiring. Mätningen utfördes vid 20 °C under 1 dygn.

3.8 Fuktförluster

Cylindrarna vägdes före och efter krypningsmätningarna. Cylindrarna vägdes vid varje krypningsmätning.

4. Resultat

4.1 Hållfasthet

Hållfasthetsutveckling för betong ges i appendix 1, dels för förseglad (B, fylld punkt), dels för lufthärdad (D, öppen punkt).

4.2 Fuktmätning

RF i provad betong ges i appendix 2, dels för förseglad betong (B, fylld punkt), dels för lufthärdad (D, öppen punkt).

4.3 Krypning

Krypning i provad betong ges i appendix 3, dels för förseglad betong (B, fylld punkt), dels för lufthärdad (D, öppen punkt).

4.4 Krypning

Krypning hos provad betong ges i appendix 4, dels för förseglad betong (B, fylld punkt), dels för lufthärdad (D, öppen punkt).

4.5 Krypning vid försenad torkstart

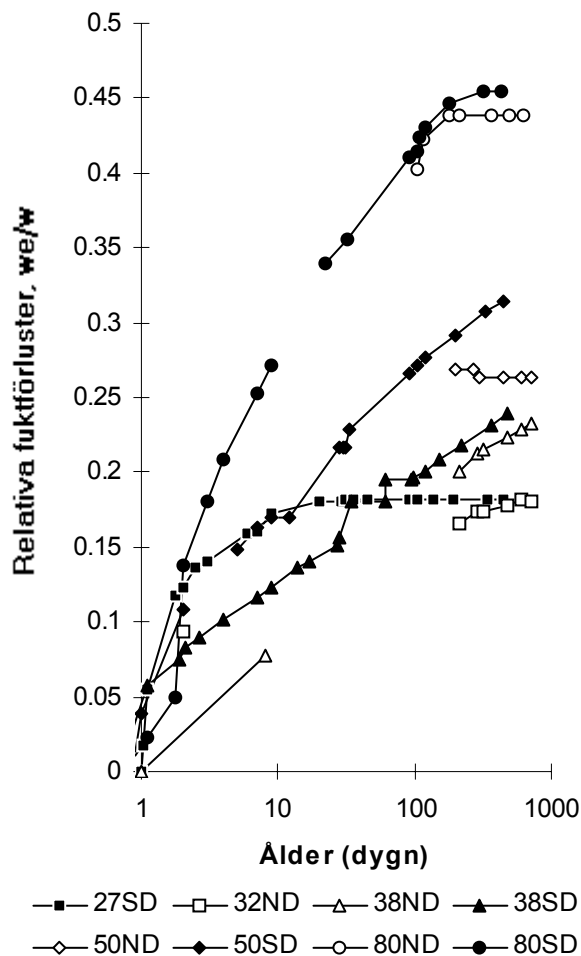
Samtliga prov utfördes med en torkstart vid 1 dygn ålder. I verkligheten påbörjas uttorkning först senare varför en separat undersökning utfördes med en senarelagd torkstart till 2, 7, 28 och 90 dygns ålder, appendix 5.

4.6 Fuktförluster - materialkostnader

Förseglade proverna förlorade ingen fukt. Fuktförluster för uttorkade cylindrar 100 mm med längd 500 mm ges i figur 4.1. Figur 4.1 visar att de uttorkade proverna kommit till jämvikt dvs. proverna hade torkat ut till i stort sett $RF = 60\%$. Detta visas även i fuktmätningarna ovan. Vid $vct = 0.27$ torkade ca 18% av blandningsvatten ut medan ca 45% av vattnet torkade ut vid $vct = 0.80$.

Direkta materialkostnader beräknade med 1998 års priser samt relativt betong 80N ges i appendix 6. Av de direkta materialkostnaderna ökade kostnaden för flytmedel

mest. Kostnaden för filler ökade betydligt vilket i viss mån kompenseras av en minskning av ballastkostnaden.



Figur 4.1 – Fuktförluster, w_e/w , w = blandningsvatten, w_e = uttorkat vatten, N = normal, S = självkompakterande, 32 = vct (%).

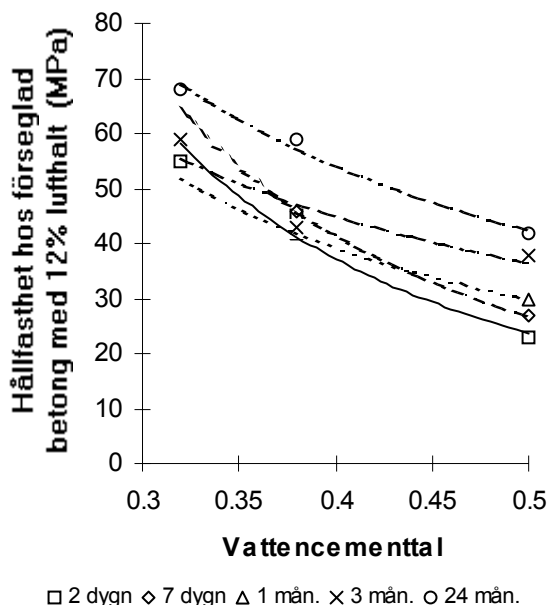
5. Felkällor och noggrannhet

Tryckpressen kalibrerades inom 1 år från mättillfället. Noggrannheten var ± 12 MPa. Daggpunktsgivarna kalibrerades i en fuktgenerator med noggrannheten $\pm 2\%$. Mätningen utfördes i klimatrums som hölls vid 20 ± 0.1 °C. Krypningen och krypningen mättes med ett mekaniskt instrument med noggrannheten ± 0.005 mm, dvs. mätningen skedde med noggrannheten ± 15 miljondelar. Instrumentet kalibrerades vid varje mättillfälle, såväl mot en stång av materialet INVAR som mot en äldre cylinder av betong med $vct = 0.80$. Cylindern (av samma utseende som provkropparna i försöket) var placerad omedelbart intill dessa.

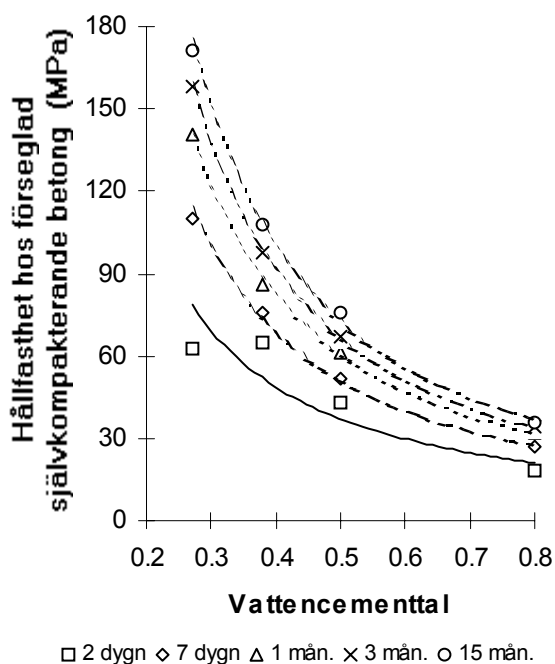
6. Analys och diskussion

6.1 Hållfasthet

Figur 6.1 visar tryckhållfastheten hos normalkompakterande betong med ca 12% lufthalt och figur 6.2 tryckhållfastheten hos självkompakterande betong, bägge hållfastheter som funktion av vct (w/c). Följande samband erhöles för hållfastheten (MPa):



Figur 6.1 - Tryckhållfastheten hos normalkompakterande betong med ca 12% lufthalt.



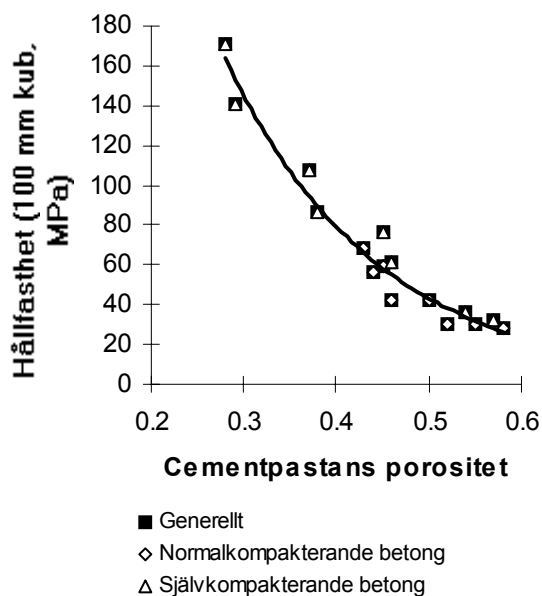
Figur 6.2 - Tryckhållfastheten hos självkompakterande betong som funktion av vct.

$$f_{ccN} = 2.8 \cdot [\ln(w/c) + 4.6]^{0.19 \cdot (\ln t - 7.8)} \quad (6.1)$$

$$f_{ccS} = 2 \cdot [\ln(w/c) + 11]^{-0.041 \cdot (\ln t + 33)} \quad (6.2)$$

f_{cc} betecknar kubhållfastheten (MPa)
 $\ln t$ betecknar naturliga logaritmen av betongåldern i månader
 $\ln(w/c)$ betecknar logaritmen av vct
 w/c vattencementtal $\{0.2 < w/c < 0.8\}$
 N betecknar normalkompakterande
 S betecknar självkompakterande

Inverkan av lufthalt på hållfastheten kan elimineras vid användning av cementpastans porositet [3], figur 6.3. Även betongens ballastandel har en inverkan på hållfastheten. Ballastandelen, a , är dock knuten till vct, t.ex. $a = 0.71$ vid vct = 0.80 samt $a = 0.80$ vid vct = 0.80. Cementpastans porositet avgör hållfastheten såväl för normal- som självkompakterande betong, figur 6.3.



Figur 6.3 - Samband mellan cementpastans porositet och kubhållfasthet (försegling).

Följande samband erhöles mellan cementpastans porositet och tryckhållfastheten:

$$f_{cc} = 890 \cdot e^{-6.054 \cdot P} \quad (6.3)$$

f_{cc} hållfastheten (100 mm kub, MPa)
 P betecknar cementpastans porositet

En jämförelse utfördes mellan å ena sidan tryckhållfasthet beräknad enligt ekv. (2.13) [8] och å andra sidan uppmätt hållfasthet visas i figur 6.4. Normal betong med 12% lufthalt erhöll således ca 40% lägre hållfasthet än beräknat medan självkompakterande betong erhöll ca 20% högre hållfasthet:

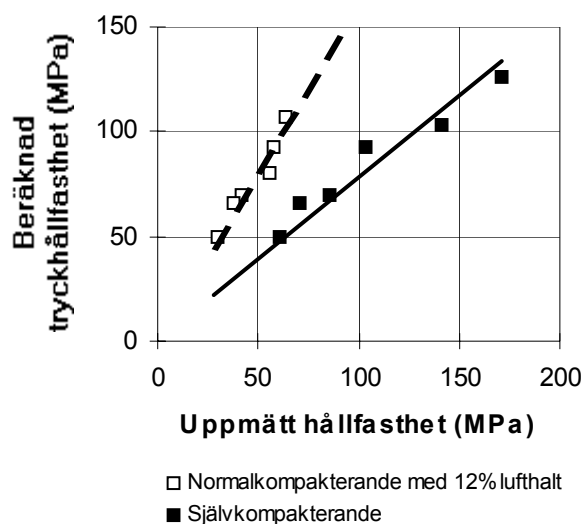
$$f_{cc,ber.} = 1.6 \cdot f_{ccN} \quad (6.4)$$

$$f_{cc,ber.} = 0.8 \cdot f_{ccS} \quad (6.5)$$

$f_{cc,ber.}$ betecknar tryckhållfasthet beräknad enligt ekv. (2.13) ovan [8] (MPa)

f_{ccN} betecknar tryckhållfasthet för normalkompakterande betong (12% lufthalt)

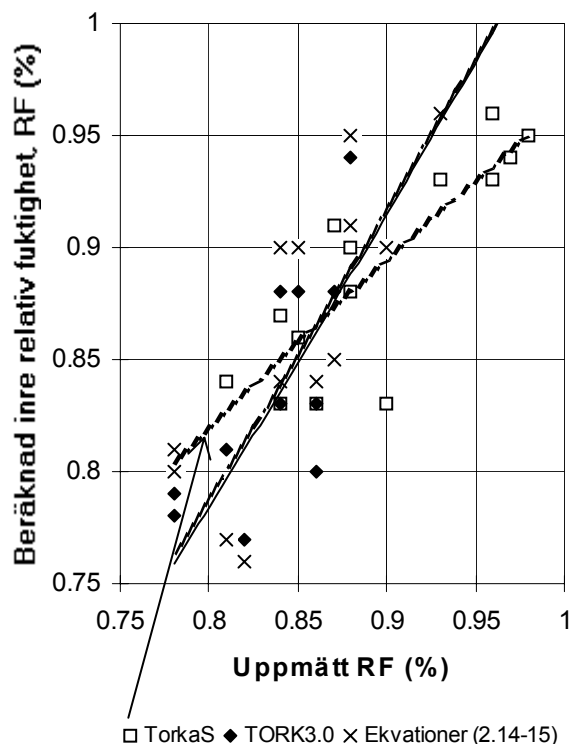
f_{ccS} hållfasthet för självkompakterande betong (MPa)



Figur 6.4. - Jämförelse mellan å ena sidan tryckhållfasthet beräknad enligt ekv. (2.13) ovan och å andra sidan uppmätt hållfasthet.

6.2 Fuktmätning

Även vad gäller fultmätningar fanns det ett önskemål om att göra jämförelser med föreliggande beräkningsprogram, TorkaS [10] och TOR3.0 [11] samt med ekvationerna (2.14-15) [3-4]. I figur 6.5 visar beräknad RF versus uppmätt RF (försegling). Beräkningsprogrammen visade korrekt värde vid RF = 87%. Vid RF < 87% överskattades RF något med TorkaS och vice versa med TOR3.0 resp. med ekv. (2.14-15).



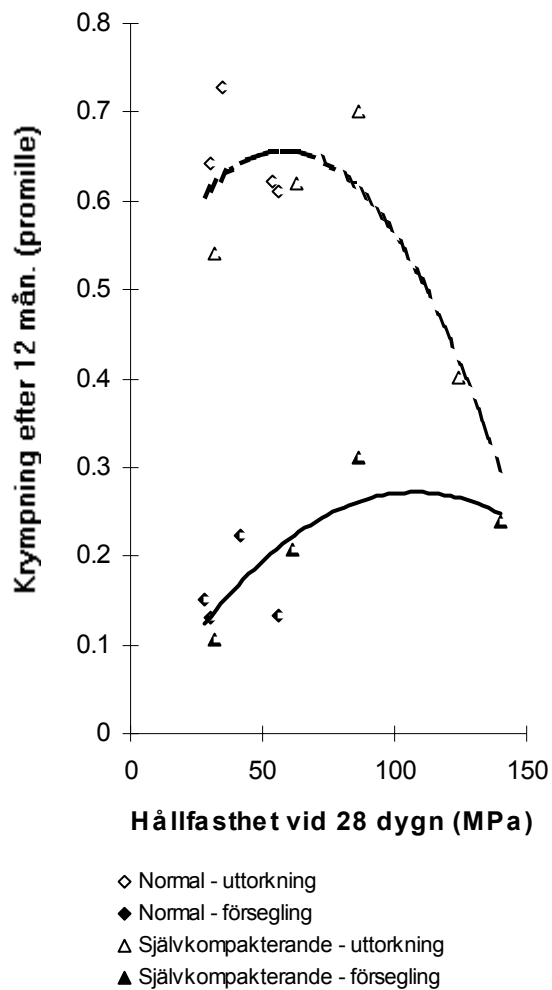
Figur 6.5 - RF beräknad enligt olika beräkningsprogram som funktion av uppmätt RF (förseglad härdning) [3-4,10-11].

6.3 Krympning

Den fria krympningen beror på att en uttorkning sker av provkroppen, normalt utåt men, vid lägre vct, även inåt i provkroppen, s. k. självuttorkning [12-13]. Det finns således ett samband mellan uttorkning och RF. Krympningen är störst i cementpasta eftersom denna saknar ballast, vilken har en mothållande inverkan på krympningen. En högre ballastandel ger således mindre krympning vid konstant vct [14]. Å andra sidan har vct en fundamental betydelse för ballastandelen. Vct har således stor betydelse för krympningen hos en god betong. Det finns även ett samband mellan vct och hållfasthet. I figur 6.6 visas därför krympningen som funktion av 28-dygnshållfastheten såväl för förseglad härdning som för uttorkning. Följande samband erhöles för krympningen efter 1 år (‰, GPa):

$$\epsilon_{B1} = 23.2 \cdot f_{cc28} \cdot (0.2156 - f_{cc28}) \quad (6.6)$$

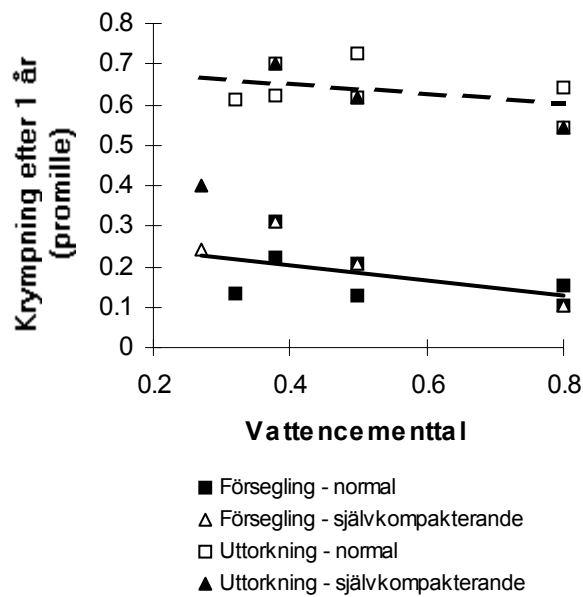
$$\epsilon_{D1} = 54.4 \cdot (0.00866 + 0.1167 \cdot f_{cc28} - f_{cc28}^2) \quad (6.7)$$



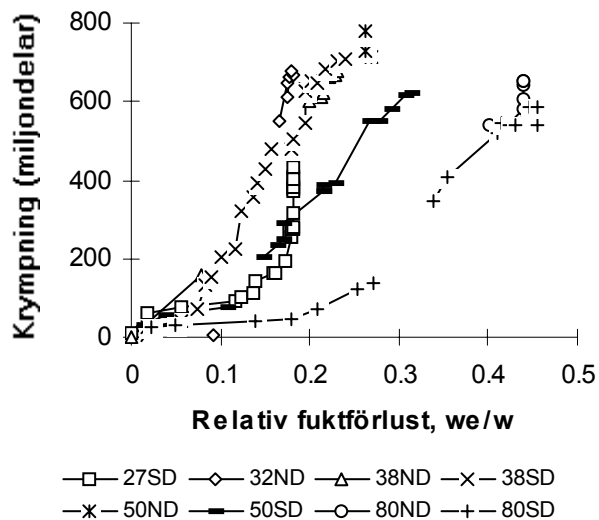
Figur 6.6 - Krympning efter 12 mån. versus 28-dygnshållfastheten (försegling och uttorkning).

f_{cc28} 28-dygnshållfastheten (OBS: GPa)
 ϵ_{B1} självuttorkningskrympning (‰)
 ϵ_{D1} uttorkningskrympning (‰)

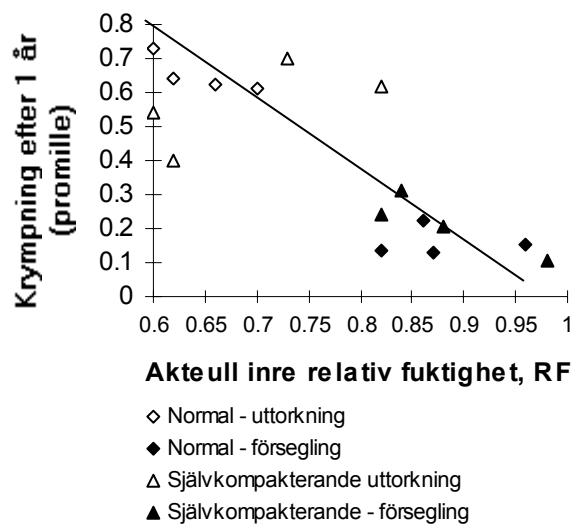
Uttorkningskrympningen uppgick till ca 0.65‰ tämligen oberoende av vct medan självuttorkningskrympningen minskade från ca 0.3‰ till ca 0.1‰ då vct ökade från 0.25 till 0.80, figur 6.7 (12 mån. ålder). Det fanns dock inget signifikant samband vare sig mellan vct och krympning eller mellan fuktförluster och krympning, figur 6.8 (12 mån. ålder). Anledningen till detta var troligen att en stor del av de normala betongerna innehöll hög lufthalt. Mellan inre RF och krympningen fanns det dock ett tämligen linjärt samband, dock även detta med låg signifikans, figur 6.9 (12 mån. ålder):



Figur 6.7 – Krympning vs vct (vid 1 år).



Figur 6.8 – Krympning versus uttorkning



Figur 6.9 – Krympning versus inre RF.

$$\varepsilon_{RF} = 1.8 \cdot (1 - RF) \quad (6.8)$$

Beteckningar:

RF inre relativ fuktighet $\{0.6 < RF < 1\}$

ε_{RF} krympning versus RF efter 1 år (‰)

Krympningen (relativt 1-årsvärdet) som funktion av ålder visas i figur 6.10. Följande samband erhöles för tidsutvecklingen av krympningen:

$$\varepsilon_t = [k \cdot 0.2 \cdot \ln(t) + 1] \cdot \varepsilon_1 \quad (6.9)$$

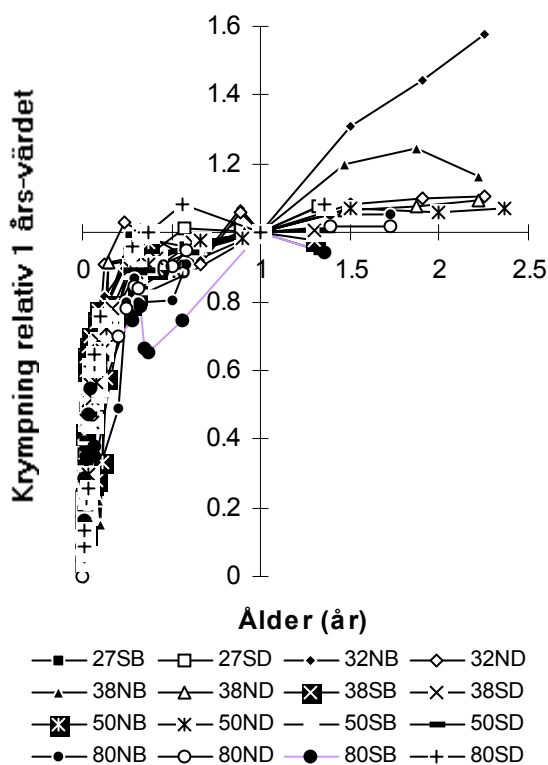
Beteckningar:

k = 1.3 för förseglad normal betong; k = 1.0 i övrigt

$\ln(t)$ naturliga logaritmen för åldern i år

ε_t krympningen versus tiden

ε_1 krympningen [enligt ekv. (6.6) - (6.7)]



Figur 6.10. - Krympningen (relativt 1-årsvärdet) som funktion av ålder.

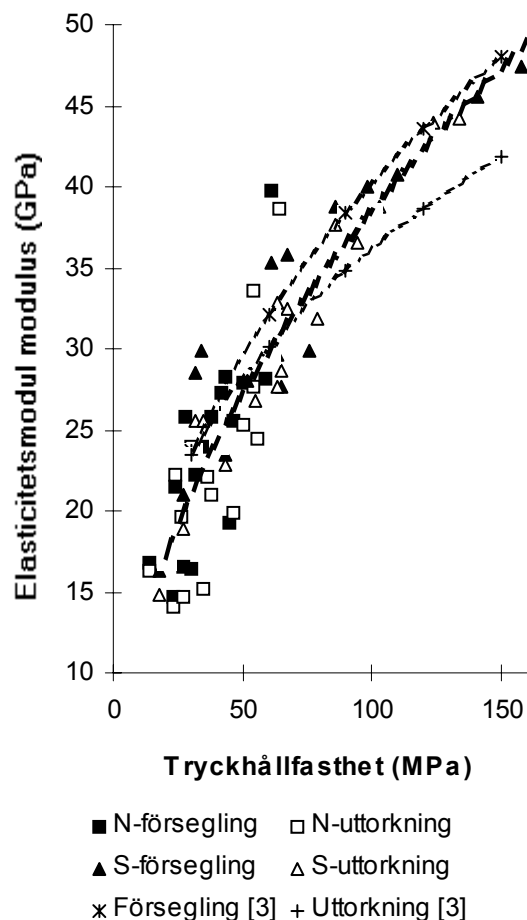
6.4 Elasticitetsmodul

Elasticitetsmodulen beräknades endera som inversen av kompliansen vid pålastning av

betongen eller som dito vid avlastning [3]. Figur 6.11 visar elasticitetsmodulen efter ca 100 s vid pålastning. Mycket små skillnader uppmättes mellan elasticitetsmodulen hos självkompakterande betong och elasticitetsmodulen hos normal betong under förutsatt att tryckhållfastheten hölls konstant, figur 6.11. Elasticitetsmodulen versus hållfastheten, f_c (MPa) vid pålastning av normal- och självkompakterande och betong beräknades enligt följande uttryck (GPa):

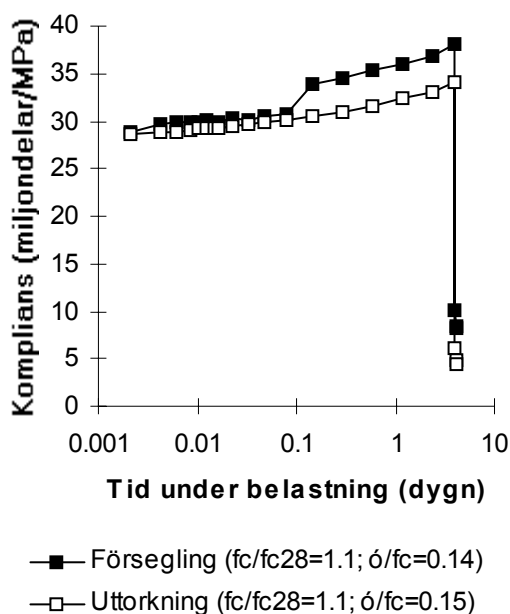
$$E_p = 3.75 \cdot \sqrt{f_c} \quad (6.10)$$

I figur 6.11 visar även uttryck för elasticitetsmodulen enligt ekv. (2.5)-(2.6) ovan [3]. Skillnaden mellan det förenklade uttrycket enligt ekv. (6.10) och [3] var avsevärd troligen beroende på belastningstiden: 100 s i föreliggande försök jämfört med 0.01 s i [3].

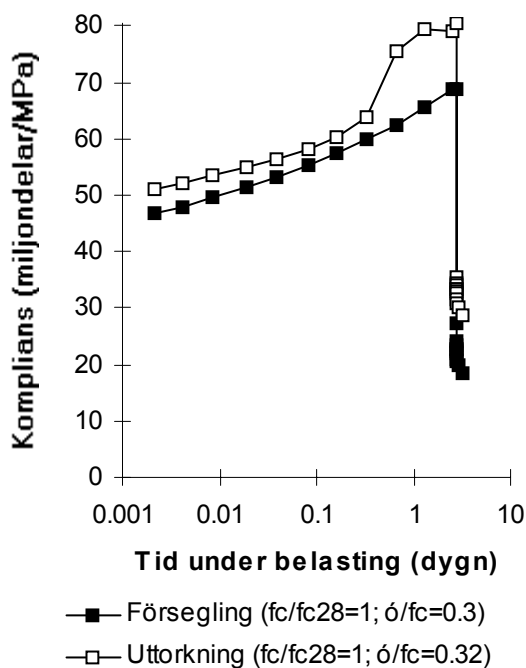


Figur 6.11 - Elasticitetsmodulen efter ca 100 s vid pålastning. N = normal; S = självkompakterande betong. Andra försök [3].

I syfte att utföra en mer noggrann beräkning av elasticitetsmodulen efter snabb pålastning och avlastning utfördes försök med betong 38S och 80S i en snabb MTS maskin. Såväl förseglade som uttorkande prover studerades. Försöken visade dock mycket stor excentricitet. Elasticitetsmodulen kunde därför ej beräknas, figur 6.12-13, appendix 9.



Figur 6.12 – Korttidsförsök med betong 38S utförda i MTS maskin. Se även appendix 9.



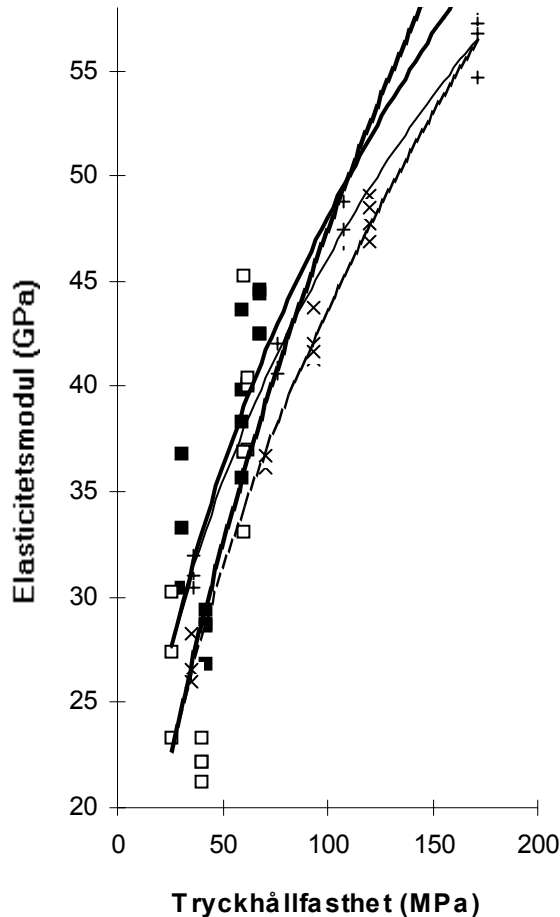
Figur 6.13 – Korttidsförsök med betong 80S utförda i MTS maskin. Se appendix 9.

Elasticitetsmodulen beräknades även omedelbart efter avlastning av provkropparna. Mätningen utfördes ca 100 s efter avlastning och visar den s. k. omedelbara elasticiteten hos betongen. Efter en tids relaxation kryper sedan betong tillbaka (expanderar ytterligare) varefter den plastiska krympningen återstår. Den återgående delen av betongens deformation kallas försenad elasticitet och ingår således ej i den beräknade elasticiteten vid avlastning. Figur 6.14 visar att ingen signifikant skillnad erhöles mellan elasticitetsmodulen för normal betong och elasticitetsmodulen för självkompakterande betong vid konstant hållfasthet även om en tendens fanns till att elasticitetsmodulen för självkompakterande betong var något lägre (ca 2 MPa) vid konstant tryckhållfasthet än elasticitetsmodulen för normal betong, figur 6.14. Figur 6.15 visar att olika elasticitetsmoduler beräknades vid avlastning av förseglade och uttorkade provkroppar. Effekten av uttorkning på elasticitetsmodulen vid konstant tryckhållfasthet är känd sedan tidigare och visar i figur 6.11 ovan [3]. I figur 6.15 visar en jämförelse med elasticitetsmodulen vid pålastning enligt ovan (figur 6.11) samt med normen Model Code 90 (tillägg) [13]. Jämförelsen visar en god överensstämmelse mellan elasticitetsmodulen enligt MC 90 och föreliggande experimentella resultat vid avlastning av betongen, figur 6.15. Resultaten av elasticitetsmodulen vid pålastning visade ca 8 MPa lägre elasticitetsmodulen troligen till följd av tidig krympning hos betongen. Ur figur 6.15 beräknades följande uttryck för elasticitetsmodulen vid avlastning för såväl normal som självkompakterande betong:

$$E_{aB} = 8.26 \cdot f_c^{0.375} \quad (6.11)$$

$$E_{aD} = 4.85 \cdot f_c^{0.481} \quad (6.12)$$

f_c aktuell tryckhållfasthet (MPa)
 E_a elasticitetsmodulen (avlastning, GPa)
 B, D förseglad resp. uttorkning



- N-försegling (fet heldragen linje)
- N-uttorkning (fet streckad linje)
- + S-försegling (tunn heldragen linje)
- × S-uttorkning (tunn streckad linje)

Figur 6.14 - Elasticitetsmodulen vid avlastning av normal- och självkompakterande betong vid varierande hållfasthet. N = normal; S = självkompakterande betong.

6.5 Krypning

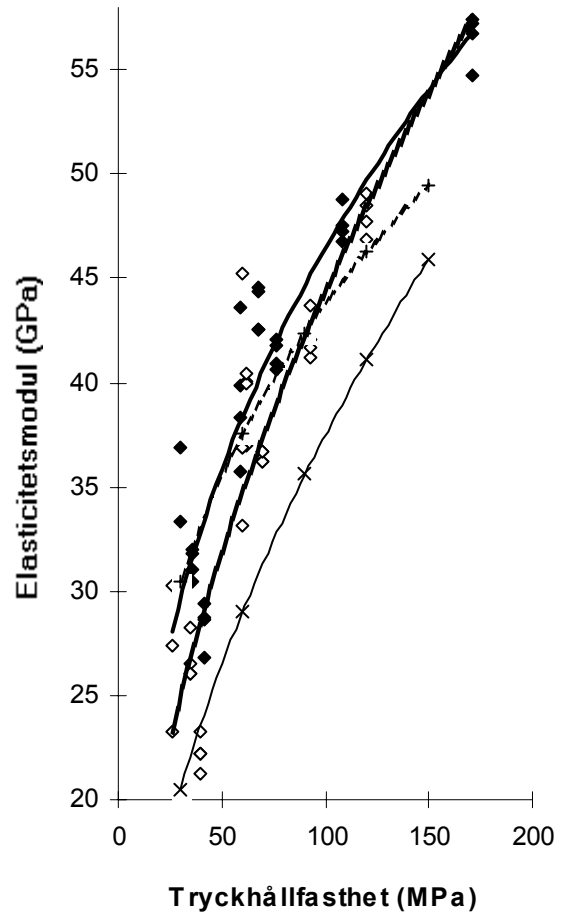
Allmänt:

Kryptalen för samtliga studerade betonger ges i appendix 7. Kryptalet definieras ovan:

$$\varphi = \varepsilon_1 / \varepsilon_E - 1 \quad (2.7)$$

Beteckningar:

- ε_1 deformation, långtid
- ε_E deformation, elastisk vid avlastning, ca 1-2 års ålder

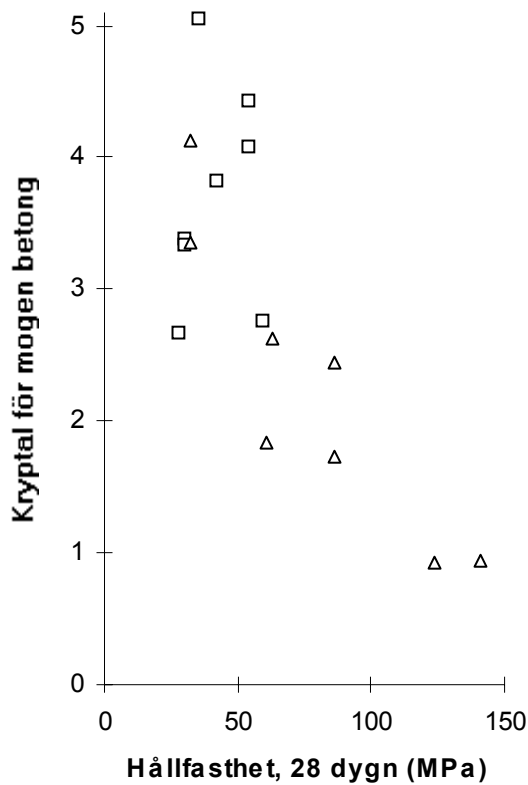


- ◆ Försegling (fet heldragen linje)
- ◇ Uttorkning (fet streckad linje)
- × Pålastning (tunn heldragen linje)
- + MC90 tillägg (tunn streckad linje)

Figur 6.15 - Elasticitetsmoduler vid avlastning av förseglade och uttorkade provkroppar, vid pålastning enligt ovan samt beräknat enligt Model Code 90 (tillägg) [13].

Inverkan av betongtyp efter 1 år:

Kryptal för, mogen betong vid pålastningen, som funktion av 28-dygnshållfastheten ges i figur 6.16. Ingen signifikant skillnad kunde utskiljas mellan kryptalen för normal- och självkompakterande betong. Det var därefter möjligt att studera inverkan av härdningsförhållanden.



□ Normal Δ Självkompakterande

Figur 6.16. - Kryptal efter 1 år för mogen betong versus 28-dygnshållfastheten, dels normal-, dels självkompakterande betong.

Inverkan av härdningsförhållanden:

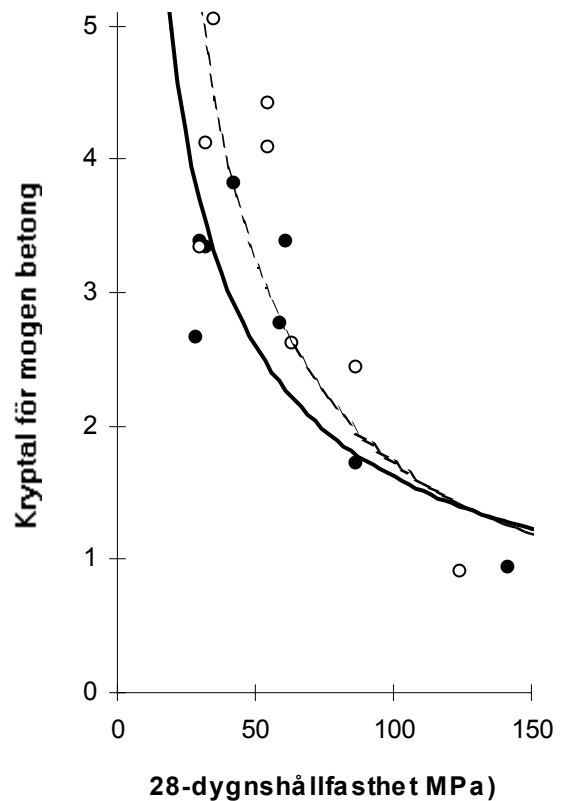
Figur 6.17 visar kryptal för mogen betong som funktion av 28-dygnshållfastheten, dels för förseglad betong, dels för uttorkande betong. Som även visats ovan var kryptalet större för uttorkande betong än för förseglad. Följande samband erhöles för kryptalet:

$$\varphi_{IB} = 38 \cdot f_{c28}^{-0.682} \quad (6.13)$$

$$\varphi_{ID} = 110 \cdot f_{c28}^{-0.9} \quad (6.14)$$

Beteckningar:

- f_{c28} 28-dygnshållfastheten (MPa)
- B förseglad härdning
- D uttorkning
- φ_1 kryptalet efter 1 år för mogen betong



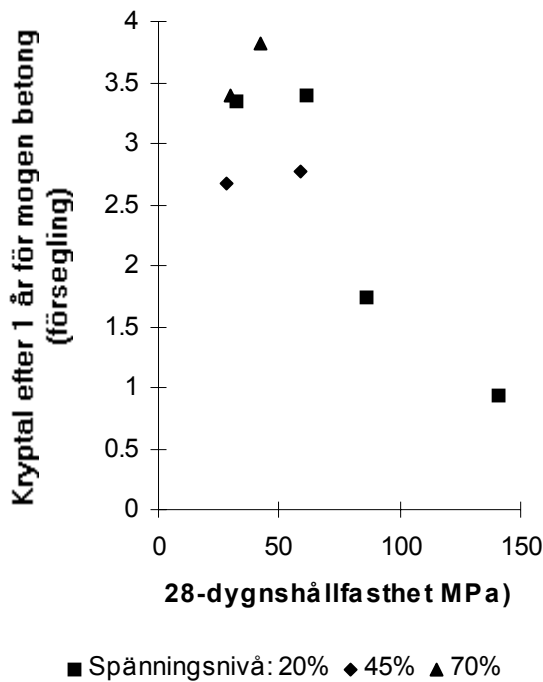
● Försegling ○ Uttorkning

Figur 6.17 – Kryptal efter 1 år för mogen betong versus 28-dygnshållfastheten, dels för förseglad betong, dels för uttorkande betong.

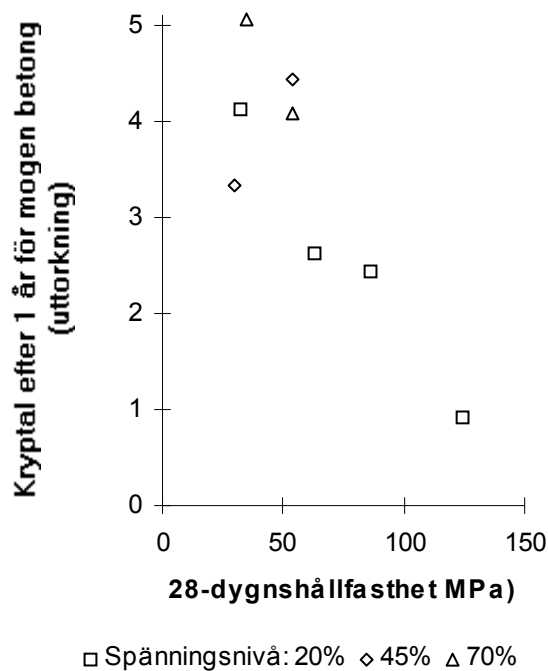
För förseglad betong ökade 1-årskryptalet, φ_{B1} , med lägre tryckhållfasthet, från ca 1 ($f_{c28} = 150$ MPa) till 3 ($f_{c28} = 30$ MPa). För uttorkande betong ökade 1-årskryptalet, φ_{D1} , med lägre tryckhållfasthet, från ca 1 ($f_{c28} = 150$ MPa) till ca 5 ($f_{c28} = 30$ MPa). Vid lägre hållfasthet var dock kryptalet ca 50% större än tidigare känt. Orsaken till denna ökning är okänd. Vid högre tryckhållfasthet bekräftar föreliggande försök resultat från forskning med högpresterande betong nämligen att kryptalet är litet för högpresterande betong [3].

Inverkan av spänningsnivå:

Spänningsnivå skulle kunna inverka på kryptalet. Figureerna 6.18-6.19 visar att så ej var fallet. Spänningsnivåerna 20, 45 och 70% (vid pålastning) undersökes, dels för förseglning, dels för uttorkande provkroppar.



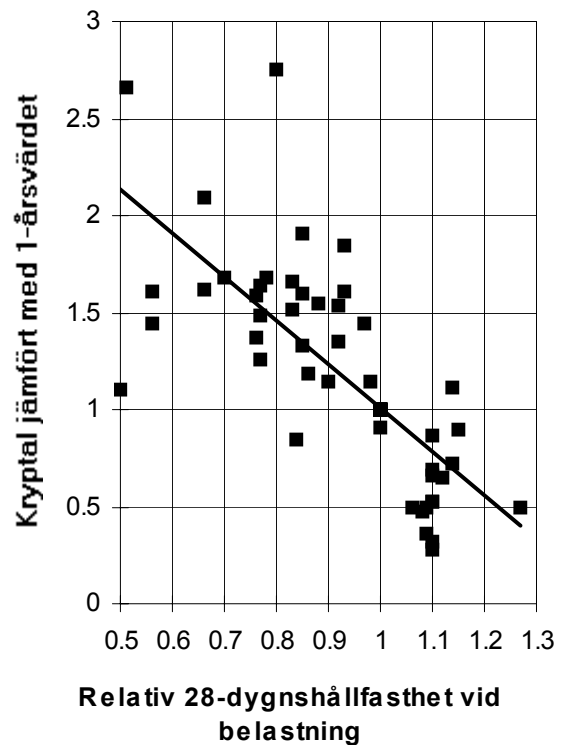
Figur 6.18 – Krytpal efter 1 år för förseglad betong vid varierande spänningsnivåer.



Figur 6.19 – Krytpal efter 1 år för uttorkande betong vid varierande spänningsnivåer.

Generell inverkan av belastningsålder:

Figur 6.20 visar krytpal relativt 1-årsvärdet och relativa 28-dygns hållfastheten vid pålastning. Ur figur 6.20 erhöles följande ekvation för förändringsfaktor relativ 28-dygns hållfasthet vid belastning, k:



Figur 6.20 - Krytpal relativt 1-årsvärdet och relativa 28-dygns hållfastheten (pålastning).

$$k = 1.44 \cdot [(2.25 - (f_c / f_{c28}))] \quad (6.15)$$

Beteckningar:

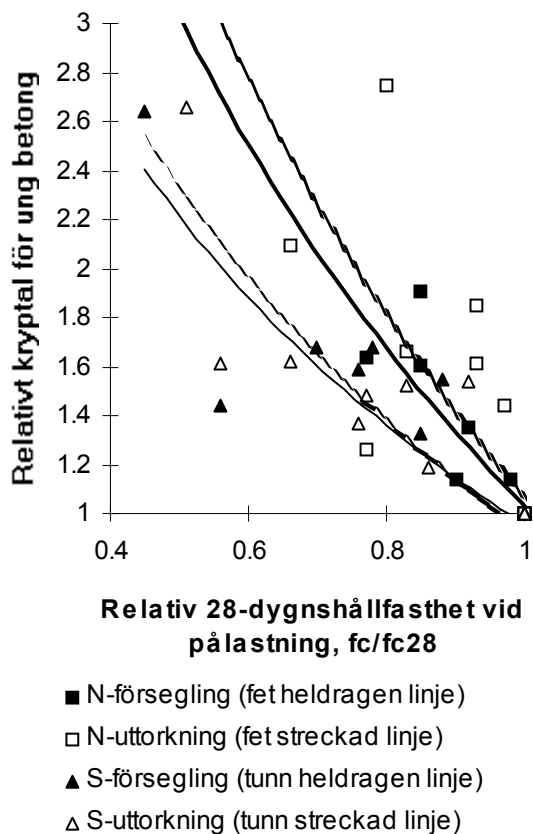
f_c / f_{c28} relativa 28-dygns hållfastheten

k förändringsfaktor relativ

28-dygns hållfasthet vid belastning

Inverkan av ung ålder vid pålastning:

Delsyftet med projektet var att undersöka inverkan av betongålder på krypningen. Exempelvis avformas byggfuktfril betong tidigt då hållfastheten hos betongen är ungefär hälften av sluthållfastheten. En förstoringfaktor bestämdes för kryptalet jämfört med 1-årskryptalet för mogen betong. Figur 6.21 visar relativa kryptalet för ung betong. Olika förstoringfaktorer erhöles för normal betong och självkompakterande betong. Orsaken till denna skillnad är okänd. Självkompakterande betong gav således en mindre ökning av kryptalet vid låg pålastningshållfasthet än vad normal betong gav. Följande samband erhöles förstoringfaktor för ung betong k_{yo} :



Figur 6.21 - Relativ kryptalet för betong ung vid pålastning. Olika förstöringsfaktorer erhöles för normal och självkompakterande betong. N = normal betong; S = självkompakterande betong.

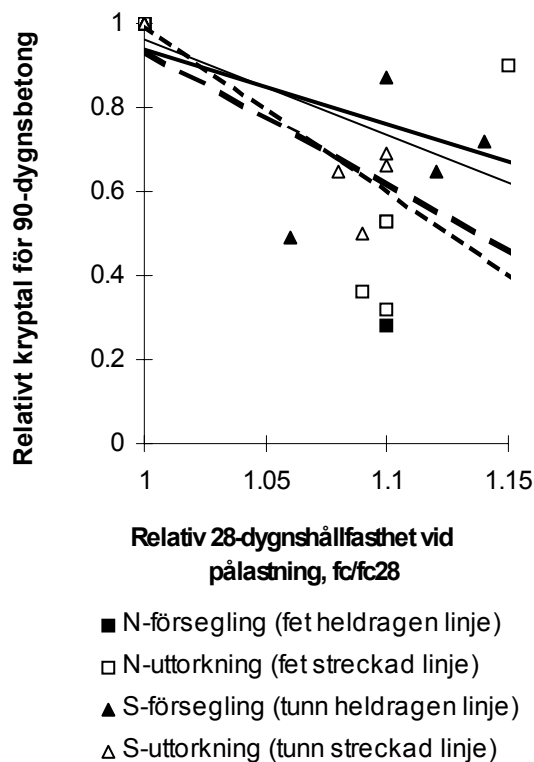
$$k_{y0N} = 3.2 \cdot [0.31 - \ln(f_c/f_{c28})] \quad (6.16)$$

$$k_{y0S} = 1.9 \cdot [0.53 - \ln(f_c/f_{c28})] \quad (6.17)$$

f_c/f_{c28} relativa 28-dygnshållfastheten
 k_{y0} förstöringsfaktor för ung betong
N normal betong
S självkompakterande betong

Inverkan av 90 dygns belastningsålder:

Härningen av betongen före pålastning hade en kraftig inverkan på kryptalet. Figur 6.22 visar relativa kryptalet för betong som var 90 dygn vid pålastning. Spridningen av resultaten i figur 6.22 är stor. Kryptalet för en uttorkad betong vid 90 dygns belastningsålder var dock betydligt mindre än kryptalet för en förseglad betong (Picketts effekt [7]). Följande ungefärliga samband erhöles för förminskningsfaktorn, k_{90} :



Figur 6.22 - Relativa kryptalet för betong som var 90 dygn vid pålastning. Betongtyp och härdningssätt anges i figuren.

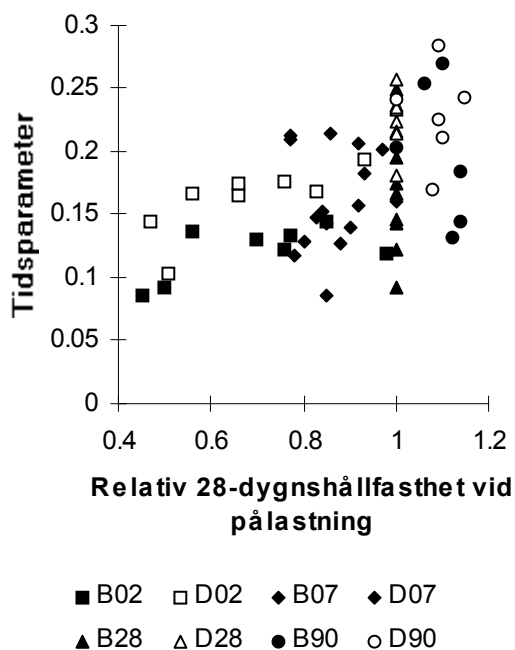
$$k_{90B} = 2 \cdot [1.5 - (f_c/f_{c28})] \quad (6.18)$$

$$k_{90D} = 3.5 \cdot [1.3 - (f_c/f_{c28})] \quad (6.19)$$

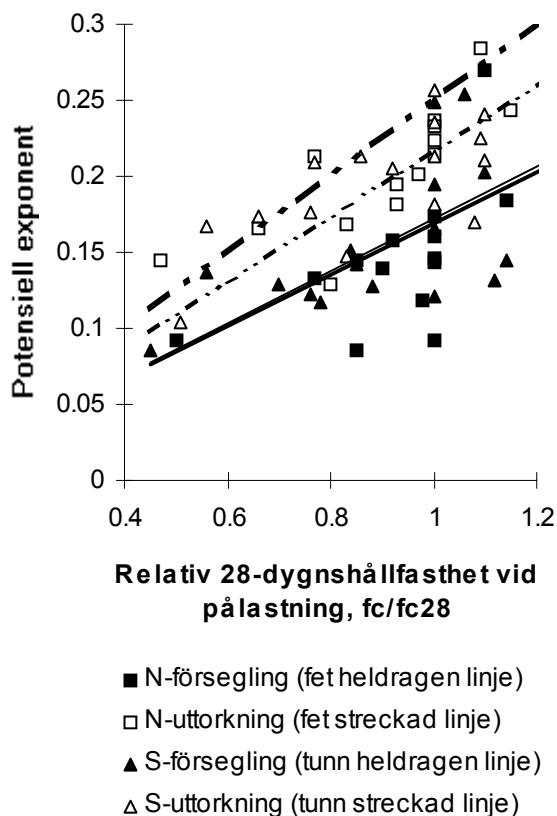
f_c/f_{c28} relativa 28-dygnshållfastheten
 k_{90} förminskningsfaktorn vid 90 dygns belastningsålder
B förseglad betong
D uttorkande betong

Inverkan av belastningstid:

Ovan redovisade kryptalet avser 1 års belastningstid. I appendix 7 redovisa kryptalsförändringar med tiden. Från appendix 7 var det (i likhet med den ovan redovisade tidberoendet för krympningen), möjligt att ta fram ett tidsanpassat kryptalet relativt 1-årsvärdet. Appendix 8 visar tidsutvecklingen av kryptalet relativt 1-årsvärdet. Appendix 8 visar att kryptalet (med tiden) utvecklas som en potensfunktion med en exponent enligt figurerna 6.23-6.24 enligt följande samband:



Figur 6.23 - Exponent för en potensfunktion som anger kryptalets tidsförändring.



Figur 6.24 - Exponent för en potensfunktion som anger kryptalets tidsförändring.

$$\varphi_{tB} = \varphi_{28B} \cdot t^{0.17 \cdot (f_c/f_{c28})} \quad (6.20)$$

$$\varphi_{tD} = \varphi_{28D} \cdot t^{0.235 \cdot (f_c/f_{c28})} \quad (6.21)$$

Beteckningar:

f_c/f_{c28} relativa 28-dygns hållfastheten

t tid under belastning ($0.001 < t < 1$ år)

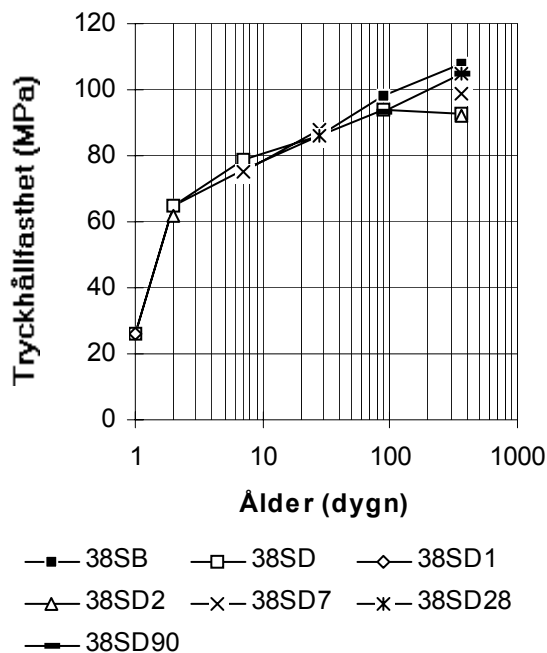
B, D försegling resp. uttorkning

φ_{28} kryptalet efter 1 år för betong belastad vid 28 dygns ålder

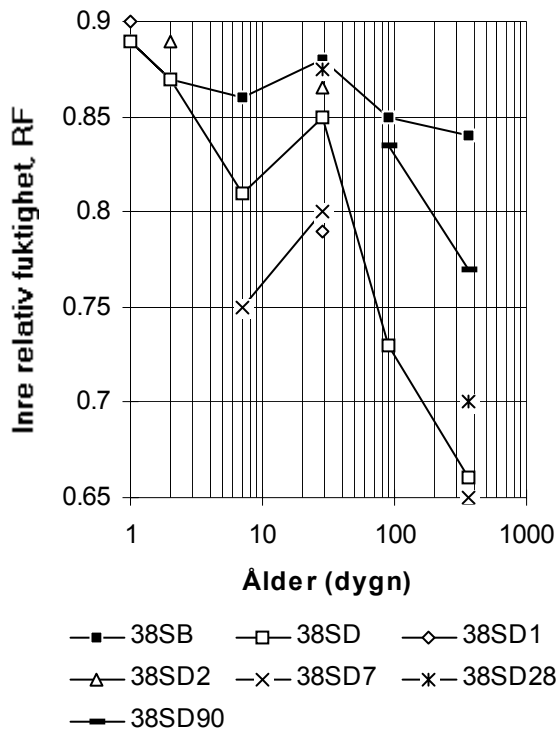
φ_t kryptalets förändring med tiden

6.6 Krympning vid försenad torkstart

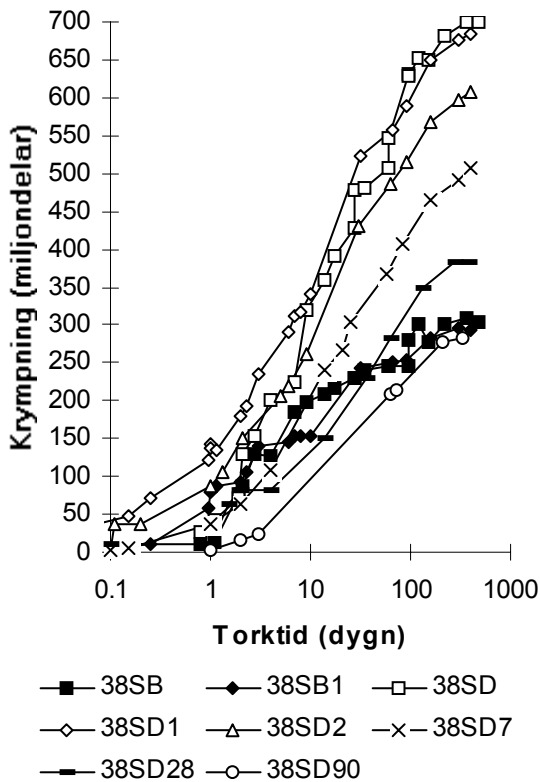
Normalt startas torkningen av betongen en viss tid efter avformning. I samtliga försök som redovisats ovan har torkningen av betongen påbörjats omedelbart efter det att avformningen utfördes. Det fanns därför skäl att komplettera undersökningen vid försenad torkstart. Torkningen påbörjades i detta fall samtidigt som betongen belastades vid 2, 7, 28 och 90 dygns ålder. De kompletterande försöken utfördes endast för betong 38S ($v_{ct} = 0.38$, självkompakterande). Figur 6.25 visar hållfasthetsutvecklingen för betong 38S vid försenad torkstart, i figur 6.26 inre relativa fuktigheten i betongen samt i figur 6.27 visas krympningen hos betong 38S vid försenad torkstart. Figureerna visar motsvarande värden för torkstart vid 2 dygns ålder samt för förseglad betong.



Figur 6.25 - Hållfasthet för betong 38S vid försenad torkstart. B = försegling; D = uttorkning; 7 = tid till torkstart (dygn).

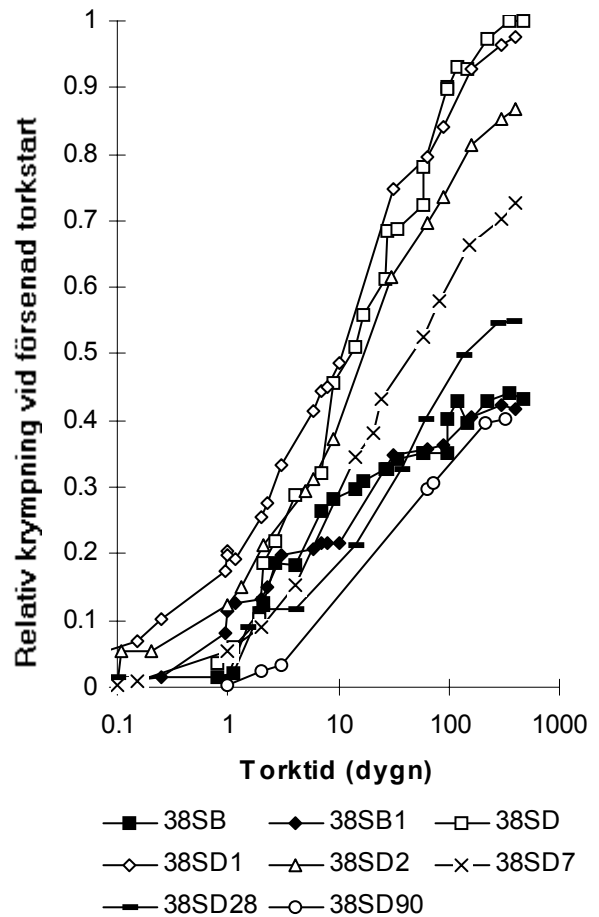


Figur 6.26 – Inre relativ fuktighet, RF, för betong 38S vid försenad torkstart. B = försegling; D = uttorkning; 7 = tid till torkstart (dygn).

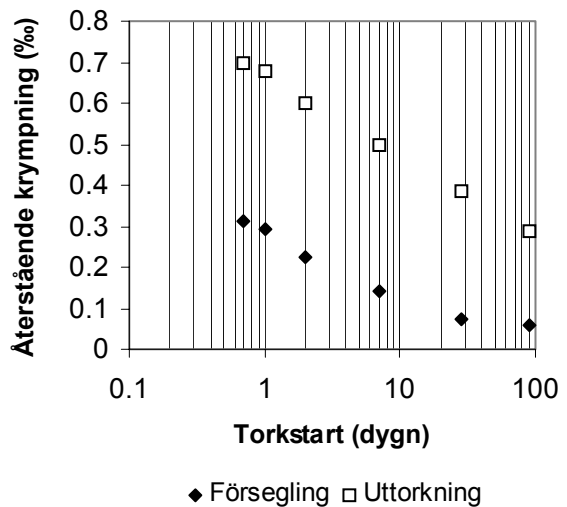


Figur 6.27 - Krympningen hos betong 38S vid försenad torkstart. B = försegling; D = uttorkning; 7 = tid till torkstart (dygn).

Figur 6.28 visar krympning hos betong 38S vid försenad torkstart i jämförelse med krympningen vid torkstart direkt efter avformning. Figur 6.29 visar den återstående krympningen vid försenad krympstart.



Figur 6.28 - Krympning hos betong 38S vid försenad torkstart i jämförelse med krympningen vid direktstart efter avformning.



Figur 6.29 - Återstående krympningen fram till 1 års ålder vid försenad krympstart.

Återstående krympning fram till 1 års ålder såväl vid uttorkning som vid försegling minskade således avsevärt vid en försenad torkstart. Från figur 6.29 erhöles följande samband för den återstående krympningen:

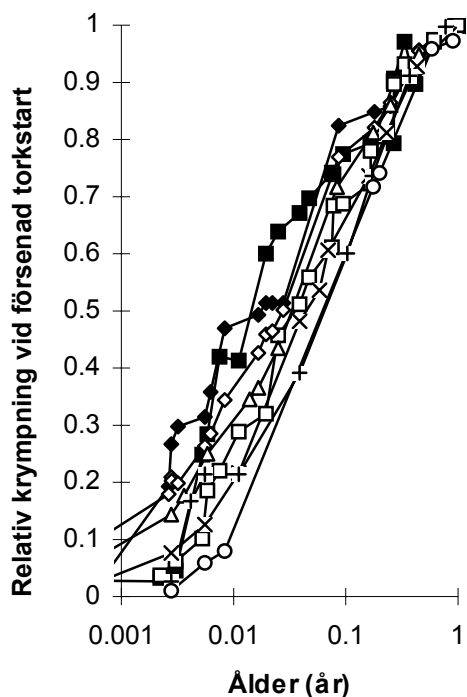
$$\varepsilon_{rB} = 0.055 \cdot [5 - \ln(t)] \quad (6.22)$$

$$\varepsilon_{rD} = 0.085 \cdot [8 - \ln(t)] \quad (6.23)$$

Beteckningar:

- ε_r = återstående krympning fram till 1 års ålder vid försenad krympstart (‰)
- $\ln(t)$ naturliga logaritmen av ålder vid torkstart (dygn)
- B försegling
- D uttorkning

Figur 6.30 visar krympningen vid försenad torkstart relativt krympningen vid torkning direkt efter avformning vid 1 dygns ålder.



- 38SB ◆ 38SB1 □ 38SD
- ◇ 38SD1 ▲ 38SD2 × 38SD7
- 38SD28 ○ 38SD90

Figur 6.30 - Krympningen vid försenad torkstart relativt krympningen vid torkning direkt efter avformning vid 1 dygns ålder.

Relativt sett utvecklades krympningen under försegling snabbast. Följande tidssamband erhöles för krympningen vid försenad torkstart relativt krympningen vid torkning direkt efter avformning vid 1 dygns ålder:

$$\varepsilon_{rtB} = [0.112 \cdot \ln(t) + 1] \cdot \varepsilon_{1B} \quad (6.24)$$

$$\varepsilon_{rtD} = [0.112 \cdot t_1^{0.096} \cdot \ln(t) + 1] \cdot \varepsilon_{1D} \quad (6.25)$$

Beteckningar:

- ε_{rt} = tidsutvecklingen av krympningen vid försenad krympstart relativt krympningen vid 1 års ålder (‰)
- ε_1 krympning vid 1 års ålder
- $\ln(t)$ naturliga logaritmen av ålder (dygn)
- t_1 ålder vid torkstart (dygn)
- B försegling
- D uttorkning

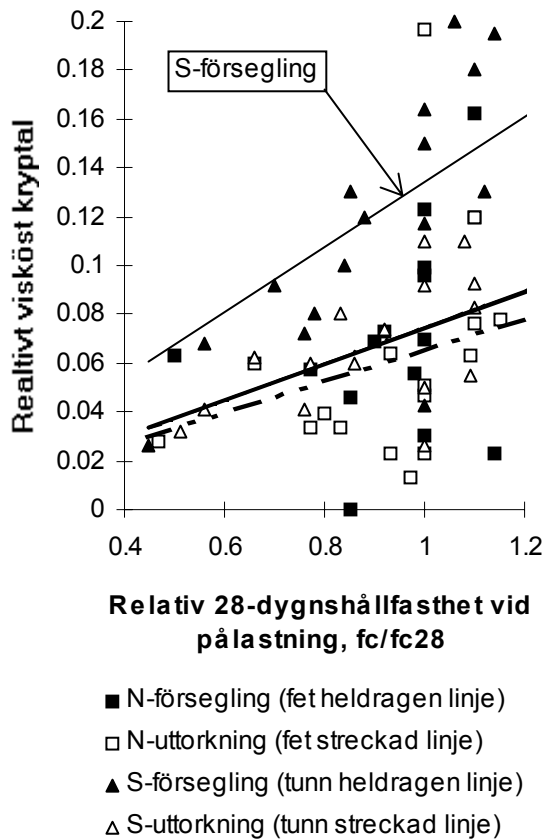
6.7 Försenad elasticitet

Den försenade elasticiteten uppmättes fram till 40 dygn efter avlastning. Figur 6.31 visar kryptalet för den försenade elasticiteten i relation till kryptalet vid avlastning. För förseglad självkompakterande betong som var mogen vid pålastning återvanns ca 14% av kryptalet inom 40 dygn jämfört med 7% för normal betong resp. uttorkad självkompakterande betong. Samband erhöles mellan den försenade elasticiteten, relativa hållfastheten vid pålastning och kryptalet. Ju äldre betongen var vid pålastning desto större blev den försenade elasticiteten. Sambanden framgår av följande funktioner:

$$\varphi_{feNSD} = 0.07 \cdot (f_c/f_{c28}) \cdot \varphi \quad (6.26)$$

$$\varphi_{feSB} = 0.14 \cdot (f_c/f_{c28}) \cdot \varphi \quad (6.27)$$

- B, D försegling resp. uttorkning
- f_c/f_{c28} rel. 28-dygns hållfasthet, pålastning
- N, S normal, självkompakterande betong
- NSD normal, förseglad självkompakterande
- φ_{fe} betecknar försenade elasticitetens andel av kryptalet (40 dygns relaxation)
- φ betecknar kryptalet enligt ekv. (2.7)



Figur 6.31 - Krypental för försenad elasticiteten fram till 40 dygn efter avlastning i relation till kryptalet vid avlastning. N = normal betong, S = självkompakterande betong.

6.8 Krypning vid försenad torkstart

Även kryptalet minskade vid försenad torkstart. I figur 6.32 visas kryptalet vid försenad torkstart. Som en jämförelse visas även kryptalet för förseglad betong. Betong med 28 eller mer dygns ålder vid torkstart erhöll ett mindre krypental (krypstart 28 eller 90 dygn) än förseglad betong med 2 dygns ålder vid krypstart. Figur 6.33 visar kryptalet efter 1 år som funktion av ålder vid torkstart. Följande ekvation erhöles, betong 38S:

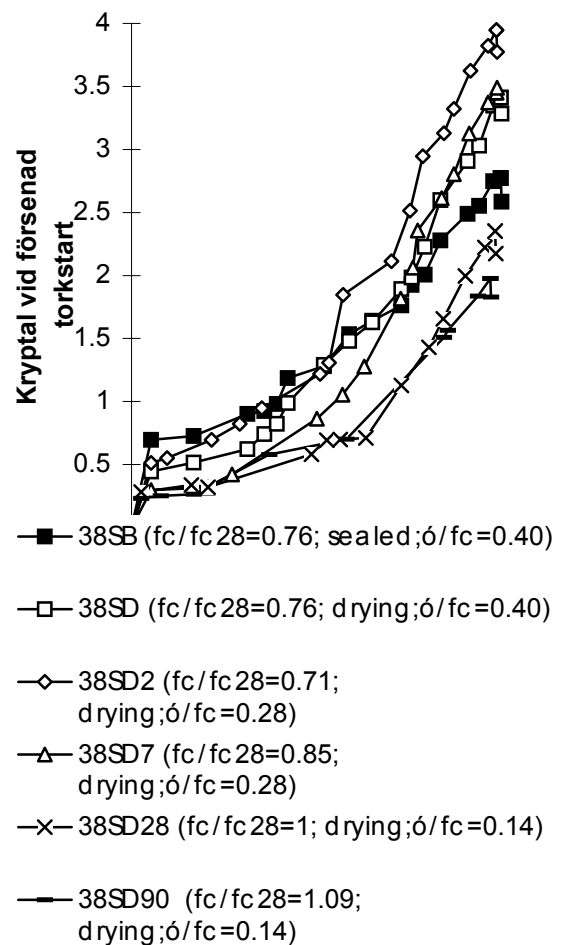
$$\varphi_{tID} = 0.402 \cdot [9.5 - \ln(t)] \quad (6.28)$$

Beteckningar:

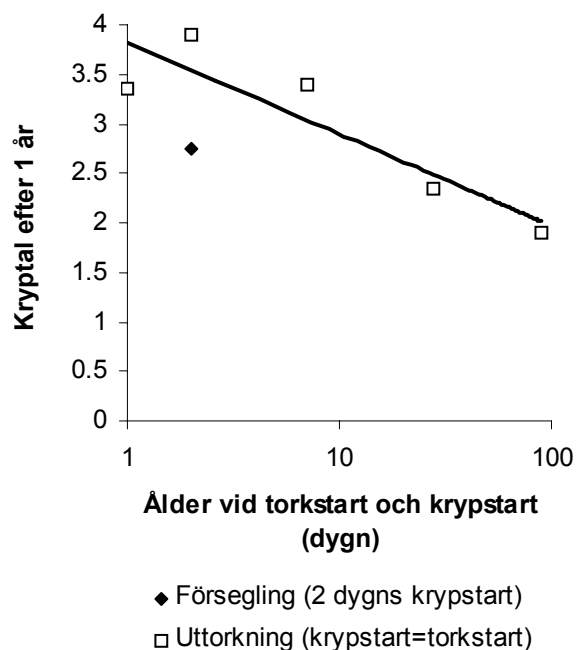
$\ln(t)$ naturliga logaritmen av ålder vid torkstart

D uttorkning

φ_{tID} kryptalet efter 1 år vid försenad torkstart



Figur 6.32 - Krypental vid försenad torkstart samt för förseglad betong. B = försegling; D = uttorkning; 7 = tid till torkstart (dygn).



Figur 6.33 - Kryptalet efter 1 år som funktion av ålder vid torkstart.

Enl. figur 6.33 erhöjls relation för kryptalet:

$$\varphi_{tD} = \varphi_1 \cdot t_r^{0.19t} \quad (6.37)$$

Beteckningar:

t_r ålder vid torkstart (dygn)

φ_1 kryptal vid 1 års ålder

φ_{tD} kryptal vid försenad torkstart

7. Fältförsök

7.1 Allmänt

Fältförsöken utfördes från juni till december, 1999, vid kvarteret Södertorpsgården, Malmö, under byggnation av ett 13-vånings bostadshus med bjälklag i byggfuktfrö betong [16,17]. Sju bjälklag studerades, endera betong med vattencementtal, vct = 0.36 (plan 9-11) eller med vct = 0.40 (plan 3-8) användes. Betongens sammansättning och viktiga egenskaper ges i tabell 7.1. Nedre femtedelen av bjälklaget bestod av 45 mm förtillverkad betong (vct = 0.40). Betongbjälklagen avformades 2 dygn efter gjutning. I samband med avformningen mättes nedböjningen av bjälklaget med ett digitalt precisionsinstrument, NAC 3003. Efter en tid varierande mellan 2 veckor och 2 mån. förnyades mätningen av nedböjningen.

Tabell 7.1 - Betongens sammansättning och hållfasthet vid fältförsöken (kg/m³, MPa) [16,17].

| Material | Vct= 0.36 | Vct = 0.40 |
|---------------------------|-----------|------------|
| Makadam 8-16 | 672 | 696 |
| Makadam 4-8 | 192 | 93 |
| Grus 0-8 | 789 | 791 |
| Slamfiller | - | 100 |
| Cement | 490 | 445 |
| Peramin V ¹⁾ | - | 1.8 |
| Peramin F ²⁾ | 10.8 | 6.7 |
| Peramin HPA ³⁾ | 0.07 | |
| Vatten | 176 | 178 |
| 28-dygnshållfasthet | 79 MPa | 70 MPa |

1) vattenreducerare

2) flytmedel

3) luftporbildare

7.2 Resultat från fältförsök

Figur 7.1 ger beräknade kryptal (ekv. (2.7)):

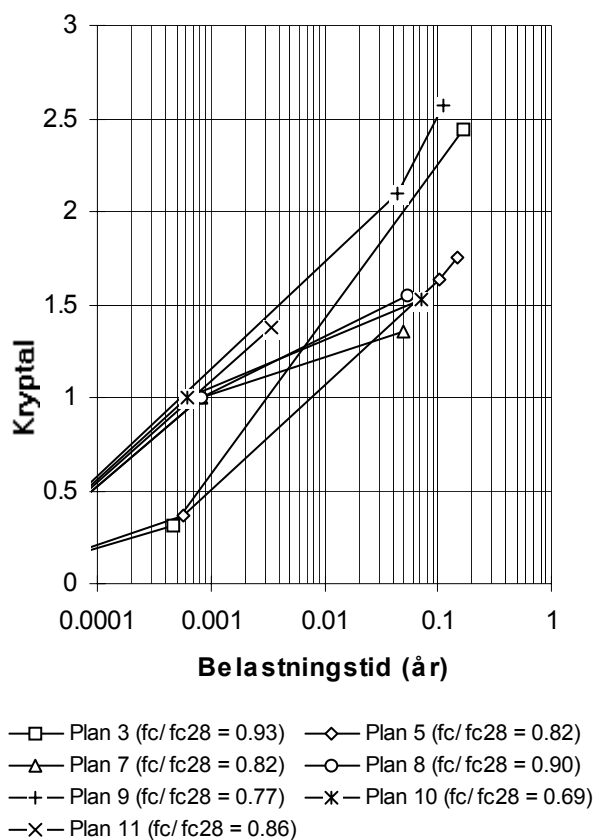
$$\varphi = \varepsilon_l / \varepsilon_E - 1 \quad (2.7)$$

Beteckningar:

ε_l deformation, långtid

ε_E deformation, elastisk vid avlastning, ca 1-2 års ålder

I figur 7.1 visas även 0.5·(relativa 28-dygnshållfastheten +1), dvs. hälften av summan av (tryckhållfastheten vid formrivning dividerad med hållfastheten vid 28 dygns ålder plus ett). På så sätt erhöjls ett medelvärde av bjälklaget relativa hållfasthet och den förtillverkade betongens hållfasthet (dygns ålder). Bjälklaget var inspänt i ena sidan varför en medelhållfasthet av platsgjuten och förtillverkade betong erfordras.



Figur 7.1 – Kryptal vid fältförsök som funktion av tiden. Plan 3-8: vct = 0.40; plan 9-11: vct = 0.36. Beteckning: fc/fc28 = relativ 28-dygnshållfasthet vid pålastning.

7.3 Felkällor och noggrannhet

Följande felkällor inverkade på jämförelsen mellan laboratorieresultat och fältresultat:

1. Hållfasthetsutvecklingen var annorlunda på byggplatsen än vid betongstationen där hållfastheten mättes
2. Spänningsnivån var betydligt lägre i fält än i laboratorium
3. Mätfel

Hållfasthetsutvecklingen bestämdes på betongkuber vilka placerades utomhus vid betongstationen. Korrekt utförda objektkuber skall placeras omedelbart ovanpå bjälklaget så att de antar bjälklagets temperatur. Troligen erhöll de fritt placerade kuberna en lägre temperatur och därmed lägre hållfasthet på kort sikt än vad betongen i bjälklaget erhöll.

Spänningsnivån var betydligt lägre i fält än i laboratorium. Spänningsutnyttjandet i bjälklagsbetong är nämligen lågt speciellt, som i det här fallet, inverkan av egentygnd. Det låga spänningsutnyttjandet kan ha givit upphov till ett lägre kryptal än om spänningsnivån varit lika stor i bjälklaget som vid laboratorieförsöken. Omätningar med det aktuella instrumentet visade att noggrannheten var god, inom ± 0.2 mm, varför denna felkälla ej hade någon inverkan.

7.4 Jämförelse mellan fältmätningar och laboratorieresultat

Jämförelse gjordes dels med laboratorieresultat ovan, dels med tidigare laboratorieresultat med högpresterande betong (datorprogram ”Creep” [4]). Eftersom utomhusförhållanden gällde betraktades betongen som förseglad. Följande ekvationer användes i jämförelsen med laboratorieförsöken:

$$\varphi_{28B} = 38 \cdot f_{c28}^{-0.682} \quad (6.13)$$

$$k_{yoN} = 3.2 \cdot [0.31 - \ln(f_c/f_{c28})] \quad (6.16)$$

$$\varphi_{tB} = \varphi_{28B} \cdot t^{0.17 \cdot (f_c/f_{c28})} \quad (6.20)$$

$$\varphi_{lab.} = k_{yoN} \cdot \varphi_{tB} \quad (7.1)$$

Beteckningar:

f_c/f_{c28} relativa 28-dygns hållfastheten

k_{yo} förstöringsfaktor för ung betong

t tid under belastning ($0.001 < t < 1$ år)

B, D förseglning resp. uttorkning

$\varphi_{lab.}$ resulterande kryptal m.h.t. ålder för laboratorieförsök

φ_{28} kryptalet efter 1 år för betong belastad vid 28 dygns ålder

φ_t kryptalets förändring med tiden

φ_1 kryptalet efter 1 år för mogen betong

Följande ekvationer användes i jämförelsen med försök med högpresterande betong enligt tidigare försök [3]:

$$\varphi_{hp.} = (\varphi_{pB} + \varphi_v) t^{0.17 \cdot (f_c/f_{c28})} \quad (7.2)$$

Beteckningar:

f_c/f_{c28} relativa 28-dygns hållfastheten

t tid under belastning ($0.001 < t < 1$ år)

$\varphi_{hp.}$ kryptalet för högpresterande betong enligt tidigare försök [3]

φ_{pB} ges ovan av ekv. (2.10)

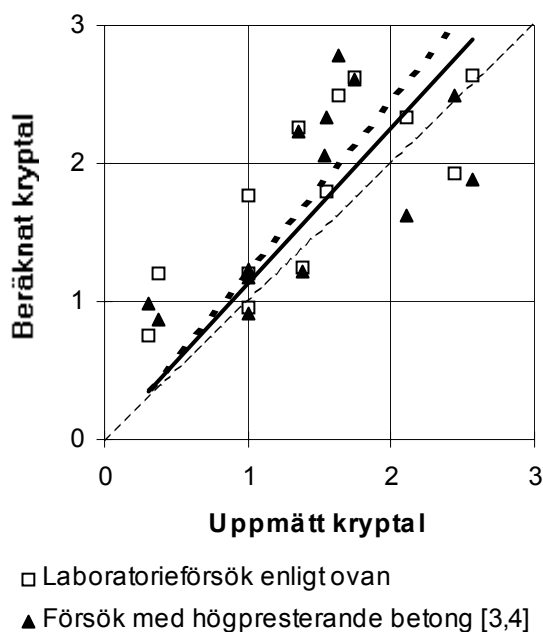
φ_v ges ovan av ekv. (2.12).

Figur 7.2 visar de beräknade kryptalen som funktion av det uppmätta.

De kryptalen som beräknades enligt laboratorieresultat ovan var ca 22% större än de uppmätta. De kryptalen som beräknades enligt högpresterande betong [3,4] var ca 13% större än de uppmätta. Som nämnts ovan berodde skillnaderna på följande:

1. Hållfasthetsutvecklingen var annorlunda på byggplatsen än vid betongstationen
2. Spänningsnivån var troligen betydligt lägre i fält än vid laboratorieförsöken.

Överensstämmelsen mellan beräknade och uppmätta kryptal får trots allt anses som god.



Figur 7.2 – Kryptal beräknade vid laboratorieförsök och vid försök med högpresterande betong som funktion av det uppmätta.

8. Sammanfattning och slutsatser

8.1 Allmänt

För krypstudierna tillverkades 8 st. betongtyper varav hälften med hög lufthalt och hälften med självkompakterande egenskaper. Parallellt utfördes studier av hållfasthet, krympning och inre relativa fuktigheten. Laboratorieförsöken omfattade studier av krympning och krypning på 88 st. cylindrar samt hållfasthet och inre relativ fuktighet på 250 st. kuber, bägge provkroppstyperna utförda i modern betong, endera normalkompakterande med luftporbildare eller av självkompakterande kvalitet. Fältförsök utfördes på bjälklag i ett bostadshus i Malmö.

8.2 Kryptal, krympning och elasticitetsmodul

Resultaten visar att såväl krympningen som kryptalet var av samma storleksordning i normalkompakterande betong och i självkompakterande betong vid konstant 28-dygnshållfasthet. Efter 1 år uppgick uttorkningskrympningen till ca 0.6‰ medan den förseglade krympningen var mindre än

0.2‰. Ej heller vad gällde elasticitetsmodulen kunde någon signifikant skillnad observeras mellan normalkompakterande betong och självkompakterande betong. Även kryptalsutvecklingen (med tiden) var av samma storleksordning hos normalkompakterande och självkompakterande betong. Kryptalet, efter 1 år, för mogen förseglad betong varierade från ca 3 vid hållfastheten 30 MPa till ca 1 vid 120 MPa. Vid lägre hållfasthet var kryptalet ca 50% större för uttorkande betong än för förseglad. Val av produktionsmetod hade stor inverkan, dvs. högre hållfasthet i resp. försegling av betongen gav mindre deformationer hos konstruktionen.

8.3 Inverkan av belastningsålder

Belastningsåldern hade stor inverkan på kryptalet. Belastning vid ung ålder dubblade kryptalet jämfört med belastning vid 28 dygns ålder medan motsatsen gällde vid 90 dygns belastningsålder (en halvering av kryptalet således jämfört med belastning vid 28 dygns ålder). Sen belastning är en produktionsmetod med vars hjälp krypnings storlek kan minskas. Tidsutvecklingen av krympningen var snabbare hos uttorkande betong än hos förseglad. Laboratorieförsöken visade att en försenad torkstart till 90 dygns ålder mer än halverade såväl krympningen som kryptalet jämfört med motsvarande parametrar vid torkstart omedelbart efter avformning. Försenad torkstart är en produktionsmetod med vars hjälp en stor del av deformationerna kan bemästras. Den försenade elasticiteten minskade, i likhet med tidigare rön, kryptalet med ca 10%.

8.4 Fältförsök

Fältmätningarna omfattade studium av nedböjning på 7 st. bjälklag utförda i byggfuktfrifri betong. Fältresultaten visade något mindre kryptal, ca 20%, än laboratorieresultaten troligen beroende av att hållfasthetsutvecklingen var snabbare på byggplatsen än vid betongstationen samt av att spänningsnivån troligen var betydligt lägre i fält än i laboratorium.

Referenser

- [1] Persson, B., Fagerlund, G., Självuttorkning och dess betydelse inom betongteknologin "Self-desiccation and Its Importance in Concrete Technology." Rapport TVBM-3075. (Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola: Lund, 1997) 255 sid.
- [2] Persson, B., Krympsprickor i väggar å Kv. Potatisåkern, Limhamn. Rapport U 99.14. LTH Byggnadsmaterial. Lund (1999) 3 sid.
- [3] Persson, B., Skenbart ögonblickliga samt långtidsdeformationer hos högpresterande betong med vissa samhörande egenskaper. "Quasi-instantaneous and Long-term Deformations of High Performance Concrete with Some Related Properties." Rapport TVBM-1016 (Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola: Lund, 1998) 500 sid.
- [4] Persson, B., Lundahl, M., Datorprogram "Creep" för beräkning av mekaniska egenskaper hos högpresterande betong. "Computer Program CREEP for Estimation of Mechanical Properties of högpresterande betong." Rapport U99.06 + CD-rom. (Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola: Lund, 1998) 2 sid.
- [5] Persson, B., Krypning, krympning och elasticitetsmodul hos självkompakterande betong. "Creep, Shrinkage and Elastic Modulus of Self-compacting Concrete." Första internationella RILEM-symposiet om självkompakterande betong. Stockholm. (Utgivare: Skarendahl and Peterson. 1999) 239-250.
- [6] Persson, B. Shrinkage and Creep of Self-compacting Concrete, SCC. Proceedings of the 17th Symposium on Nordic Concrete Research. Reykjavik. Iceland. Publisher: The Norwegian Concrete Association. Oslo. Ed. by O. Wallevik. 1999, 55-57.
- [7] Acker, P., Krypning och krympning hos betong. "Creep and Shrinkage of Concrete." Femte internationella RILEM-symposiet beträffande krypning och krympning hos betong. Barcelona. (E & FN Spon: London, 1993) 3-14.
- [8] Persson, B., Sjuårig studie av effekten av silikastoft i betong. "Seven-year Study of the Effect of Silica Fume in Concrete." Advanced Cement Based Materials 7 (1998) 139-155.
- [9] Hassanzadeh, M., Brottmekaniska egenskaper hos högpresterande betong. "Fracture Mechanical Properties of High-Performance Concrete." Report M4:05 (Avd. Byggnadsmaterial, Lunds Tekniska Högskola: Lund, 1994) 8-13.
- [10] Torka S. Beräkningsprogram för uttorkning av byggfukt. SBUF (1999).
- [11] Persson, B., Beräkningsprogram TORC för val av vct i byggfuktfri betong." Bygg & Teknik. 95/7: Stockholm (1995) 22-25.
- [12] Persson, B., Fukt i betong efter olika härdningssätt. "Moisture in Concrete Subjected to Different Kinds of Curing." Materials and Structures 30. RILEM (203, 1997) 533-544.
- [13] Persson, B., Självuttorkning och dess betydelse inom betongteknologin. "Self-Desiccation and Its Importance in Concrete Technology." Materials and Structures 30. RILEM (199, 1997) 293-305.
- [14] Tazawa, E., Miyazawa, S., Inverkan av sammansättning och härdningsförhållande på självuttorkningskrympning hos betong. "Effect of Constituents and Curing Conditions on Autogenous Shrinkage of Concrete." Workshop. Hiroshima (Red. Tazawa, E.. E &

- Spon: London: 1999) 269-280.
- [15] Jaccoud, J.-P., Leclercq, A., Synpunkter beträffande utvidgning av nuvarande konstruktionsregler för högpresterande betong. "Some Aspects Concerning Extension of Present Design Rules to HPC-structures." Materialegenskaper och konstruktion. Workshop beträffande för högpresterande betong. (Red. F H Wittmann, P Schwesinger: Freiburg and Unterengstringen. 1995) 341-357.
- [16] Nilsson, L.-O., Är högpresterande betong lösningen på fuktproblemen?
- [17] Fagerlund, G.; Persson, B.. Högpresterande betong utan byggfukt. Cementa 3/90 (1990) 18-19.
- [18] Andersson, J., Personlig information. Sydsten AB. Malmö (1999)
- [19] Persson, J., Personlig information. Sydsten AB. Malmö (1999)

APPENDIX 1

Tryckhållfasthet hos provad betong (100 mm kub)

Beteckningar:

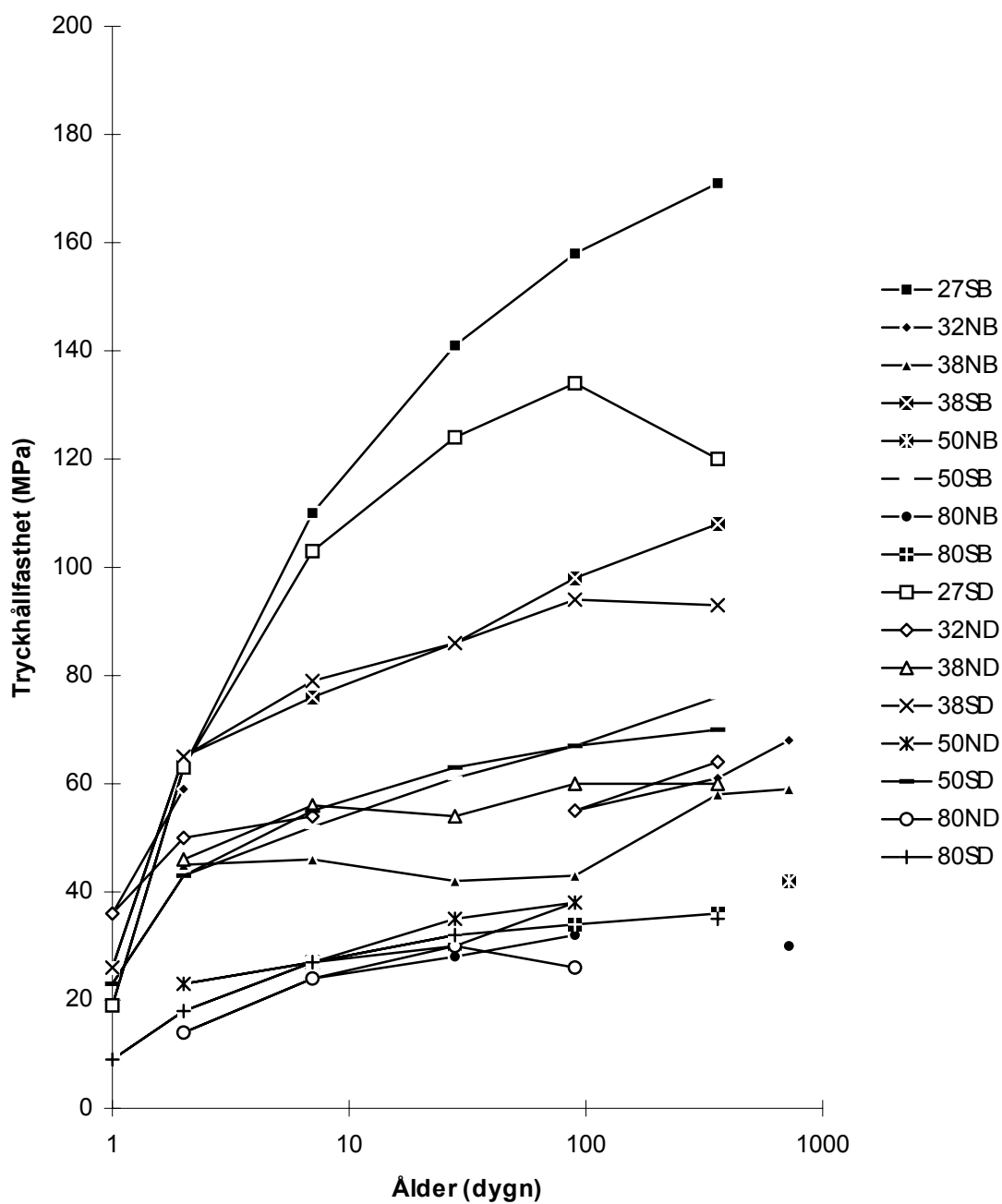
B = försegling

D = lufthårdning

N = normalkompakterande betong

S = självkompakterande betong

27 = vct (%)



APPENDIX 2

Inre relativ fuktighet hos provad betong (100 mm kub)

Beteckningar:

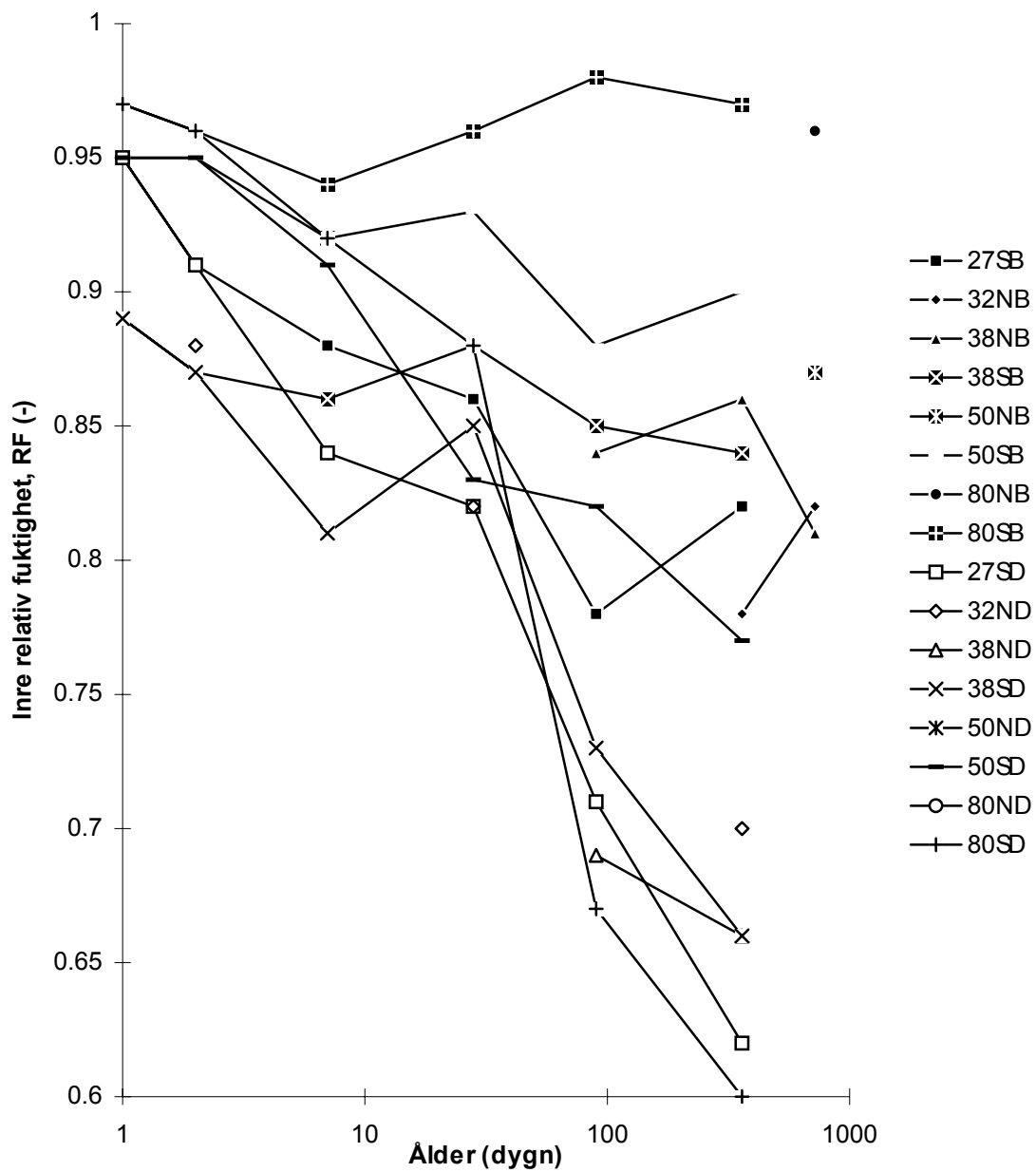
B = försegling

D = lufthårdning

N = normalkompakterande betong

S = självkompakterande betong

27 = vct (%)



APPENDIX 3

Krympning hos provad betong (100 mm cylinder med längden 500 mm)

Beteckningar:

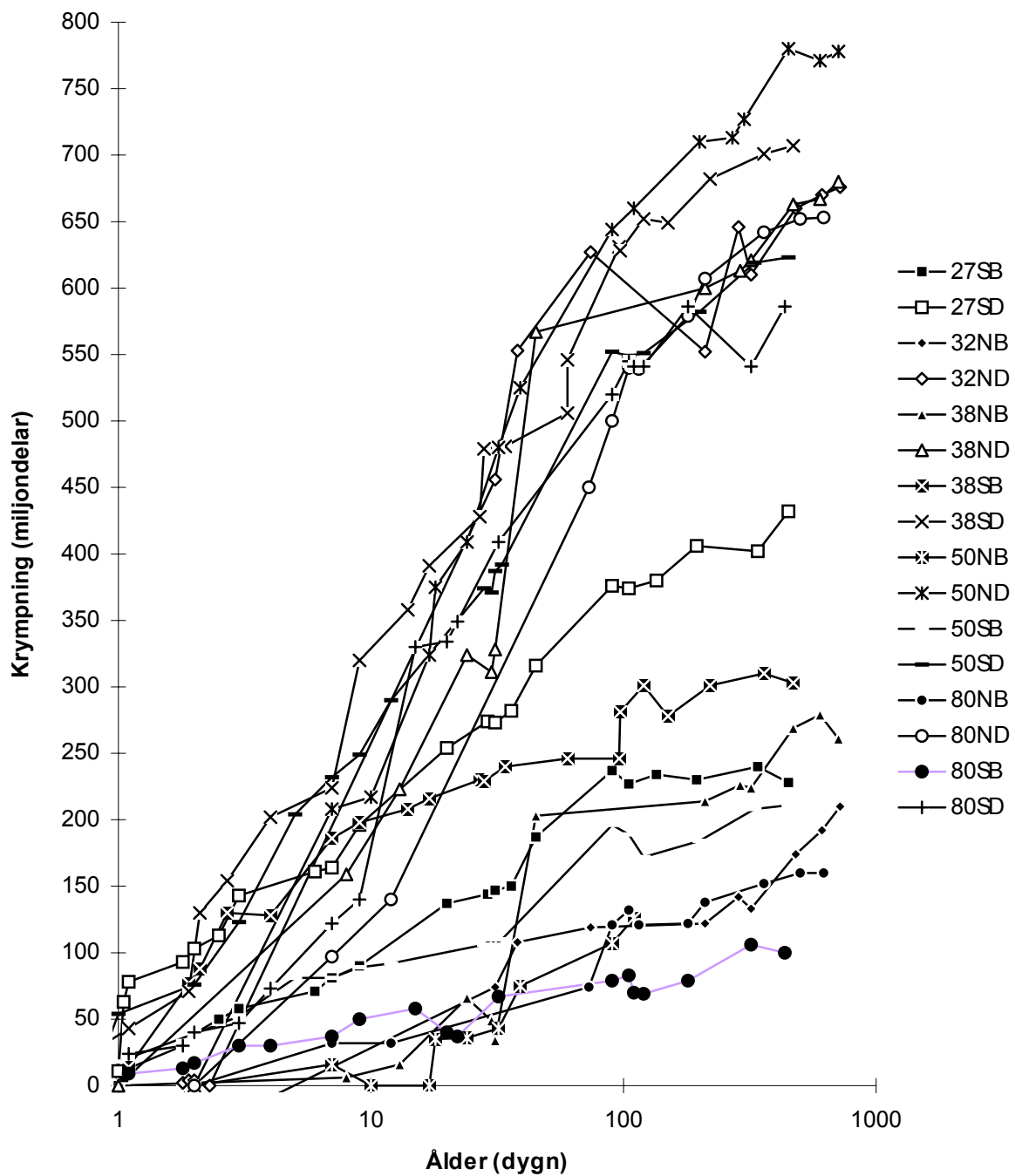
B = försegling

D = lufthärdning

N = normalkompakterande betong

S = självkompakterande betong

27 = vct (%)



APPENDIX 4

Krypning hos provad betong (100 mm cylinder med längden 500 mm)

Beteckningar:

f_c = aktuell tryckhållfasthet, 100 mm kub (MPa)

f_{c28} = 28-dygns tryckhållfasthet, 100 mm kub (MPa)

B = försegling

D = lufthårdning

N = normalkompakterande betong

S = självkompakterande betong

27 = vct (%)

σ = aktuell spänning (MPa)

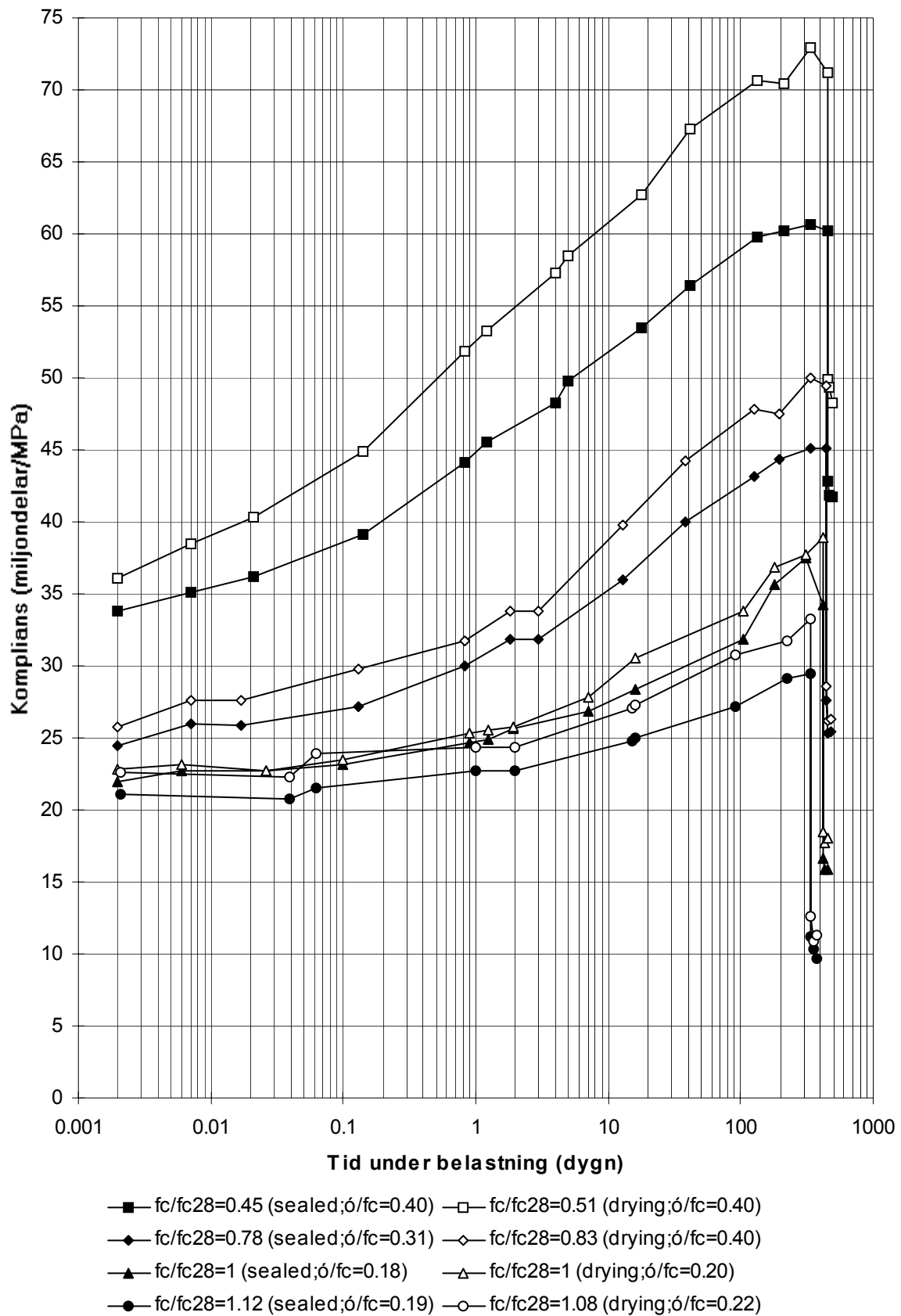
(sealed = förseglad betong; drying = torkstart 2 dygn efter gjutning)

Innehållsförteckning:

| | |
|--------------|------------|
| Appendix 4.1 | Betong 27S |
| Appendix 4.2 | Betong 32N |
| Appendix 4.3 | Betong 38N |
| Appendix 4.4 | Betong 38S |
| Appendix 4.5 | Betong 50N |
| Appendix 4.6 | Betong 50S |
| Appendix 4.7 | Betong 80N |
| Appendix 4.8 | Betong 80S |

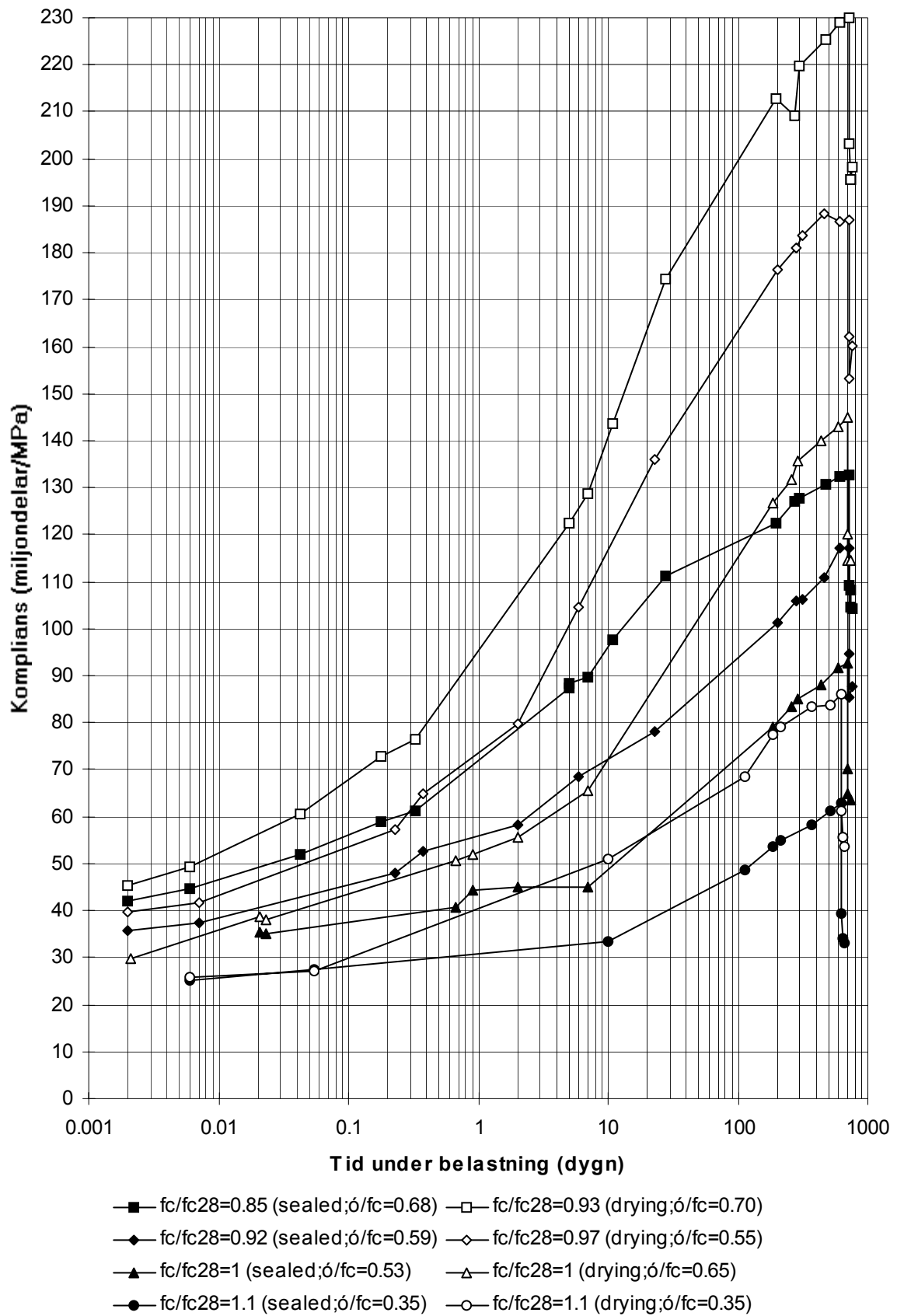
Appendix 4.1

Betong 27S



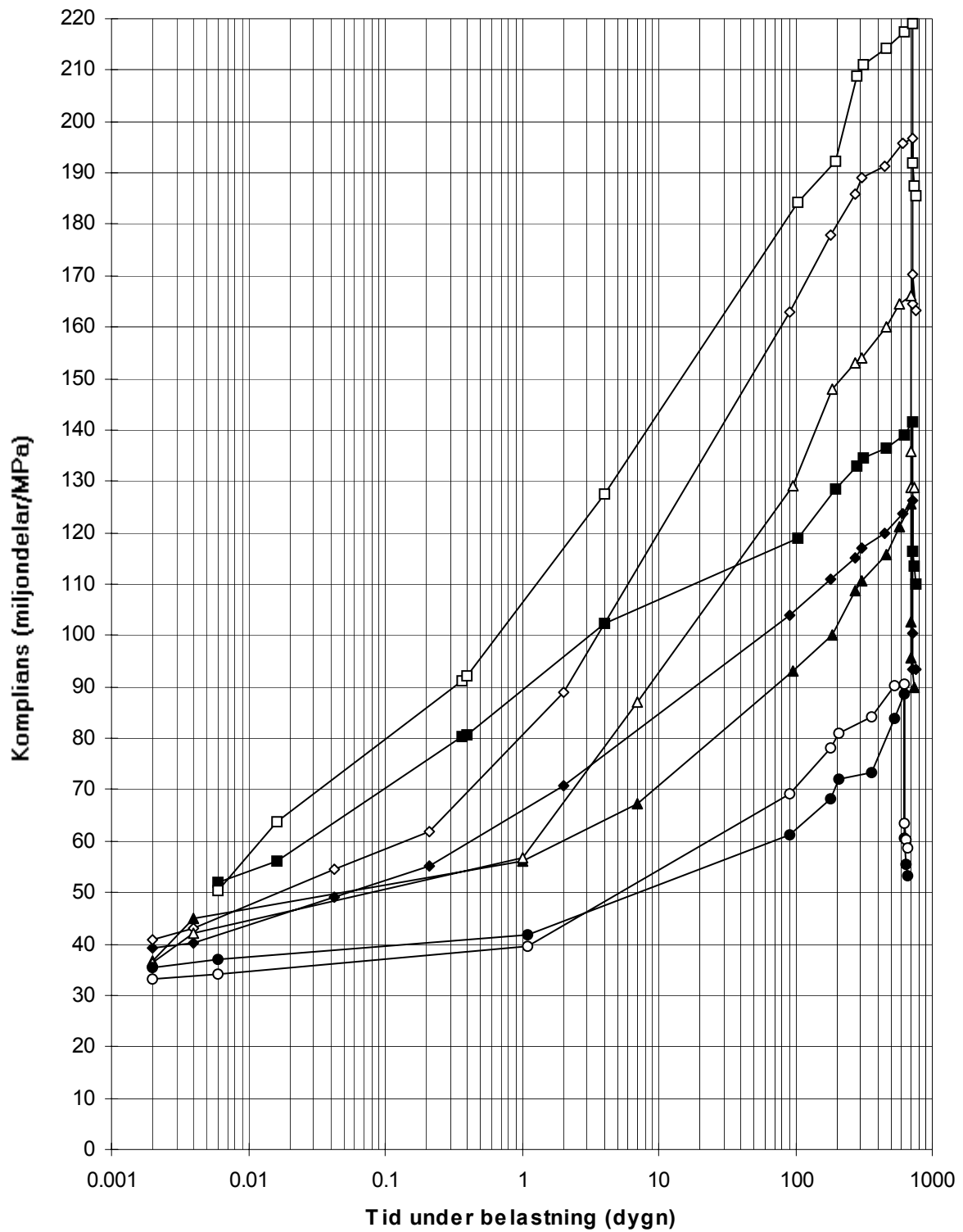
Appendix 4.2

Betong 32N



Appendix 4.3

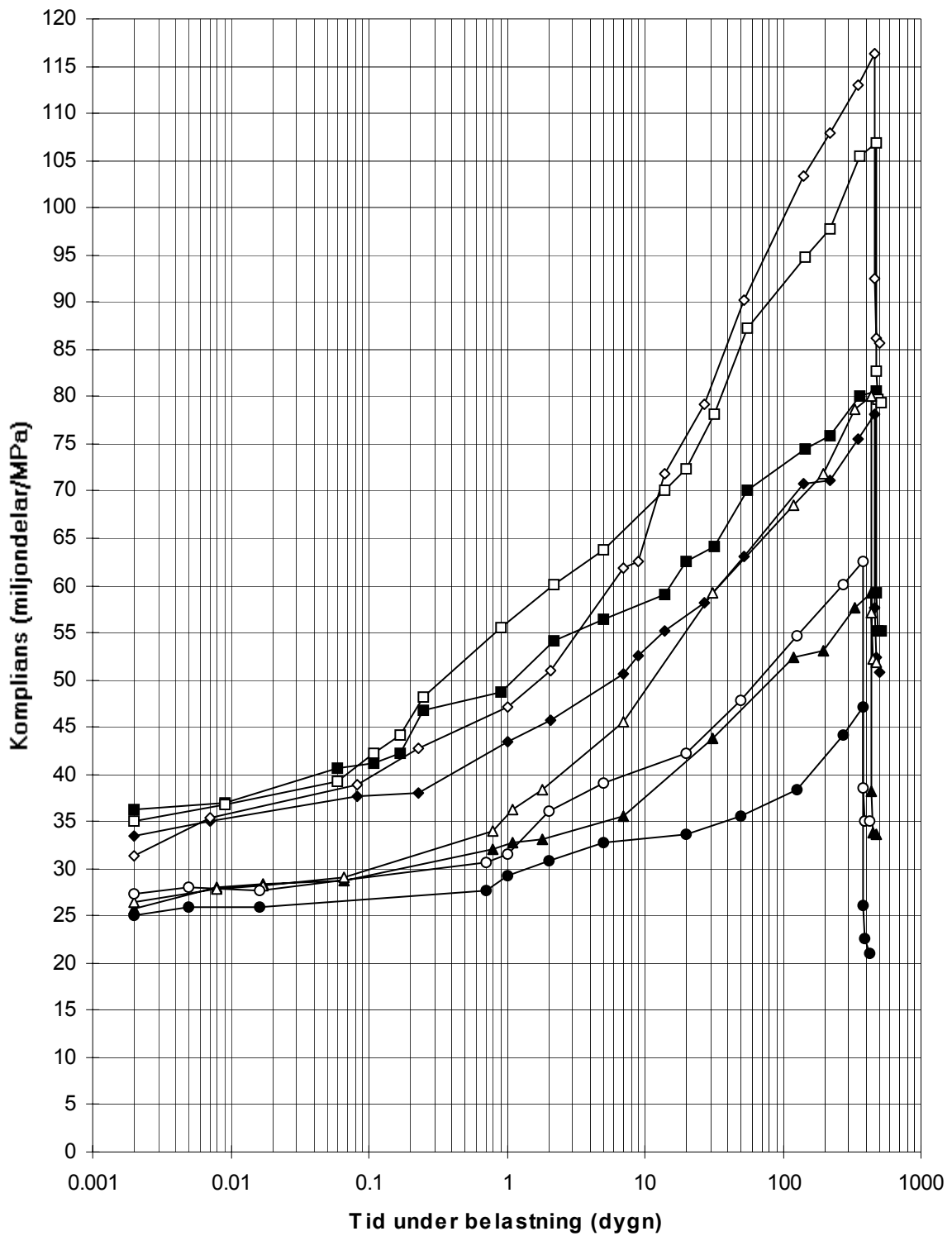
Betong 38N



- $f_c/f_{c28}=0.98$ (sealed; $\delta/f_c=0.79$) □ $f_c/f_{c28}=0.83$ (drying; $\delta/f_c=0.78$)
- ◆ $f_c/f_{c28}=1$ (sealed; $\delta/f_c=0.78$) ◇ $f_c/f_{c28}=0.93$ (drying; $\delta/f_c=0.62$)
- ▲ $f_c/f_{c28}=1$ (sealed; $\delta/f_c=0.70$) △ $f_c/f_{c28}=1$ (drying; $\delta/f_c=0.70$)
- $f_c/f_{c28}=1.1$ (sealed; $\delta/f_c=0.35$) ○ $f_c/f_{c28}=1.1$ (drying; $\delta/f_c=0.35$)

Appendix 4.4

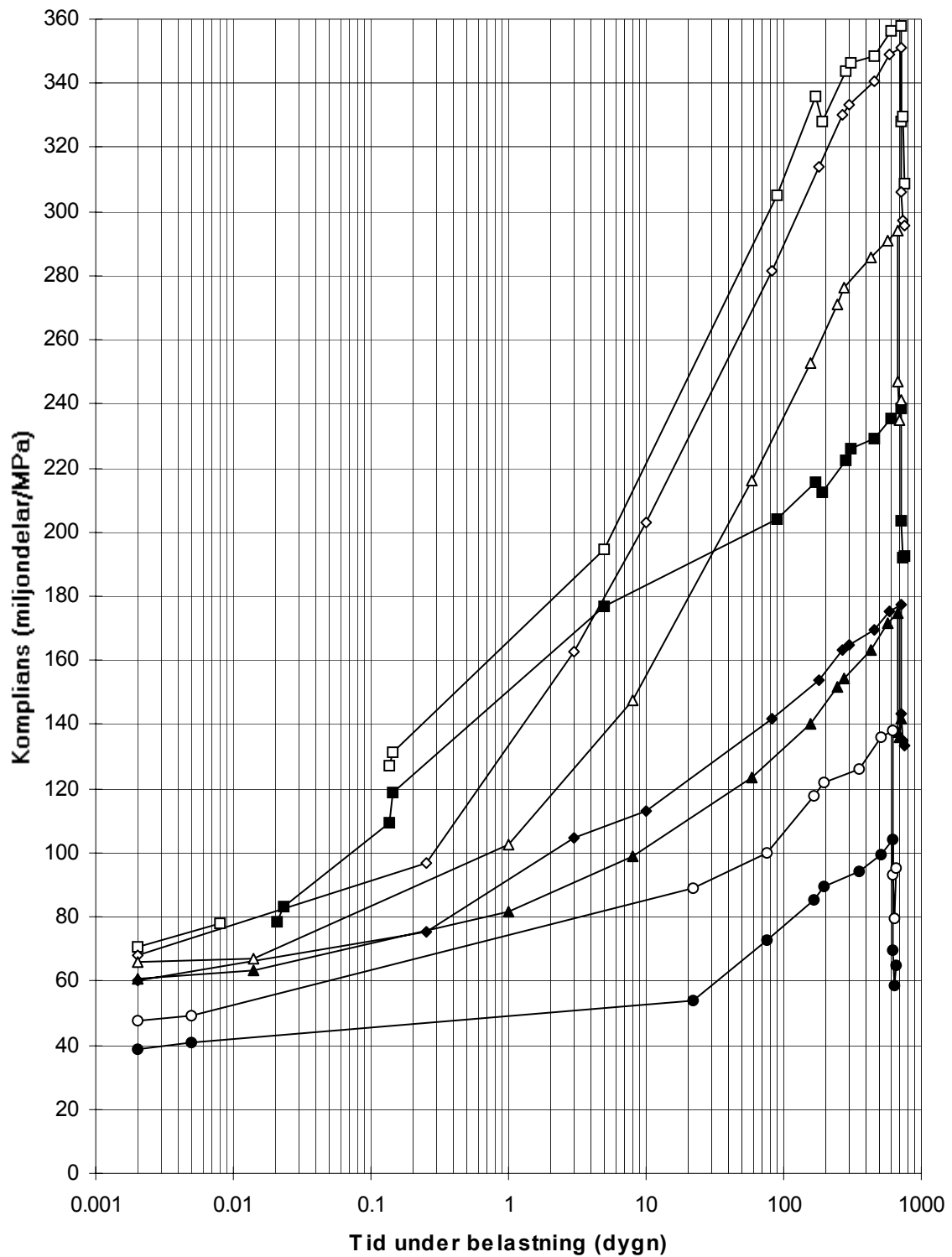
Betong 38S



- $f_c/f_{c28}=0.76$ (sealed; $\delta/f_c=0.40$) —□— $f_c/f_{c28}=0.76$ (drying; $\delta/f_c=0.40$)
- ◆— $f_c/f_{c28}=0.88$ (sealed; $\delta/f_c=0.41$) —◇— $f_c/f_{c28}=0.92$ (drying; $\delta/f_c=0.39$)
- ▲— $f_c/f_{c28}=1$ (sealed; $\delta/f_c=0.20$) —△— $f_c/f_{c28}=1$ (drying; $\delta/f_c=0.20$)
- $f_c/f_{c28}=1.14$ (sealed; $\delta/f_c=0.21$) —○— $f_c/f_{c28}=1.1$ (drying; $\delta/f_c=0.35$)

Appendix 4.5

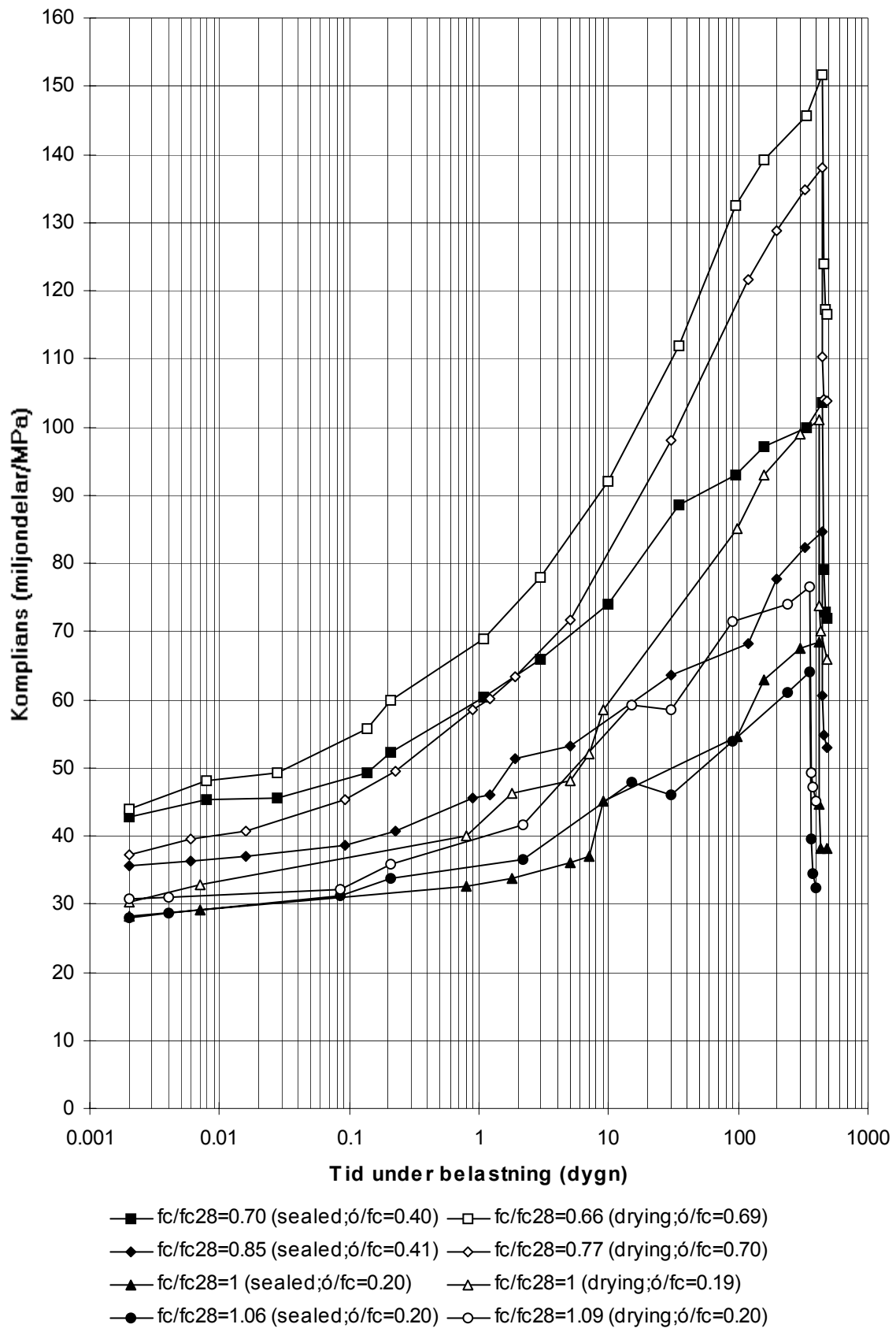
Betong 50N



- $f_c/f_{c28}=0.77$ (sealed; $\delta/f_c=0.69$) □ $f_c/f_{c28}=0.66$ (drying; $\delta/f_c=0.69$)
- ◆ $f_c/f_{c28}=0.90$ (sealed; $\delta/f_c=0.71$) ◇ $f_c/f_{c28}=0.77$ (drying; $\delta/f_c=0.70$)
- ▲ $f_c/f_{c28}=1$ (sealed; $\delta/f_c=0.70$) △ $f_c/f_{c28}=1$ (drying; $\delta/f_c=0.60$)
- $f_c/f_{c28}=1.27$ (sealed; $\delta/f_c=0.35$) ○ $f_c/f_{c28}=1.09$ (drying; $\delta/f_c=0.35$)

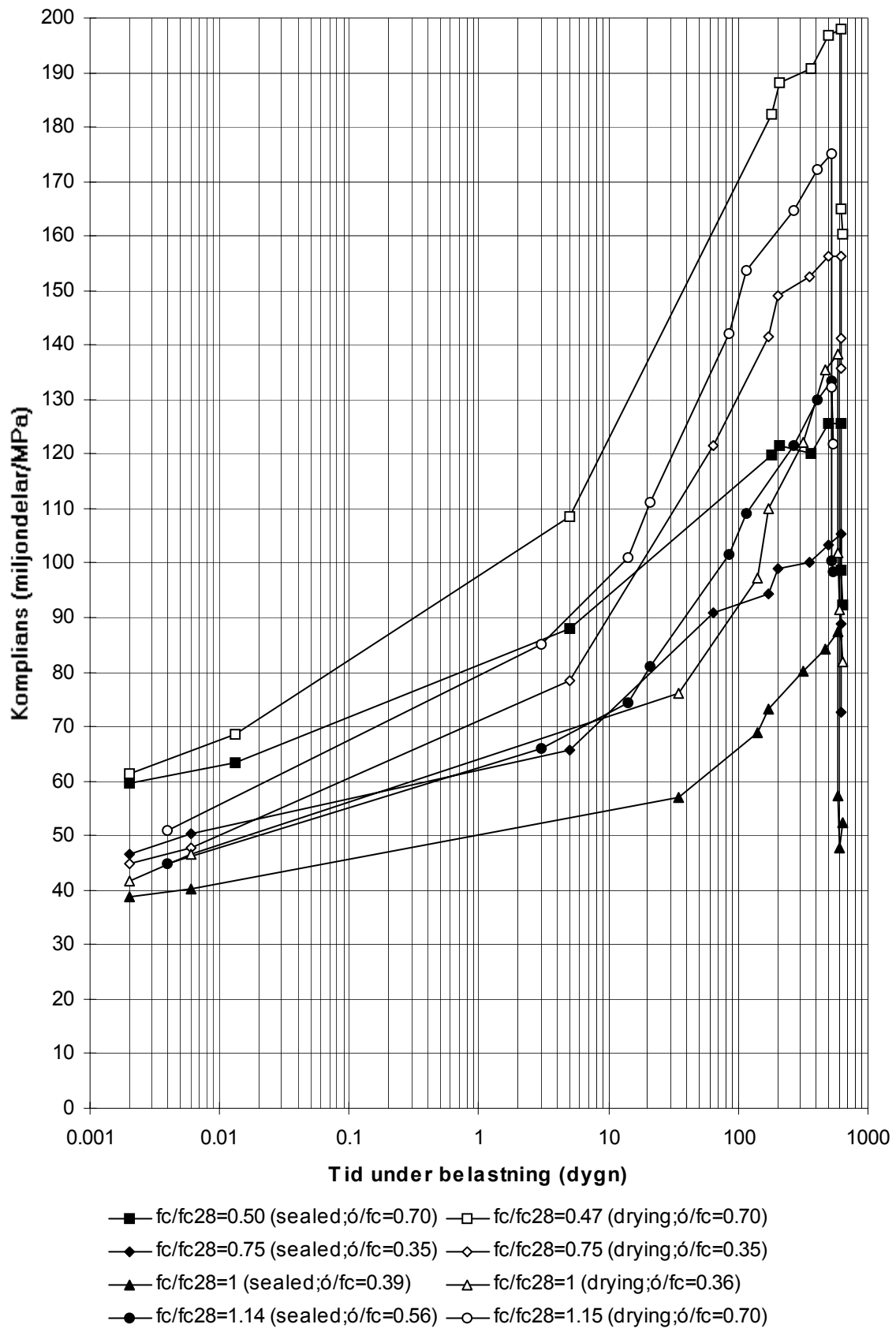
Appendix 4.6

Betong 50S



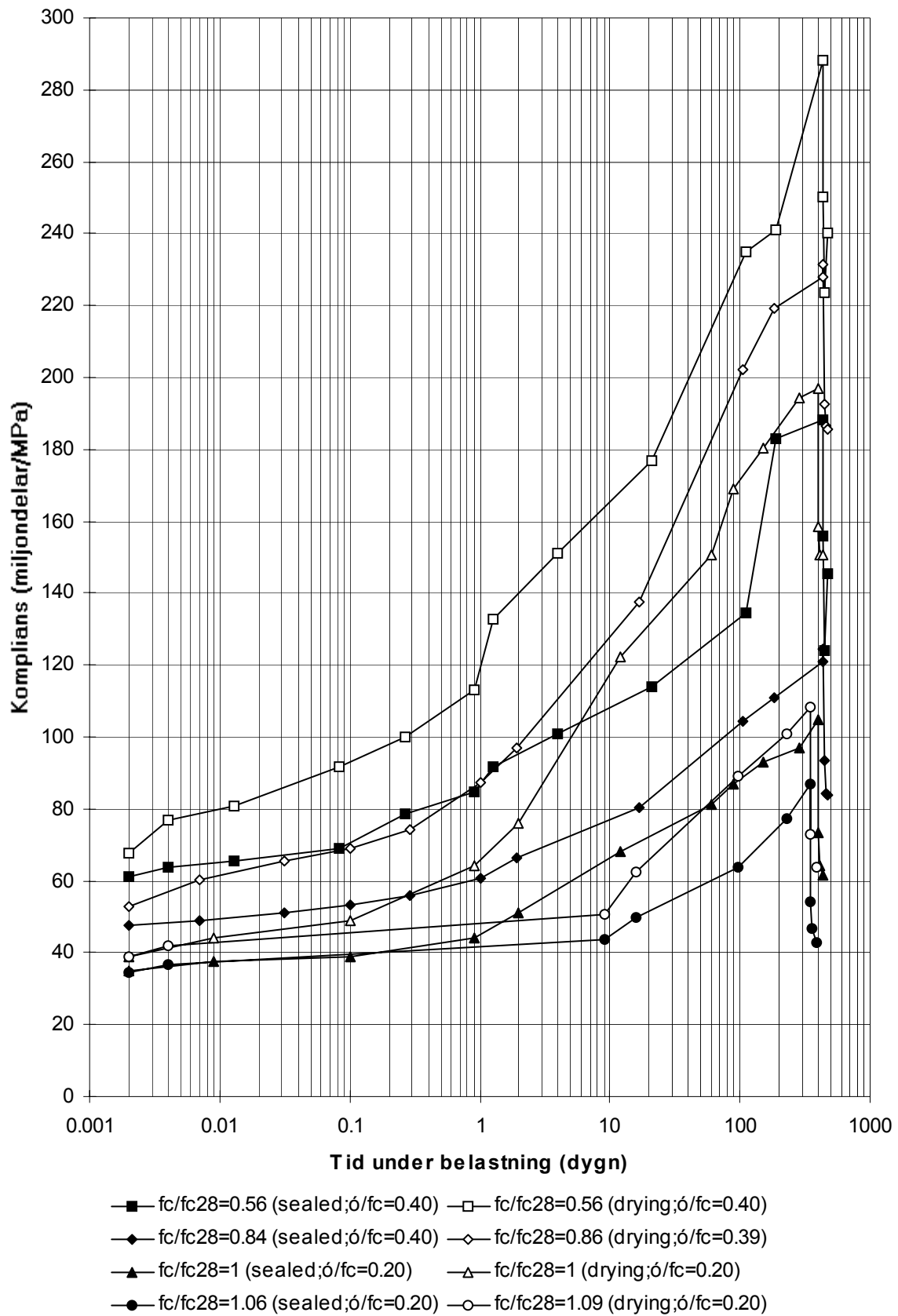
Appendix 4.7

Betong 80N



Appendix 4.8

Betong 80S



APPENDIX 5

Egenskaper vid försenad torkstart (100 mm cylinder - längd 500 mm)

Beteckningar:

f_c = aktuell tryckhållfasthet, 100 mm kub (MPa)

f_{c28} = 28-dygns tryckhållfasthet, 100 mm kub (MPa)

B = försegling

D = lufthärdning (torkstart vid 2 dygns ålder)

D1 = lufthärdning (torkstart vid 1 dygns ålder)

D90 = lufthärdning (torkstart vid 90 dygns ålder)

38 = vct (%)

σ = aktuell spänning (MPa)

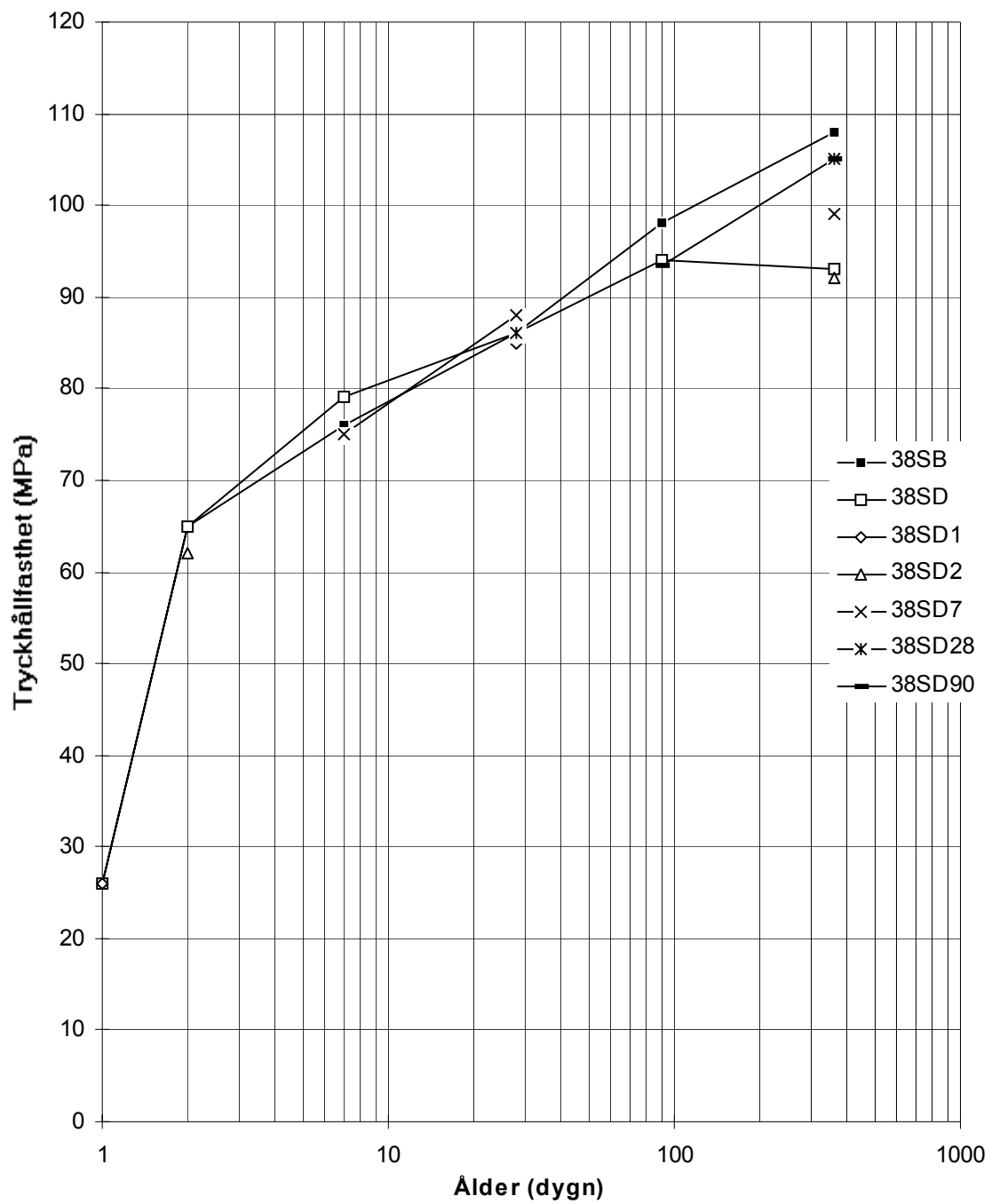
(sealed = förseglad betong; drying = torkstart 2 dygn efter gjutning)

Innehållsförteckning:

| | |
|--------------|---|
| Appendix 5.1 | Betong 38S - hållfasthet vid försenad torkstart |
| Appendix 5.2 | Betong 38S - uttorkning vid försenad torkstart |
| Appendix 5.3 | Betong 38S - krympning vid försenad torkstart |
| Appendix 5.4 | Betong 38S - krypning vid försenad torkstart |

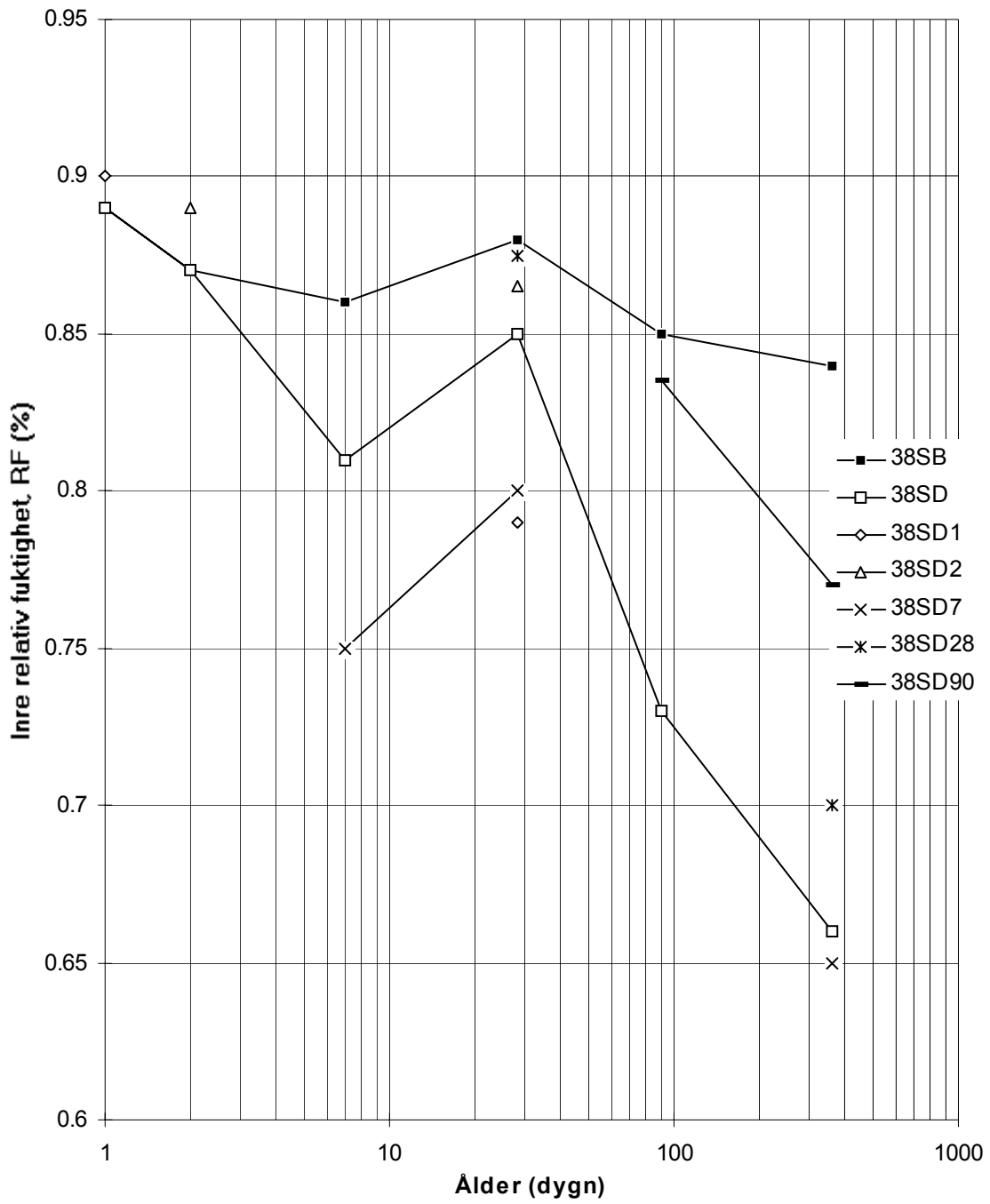
Appendix 5.1

Betong 38S - hållfasthet vid försenad torkstart



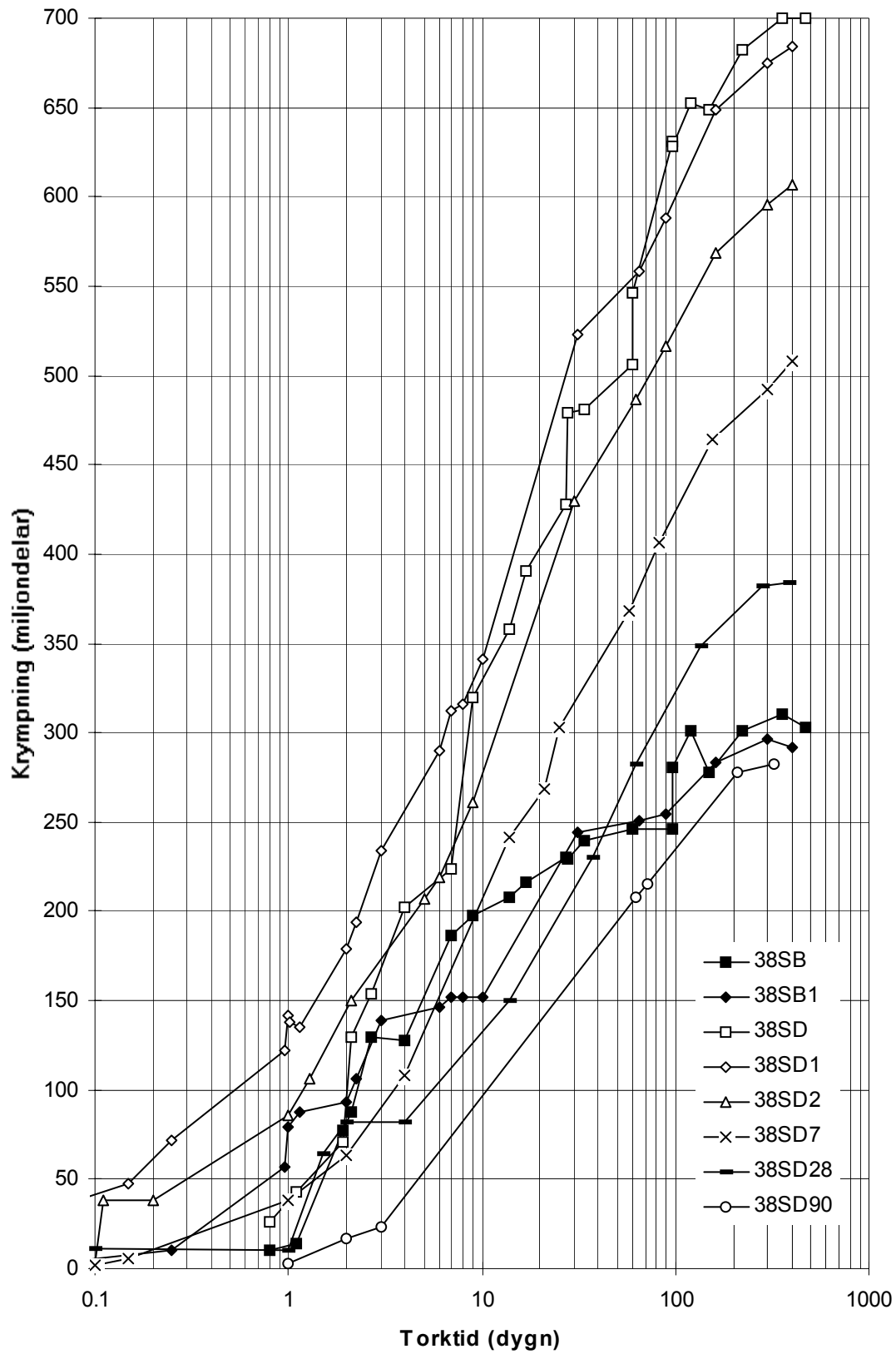
Appendix 5.2

Betong 38S - uttorkning vid försenad torkstart



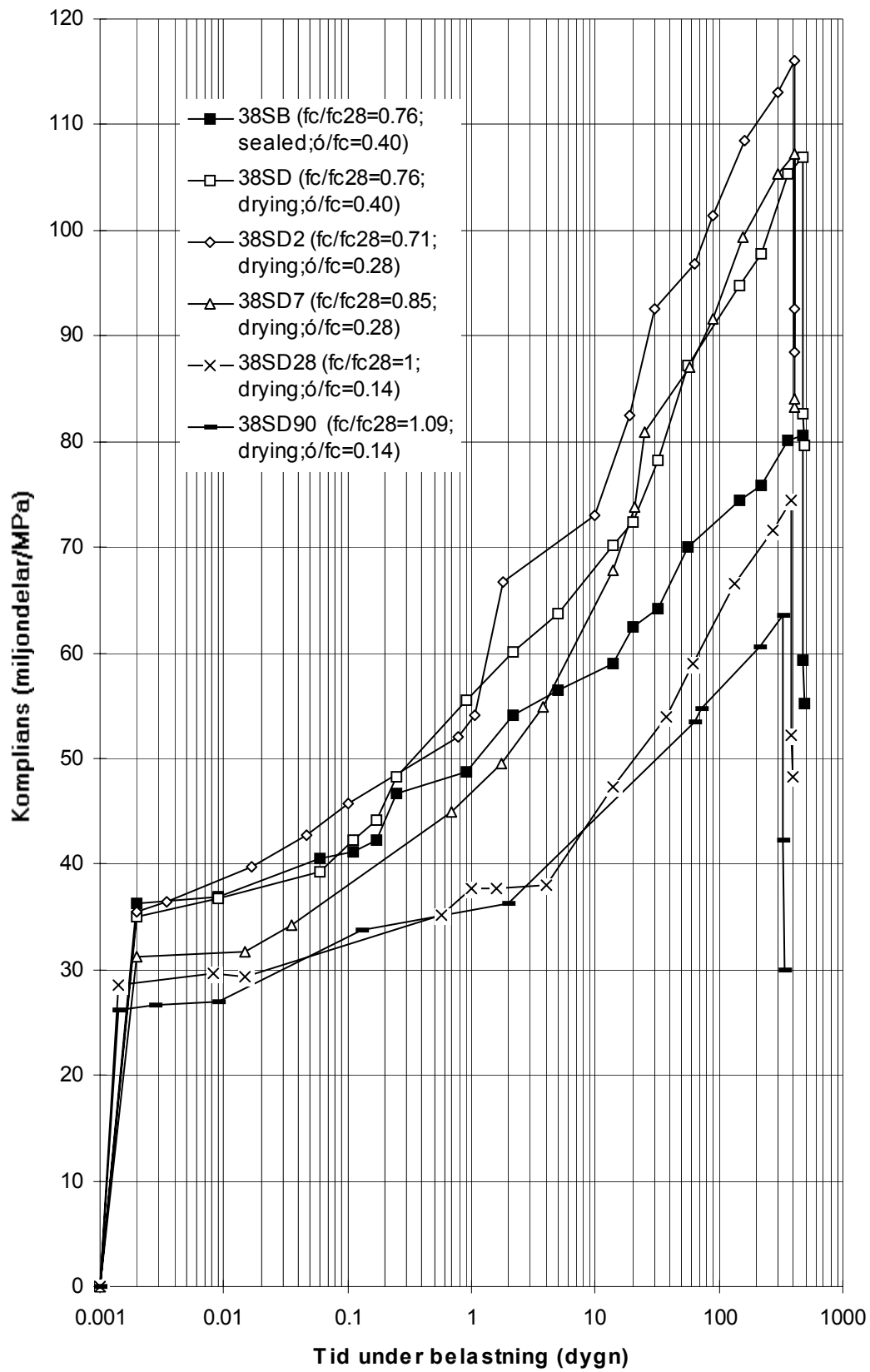
Appendix 5.3

Betong 38S - krympning vid försenad torkstart



Appendix 5.4

Betong 38S - krypning vid försenad torkstart



APPENDIX 6

Relativa materialkostnader hos provad betong (1998 års priser)

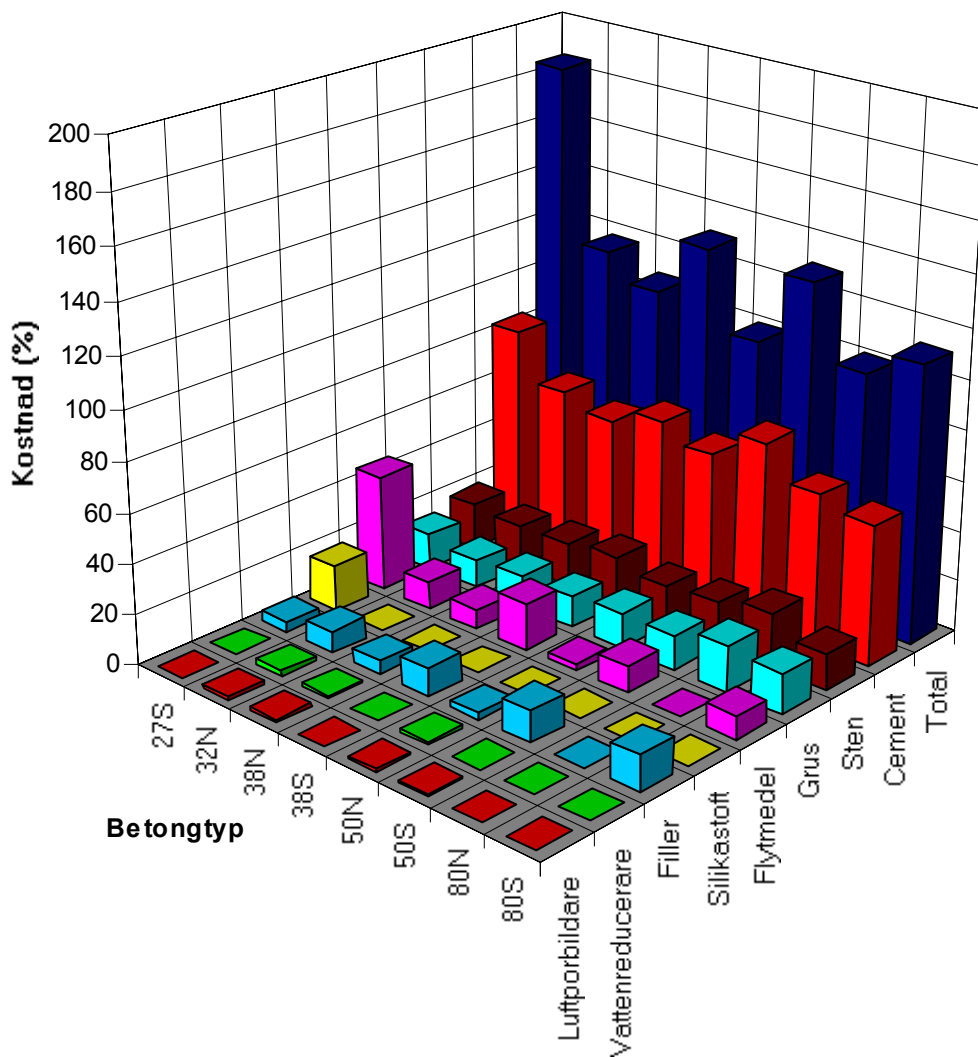
Beteckningar:

N = normalkompakterande betong

S = självkompakterande betong

27 = vct (%)

100 = Relativ materialkostnad för betong 80N (normalkompakterande betong med vct = 0.80).



APPENDIX 7

Krytpal hos provad betong (100 mm cylinder med längden 500 mm)

Beteckningar:

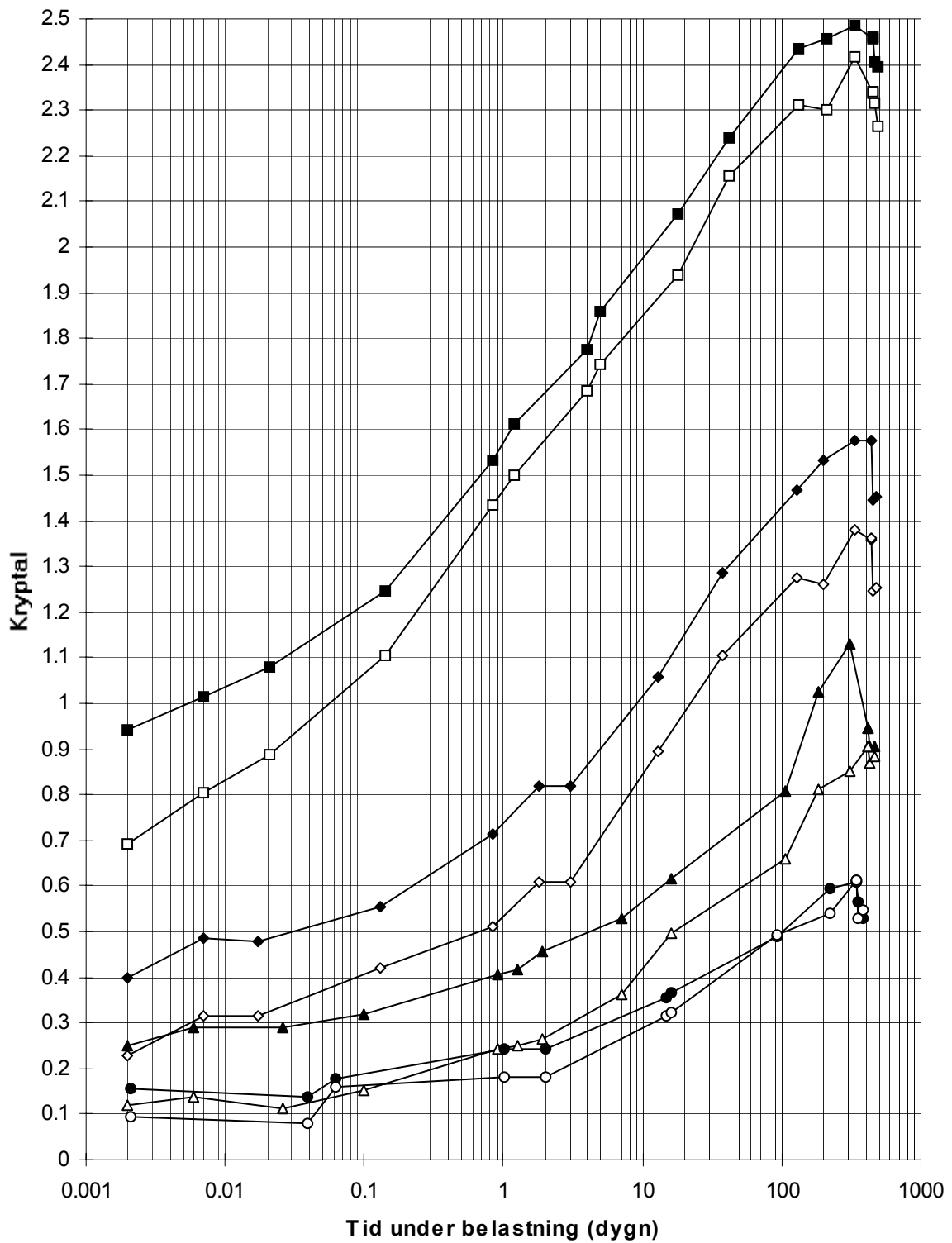
- f_c = aktuell tryckhållfasthet, 100 mm kub (MPa)
 f_{c28} = 28-dygns tryckhållfasthet, 100 mm kub (MPa)
B = försegling
D = lufthärdning
D1 = lufthärdning (torkstart vid 1 dygns ålder)
D90 = lufthärdning (torkstart vid 90 dygns ålder)
N = normalkompakterande betong
S = självkompakterande betong
27 = vct (%)
 σ = aktuell spänning (MPa)

Innehållsförteckning:

| | |
|--------------|-----------------------------------|
| Appendix 7.1 | Betong 27S |
| Appendix 7.2 | Betong 32N |
| Appendix 7.3 | Betong 38N |
| Appendix 7.4 | Betong 38S |
| Appendix 7.5 | Betong 50N |
| Appendix 7.6 | Betong 50S |
| Appendix 7.7 | Betong 80N |
| Appendix 7.8 | Betong 80S |
| Appendix 7.9 | Betong 38S med försenad torkstart |

Appendix 7.1

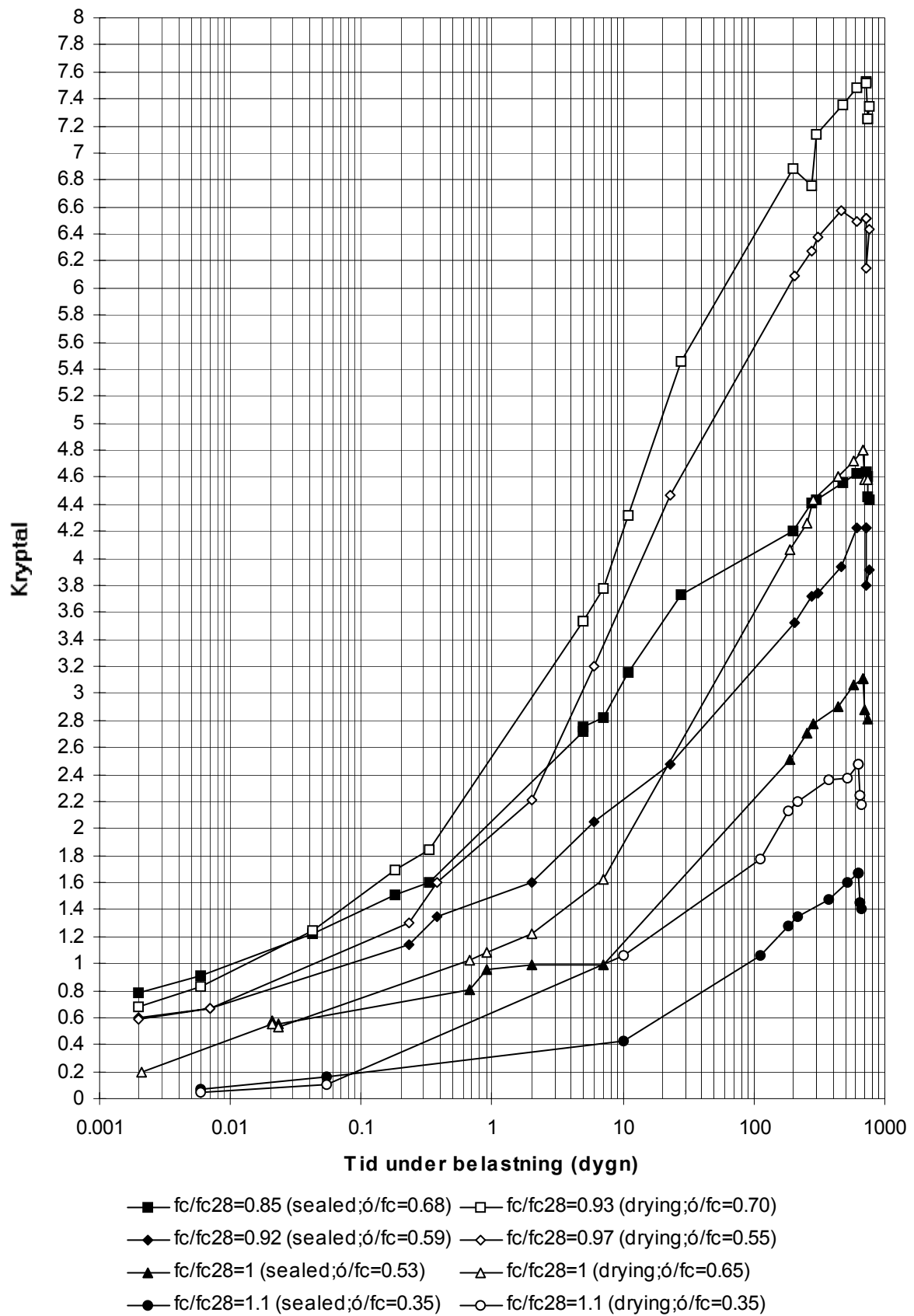
Betong 27S



- $f_c/f_{c28}=0.45$ (sealed; $\acute{o}/f_c=0.40$) —□— $f_c/f_{c28}=0.51$ (drying; $\acute{o}/f_c=0.40$)
- ◆— $f_c/f_{c28}=0.78$ (sealed; $\acute{o}/f_c=0.31$) —◇— $f_c/f_{c28}=0.83$ (drying; $\acute{o}/f_c=0.40$)
- ▲— $f_c/f_{c28}=1$ (sealed; $\acute{o}/f_c=0.18$) —△— $f_c/f_{c28}=1$ (drying; $\acute{o}/f_c=0.20$)
- $f_c/f_{c28}=1.12$ (sealed; $\acute{o}/f_c=0.19$) —○— $f_c/f_{c28}=1.08$ (drying; $\acute{o}/f_c=0.22$)

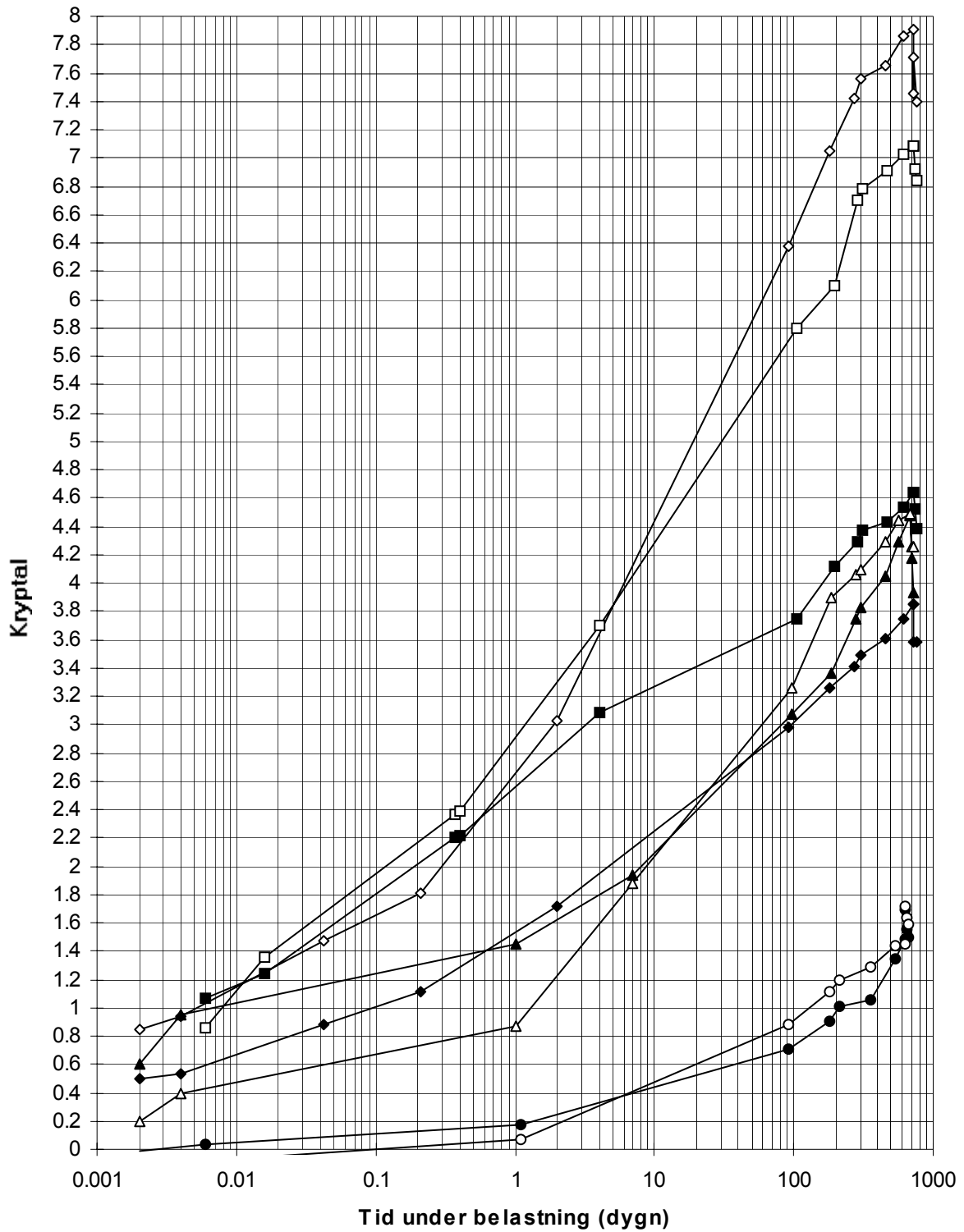
Appendix 7.2

Betong 32N



Appendix 7.3

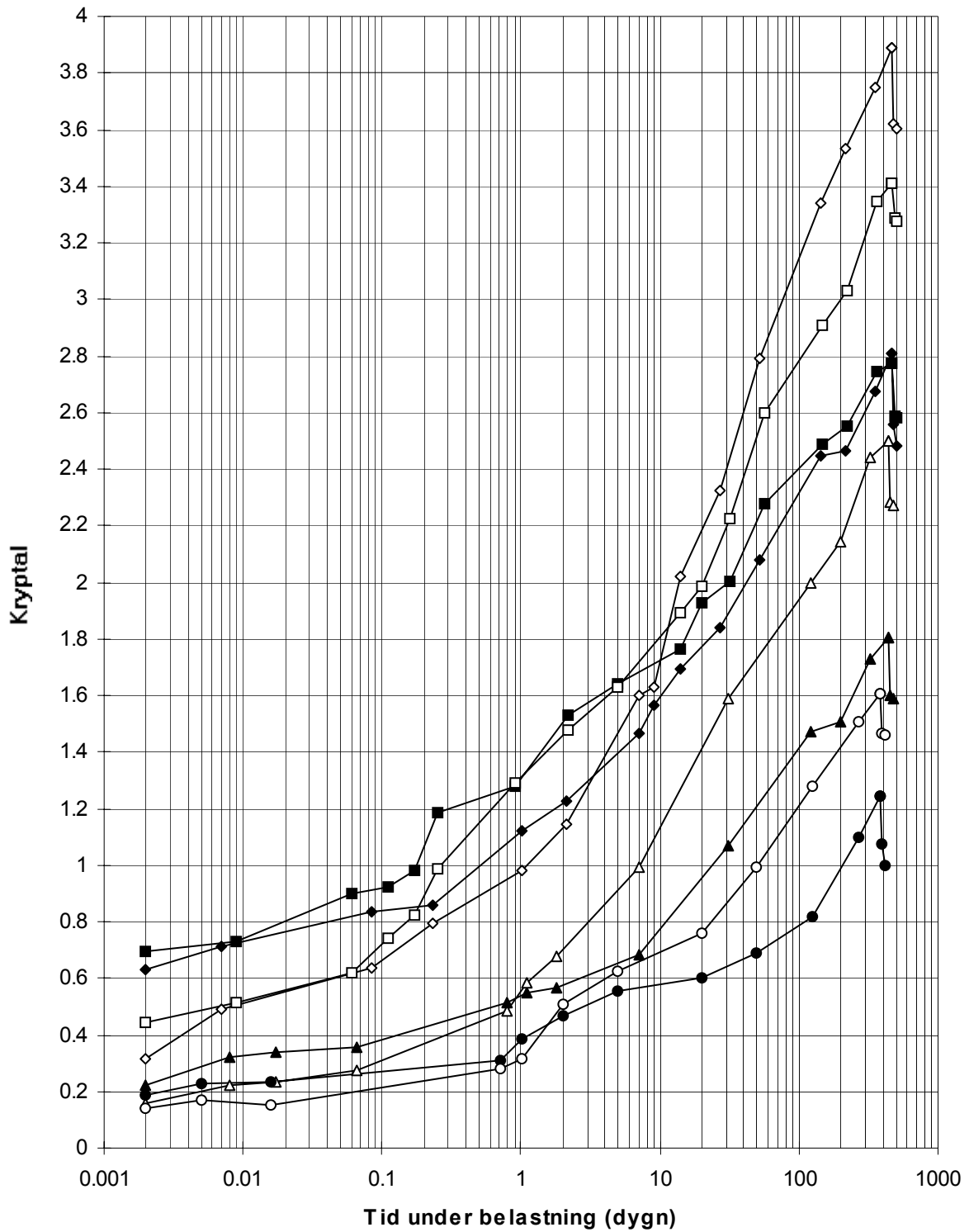
Betong 38N



- $f_c/f_{c28}=0.98$ (sealed; $\delta/f_c=0.79$)
- ◆— $f_c/f_{c28}=1$ (sealed; $\delta/f_c=0.78$)
- ▲— $f_c/f_{c28}=1$ (sealed; $\delta/f_c=0.70$)
- $f_c/f_{c28}=1.1$ (sealed; $\delta/f_c=0.35$)
- $f_c/f_{c28}=0.83$ (drying; $\delta/f_c=0.78$)
- ◇— $f_c/f_{c28}=0.93$ (drying; $\delta/f_c=0.62$)
- △— $f_c/f_{c28}=1$ (drying; $\delta/f_c=0.70$)
- $f_c/f_{c28}=1.1$ (drying; $\delta/f_c=0.35$)

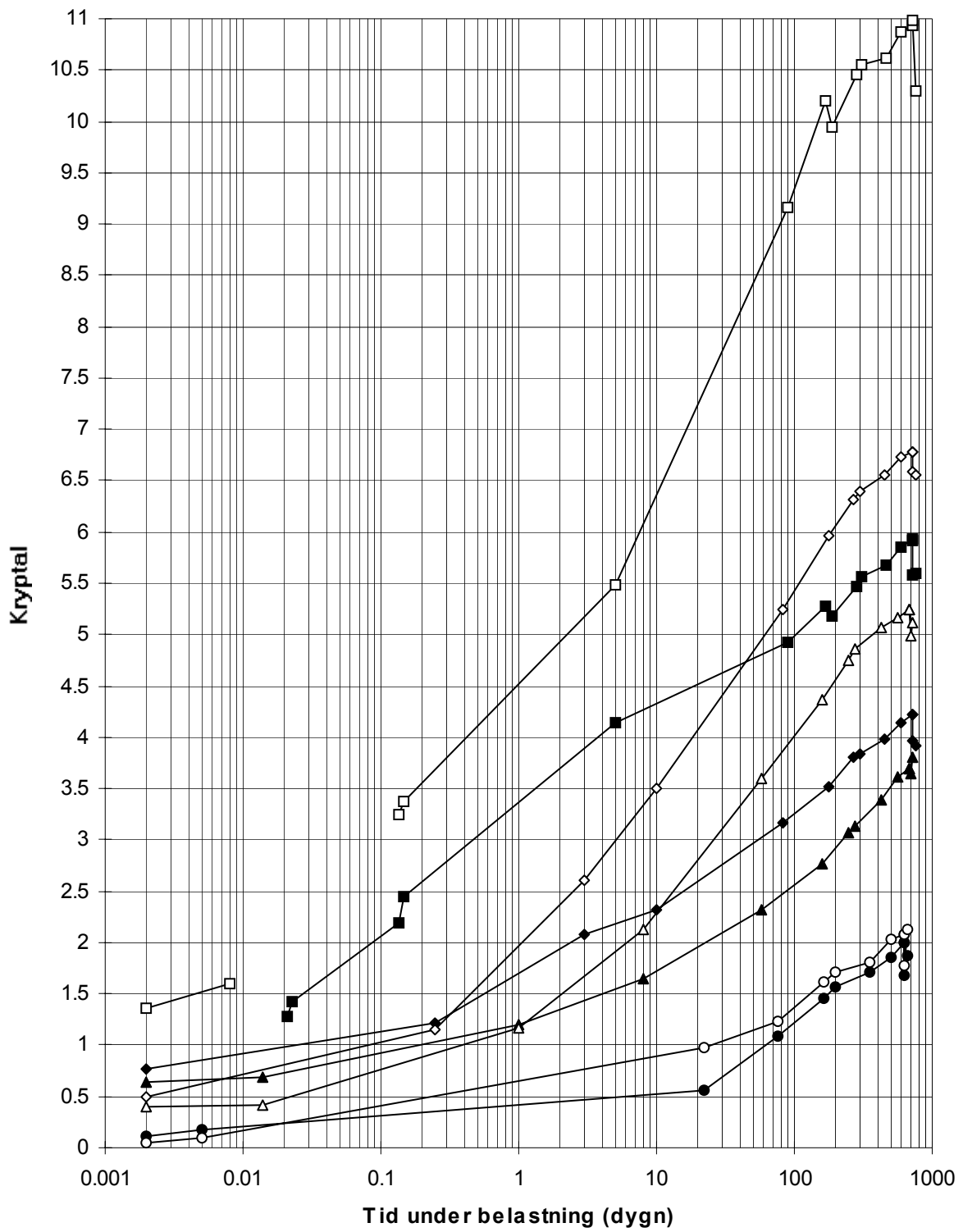
Appendix 7.4

Betong 38S



Appendix 7.5

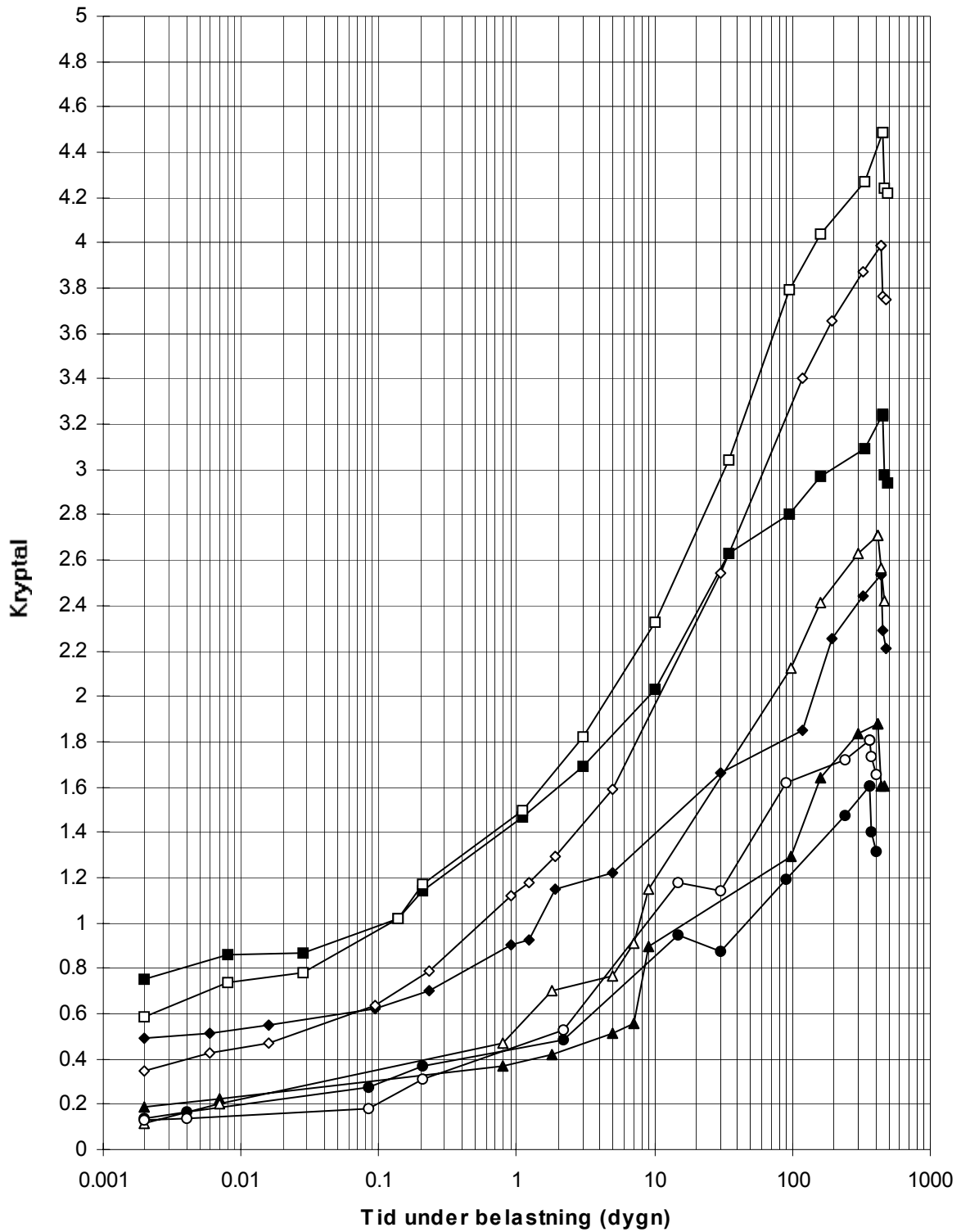
Betong 50N



- $f_c/f_{c28}=0.77$ (sealed; $\delta/f_c=0.69$) □ $f_c/f_{c28}=0.66$ (drying; $\delta/f_c=0.69$)
- ◆ $f_c/f_{c28}=0.90$ (sealed; $\delta/f_c=0.71$) ◇ $f_c/f_{c28}=0.77$ (drying; $\delta/f_c=0.70$)
- ▲ $f_c/f_{c28}=1$ (sealed; $\delta/f_c=0.70$) △ $f_c/f_{c28}=1$ (drying; $\delta/f_c=0.60$)
- $f_c/f_{c28}=1.27$ (sealed; $\delta/f_c=0.35$) ○ $f_c/f_{c28}=1.09$ (drying; $\delta/f_c=0.35$)

Appendix 7.6

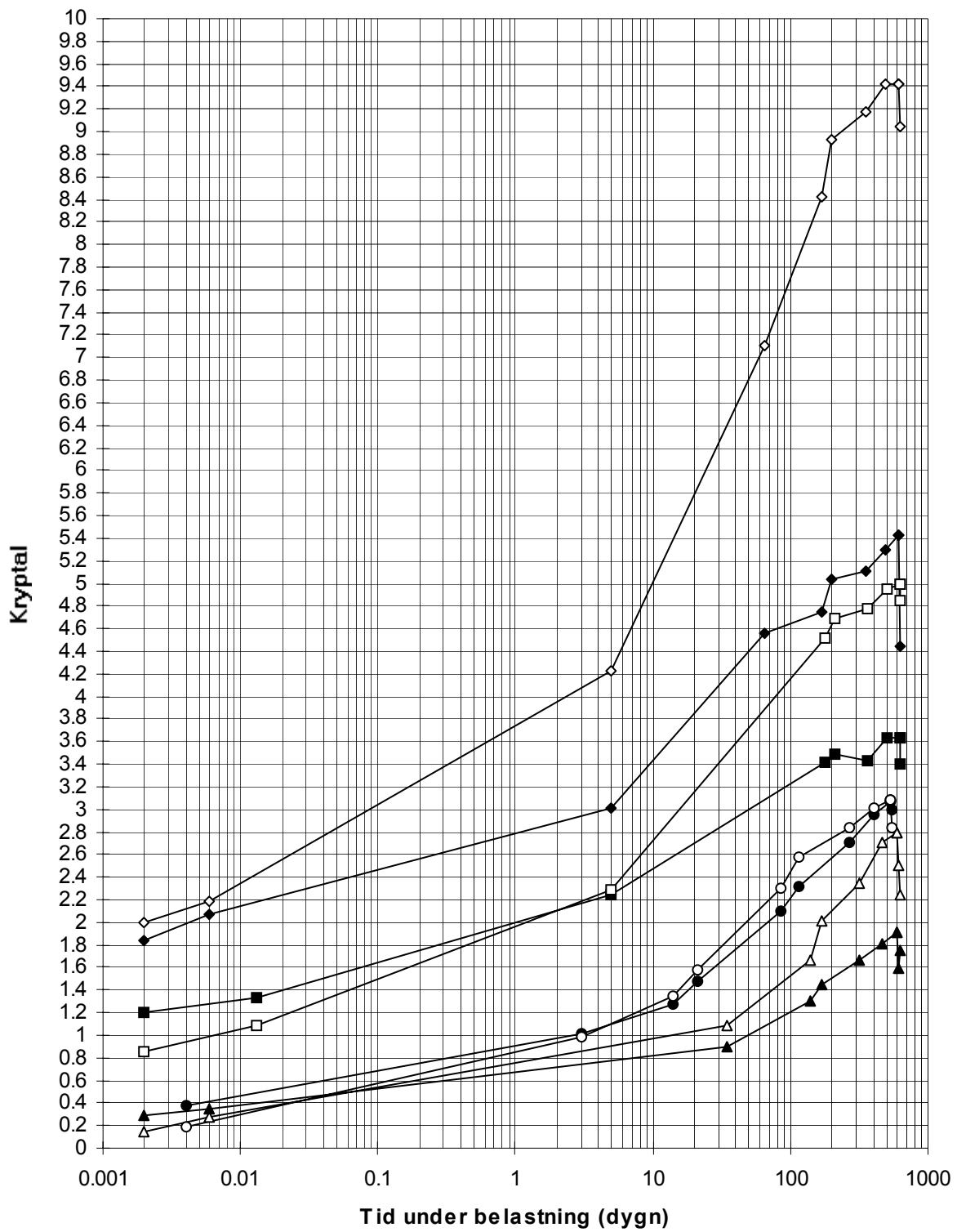
Betong 50S



- $f_c/f_{c28}=0.70$ (sealed; $\delta/f_c=0.40$) □ $f_c/f_{c28}=0.66$ (drying; $\delta/f_c=0.69$)
- ◆ $f_c/f_{c28}=0.85$ (sealed; $\delta/f_c=0.41$) ◇ $f_c/f_{c28}=0.77$ (drying; $\delta/f_c=0.70$)
- ▲ $f_c/f_{c28}=1$ (sealed; $\delta/f_c=0.20$) △ $f_c/f_{c28}=1$ (drying; $\delta/f_c=0.19$)
- $f_c/f_{c28}=1.06$ (sealed; $\delta/f_c=0.20$) ○ $f_c/f_{c28}=1.09$ (drying; $\delta/f_c=0.20$)

Appendix 7.7

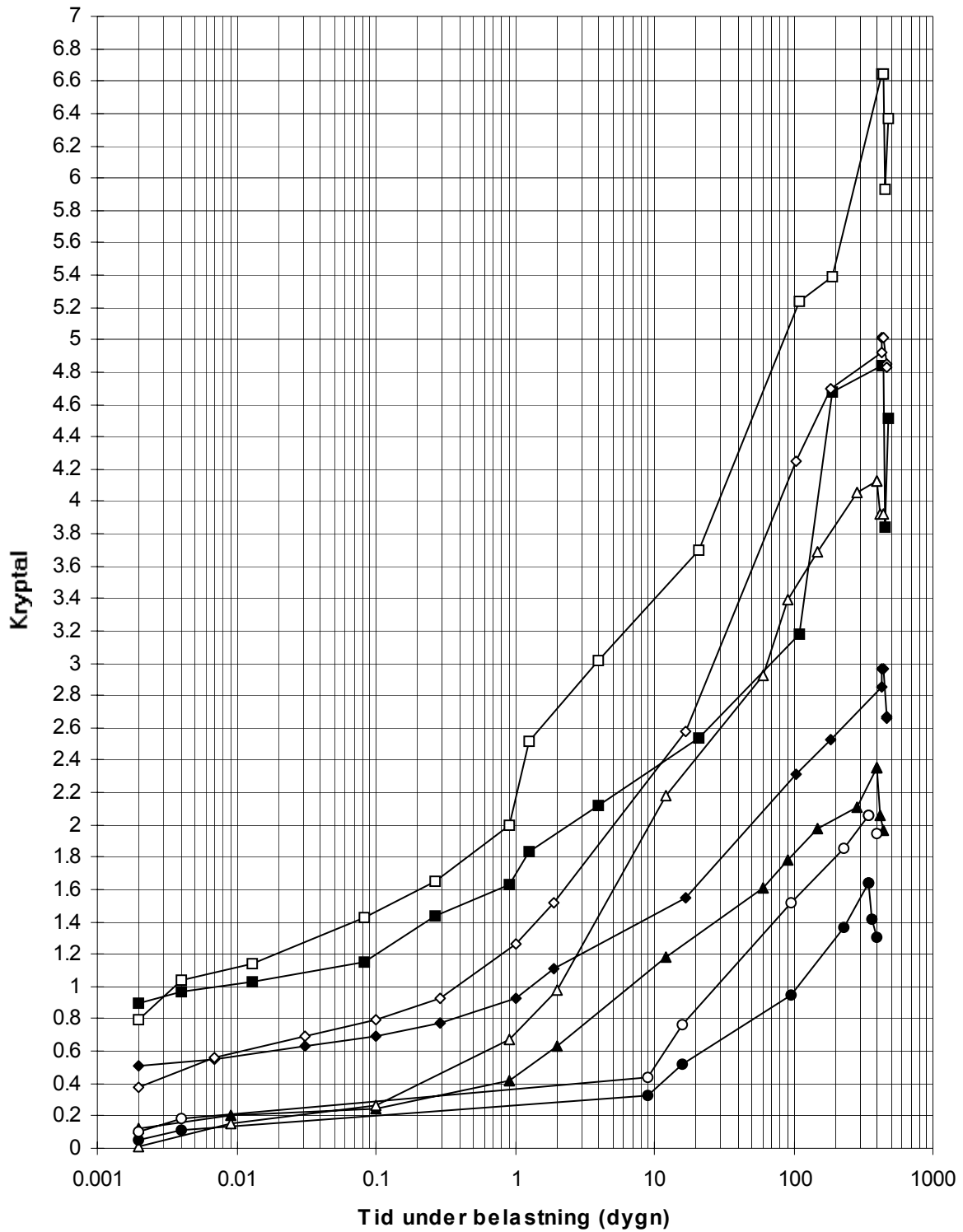
Betong 80N



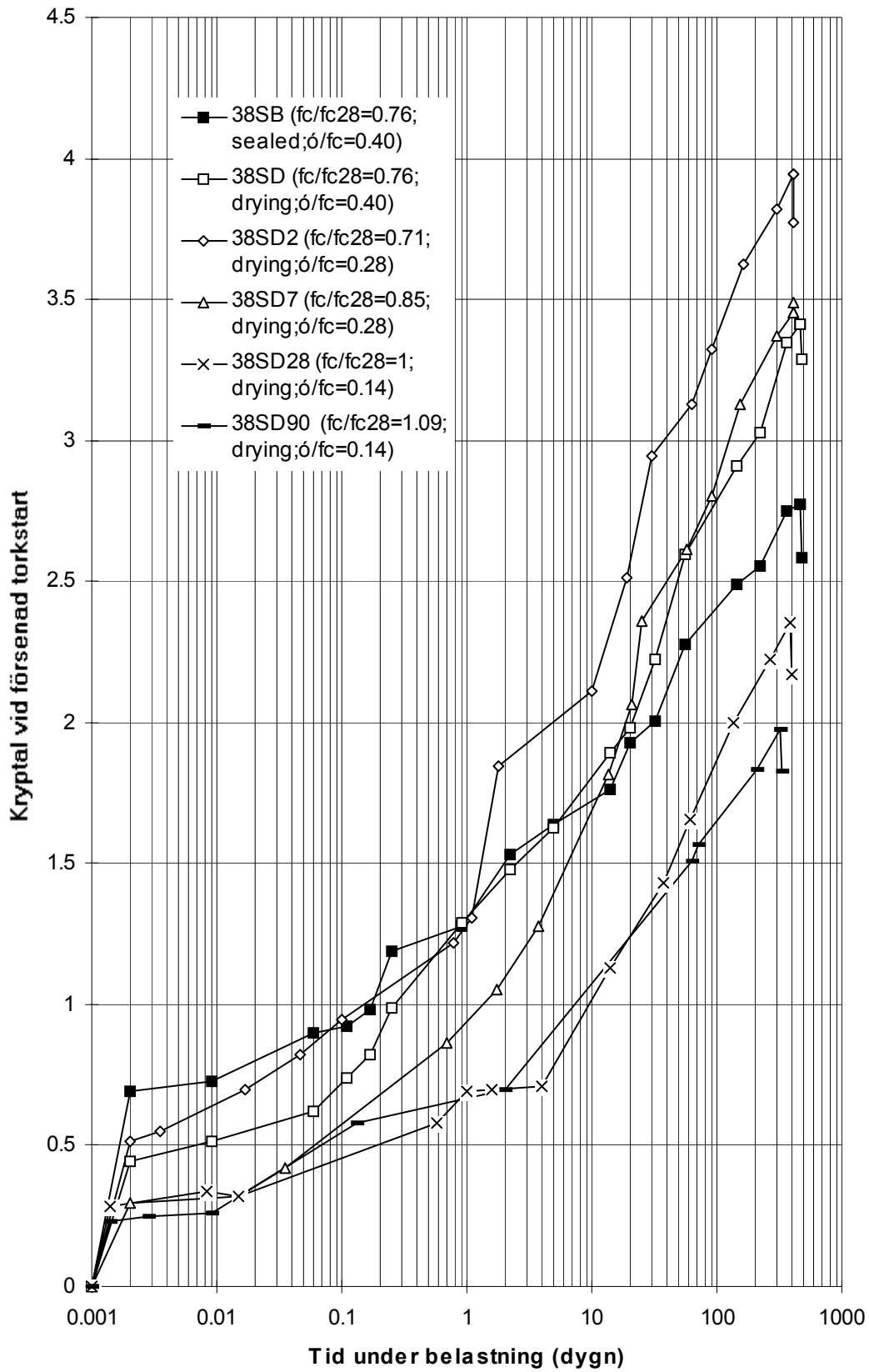
- $f_c/f_{c28}=0.50$ (sealed; $\acute{o}/f_c=0.70$) —□— $f_c/f_{c28}=0.47$ (drying; $\acute{o}/f_c=0.70$)
- ◆— $f_c/f_{c28}=0.75$ (sealed; $\acute{o}/f_c=0.35$) —◇— $f_c/f_{c28}=0.75$ (drying; $\acute{o}/f_c=0.35$)
- ▲— $f_c/f_{c28}=1$ (sealed; $\acute{o}/f_c=0.39$) —△— $f_c/f_{c28}=1$ (drying; $\acute{o}/f_c=0.36$)
- $f_c/f_{c28}=1.14$ (sealed; $\acute{o}/f_c=0.56$) —○— $f_c/f_{c28}=1.15$ (drying; $\acute{o}/f_c=0.70$)

Appendix 7.8

Betong 80S



- $f_c/f_{c28}=0.56$ (sealed; $\delta/f_c=0.40$) □ $f_c/f_{c28}=0.56$ (drying; $\delta/f_c=0.40$)
- ◆ $f_c/f_{c28}=0.84$ (sealed; $\delta/f_c=0.40$) ◇ $f_c/f_{c28}=0.86$ (drying; $\delta/f_c=0.39$)
- ▲ $f_c/f_{c28}=1$ (sealed; $\delta/f_c=0.20$) △ $f_c/f_{c28}=1$ (drying; $\delta/f_c=0.20$)
- $f_c/f_{c28}=1.06$ (sealed; $\delta/f_c=0.20$) ○ $f_c/f_{c28}=1.09$ (drying; $\delta/f_c=0.20$)



APPENDIX 8

Kryptal relativt 1-årsvärdet (100 mm cylinder med längden 500 mm)

Beteckningar:

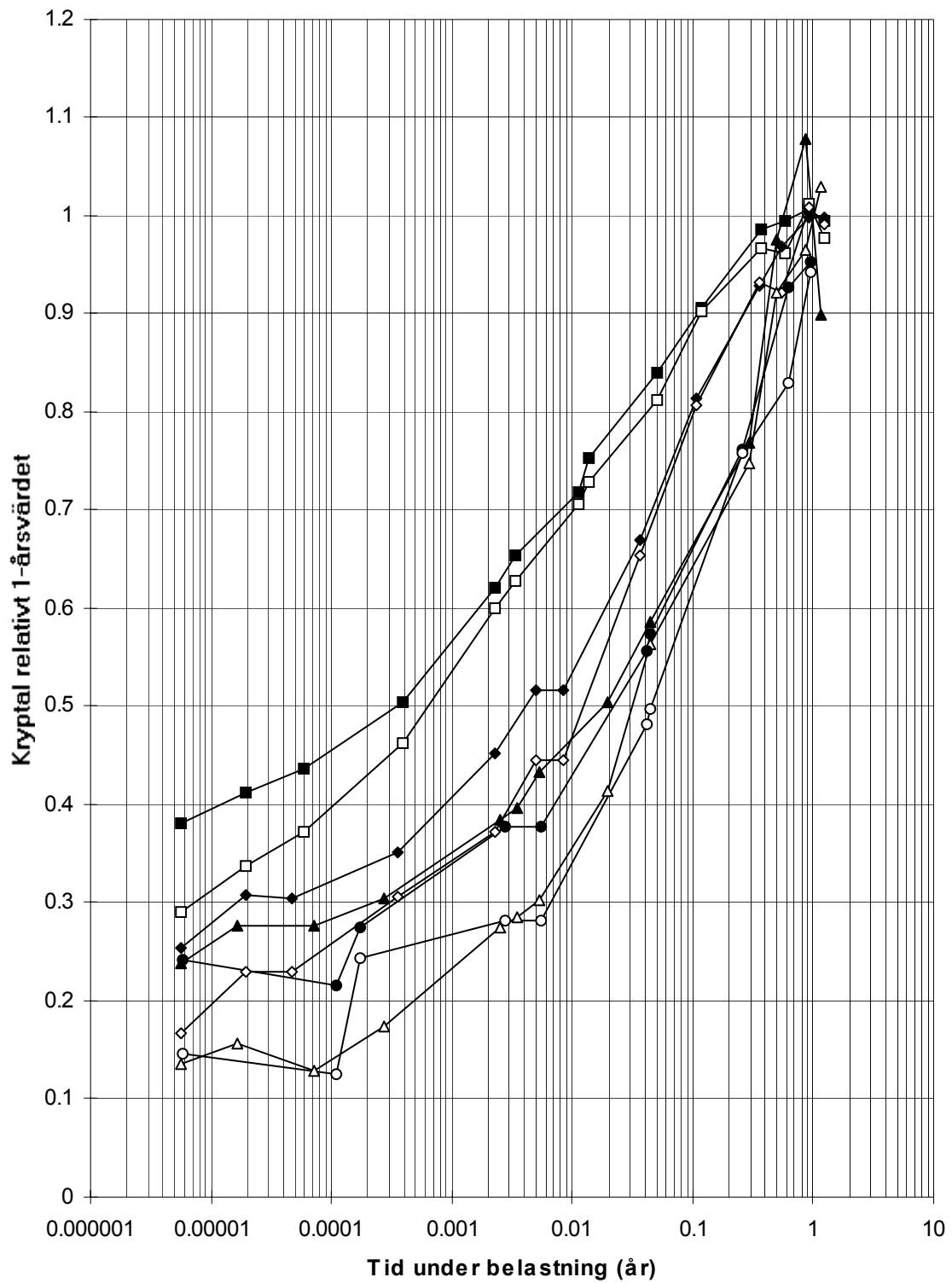
- f_c = aktuell tryckhållfasthet, 100 mm kub (MPa)
 f_{c28} = 28-dygns tryckhållfasthet, 100 mm kub (MPa)
B = försegling
D = lufthärdning
D1 = lufthärdning (torkstart vid 1 dygns ålder)
D90 = lufthärdning (torkstart vid 90 dygns ålder)
N = normalkompakterande betong
S = självkompakterande betong
27 = vct (%)
 σ = aktuell spänning (MPa)

Innehållsförteckning:

| | |
|--------------|-----------------------------------|
| Appendix 8.1 | Betong 27S |
| Appendix 8.2 | Betong 32N |
| Appendix 8.3 | Betong 38N |
| Appendix 8.4 | Betong 38S |
| Appendix 8.5 | Betong 50N |
| Appendix 8.6 | Betong 50S |
| Appendix 8.7 | Betong 80N |
| Appendix 8.8 | Betong 80S |
| Appendix 8.9 | Betong 38S med försenad torkstart |

Appendix 8.1

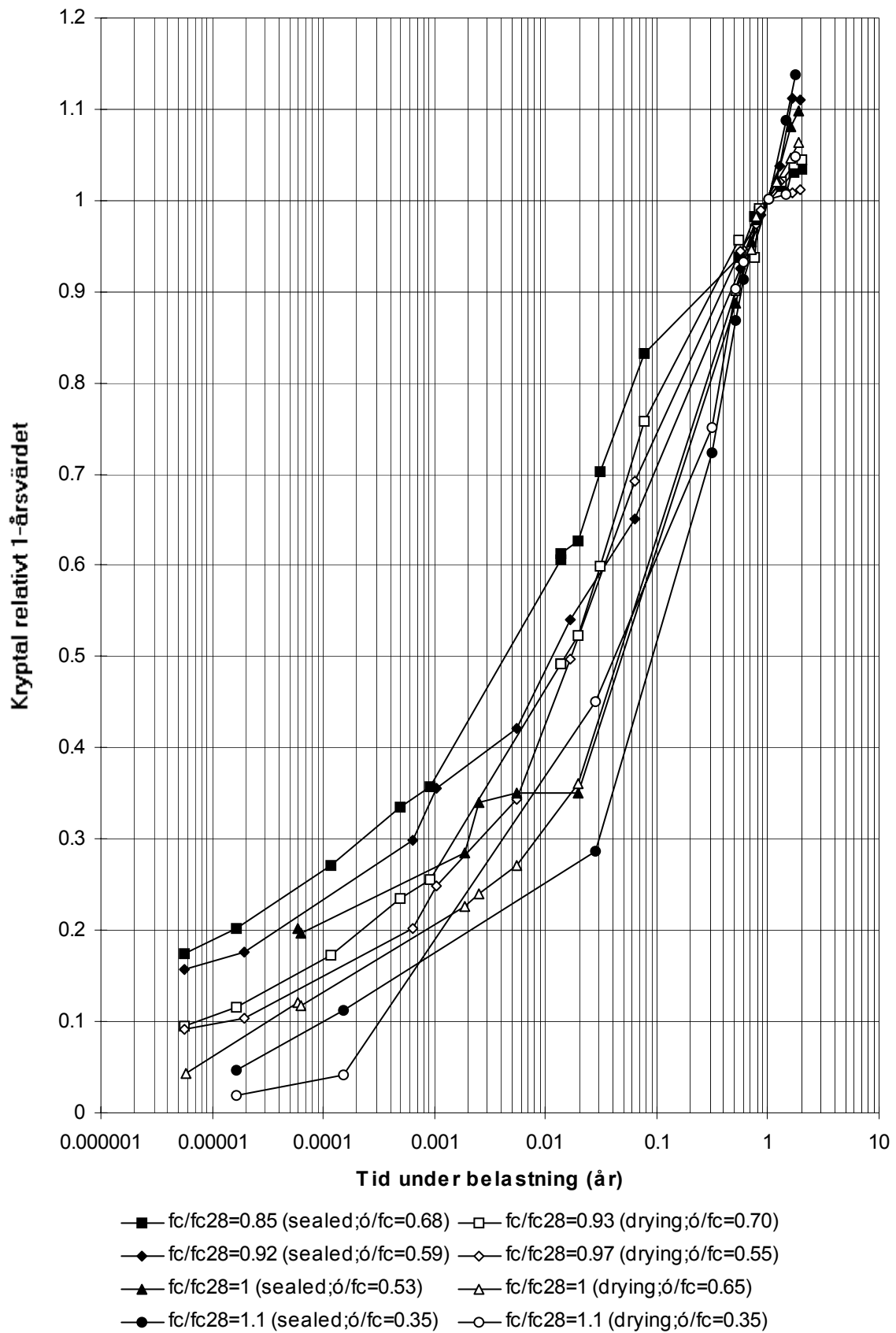
Betong 27S



- $f_c/f_{c28}=0.45$ (sealed; $\delta/f_c=0.40$) □ $f_c/f_{c28}=0.51$ (drying; $\delta/f_c=0.40$)
- ◆ $f_c/f_{c28}=0.78$ (sealed; $\delta/f_c=0.31$) ◇ $f_c/f_{c28}=0.83$ (drying; $\delta/f_c=0.40$)
- ▲ $f_c/f_{c28}=1$ (sealed; $\delta/f_c=0.18$) △ $f_c/f_{c28}=1$ (drying; $\delta/f_c=0.20$)
- $f_c/f_{c28}=1.12$ (sealed; $\delta/f_c=0.19$) ○ $f_c/f_{c28}=1.08$ (drying; $\delta/f_c=0.22$)

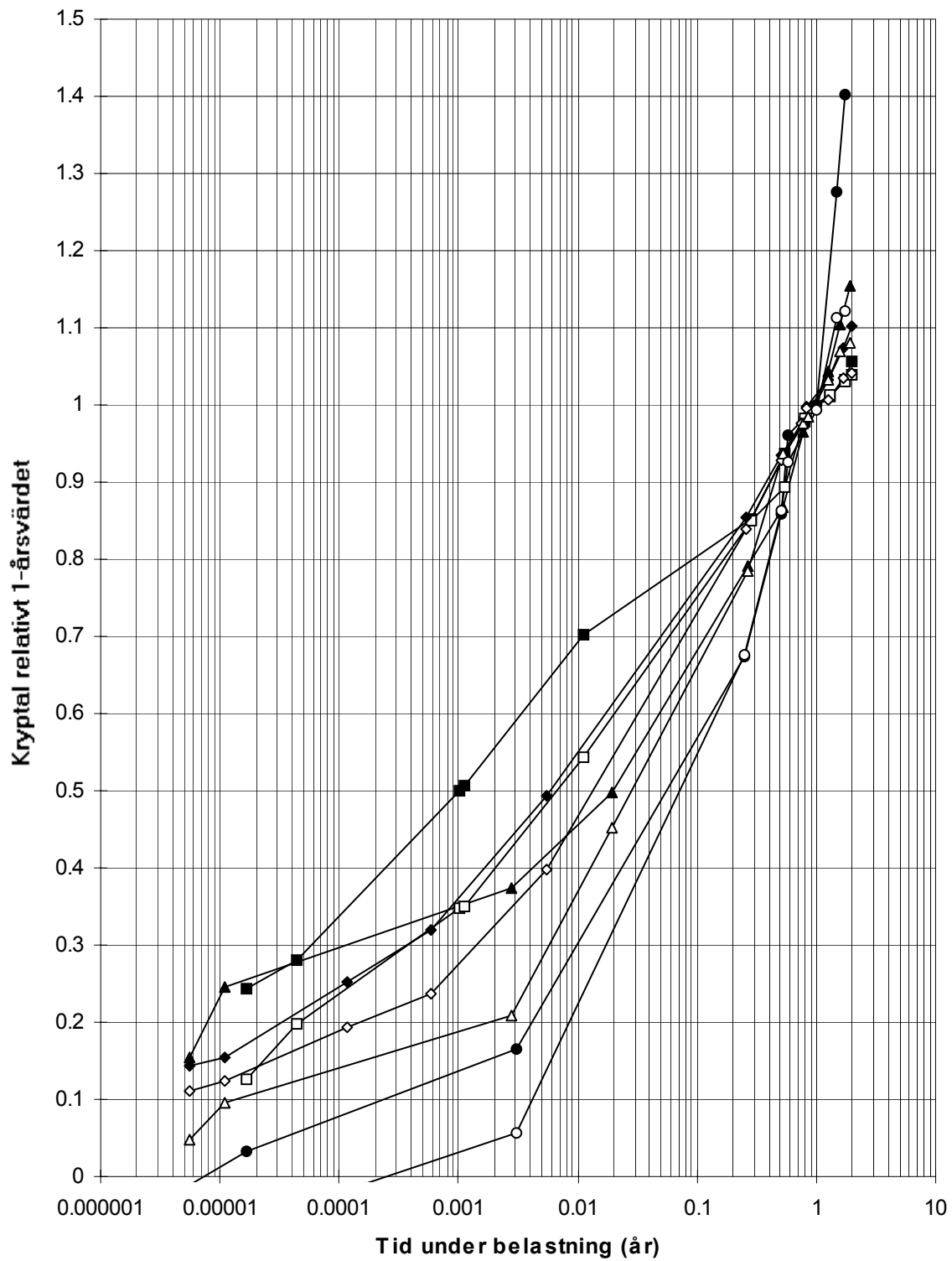
Appendix 8.2

Betong 32N



Appendix 8.3

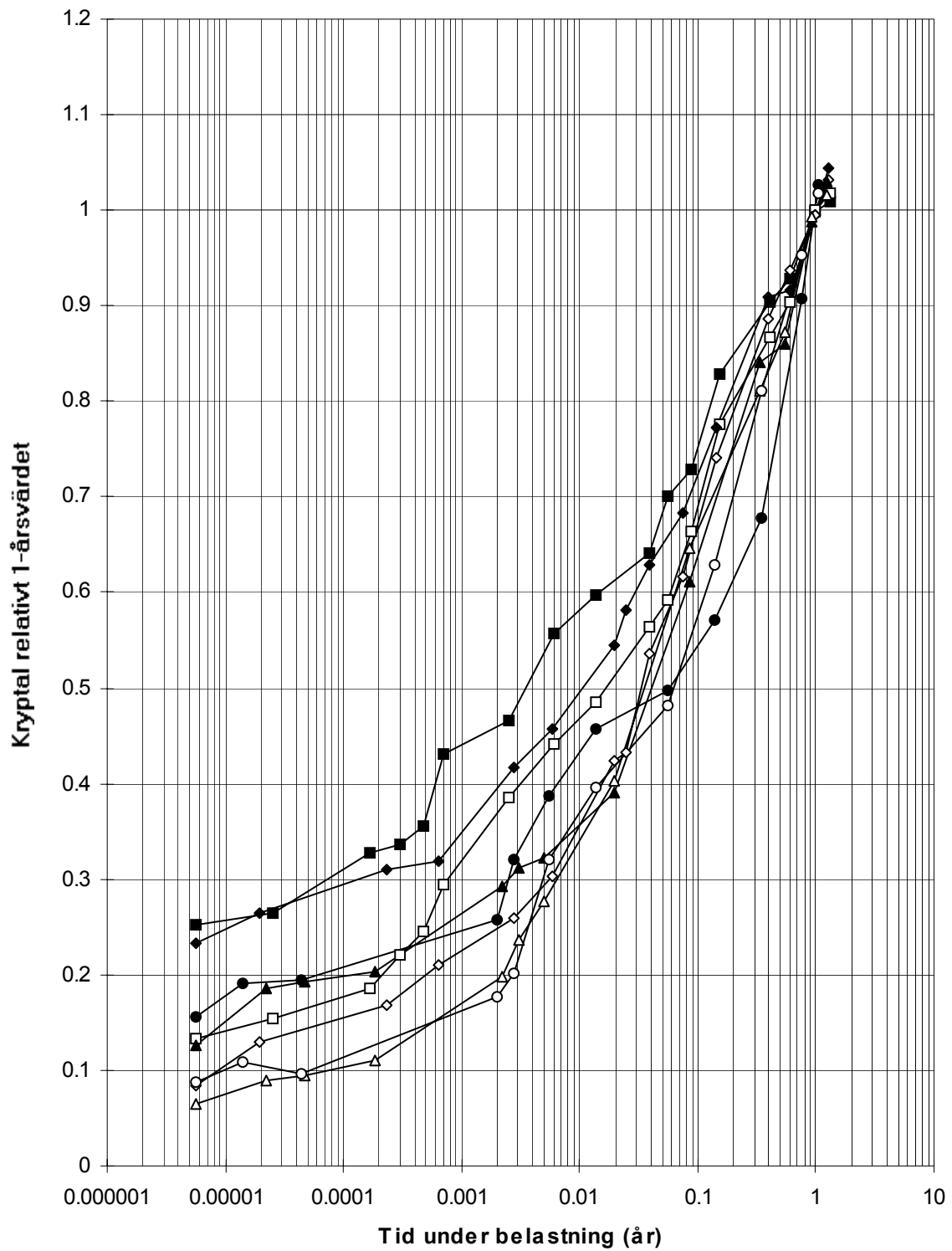
Betong 38N



- $f_c/f_{c28}=0.98$ (sealed; $\sigma/f_c=0.79$) □ $f_c/f_{c28}=0.83$ (drying; $\sigma/f_c=0.78$)
- ◆ $f_c/f_{c28}=1$ (sealed; $\sigma/f_c=0.78$) ◇ $f_c/f_{c28}=0.93$ (drying; $\sigma/f_c=0.62$)
- ▲ $f_c/f_{c28}=1$ (sealed; $\sigma/f_c=0.70$) △ $f_c/f_{c28}=1$ (drying; $\sigma/f_c=0.70$)
- $f_c/f_{c28}=1.1$ (sealed; $\sigma/f_c=0.35$) ○ $f_c/f_{c28}=1.1$ (drying; $\sigma/f_c=0.35$)

Appendix 8.4

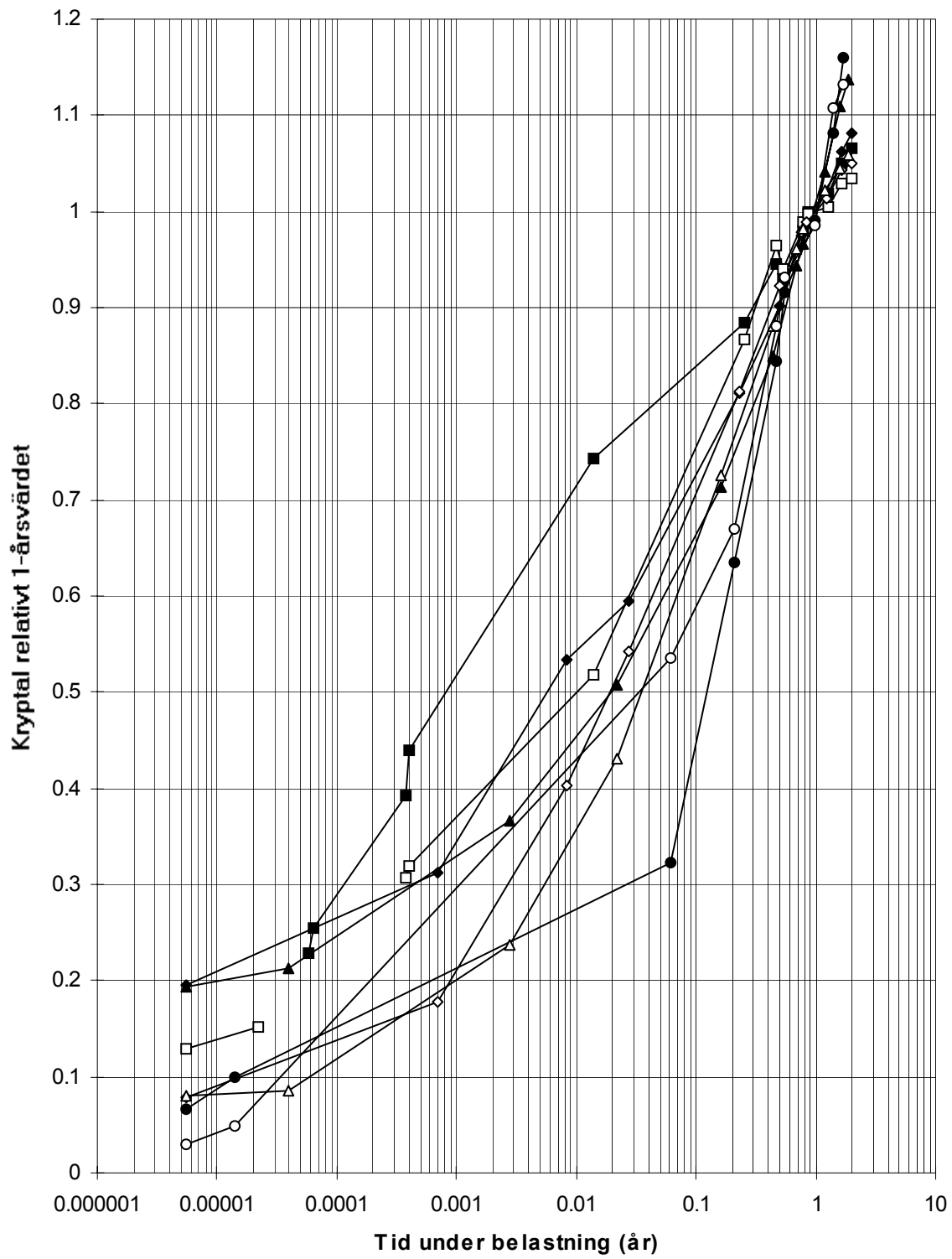
Betong 38S



- $f_c/f_{c28}=0.76$ (sealed; $\acute{o}/f_c=0.40$) —□— $f_c/f_{c28}=0.76$ (drying; $\acute{o}/f_c=0.40$)
- ◆— $f_c/f_{c28}=0.88$ (sealed; $\acute{o}/f_c=0.41$) —◇— $f_c/f_{c28}=0.92$ (drying; $\acute{o}/f_c=0.39$)
- ▲— $f_c/f_{c28}=1$ (sealed; $\acute{o}/f_c=0.20$) —△— $f_c/f_{c28}=1$ (drying; $\acute{o}/f_c=0.20$)
- $f_c/f_{c28}=1.14$ (sealed; $\acute{o}/f_c=0.21$) —○— $f_c/f_{c28}=1.1$ (drying; $\acute{o}/f_c=0.35$)

Appendix 8.5

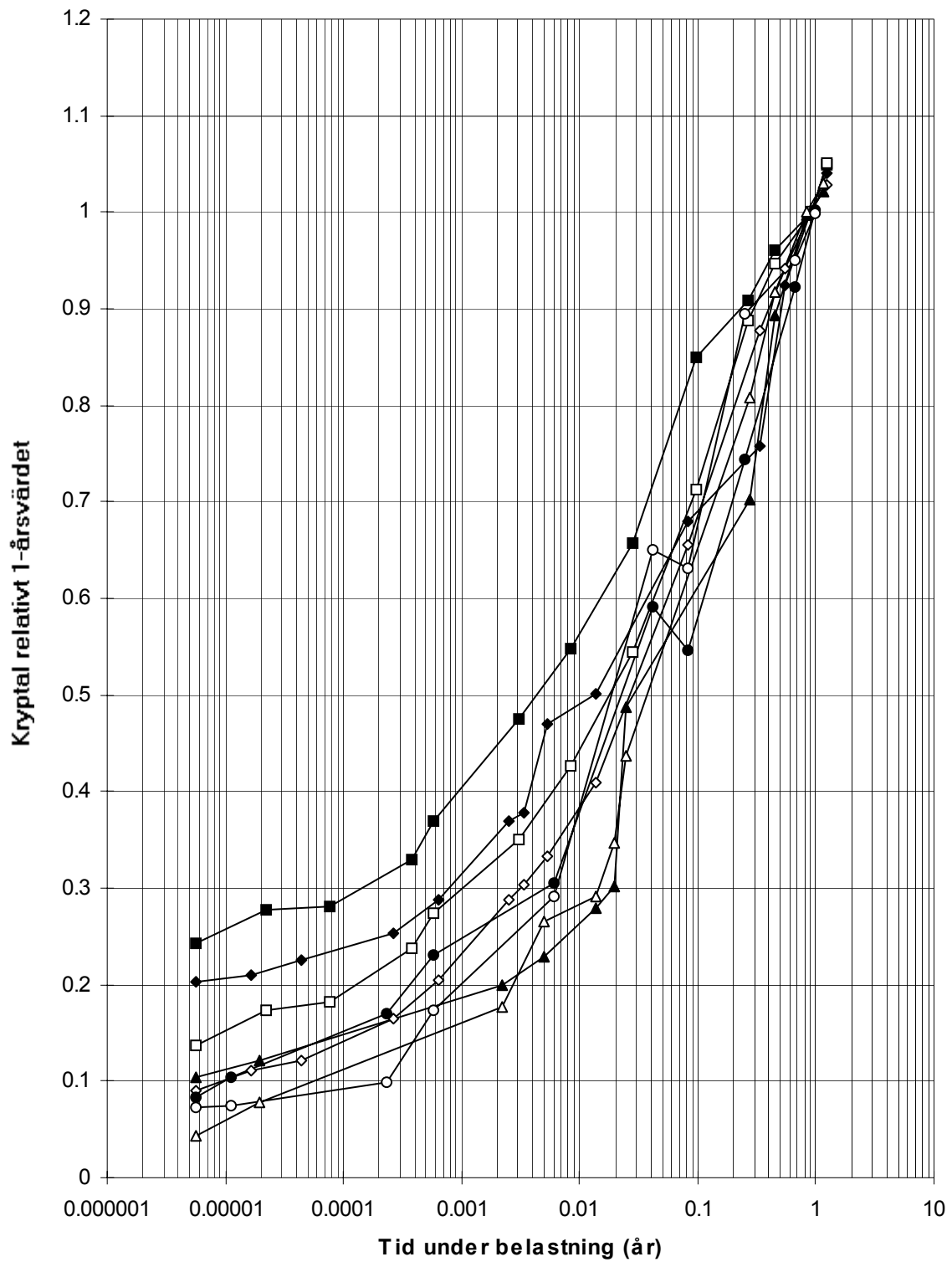
Betong 50N



- $f_c/f_{c28}=0.77$ (sealed; $\delta/f_c=0.69$) □ $f_c/f_{c28}=0.66$ (drying; $\delta/f_c=0.69$)
- ◆ $f_c/f_{c28}=0.90$ (sealed; $\delta/f_c=0.71$) ◇ $f_c/f_{c28}=0.77$ (drying; $\delta/f_c=0.70$)
- ▲ $f_c/f_{c28}=1$ (sealed; $\delta/f_c=0.70$) △ $f_c/f_{c28}=1$ (drying; $\delta/f_c=0.60$)
- $f_c/f_{c28}=1.27$ (sealed; $\delta/f_c=0.35$) ○ $f_c/f_{c28}=1.09$ (drying; $\delta/f_c=0.35$)

Appendix 8.6

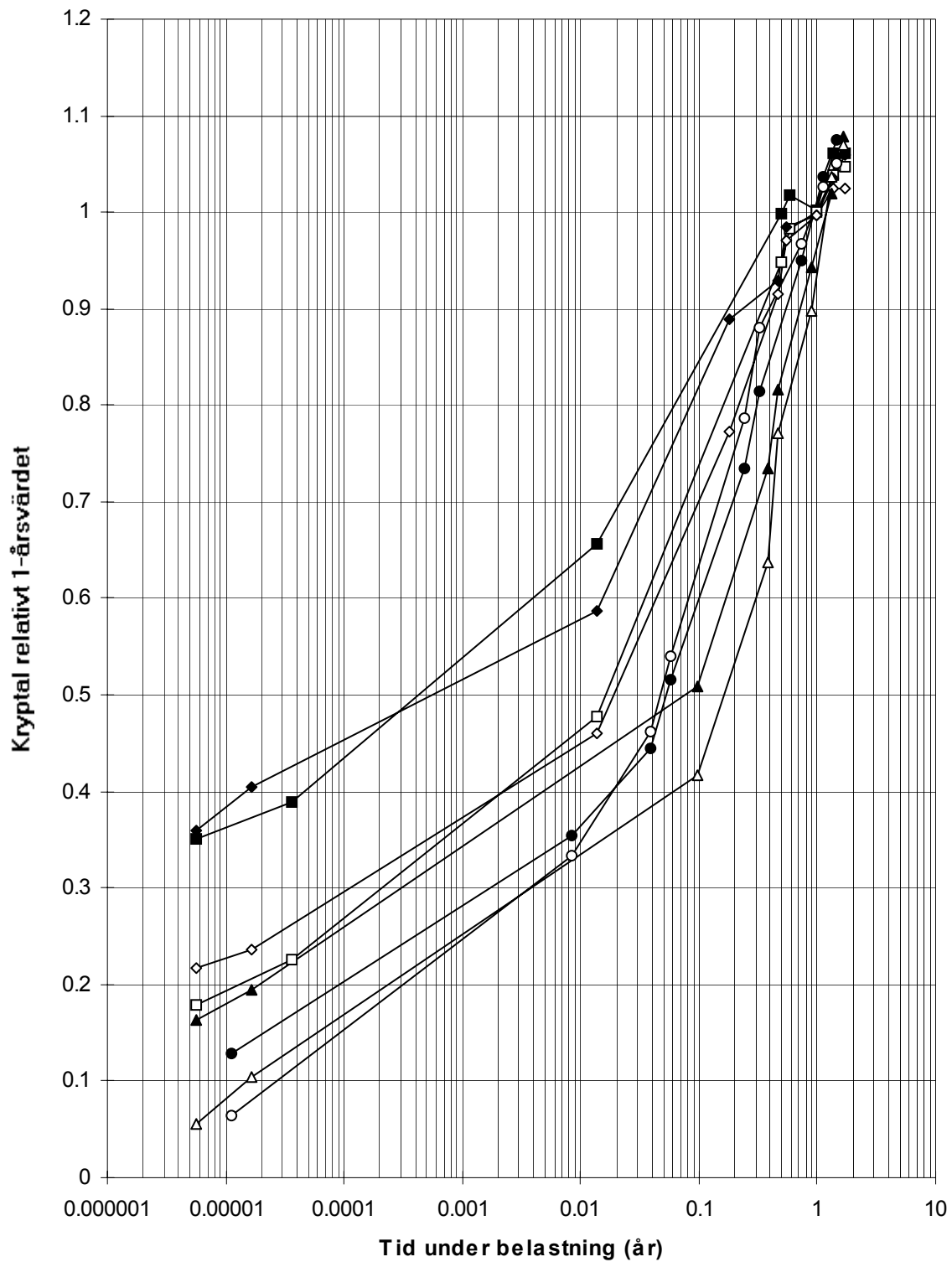
Betong 50S



- $f_c/f_{c28}=0.70$ (sealed; $\sigma/f_c=0.40$) —□— $f_c/f_{c28}=0.66$ (drying; $\sigma/f_c=0.69$)
- ◆— $f_c/f_{c28}=0.85$ (sealed; $\sigma/f_c=0.41$) —◇— $f_c/f_{c28}=0.77$ (drying; $\sigma/f_c=0.70$)
- ▲— $f_c/f_{c28}=1$ (sealed; $\sigma/f_c=0.20$) —△— $f_c/f_{c28}=1$ (drying; $\sigma/f_c=0.19$)
- $f_c/f_{c28}=1.06$ (sealed; $\sigma/f_c=0.20$) —○— $f_c/f_{c28}=1.09$ (drying; $\sigma/f_c=0.20$)

Appendix 8.7

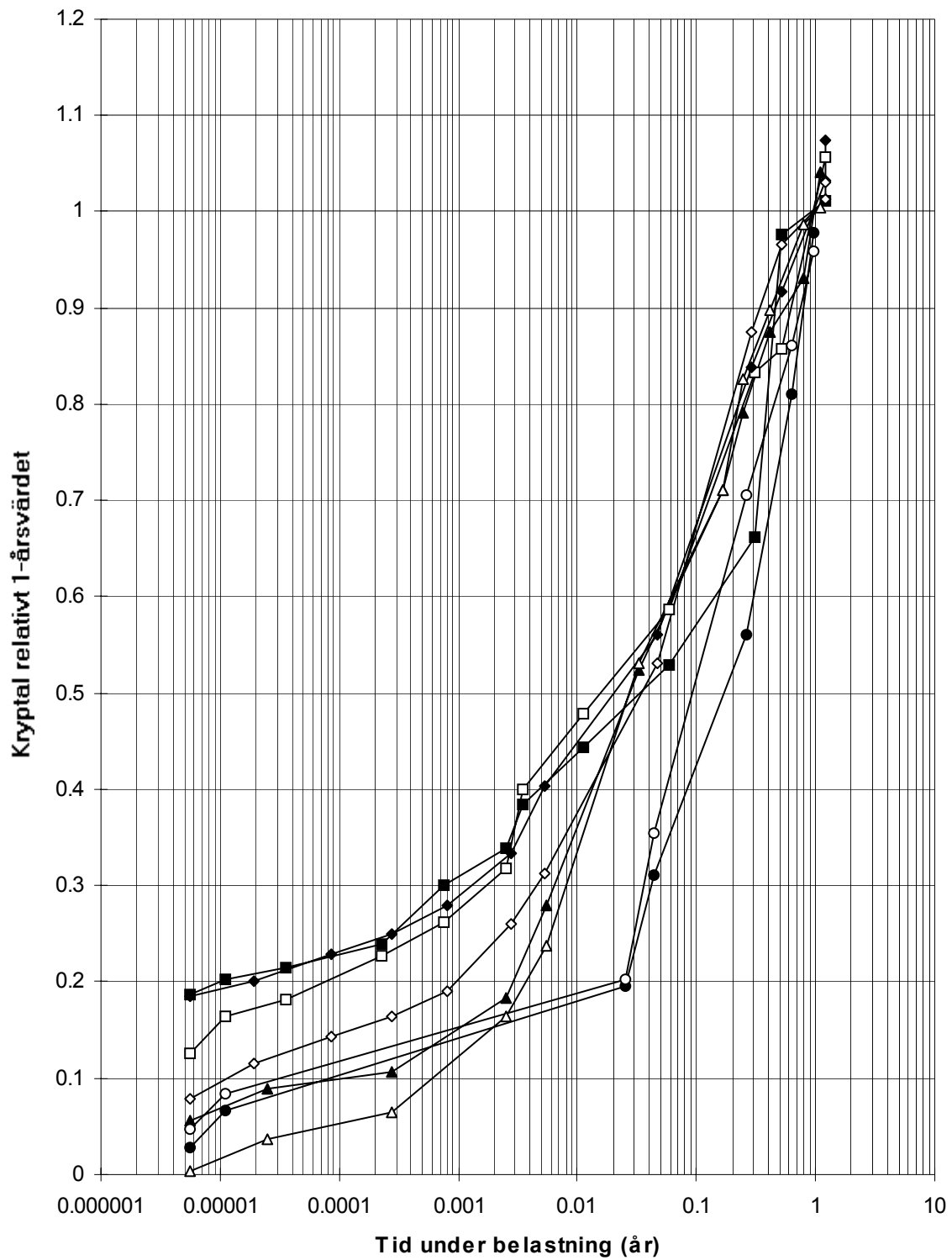
Betong 80N



- $f_c/f_{c28}=0.50$ (sealed; $\delta/f_c=0.70$) —□— $f_c/f_{c28}=0.47$ (drying; $\delta/f_c=0.70$)
- ◆— $f_c/f_{c28}=0.75$ (sealed; $\delta/f_c=0.35$) —◇— $f_c/f_{c28}=0.75$ (drying; $\delta/f_c=0.35$)
- ▲— $f_c/f_{c28}=1$ (sealed; $\delta/f_c=0.39$) —△— $f_c/f_{c28}=1$ (drying; $\delta/f_c=0.36$)
- $f_c/f_{c28}=1.14$ (sealed; $\delta/f_c=0.56$) —○— $f_c/f_{c28}=1.15$ (drying; $\delta/f_c=0.70$)

Appendix 8.8

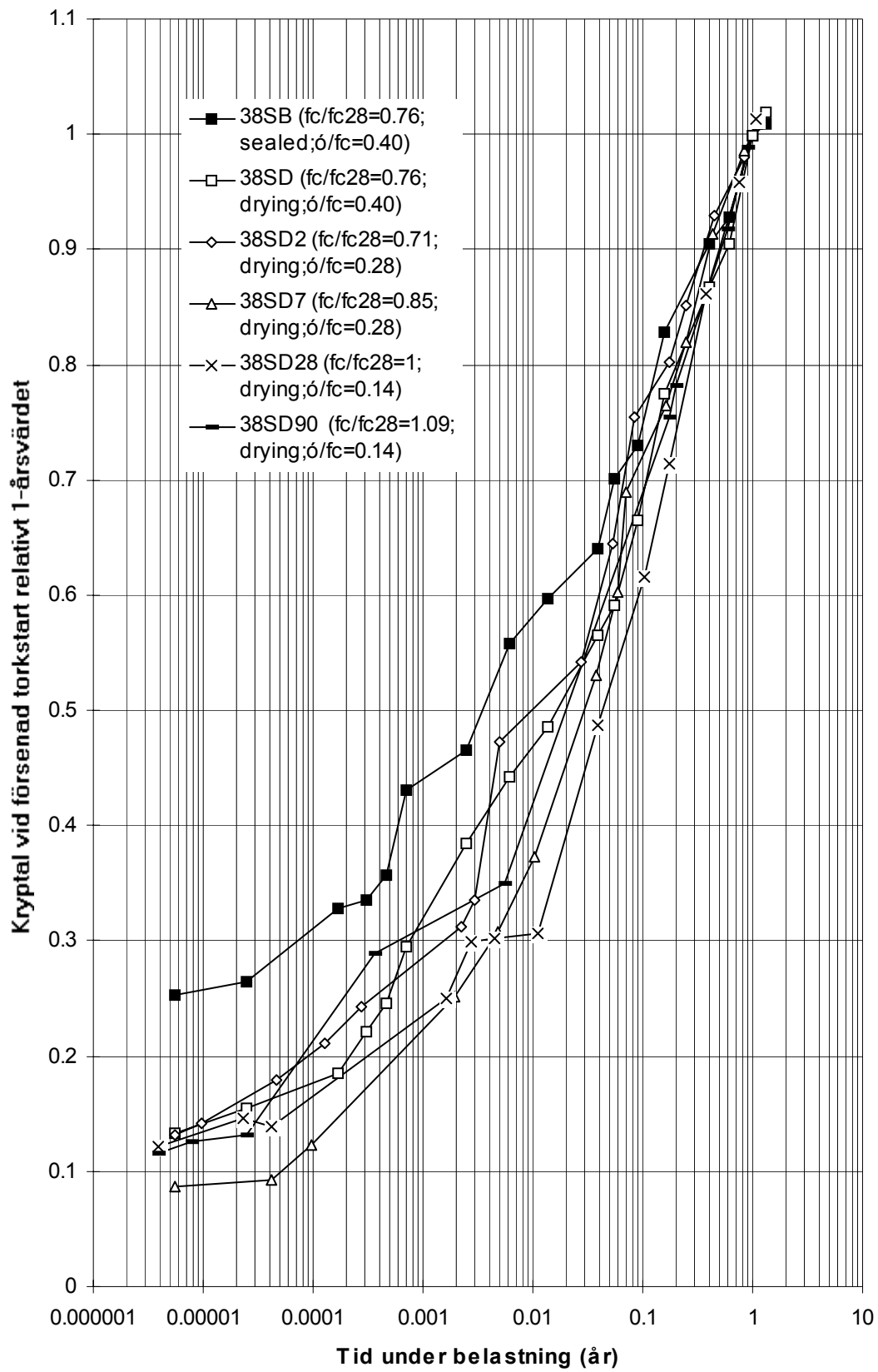
Betong 80S



- fc/fc28=0.56 (sealed; ó/fc=0.40) □ fc/fc28=0.56 (drying; ó/fc=0.40)
- ◆ fc/fc28=0.84 (sealed; ó/fc=0.40) ◇ fc/fc28=0.86 (drying; ó/fc=0.39)
- ▲ fc/fc28=1 (sealed; ó/fc=0.20) △ fc/fc28=1 (drying; ó/fc=0.20)
- fc/fc28=1.06 (sealed; ó/fc=0.20) ○ fc/fc28=1.09 (drying; ó/fc=0.20)

Appendix 8.9

Betong 38S med försenad torkstart



APPENDIX 9

Deformationer hos betong 38S (100 mm cylinder med längden 500 mm) vid 137 kN last

Beteckningar:

y = deformationsgivare

A = försegling

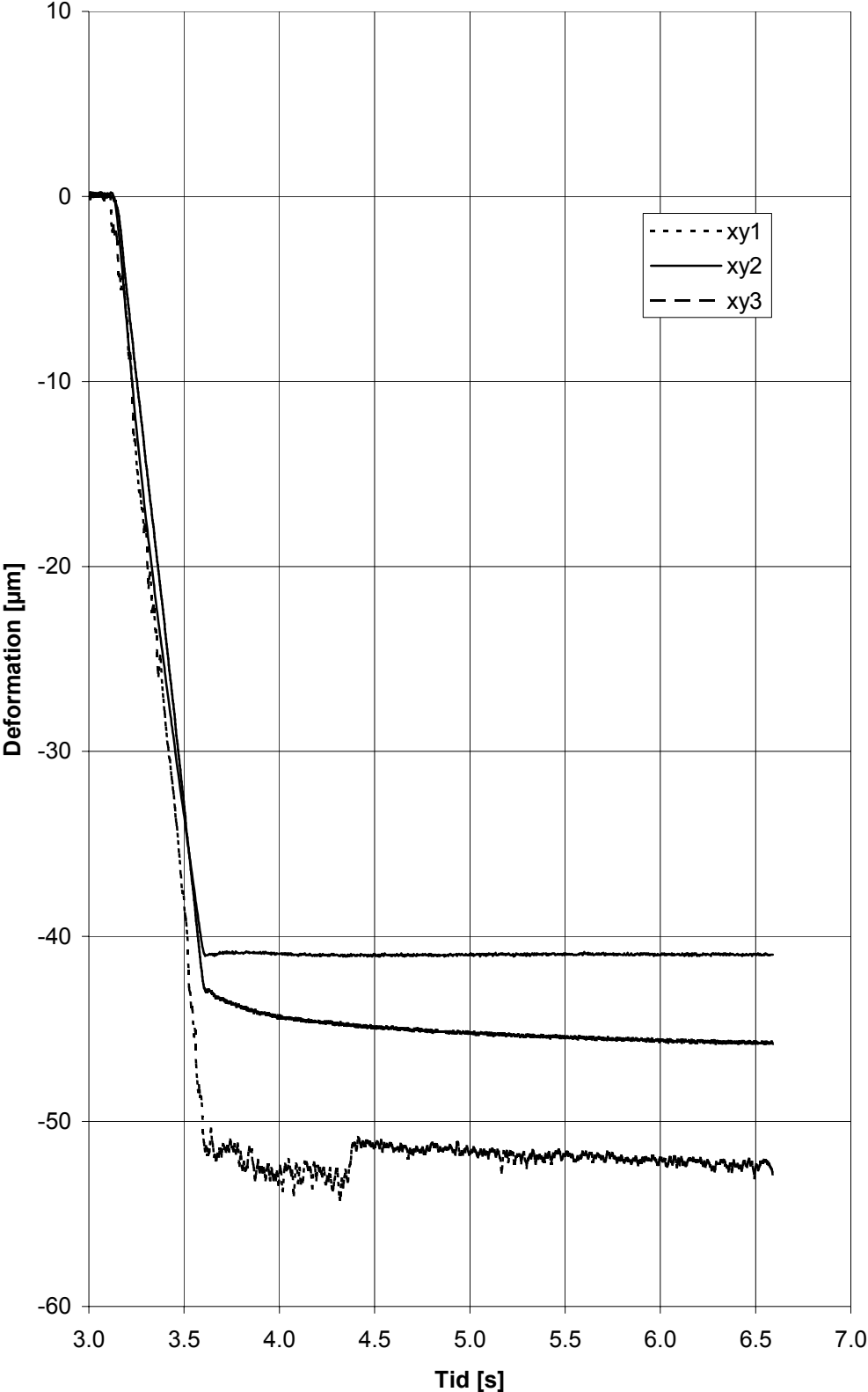
O = lufthårdning

V = självkompakterande betong

38 = vct (%)

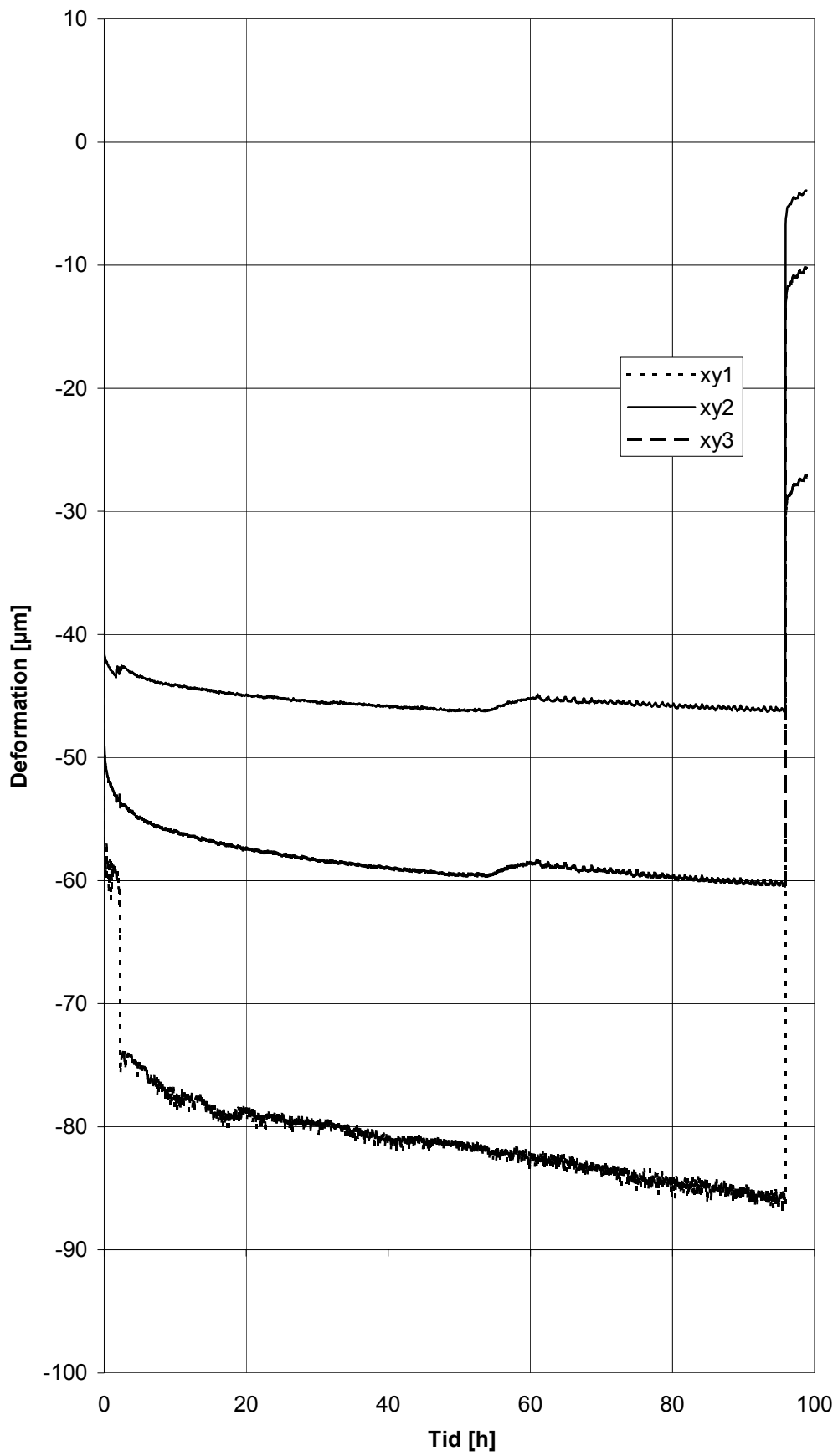
Innehållsförteckning:

| | |
|--------------|-------------------------------------|
| Appendix 9.1 | Försegling, pålastning |
| Appendix 9.2 | Försegling, belastning under 4 dygn |
| Appendix 9.3 | Försegling, avlastning |
| Appendix 9.4 | Uttorkning, pålastning |
| Appendix 9.5 | Uttorkning, belastning under 4 dygn |
| Appendix 9.6 | Uttorkning, avlastning |



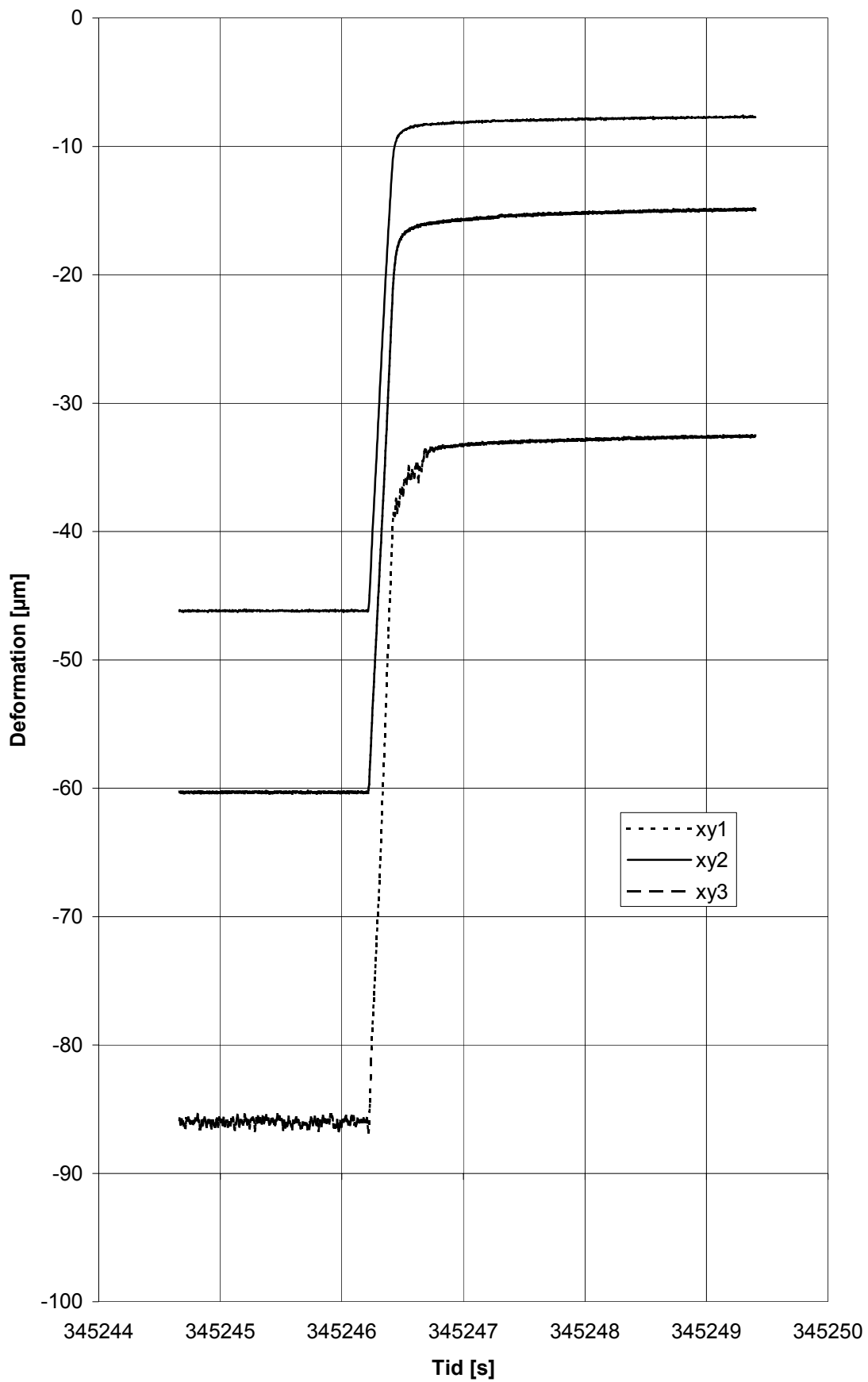
Appendix 9.2

Försegling, belastning under 4 dygn



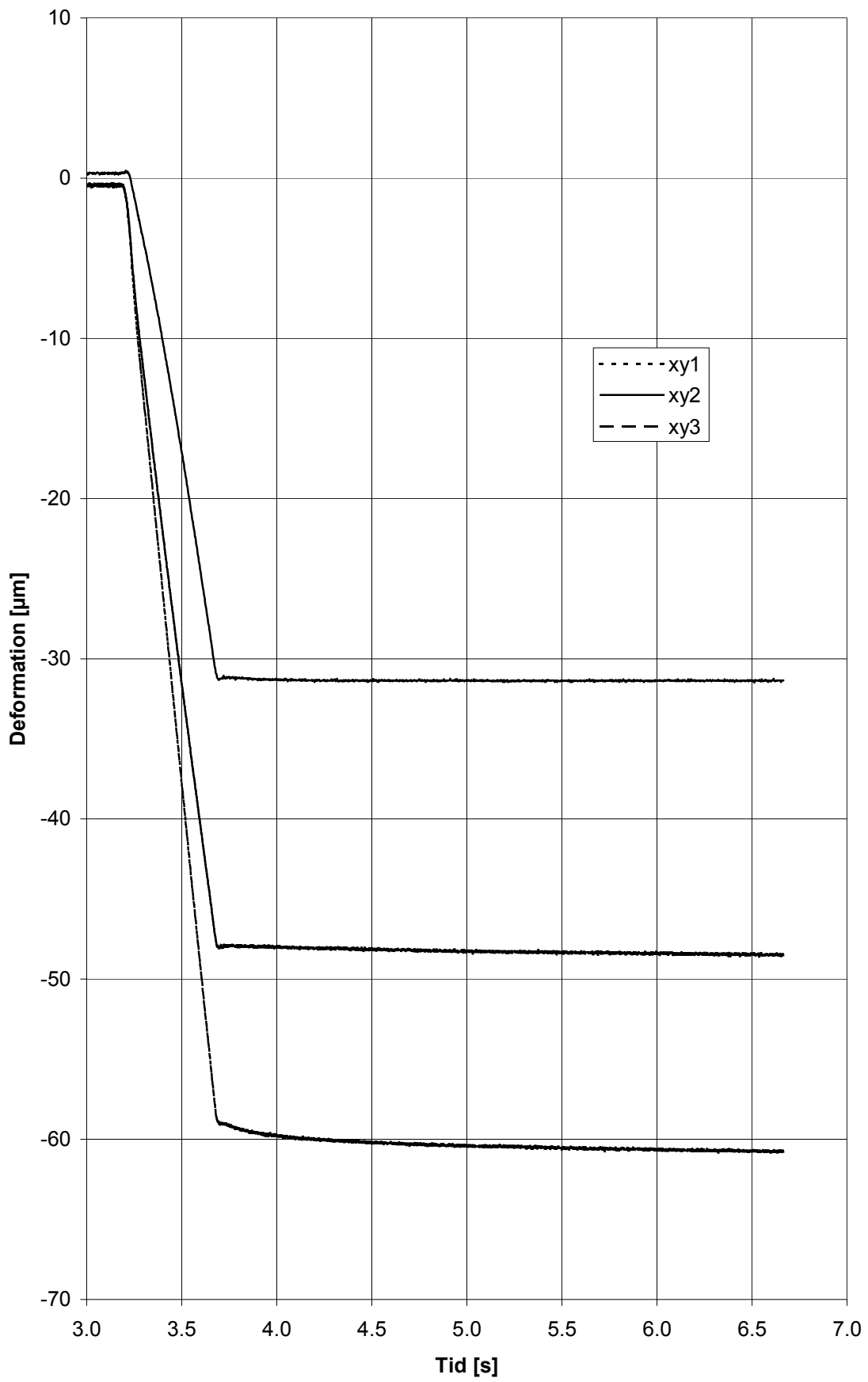
Appendix 9.3

Försegling, avlastning



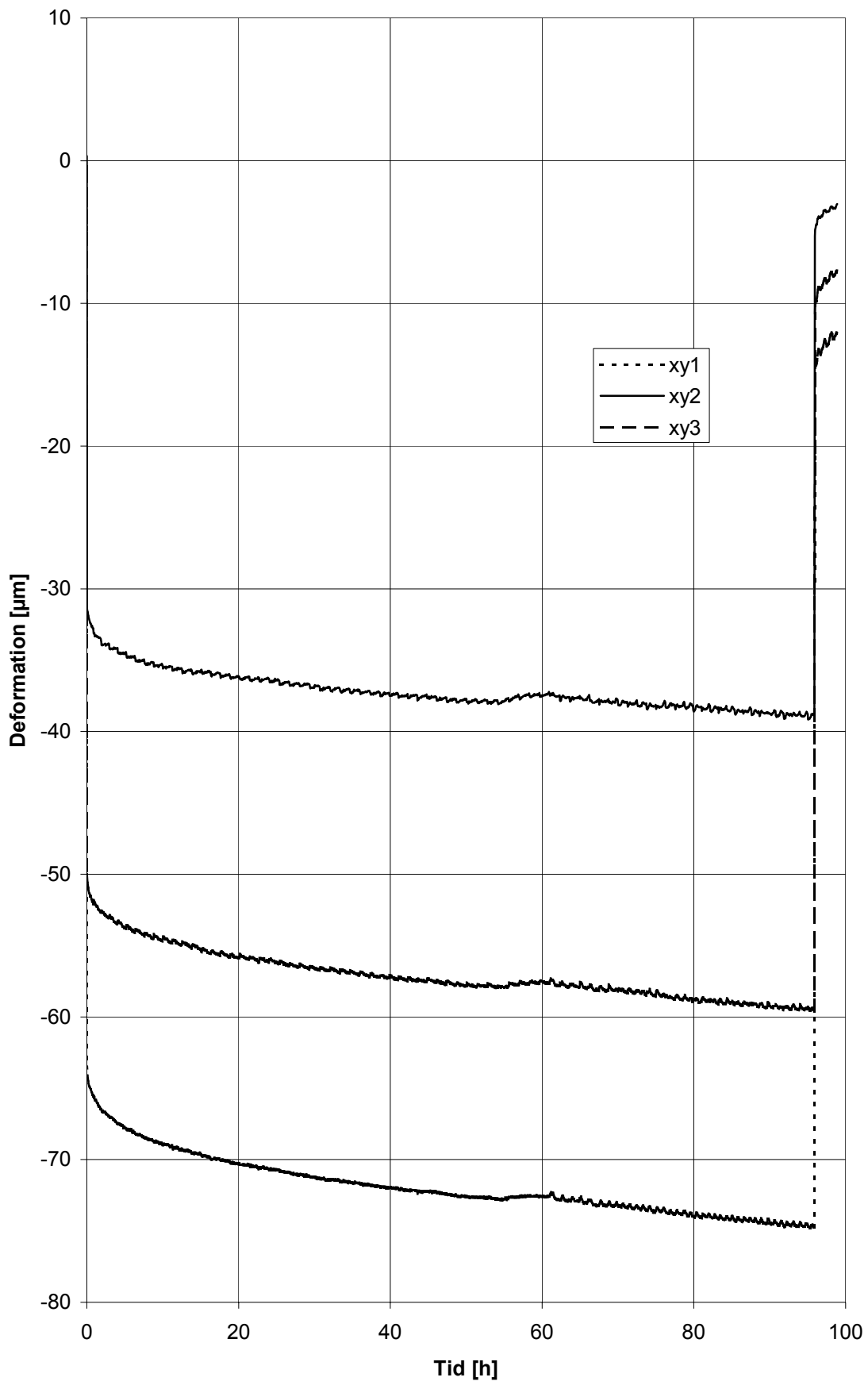
Appendix 9.4

Uttorkning, pålastning



Appendix 9.5

Uttorkning, belastning under 4 dygn



Appendix 9.6

Uttorkning, avlastning

