

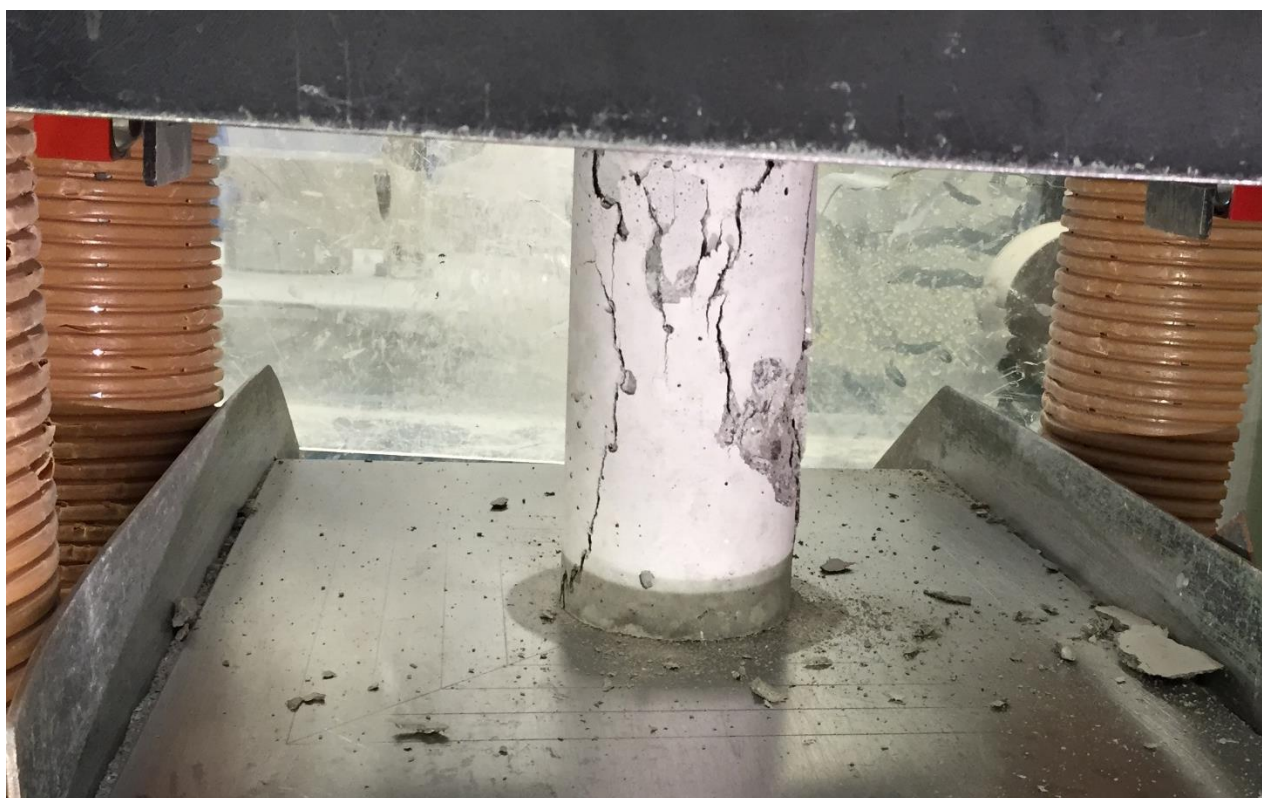
10.1 Betons trykstyrke

Af Claus Vestergaard Nielsen

Beton er et hårdt og stærkt materiale, som kan modstå store trykpåvirkninger. Det maksimale tryk, en beton kan optage, kaldes trykstyrken – eller betonstyrken og i daglig tale ofte bare styrken.

Betons trykstyrke afhænger primært af vand/cement forholdet (v/c) - således at jo lavere v/c jo højere styrke. Desuden har cementtypen, luftindholdet og tilslaget væsentlig betydning for styrken. For alle betoner gælder desuden, at styrken afhænger af betonens alder.

Almindelig beton har en trykstyrke mellem 5 og 50 MPa, og traditionel husbygningsbeton har en styrke på ca. 25 MPa. Beton med en styrke på over 50 MPa betegnes ofte som højstyrkebeton, og det er muligt at fremstille højstyrkebeton med en styrke på op til ca. 400 MPa, hvilket til sammenligning svarer til omkring halvdelen af støbejerns trykstyrke.



Figur 1. Betons trykstyrke måles i en trykpresse. En cylinder indsættes mellem de to trykflader, pumpen startes og kører indtil cylinderen er knust.

10.1.1 Generelt

Trykstyrken er byggematerialet betons vigtigste mekaniske egenskab. Trykstyrken betegnes normalt f_c .

Beton er på mikroskopisk niveau et porøst materiale. Porøsiteten afhænger primært af vand/cement forholdet (v/c), således at højere v/c medfører højere porøsitet. Denne porøsitet har stor betydning for styrken, således at en høj porøsitet medfører en lav styrke. Derfor afhænger styrken også af v/c , således at et højt v/c giver lav styrke, og omvendt giver et lavt v/c en høj styrke. Se også afsnit 6 "Proportionering", hvor denne sammenhæng og cementtypens betydning er beskrevet i detaljer.

Ved høje betontrykstyrker har tilslaget styrke også betydning, og i højstyrkebeton skal tilslaget derfor have en høj knusningsstyrke.

Sammenhængen mellem porøsitet, styrke og v/c betyder også, at de fleste andre mekaniske egenskaber er tæt korreleret med trykstyrken.

Derfor anvendes trykstyrken ofte som den "ene" egenskab, der kan benyttes til samlet at beskrive betonkvaliteten. Ved at kontrollere betonstyrken i en løbende produktion kan ensartetheden i betonkvaliteten vurderes.

I denne artikel beskrives trykstyrken for normal beton. Andre betontyper som letbeton og gasbeton er ikke behandlet.

Betons trykstyrke, f_c er defineret som den enaksede trykpåvirkning, hvor betonen knuses. Eftersom spændingerne inde i en konstruktion varierer stærkt, og sjældent er enaksede, er det valgt at definere f_c ud fra et standardprøveemne udsat for en standardiseret trykprøvning. Eurocode 2 [3] definerer f_c som trykstyrken bestemt på en cylinder med diameter 150 mm og en højde på 300 mm. Det tillades også at benytte en terning (som er lettere at fremstille forme til) med sidelængde 150 mm, hvilket giver trykstyrken $f_{c,cube}$. Som det beskrives i afsnit 10.1.4 er trykstyrken målt på de to typer prøveemner ikke ens - normalt er $f_{c,cube} > f_c$ - alt andet lige.

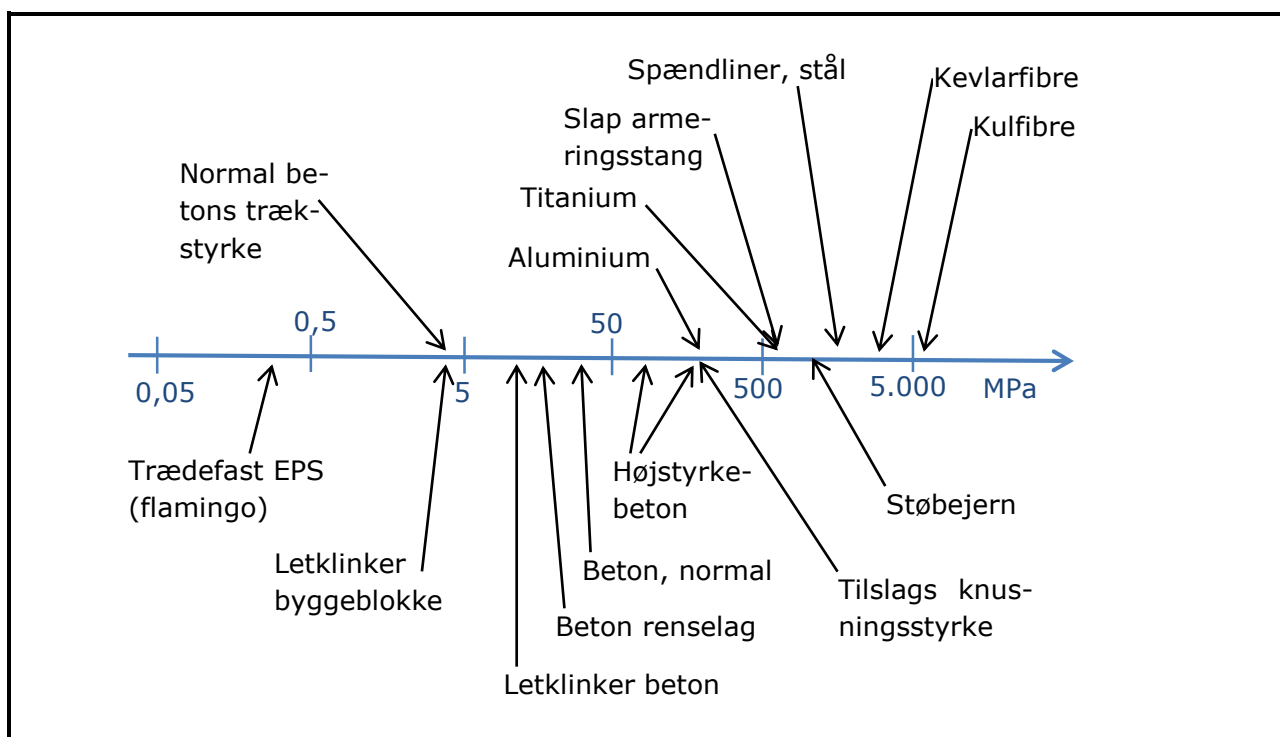
Både cylindre og terninger støbes i forme, afforskalles efter 1 døgn og vandlagres i 28 døgn ved 20 °C. Derefter trykprøves de i en maskine, hvor to parallelle stålplader langsomt trykkes sammen af en hydraulisk presse. Den tryklast som registreres, når betonen lige netop knuses, omregnes derefter til en jævnt fordelt spænding over prøveemnets areal vinkelret på kraften $f_c = P_{brud} / A$.

Årsagen til at der findes to ligeværdige faconer (cylindre og terninger) på betonprøveemner skal findes i forskellige nationale traditioner. Danmark benytter normalt cylindre, mens Norge og Sverige har tradition for terninger - ligesom det er tilfældet i England. Som det beskrives senere, afhænger styrken dels af prøveemnets form og dels af dets størrelse. Derfor er det naturligvis vigtigt at vide, hvilken metode der er benyttet, når man får oplyst styrkeresultater og styrkeklassen.

I Eurocode 2 klassificeres beton efter den karakteristiske trykstyrke. En beton med en karakteristisk trykstyrke på fx 30 MPa målt på cylindre betegnes styrkeklasse C30/37, hvor det er underforstået, at trykstyrker angives i MPa eller N/mm². Det første tal i styrkeklassen er cylinderstyrken og det andet tal efter skråstregen er terningstyrken. Eurocode 2 fastlægger derfor for hver styrkeklasse en omregning mellem cylinderstyrke og terningstyrke.

Karakteristisk trykstyrke skrives f_{ck} og dækker over en sikkerhedsmæssig betragtning, når man skal anvende en trykstyrke til dimensionering. Hvis man trykprøver et stort antal cylindre fra den samme betonproduktion og herudfra beregner middelværdien, vil ca. halvdelen (afhængigt af fordelingsfunktionen) af alle prøverne være svagere end denne værdi. Den karakteristiske styrke er en statistisk værdi beregnet ud fra middelværdi og spredning, som kun 5 % af alle trykprøver vil ligge lavere end. f_{ck} er derfor den trykstyrke, der med stor sikkerhed vil være til stede i konstruktionen

Det typiske krav til styrkeklasse for normal konstruktionsbeton er C12/15 til indendørs beton og fundamenter, og C25/30 til hårdere påvirkede konstruktioner, fx indendørs vægge og søjler, terrændæk og betonfacader.



Figur 2. Eksempler på tryk- og trækstyrke for forskellige materialer lige fra isoleringsmaterialer til højteknologiske kulstofmaterialer. Hvor de fleste andre byggematerialer har en indbygget styrke – som kun kan påvirkes meget lidt – er beton kendetegnet ved at kunne skræddersys i et bredt styrkeområde bl.a. ved valg af cementtype, tilslag og v/c. Dette er en vigtig årsag til at beton er så udbredt over hele kloden. Bemærk den logaritmiske akseinddeling.

Da der er en sammenhæng mellem betons styrke og betons holdbarhed overfor miljøpåvirkninger som fx frost-tø og saltpåvirkning, skal betoner til fx broer, altaner og svømmebassiner overholde højere styrkekrav – fx C35/45, C40/50 eller højere.

I mange tilfælde bliver der krævet højere styrker end ovenfor anført. Fx er det almindeligt, at forspændte element-bjælker i bygninger – også indendørs – fx er i styrkeklasse C45/55.

Styrken på udsatte dele af broer kræves typisk i klasse C40/50 af hensyn til holdbarheden – også selv om der måske kun beregningsmæssigt er brug for en cylindertrykstyrke på 20 eller 25 MPa.

Eurocode 2 kan anvendes op til betonstyrkeklasse C90/105. Normalt betegner man beton med f_c over ca. 50 MPa som højstyrkebeton. Det er muligt at opnå trykstyrker på op til flere hundrede MPa ved ekstremt lave v/c , tilsætning af mikrosilica og anvendelse af specielt stærke tilslag.

10.1.2 Betons tryk-arbejdslinje

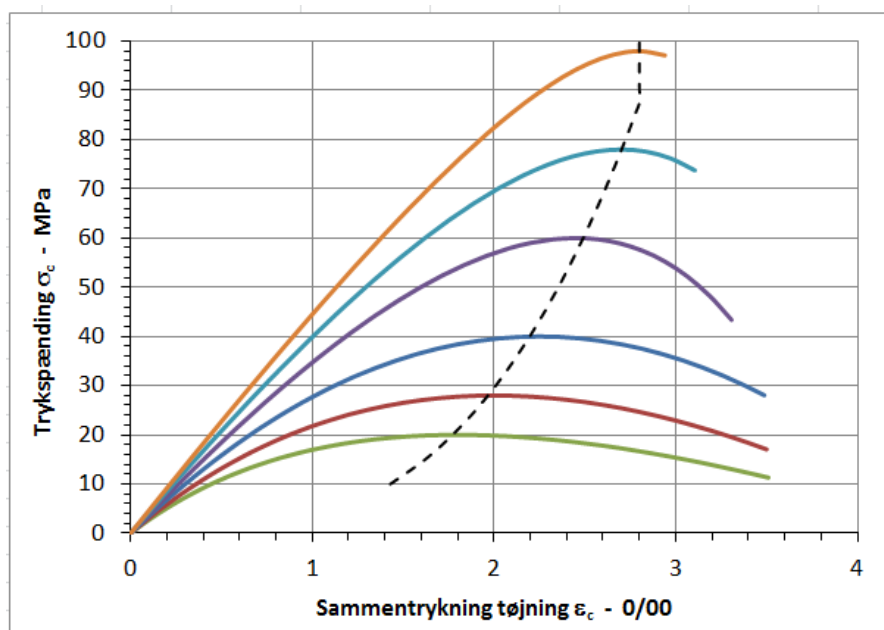
Når beton udsættes for enakset trykpåvirkning, sådan som det fx sker i en trykprøvningsmaskine, kan man optegne sammenhængen mellem prøveemnets relative sammentrykning ($\varepsilon_c = \text{tøjning} = \text{sammentrykning pr. længdeenhed}$) og den tilhørende trykspænding σ_c . Denne sammenhæng benævnes trykarbejdslinjen og beskriver betonens eftergivelighed eller stivhed. Trykarbejdslinjen benyttes bl.a. til at beregne nedbøjninger og bæreevne af betonbjælker.

Eurocode 2 angiver en model for faconen af trykarbejdslinjen for beton:

$$\sigma_c(\varepsilon_c) = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} \cdot \frac{1,05 \cdot E_c \cdot \varepsilon_{c1} - f_c \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}}{1 + 1,05 \cdot E_c \cdot \frac{\varepsilon_c}{f_c} - 2 \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{c1} = 0,7 \cdot f_c^{0,31} \leq 2,8 \text{ 0/00}$$

Hvor symbolerne E_c betegner betonens sekant E-modul (se "E-modul" behandlet i afsnit 10 Hærdnende og hærdnet beton) og ε_{c1} er tøjningen svarende til toppunktet. Ved indsættelse af toppunktets tøjning ε_{c1} i (1) ses det, at spændingen $\sigma_c(\varepsilon_{c1}) = f_c$ opnås.



Figur 3. Trykspændingslinjer optegnet ud fra analytisk udtryk – se (1) – i Eurocode 2 for forskellige trykstyrker fra ca. 20 MPa til knap 100 MPa. Den stiplede linje angiver placering af toppunktet (ϵ_{c1} ; f_c) på de enkelte arbejdslinjer.

Normalt er trykspændinger og tilhørende sammentrykninger negative størrelser, men i (1) og i resten af kapitlet er der benyttet positive værdier for tryk og negativ for træk. Værdier for materialeegenskaber såsom E_c og f_c , regnes derimod altid positive.

På arbejdslinjens opadgående del kan betonens E-modul (stivhed) aflæses. Toppunktet angiver betonens trykstyrke, eller den maksimale trykspænding, som betonen kan modstå.

Som det fremgår af Figur 3 bliver E-modulet højere (linjerne stejlere), når betonstyrken stiger og toppunktet (styrken) flytter sig opad (højere styrke) og udad (større tøjning). Det ses også, at jo stærkere betonen bliver, jo mere veldefineret bliver toppunktet. Dette betyder, at en højstyrkebeton oftest udviser et pludseligt brud, når spændingen når trykstyrken

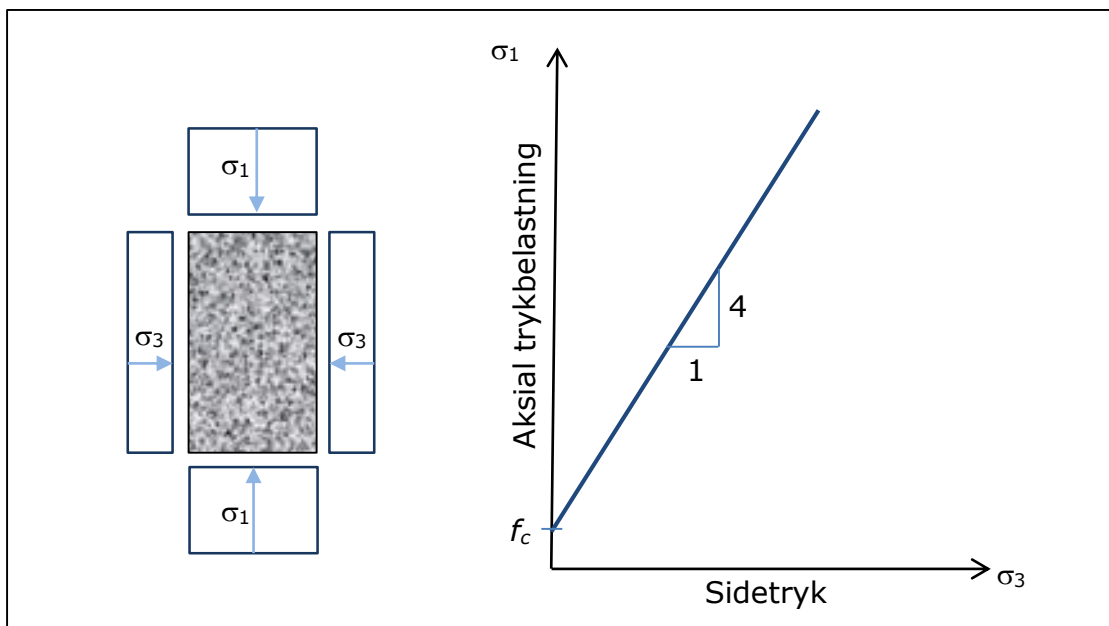
Det er almindeligt, at prøveemner af højstyrkebeton nærmest sprænges i trykpressen. Årsagen hertil er, at ved høje betonstyrker har cementpasta og tilslag omtrentlig samme styrke, hvorfor bruddet sker igennem stenene fremfor rundt om stenene, som det er tilfældet for normal- og lavstyrkebeton.



Figur 4. Som det ses på billedet, er der i denne opstilling anordnet et afløbsrør, hvori cylinderen kan anbringes, inden den trykkes. Herved kan betonstykker forhindres i at flyve rundt i hele lokalet, når den i elastiske energi ophobet i maskinen frigøres ved betonens brud. Det er vigtigt, at røret er opslidset, så cylinderen ikke påføres et ydre tryk, der ville "øge" trykstyrken - se nedenfor i figur 5.

10.1.3 Betons brudbetingelse

Hvis en betoncylinder udsættes for et radiært sidetryk, vil man konstatere, at betonen kan modstå en større aksial lastpåvirkning, end hvis der ikke var noget sidetryk. For at kunne medtage denne effekt i dimensionering af beton udsat for fleraksede trykpåvirkninger, er det nødvendigt at opstille en brudbetingelse, som beskriver denne sammenhæng.



Figur 5. Betoncylinder udsat for flerakset trykpåvirkning i form af trykspændingerne $\sigma_1 \geq \sigma_3$. Diagrammet til højre angiver hvordan trykstyrken vokser 4 gange, når sidetrykket vokser 1 gang. Denne sammenhæng skyldes glidningsbrudbetingelsen i (3).

Allerede i det 18. århundrede blev der opstillet modeller der beskriver, hvordan materialer går i stykker. På dette tidspunkt var beton ikke "opfundet", men modellerne anvendtes på jord, sten, træ mv. Det viste sig dog senere, at datidens modeller også kan anvendes på beton. De mest anvendte brudbetingelser til beton er:

- Adskillelsesbrud, hvor materialedelene på hver side af et snit fjerner sig fra hinanden i en retning vinkelret på snittet. Denne situation opstår for beton, når trækspændingen overstiger betonens trækstyrke. Brudmåden beskrives nærmere under "Betons trækstyrke" i afsnit 10 Hærdnende og hærdnet beton.
- Glidningsbrud, hvor friktionshypotesen forudsiger et glidningsbrud langs med et brudsnit, hvor forskydningspændingen τ overstiger materialets modstandsevne.

Brudbetingelsen for et adskillelsesbrud kan skrives som:

$$\sigma_{brud} = -f_t \tag{2}$$

hvor f_t angiver betonens enaksede trækstyrke, se "Betons trækstyrke" i afsnit 10 "Hærdnende og hærdnet beton".

Betingelsen for et glidningsbrud kan skrives som:

$$\tau_{brud} = \pm(c + \mu\sigma) \tag{3}$$

hvor c betegner kohæsionen og μ friktionskoefficienten. Både c og μ er positive værdier, der beskriver betons indre brudmodstandsevne. Som det fremgår af (3) vokser modstandsevnen af et brudsnit, når trykspændingen σ vinkelret på snittet øges. Når der

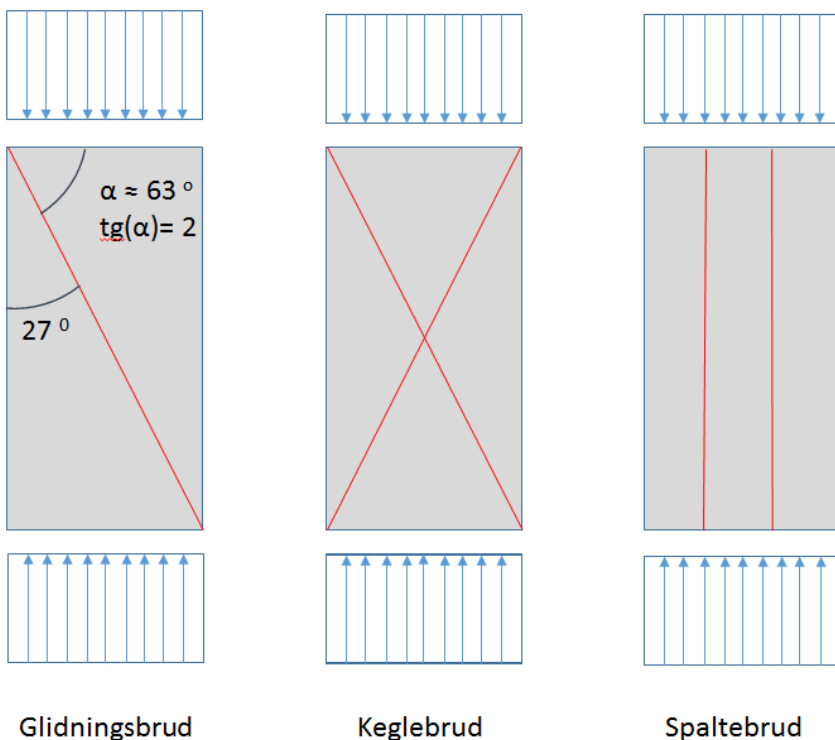
ikke findes nogen normalspænding på snittet er brudmodstanden givet ved materialets kohæsion alene.

Friktionskoefficienten μ er forbundet til friktionsvinklen φ igennem relationen:

$$\mu = \tan(\varphi) \tag{4}$$

Laboratorieforsøg med betonemner udsat for forskellige trykspændinger og samtidigt fremprovokeret glidningsbrud, hvor modstandsevnen τ_{brud} måles, har vist, at friktionskoefficienten for normal beton er ca. $\mu \approx 0,75$, hvilket giver $\varphi \approx 37^\circ$.

Ud fra brudbetingelsen kan man også beregne, hvordan brudsnittet ligger i forhold til belastningsretning, når man udsætter beton for enakset tryk. Snittet med forskydningsspændingen τ_{brud} danner vinklen $45^\circ - \varphi/2 \approx 27^\circ$ med kraftretningen, hvilket stemmer overens med de brudkegler, som oftest observeres under en standard trykprøvning. Denne vinkel betyder, at et trykprøveemne helst skal have et længde/diameter forhold på mindst 2, ellers kan brudfiguren ikke udvikles frit indenfor prøveemnets højde.



Figur 6. Typiske brudfigurer ved trykprøvning af beton. DS/EN 12390-3 giver eksempler på hvordan såvel terninger og cylindre typisk ser ud i brudsituationen, herunder også anvisninger på, hvordan de ikke bør se ud.

Der observeres også nogle gange adskillelsesbrud (af betonfolk ofte kaldet spaltebrud) i prøveemnet, hvor brudsnittene forløber næsten parallelt med kraftretningen. Det skyldes ofte, at der optræder trækspændinger på tværs af lastretningen – fx hvis cylindrens endeflader på grund af fejl i støbeformen er koniske. En anden forklaring kan være,

at beton er et inhomogent materiale med pasta og tilslag. Derved kan der opstå spændingskoncentrationer om fx en stor sten, som igen kan medvirke til spaltebrud. Spaltebrud ses oftest på højstyrkebetoner.

10.1.4 Trykstyrkens afhængighed af prøveemner og prøvningsbetingelser

Prøveemnets facon

Som beskrevet i 10.1.1 giver prøvelegemer udformet som cylindre og som terninger ikke samme styrke. Hvis man støber begge typer prøveemner ud af den samme betoning og prøver dem i den samme trykpresse ved samme alder osv. - så vil man opdage, at terningerne giver markant højere trykstyrke end cylindrene, dvs. $f_c < f_{c,cube}$.

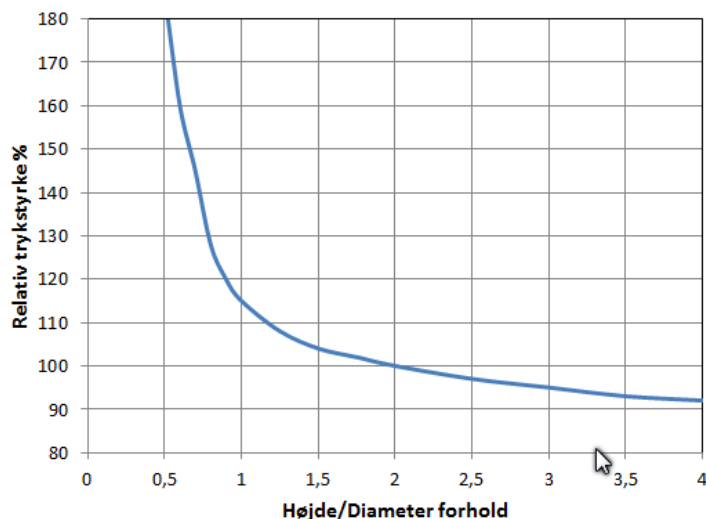
Årsagen hertil er, at lastpladerne ved friktion hindrer prøvelegemerne i at udvide sig frit på tværs. Derved "forurenes" den enaksede spændingstilstand tættest ved lastpladerne. Trykpladerne har dermed en sammenholdende effekt på prøveemnet og denne effekt er på grund af geometrien mest markant for terningerne.

For at minimere disse friktionskræfters indflydelse skal man anvende prøveemner, hvis højde er tilpas meget større end dets dimension på tværs af kraftretningen, således at effekten fra lastpladerne ikke har indflydelse på betonen i midten af prøveemnet. Det betyder, at prøveemnets højde være mindst det dobbelte af bredden. Derfor har man valgt, at standardprøvecylindre udføres med højde/diameterforhold på 2. Terninger opfylder slet ikke dette krav, hvorfor der måles større styrker.

Normalt anses cylindertrykstyrken f_c for betonens "sande" trykstyrke og benyttes også som sådan i Eurocode 2. Mange forskere har søgt at skabe en entydig sammenhæng mellem terning- og cylindertrykstyrke, men uden fremgang. Normalt benyttes følgende tommelfingerregel ved omregning mellem de to standardprøveemner:

$$f_c \approx 0,8 \cdot f_{c,cube} \quad (5)$$

Denne sammenhæng benyttes bl.a. i Eurocode 2, men den er ikke særlig præcis og specielt ved lave trykstyrker kan den give usikre resultater. For højstyrkebeton er omregningsfaktoren nærmere 0,9 og endda højere, når betonstyrken overstiger 100 MPa.



Figur 7. Betons trykstyrke målt på cylindre med forskellige højde-diameter-forhold [1]. Baseret på beton med f_c omkring 15 MPa.

For cylindre med varierende højde-diameter-forhold er der ligeledes en stærk indflydelse på trykstyrken. Dette gælder specielt for cylindre med højde/diameter mindre end 1,5, hvor den sammenholdende effekt fra trykpressens lastplader får en effekt svarende den, som er beskrevet ovenfor for terningprøveemner. Effekten er også her størst for lave betonstyrker.

Prøveemnets størrelse

Et stort prøveemne indeholder mere materiale end et lille og derved også en større sandsynlighed for materialefejl, eller defekter, som kan være årsag til et brud. Den gennemsnitlige styrke af prøveemner falder således med voksende volumen.

I forhold til en standardcylinder (Ø150x300 mm) vil styrken af en cylinder med dobbelt diameter være faldet med knap 10 % og knap 15 % for en cylinder, der har tre gange så stor diameter. Omvendt vil en cylinder med den halve diameter have 5-7 % højere styrke end standardcylinderen [2].

Størrelseseffekten vil naturligvis også være til stede i betonkonstruktioner. Samtidig vil den statistiske variation udtrykt ved spredningen vokse med faldende prøveemne-størrelse. Jo større prøveemne man benytter, jo mere korrekt trykstyrke opnår man. Omvendt er der naturligvis også en praktisk grænse for, hvor store prøveemner man kan håndtere. Fx betyder standardcylindre Ø150/300 mm arbejdsmiljøproblemer med for tunge løft på danske betonlaboratorier.

Prøveemnets størrelse skal også være tilstrækkeligt i forhold til tilslaget største stenstørrelse. Hvis prøveemnet ikke er tilstrækkeligt stort i forhold til tilslaget, vil prøveemnet ikke være repræsentativt for materialet og dermed ikke repræsentativt for dets styrke. Normalt skal prøveemnets mindste dimension være mindst 3 gange større end den største stenstørrelse for at give troværdige og repræsentative resultater.

Effekt af lagringsforhold

Standardprøveemner skal i henhold til DS/EN 12390-2 lagres enten i vandbad, eller i en atmosfære med RH > 95 % indtil prøvning. I begge tilfælde under konstant temperatur (20 °C) og senere prøves uden tørring.

Lagring i vandbad er langt den sikreste metode, fordi det i praksis er meget vanskeligt at opretholde en luftfugtighed på RH > 95 % i rum, hvortil der er adgang. Imidlertid vil styrken blive lavere, hvis luftfugtigheden er lavere, hvorfor lagring i vandbad vælges af alle laboratorier med faglig indsigt.

Når et prøveemne tages op af vandet i lagringskarret starter en langsom udtørring fra emnets overflade. Det er vigtigt, at prøveemnet kun får lov til at tørre i ganske kort tid inden trykprøvningen, da styrken af prøvelegemet ellers vokser. Eventuel transport af prøveemner fra lagringsrummet til laboratoriet skal foregå indpakket i plast og våde sække eller i beholdere med vand for at undgå udtørring.

Udtørringen starter fra de største porer i cementpastaen og bevirker et indre undertryk (kapillarspændinger) i betonens porer. Under en trykprøvning skal det indre undertryk overvindes af trykpressens ydre trykbelastning og derved opnås en højere brudlast, end hvis prøveemnet var prøvet i våd tilstand.

Det er derfor muligt, uretmæssigt at opnå en højere styrke ved at lade prøveemnerne tørre inden prøvning. Denne fremgangsmåde er ikke tilladt i forhold til prøvningsmetoden. Effekten af delvis udtørring er reversibel, idet en genopfugtning af prøveemnet vil medføre en reduktion af den målte trykstyrke.

Andre effekter

Prøvningsstandarderne fastlægger krav til de geometriske tolerancer for prøveemnerne, som anvendes til trykprøveforsøg. Såfremt prøveemnets endeflader ikke er plane, vil der opstå spændingskoncentrationer og trykstyrken vil blive målt lavere end den sande trykstyrke. Det betyder, at den betonproducent, der anvender forme, der ikke opfylder planhedskravene, vil straffe sig selv ved at få for lave styrker.

Prøvningsstandard DS/EN 12390-3 foreskriver, at prøveemnets endeflader skal tilrettes vha. enten planslibning eller afretning med et egnet materiale. Tidligere blev der ofte anvendt bløde mellemlæg af masonit mellem endeflader og lastplader for at udjævne evt. spændingskoncentrationer, men denne metode er ikke længere tilladt i standarderne.

DS/EN 12390-3 beskriver også, hvilken hastighed lasten skal påføres med. Der foreskrives lasthastigheder, hvor bruddet i prøveemnet opnås efter få minutters lastpåvirkning. Eksperimenter har vist, at betonens trykstyrke øges med voksende lastpåføringshastighed, hvorfor det altid skal sikres, at lasten ikke påføres for hurtigt. Ved tidligere tiders trykpresser med håndpumper var det almindeligt, at en laborant med store overarme pumpede ekstremt hurtigt for at "opnå" store styrker.

Prøvningsmetoden i DS/EN 12390-3 fastlægger lasthastigheden under trykprøvning til ca. 0,6 MPa/sekund. Et trykstyrke på 30 MPa opnås derved efter ca. 50 sekunder.

10.1.5 Trykstyrkens udvikling med alder og temperatur

Nogle få timer efter blandingen (afbindingstidspunktet) begynder betonen at få en fast og sammenhængende struktur [1,2]. Fra afbindingstidspunktet kan betonen ikke bearbejdes og fx ikke afrettes. Først er betonens styrke lav, men med tiden foregår der en kemisk hydratiseringsproces, der gør at betonen opnår sin slutstyrke. Hastigheden af denne kemiske proces foregår hurtigere ved høje temperaturer end ved lave.

Normalt anvendes alderen 28 døgn = 4 uger som den tid, det tager betonen at opnå sin slutstyrke. Når der anvendes et antal døgn deleligt med 7 – fx 28 døgn – opnår man den fordel, at man normalt ikke skal foretage styrkeprøvning på beton i weekends. Beton støbt en tirsdag skal også prøves en tirsdag osv.

Uanset anvendelsen af 28 døgn som en normal prøvningstermin, vil nogle betoner – fx med højt flyveaskeindhold - have en ikke ubetydelig styrketilvækst efter denne termin. Langtidsstyrker kan udmærket være 25-100 % højere end 28-døgns styrken.

I mange situationer er der behov for at belaste konstruktionen tidligere end 4 uger. Dette er fx tilfældet for brokonstruktioner, der skal opspændes med kabler, eller beton-elementer, der skal løftes og håndteres kort tid efter støbning.

Eurocode 2 indeholder en formel for, hvorledes trykstyrken udvikler sig med alderen t i døgn:

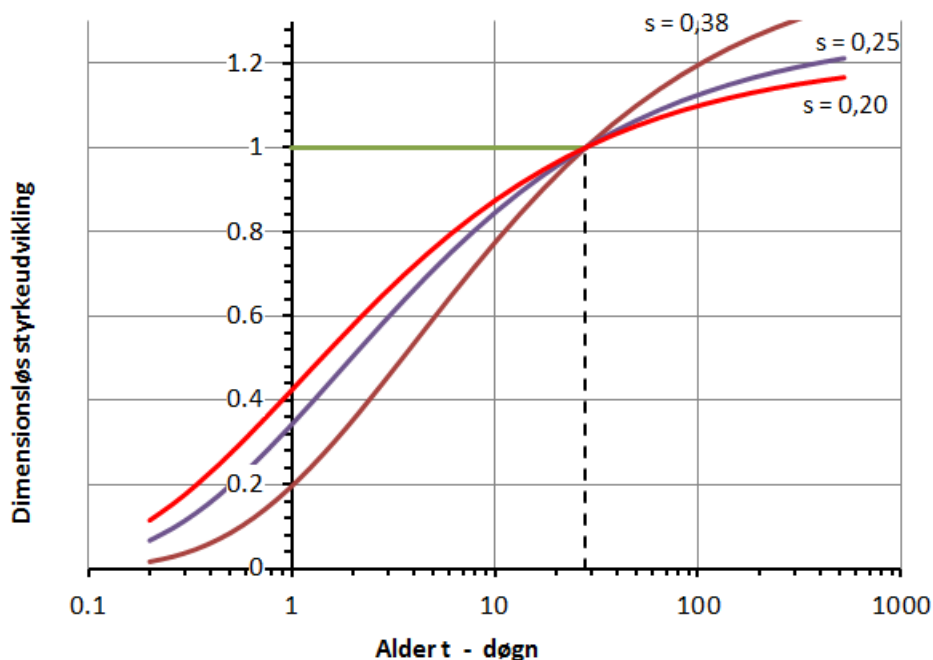
$$f_c(t) = \beta_{cc}(t) \cdot f_c \quad (6)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left(1 - \sqrt{\frac{28d}{t}} \right) \right\} \quad (7)$$

Udtrykket medfører naturligvis, at $f_c(t = 28d) = f_c$. Parameteren s bestemmer kurvens hældning og dermed styrketilvækstens hastighed. I Eurocode 2 angives tre forskellige hastighedsparametre ($s = 0,20$; $0,25$ og $0,38$). Disse tre kurver indikerer spektret for udvikling af trykstyrke med betonens hærdalder. Efter 1 døgn opnås fx 42 % af 28 døgns styrken for den hurtige model ($s = 0,20$), mens den langsomme kun har opnået ca. det halve efter 1 døgn.

Parameteren s afhænger primært af cementtypen samt af betonsammensætningen. Jo højere s -værdi jo lavere tidlig styrke – alt andet lige.

Betonproducenten kan oplyse styrkeudviklingen for en given betontype. Det ses også af diagrammet i figur 8, at styrketilvæksten fortsætter med noget lavere hastighed efter de 28 døgn.



Figur 8. Diagram med $\beta_{cc}(t)$ i enakset trykforsøg. Bemærk logaritmisk tidsakse. Den stiplede linje angiver alder 28 døgn.

Effekt af temperaturen

Betonens alder t i ovennævnte model forudsætter, at betonen har konstant temperatur lig med 20 °C i hele hærdningsperioden. Dette svarer til hærdnetemperaturen, som benyttes til vådlagring af standardtrykprøveemner, se "afsnit 10.1.4. Når betonen hærdner under andre temperaturer end 20 °C, sker der en udvikling, som går stærkere, hvis temperaturen er højere end 20 °C, og langsommere hvis temperaturen er lavere end 20 °C.

Derfor ses det fx ofte, at betonelementfabrikker anvender varmhærdning, hvor der fx cirkuleres varmt vand eller damp i støbebordene. Dette accelererer hærdningen og man kan afforme og håndtere elementerne allerede få timer efter udstøbningen, hvilket øger fabrikkens produktivitet.

I Danmark anvendes typisk en model for sammenhængen mellem temperatur og hærdningshastighed, der kaldes modenhedsfunktionen, eller Arrhenius' modenhedsfunktion [4].

Svante Arrhenius er en berømt svensk fysiker/kemiker (1859-1927), der fik Nobelprisen i kemi i 1903. Arrhenius beskrev blandt andet sammenhængen mellem hastigheden af en kemisk reaktion og temperaturen.

Modenhedsfunktionen for beton består af en relativ hærdehastighed H , der er en funktion af betontemperaturen T . En høj temperatur medfører en høj H og ved frostgrader er H tæt ved nul, svarende til at hærdningen går i stå i frossen beton.

Modenheden af beton defineres som den ækvivalente hærdealder betonen ville have, hvis den var hærdet ved 20 °C og beregnes vha. udtrykket:

$$\Delta M(T) = H(T) \cdot \Delta t \quad (8)$$

Hvor Δt = tidstilvæksten ved en given betontemperatur T , H = hærdehastigheden svarende til betontemperaturen og ΔM = tilvæksten i modenhed.

Funktionen $H(T)$ kan udtrykkes som:

$$H(T) = x = \frac{\text{hastighed ved } T \text{ }^\circ\text{C}}{\text{hastighed ved } 20 \text{ }^\circ\text{C}} \approx \exp \left[\frac{E}{R} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{273+T} \right) \right] \quad (9)$$

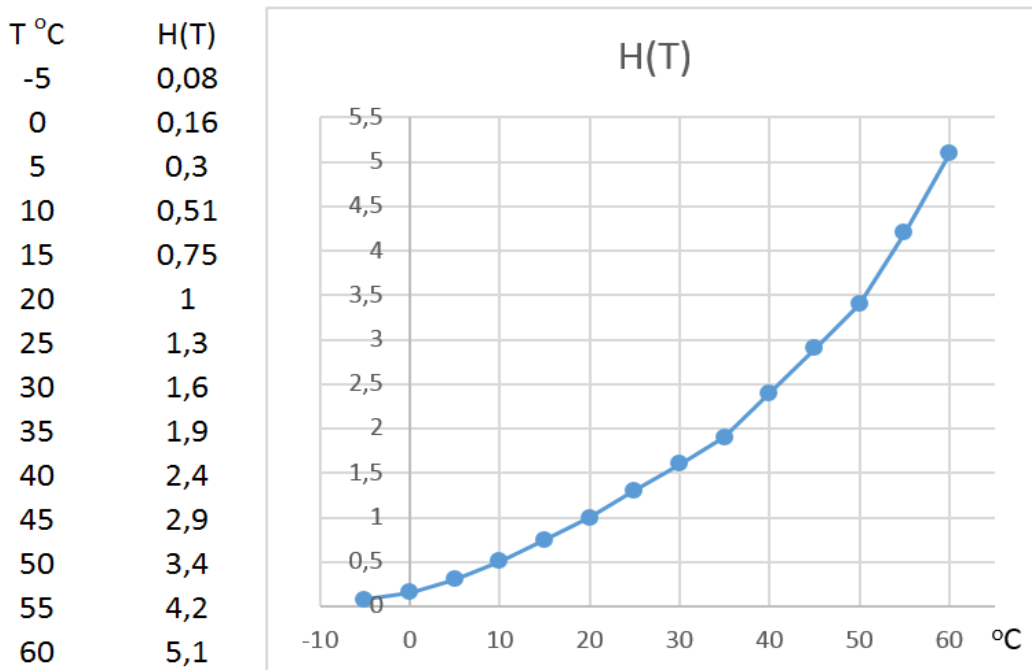
Hvor:

E = karakteristisk aktiveringsenergi

som kan sættes til:

- 33.500 J/mol for $T \geq 20^\circ\text{C}$
- $33.500 + 1.470 \cdot (20 - T)$ J/mol for $T < 20 \text{ }^\circ\text{C}$

R = Gaskonstanten = 8.314 J/mol °C



Tabel 1. Den relative hærdehastighed $H(T)$ som funktion af betontemperaturen. Ved andre temperaturer benyttes interpolation mellem de viste værdier.

Ved referencetemperaturen 20 °C er hærdehastigheden lig med 1. Det betyder i praksis, at betonens hærdeudvikling (fx styrkeudvikling) tidsmæssigt er som for et prøvelegeme i lagringskarret på laboratoriet. Ved højere temperaturer er hærdehastigheden større

end 1. Hvis hærdhastigheden fx er 2, betyder det, at den tilvækst i styrken, der fx nås på 12 timer i lagringskarret ved 20 °C, kan opnås på 6 timer.

Tabel 1 indeholder værdier for $H(T)$ svarende til temperaturer indenfor det for beton normale temperaturspektrum. Reaktionshastigheden fordobles omtrent for hver 15 °C temperaturen øges. Som det også ses, vil en beton ved fx 0 °C have en relativ hærdhastighed på 0,16, hvilket betyder, at 28-døgns styrken (målt ved 20 °C) først opnås efter $28/0,16 = 175$ døgn, svarende til ½ år.

I nogle lande benyttes såkaldt match-curing til at vurdere den rigtige temperaturafhængige styrke ved en given alder. Ved denne metode udstøbes et antal prøveemner, samtidigt med støbningen af konstruktionen. Prøveemnerne placeres i et temperaturstyret vandbad, hvor termostaten styres af indstøbte termofølere i den konstruktionsdel, som skal vurderes. På den måde får prøveemnerne samme temperaturhistorie som konstruktionen og dermed samme modenhed.

Nyere undersøgelser som [6] viser, at den i tabel 1 angivne hastighedsfunktion overvurderer styrken ved høje temperaturer. Prøvningsmetoden TI-B 103, der ligger til grund for bestemmelse af hastighedsfunktionen, anvender et temperaturspektrum på fra 5 °C til 40 °C og tider fra 12 timer til 48 timer. Alligevel anvendes hastighedsfunktionen på byggepladsen fx op til 60 °C og frem til fx 10 døgn. Denne "ekstrapolation" kan give en overvurdering af trykstyrken i konstruktioner, der har oplevet en temperaturhistorie med høje temperaturer.

På byggepladsen vil beton opleve en varierende temperatur i løbet af sin hærdperiode – og aldrig en hærdning ved en konstant temperatur på 20 °C. Hvis betonens temperaturhistorik inddeles i et antal tidsintervaller med tilnærmet konstant temperatur, kan man beregne $H(T)$ for hvert interval, modenhedstilvæksten for hvert interval ud fra (8) og til slut beregnes modenheden ved at lægge tilvæksterne sammen. Modenheden kan bl.a. benyttes til at vurdere trykstyrken ved simpelthen at erstatte hærdalderen t i (6) med modenheden M .

10.1.6 Bestemmelse af trykstyrken på en eksisterende konstruktion

Trykstyrken kan også bestemmes på en konstruktion.

Behovet herfor kan fx skyldes fejl i de udstøbte prøvelegemer, tvivl om hvilken beton der er anvendt i konstruktionen, eller simpelthen at den reelle styrke i konstruktionen (inklusive udførelsens evt. negative indflydelse) ønskes bestemt.

Tilsvarende ønskes betonstyrken i konstruktionen bestemt i forbindelse med bæreevnevurdering af en eksisterende konstruktion, og fx i forbindelse med skader fra brand, hvor skadens indflydelse på betonens styrke skal undersøges nærmere.

Den styrke, som måles direkte på konstruktionen kaldes for in-situ trykstyrken og betegnes $f_{c, is}$. In-situ trykstyrken har som regel betydeligt større variationer end standardtrykstyrken målt på standardprøveemner vådlagret under kontrollerede forhold. Skal

trykstyrken derfor bestemmes med nøjagtighed, skal der derfor foretages et betydeligt antal prøvninger på konstruktionen.

Da styrken udvikler sig med tiden – og ofte ganske betydeligt, se afsnit 10.1.5 – er det vigtigt, at det overvejes om styrken skal bestemmes som betonens øjeblikkelige styrke, eller om der skal regnes om til et andet tidspunkt fx 28 døgn. Dette sidste vil ofte været krævet hvis styrkebestemmelse skal anvendes til at eftervise en ny konstruktions bæreevne.

De oftest anvendte metoder til måling af trykstyrken på en konstruktion er:

- trykprøvning af borekerner udboret fra konstruktionen
- udtrækningsmetoder, hvor en betonkegle trækkes ud af betonoverfladen
- rekylværdi (overfladehårdhed) ved hjælp af en såkaldt Schmidt-hammer
- måling af lyd hastigheden i betonen.

Det vil normalt være et ønske, at konstruktionen beskadiges mindst muligt ved målingen af trykstyrken. Udboring af et antal kerner vil skæmme en synlig konstruktionsdel, hvorfor der er udviklet ikke-destruktive metoder (ofte benævnt NDT - Non Destructive Testing) til bestemmelse af trykstyrken.

Det er kun de to sidstnævnte metoder, der er ikke-destruktive. Udboring af kerner medfører et indgreb, som ikke lader sig reparere, uden at det efterfølgende kan ses, og udtrækningsmetoder medfører en lokal skade, der kan repareres (skjules) som et clampshul.

Det er også muligt at estimere styrken af beton ved at bestemme vand/cement forholdet på et tyndslib af betonen og på baggrund heraf beregne styrken – især hvis der er yderligere informationer om betonsammensætningen, herunder cementtypen. Se "Struktur" behandlet i afsnit 10 Hærdnende og hærdnet beton.

Ikke-destruktiv styrkeprøvning af betonkonstruktioner er behandlet omfattende i litteraturen. En historisk gennemgang kan ses i [5].

Borekerner

Ved udboring af en kerne fra betonen kan der fremskaffes et prøvelegeme, der ligner den støbte cylinder mest muligt, og derfor må forventes at give mest sammenlignelige resultater. Borekernerne udbores med et rørformet bor, hvor der på rørets kant er støbt/limet meget hårde partikler – et såkaldt diamantbor. Ligesom for de støbte standardprøveemner findes der standarder som beskriver, hvordan borekerner udtages og trykprøves (DS/EN 12504-1), og hvordan trykstyrken efterfølgende evalueres (DS/EN 13791).

Normalt skal borekerner udtages med dimensioner, der svarer til de støbte cylindre. Da prisen på udboring stiger med diameteren, anvendes som regel $\varnothing 100$ mm bor og kun sjældent (hvis det direkte kræves) $\varnothing 150$ mm bor. Den mindste diameter skal være

mindst tre gange betonens største stenstørrelse, hvorfor $\varnothing 50$ mm i praksis er den mindste størrelse bor, der anvendes i beton. Borestedet bør ikke ligge for tæt på kanter og så vidt muligt i et område uden armering.

Generelt skal det tilstræbes, at højde-diameter-forholdet svarer til den standardtrykstyrke, man prøver at eftervise. Det vil sige:

- en borekerne med et højde-diameter-forhold lig med 2 svarer til en standardcylinder
- en borekerne med et højde-diameter-forhold lig med 1 svarer til en standardterning.

Borekernen bør om muligt have en længde, der er mindst 2 gange diameteren, da borekernens endeflader kræver savning og slibning for at kunne bruges til trykprøvning.

I praksis vil man ofte, efter selv den bedst planlagte udboring, stå med et antal borekerner af vidt forskellig længde. Borekerner kan knække på grund af revner i betonen, armeringslag eller påvirkninger fra boremaskinen. Disse geometrisk forskellige kerners styrker skal derefter omregnes for at kunne sammenlignes.



Figur 9. Vandret udboring af borekerne med diamantbor.

Armering beliggende parallelt med borekernes akse må ikke forekomme, da det påvirker styrken. Borekernen skal tilrettes og enderne skal slibes og gøres plane og parallelle. Selve trykprøvningen foregår som for støbte prøveemner. Inden prøvning bør det tilstræbes, at borekernen er i temperaturligevægt med laboratoriet, dvs. mindst 3 dages eksponering til laboratorieklima inden prøvning.

Forsøg har vist, at borekerner generelt giver lavere styrker, end hvis man måler på et støbt og vådlagret prøveemne med samme modenhed. Reduktionen er ofte på 10 til 30

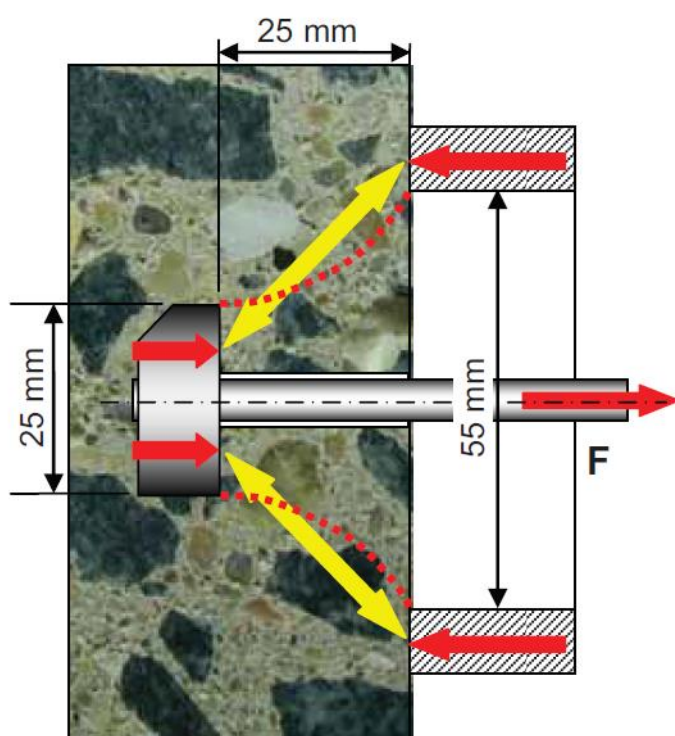
% og DS/EN 13791 angiver følgende overslagsmæssige sammenhæng, der kan anvendes, når trykstyrker fra borekerner skal vurderes:

$$f_{c,is} \approx 0,85 \cdot f_c \quad (10)$$

Årsagen til denne 15 % styrkereduktion kendes ikke i detaljer, men en primær årsag er formentlig, at betonen i det støbte og vådlagrede prøveemne har haft optimale hærdningsforhold, hvad betonen i konstruktionen ikke har haft.

Udtrækskraft, lok-test

Lok-test prøvningen består af en udtrækning af en bolt eller stålstang med en veldefineret fortykkelse i den indstøbte ende (DS/EN 12504-3).



Figur 10. Lok-test princip. Der udtrækkes et lille kegleformet betonstykke afgrænset af udtræksbolt og modhold.

Umiddelbart kunne lok-test princippet antages for at være en bestemmelse af trækstyrken, men det kan eftervises, at det er en bestemmelse af trykstyrken, idet der sker trykbrud i det gule område på Figur 10.

Lok-test er forsynet med stærke danske fingeraftryk, da metoden blev undersøgt og udviklet i 1970'erne på DTH [1] og sidenhen er den blevet kommercialiseret af Germann Instruments. Lok-test har opnået stor udbredelse uden for Danmark – særligt i USA – på grund af metodens evne til at give et her-og-nu udsagn om styrken.

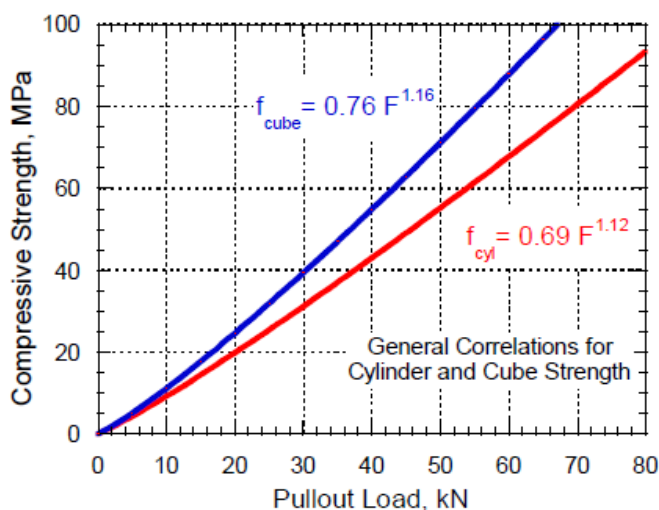
Udtræksbolten kan indstøbes på forhånd, fx hvis det er planlagt at vurdere betonens styrke før afformning.

Udtræksbolten kan også eftermonteres ved indboring, fræsning og ekspansion af et særligt metalstykke, der herefter virker som udtræksboltens hoved. Denne version kaldes ofte Capo-test og kan anvendes på en vilkårlig betonflade i et vilkårligt punkt og til et vilkårligt tidspunkt til bestemmelse af konstruktionens styrke.



Figur 11. Lok-test (og Capo-test) laver en begrænset skade i betonens overflade. Skaden kan med lidt behændighed repareres, så det ligner et udsat clampshul.

Ved udtrækning af prøvebolten opstår et kegleformet brud i betonoverfladen (Figur 11). Metoden er dermed destruktiv, men skaden er relativ lille i forhold til fx borekerner og prøvningen kan foretages af en enkelt person uden anvendelse af tungt udstyr. Styrken bestemmes umiddelbart i forbindelse med prøvningen, hvilket kan være fordelagtigt fremfor at skulle indsende borekerner til et prøvningslaboratorium og afvente resultatet.



Figur 12. Udtræksstyrken kan omsættes til trykstyrke for standardprøveemnerne med en omsætningstabellabel af denne type. Tabellen er hentet i Germann Instruments informationsmateriale, hvor begrænsningerne for tabellens gyldighed også kan ses.

Rekylværdi, Schmidt-hammer

Hvis man slår på en betonoverflade med en hammer, vil en beton med høj styrke virke "hård og klingende". Dette princip er udviklet til kommerciel brug i den såkaldte Schmidt-hammer.



Figur 13. Schmidt-hammeren er et lille handy instrument til bestemmelse af betons styrke.

I en Schmidt-hammer udløser en sammentrykket fjeder et stålstempel, der slynges med stor kraft ind mod betonoverfladen og tilbageslaget (eller rekylen) registreres af Schmidt-hammeren. Schmidt-hammer testen er omfattet af standarden DS/EN 12504-2.

Størrelsen af rekylen afhænger af betonoverfladens stivhed (elasticitetsmodul), der igen er relateret til betonens styrke. Schmidt-hammeren er udbredt over hele verden, da den er nem at anvende og ikke skader betonen (ikke-destruktiv).

Schmidt-hammeren er opkaldt efter E. Schmidt - en schweizisk ingeniør - som efter 2. verdenskrig udviklede et apparat som kunne måle rekylen fra et kontrolleret udført slag.

Ved hjælp af en omregningstabel kan rekylværdien omregnes til betons trykstyrke. Som det kan ses af Figur 4 i afsnit om E-modul i afsnit 10 Hærdnende og hærdnet beton giver denne omregning bedst styrkebestemmelse ved lave betonstyrker under 20 MPa. Ved høje styrker er E-modulet stort set uafhængigt af styrken, hvorfor omregning fra E-modul til styrke er mere usikker.

Metoden er derfor velegnet til at afsøge større betonarealer (fx en tunnelvæg) for at lokalisere svage områder, eller nedbrudt beton, som efterfølgende kan undersøges nærmere vha. andre metoder.

Ultralydsmåling

Ved ultralydsmåling i beton sendes en lydimpuls ind i materialet via en transmitter og den modtages igen med en modtager. Den tid, det tager lydbølgen at rejse en given afstand, afhænger primært af materialets stivhed (E-modul). Normalt er lydhastigheden i god beton ca. 4.000 meter pr. sekund. Ultralydsmålinger på beton er beskrevet i prøvestandarden DS/EN 12504-4.

Ultralydsmålinger benyttes især på stålkonstruktioner, hvor delaminering, svejsefejl mv. kan opdages i tide. Målemetoden er mest velegnet på homogene materialer såsom stål.

Da ultralydsmålingen ligesom rekyl-værdi målingen reelt er en måling af E-modulet, har den de samme utilstrækkeligheder for især de høje betonstyrker. Ultralydshastigheden afhænger desuden også af faktorer, som ikke nødvendigvis har indflydelse på styrken, og derfor er den ikke velegnet til at måle af absolutte styrker.

Ultralydsmålinger egner sig derimod til sammenligninger på tilsyneladende "ens" beton – fx indbyrdes sammenligning af en serie vægelementer støbt med samme beton for at udpege de elementer, som måske ikke har den krævede kvalitet. Man benytter ofte ultralydsmålinger i laboratoriet for at kunne screene betonprøveemner, eller til kvantificering af specielt de tidlige styrker, indre revnedannelse og lignende.

Ultralydsmålinger påvirkes også af armering, revner og støbedefekter, hvilket kan gøre det vanskeligt at tolke prøvningsresultaterne. Der findes også avancerede målesystemer, der anvender ultralyd til netop at finde og kortlægge fx revner og støbedefekter.

10.1.7 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] "Vinterstøbning af Beton", SBI anvisning nr. 123, 1999. Findes på www.teknologisk.dk
- [5] Carino, N., *Non-Destructive Testing of Concrete: History and Challenges*, ACI-SP-144, pp. 623-678, American Concrete Institute, 1994.
- [6] Munch-Petersen G.N. et C, Early property development in concrete, NCR vol. 51 Dec. 2014.