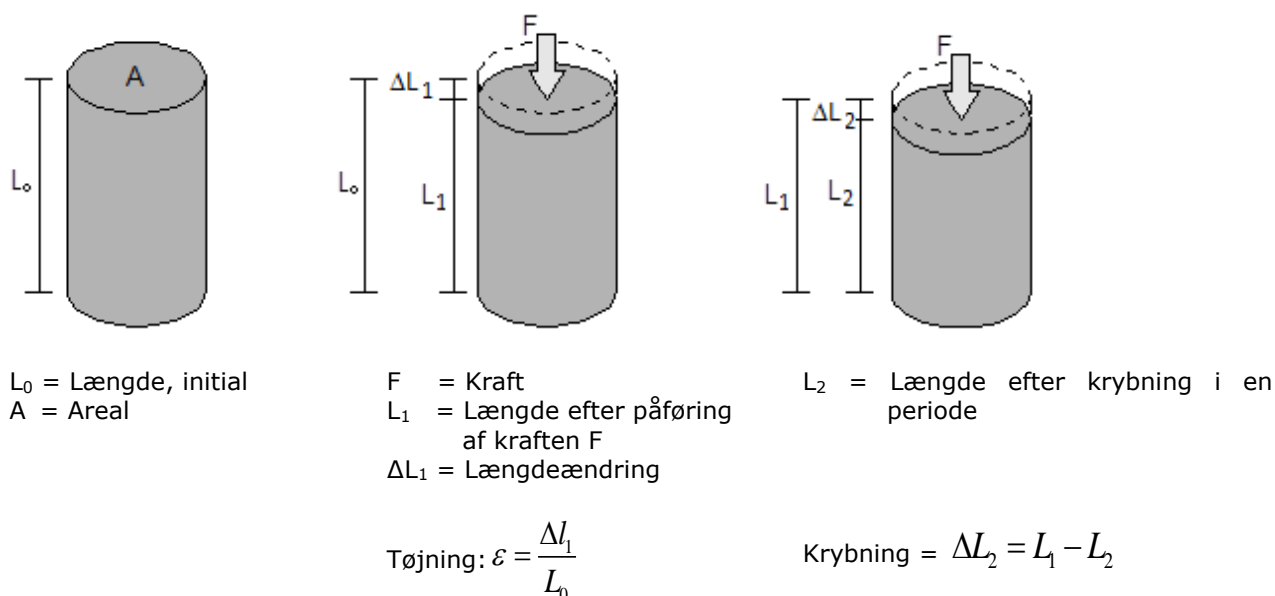


10.5 Krybning

Af Jens Ole Frederiksen og Gitte Normann Munch-Petersen



Figur 1. Forskellen mellem øjeblikkelig deformation og tidsafhængig deformation.

Når et betonlegeme påføres en kraft, vil der ske en momentan deformation, men med tiden vil denne deformation vokse, selv ved uændret last. Dette kaldes krybning.

Det betyder fx, at en ikke forspændt betonbjælke påvirket af sin egen vægt med tiden vil få en større nedbøjning.

Krybning optræder i de fleste byggematerialer. I træ optræder en meget stor krybning, især hvis træet er fugtigt, mens der i stål kun optræder en meget begrænset krybning.

Et velkendt eksempel på krybning ses i en bogreol, hvor hylderne med det store leksikon tit vil have en tydelig nedbøjning. En stor del af denne nedbøjning er kommet med tiden, og ikke da bøgerne blev sat ind. Det skyldes krybning i hyldematerialet (træet).

En tilsvarende effekt af krybning kan ses i belastede betonkonstruktioner, som fx bjælker og plader. Krybning i beton er mindre end i træ, men princippet er det samme.

10.5.1 Definition

Når et materiale påføres en konstant spænding i en længere periode, medfører det, at deformationen vokser med tiden. Dette skyldes, at materialet kryber. Krybning afhænger af lastens størrelse og varighed, idet krybningen stiger, ved stigende størrelse og stigende varighed af belastningen.

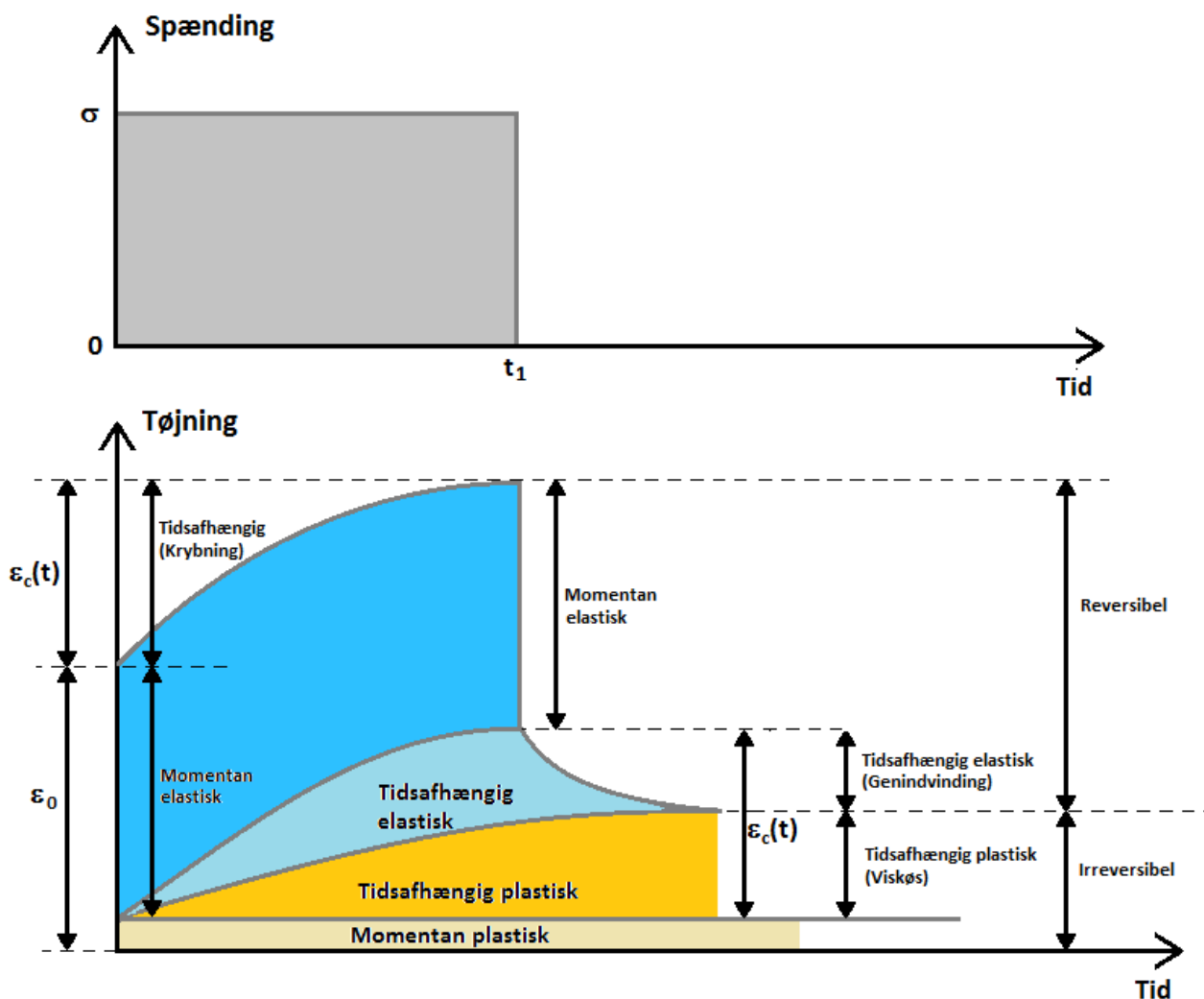
Den relative luftfugtighed, RH, og vandmætningsgraden er de eksterne faktorer, der har størst indflydelse på krybning. Forklaringen er, at et højt fugtindhold i porerne formindsker friktionen, idet vandmolekylerne holder partiklerne i porerne fra hinanden. Fordampningens størrelse afhænger af det specifikke overfladeareal (overfladen i forhold til volumen) af konstruktionen eller prøveemnet, hvilket betyder at slanke konstruktioner vil krybe mere end massive, hvis der sker en udtørring i den periode konstruktionen er belastet. Da temperaturen også har indflydelse på, hvor meget betonen udtørres, vil øgede temperaturer også medføre øget krybning.

Krybningen bliver mindre med stigende styrke. Da betonens styrke stiger som en funktion af tiden, vil beton der belastes i en tidlig alder, krybe mere end beton der belastes på et senere tidspunkt. Lave v/c-forhold giver høj styrke og mindre krybning end højt v/c-forhold.

Det er primært cementpastaen der kryber, hvilke betyder at et højt cementpastaindhold vil give større krybning.

De nævnte parametre har følgende principielle indflydelse på deformationer forårsaget af krybning i betonen:

- | | |
|-----------------------------|---|
| - Lastens varighed: | Deformationen øges med lastens varighed |
| - Laststørrelse: | Deformationen øges proportionalt med lasten |
| - Relativ luftfugtighed: | Deformationen øges med faldende luftfugtighed |
| - Konstruktionens geometri: | Deformationen øges, jo slankere konstruktion |
| - Temperaturen: | Deformationen øges, ved stigende temperaturer |
| - Vandcementtal: | Deformationen øges med stigende vandcementtal |
| - Tidspunkt for belastning: | Deformationen øges, jo tidligere der belastes |
| - Cementpastaindhold: | Deformationen øges med stigende cementpasta-indhold |



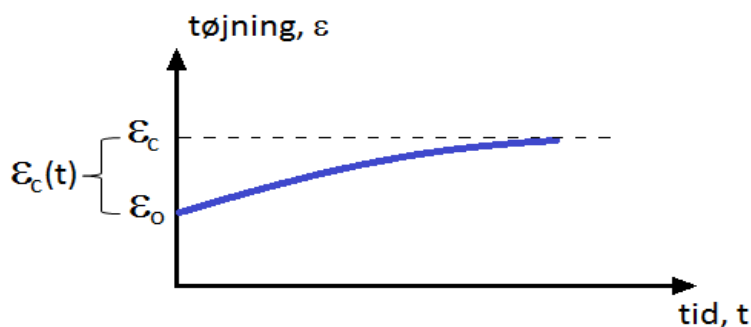
Figur 2. Sammenhæng mellem tøjning og tid, når et materiale påføres en konstant spænding til tiden 0, hvorefter materialet aflastes til tiden t_1 .

Når en betonkonstruktion belastes, sker der først en øjeblikkelig (elastisk) deformation, og derefter en krybning, der øger deformationen. Hvis lasten fjernes, vil der tilsvarende først komme en negativ deformation og efterfølgende også en vis negativ deformation som følge af tilbagekrybning (se Figur 2). Tilbagekrybningen vil altid være lavere end krybningen.

På Figur 2 ses det, at de tidsafhængige deformationer både kan være reversible og irreversible. Normalt skelner man kun mellem to tøjningsbidrag:

- Momentan tøjning, ϵ_0
- Tidsafhængig tøjning (krybetøjning) $\epsilon_c(t)$

Den samlede tøjning $\epsilon(t)$ er summen af ϵ_0 og $\epsilon_c(t)$, og er dermed også tidsafhængig.



Figur 3. Krybetøjning.

Forholdet mellem krybetøjningen og momentantøjningen kaldes krybningsparameteren eller krybetallet, $\Phi(t)$:

$$\phi(t) = \frac{\varepsilon_c(t)}{\varepsilon_0}$$

Hvor: $\varepsilon_0 = \frac{\sigma}{E}$ og $\varepsilon_c(t) = \phi(t) \cdot \varepsilon_0 = \phi(t) \cdot \frac{\sigma}{E}$

Den samlede tøjning bliver da:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_0 + \varepsilon_c(t) = \frac{\sigma}{E} + \phi(t) \cdot \frac{\sigma}{E} = \frac{\sigma}{E} (1 + \phi(t))$$

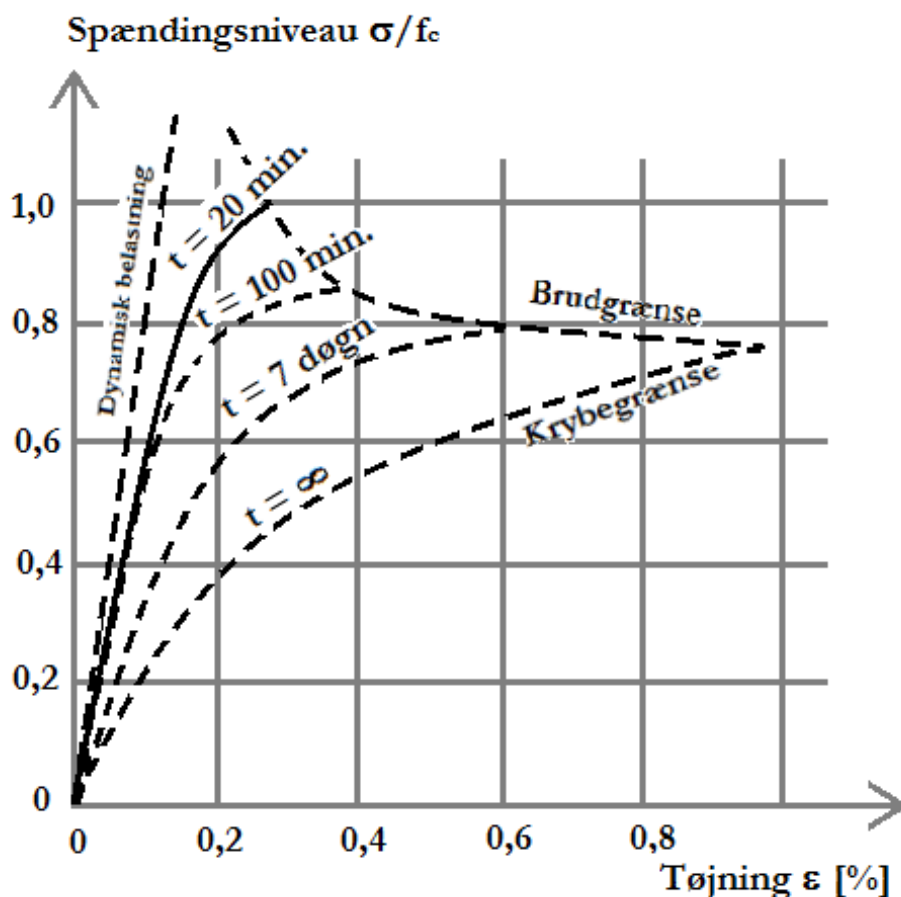
Det effektive E-modul $E_{c,eff}$, der både har indregnet krybetøjningen og momentantøjningen. $E_{c,eff}$ anvendes ved beregning af langtidsdeformationer, og sekant E-modulet anvendes til beregning af momentantøjningen:

$$E_{c,eff} = \frac{\sigma}{\varepsilon_c} = \frac{\sigma}{\frac{\sigma}{E_{cm}} (1 + \phi)} = \frac{E_{cm}}{(1 + \phi)}$$

Krybetallet kan bestemmes ud fra DS/EN 1992-1-1 afsnit 3.1.4. Størrelsen afhænger af betonens alder, cementtypen, betontværsnittet og betonstyrken. Ofte ligger værdien omkring 2, hvilket betyder, at krybe E-modulet bliver 1/3-del af korttids E-modulet. Det skal pointeres, at dette krybe E-modul er en ren fiktiv størrelse. I virkeligheden kommer først en deformation svarende til korttids E-moduler, og derefter med tiden på grund af krybning en deformation, der med krybetallet 2 er dobbelt så stor som korttidsdeformationen. Det betyder, at den forventede langtidsdeformation på grund af belastning og krybning er 3 gange så stor, som den deformation, der beregnes på basis af korttids E-modulet.

10.5.1.1 Slut-tøjning og krybebrud

For at få et overblik over krybningens størrelse over tid, kan man optegne isokrone σ - ϵ -kurver. Prøvelegemer af samme beton belastes ved forskellige spændingsniveauer. Momentantøjningen og krybetøjningen efter bestemte tidsintervaller måles, og indtegnes i et σ - ϵ -diagram, som vist i Figur 4. Det ses at under et vist kritisk spændingsniveau på ca. 75 % af betontrykstyrken f_c , vil tøjningen vokse mod en slut-tøjning, også kaldet krybegrænsen ($t=\infty$). Over det kritiske spændingsniveau vil der ske krybning indtil der indtræffer brud. Dette skyldes, at revnerne, der dannes i betonen, når den belastes, ikke er stabile ved spændinger på over ca. 75 % af trykstyrken.



Figur 4. Isokront σ - ϵ -diagram.

10.5.1.2 Krybning og deformationsbereninger

Deformationsberegninger, der indregner krybning, er primært relevante for nedbøjning af plader og bjælker, mens sammentrykningen af søjler er så små, at det normalt er uden betydning.

Slapt armerede bjælker og plader har som oftest en begrænset spændvidde, og derfor er krybning sjældent kritisk for slapt armerede konstruktioner.

Bjælker, plader og andre konstruktioner med stort spænd er som oftest forspændte

Forspænding kan udføres som "førspændt" ved at en del af armeringen i form af liner er spændt op, inden bjælken eller pladen støbes.

Førspænding anvendes oftest i forbindelse med elementproduktion fx af huldæk, bjælker, dobbelt T-dragere etc.

Forspænding kan også udføres som "efterspændt", ved at en del af armeringen i form af liner, kabler eller stænger bliver spændt op efter udstøbningen. Efterspænding anvendes ofte i broer, hvor forspændingsstålet monteres i indstøbte rør, og dernæst opspændes, når betonen har nået den fornødne styrke.

Forspænding af en konstruktion medfører, at der kommer trykspændinger i betonen. For en almindelig simpelt understøttet forspændt bjælke er disse trykspændinger størst i bjælkens underside. Dette betyder, at bjælken på grund af forspændingen vil krumme lidt opad. Da betonen efterfølgende kryber på grund af trykspændingerne, vil bjælken krumme mere og mere opad med tiden.

Når bjælken efterfølgende belastes ude i konstruktionen, vil der opstå øgede trykspændinger i bjælkens overside, og trykspændingerne i undersiden fra forspændingen vil blive mindre.

Hvis de samlede belastninger bevirker, at trykspændingerne over hele arealet bliver lige store, betyder det, at der ikke kommer tillægsudbøjninger, hverken op eller ned, på grund af krybning. Elementet vil dog blive kortere på grund af krybning, men det har ingen betydning. Det moment fra egenlast og belastning, der netop bevirker, at trykspændingerne over hele arealet bliver lige store, kaldes balancemomentet. Dette balancemoment fremgår normalt af oplysninger om forspændte elementer fra de enkelte leverandører.

For en del år siden havde en produktionsvirksomhed et problem, hvor en travers kran efter en årrække ikke længere kunne bevæge sig frit ned igennem fabriksshallen, da den stødte mod tagpladerne, der var af en type, der hedder dobbelt TT-plader.

Dette kunne næppe skyldes andet, end at krybning i tagpladerne havde fået pladerne til med tiden at bøje så meget ned, at kranen ikke længere kunne passere.

En beregning efter metoderne beskrevet i Betonbogen sandsynliggjorde efterfølgende, at krybning i tagpladerne var forklaringen.

Det fortælles også, at fabrikken efterfølgende fulgte DMI's vejrudsigter meget nøje, fordi kranen kun kunne passere tagbjælkerne, når der var en kraftig storm, som gav et tilstrækkeligt vindsug til, at tagpladerne løftede sig så meget, at kranen lige kunne passere.

Med tiden fandt man dog en mere permanent løsning.

Det er i praksis svært at vide præcist, hvilken belastning et element udsættes for ud over egenvægten. Det er derfor stort set umuligt at sikre sig fuldstændigt mod ændrede op- eller nedbøjninger med tiden som følge af krybning.

For at begrænse langtidsnedbøjningen af forspændte bjælker eller plader forårsaget af krybning, bruger man ofte den regel, at momentet svarende til dækkets egenvægt plus 65 % af den øvrige, faktisk forekommende langtidsbelastning ikke skal overstige balancemomentet. For broer gælder særlige regler.

10.5.1.3 Krybning og bæreevneberegninger

Krybning i beton har normalt ikke nogen betydende indflydelse på en konstruktions bæreevne. Der er dog en undtagelse ved stabilitetsberegning af slanke søjler påvirket med en excentrisk normalkraft. Den excentriske normalkraft vil give udbøjninger af søjlen, og disse udbøjninger vil vokse med tiden på grund af krybning. Dette vil med tiden nedsætte stabilitetsbæreevnen.

I statisk ubestemte konstruktioner kan krybning føre til spændingsomlejring. I en bjælke over to fag med en mellemunderstøtning, vil krybning i betonen betyde, at spændingerne over mellemunderstøtningen falder lidt, mens spændingerne midt i fagene vil stige lidt.

10.5.1.4 Krybning og hærdeberegninger

Ved spændingsberegninger af hærdnende betonkonstruktioner bør krybning indgå i beregningerne, hvis støbeprocessen skal optimeres. Krybningen vil nemlig bevirke, at tvangsspændingerne fra hærdeprocessen reduceres, og dette betyder igen, at risikoen for at betonen revner på grund af hærdevarmen vil reduceres. Læs mere om hærdeberegninger i afsnit 7 Produktion af frisk beton

10.5.1.5 Bestemmelse af krybeegenskaber

Der er ikke nogen dansk standard til bestemmelse af krybeegenskaber for beton. Teknologisk Institut har udviklet en metode, der hedder TI-B 102, "Tøjninger fra krybning og svind i tidlig alder". Denne metode er specielt udviklet til at bestemme krybning i beton i meget tidlig alder til brug ved hærdeberegninger.

Ved stort set alle større anlægskonstruktioner i Danmark (og også en del udenlandske anlægskonstruktioner i fx Sverige og Tyrkiet) er denne metode blevet anvendt til bestemmelse af krybeegenskaber, hvis der har været krav om spændingsberegninger i forbindelse med planlægningen af støbeprocessen.

Efter metoden udstøbes der 6 cylindre - cirka 130 mm i diameter og 700 mm høje. De tre af dem bliver anvendt til måling af svind, og de tre andre bliver brugt til måling af krybning. Det ene emne er påført last i hele måleperioden, mens de to andre emner skiftevis er påført last. Billedet på Figur 5 viser opstillingen.

Ved metoden bliver der påført last, allerede når betonen er cirka 12 modenhedstimer, det vil sige typisk 12 timer efter udstødning. Derefter bliver de to af emnerne skiftevis

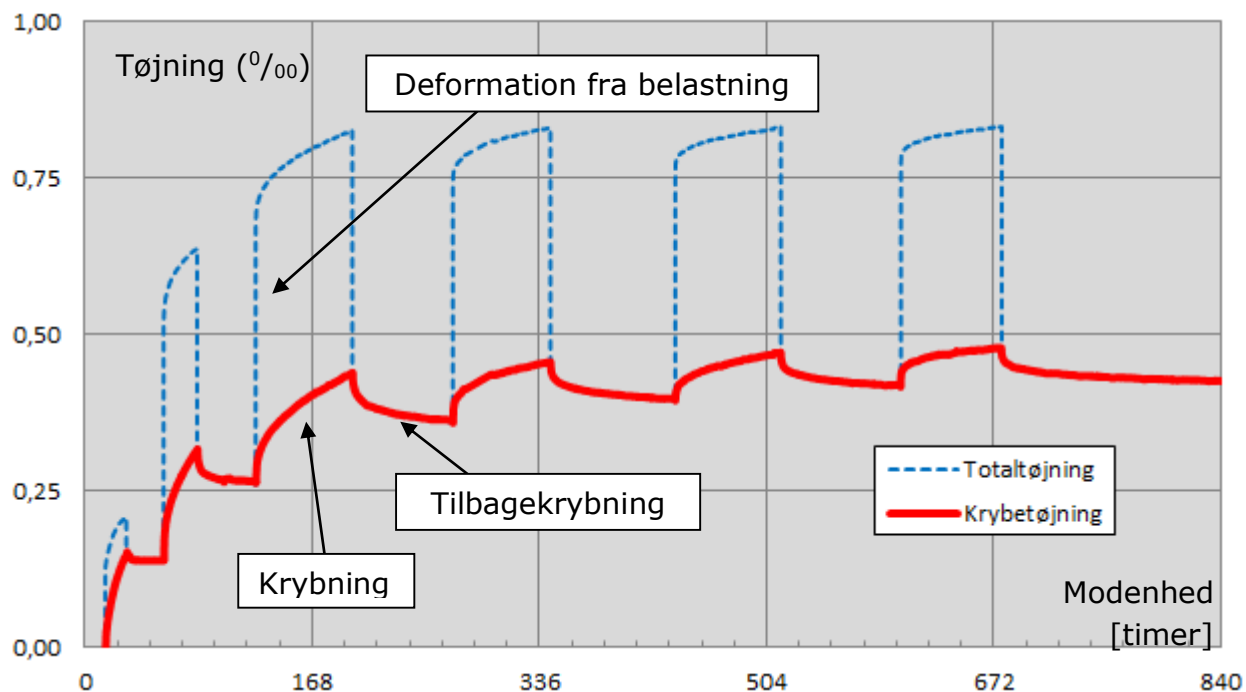
aflastet og belastet, mens det tredje emne hele tiden er belastet. Forsøget afsluttes, når der er gået cirka 4 uger.

På basis af de målte resultater bliver der beregnet en række såkaldte krybeparametre, som beskriver både krybningen og tilbagekrybningen for den aktuelle beton. Disse parametre anvendes dernæst i finite element programmer til hærdeberegninger, fx Teknologisk Instituts hærdeberegningsprogram 4C-Temp&Stress.

Figur 6 viser et eksempel på resultatet for et af de to prøveemner. Resultatet er vist som tøjning i relation til tiden. Tøjning er deformationsændringen pr. længdeenhed. I Figur 6 er tøjningen vist i promille. En tøjning på 0,5 ‰ svarer således til en længdeændring på 0,5 mm over en længde på 1000 mm.



Figur 5. Opstilling til måling af autogent svind og krybning efter TI-B 102. Der måles autogent svind på tre emner og krybning på tre emner. Der måles fra betonens afbindingstidspunkt. Betonen udstøbes i plastrør, som sikrer, at der ikke kan udveksles fugt med omgivelserne.



Figur 6. Eksempel på tøjningsforløb ved bestemmelse af krybning efter TI-B 102. I dette forsøg er lasten påført lidt over 12 timer efter udstøbningen, og så er emnet skiftevis aflastet og belastet indtil sidste aflastning lidt over 4 uger efter støbning. Det ses også af denne krybekurve, at krybningen er størst i betonens meget tidlige fase. I denne sammenhæng er det værd at bemærke, at lasten i den tidlige fase er væsentlig lavere end ved de senere belastninger. Hvis belastningen havde været ens i hele perioden, ville forskellen på størrelsen af den tidlige og den senere krybning have været endnu mere markant.

10.5.2 Litteratur

- [1] <http://www.bef.dk/files/DanskBeton/Betonelement/Statik/Betonlaerebog2010.pdf>
- [2] http://www.betonportal.dk/bind2/6_1.htm
- [3] http://www.betonportal.dk/bind3/8_4.htm