

## 10.2 Betons trækstyrke

*Af Claus Vestergaard Nielsen*

Beton har en lav trækstyrke. Modsat fx stål, hvor træk- og trykstyrken er stort set ens, er betons trækstyrke typisk 10-20 gange mindre end trykstyrken. Et trækbrud i beton er uvarslet, skørt brud, og trækstyrken er meget varierende. Trækstyrken er således en upålidelig størrelse at dimensionere efter. De almindelige dimensioneringsregler for beton forudsætter derfor heller ikke, at beton overhovedet har en trækstyrke.

Trækstyrken er dog vigtig, hvis man anvender uarmeret beton i fx fliser og ved beregning af revnerisiko.



*Figur 1. Betons lave trækstyrke betyder, at beton let revner. Ved at trykke en cylinder på siderne, dannes der en trækspænding på tværs af cylinderen, og trækstyrken kan bestemmes.*

Trækstyrken betegnes normalt  $f_{ct}$ . Den afhænger af de samme forhold som beskrevet under "Betons trykstyrke" i afsnit 10 Hærdnende og hærdnet beton. Trækstyrken kan (med en betydelig usikkerhed) estimeres ud fra trykstyrken.



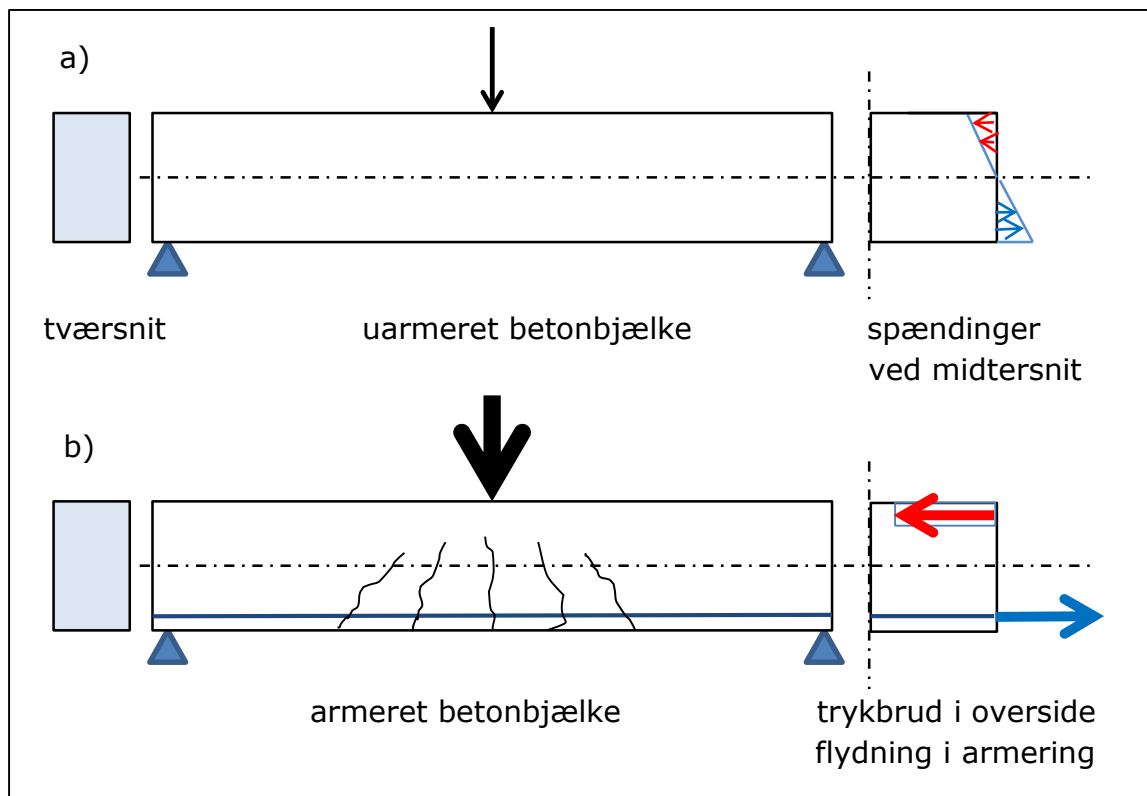
*Figur 2. Når betons trækstyrke overskrides, opstår der revner. En revnet betonkonstruktion ser ikke pæn ud, og revner kan have afgørende negativ betydning for en funktionen – specielt hvis konstruktionen er udsat for ensidigt vandtryk og skal være vandtæt.*

### 10.2.1 Generelt

Hvis en simpelt understøttet uarmeret betonbjælke belastes med en central lodret last som vist i figur 3, vil der opstå normalspændinger i bjælkens tværsnit. I bjælkens overside vil der være trykspændinger og i undersiden trækspændinger. Når trækspændingerne når op på trækstyrken, opstår der en revne i bjælkens underside, og bjælken knækker.

Denne brudform er ikke acceptabel, fordi bruddet sker uvarslet og ved en meget lille påvirkning. Trykspændingerne i bjælkens overside er ved bruddet er således kun nået op på en brøkdel af betonens trykstyrke. For at undgå det uvarslede brud og for at sikre en udnyttelse af betonens store trykstyrke, kan der indlægges armeringsstænger. Disse armeringsstænger vil kunne optage trækkræfterne i bjælkens underside, når betonens trækstyrke overskrides. Bjælkens bærevne vil herved mangedobles.

Hvis belastningen på en armeret bjælke øges, vil trækkræften i armeringen øges, hvilket sker under forlængelse af armeringen. Det betyder, at betonen får stadigt større revner i bjælkens underside.



Figur 3. a) Uarmert betonbjælke udsat for bøjning. b) Armeret betonbjælke udsat for bøjning. Røde pile angiver tryk og blå pile angiver træk. Bjælken på figur vil have en betydelig nedbøjning, hvilket dog ikke er vist på figuren.

Beton og andre stenagtige materialer har typisk meget mindre styrke overfor træk end overfor tryk. Dette skyldes materialestrukturen på mikroniveau. Metaller indeholder atomer i en homogen struktur, der er svær at bryde itu pga. deres indbyrdes sammenhængskræfter. Betons mikrostruktur er derimod meget inhomogen, bestående af mange forskellige hydratiseringsprodukter med porer og mikrorevner på kryds og tværs. Alle disse imperfektioner betyder, at der optræder spændingskoncentrationer, som medfører revneudvikling og brud ved trækpåvirkninger.

### 10.2.2 Bestemmelse af betons trækstyrke

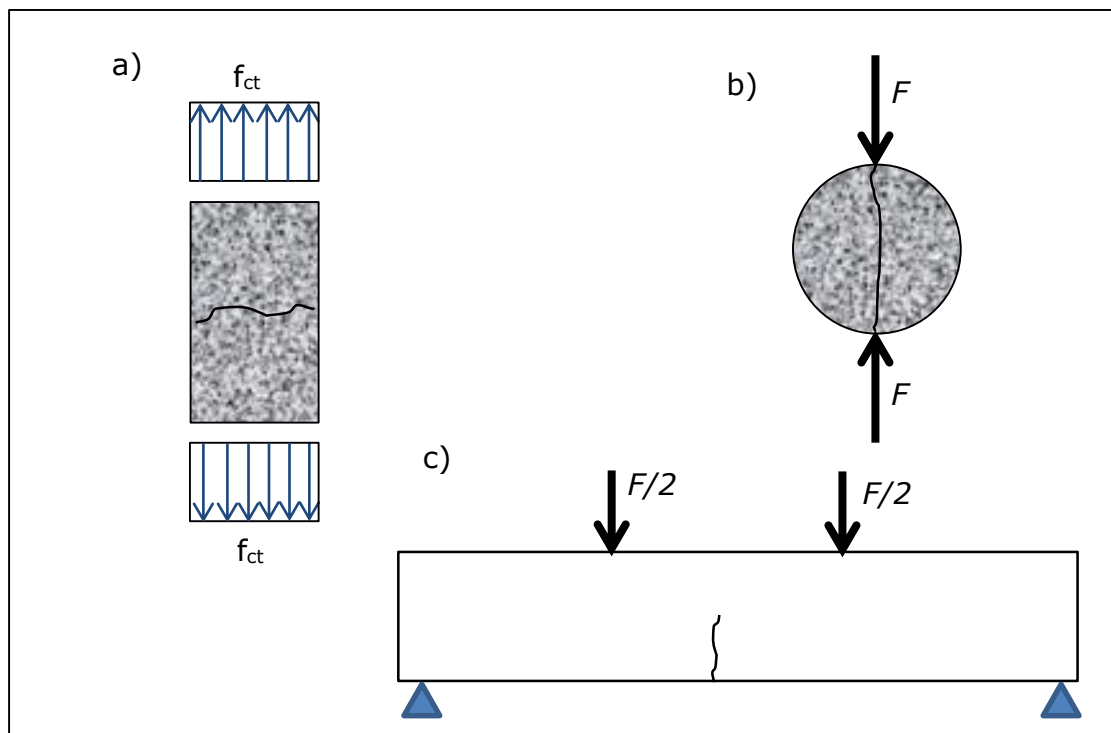
Det er vanskeligt at bestemme betons trækstyrke ved en direkte måling.

Dette skyldes primært, at det er svært at gribe fat i hver ende af et betonprøveemne og overføre et ensartet centralt træk. Ydermere er der tale om ret små kræfter, som er svære at måle med tilstrækkelig præcision.

Derfor anvendes der i betonstanderne to indirekte metoder:

- Spaltetrækforsøg
- Bøjningstrækforsøg

Begge metoder kræver omregning af måleresultatet for at få en bestemmelse af trækstyrken.



Figur 4. Forskellige metoder til bestemmelse af betons trækstyrke.  
a) direkte trækforsøg. b) spaltetrækforsøg. c) bøjetrækforsøg.

Den direkte måling af trækstyrken findes ikke som en standardiseret prøvningsmetode, da kun få laboratorier er i stand til at gennemføre denne prøvning.

Selv om der ikke findes en standardmetode for prøvning af den direkte trækstyrke, findes der mange forsøgsopstillinger på laboratorier, hvor prøveemner fastholdes af specielle gribe-kæber, hvor prøveemnet udformes som et kødben, eller hvor fastholdelsen sker ved pålmede metalplader til prøveemnets endeflader.

Spaltetrækforsøget er beskrevet i DS/EN 12390-6, hvor en standardcylinder trykbelastes liggende langs to diametrale linjer. Denne metode har den fordel, at den kan udføres med en trykprøvningsmaskine, som i forvejen skal benyttes til trykprøvning af beton, og endda på de samme typer prøveemner som anvendes til trykprøvning.

Metoden udnytter, at der opstår trækspændinger på tværs af planet mellem belastningerne. Dette betyder, at cylinderen spalter i to halvdele, når den belastes på tværs. Ud fra prøveemnets dimensioner og den maksimale trykbelastning kan spaltetrækstyrken beregnes ud fra en formel i prøvningsmetoden. Denne betegnes normalt  $f_{ct,sp}$  og kan relateres til den direkte trækstyrke via følgende sammenhæng [3]:

$$f_{ct} = 0,9 \cdot f_{ct,sp} \quad (1)$$

Forholdet mellem direkte trækstyrke og spaltetrækstyrken er dog ikke entydigt fastlagt. Tidligere regnede man således i Danmark [1] med en faktor på 0,6.

Bøjningstrækforsøget er beskrevet i DS/EN 12390-5, hvor små betonbjælker (fx 150x150x600 mm) med kvadratisk tværsnit udsættes for to-punktsbøjning. Belastningen  $F$  registreres indtil brudsituationen, hvor bjælken brækker i to dele. Trækbruddet vil optræde i et tværsnit beliggende mellem de to belastninger.

På baggrund af forsøgsbjælkens dimensioner kan den maksimale trækspænding, der teoretisk set optræder i bjælkens underside, beregnes. Denne betegnes herefter som betonens bøjningstrækstyrke  $f_{ct,fl}$ . Normalt vil bøjningstrækstyrken være 30-50 % højere end den enaksede trækstyrke, men det afhænger noget af prøveemnets dimensioner [3].

Aftræksstyrke. Hvis der fx er støbt et tyndt lag beton uden på et betonvolumen, er det selvfølgelig vigtigt, at dette lag sidder godt fast og ikke "skaller" af. Man kan derfor måle den såkaldte aftræksstyrke, hvor man fra overfladen med et kernebor borer gennem overfladelaget og gennem grænselaget ind i det indre betonvolumen.

Hvis man herefter pålimer et trækhoved på ydersiden og trækker til brud, vil man få bestemt aftræksstyrken, hvis bruddet sker i grænselaget. Hvis bruddet sker i overfladelaget eller i det indre betonvolumen, har man derimod fået bestemt trækstyrken i et af disse lag. Bestemmelse af aftræksstyrke er ofte forbundet med stor usikkerhed og en betydelig spredning. Kravet til aftræksstyrke er derfor som regel formuleret ud fra et statistisk kriterium – fx en nedre karakteristisk værdi bestemt ud fra 5 målinger.

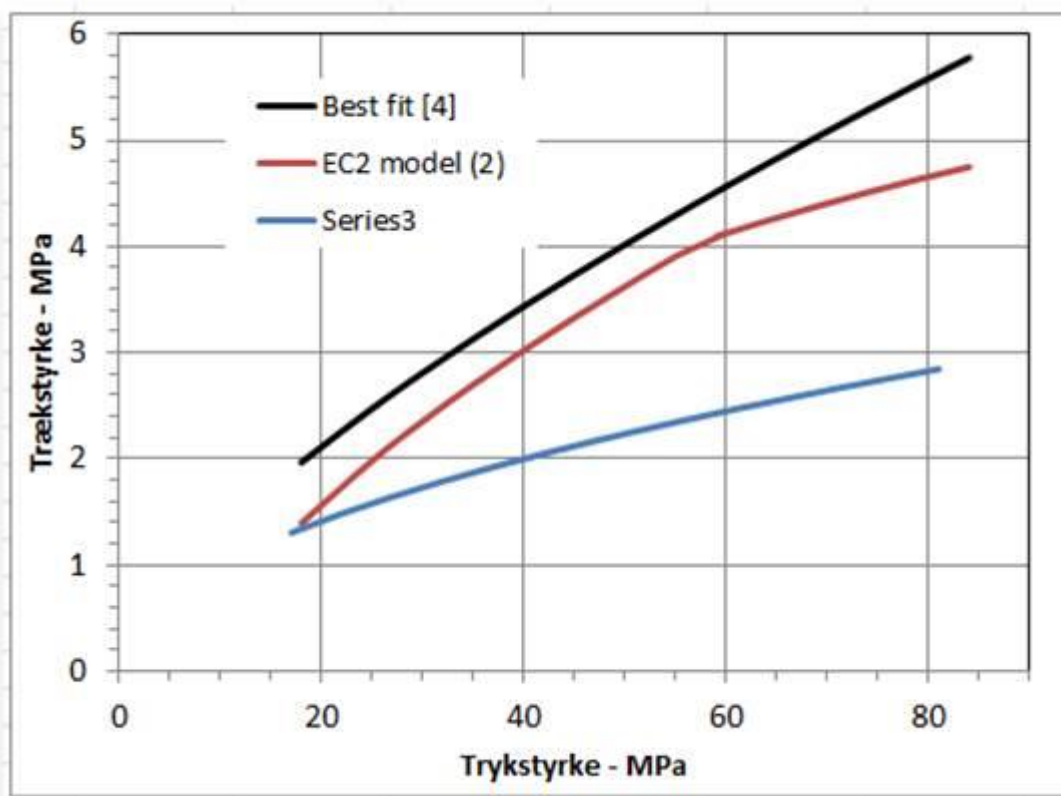
### 10.2.3 Trækstyrkens afhængighed af trykstyrken

Eurocode 2 indeholder en analytisk sammenhæng mellem træk- og trykstyrke for normal beton. Modellen er delt op på hhv. de lave styrkeklasser og de høje:

$$f_{ct} = 0,3 \text{ MPa} \cdot \left( \frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{0,67} \text{ for trykstyrke} \leq \text{C50/60} \quad (2)$$

$$f_{ct} = 2,12 \text{ MPa} \cdot \ln \left\{ 1 - \frac{f_c}{10 \text{ MPa}} \right\} \text{ for trykstyrke} > \text{C50/60}$$

Det skal bemærkes, at det første udtryk i (2) anvender den karakteristiske trykstyrke, mens det andet anvender middelværdi af trykstyrken. Figur 5 illustrerer sammenhængen i EC2 modellen (2).



Figur 5. Trækstyrken  $f_{ct}$  som funktion af trykstyrken  $f_c$ . Knæpunktet i model (2) svarer til overgangen til højstyrkebeton. "Series 3" svarer til DS 411 (3).

Figur 5 indeholder desuden to andre modeller; dels en der stammer fra en større undersøgelse [4], der har samlet mange forsøgsresultater fra hele verden og lavet et best fit, dels den kvadratrodsmodel, som tidligere blev anvendt i Danmark i den nu udgåede betonnorm DS 411. DS 411-modellen giver de laveste værdier. Dette hænger bl.a. sammen med, at spaltetrækstyrken tidligere blev beregnet mere konservativt end den gør nu. DS 411 modellen lød:

$$f_{ct} = \sqrt{0,1 \cdot f_{ck}} \quad (3)$$

Udviklingen af trækstyrken med alder og temperatur følger trykstyrkens, som er beskrevet under "Krybning" i afsnit 10 Hærdnende og hærdnet beton.

Normalt antages det, at trækspændinger opbygges lineærelastisk med træktøjningerne således, at arbejdslinjen udgøres af en ret linje i et  $\sigma$ - $\varepsilon$  diagram. Hældningen svarer til betonens elasticitetsmodul  $E_{cm}$ .

#### 10.2.4 Litteratur

- [1] Herholdt, A.D., Justesen, C.F.P., Nepper-Christensen, P. & Nielsen, A., *Beton-Bogen*, 2. udgave, CtO, 1985.

- [2] Neville, A.M., *Properties of Concrete*, 4. udgave, Longman Group Ltd., 1995.
- [3] DS/EN 1992-1-1, *Eurocode 2, Betonkonstruktioner – Del 1.1 Generelle regler samt regler for bygningskonstruktioner*, CEN.
- [4] Vilanova, et al. "Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete using Conventional Concrete Models", *ACI Materials Journal*, Vol. 109, pp. 587-596.