



Afdelingen for Bærende Konstruktioner  
Department of Structural Engineering  
Danmarks Tekniske Højskole · Technical University of Denmark

## State-of-the-art Rapport for Højstyrkebetons Svind og Krybning

Henrik Elgaard Jensen

Serie R

No 288

1992

**State-of-the-art rapport  
for  
Højstyrkebetons svind og krybning**

**State-of-the-art Rapport for Højstyrkebetons Svind og Krybning**

Copyright © by Henrik Elgaard Jensen, 1992

Tryk:

Afdelingen for Bærende Konstruktioner

Danmarks Tekniske Højskole

Lyngby

ISBN 87-7740-108-5

## Forord

Denne State-of-the-Art rapport er en del af forstudiet til "Højstyrkebetons svind og krybning". Projektet er et delprojekt (nr. 5) i "Det materialeteknologiske Udviklingsprogram: Højkvalitetsbeton i 90'erne."

Hensigten med rapporten er at give et overblik over den forskning, der til dato er offentliggjort indenfor dette emne.

De parametre, der specielt er fokuseret på i denne rapport, er de samme, der har dannet grundlag for den eksperimentelle del af forskningsprojektet.

Det er ikke hensigten med rapporten at forklare eller konkludere ud fra de rapporterede data.

Rapporten er renskrevet af stud. techn. Karin Kaderková.

Januar 1991

Henrik Elgaard Jensen

## **I. Abstract**

The research project has been carried out as a Ph.D. study at the Department of Structural Engineering, Technical University of Denmark. The supervisor of the Ph.D. study has been Professor Dr. techn. Mogens Peter Nielsen.

The Ph.D. Thesis consist of 3 theses performed during the period of the Ph.D. study:

1. State-of-the-art rapport for Højstyrkebetons svind og krybning.
2. Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; A Test Report. + Appendices A-D.
3. Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; An Analysis.

### **1. State-of-the-art rapport for Højstyrkebetons svind og krybning.**

The report deals briefly with the concepts and models which are used in relation to shrinkage and creep of concrete.

Different kinds of test-equipment are evaluated for usage in the experimental part of the project.

A review of the ingredients which are used to produce a high-strength concrete and the influence of these ingredients on shrinkage and creep of concrete, are obtained by references to tests reported in the literature.

### **2. Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; A Test Report. + Appendices A-D.**

The investigation deals with some time-dependent mechanical properties of seven different concretes. The time-dependent properties are shrinkage, uniaxial-creep and aging. The compressive strength of the seven concretes vary from 10 Mpa to 100 Mpa.

The concretes are exposed to drying at a temperature of 21 °C and a relative humidity of 65 % after 28 days of water curing. The stress/strength ratio is 1/3 in the creep tests.

Three of the seven concretes are investigated further. The compressive strength of the three

concretes is 15, 80 and 100 MPa.

The stress/strength ratio is varied from 0.4 to 0.7 for the three concretes in different creep tests. The three concretes are also investigated under sealed conditions, and after a water curing period of 7 days.

The pastes of the 80 and 100 MPa concretes are investigated as well, and creep recovery of the three concretes are studied.

The period of measuring is at least 11 month for all tests.

### **3. Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; An Analysis.**

This is a qualitative analysis of the test results presented in the test report. The analysis concerns a qualitative evaluation of the general mechanical properties and the time-dependent mechanical properties shrinkage, creep, weight-loss, development of strength/stiffness, age at loading, stress/strength ratio, microcracking, drying creep, static-fatigue and creep recovery. Based upon the analysis it is demonstrated that high-strength/high-performance concrete, containing microsilica fume and/or fly-ash and plasticizer, is not a new material with respect to the investigated properties.

The investigated concretes exhibit mechanical properties which comply with existing knowledge of the mechanisms of creep and shrinkage.

To avoid misinterpretations related to test conditions, the test results are evaluated quantitatively in relation to the "CEB-FIP modelcode 1990". The modelcode is used as a mathematical standard of test evaluation, as the CEB-FIP modelcode 1990 is calibrated by means of a computerized data bank to fit several shrinkage and creep laboratory tests.

**Keywords: Drying creep, basic creep, shrinkage, aging, testing, high-strength concrete, high stress/strength-level, creep recovery.**

## I. Resumé

Forskningsprojektet er gennemført som et licentiat studium på Afdelingen for Bærende Konstruktioner, Danmarks tekniske Højskole. Licentiat studiets vejleder har været Professor Dr. Techn. Mogens Peter Nielsen.

Licentiat afhandlingen består af 3 afhandlinger udført gennem licentiat studiet:

1. State-of-the-art rapport for Højstyrkebetons svind og krybning.
2. Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; A Test Report. + Appendices A-D.
3. Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; An Analysis.

### **1. State-of-the-art rapport for Højstyrkebetons svind og krybning.**

Rapporten omhandler kort de begreber og modeller, der benyttes i forbindelse med betons svind og krybning.

Forskellige typer forsøgsudstyr er vurderet med henblik på senere brug i den eksperimentelle del af det samlede projekt.

Der gives et overblik over de ingredienser, der benyttes ved produktion af højstyrkebeton og disse ingrediensers indflydelse på betons svind- og krybeegenskaber, ved reference til forsøg indsamlet fra litteraturen om emnet.

### **2. Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; A Test Report. + Appendices A-D.**

Undersøgelsen omhandler nogle tidsafhængige mekaniske egenskaber for syv forskellige betoner.

De tidsafhængige egenskaber er svind, eenakset-krybning og ældning. Trykstyrken af de syv betoner varierer fra 10 MPa til 100 MPa.

Betonerne er udsat for udtørring ved 21 °C og ved en relativ luftfugtighed på 65 % efter 28 dg. vandlagring. Spændings/styrke forholdet er 1/3 i krybeforsøgene.

Tre af betonerne er undersøgt yderligere. Trykstyrken af de tre betoner er 15, 80 og 100 MPa. Spændings/styrke forholdet er varieret fra 0.4 til 0.7 for de tre betoner i forskellige krybeforsøg. De tre betoner er også undersøgt under forseglede forhold og efter en vandlagringsperiode på 7 dage.

80 og 100 MPa betonernes pasta er ligeledes undersøgt og tilbagekrybningen er undersøgt for de tre betoner.

Måleperioden er mindst 11 måneder for alle forsøg.

### **3. Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; An Analysis.**

Dette er en kvalitativ analyse af de forsøgsresultater, der er præsenteret i forsøgsrapporten. Analysen er en kvalitativ vurdering af de generelle mekaniske egenskaber og de tidsafhængige mekaniske egenskaber som svind, krybning, vægttab, udvikling af styrke/stivhed, belastningsalder, spændings/styrke forhold, mikrorevner, udtørnings krybning, langtidsstyrke og tilbagekrybning. På baggrund af analysen er det vist, at højstyrke-/højkvalitetsbeton, der indeholder mikrosilica og/eller flyveaske og plastificerende midler, ikke er et nyt materiale med hensyn til de undersøgte egenskaber.

De undersøgte betoner udviser mekaniske egenskaber, der stemmer overens med eksisterende viden om svind- og krybemekanismerne.

For at undgå fejlfortolkninger relateret til forsøgsbetingelser, er forsøgsresultaterne vurderet kvantitativt i forhold til "CEB-FIP modelcode 1990". Modelnormen er brugt som en matematisk standard til forsøgsvurdering, da CEB-FIP modelcode er kalibreret vha. en EDB data bank mht. svind og krybning bestemt ved laboratorieforsøg.

**Nøgleord: Udtørningskrybning, grundkrybning, svind, ældning, forsøg, højstyrke beton, højt spændings/styrke niveau, tilbagekrybning.**



## Indhold

1.1	Indledning	1
2.1	Deformationer	2
2.2	Modeller generelt	6
	Modeller eksperimentelt	8
	krybning	8
	Potensfunktioner	9
	Logaritmiske funktioner	9
	Ekspontielle funktioner	9
	Hyperbolske funktioner	10
	Svind	10
	Empiriske modeller	11
	Sofistikerede modeller	11
3.1	Forsøgs- og måleudstyr	13
	Enaksede trykforsøg	13
	Trækkrybeforsøg	15
	Måleudstyr	15
	Klima	16
4.1	Forhold, der har indflydelse på svind og krybning	18
	V/C-tal	18
	Puzzolaner	19
	Additiver	19
4.2	Mikrosilica	21
	Svind	21
	Krybning	22
4.3	Flyveaske	23
4.4	Plastificerende midler	24

4.5 Tilslag .....	24
4.6 V/C-tal .....	25
4.7 Styrkeudvikling og belastningsalder .....	26
4.8 $\sigma/f_c$ - Forholdet .....	26
4.9 Luftfugtighedens indflydelse på svind og krybning .....	28
4.10 Svind og krybning af højstyrkebeton .....	30
Krybning .....	30
Svind .....	30
5.1 Referencer .....	32
6.1 Figurer .....	38



## 1.1 Indledning

Betons svind og krybning har givet anledning til mange problemer og spekulationer indenfor både praktisk anvendelse og teoretisk analyse af beton.

På nuværende tidspunkt findes der ingen anvendelig teori, der entydigt kan forklare samtlige svind- og krybefænomener. Det siger selvfølgelig sig selv, at manglen på teorier for almindelig beton også bliver en mangel for højstyrkebeton.

Det er muligt at nære håb for, at den viden, vi kan skaffe os fra forsøg med højstyrkebeton kan hjælpe et skridt på vejen til at løse mysteriet og tilvejebringe en bedre forståelse af både svind- og krybemekanismerne.

Det virker fra et videnskabeligt synspunkt meget utilfredsstillende, at det ikke er muligt at forklare fænomenerne til fulde. Set med ingeniørens øjne er behovet for den uddybende forklaring ikke nødvendigvis så stor. Den projekterende ingeniør har mere behov for at kunne sammenligne umiddelbare egenskaber for forskellige betoner, for på dette grundlag at kunne vurdere konstruktionens virkemåde.

Den projekterende ingeniør har mere behov for at få svar på spørgsmål af karakteren: "Kryber højstyrkebeton mere eller mindre end normalstyrkebeton?", end at få svar på spørgsmålet: "Hvorfor kryber højstyrkebeton mere eller mindre end normalstyrkebeton?". Ved projektering af eksempelvis stålkonstruktioner har man f.eks. ikke noget behov for at vide, hvorfor stål er lineærtelastisk til en vis grænse, hvorefter det flyder, der er kun behov for at vide, at materialet opfører sig således.

Behovet for at få svar på simple spørgsmål skal dog ikke bremse en søgen efter svar på de mere komplicerede spørgsmål.

Betragtningerne over hvilke spørgsmål, der søges belyst afspejler sig i høj grad i de undersøgelser, der er foretaget til dato, og det vil også afspejle sig i fremtidige undersøgelser.

## 2.1 Deformationer

Når en betonkonstruktion belastes, deformeres den, hvilket er i overensstemmelse med elasticitets- og plasticitetsteoretiske betragtninger. Det kan observeres, at betonkonstruktioner ikke blot deformeres i det øjeblik de belastes, men at deformationerne ændres med tiden. Dette fænomen kaldes krybning.

De deformationer, der kan konstateres som krybning i betonkonstruktioner er dog mangeartede og skyldes flere forskellige faktorer. Det er fundet nødvendigt at opdele den observerede deformation i flere deformationer for at kunne betragte fænomenet - krybning - på mere teoretisk vis.

Deformationer angives som oftest i form af en længdeændring eller en vinkeldrejning, dette er ikke praktisk, og man angiver da i stedet en tøjning,  $\epsilon$ , der er en deformation pr. længdeenhed og derfor en dimensionsløs parameter.

Tøjningerne kan opdeles i dels tidsafhængige og dels tidsuafhængige tøjninger. Til de tidsuafhængige tøjninger hører momentantøjning, og til de tidsafhængige hører grundkrybning, sorptionskrybning og svindtøjning.

Momentantøjningen er den tøjning, der kan observeres når prøvelegemet belastes/aflastes over et meget kort tidsrum ( $\tau \leq 0.01$  sek).

Momentantøjningen anses normalt at være uafhængig af tiden, hvilket ikke er fuldstændig korrekt, da E-modulet vokser med tiden pga. den fortsatte styrkeudvikling. Da momentantøjningen antages at have flg. sammenhæng med spændingen:

$$\sigma = E(\tau) \epsilon_0 \quad (2.1)$$

ses det let, at  $\epsilon_0$  vil blive mindre med tiden, når  $\sigma$  er konstant og  $E(\tau)$  vokser. Ofte er denne tidsafhængighed så ubetydelig, at der i forsøgspraksis ikke tages hensyn til dette. Det er dog et forhold, der må holdes for øje, når betonens alder ved belastningen er mindre end 7 dg., da E-modulet vokser kraftigt i denne periode.

Grundkrybningen er defineret som den krybning, der opstår i et prøvelegeme, når der ikke

udveksles fugt mellem betonen eller omgivelserne.

Dette er i praksis ofte tolket på den måde, at grundkrybningen kan bestemmes på prøvelegemer nedsænket i vand, dog under forudsætning af, at svelningen kun giver et ubetydeligt bidrag i forhold til den målte krybning.

Sorptionskrybningen er den totale krybning, der kan observeres, når betonen har mulighed for at udveksle fugt med omgivelserne. Sorptionskrybningen, der som oftest er større end grundkrybningen, kan udtrykkes som en sum af grundkrybningen og en fugtbetinget krybning.

Svindkrybningen er den tøjning, der kan registreres på et prøvelegeme, som ikke belastes, men udelukkende ændrer sin geometri pga. fugttransmission. Se iøvrigt Figur 2.1.1.

I mange år har det været antaget, at sorptionskrybningen kunne bestemmes som differencen mellem den målte totale tidsafhængige tøjning og svindtøjningen. Det er dog ikke tilfældet, at superposition er mulig, da det vides, at svind og krybning påvirkes indbyrdes. Da det ikke umiddelbart er muligt at adskille bidraget fra svind til krybningen, antages det, at svind ikke bidrager til krybningen og dermed, at superposition er mulig. Forholdene er illustreret i Figur 2.1.2.

I Figur 2.1.3 svarer det første kurvestykke til momentantøjningen, der opstår umiddelbart samtidig med lastpåførslen, hvorefter betonen begynder at krybe pga. belastningen.

Det andet kurvestykke, kaldet primær krybning, viser en aftagende tøjningsacceleration, ( $d^2\epsilon/d\tau^2 < 0$ ). Bliver accelerationen på et tidspunkt nul, ( $d^2\epsilon/d\tau^2 = 0$ ), svarende til det 3. kurvestykke, siges krybningen at være i sit sekundære stadie, hvor tøjningshastigheden er konstant, ( $d\epsilon/d\tau = \text{konstant}$ ).

Det 4. kurvestykke eksisterer ikke nødvendigvis, men beskriver en voksende acceleration, ( $d^2\epsilon/d\tau^2 > 0$ ), og benævnes - krybningens tertiære stadie. Dette stadie nås kun, hvis prøvelegemet er belastet med en spænding, der svarer til betonens langtidstyrke (se senere). De fleste konstruktioner er belastet således, at krybningen kun befinder sig i det primære stadie og i en vis del af det sekundære.

Beskrivelsen af grænsen mellem det sekundære og det tertiære stadie har dog stor betydning ved bestemmelse af langtidstyrken, da det tertiære stadie ender i brud.

I det foregående er der kun beskrevet, hvorledes beton deformeres som funktion af tiden, når betonen påføres en konstant varig last. I de flg. afsnit vil en kort beskrivelse af forholdene, når betonen aflastes blive givet.

Betonprøvelegemer som gennem et tidsrum har været belastet med en konstant last har som tidligere nævnt undergået en momentan- og tidsafhængig tøjning. Aflastes prøvelegemerne, deformeres prøvelegemerne tilbage mod den oprindelige geometri efter samme mønster som ved belastning. Først tilbagetøjer legemet momentant, hvorefter reetableringen af geometrien forløber som en funktion af tiden, tilbagekrybning.

Den elastiske tilbagetøjning er generelt mindre end den elastiske tøjning ved belastningstidspunktet, hvilket skyldes dels voksende E-modul og styrkeudvikling, og dels plastiske deformationer af betonen. Tilbagekrybningen er ligeledes mindre end selve krybningen, undtagen i visse tilfælde, hvor belastningen påføres når betonens alder er meget fremskreden. I dette tilfælde kan tilbagekrybningen være lig med krybningen. Generelt står prøvelegemerne tilbage med en blivende deformation efter aflastning. Der er tale om en reversibel og irreversibel krybning.

Det er dog yderst sjældent, at betonkonstruktioner blot belastes med en varig last (f.eks. egenvægt), eller blot aflastes igen. De fleste betonkonstruktioner udsættes for en lasthistorie med gentagende be- og aflastninger.

Betonens krybning er i høj grad en funktion af lasthistorien, der igen er en funktion af tiden, hvilket selvfølgelig får indflydelse på de tidsafhængige deformationer.

Belastes betonen udelukkende med en konstant varig last, så følger deformationerne et tøjningsforløb, der defineres som jomfrukrybningen. Aflastes betonen opstår der som tidligere nævnt en tilbagekrybning. En genbelastning til samme belastning som før aflastning resulterer følgelig i krybning, men i en krybning, der ikke når jomfrukrybningen, men nærmer sig asymptotisk til denne, se Figur 2.1.4.

Belastes betonen til en spænding  $\sigma_1$  fås et krybningsforløb. Belastes der nu yderligere op fra  $\sigma_1$  til en spænding  $\sigma_2$  fås et nyt krybningsforløb, der nærmer sig asymptotisk til jomfrukrybningen for  $\sigma_2$ .

I det foregående er beskrevet nogle tøjningsforløb som funktion af flere parametre, et af disse tøjningsforløb er momentantøjningen. Da momentantøjningen iflg. (2.1) er en funktion af dels

spænding og dels E-modul, kræver sidstnævnte en lidt nøjere behandling.

Arbejdskurven for beton er ikke retlinet, som (2.1) ville antyde, men tværtimod krum. Denne krumning skyldes krybningens indflydelse, allerede efter ganske kort tid. Dette forhold får indflydelse på, hvilket E-modul man skal betragte i forbindelse med fastlæggelsen af momentantøjningen ved be- og aflastninger.

Momentantøjningen er en funktion af tiden, da det ikke er muligt at påføre lasten over uendelig kort tid uden, at der bliver tale om et stød. Kan lasten påføres på under 5 sek. bliver momentantøjningen  $\sigma/E_0$ , hvor  $E_0$  er det initielle tangent modul. Påføres lasten over en periode på 5 sek. til 2 min. kan der observeres en momentantøjning 15% højere end den tidligere. Til denne lasttid svarer sekant modulet  $E_s$ . For belastningsintervaller i perioden 2 min. til 20 min. konstateres der ikke en nævneværdig vækst i momentantøjningen, hvorfor perioden på 20 min. ofte anvendes i korttidsforsøg. De samme forhold gælder for aflastninger.

Interessen for E-modulet har flere årsager dels bruges E-modulet ved belastningstidspunktet i definitionen af krybefunktionen (se senere), og dels har det interesse, da det kan være vanskeligt at skaffe målinger af tøjninger umiddelbart efter, at lasten er påført, det til trods for, at lasten er påført på få sekunder (se kap. 3 Måleudstyr).

De deformationer, der kan observeres i forbindelse med studier af krybning i beton kan klassificeres på flg. måde:

Deformationer	Momentant	Tids-afhængig
Reversibel	Elastisk	Forsinket elastisk
Irreversibel	Plastisk	Forsinket plastisk

Dette kan afbildes grafisk på flg. måde, se Figur 2.1.5.

Test har vist, at den forsinkede elasticitet når en konstant værdi efter en periode med vækst, hvorimod den forsinkede plasticitet fortsat er i vækst. Dette forhold kan forklare grænsen mellem den primære- og sekundære krybning.

Før dette kapitel afsluttes, er det nødvendigt at nævne nogle definitioner, der i de efterfølgende afsnit må betragtes som værende læseren bekendt.



Det er ofte nødvendigt at modificere forskellige krybningsresultater for at gøre disse indbyrdes sammenlignelige. Til dette formål defineres dels den specifikke krybning, som krybning pr. spændingsenhed, og dels krybekoefficienten som krybning i forhold til momentantøjningen.

$$\textit{Specifik krybning} = \frac{\textit{krybning}}{\textit{spænding}}$$

$$\varphi = \textit{krybekoefficient} = \frac{\textit{krybning}}{\textit{momentantøjning}}$$

## Modeller

### 2.2 Modeller generelt

Det grundlæggende formål med at udvikle matematiske/fysiske modeller er at kunne forudsige en konstruktions virkemåde som følge af udefra kommende påvirkninger.

Der kan opstilles modeller ud fra to forskellige grundlag, et eksperimentelt og et semi-eksperimentelt (empiri).

En ekstrem yderlighed, hvorpå en model eksperimentelt kunne grundlægges, var at opføre en konstruktion i fuld skala og derefter undersøge konstruktionens respons overfor påvirkninger af interesse, hvilket selvfølgelig er en ganske uacceptabel fremgangsmåde, både ingeniørmæssigt og økonomisk.

Grundlægges en model efter eksperimenter, kan disse begrænses til at omhandle karakteristiske egenskaber for det materiale modellen udvikles for. Som eksempel kunne nævnes Storebæltsforbindelsen. Betonen, der anvendes til Storebæltsforbindelsen kunne undersøges for nogle karakteristika, som i forbindelse med denne rapport ville være tidsafhængige deformationer. Betonen kunne undersøges på nogle små prøvelegemer. Herefter kunne resultaterne sammenholdes med tilsvarende resultater for andre betoner, der tidligere var brugt i udførte konstruktioner. På denne måde kunne undersøgelser på prøvelegemer af overskueligt omfang ekstrapoleres til udførte konstruktioner. Denne metode har dog en væsentlig ulempe, at den er kostbar både i tid og penge.

Den semi-eksperimentelle metode er også baseret på forsøg, men ikke forsøg udført på den pågældende beton, men derimod på betoner, der har ligheder med den anvendte beton. Blandt ligheder kunne nævnes forhold som V/C-tal, cementmængde og sætmål. Den grundliggende idé i denne modellering er at antage, at ligheder mellem de undersøgte betoner, og den anvendte beton medfører ligheder i respons.

## Modeller eksperimentelt

Indledningsvis blev det nævnt, at forsøg udført for specifikke betoner kunne danne grundlag for matematiske/fysiske modeller, der gør det muligt at forudsige et respons, der ligger udenfor den tidsperiode eller geometri, under hvilke forsøgene er gennemført.

For svind og krybnings vedkommende bliver modeller baseret på eksperimenter hovedsagelig en matematisk kurve-fitting, da der reelt ikke foreligger fysiske modeller, der beskriver fænomenerne fyldestgørende. Der er m.a.o tale om empiriske modeller for en aktuel beton.

De empiriske matematiske modeller, der kan opstilles, og som opfylder de målte fysiske egenskaber, bærer præg af den manglende forståelse af fænomenerne svind og krybning. Dette afspejler sig i det forhold, at der er opstillet dels modeller, der i deres udformning betyder, at krybning ikke ophører efter uendelig lang tid, og dels modeller, der viser, at krybningen konvergerer mod en konstant værdi efter uendelig lang tid.

For svinds vedkommende er der dog blandt forskerne enighed om at svindet ophører efter en længere tidsperiode.

De i de efterfølgende afsnit nævnte modeller baseret på eksperimentelle data kan genfindes hos Neville [43], hvor yderligere referencer kan findes. Fælles for dem alle er, at tiden,  $t$ , indgår som eneste variabel. Udfra forsøgsdata er det muligt at bestemme karakteristiske konstanter i alle modellerne.

## krybning

De matematiske modeller kan for krybnings vedkommende opdeles i fire principielt forskellige kategorier som er: 'Potens-, Logaritmiske-, Ekponentielle- og Hyperbolske udtryk'. Potens- og logaritmiske udtryk konvergerer ikke, hvorimod eksponentielle- og hyperbolske funktioner konvergerer for  $t \rightarrow \infty$ .

Disse modeller kan fysisk anskueliggøres ved rheologiske modeller, der sammensættes af fjedre og dæmpere. De to grundliggende rheologiske modeller er en Maxwell-model, der består af en fjeder og en dæmper koblet i serie og en Kelvin-model, som er en fjeder og en dæmper koblet parallelt. Sammensættes en Maxwell-model i serie med en Kelvin-model fås en Burgers-model. For nærmere studie af disse modeller, se f.eks. Neville [43].

Fælles for dem alle er, at de kan forfines således, at de netop passer til en bestemt type beton,

men ofte medfører dette, at modellerne mister deres generelle karakter.

### Potensfunktioner

Potensfunktioner har i deres grundlæggende form fig. struktur:

$$c(t, t_0) = A(t - t_0)^B \quad (1)$$

$c(t, t_0)$  er krybningen til tiden  $t$ .

$t_0$  er tiden for lastpåførsel, således, at  $t = t_0$  medfører

$$c(t, t_0) = 0.$$

$A$  og  $B$  er karakteristiske konstanter for den pågældende beton.

Der er lavet adskillige varianter af (1) for at tage hensyn til udtrykkets manglende konvergens. Den manglende konvergens giver sig udslag i, at krybningen overvurderes.

Konstanterne  $A$  og  $B$  kan let bestemmes udfra sammenhængen

$$\log(c) = A + B \log(t - t_0) \quad (2)$$

hvilket giver en ret linie ved afbildning, se Figur 2.2.1.

### Logaritmiske funktioner

Funktionen (3) adskiller sig fra (2) ved kun at være enkelt logaritmisk.

$$c(t, t_0) = F(t_0) \log((t - t_0) + 1) \quad (3)$$

Funktionen tager sig ved afbildning ud som i Figur 2.2.2, hvoraf  $F(t_0)$  let kan bestemmes.

### Eksponentielle funktioner

Funktionen (4) antager, at krybningen er eksponentielt voksende. Det har dog vist sig, at funktioner af denne karakter ikke giver god overensstemmelse med forsøgsdata med mindre korrektioner indføres.

$$c(t, t_0) = C(1 - \exp(-A(t - t_0))) \quad (4)$$

### Hyperbolske funktioner

Af (5) og (6) ses eksempler på hyperbolske funktioner, der kan bruges til beskrivelse af krybning.

$$c(t, t_0) = \frac{t - t_0}{A + B(t - t_0)} \quad (5)$$

$$c(t, t_0) = A + \frac{B}{t - t_0} \quad (6)$$

Da hyperbolske modeller giver god overensstemmelse med eksperimentelle data efter længere tid, anvendes disse ofte i standardiserede modeller, så som ACI-209 og CEB-FIP. ACI-209 og CEB-FIP benytter dog en blanding af potens- og hyperbolske funktioner. ACI angiver

$$c(t, t_0) = \frac{A(t - t_0)^D}{B + (t - t_0)^D} \quad (7)$$

A er uafhængig af RF, størrelse osv.

$$B = 10$$

CEB-FIP angiver

$$c(t, t_0) = \frac{A t^D}{B + t^D} \quad (8)$$

A er afhængig af RF, størrelse osv.

B og D er kun afhængig af størrelse.

### Svind

Da det er generelt accepteret, at svind er et fænomen, der konvergerer mod en konstant værdi efter uendelig lang tid, er potens- og eksponentielle udtryk ikke af nogen interesse.

De matematiske udtryk adskiller sig ikke fra krybningsudtrykkene, blot skal der bestemmes nogle andre konstanter. Det samme gælder både for ACI-209s og CEB-FIPs svind formler.

### Empiriske modeller

I det foregående blev modeller, der kan anvendes til at fremskrive korttids forsøgsdata, beskrevet. I det følgende vil der blive knyttet nogle kommentarer til modeller, der baseres på betonens sammensætning.

Fælles for disse modeller er, at de ikke kan anvendes for højstyrkebetoner, der indeholder puzzolaner og plastificerende midler.

Både CEB-FIP og ACI-209's formler forudsætter, at de parametre, der indgår i modellen, er mere eller mindre indbyrdes uafhængige. Formlerne har karakter som (9).

$$\phi = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \dots \cdot k_i \quad (9)$$

$\phi$  er krybekoefficienten og  $k_1, k_2, k_3, \dots, k_i$   
er indbyrdes uafhængige variable, der afhænger  
af RF, geometri, tid, osv.

Fælles for begge modeller er, at de kan genfindes i de foregående matematiske modeller i en eller anden afskygning.

CEB-FIPs 1970 model er vist i Figur 2.2.3. Nærmere studie i sammenligning mellem modeller og beskrivelse af metoderne kan findes i [43, 45, 50].

### Sofistikerede modeller

Gennem tiderne er der arbejdet meget intensivt med sofistikerede svind- og krybemodeller. Hensigten med disse modeller, er at blive i stand til at forudbestemme deformations-egenskaberne for en given beton i en given konstruktion og med en given lasthistorie, som omfatter brugslast, temperatur- og fugtvariationer osv.

De sofistikerede modeller adskiller sig på et væsentligt punkt ikke fra de simple modeller beskrevet tidligere. På et eller andet niveau i modeludviklingsfasen skal sofistikerede modeller

også kalibreres vha. forsøgsdata.

Behovet for anvendelse af simple eller sofistikerede modeller afhænger afhænger af det problem modellen skal belyse. Analysen af problemstillingen skal ikke nødvendigvis ske vha. den til enhver tid mest avancerede model og analyse metode.

På baggrund af den nøjagtighed, som behøves i det enkelte tilfælde, vælges den model, der kan opfylde kravene til analysens præcision, Bazant et al. [52]. Eksempelvis angives i CEB 90 [53] en nøjagtighed i forhold til en stor mængde forsøgsdata, hvormed svind og krybning kan beregnes efter forholdsvis simple beregningsmetoder.

Både simple som sofistikerede modellers præcision øges signifikant, hvis modellerne kalibreres vha. forsøg udført med den givne beton som indgår i den konstruktion, som skal analyseres.

### 3.1 Forsøgs- og måleudstyr

Forsøgsudstyr til at undersøge krybningssegenskaberne hos beton skal uanset det drejer sig som træk-, tryk-, vridnings- eller bøjningsforsøg kunne opfylde et krav om at kunne opretholde den nødvendige spænding i en længere periode med et minimum af vedligehold.

Der er generelt tre måder inden for forsøgsteknikken vedr. krybning at frembringe den nødvendige last på. Disse tre måder er, hydrauliske, fjederbelastede eller dødvægtsbelastede systemer. Alle tre systemer har deres fordele og ulemper, der kort kan ridses op her.

Hydrauliske systemer har den fordel, at de kan tilvejebringe en forholdsvis stor spænding, hvilket kan have interesse i forbindelse med undersøgelser af højstyrkebetons egenskaber. Blandt ulemperne er, at hydrauliske systemer er dyre at fremstille og vedligeholde, da de som regel må forventes at lække olie ved belastninger over en længere periode.

Fjederbelastede systemer har den fordel, at de kan frembringe en forholdsmæssig stor kraft. De er billige, men kræver dog et vist vedligehold, da den frembragte kraft er en funktion af en deformation, der bliver mindre, når betonen kryber - dvs. de fjederbelastede systemer mister deres kraft med tiden og må derfor efterreguleres.

De dødvægts baserede systemers fordel er lav pris og lavt vedligeholdelses niveau. Deres ulempe er, at de fylder meget, dvs. jo større belastning jo større plads kræver forsøgsopstillingerne, enten i form af lange udvekslingsarme eller i form af en stor mængde dødvægt.

Enaksede trykforsøg er den type undersøgelser, der oftest foretages i forbindelse med betons krybningssegenskaber, hvilket selvfølgelig skyldes, at betons trykstyrke udnyttes optimalt i forbindelse med dimensionering af betonkonstruktioner. Dette er også grunden til, at der til enakset tryk findes den største mængde forsøgsopstillinger.

I Figur 3.1.1 er vist et dødvægtssystem, der vha. et vægtarmsforhold på 1:20 kan give en spænding på 10 MPa. Dette kræver en dødvægt på 400 kg. I forbindelse med undersøgelse af betonstyrker over 50 MPa, kommer denne opstilling hurtigt til kort pgr. kravet om et stort vægtarmsforhold eller en stor dødvægt. Dette kan dog forbedres vha. et taljesystem, men det ville i pågældene opstilling kræve større dimensioner, og der ville være et krafttab i taljerne pga. friktion, som ville fjerne fordelene med den konstante kraft i denne opstilling.



Hydrauliske systemer findes i utallige udformninger, hvoraf tre vil blive omtalt nærmere her. I Figur 3.1.2 ses et hydraulisk system, der er fremstillet specielt til krybningsforsøg. Systemets fordel er, at der kan opnås en stor kraft vha. en håndpumpe. Nogle af ulemperne ved den type belastningsopstillinger er, at der kræves en høj fremstillingsnøjagtighed for at undgå olieudslip. Dette forøger prisen på et sådant system. En anden ulempe er, at systemets stivhed er så stor, at en lille deformation af betonprøvelegemerne resulterer i en relativ stor kraftreduktion. Denne ulempe kan dog reduceres vha. et externt hydrauliksystem, der kan opretholde konstant olietryk, se Figur 3.1.4. Et sådant tryksystem kan vedligeholde trykket i flere forsøgsopstillinger, men er igen en fordyrende faktor. Der kan dog spares penge ved at erstatte pressen med en kapselpresse, se Figur 3.1.5. Disse kan fås i handlen til overkommelige priser sammenlignet med specialfremstillede presser. Kapselpresser virker vha. en plastisk deformation af randen, hvilket giver pressen en begrænset levetid (genbrugsmulighed). En ulempe ved disse kapselpresser er, at kraften ikke er konstant, når afstanden mellem trykfladerne ændrer sig, men til dens fordel kan nævnes, at trykfladerne selv tilpasser sig prøvelegemerne, således at dyre kugleskåle kan spares.

Til sidst skal der knyttes nogle bemærkninger til de fjederbelastede forsøgsopstillinger. Disse findes ligeledes i et utal af variationer, hvoraf 4 grundliggende forskellige vil blive omtalt her. I Figur 3.1.6 ses et system, der også kaldes et dynamometerbelastet system. Betragter man dynamometeret (stålaksel) som en meget stiv fjeder, så adskiller systemet sig ikke fra det i Figur 3.1.3 viste. Dynamometersystemet har samme ulemper som tidligere omtalt for et af de hydrauliske, at stivheden er så stor, at kraften forsvinder hurtigt, hvilket medfører en hyppig efterregulering af kraften. Kraften tilføres systemet ved en tilspænding af trækstængerne, hvilket kan gøres f.eks. ved hjælp af hydraulisk tilspænding. For at spare kan dynamometeret udelades og stængerne kan derimod anvendes som dynamometer, hvilket selvfølgelig øger antallet af nødvendige målinger, og dermed unøjagtigheden af bestemmelsen af kraften.

Erstattes dynamometeret af en fjeder, som kan kalibreres, så fås et system med en stivhed, der er reduceret mange gange i forhold til det dynamometer belastede. Herved fås et system, der er mindre følsomt pga. deformationerne, der er uændrede. Kraften kan tilføres systemet ved opspænding af trækstængerne eller ved sammentrykning af systemet efterfulgt af en opspænding af stængerne til disse bærer den fulde belastning. Den sidst nævnte metode har den fordel, at lasten kan påføres hurtigt vha. et hydraulisk system, hvilket giver et godt mål for momentantøjningen. Dette princip finder anvendelse i det i Figur 3.1.9 viste system, der anbefales af ASTM.

En mellemtung mellem det fjederbelastede system og dødvægtssystemet ses i Figur 3.1.7.

Dette system giver mulighed for meget store kræfter. En ulempe er dog, at fjederens vandring pga. krybning i betonen, medfører, at udvekslingsforholdet bliver større, og dermed bliver dette system meget følsomt, således at kraftvariationen som funktion af krybningen er stor. Dette medfører en hyppigere efterregulering.

**Trækkrybeforsøg** er umiddelbart nemmere at skaffe forsøgsudstyr til, da betons trækstyrke som bekendt er væsentlig mindre end trykstyrken, hvilket resulterer i samlede kræfter af et mere behersket omfang (specielt for højstyrkebetoner). Den mindre kraft giver større frihed i valg af prøveudstyr, da dimensionerne bliver mere overkommelige dels rent praktisk dels økonomisk.

### **Måleudstyr**

Til bestemmelse af de deformationer, der har interesse i forbindelse med krybningsforsøg, kan anvendes elektriske modstands strain gauges (ERSG), mekaniske gauges (MG), elektriske- og mekaniske længdetransducere, optiske og akustiske gauges.

Elektriske modstands strain gauges er på trods af deres ringe pris og gode nøjagtighed ikke velegnede til langtidforsøg. Dette skyldes, at der dels kan være krybning i limen, som gaugene er monteret i og dels kan limen slippe betonen ved for store tøjninger.

ERSG har også den ulempe, at der måles meget små spændinger i størrelsesordenen  $\mu V$ , hvilket giver en meget stor følsomhed over for modstand i tilslodningerne. Denne følsomhed kan give sig udslag i nulpunktsdrift, hvilket selvfølgelig ikke er ønskeligt.

De elektriske gauges kan dog anvendes sideløbende med mekaniske gauges, da de elektriske gauges kan tilsluttes datalogger, og dermed åbne mulighed for et stort antal målinger indenfor en relativt kort tidsperiode. Denne fordel kan benyttes dels ved bestemmelse af den momentane tøjning ved belastningsophør, og dels ved registrering af tøjninger i forbindelse med statisk udmattelse.

Mekaniske gauges er oftest at foretrække i forbindelse med målinger over længere tid, da problemer med krybning i lim og deslige undgås. Ulempen ved de mekaniske gauges er, at hver enkelt måling er forholdsvis tidskrævende sammenlignet med den tid, det er muligt at modtage målinger fra elektriske gauges.

Mekaniske gauges udmærker sig, udover god målenøjagtighed, ved at de efter anskaffelse er

meget økonomiske i brug.

Et eksempel på en mekanisk gauge er en pferdemåler, der med en gaugeslængde på 100 mm har en målefølsomhed på 10 - 20 $\mu\epsilon$ .

Mekaniske- og elektriske længdetransducere har samme indbyrdes forhold mht. målehastighed, som mekaniske- og elektriske strain gauges. Længdetransducerne adskiller sig fra strain gauges ved, at målingen ikke umiddelbart sættes i forhold til en udgangs målelængde, dvs. man er mere frit stillet overfor gaugeslængde, hvilket selvfølgelig kræver supplerende udstyr.

En væsentlig fordel ved længdetransducere ligger i, at målingen reelt kan foretages et stykke fra prøvelegemet, hvilket har sine umiddelbare fordele ved høje temperaturer eller ved prøvelegemer nedsænket i vand.

Elektriske længdetransducere giver en meget følsom måling, men disse er dyre at anskaffe. De kan dog bruges til mange andre typer deformationsmåling, hvilket ofte kan berettiggere deres anskaffelse.

Både elektriske gauges og akustiske gauges kan fås i en udformning, der gør indstøbning i prøvelegemerne mulig. Erfaringerne er iflg. R.H Scott et al [51], at revnedannelse ofte udspringer fra disse indstøbte gauges. De akustiske gauges kan i deres udformning blive så dominerende mht. prøvelegemestørrelse, at målingerne påvirkes væsentligt.

Til temperatur målinger findes der termogauges til indstøbning. Disse finder ofte anvendelse ved udstøbning af store massive konstruktioner.

## **Klima**

Til kontrol af den relative luftfugtighed foreslår Neville [43], at der anvendes mættede saltopløsninger (Salt opløst i vand sænker damptrykket), men denne metode er ikke anvendelig i forbindelse med konstant relativ luftfugtighed i større rum (> 1 m<sup>3</sup>).

Der findes i handlen selvfølgelig færdige klimaanlæg, der kan give en stor valgmulighed inden for både temperatur og relativ luftfugtighed. Disse anlæg har både varme- og køleflader og mulighed for at tilføre vand og fjerne vand fra luften i rummet. Et sådant anlæg er dyr i anskaffelse, så dyr at prisen nemt kan overskygge projektets øvrige omkostninger. Såfremt forsøgene tillader det, kan det derfor anbefales at fastlægge nogle klimatiske forhold, der

ligger et stykke fra de normalt forekommende på det pågældende sted, hvor forsøgene udføres. Det bliver derved kun nødvendigt at tilføre eller fjerne vand og/eller varme.

#### 4.1 Forhold, der har indflydelse på svind og krybning

Denne rapport omhandler svind og krybning for højkvalitets/højstyrkebetoner. Derfor fokuseres der i denne State-of-the-Art rapport primært på de parametre, der ændres for at fremstille højstyrkebeton i stedet for normalstyrkebeton. I det følgende vil der ikke blive skelnet mellem højkvalitetsbeton og højstyrkebeton, da dette reelt er to sider af samme sag.

Beton er et kompositmateriale bestående af en cementpasta og et tilslagsmateriale. Tilslagsmaterialet har kun ringe eller ingen indflydelse på cementpastaens egenskaber. Det er derfor muligt, uafhængigt af hinanden, at variere enten cementpastaen eller tilslaget, og derved få et kompositmateriale med nye egenskaber. De to materialer, cementpastaen og tilslaget, betragtes som indbyrdes uafhængige.

For at få en højstyrkebeton, HSC, er det nødvendigt med et højkvalitetstilslagsmateriale, da dette ellers bliver afgørende for betonens egenskaber. Der er dog en naturlig grænse for valg af tilslagsmateriale, da disse er givet fra naturens hånd. Vi har kun mulighed for at udvælge, men ikke over en vis grænse. Dette bånd naturen pålægger os betyder naturligvis, at vi vælger cementpastaens egenskaber. Variation af cementpastaen har langt flere frihedsgrader end tilslagsmaterialet. Det er netop variation af cementpastaen, der har opnået mest opmærksomhed indenfor de seneste år.

Den hærdnende cementpasta er et inhomogent og porøst materiale, hvis egenskaber hovedsageligt kan tilskrives:

Porøsitet

Porefordeling, som er afhængig af v/c-tal og hydratisation.

I de efterfølgende afsnit vil der kort blive beskrevet, hvilke variationer, der kan foretages af cementpastaens sammensætning med den følge, at der fremstilles en højstyrkebeton. Derefter vil disse parametres indflydelse på svind og krybning blive belyst nærmere ud fra forskningsresultater netop på disse indsatsområder.

#### **V/C-tal**

Ved at reducere vand/cement-tallet, v/c, kan betonens porøsitet reduceres, og en bedre porefordeling opnås. Det siger umiddelbart sig selv, at en unødvendig stor porøsitet giver lille

styrke.

For at opnå fuldstændig hydratisation, er det nødvendigt at tilsætte 40 vægtprocent vand i forhold til den valgte cementmængde. Ud af de 40% vand bidrager de 25% til kemisk hydratisation, hvorimod de resterende 15% bindes fysisk i cementpastaens gelstruktur. For  $v/c < 0.4$  kan der altså ikke opnås en fuldstændigt hydratisation af cementen, hvilket betyder, at der er et overskud af cement, der til gengæld virker som 'tilslag' af meget fin karakter, disse forhold er vist i Figur 4.1.1.

Højstyrkebeton har normalt  $v/c < 0.4$ , hvilket reducerer mængden af kapilarporer væsentligt, dette kan ses af Figur 4.1.2.

### Puzzolaner

Udover at reducere  $v/c$ -tallet, kan betonens styrke og porøsitet forbedres ved at erstatte en del af cementen med puzzolaner. Puzzolaner er kiselholdige materialer, der ikke i sig selv er i stand til at udvikle bindemidleegenskaber. Sammen med calciumhydroxid reagerer de dog, og danner produkter, som har bindemidleegenskaber.

Blandt de puzzolaner, der oftest finder anvendelse i Danmark, er mikrosilica og flyveaske. Flyveasken ændrer ikke betonens styrkeegenskaber væsentligt, den reducerer tværtimod styrken en smule. Fordelen ved flyveasken er dog, at den forbedrer betonens bearbejdighed og holdbarhed. Erstatte man derimod en del af cementen med mikrosilica, fås en væsentlig styrkeforøgelse. Mikrosilica siges at være 2-4 gange mere effektiv end den erstattede cementmængde.

Det at mikrosilicaen virker mere effektiv i styrkesammenhæng og det, at en del af cementen er erstattet, giver anledning til en mindre revision af begrebet  $v/c$ -tallet.

$v/c$ -tallet indgår i styrkeproportioneringer, og der må naturligvis tages hensyn til dette ved en styrkeproportionering, hvor en del af cementen erstattes med et puzzolan, der virker mere eller mindre effektivt end den erstattede cement. Ved at indføre det ækvivalente  $v/c$ -tal,

$$\frac{V}{C_e} = \frac{V}{C + k p}$$

V	Vand
C	Cement
p	Puzzolan
k	Aktivitetsfaktor for puzzolanen
	$k = 2-5$ for mikrosilica
	$k = 0.3 - 0.5$ for flyveaske

bliver det muligt at gennemføre styrkeproportioneringer på traditionel vis.

Flere modeller, der forudsiger svind og krybning udfra v/c-tallet (CEB-FIP, ACI 209), er baseret på betoner, der ikke indeholder puzzolaner. Det kan ikke forventes, at disse modeller kan benyttes med det ækvivalente v/c-tal, hvor k er knyttet til styrken. Det er dog ikke utænkeligt, at disse modeller kan anvendes ved indførsel af en aktivitetsfaktor for puzzolanerne, der baseres på svind- og krybeegenskaberne.

### Additiver

Den moderne betonteknologi anvender udover de for beton nødvendige materialer, også kemiske tilsætningsstoffer for at ændre den friske eller hærdnede betons egenskaber.

Luftindblandingsmidler er et eksempel på stoffer, der ændrer den hærdnede betons egenskaber. Plastificerende midler er et eksempel på stoffer, der ændrer den friske betons egenskaber.

Som tidligere nævnt kan højstyrkebeton fremstilles ved en reduktion af v/c-tallet. En sådan reduktion er ikke mulig uden, at det påvirker betonens bearbejdelighed. For at få en bearbejdelighed, der gør det muligt at støbe med v/c svarende til højstyrkebeton, er det nødvendigt at tilsætte plastificerende midler.

De nævnte additivs egenskaber er at ændre en parameter, f.eks. porestrukturen ved luftindblanding eller bearbejdelighed vha. plastificerende midler. Det er dog ønskværdigt, at disse additiver i sig selv ikke har indflydelse på betonens egenskaber, dvs. at de f.eks. ikke reagerer kemisk med de øvrige materialer såsom vand, cement og tilslag.

I de efterfølgende afsnit vil flere af de førnævnte parametre, der kan varieres med henblik på fremstilling af højkvalitets/højstyrke betoner, blive behandlet nærmere og set i sammenhæng med allerede generel viden om betons svind- og krybeegenskaber.

## 4.2 Mikrosilica

Mængden af forsøg, der kan belyse mikrosilicas indflydelse på svind og krybning er forholdsvis begrænset. De fleste forsøg omhandler kun svind, hvorimod krybeforsøg er yderligere begrænset i antal. Det sparsomme materiale gør det vanskeligt at drage generelle konklusioner, specielt i tilfælde af umiddelbart modstridende resultater.

### Svind

Mikrosilicas indflydelse på svind er blevet undersøgt dels for cementpasta og dels for beton. Både for pasta og betons vedkommende kan det konstateres, at fordampningen af vand fra overfladen til omgivelserne, foregår langsommere ved silica indblanding. Dette ses f.eks. af Carette og Malhotras forsøg [32] se Figur 4.2.1. Trætteberg og Alstad [36] når samme resultat med silicapasta.

Den nedsatte fordampning skyldes, at silica er meget finere end cement og dermed udover puzzolan virkningen kan virke som meget fint tilslag, se Figur 4.3.1.

Carette og Malhotras forsøg viste svind, der ikke afhæng væsentligt af silicamængden, hvorimod fordampningen afhæng mere af silicamængden, se Figur 4.2.2 og Figur 4.2.1. Der må dog tages hensyn til den forholdsvis korte tid forsøgene strakte sig over.

Buil og Acker [37] fandt for en silicabeton med  $SF/(C + SF) = 8\%$  og  $V/C = V/(C + SF) = 0.38$  svind, der var 17% højere for den uforsegledede silicabeton i forhold til referencetonen og 7% højere for svind for den forseglede silicabeton. Dette svind blev målt fra udstøbningsdagen og ca. 180 dage senere. SF og C angiver hhv. mikrosilica og cement i vægt.

Mitsui et al. [33] fandt efter 26 uger mindre svind for silicabetonen end for deres referenceton.

Af ovenstående fremgår det klart, at dels et grundigere studium af diverse forsøg er nødvendig, og dels skal yderligere forsøg underbygge de konklusioner, man måske kan drage af eksisterende forsøg. Vanskeligheden i at sammenligne de eksisterende forsøg er mangeartede, men en af dem er, at det er vanskeligt at gå frem efter den klassisk videnskabelige metode, hvor blot een parameter ændres og alt andet lige. Erstatte f.eks. kun en



del af cementen med mikrosilica, så får man om man vil det eller ej en stærkere beton. Dette betyder f.eks., at hvis svind i silicabeton ønskes bestemt som funktion af den fordampede vandmængde, så må det tages i regning, at betonen som sådan er blevet stivere, og derfor gør øget modstand mod en deformation.

### **Krybning**

For krybning af silicabeton eksisterer der endnu færre undersøgelser af silicas indflydelse. Buil og Acker [37] fandt mindre krybning for silicabeton end for en referencebeton under udtørring. For forseglede prøvelegemer fandt de ingen væsentlig forskel mellem silica- og referencebeton.

Tazawa og Yonekura [38] fandt en specifik sorptionskrybning, der var ca. 2 gange så stor for silicabeton end for deres tilsvarende referencebeton.

### 4.3 Flyveaske

Tilsætning af flyveaske i beton medfører ikke nødvendigvis en forøgelse af styrken, nogle gange tværtimod. Indblanding af flyveaske reducerer bleeding og løser iøvrigt et affaldsproblem. Da flyveaske ikke har bindemiddelegenskaber, og da finheden af flyveaske er nogenlunde den samme som for uhydratiseret cement, se Figur 4.3.1, så er det ikke uventet at få lavere styrke, når en del af cementen erstattes med flyveaske.

Antallet af forsøg, der omhandler svind og krybning for flyveaskebetoner er begrænsede, ligesom for andre emner inden for den moderne betonteknologi vedr. svind og krybning. Det er derfor vanskeligt at drage generelle konklusioner på basis af de eksisterende forsøg.

Yamato og Sugita [28] fandt for flyveaskebeton  $FLA/(C + FLA) = 0.2$ , FLA og C angiver hhv. flyveaske og cement i vægt, mindre svind og mindre krybning end for en tilsvarende referencebeton uden flyveaske. Det skal her bemærkes, at i deres krybeforsøg var spændingen konstant, mens  $f_c$  varierede. Dette forhold betyder, at betonerne blev undersøgt for forskellige  $\sigma/f_c$  - forhold.

K.M. Alexander et al. [27] fandt ligeledes en reduktion af krybning for flyveaskebeton i forhold til den respektive reference, se Figur 4.3.2. Dette forhold støttes yderligere af R.D. Brown og K.M. Alexander et al. [27].

R.S. Gosh og J. Timusk [29] fandt for en referencebeton og en flyveaskebeton med samme styrke generelt samme svind og krybning for flyveaskebetonerne. Styrkerne varierede fra 20 MPa. til 55 MPa.

K.W. Nasser og A.A. Al-Manaseer [26] fandt for en flyveaskebeton med  $FLA/(C + FLA) = 0.2$  og  $V/(C + FLA) = 0.6$  og en reference beton med  $V/C = 0.6$ , at svind ikke varierede væsentligt mellem de to betoner, se Figur 4.3.3. Derimod fandt de 72% større krybning for flyveaskebetonen, se Figur 4.3.4.

K.W. Nasser og A.A. Al-Manaseer fandt for en flyveaskebeton med  $FLA/(C + FLA) = 0.5$  og  $V/(C + FLA) = 0.6$  og en referencebeton med  $V/C = 0.6$ , at svindet var større for flyveaskebetonen efter 120 dg., se Figur 4.3.5. Derimod fandt de nu lavere krybning for flyveaskebetonen end for referencebetonen, hvilket er det omvendte forhold end for  $FLA/(C + FLA) = 0.2$ .

R.P. Lothia et al. [31] undersøgte for to faste tilslagsforhold  $T/(C + FLA) = 6.4$  og  $T/(C + FLA) = 4.9$  og  $V/(C + FLA)$  hhv. 0.62 og 0.5, både svind og krybning. T er tilslaget i vægt.

Resultaterne viste en faldende tendens både for svind og krybning, når  $FLA/(C + FLA)$  voksede indtil 25% både for  $\sigma/f_c = 20\%$  og  $\sigma/f_c = 35\%$ .

#### 4.4 Plastificerende midler

Ved fremstilling af betoner med lave v/c-tal er det uundgåeligt at anvende plastificerende midler for overhovedet at få en bearbejdelig beton. Indflydelsen af plastificerende midler anses normalt at være uden betydning (betonbogen, [45]).

Brooks et al. [40, 41, 42] konkluderer på basis af egne forsøg, at plastificerende midler ingen indflydelse har på svind og krybning under vand. Derimod erfarer de øgede deformationer både for svind og krybning under udtørring. De konkluderer dog, at disse deformationer er af ubetydelig størrelse i praktisk øjemed.

Brooks [39] har samlet flere indbyrdes uafhængige forsøgsresultater og finder, at tilsætning af plastificerende eller superplastificerende midler øger svind og krybning med i snit 19.4%, se Figur 4.4.1.

#### 4.5 Tilslag

Tilslag, der anvendes ved fremstilling af normaldensitetsbetoner i Danmark, tillægges ikke tidsafhængige deformationsegenskaber. Danske betoner tidsafhængige deformationsegenskaber skal primært søges i cementpastaen. Dermed er det ikke sagt, at tilslaget ikke har indflydelse på svind og krybning, for det har det. Tilslagets indflydelse er dog kun indirekte.

Når cementpastaens deformation varierer med tiden, så overføres de spændinger pastaen optog til tilslaget, der derfor har indflydelse på i hvor høj grad pastaen aflastes.

Tilslagets stivhed påvirker svind og krybning således, at jo stivere tilslag jo mindre krybning.

Udover tilslagets stivhed, har mængden af tilslag i forhold til pasta, indflydelse på deformationerne.

Det er selvfølgelig, at hvis tilslaget ikke kryber og pastaprocenten er nul, så forekommer der ingen krybning. Det er ligeledes selvfølgelig, at en pastaprocent på 100 medfører, at kun pastaens krybning forekommer.

Af det ovenstående kan ses, at stivere tilslag og større tilslagsprocent medfører reduktion af de tidsafhængige deformationer, hvilket understøttes af forsøg, og kan studeres nøjere i Nevilles bog [43].

De ovennævnte forhold er selvfølgelig ikke de eneste, der gør sig gældende i forholdet mellem pasta og tilslag. Tilslagets porøsitet påvirker transporten af vand i betonen, og da svind og krybning afhænger af vandtransport ind og ud af betonen, så får tilslagets evne til vandoptagelse eller vandtransport en ikke ringe indflydelse på deformationerne.

#### 4.6 V/C-tal

En af de væsentligste parametre, der ændres for at opnå en højstyrkebeton, er en reduktion af v/c-tallet.

Neville et al. [43] har analyseret flere forsøgsresultater og viser, at for konstant spænding, så reduceres krybningen, når v/c falder. Dette virker ikke umiddelbart overraskende, da styrken også vokser, når v/c falder.

Reduceres v/c og belastes prøvelegemerne med et konstant spændings/styrkeforhold,  $\sigma/f_c$ , så tegner et andet billede sig. Krybningen vokser, når v/c falder. Dette forhold tilskriver Neville at hænge sammen med betonens styrkeudvikling. Betoner med højt v/c udvikler den endelige styrke over en længere periode end betoner med lavt v/c.

Denne styrkeudvikling betyder for beton med højt v/c, at  $\sigma/f_c$  falder hurtigere end for beton med lavt v/c.

#### 4.7 Styrkeudvikling og belastningsalder

Betonens styrkeudvikling og alder ved belastning har indflydelse på krybningen. Forholdene er dog ikke undersøgt nøjere for højstyrkebeton.

De to forhold, styrkeudvikling og belastningsalder, er to parametre, der er indbyrdes afhængige, da belastningsalderen kan sættes i relation til betonens relative styrke. Den relative styrke refererer til styrken på pågældende tidspunkt i forhold til 28 dg. styrken.

Da højstyrkebeton har et anderledes styrkeudviklingsforløb end lav- og mellemstyrkebeton, kan højstyrkebeton forventes at have andre krybeegenskaber, end man kan forvente ud fra en ekstrapolation af viden om krybning.

#### 4.8 $\sigma/f_c$ - Forholdet

Spændings/styrke forholdets,  $\sigma/f_c$ , indflydelse på krybningen af dels cementmørtler og dels beton, er blevet studeret af mange forskere for normalstyrke beton. Resultaterne af disse undersøgelser er, at der eksisterer en proportionalitet mellem krybning og  $\sigma/f_c$ , således at krybningen vokser for voksende  $\sigma$  og konstant  $f_c$  eller omvendt krybningen falder for konstant  $\sigma$  og voksende  $f_c$ .

Mange undersøgelser har vist, at denne proportionalitet er lineær op til en vis grænse. Denne grænse ligger for normalstyrke beton iflg. flere undersøgelser i et meget bredt interval, spændende fra  $\sigma/f_c = 0.3$  til  $\sigma/f_c = 0.75$ . Den gængse opfattelse til ophøret af den lineære sammenhæng er, at normalstyrke beton begynder at udvikle betydelige mikrorevner i området  $\sigma/f_c = 0.4$  til  $0.6$ .

For  $\sigma/f_c$  større end linearitetsgrænsen gælder uden undtagelse, at krybningens vækstrate er voksende for voksende  $\sigma/f_c$ .

Der findes en anden proportionalitetsgrænse mellem krybning og  $\sigma/f_c$ . Denne grænse findes over linearitetsgrænsen og giver sig udslag i en accelererende vækstrate for krybningen. Den accelererende krybning skyldes en ustabil mikrorevnedannelse, og ender i et brud med mindre

lasten fjernes. Bruddet giver anledning til betegnelsen langtidsstyrken. Da bruddet indtræffer for en statisk last mindre end korttids brudlasten og efter et vist tidsrum, kaldes denne brudform også for statisk udmattelse jvf. dynamisk udmattelse. Grænsen for statisk udmattelse ligger for normalstyrke beton i  $\sigma/f_c$  - intervallet 0.7 til 0.9.

De fleste undersøgelser af krybning er generelt gennemført med et spændingsniveau, der svarer til den normalt forekommende brugsspænding. Den normalt forekommende brugsspænding er ca. 30% af brudspændingen.

For højstyrkebeton er antallet af krybeforsøg af overskuelig mængde, og som for andre krybeforsøg er  $\sigma/f_c$  som oftest 30%. Dette betyder, at det er meget begrænsede mængder af forsøg, der dækker området for  $\sigma/f_c > 0.3$ . Hvad statisk udmattelse angår ( $\sigma/f_c > 0.8$ ) er mængden af forsøg yderligere begrænset.

Mohammad M. Smadi et al.[5] har undersøgt lav-, mellem- og højstyrkebeton, hhv. 22, 35 og 63 MPa. Disse betoner blev belastet med spændinger svarende til 40% til 80% af trykstyrken. Herved observerede de, at lineariteten mellem krybning og  $\sigma/f_c$  ophørte ved ca. 45% for lav- og mellemstyrkebetonerne, hvorimod grænsen lå ved 65% for højstyrkebetonen.

Dette stemmer overens med Ali S. Ngab et al.[6] undersøgelser af mikrorevnedannelsen. De viser for en normalstyrkebeton (33-40 MPa), at revnedannelsen vokser væsentlig ved 45% af  $f_c$ . Forholdene bekræfter, at mikrorevnedannelse forårsager ulineariteten mellem krybning og  $\sigma/f_c$ , se Figur 4.8.1.

Mohammad M. Smadi et al.[7] fandt langtidsstyrker for højstyrkebetoner (55-69 MPa), der lå på 80-85% af  $f_c$ . Langtidsstyrken for lav- og mellemstyrkebeton (21-41 MPa) lå ved 70-75% af trykstyrken.

Resultaterne fra Mohammad M. Smadi et al. forsøg er vist i isokrone  $\sigma$ - $\epsilon$  diagrammer, se Figur 4.8.2, hvoraf det fremgår, at det område indenfor hvilket deformationerne kan begrænses, er mindre for højstyrkebeton.

#### 4.9 Luftfugtighedens indflydelse på svind og krybning

Flere hypoteser, der er opstillet for at forklare svind og krybning, er baseret på en transport af vand inde i betonen. Transporten af vand sker iflg. disse hypoteser dels inde i selve betonen og dels ud af denne.

Der er lavet flere undersøgelser, der belyser luftfugtighedens indflydelse på svind og krybning for højstyrke beton, HSC. For at få et overblik over hvilken indflydelse luftfugtigheden har på svind og krybning, ikke kun for HSC, men også for normalstyrke beton, NSC, må luftfugtighedens indflydelse på NSC også holdes for øje.

Flere uafhængige undersøgelser viser, at svind og/eller krybning er uafhængig af den relative luftfugtighed, RF for HSC.

A. Tomaszewics og J.J. Jensen [2] finder for beton med cubestyrker op til 83 MPa og  $\sigma/f_c$  i intervallet 30-50%, at der ikke er nogen tydelig forskel mellem hverken svind eller krybning dels for forseglede og dels for uforseglede prøvelegemer, se Figur 4.9.1. Forsøgene løb over en periode på 109 dg.

Ali S. Ngab et al. [15] finder samme forhold gældende for krybekoefficienten, se Figur 4.9.4. Prøvelegemerne var 89 x 89 x 267 mm. Trykstyrkerne ca. 63 MPa.

Svindtøjningerne er iflg. T.M. Collins [10] uafhængig af, om prøvelegemerne er forseglede eller ikke, se Figur 4.9.5. T.M. Collins test blev gennemført for de uforseglede prøvelegemers vedkommende ved 21 °C og RF = 50%. Cylinderstyrken (152 x 305 mm) ligger for 5 recepter på 55-64 MPa. Forsøgene løb over en periode på 100 dg.

M. Buil og P. Acker [37] opnår med en silicabeton tilsvarende resultater for svindtøjningerne, som det fremgår af Figur 4.9.2. Prøvelegemerne var 160 x 1000 mm cylindre opbevaret dels forseglede og dels uforseglede under udtøringsbetingelser svarende til 20 °C og RF = 50%. Prøvelegemerne var forseglede efter afformning til prøvning efter 28 dg.

Svindet er stort set upåvirket af forseglingen for silicabetonen, hvorimod referencebetonens svind er meget følsom overfor en forsegling eller ej, og dermed det omgivende miljøes RF. Cylinderstyrkerne (160 x 320 mm) for silicabetonen var 76 MPa. Undersøgelsernes varighed var 1 år.

F. de Larrard et al.[51, 52] finder for HSC indeholdende silica, at sorptionskrybningen er praktisk taget lig nul, med andre ord den totale krybning er lig grundkrybningen.

Der er dog udført forsøg, der ikke støtter disse observationer. V. Penttala et al.[11, 53] finder ved forsøg på cylindre af beton med cubestyrker i intervallet 85-110 MPa, at både svind og krybning er afhængig af miljøet omkring prøvelegemerne.

Prøvningen fandt sted ved 23 °C og dels RF = 60% og dels RF = 80%. I en forsøgsserie med en silicabeton findes der overensstemmelse dels for svind og dels for krybning ved to luftfugtigheder. Overensstemmelsen ophører dog efter 80 dg., se Figur 4.9.3.

For de øvrige forsøg gælder som for NSC, at både svind og krybning øges, når omgivelsernes RF falder. Undersøgelserne fandt sted over en periode på 1 år.

P.C. Aitcin et al.[8] har lavet undersøgelser af svindet på in situ støbte betonsøjler med dimensionerne 1100 x 1100 mm og cylindertrykstyrke (100 x 200 mm) efter 28 dg. på 85 MPa. Svindtøjningerne fra udstøbningstidspunktet og fire år frem blev målt dels på overfladen og i kernen i længderetningen, og dels i tværretningen i kernen. Resultaterne kan ses i Figur 4.9.6, hvor det ses, at svindet i kernen, svarende til forseglede forhold og svindet på randen er meget forskellige. Svindet inde i betonen er mindre end på overfladen.



## 4.10 Svind og krybning af højstyrkebeton

### Krybning

Smadi et al.[5] fandt krybetøjningen, krybekoefficienten og den specifikke krybning i en periode frem til 60 dg. for  $\sigma/f_c = 0.6$ . Krybekoefficienten var 0.9, 1.8 og 2.7 for hhv. høj-, normal-, og lavstyrke beton.

R.N. Swamy [16] fandt en reduceret specifik krybning og krybekoefficient for sine højstyrke betoner.

V. Penttala et al.[11] fandt, at krybedeformationerne er 40-70% af deformationerne for normalstyrke beton.

M. Buil og P. Acher [37] viste, at både den specifikke krybning og krybekoefficienten reduceres for højstyrke beton indeholdende mikrosilica.

A. Tomaszewics et al.[15] fandt, at krybekoefficient og specifik krybning er mindre for højstyrkebeton. Forholdene var mere udprægede under udtørring, hvor den specifikke krybning var 20-25% af den tilsvarende for normalstyrke beton. Tilsvarende var den specifikke krybning 30-35% ved forseglede prøvelegemer.

Krybekoefficienten var 50-75% af den tilsvarende for normalstyrke beton under udtørring og 75-90% under forseglede forhold.

### Svind

Smadi et al.[5] fandt, at udtørringssvindet er større for normalstyrke beton end for højstyrke beton.

M. Auferin fandt [4] ligeledes, at udtørringssvindet var mindre for HSC. Han fandt også et autogent svind (grundsvind), der vokser med faldende  $V/C$  eller  $V/(C + F)$ , og at forholdet mellem det autogene svind og  $V/(C + F)$  er lineært i området  $V/(C + F) = 0.31 - 0.04$ . Det autogene svind ophører efter få uger efter udstøbning. Svindraten er meget stor i begyndelsen af hærdeperioden for højstyrke beton i forhold til normalstyrke beton.

V. Penttala et al.[11] fandt ligeledes, at det totale svind er mindre for høje styrker end for

normale styrker.

R.N. Swamy [16] viste, at svindet er i stor vækst i begyndelsen af hærdeperioden pga. den kraftige hydratisering i betonens første uger. Han fandt at 15-25% af 500 dg. svindet fandt sted inden for de første 24 timer, og at 90% havde fundet sted indenfor et år.

Ali S. Ngab [15] fandt mindre mikroevnedannelse pga. svind i højstyrkebeton og konkluderede, at udtørringssvindet måtte være mindre.

M. Buil og P. Acher [37] fandt at det autogene svind voksede ved højstyrke beton indeholdende silica.

A.S. Ngab [6] fandt i en anden undersøgelse, at det totale svind var større for højstyrkebeton.

## 5.1 Referencer

- [1] Ivar Holand  
High-Strength Structural Concrete, Materials and Mechanical Properties  
Nordisk Betong 1988, 2-3 pp. 55-61.
  
- [2] Høyfast betong. Delrapport 5. Pilotforsøk med kryp i høyfast betong.  
A. Tomaszewicz.  
Sintef rapport. STF 65 A85006, 1985.
  
- [3] Creep and Shrinkage of High-Strength Field Concrete.  
Francois de Larrard.  
Utilization of High-Strength Concrete 2. Symposium. 1990
  
- [4] Shrinkage and Creep in certin High Performance Concrete for use in site.  
Michel Auperin  
Research Department Bouygues. Unpublished notes
  
- [5] Shrinkage and Creep of High-, Medium-, and Low-Strength Concretes, Including  
Overloads.  
Mohammad M. Smadi, Floyd O. Slate, og Arthur H. Nilson.  
ACI Materials Journal. May-June 1987. pp 224-234.
  
- [6] Microcracking and Time-Dependent Strains in High Strength Concrete.  
Ali S. Ngab, Floyd O. Slate og Arthur H. Nilson.  
ACI Materials Journal. July-August 1981. pp 262-268.
  
- [7] High-, Medium-, and Low-Strength Concrete Subject to Sustained Overloads-strains,  
Strength, and Failure Mechanisms.  
Mohammad M. Smadi, Floyd O. Slate og Arthur H. Nilson.  
ACI Journal. September-October 1985. pp 657-664.
  
- [8] Long-Term Characteristics of a Very High Strength Concrete.  
P.C. Aitcin, S.L. Sarkar og P. Laplante.  
Concrete International. January 1990. pp. 40-44.

- [9] Mechanical Properties of high-strength concrete (HSC).  
Markus Held.  
Darmstadt Concrete. Vol. 4-1989.
- [10] Proportioning High-Strength Concrete to Control Creep and Shrinkage.  
Therese M. Collins.  
ACI Materials Journal. November-December 1989. pp 576-580.
- [11] Microporosity, Creep, and Shrinkage of High Strength Concrete.  
V. Penttala og T. Rautanen.  
Utilization of High-Strength Concrete. 2. Symposium 1990.
- [12] Field study of creep and shrinkage of a high strength concrete.  
P. Laplante og P.C. Aitcin.  
Fourth int. RILEM conference 1986.
- [13] Høyfast betong.  
Odd E. Gjerv.  
Nordisk betong 1988, 1 pp. 5-9 .
- [14] State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete.  
ACI Journal. July-August 1984. pp 365-411.
- [15] Shrinkage and Creep of High Strength Concrete.  
Ali S. Ngab, Arthur H. Nilson og Floyd O. Slate.  
ACI Journal. July-August 1981 pp 255-261.
- [16] High-Strength Concrete. Material Properties and Structural Behavior.  
R.N. Swamy.  
ACI. SP-87-8. pp. 119-146. 1985
- [18] Properties of High-Strength Concrete.  
Ramnathe N. Swamy.  
Cement, Concrete and Aggregates. Vol. 8 No. 1 1986 . pp 33-41.
- [19] Design Implications of Current Research on High-Strength Concrete.  
Arthur H. Nilson.

ACI. SP-87 -7. pp 85 -118. 1985

- [20] High Strength Concrete. Structural Properties of High Strength Concrete.  
Andrzej Tomazewics.  
Sintef. STF65 A88007. 1988
- [21] High strength and water impermeability of concrete as a function of surface area of aggregate.  
H. Stamenkovic.  
Materials and Structures. Vol. 3, No. 14, 1970. pp 91-98.
- [22] The strength and deformation characteristics of high early strength structural concrete.  
R.N. Swamy, A.B. Ibahim og K.L. Anand.  
Materials and Structures. Vol. 8, No. 48, 1975. pp 413-423.
- [23] Practical prediction of creep and shrinkage of high strength concrete.  
Zdenek P. Bazant.  
Materials and Structures. Vol. 17. No. 101, 1984. pp 375-378.
- [24] Microcracking and Definition of Failure of High-, and Normal-Strength Concretes.  
Ramon L. Carrasquillo and Floyd O. Slate.  
Cement, Concrete and Aggregates Vol. 5, No. 1, 1983. pp 54-61.
- [25] Shrinkage and Creep of Concrete Containing 50 Percent Lignite Fly Ash at Different Stress- Strength Ratios.  
K.W. Nasser and A.A. Al-Manaseer..  
ACI. SP-91-20. pp. 433-448. 1986
- [26] Creep of Concrete Containing Fly Ash and Superplasticizer at Different Stress/- Strength Ratios.  
K.W. Nasser og A.A. Al-Manaseer.  
ACI Journal, July-August, 1986. pp. 668-673.
- [27] A 4:1 Range in concrete creep when cement  $SO_3$  content, curing temperature and fly ash content are varied.  
K.M. Alexander, J. Wardlaw og I. Ivanusec.

Cement and Concrete Research. Vol 16, 1986. pp 173-180.

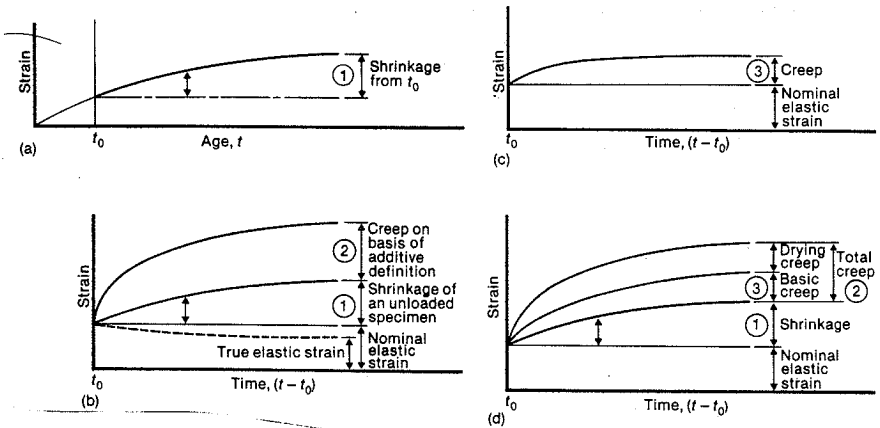
- [28] Shrinkage and Creep of Mass Concrete Containing Fly Ash.  
Takeshi Yamato og Hideaki Sugita.  
ACI. SP79-4. pp 87-102. 1983
- [29] Creep of Fly Ash Concrete.  
Ram S. Ghosh og John Timusk.  
ACI Journal. September-October 1981. pp 351-357.
- [30] Shrinkage and Creep of Concrete Containing 50% Lignite Fly Ash at High  
Temperatures.  
Karim W. Nasser og Akthem A. Al-Manaseer.  
Cement, Concrete and Aggregates Vol. 9, No. 2, 1987. pp 95-100.
- [31] Creep of Fly Ash Concrete.  
R.P. Lohtia, B.D. Nautiyal og P.P. Jain.  
ACI Journal. August 1976. pp 469-472.
- [32] Mechanical Properties, Durability, and Drying Shrinkage of Portland Cement  
Concrete Incorporation Silica Fume.  
George G. Carette og V. Mohan Malhotra.  
Cement, Concrete and aggregates. Vol. 5, No. 1. 1983. pp 3-13.
- [33] Properties of High-Strength Concrete With Silica Fume Using High-Range Water  
Reducer of Slump Retaining Type.  
K. Mitsui, H. Kasami, Y. Yoshioka og M. Kinoshita.  
ACI. SP-119-4. pp 79-96. 1989
- [34] Silica Fume in Concrete.  
ACI Commitee 226.  
ACI Materials Journal. March-April 1987. pp 158-166.
- [35] Ultra High-Strength Field Placeable Concrete with Silica Fume Admixture.  
John Wolsiefer.  
Concrete International. April 1984. pp 25-31.

- [36] Condensed silica fume in concrete.  
Erik J. Sellevold.  
Thomas Telford London 1988.
- [37] Creep of a silica fume concrete.  
M. Buil og P. Acker.  
Cement and Concrete Research. Vol. 15. 1985. pp 463-466.
- [38] Drying Shrinkage and Creep of Concrete with Condensed Silica Fume.  
E. Tazawa og A. Yonekura.  
ACI. SP-91-43. pp 903-920. 1986
- [39] Influence of mix proportions, plasticizers and superplasticizers on creep and drying shrinkage of concrete.  
J.J. Brooks.  
Magazine of Concrete Research, 1989. Vol 41, No. 148. pp 145-153.
- [40] Time-dependent behavior of concrete containing a plasticiser.  
A.M. Neville and J.J. Brooks.  
Concrete. Vol. 9. 1975. pp 33-35.
- [41] Time-dependent Behavior of High-Early-Strength Concrete Containing a Superplasticizer.  
J.J. Brooks, P.J. Wainwright og A.M. Neville.  
ACI. AP-68-5. pp 81-100. 1981
- [42] Time-Dependent Properties of Concrete Containing a Superplasticizing Admixture.  
J.J. Brooks, P.J. Wainwright og A.M. Neville.  
ACI. SP-62-15. pp 293-314. 1979
- [43] Creep of plain and Structural concrete.  
A.M. Neville, W.H. Dilger og J.J. Brooks.  
Construction Press. 1983.
- [44] Creep and Shrinkage in concrete structures.  
Z.P. Bazant og F.H. Wittmann.  
John Wiley & Sons. 1982.

- [45] Beton-Bogen.  
Aage D. Herholdt, Chr. F.P. Justesen, Palle Nepper-Christensen og Anders Nielsen.  
Cementfabrikkernes tekniske oplysningskontor. 2. udg. 1985.
- [46] Concrete Technology.  
A.M Neville og J.J. Brooks.  
Longman Scientific & Technical. 1987.
- [47] Properties of Concrete.  
A.M. Neville.  
Pitman 1982.
- [48] Designing for Creep & Shrinkage in Concrete Structures.  
ACI Committee 209.  
ACI. SP-76.
- [49] Creep and Shrinkage of Concrete Elements and Structures.  
Zdenek Smerda og Vladimir Kristek.  
Elsevier 1988.
- [50] Creep and Shrinkage.  
Hubert Rusch, Dieter Jungwirth og Hubert K. Hilsdorf.  
Springer-Verlag 1983.
- [51] Measurements of internal concrete strains using embedment strain gauges.  
R.H. Scott og P.A.T. Gill  
Magazine og Concrete Research Vol. 39. No. 139. June 1987.
- [52] Improved prediction model for time-dependent deformations of concrete: Part 1.  
Z. Bazant, J. Kim and L. Panula  
Materials and Structures 1991 vol. 24 pp. 327-345
- [53] CEB-FIP Model Code 1990  
Bulletin d'information No 196  
CEB Comite Euro-International du Beton



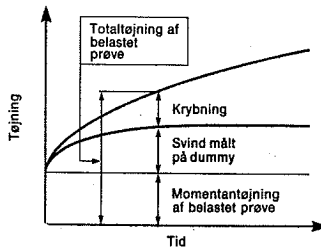
## 6.1 Figurer



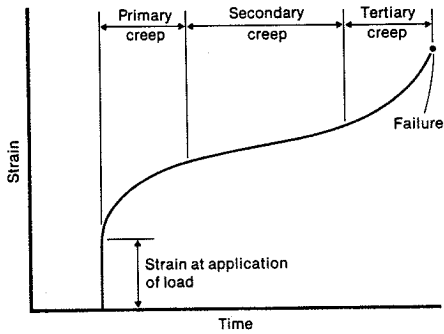
Figur 2.1.1 Definition af terminologi [43]

Figur 2.1.1 viser

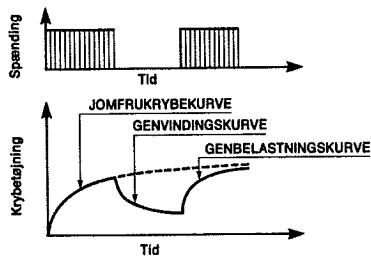
- Svind af et ubelastet prøvelegeme.
- Tøjningsændring af et belastet og udtørrende prøvelegeme.
- Krybning af et belastet prøvelegeme i hygrostatiskligevægt med omgivelserne.
- Tøjningsændring af et belastet og udtørrende prøvelegeme.



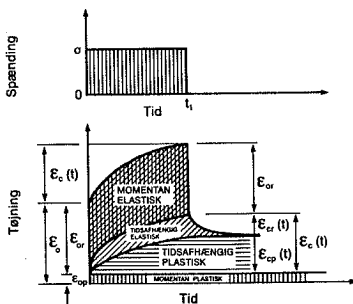
Figur 2.1.2 Konvention for bestemmelse af krybning under sorption [45]



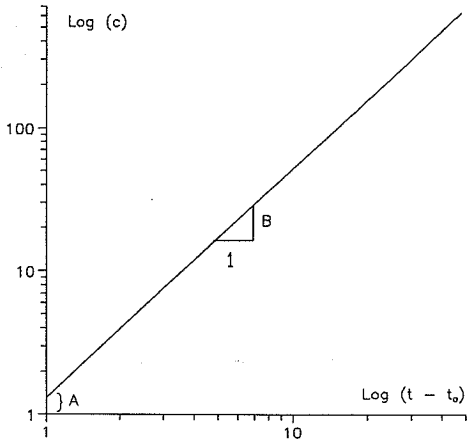
Figur 2.1.3 Generel form af tøjnings-tidskurven for et materiale udsat for krybning [43].



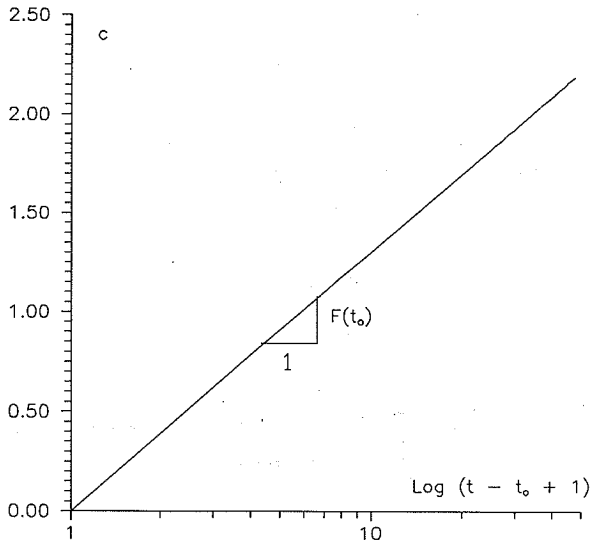
Figur 2.1.4 Betegnelser for krybning ved gentagen påvirkning [45].



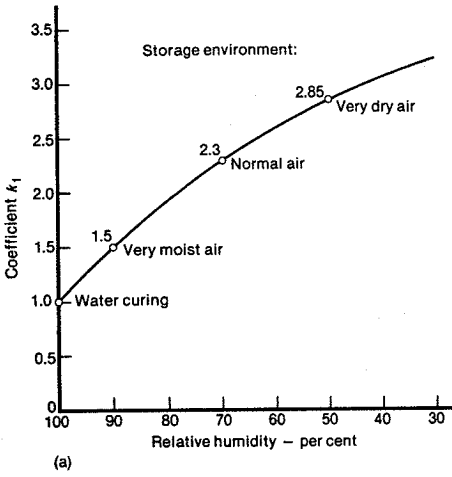
Figur 2.1.5 Tøjnings-tids-diagram for et vilkårligt materiale [45].



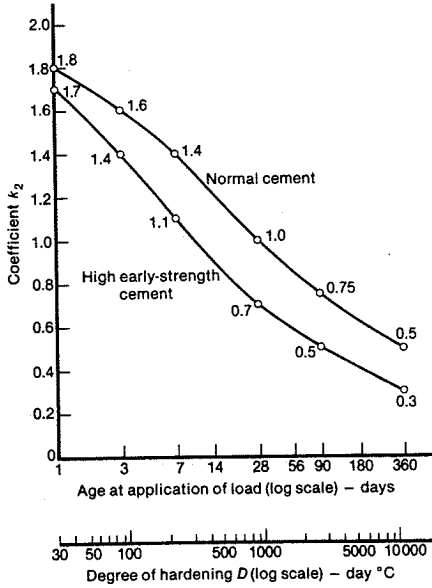
Figur 2.2.1



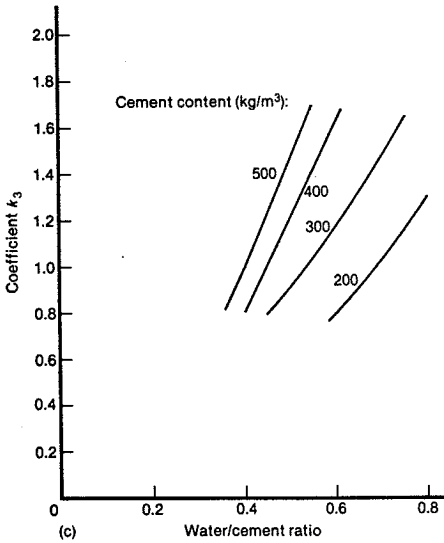
Figur 2.2.2



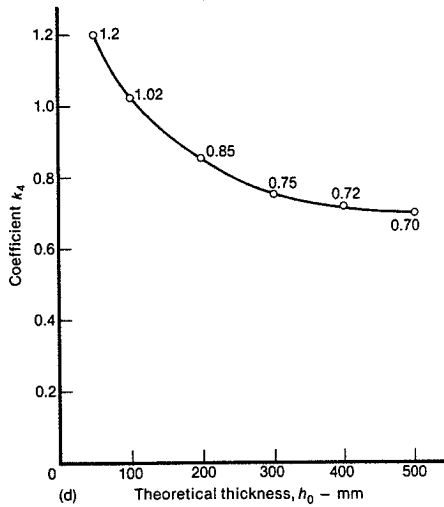
(a)



(b)

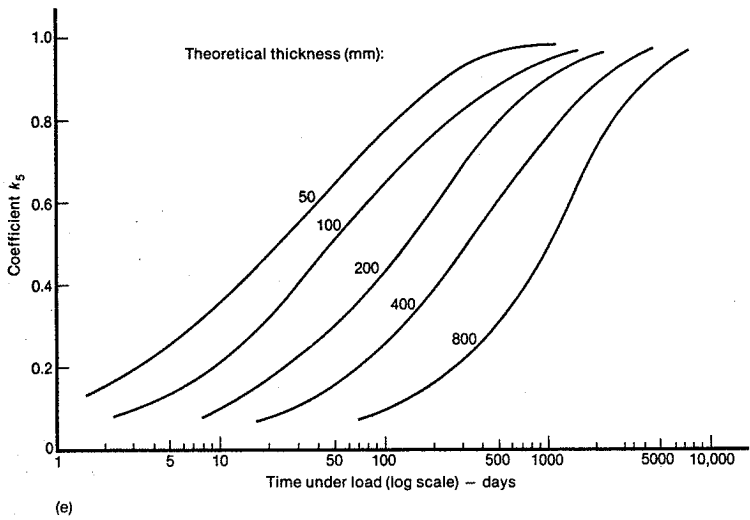


(c)

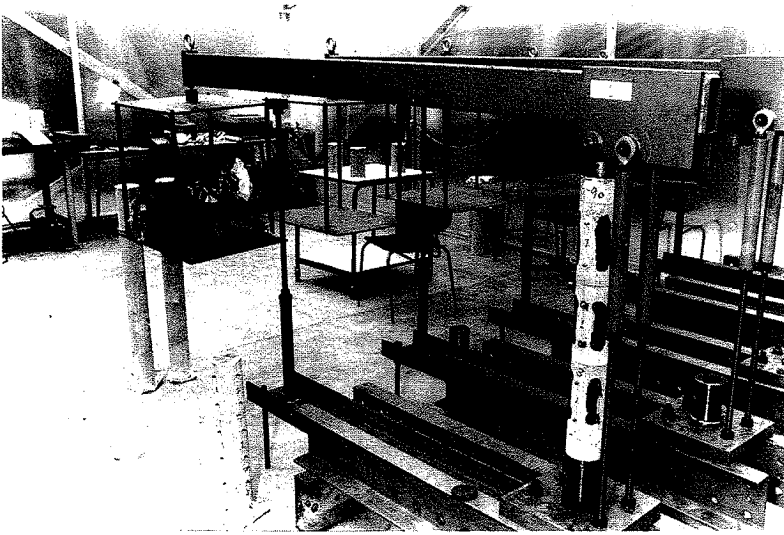


(d)

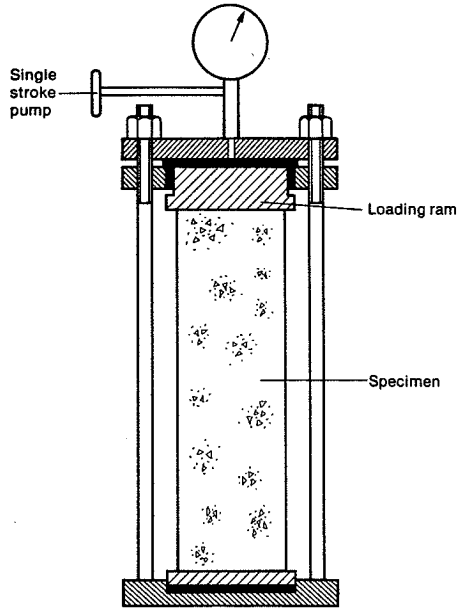
Figur 2.2.3 CEB-1970 Krybe model kurver [43].



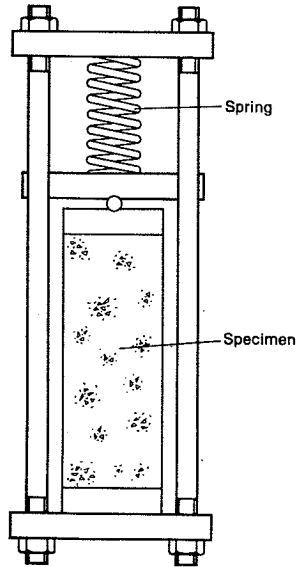
Figur 2.2.3 (fortsat)



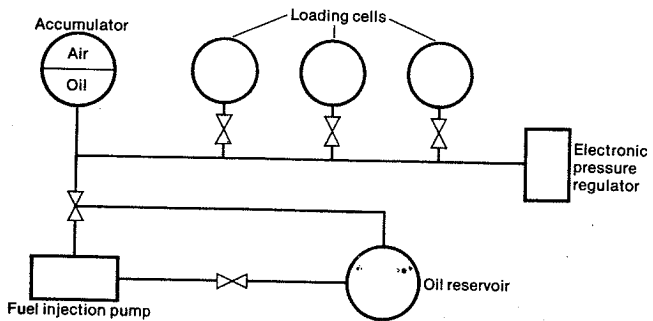
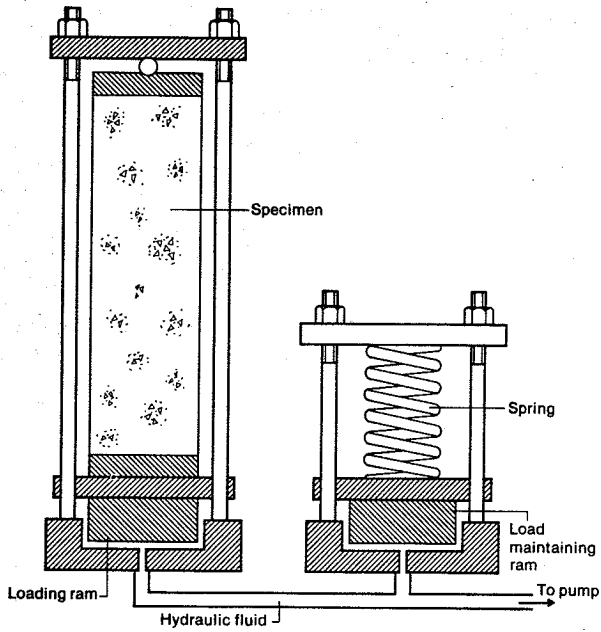
Figur 3.1.1 Dødvægts kryberig.



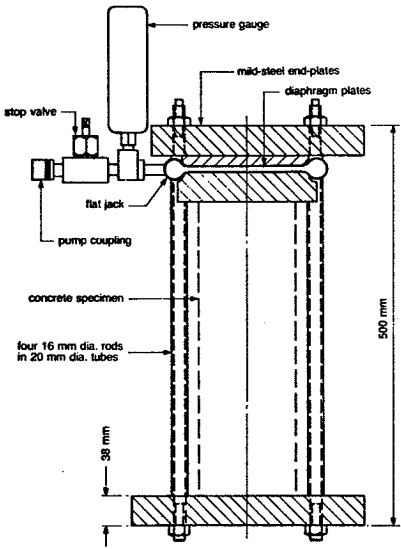
Figur 3.1.2 Hydraulisk kryberig [43].



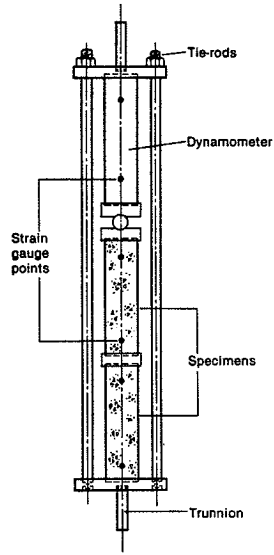
Figur 3.1.3 Fjeder kryberig [43].



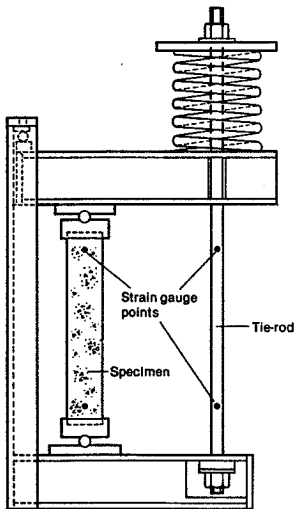
Figur 3.1.4 Selvregulerende hydraulisk kryberig [43].



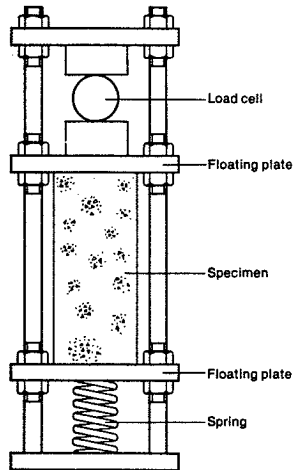
Figur 3.1.5 Kapselpresse kryberig.



Figur 3.1.6 Simpel kryberig med dynameter [43].

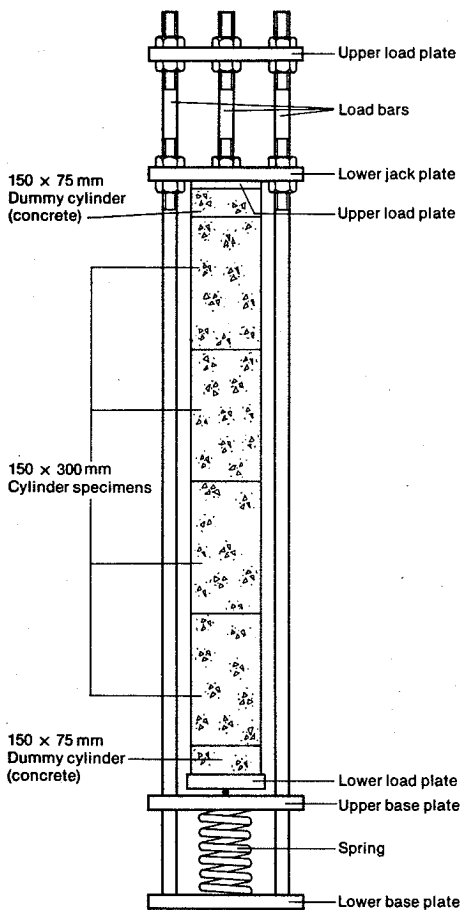


Figur 3.1.7 Fjederbelastet vægtarmsrig [43].

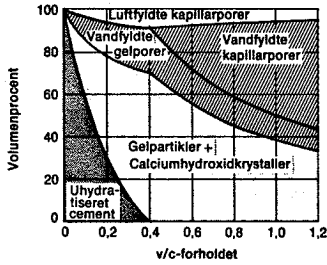


Figur 3.1.8 Fjederbelastet kryberig med dynameter [43].



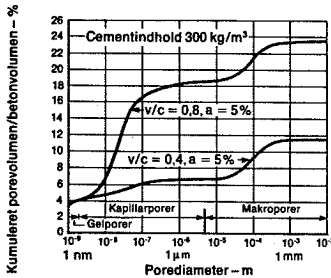


Figur 3.1.9 Trykkryberig iht. ASTM standard C512-76 [43].

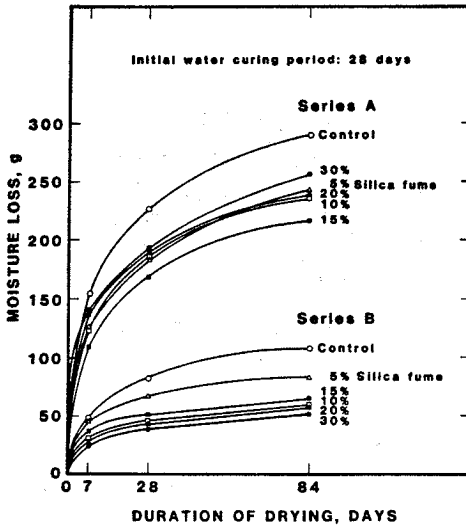


Figur 4.1.1 Fordeling af gelporer og kapillarporer i fuldstændigt hydratiseret cementpasta ved forsejlet lagring. Figuren er teoretisk og baseret på en formél beregning [45].

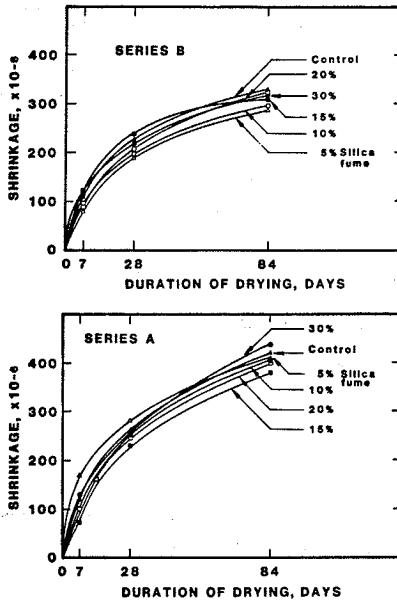
Gelporer	< 2 nm
Kapillarporer	2 nm – 5 µm
Makroporer {	5 µm – 0,5 mm
	> 0,5 mm
	{ Sfæriske luftbobler
	{ Grove hulrum



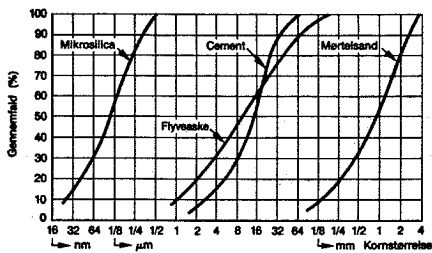
Figur 4.1.2 Tabellen viser porestørrelsen i beton. Figuren viser eksempler på porestørrelses fordelingen ved fuldstændig hydratisering [45].



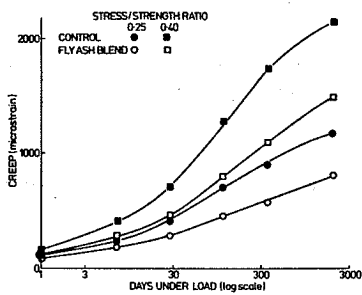
Figur 4.2.1 Vandtab som funktion af tiden [32].



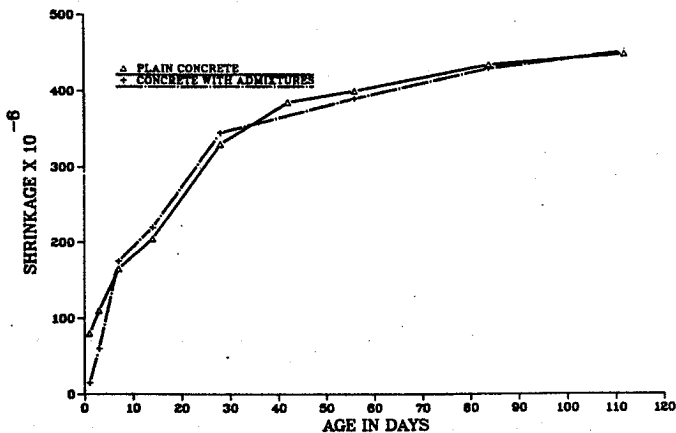
Figur 4.2.2 Udtøringskrybning som funktion af tiden [32].



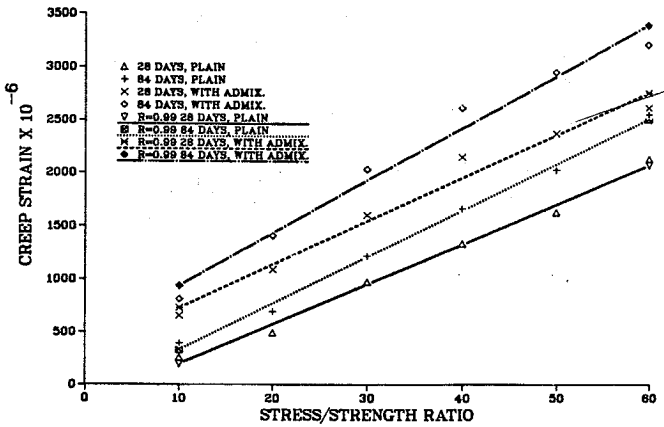
Figur 4.3.1 Eksempler på kornkurver [45].



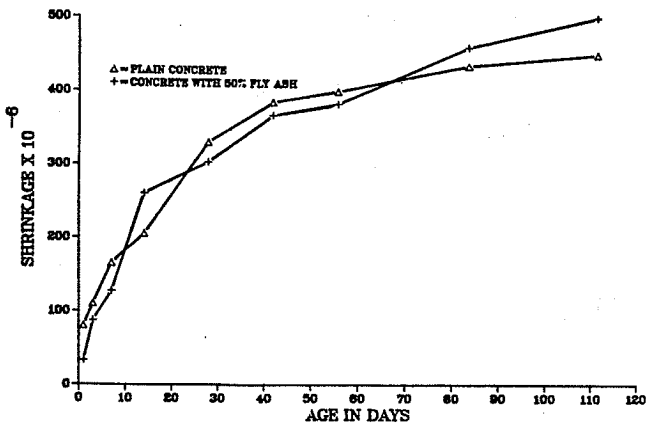
Figur 4.3.2 Flyveaskes indflydelse på krybningen i en 40 MPa beton [27].



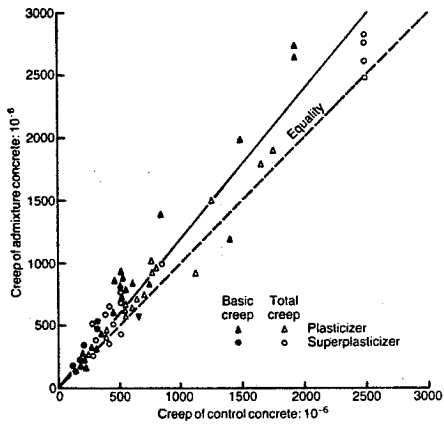
Figur 4.3.3 Svind som funktion af tiden for uforseglet beton med og uden tilsætningsstoffer [26].



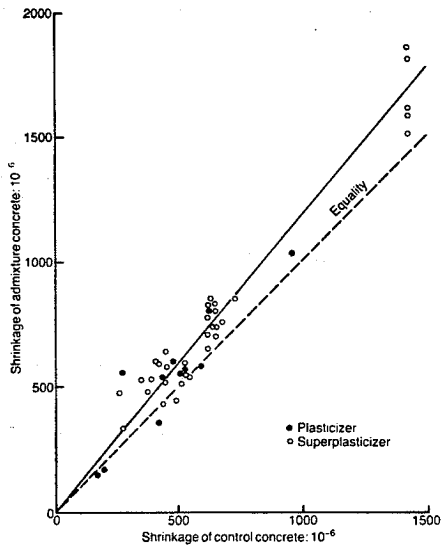
Figur 4.3.4 Krybning som funktion af spændings/styrke forhold for uforseglet beton med og uden tilsætningsstoffer [26].



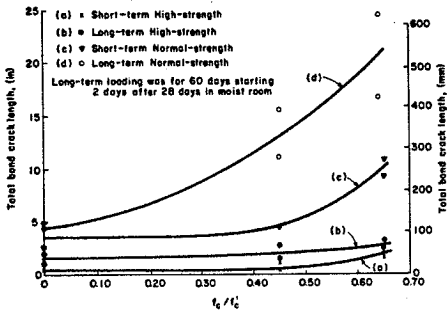
Figur 4.3.5 Svind som funktion af tiden for uforseglet beton med og uden flyveaske [26].



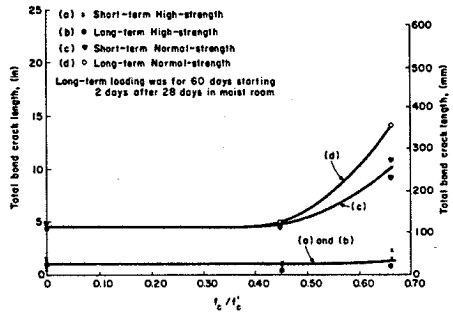
Figur 4.4.1.a Sammenligning af krybning af beton med og uden superplastificerende tilsætning. Standardafvigelsen er 120 % [39].



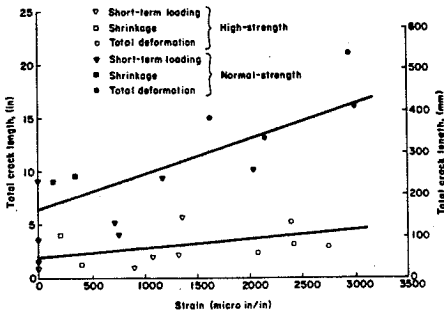
Figur 4.4.1.b Sammenligning af svindet af beton med og uden superplastificerende tilsætning. Standardafvigelsen er 118.6 % [39].



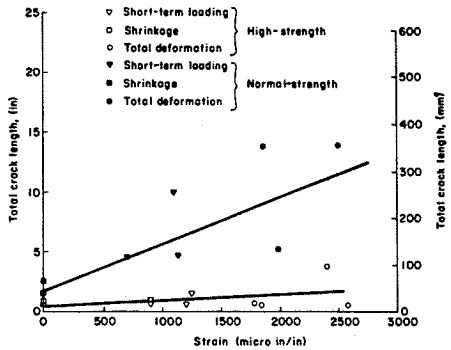
Figur 4.8.1.a Forhold mellem revnelængde og  $\sigma/f_c$  for uforsøjet beton [6].



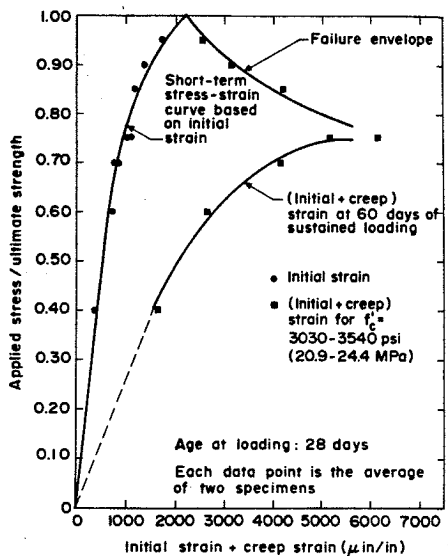
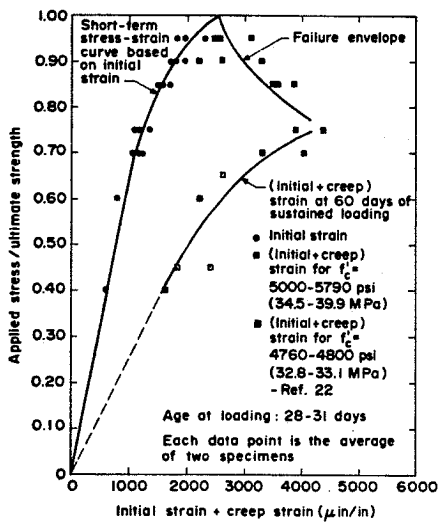
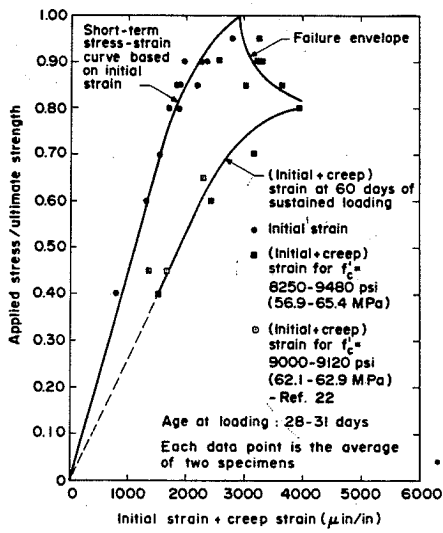
Figur 4.8.1.b Forhold mellem revnelængde og  $\sigma/f_c$  for forseglet beton [6].



Figur 4.8.1.c Forhold mellem tøjning og revnelængde af uforsøjet beton [6].

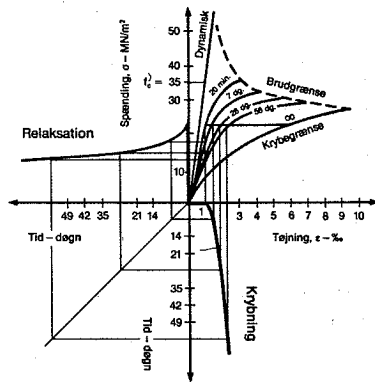
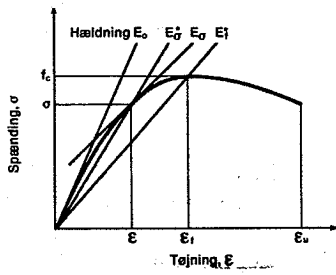
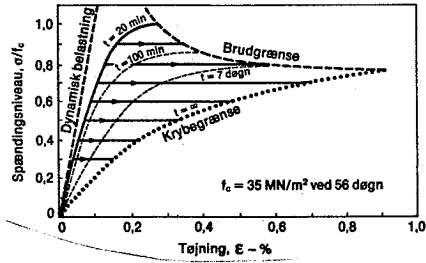
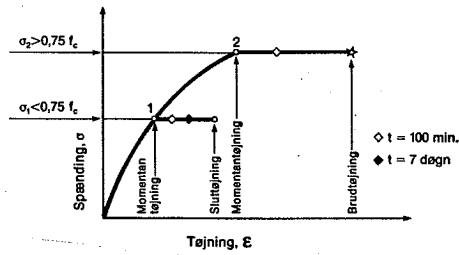


Figur 4.8.1.d Forhold mellem tøjning og revnelængde af forseglet beton [6].

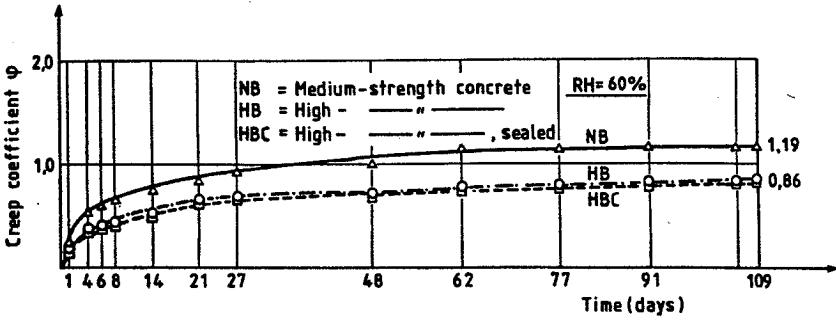


Figur 4.8.2 Isokront  $\sigma$ - $\epsilon$ -diagram for høj-, normal- og lavstyrke beton [7].

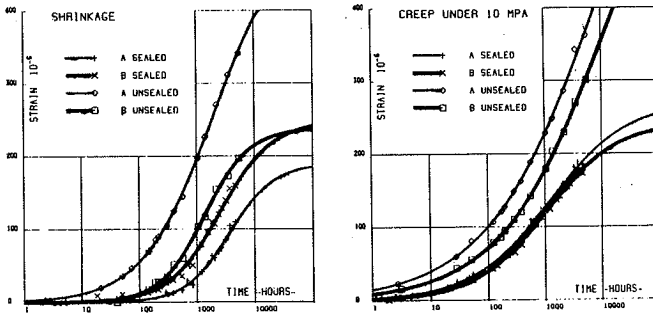




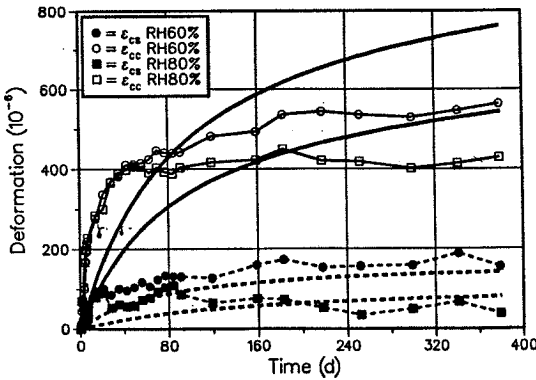
Figur 4.8.3 [45]



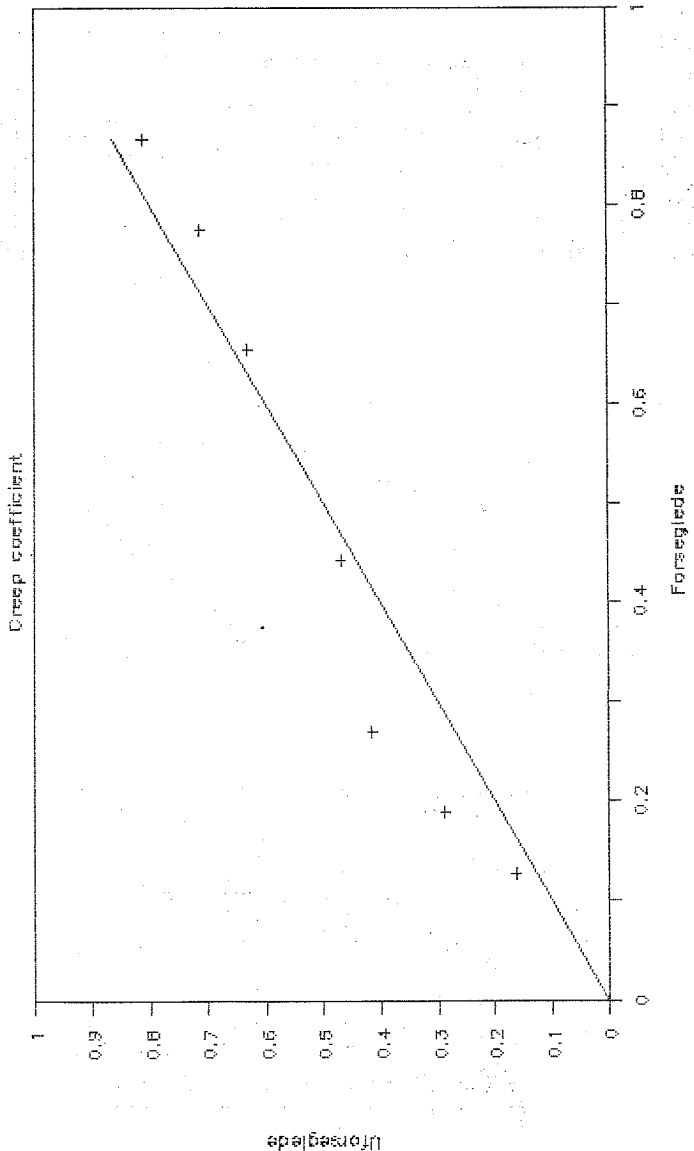
Figur 4.9.1 [2]



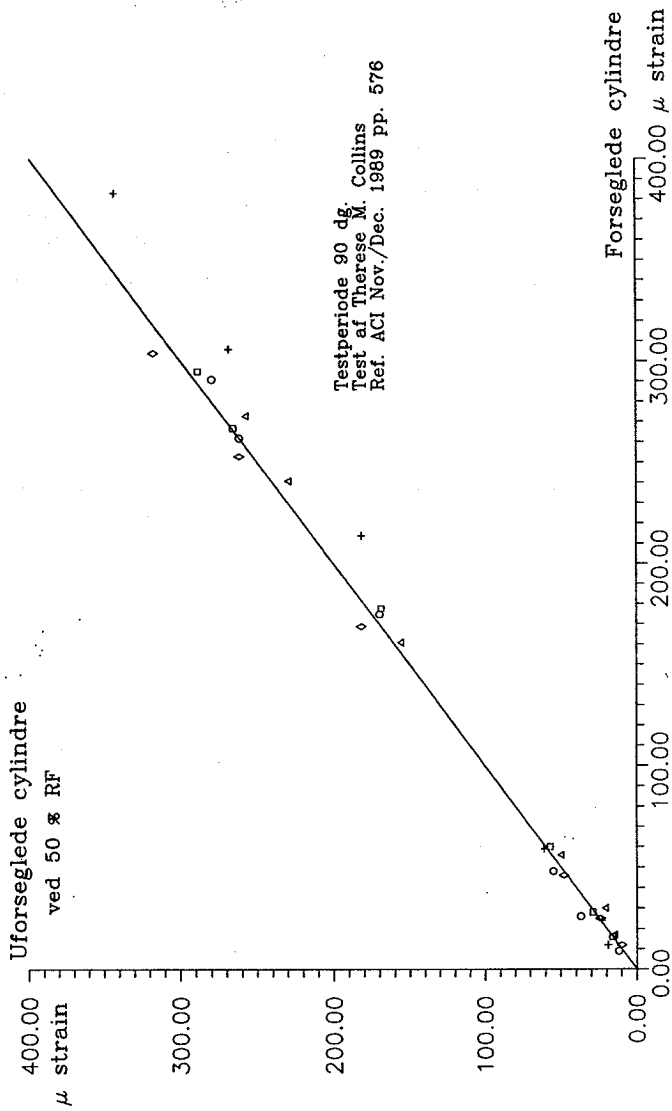
Figur 4.9.2 A-LSC; B-HSC [37]



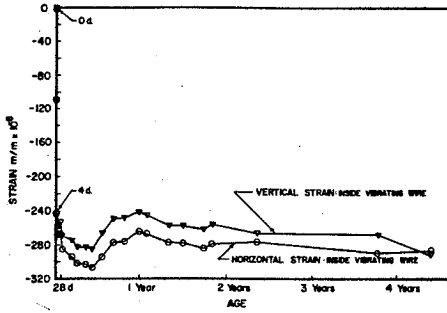
Figur 4.9.3 [11]



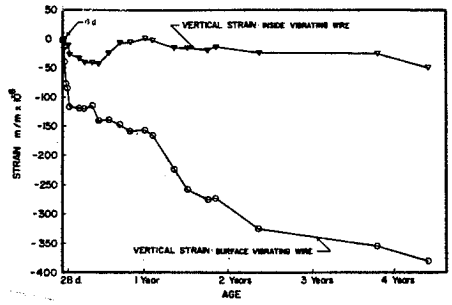
Figur 4.9.4 Resultater fra [15]



Figur 4.9.5 Resultater fra [10]

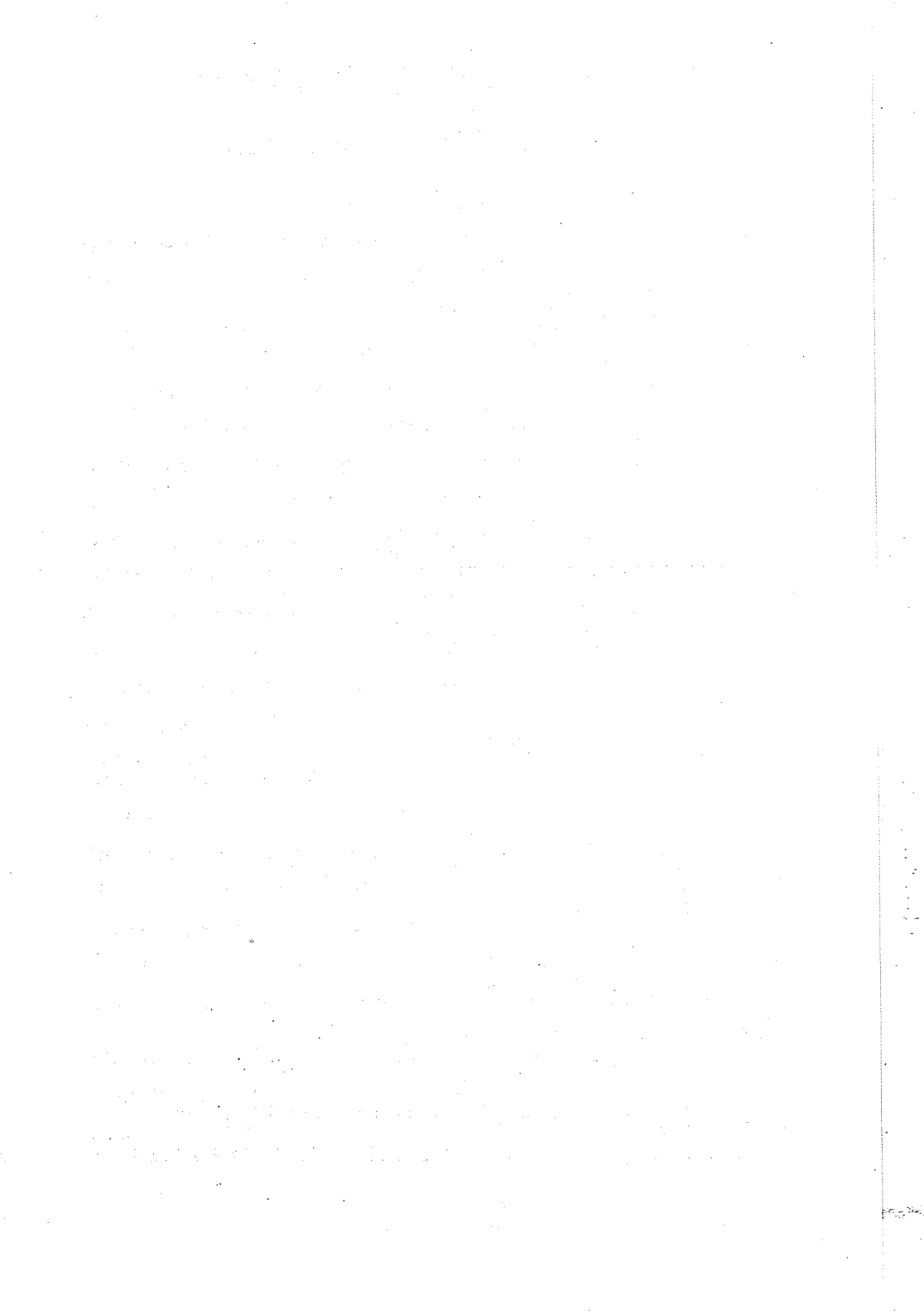


—Strain inside column from 0 days to four years.



—Inside and surface shrinkage strain after four days.

Figur 4.9.6 [8]



AFDELINGEN FOR BÆRENDE KONSTRUKTIONER  
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

Department of Structural Engineering  
Technical University of Denmark, DK-2800 Lyngby

SERIE R

(Tidligere: Rapporter)

- R 282. DAHL, KAARE K.B.: Uniaxial Stress-Strain Curves for Normal and High Strength Concrete. 1992.
- R 283. DULEVSKI, DAVID ENCHO: Global Structural Analysis of Steel Box Girder Bridges. 1992.
- R 284. Resumeoversigt 1991 - Summaries of Papers 1991.
- R 285. DAHL, KAARE K.B.: The Calibration and Use of a Triaxial Cell. 1992.
- R 286. DAHL, KAARE K.B.: A Failure Criterion for Normal and High Strength Concrete. 1992.
- R 287. DAHL, KAARE K.B.: A Constitutive Model for Normal and High Strength Concrete. 1992.
- R 288. JENSEN, HENRIK ELGAARD: State-of-the-art Rapport for Højstyrkebetons Svind og Krybning. 1992.
- R 289. JENSEN, HENRIK ELGAARD: Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; A testreport. 1992.
- R 290. JENSEN, HENRIK ELGAARD: Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; A testreport; Appendix A. 1992.
- R 291. JENSEN, HENRIK ELGAARD: Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; A testreport; Appendix B. 1992.
- R 292. JENSEN, HENRIK ELGAARD: Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; A testreport; Appendix C. 1992.
- R 293. JENSEN, HENRIK ELGAARD: Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; A testreport; Appendix D. 1992.
- R 294. JENSEN, HENRIK ELGAARD: Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; An Analysis. 1992.
- R 295. JENSEN, HENRIK ELGAARD: State-of-the-art Rapport for Revnet Betons Styrke. 1992.
- R 296. IBSE, JAN BEHRENDT & RASMUSSEN, LARS JUEL: Vridning af armerede normal- og højstyrkebetonbjælker. 1992.
- R 297. RIBERHOLT, HILMER, JOHANNESSEN, JOHANNES MORSENG & RASMUSSEN, LARS JUEL: Rammehjørner med indlmede stålstænger i limtræ. 1992.
- R 298. JENSEN, RALPH BO: Modified Finite Element Method modelling Fracture Mechanical Failure in wooden beams. 1992.
- R 299. IBSE, JAN BEHRENDT & AGERSKOV, HENNING: Fatigue Life of Off-shore Steel Structures under dStochastic Loading. 1992.
- R 300. HANSEN, SVEND OLE: Reliability of Wind Loading on Low-Rise Buildings in a Group. 1992.
- R 301. AARRE, TINE: Tensile characteristics of FRC with special emphasis on its applicability in a continuous pavement. 1992.
- R 302. GLAVIND, METTE: Evaluation of the Compressive Behaviour of Fiber Reinforced High Strength Concrete. 1992.
- R 303. NIELSEN, LEIF OTTO: A C ++ basis for computational mechanics software. 1993
- R 304. Resumeoversigt 1992 - Summaries of Papers 1992.
- R 305. HANSEN, SØREN, STANG, HENRIK: Eksperimentelt bestemte mekaniske egenskaber for fiberbeton. 1993.
- R 306. NIELSEN, PER KASTRUP, ELGAARD JENSEN, HENRIK, SCHMIDT, CLAUD, NIELSEN, M.P.: Forskydning i armerede tegl bjælker. 1993.
- R 307. CHRISTOFFERSEN, JENS, JAGD, LARD, NIELSEN, M.P.: HOTCH-POTCH Pladeelementet - Finite element til beregning af armerede betonplader. 1993.

Abonnement 1.7.1993 - 30.6.1994 kr. 130,-

Subscription rate 1.7.1993 - 30.6.1994 D.Kr. 130.-.

Hvis De ikke allerede modtager Afdelingens resumeoversigt ved udgivelsen, kan Afdelingen tilbyde at tilsende næste års resumeoversigt, når den udgives, dersom De udfylder og returnerer nedenstående kupon.

Returneres til  
Afdelingen for Bærende Konstruktioner  
Danmarks tekniske Højskole  
Bygning 118  
2800 Lyngby

Fremtidig tilsendelse af resumeoversigter udbedes af  
(bedes udfyldt med blokbogstaver):

Stilling og navn: .....

Adresse: .....

Postnr. og -distrikt: .....

The Department has pleasure in offering to send you a next year's list of summaries, free of charge. If you do not already receive it upon publication, kindly complete and return the coupon below.

To be returned to:  
Department of Structural Engineering  
Technical University of Denmark  
Building 118  
DK-2800 Lyngby, Denmark.

The undersigned wishes to receive the Department's  
List of Summaries:  
(Please complete in block letters)

Title and name .....

Address.....

Postal No. and district.....

Country.....



