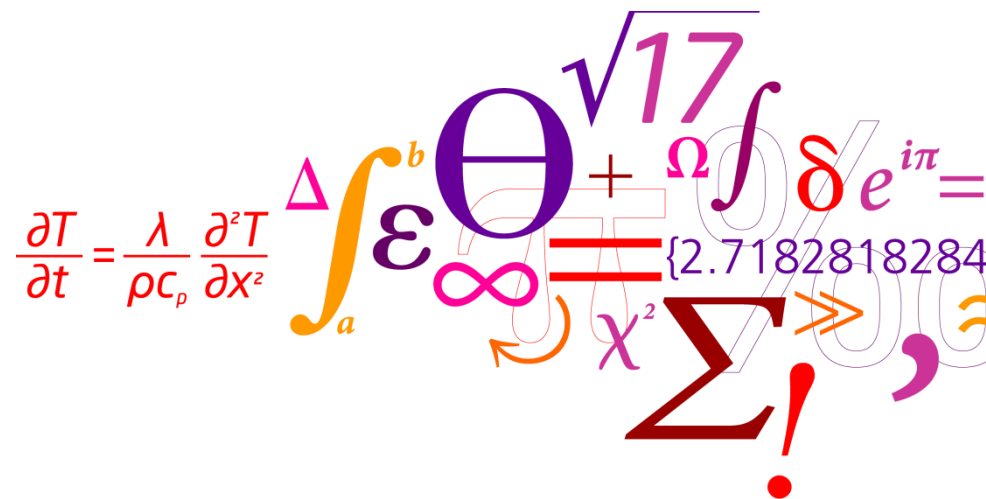


Materialer – beton og stål

Per Goltermann


$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$
$$\Delta \int_a^b \varepsilon \Theta^{\sqrt{17}} + \Omega \int \delta e^{i\pi} = \{2.7182818284\}$$
$$\infty = \chi^2 \sum !$$

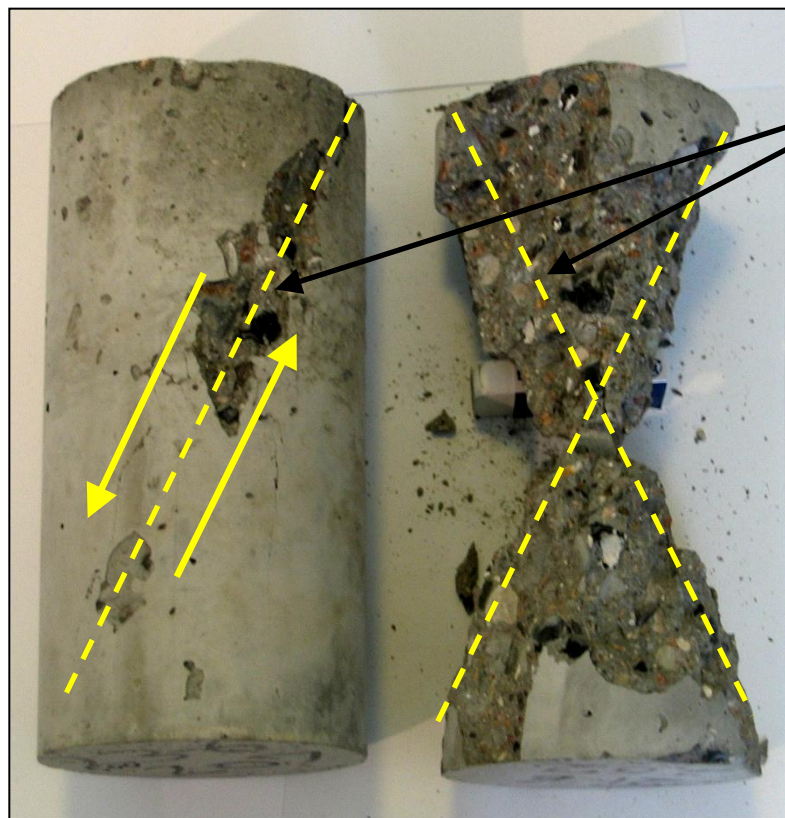
Lektionens indhold

1. Betonen og styrkerne
2. Betonens arbejdskurve
3. Fleraksede spændingstilstande
4. Betonens svind
5. Betonens krybning
6. Armeringens arbejdskurve
7. Materialekrav

1. Betonen og styrkerne

- Beton består normalt af sand, sten og et bindemiddel, der reagerer med vand og binder alt sammen.... der er dog andre typer.
- Bindemidlet er i dag normalt Portland cement, evt. kombineret med flyveaske og mikrosilica.... der er dog andre muligheder.
- Tidligste bindemiddel var puzzolan, brugt i Romerske betoner fra ca. 300 BC
 - (Ældste daterede er "Temple of Concord" i Rom)

Rent aksialt tryk; Glidningsbrud



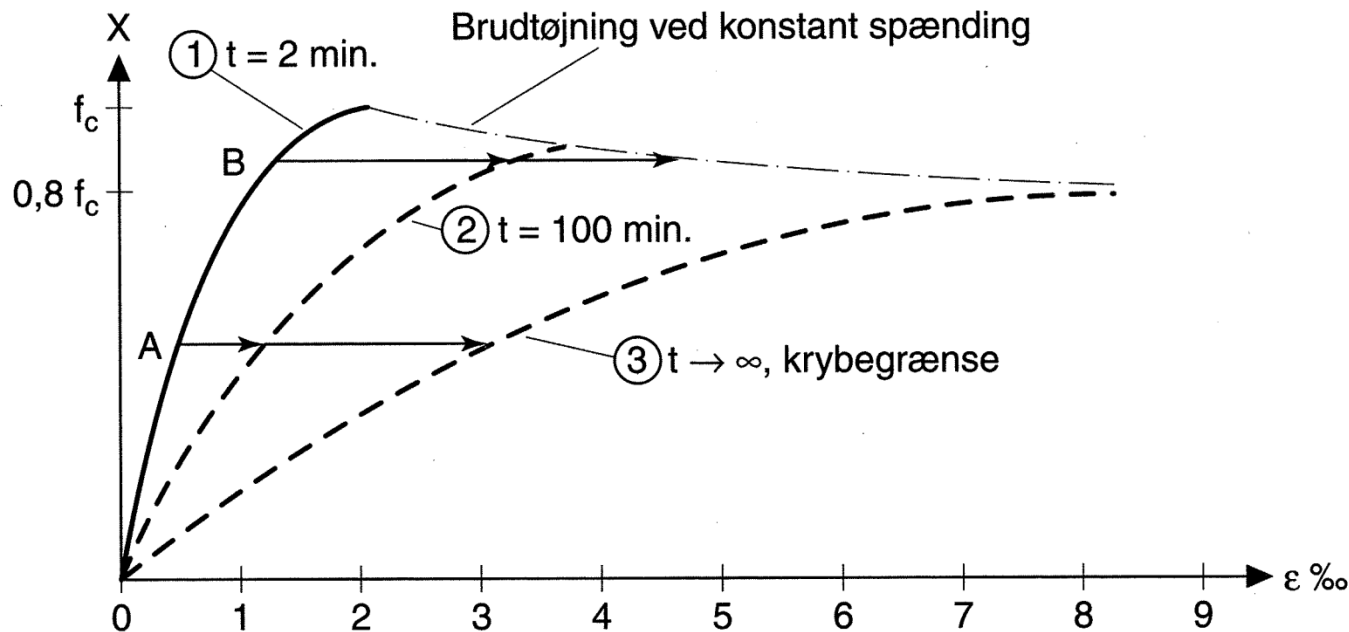
Test stoppet
før brud

Test kørt
til brud

Ved trykprøvning af kerner vil bruddet løbe på skrå, svarende til et glidningsbrud.

Brudliniernes vinkel med lodret er normalt 45° minus $\phi/2$ svarende til en hældning på 1:2 (ϕ er friktionsvinklen)

Langtidslast

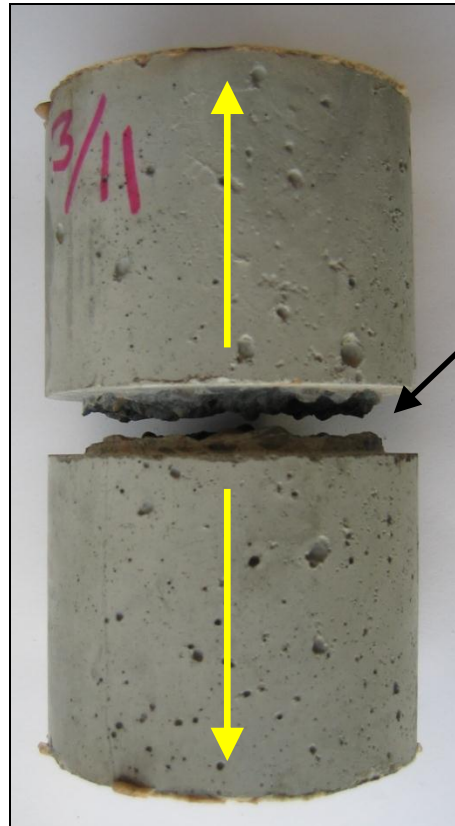


I Danmark ignorerer vi normalt denne reduktion, da den dimensioneringsgivende last er mere end 25 % over den langvarige last

Rent aksialt træk; Adskillelsesbrud



Trækprøvning
før brud

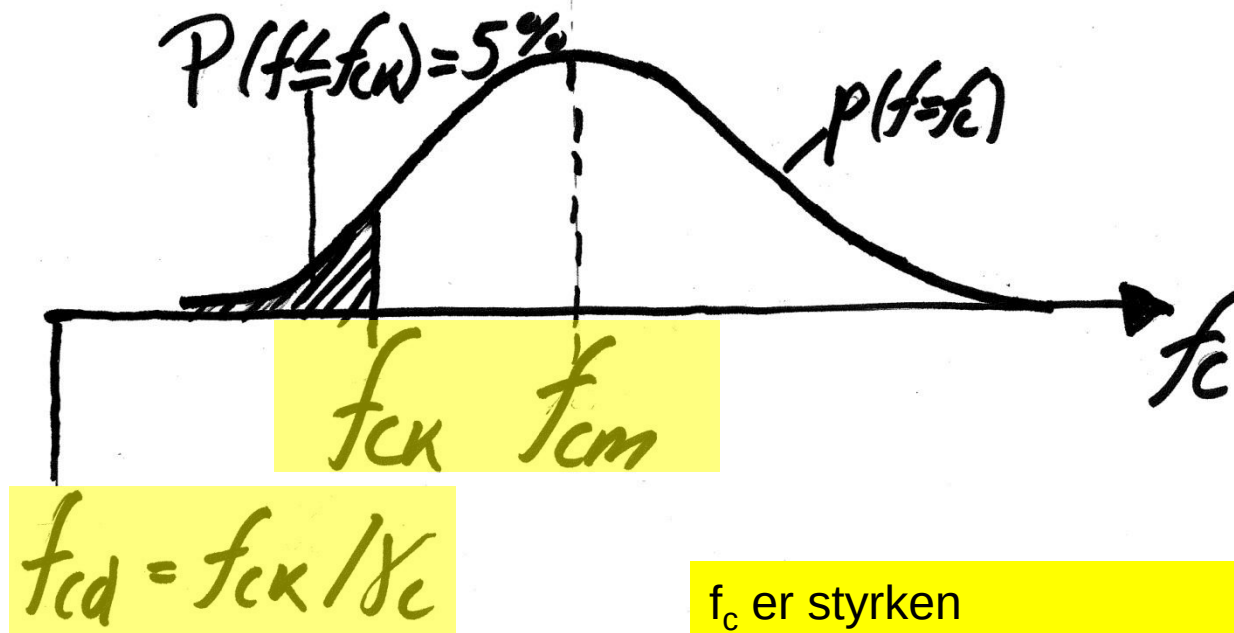


Trækprøve
efter brud

Ved trækprøvning af kerner vil bruddet løbe på tværs, svarende til et trækbrud.

- Ved dimensioneringen anvendes normalt betonstyrken efter 28 døgn – i byggeperioden anvendes en lavere værdi, svarende til den tidligere styrke.
- Middelværdier anvendes oftest til at vurdere deformationer med (bedste estimat).
- Karakteristiske værdier anvendes ved bæreevne eftervisning (sikkerhed).
- Karakteristiske værdier svarer til den nedre 5 % fraktil i en normalfordeling.

Middel, karakteristisk og regningsmæssig styrke



f_c er styrken

f_{cm} er middelværdien af styrken

f_{ck} er den karakteristiske værdi af styrken

f_{cd} er design værdien af styrken (afsnit 3)

Produktionsdata og styrker

No	fc (Mpa)
1	39,4
2	44,8
3	37,6
4	50,5
5	47,7
6	41,9
7	45,8
8	40,4
9	41,0
10	41,9
11	37,7
12	40,8
13	45,0
14	41,7
15	47,4
16	45,0
17	42,0
18	35,7
19	36,3
20	37,6
21	47,9



Gennemsnit	42,3 Mpa
Spredning	4,2 MPa
Variationskoefficient	10% Normalt er den snarere 10-15%



fcm	42,3 Mpa
fck, mulig	35,4 Mpa (denne er mulig)
fck, deklareret	30,0 Mpa (denne deklarerer)
fcd	20,7 Mpa (ca 50 % af middelstyrken)

Udvikling af styrken

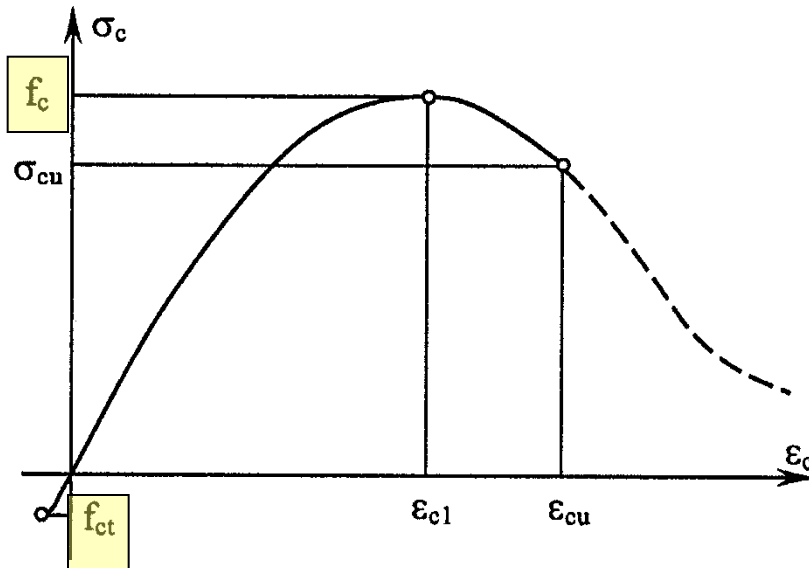
$$f_{cm}(t) = f_{cm} \exp \left(s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right) \right)$$

$s = 0,20$ eller $0,25$ eller $0,38$ afhængig af cementtype

$$f_{ck}(t) = \begin{cases} f_{cm}(t) - 8 \text{ MPa} & 3 < t < 28 \text{ døgn} \\ f_{ck} & t \geq 28 \text{ døgn} \end{cases}$$

t er modenheten (alderen ved 20 grader celcius)

2. Betonens arbejdskurve

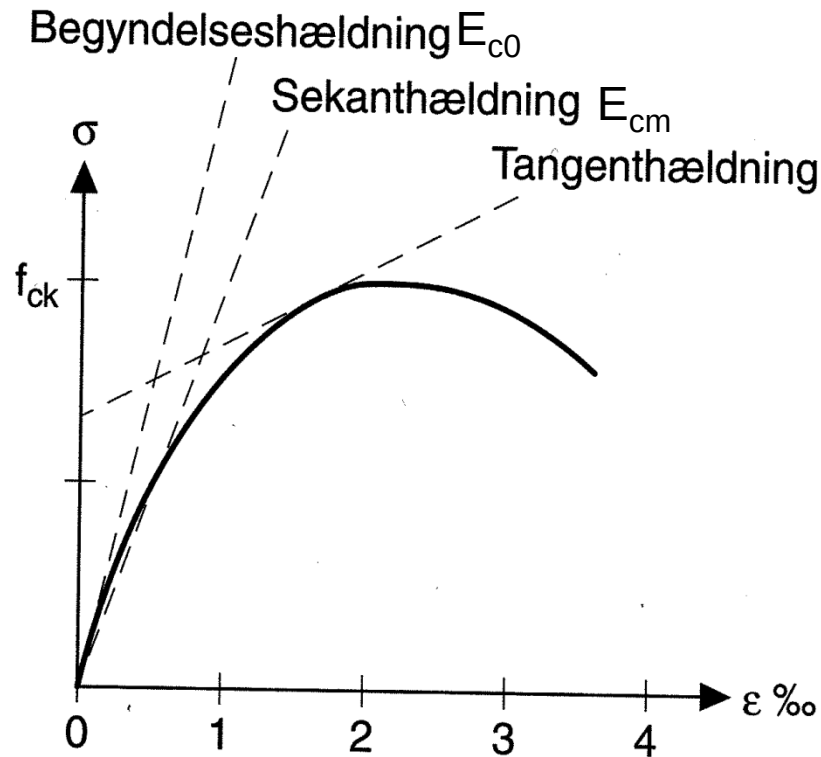


- Betons arbejdskurve er stærkt ulineær
- Betonens trækstyrke (f_{ct}) er meget mindre end trykstyrken (f_c)

$$f_{ctm} = \begin{cases} 0,3f_{ck}^{2/3} & \text{for } f_{ck} \leq 50\text{MPa} \\ 2,12\ln(1+\frac{f_{ck}+8}{10}) & \text{for } f_{ck} > 50\text{MPa} \end{cases}$$

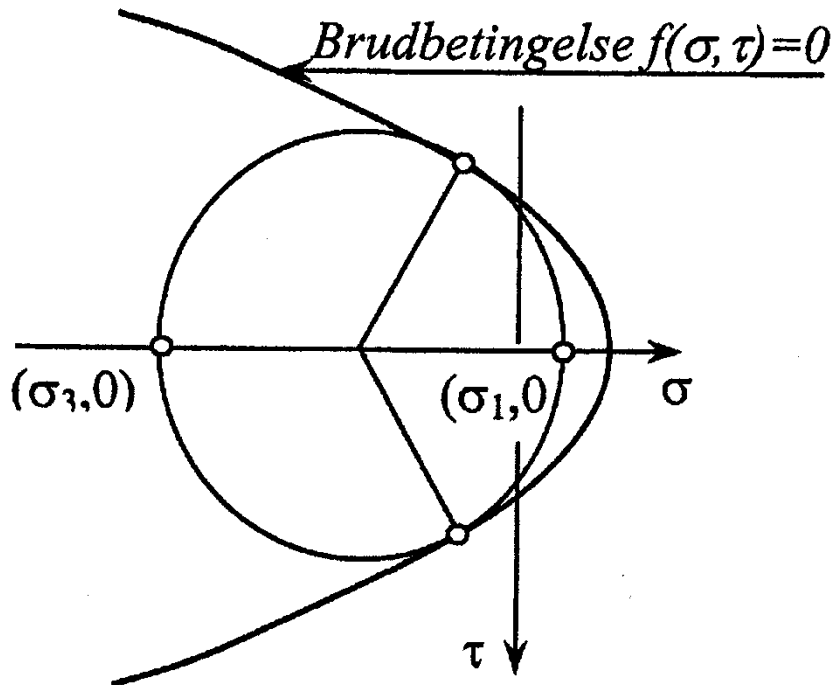
$$f_{ctk} = 0,7f_{ctm}$$

Betonens E-modul(er)



$$E_c = E_{cm} = 22000 \text{ MPa} \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0,3} = 22000 \text{ MPa} \left(\frac{f_{ck} + 8}{10} \right)^{0,3}$$

3. Fleraksede spændingstilstande

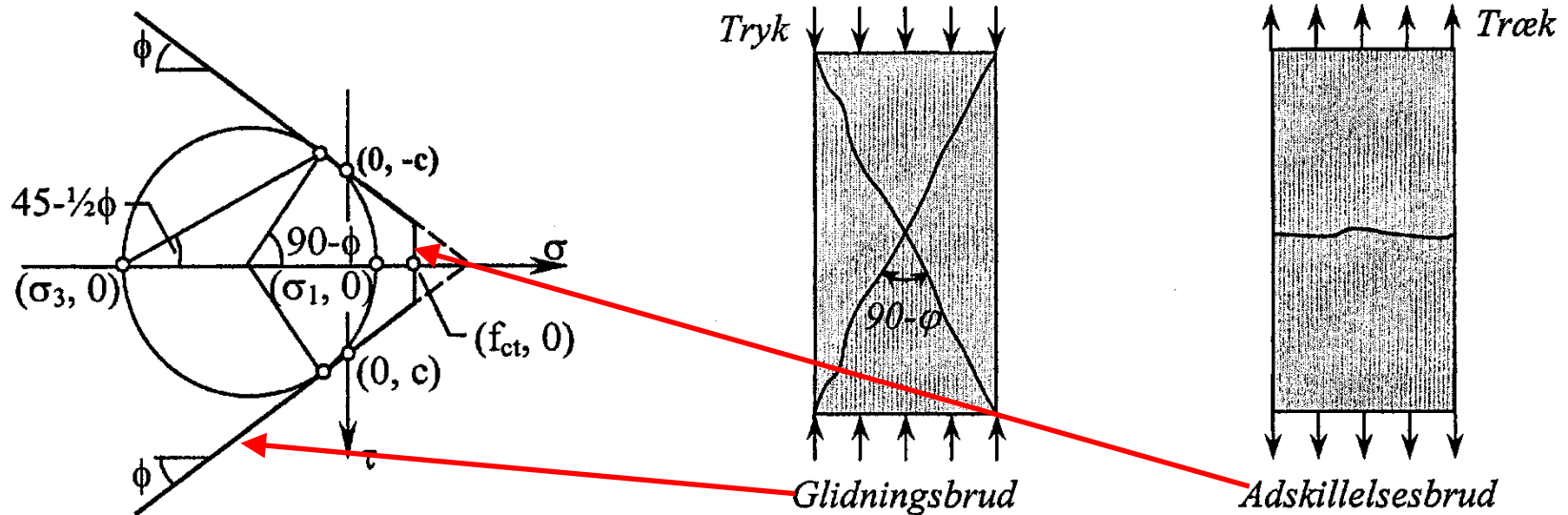


Ved fleraksede spændingstilstande er det kun den mindste (σ_1) og den største hovedspænding (σ_3), der har betydning for brud.

Brudbetingelsen udtrykkes som
 $f(\sigma, \tau)=0$

(Der er brud, hvis Mohr's cirkel rører eller skærer brudbetingelsen)

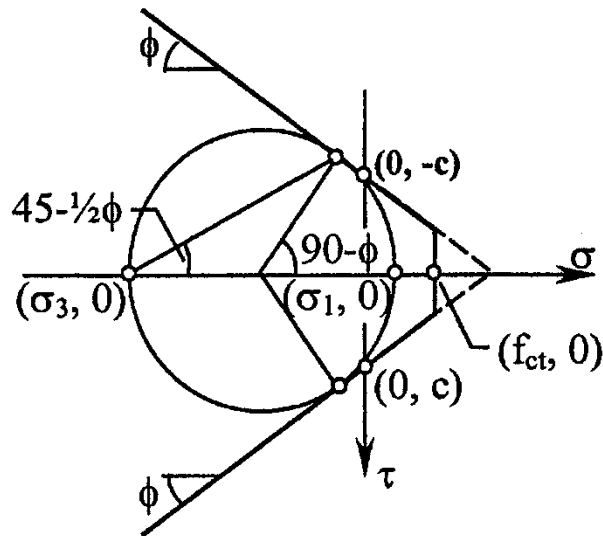
Coulomb's brudbetingelse



Det har eksperimentelt vist sig at brudbetingelsen kan opdeles i 2 typer brud:

- 1) Glidningsbrud (dvs. tryk og eller forskydning)
- 2) Adskillelsesbrud (dvs. trækbrud)

Coulomb's brudbetingelse



Adskillelsesbruddet forekommer når spændingen når trækstyrken:

$$\sigma = f_{ct}$$

Glidningsbruddet er bestemt af

$$|\tau| = c - \mu\sigma$$

hvor konstanten c og friktionskoefficienten μ begge er positive. Friktionsvinklen ϕ bestemmes for almindelig beton som

$$\tan \phi = \mu \approx 3/4$$

$$\phi \approx 37^\circ$$

4. Svind

- Plastisk svind (ϵ_{cp}): Opstår under hærdningen pga. dårlig afdækning – kan begrænses !.
- Udtørrings svind (ϵ_{cd}): Opstår ved betonens langsomme udtørring – kan ikke undgås !
- Autogent svind (ϵ_{ca}): Opstår pga betonens sammensætning ved lave vand/cementtal (som bruges i dag) – kan ikke undgås !

Grove netrevner fra plastisk svind



Plastisk svind foregår i den **meget** unge beton og skyldes utilstrækkelig afdækning.

Plastisk svind kan og skal undgås ved afdækning.

Meget ung beton har et højt vandindhold og en styrke som mudder – som jo også revner i udtørring som det ses nederst til højre



Netrevner



Svind - Danmark



Svind - Grækenland

Udtrørringssvindrevner – eller autogent svind - på betonoverflader (maskevidde 1-5 cm).

Overfladesvindrevner er normalt meget fine og kan være svære at se – medmindre revnerne er fugtige og overfladen eller er tør.

Ved autogent svind dannes der netrevner igennem hele tværsnittet – ved udtørringssvind er det kun ved overfladen

Overfladerevner i broplade



Udtørringssvind-
revner på
betonoverflader kan
gå helt ind til
armeringen uden at
gå igennem pladen -
korrosionsrisiko

Gennemgående revner



Udtørringssvindrevner kan være meget fine og svære at se – revnerne er derfor markeret med stipling på billedet.

Uden tilstrækkelig armering vil nogle revner kunne være ret grove.

Altangang med gennemgående revner



Udtørringssvindrevner kan være meget fine men vil alligevel kunne lede vand og salt ind til armeringen. Derefter er der en risiko for korrosion og efterfølgende tab af bæreevne.

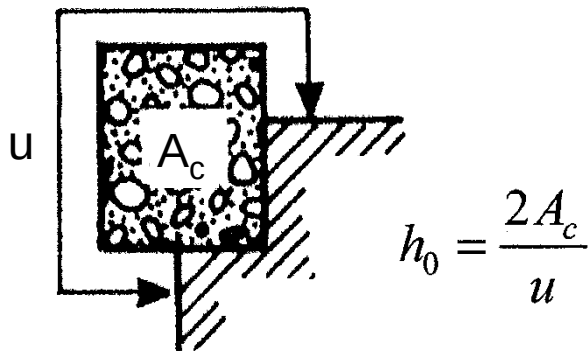


Udtørringssvind: Beregning

$$\varepsilon_{cd}(t) = \beta_{ds}(t, t_s) k_h \varepsilon_{cd,0}$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 1,32 \left((220 + 110 \alpha_{ds1}) \exp \left(-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{10} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{RH}{100} \right)^3 \right) 10^{-6}$$

$$\beta_{ds}(t, t_s) = \frac{t - t_s}{t - t_s + 0,04 \sqrt{h_0^3}}$$



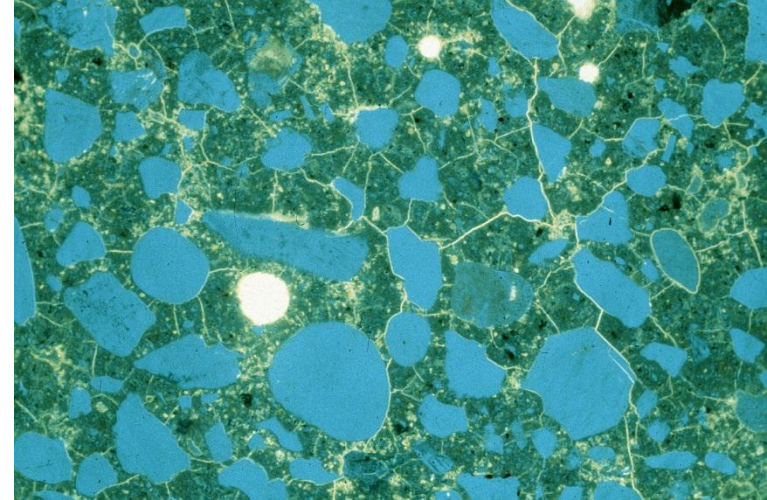
h_0 i mm	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,70

Autogent svind: Beregning

$$\varepsilon_{ca}(t) = \beta_{as}(t) \varepsilon_{ca}(\infty)$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2,5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6}$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0,2\sqrt{t})$$



Tyndslib 2,5 x 1,5 mm med revner (sand er blå og pasta grønt i den anvendte belysning)

▲

Bemærk at autogent svind kan opbruge en del af svindkapaciteten og dermed medføre flere udtørringssvindrevner end ellers

Svind, spændinger og RB

Betonemnets samlede tøjning betegnes ε_T og vi finder

Betonens træktøjning er $\varepsilon_{cs} - \varepsilon_T$

$$\Rightarrow \sigma_c = E_c \cdot (\varepsilon_{cs} - \varepsilon_T) \text{ (dvs. træk)}$$

Armeringens tryktøjning er ε_T

$$\Rightarrow \sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_T \text{ (dvs. tryk)}$$

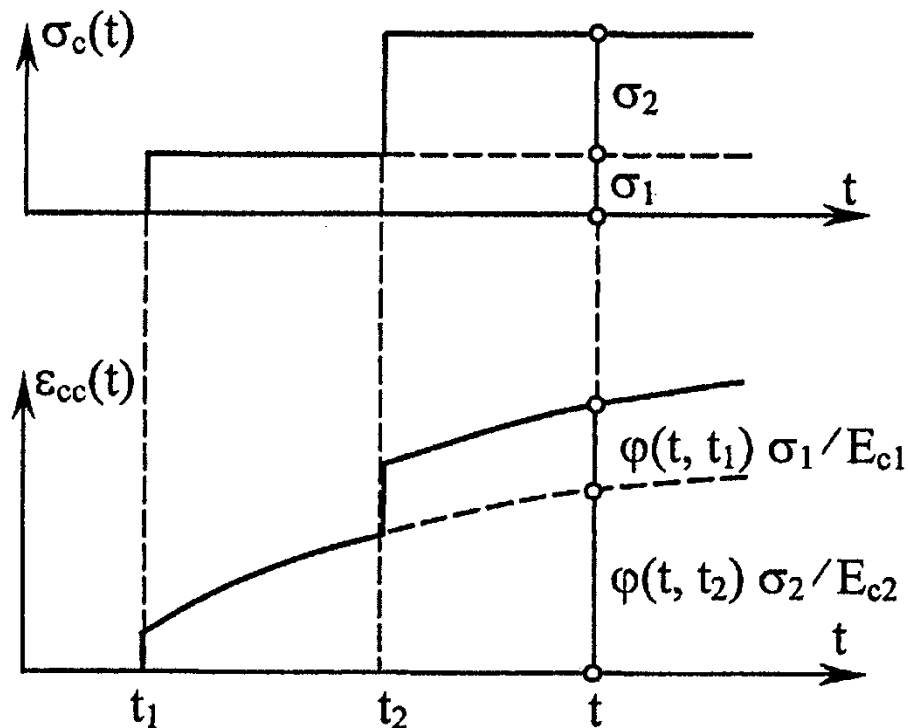
$$\Rightarrow N = \sigma_s \cdot A_s - \sigma_c \cdot A_c$$

Randbetingelser :

Kan betonemnet trække sig frit sammen er $N = 0$

Er betonemnet fuldstændigt fastholdt er $\varepsilon_T = 0$

5. Krybning



- Påføres en betonkonstruktion en belastning, så opstår der en initial deformation – denne deformation vokser med tiden, svarende til at betonen "kryber".

- Boltzmann's princip: Initial deformationer og krybning kan beregnes hver for sig for hver enkelt belastning og derefter lægges sammen

Krybning: Beregning

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \varepsilon_{c0}(t_0) + \varepsilon_{cc}(t, t_0) \quad (\text{Langtidstøjning})$$

$$\varepsilon_{c0}(t_0) = \frac{\sigma}{E_{cm}(t_0)} \quad (\text{Momentantøjning})$$

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \frac{\sigma}{E_{cm}} \Rightarrow \quad (\text{Krybetøjning})$$

$$\varepsilon_c(t, t_0) = \left[1 + \varphi(t, t_0) \right] \frac{\sigma}{E_{cm}(t_0)}$$

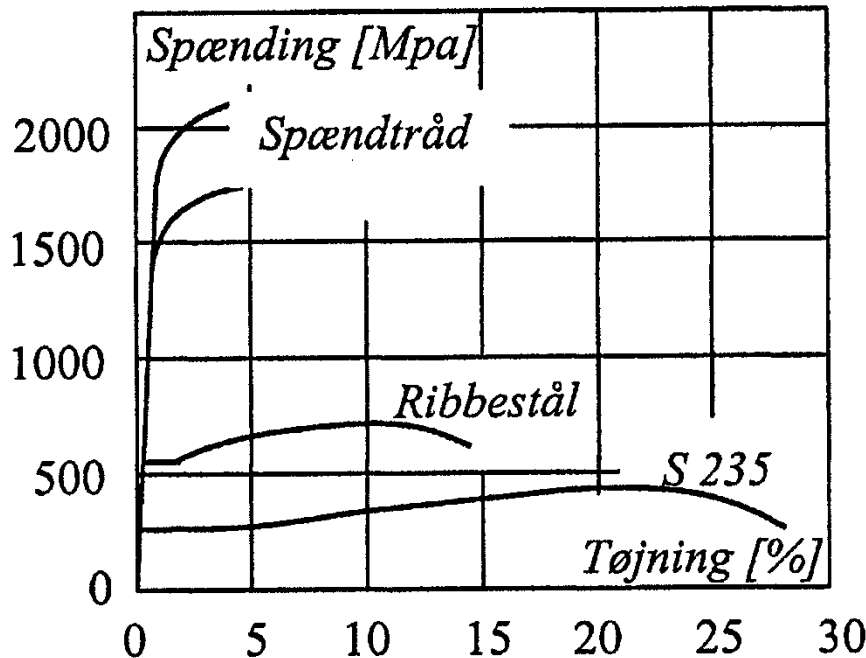
φ benævnes krybningskoefficienten og afhænger af betonsammensætning, relativ luftfugtighed, alder ved belastning og belastningstiden men kan sættes til 3 i beregningerne

6.Armeringen

- Der laves både uarmeret og armeret beton – armeret beton kræves, når kræfterne ikke kan optages af betonen alene.
- Armeret beton er brugt siden 1850.
- Armeringen er normalt i form af armeringsstænger ... men der bruges også fibre som armering.

- Armeringen har en række gode egenskaber:
 - Høj trækstyrke
 - Høj stivhed
 - Stor sejghed
 - God vedhæftning til beton
 - God holdbarhed og robusthed

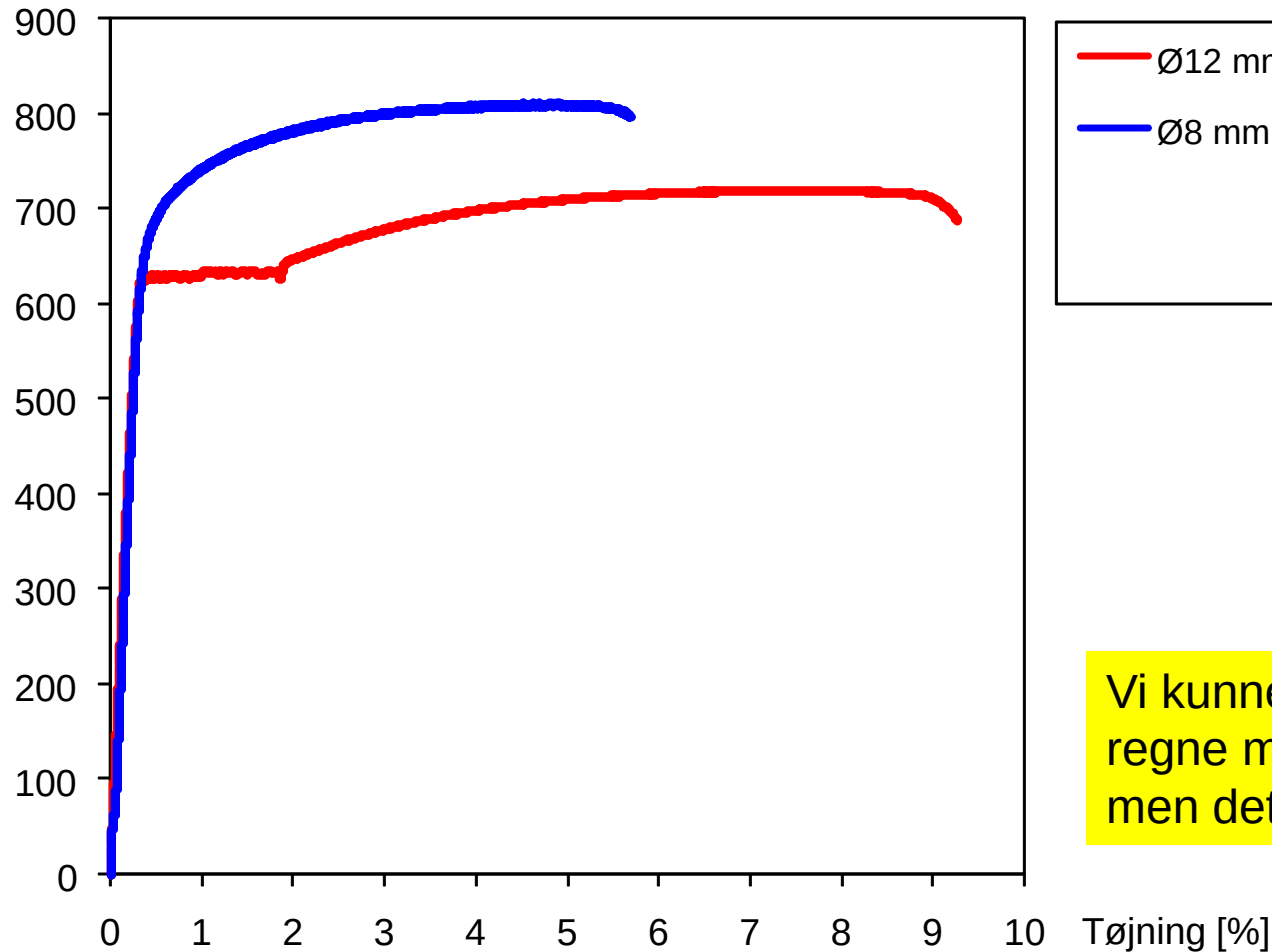
Armeringsstålets arbejdskurve



- Mange forskellige arbejdskurver er mulige, afhængigt af armeringens kemiske sammensætning og produktionsformen og endda bare diameteren

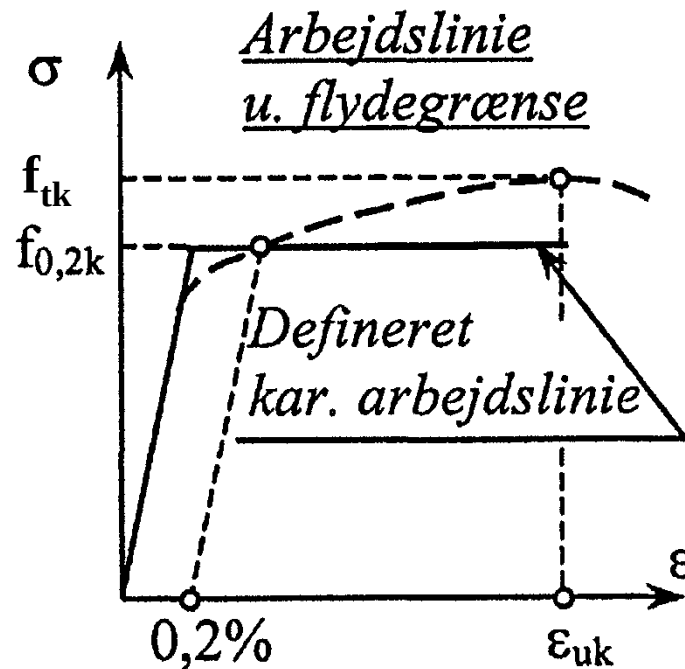
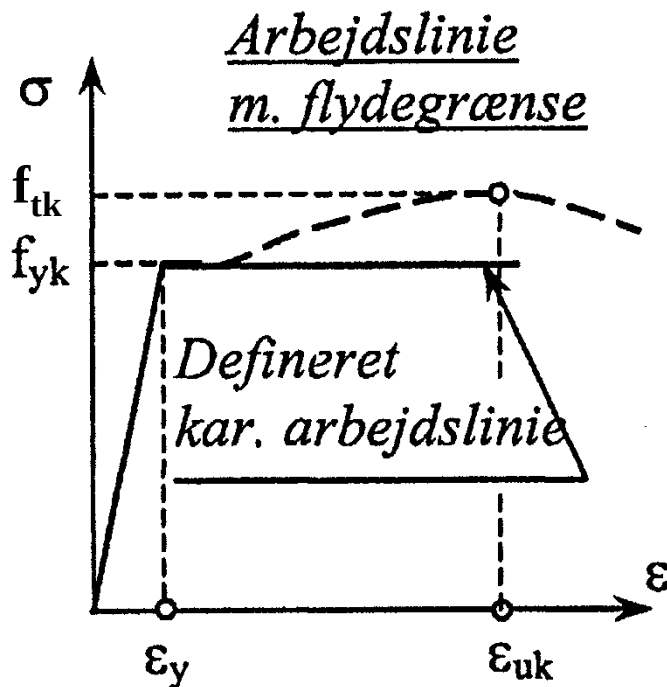
Ribbestål, Ø8 mm og Ø12mm

Spænding [MPa]



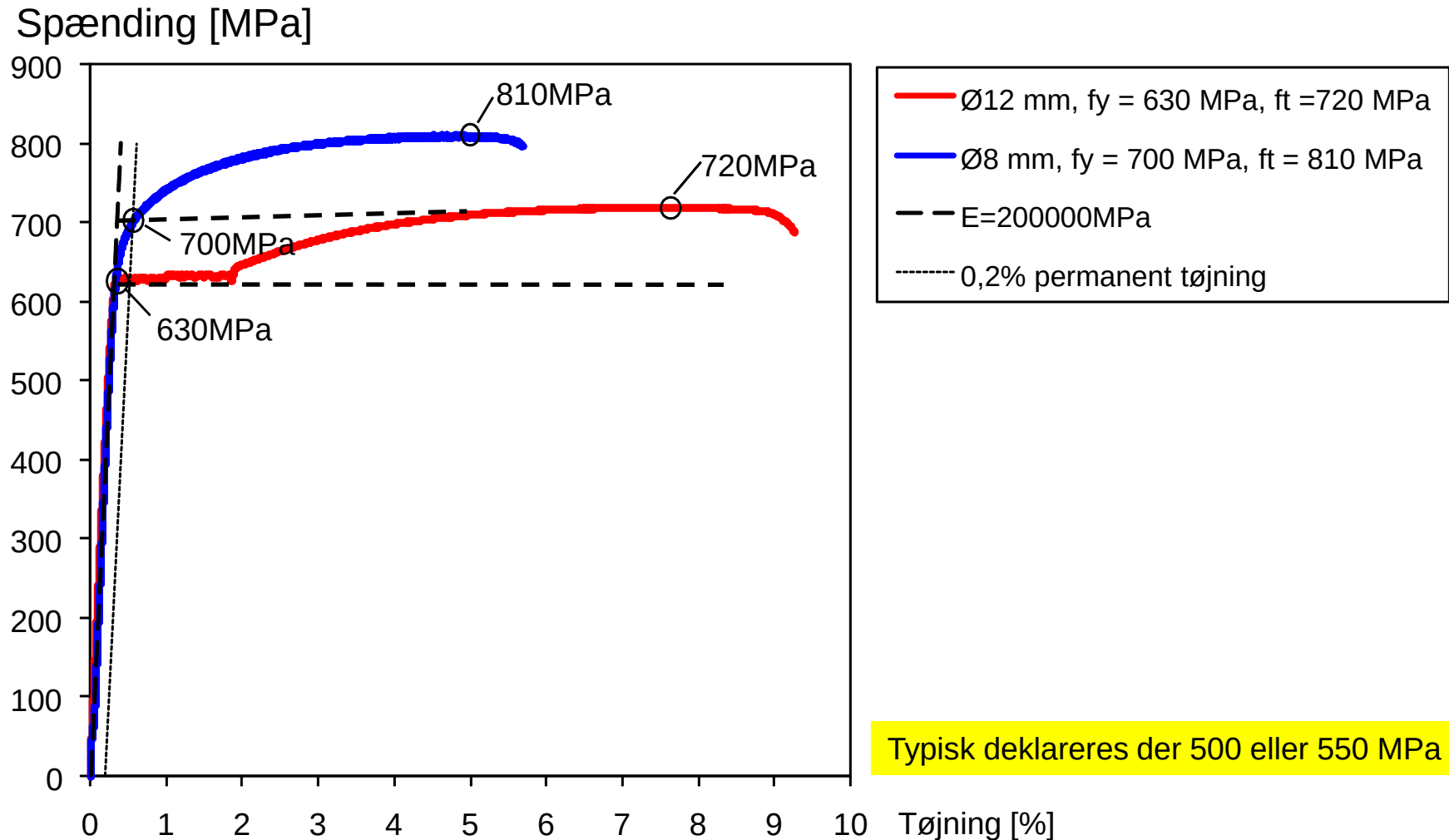
Vi kunne sådan set godt regne med disse kurver – men det er ret besværligt

Idealiseret arbejdskurve



- Armeringens arbejdskurve regnes lineær-elastisk, stift-plastisk ($E_s = 2 \cdot 10^5 \text{ MPa}$).

Idealiseret arbejdskurve



7. Materialekrav

- Der stilles krav til armeringens
 - Brudforlængelse
 - Reserve $(f_t/f_y)_k$
 - Bøjeprovning
 - Udmattelsesprovning
 - Forankringsevne
 - Svejsbarhed

Bemærk, at kravene ofte varierer fra land til land !

Krav til armeringen

Produkt	Stænger, udrettet Armering og svejste net			Fraktil (%)
Klasse	A	B	C	
Karakteristisk flydespænding F_{yk} eller $f_{0,2}$ (MPa)	400 – 650			5,0
Minimumsværdi af $k = (f_t/f_y)_k$	$\geq 1,05$	$\geq 1,08$	$\geq 1,15$ $< 1,35$	10
Karakteristisk tøjning ved Maksimal kraft, ϵ_{uk} (%)	$\geq 2,5$	$\geq 5,0$	$\geq 7,5$	10

Plastisk
analyse tilladt

■ Der stilles krav til

- Betonens sammensætning (ikke dette kursus), men det leder til et indirekte styrkekrav
- Dæklagets kvalitet og tykkelse
- Maksimal revnevidde i dæklag

Miljøklasse	Minimumsværdi af foreskreven f_{ck} MPa
Ekstra aggressiv	40
Aggressiv	35
Moderat	25
Passiv	12

Krav til dæklag og revnevidder

Miljøklasse	Minimum dæklag $c_{\min, \text{dur}}$ mm	Foreskrevet dæklag c $c_{\min, \text{dur}} + \Delta c_{\text{dev}}$ mm
Ekstra aggressiv	40 mm	40 mm + tolerancetillæg
Aggressiv	30 mm	30 mm + tolerancetillæg
Moderat	20 mm	20 mm + tolerancetillæg
Passiv	10 mm	10 mm + tolerancetillæg

Typisk 5 mm tolerancetillæg

Miljøklasse	Slap armering	Spændarmering
Ekstra aggressiv	0,2 mm	0,1 mm
Aggressiv	0,3 mm	0,2 mm
Moderat	0,4 mm	0,3 mm