

Når citronen presses, beregninger udover Eurocode 2

Frederik Autrup

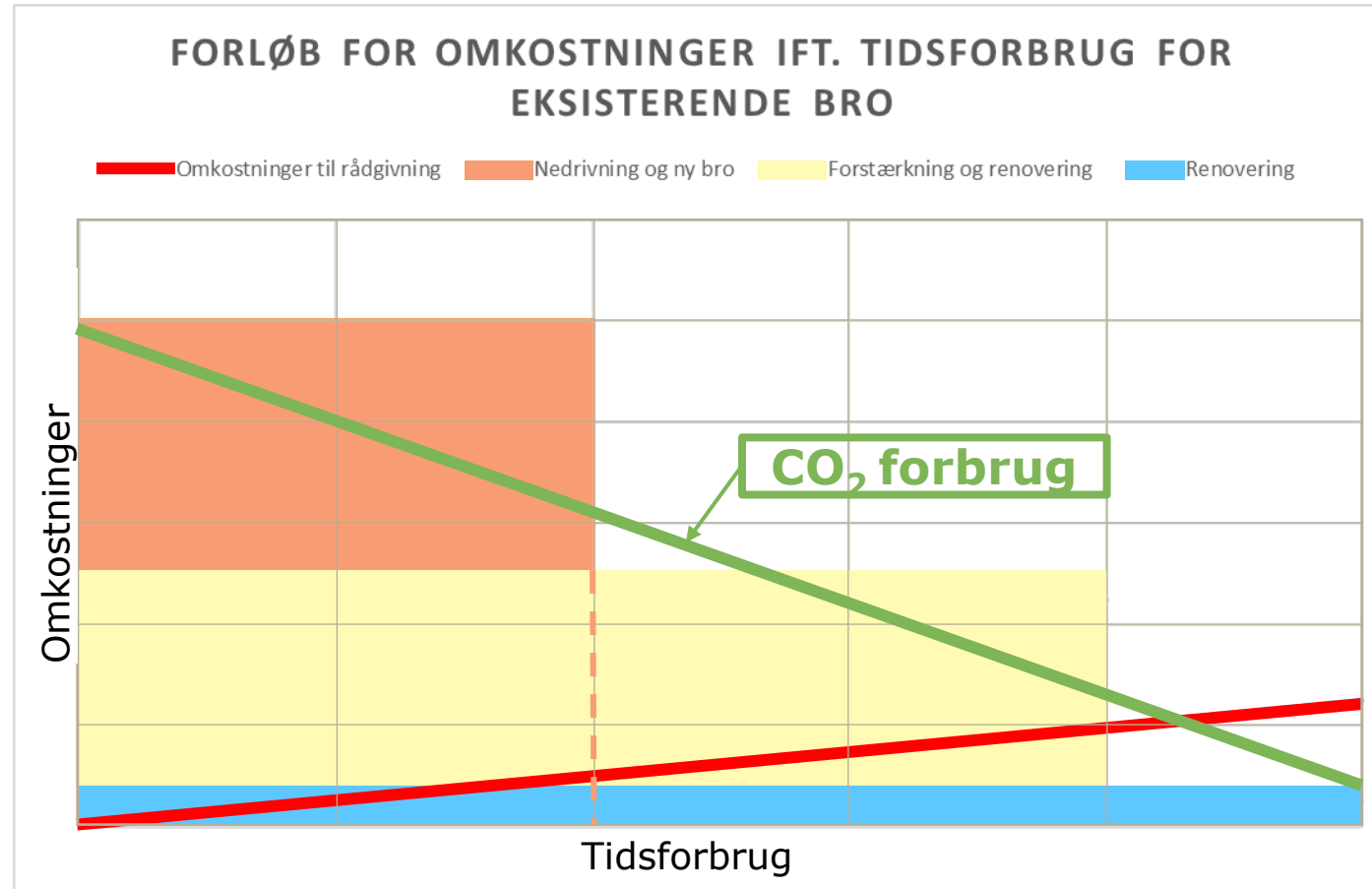
Chef Specialist, PhD

Afdeling for Monitering og Analyse af Eksisterende konstruktioner

RAMBOLL

Bright Ideas.
Sustainable change.

Hvad er forskelligt for eksisterende kontra nye?



Beregningsniveauer for eksisterende konstruktioner

Vejdirektoratets opdeling fra 2013:

- Bæreevneanalyse opdeles i tre trin

Trin 1: Screening

Hvad er bygherrens krav til normalklasse og eller betingede klasser?

- Gennemgang af arkiv
- Bæreevnen vurderes på baggrund af designlast
- Hvis bæreevnen er tilstrækkelig og $G.E < 3$ af bæreevnebestemmende elementer, godkendes bæreevnen.

NB. Hvis broen er nyere end 1974, har den minimum $NK=100$, $B1=100$, $B2=125$, $B3=125$. se endvidere afsnit 6.

Trin 2: "Normal" beregning

Gennemgang af generaleftersynsrapport
Beregning af sikkerhedsfaktorer (S.F.) ved simpel model. (lineær, plastisk, 2D 3D) for den ønskede klasse.

Trin 3: Avanceret beregning

Detaljeret brudberegning, herunder supplerende plastiske og ikke lineære modeller
Probabilistisk modellering
Sikkerhedsanalyser
Særeftersyn
Udvælgelse af totaløkonomisk optimal D&V strategi

Det ønskede resultat skal opnås billigt muligt.

Beregningsmetoder for en simpel plade

1) Bjælke-model

Et **akseltryk på ca. 11 ton**

= ca KL 50

2) Elastisk FE-model

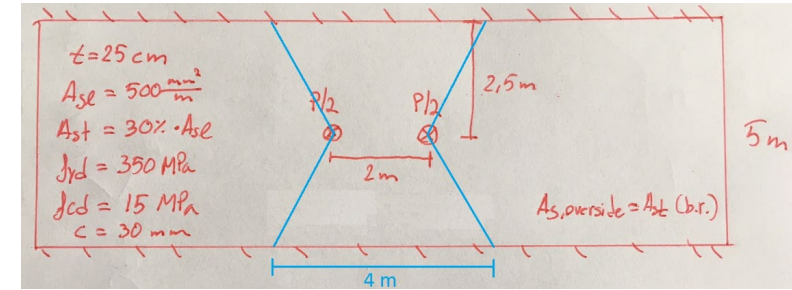
Et **akseltryk på 13 ton**

= ca KL 70

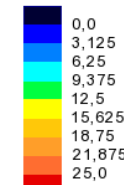
3) Plastisk beregning

Ved en fuld plastisk beregning kan der eftervises et **akseltryk på 16 ton**

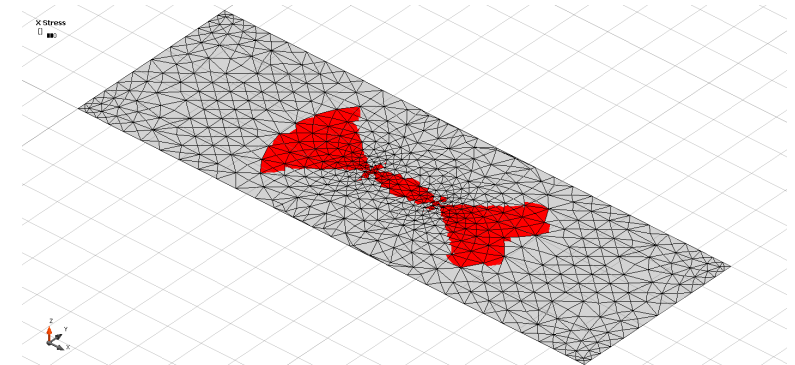
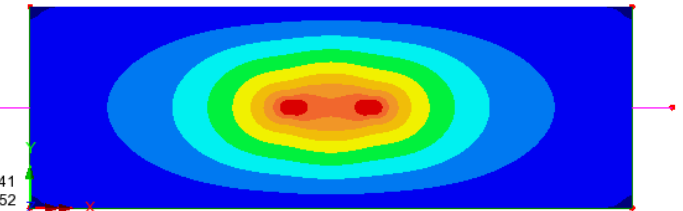
= ca. KL 120



Combination 1
Entity: Force/Moment - Thick Shell
Transformation: Global
Component: My (Units: kN.m/m)



Maximum 35,1597 at node 3841
Minimum -0,268635 at node 152



Partialkoefficient

General sikkerhed – dækker alle typer af konstruktioner/laster => konservativ

VS

Sandsynlighedsbaseret

Baggrund for partialkoefficienterne -
konstruktions/last specifik – faktisk sikkerhed af konstruktionen

Trin 3: Sandsynlighedsbaserede bæreevneberegninger

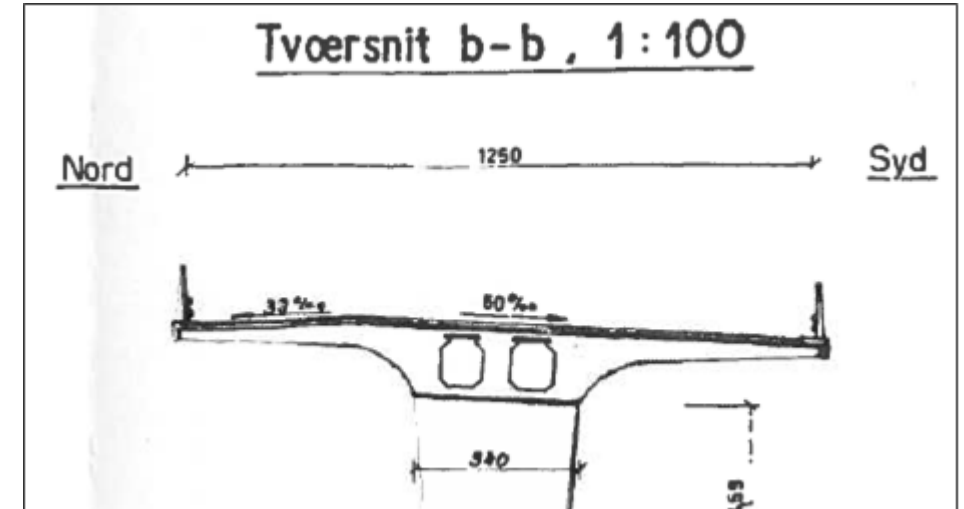
Vestmotorvejen

Opgraderet fra broklasse **70** til **115**.

Roldsgaard et al., 2019 [3]

	Deterministisk	Sandsynligheds- baseret Klasse 115
Klasse 115 køretøjet	1,25	1,19
Klasse 50 køretøjet	1,05	1,08
Stødfaktor ϕ_{KL115}	1,13	1,14
Stødfaktor ϕ_{KL50}	1,13	1,14
Y_{ck}	1,45	1,38
Y_{yk}	1,2	1,10
K_{FI}	1,1	1,0

Tabel 3. "Gamle" og "nye" partialkoefficienter.



Beregningsmodeller og Eurocode 0

1.4 Forskellen mellem principper og anvendelsesregler

(5) Det er tilladt at benytte andre projekteringsmetoder end anvendelsesreglerne, hvis det eftervises, at de alternative metoder er i overensstemmelse med de relevante principper og **mindst giver samme sikkerhed**, anvendelighed og holdbarhed, som den der forventes, når eurocodes anvendes.

- Anvendelsesregler angives med ()

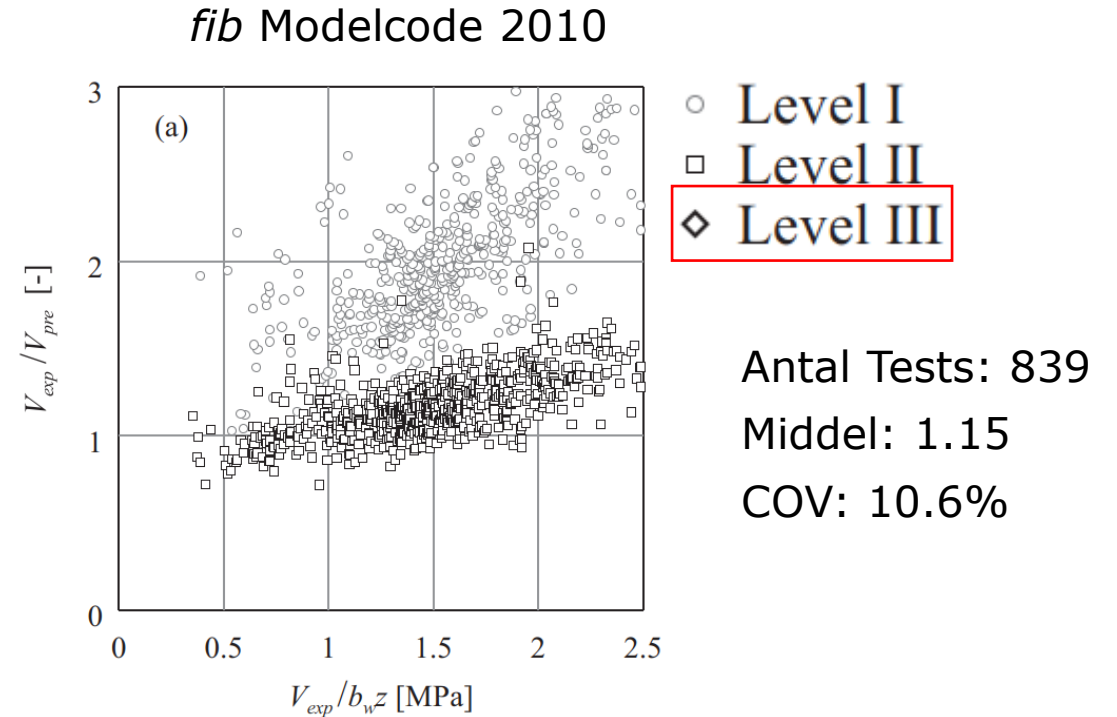
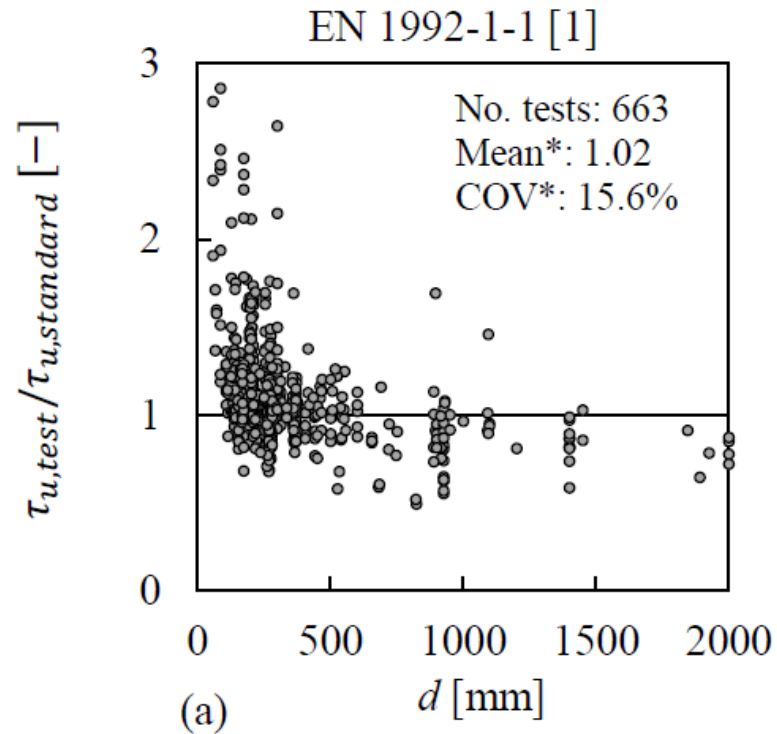
(1) Den regningsmæssige værdi af forskydningsbæreevnen $V_{Rd,c}$ er givet ved:

$$V_{Rd,c} = [C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d$$

- Principper angives med P

(1)P For eftervisning af forskydningsbæreevnen er følgende symboler defineret:

Beregningsmodel for ikkeforskydningsarmeret



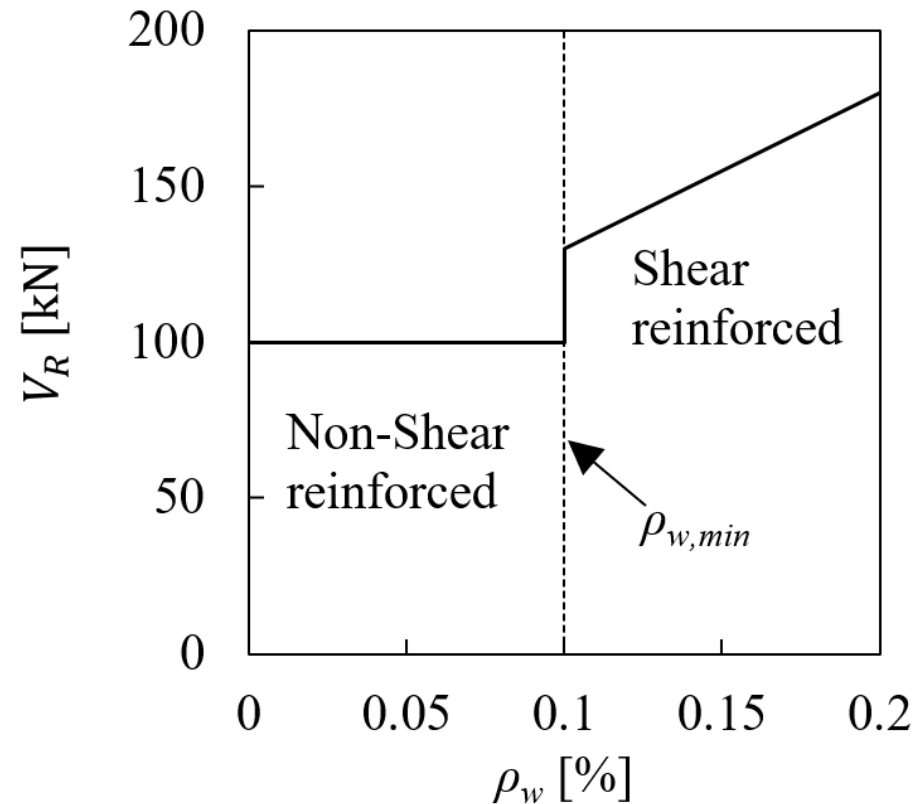
Krav til forskydningsarmering i Eurocode 2

Hvis $\rho_w < \rho_{w,min}$

- Betragtes konstruktionen ikkeforskydningsarmeret

Hvis $s > s_{max}$

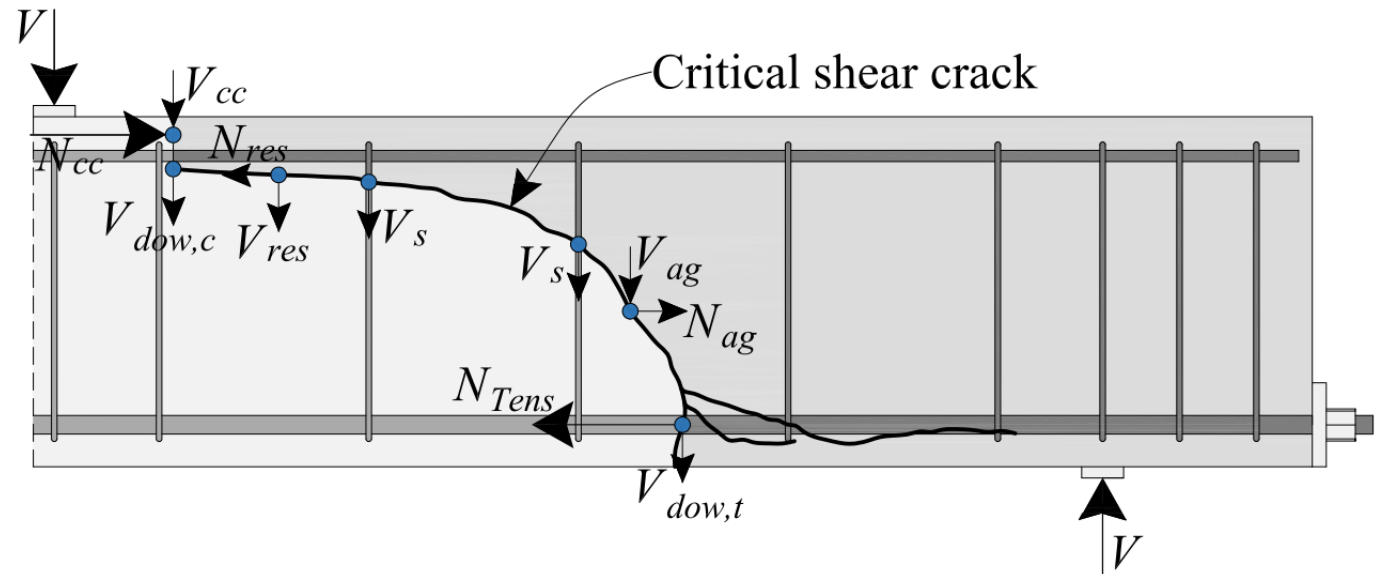
- Betragtes konstruktionen ikkeforskydningsarmeret
- I Danmark blev, $\rho_{w,min}$, først introduceret med DS/ENV:1992-1-1 i 1993 (første Eurocode 2)



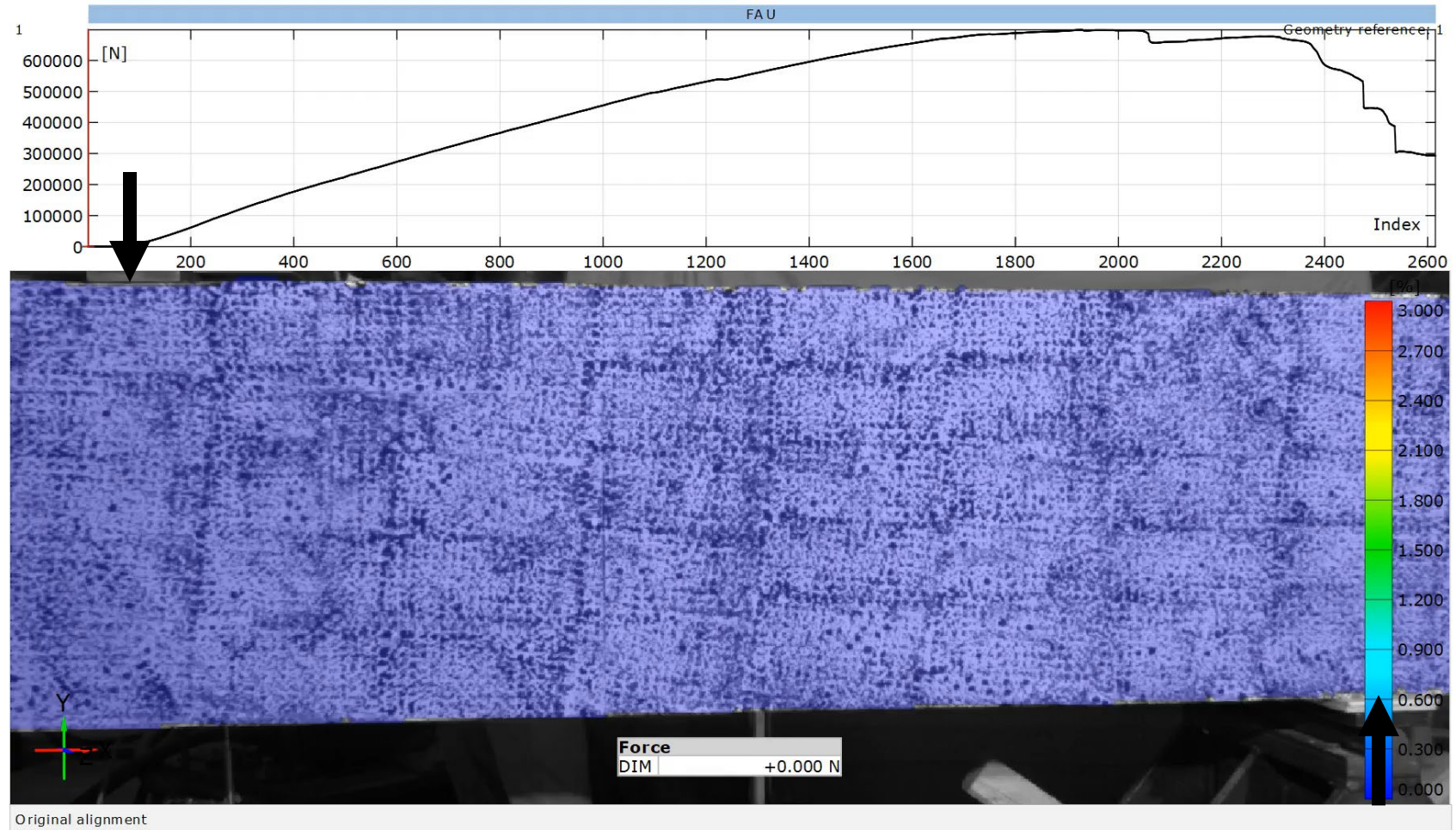
Forskydningsopførslen af betonbjælker

Forskydningsbæreevnen styres af bidrags fra:

- Trækspændinger over revnen, V_{res}
- Friktion mellem revneflader, V_{ag}
- Trykzonen, V_{cc}
- Dorn virkning, V_{dow}
- Forskydningsarmering, V_s



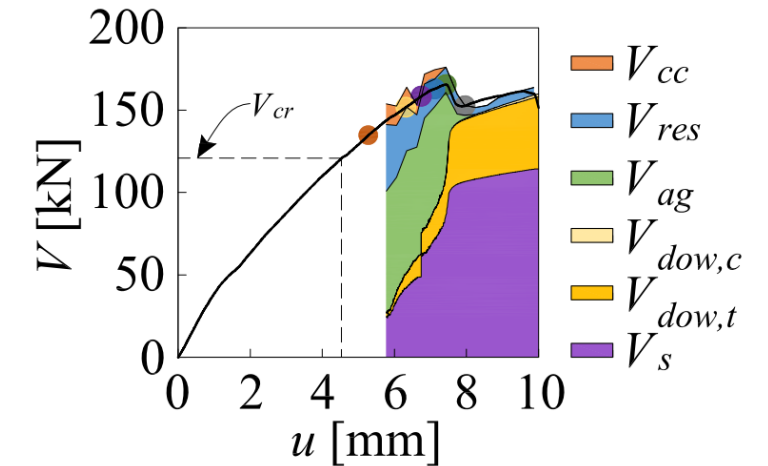
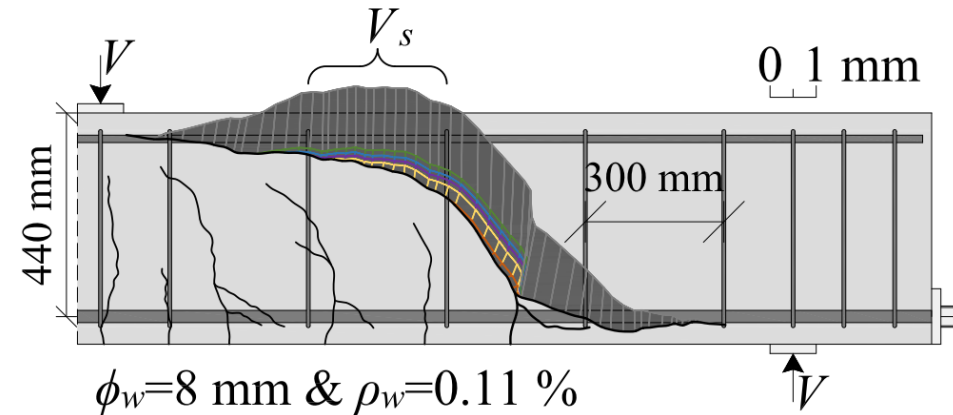
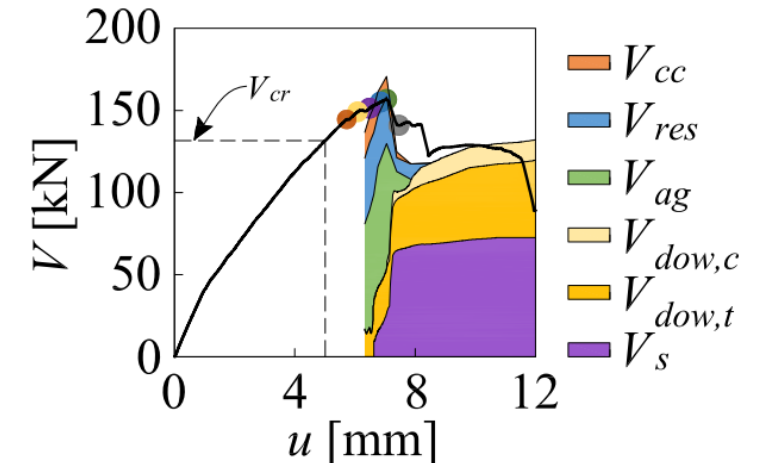
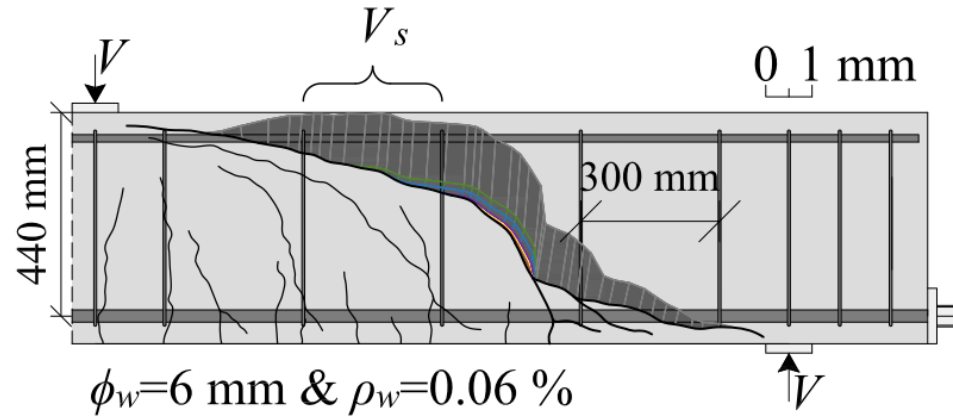
Forskydningsforsøg af bjælke med DIC



Analyse af forskydningsforsøg

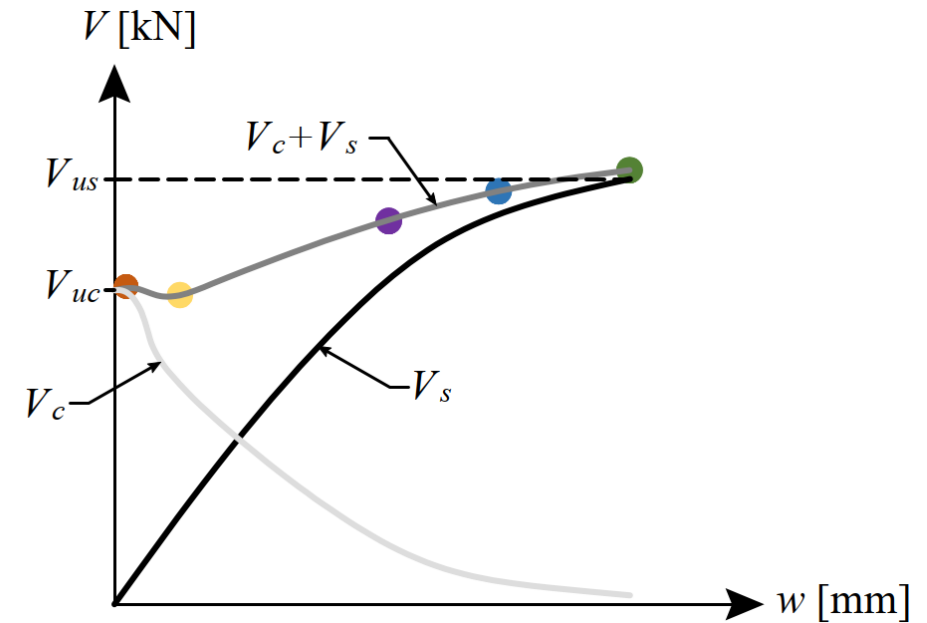
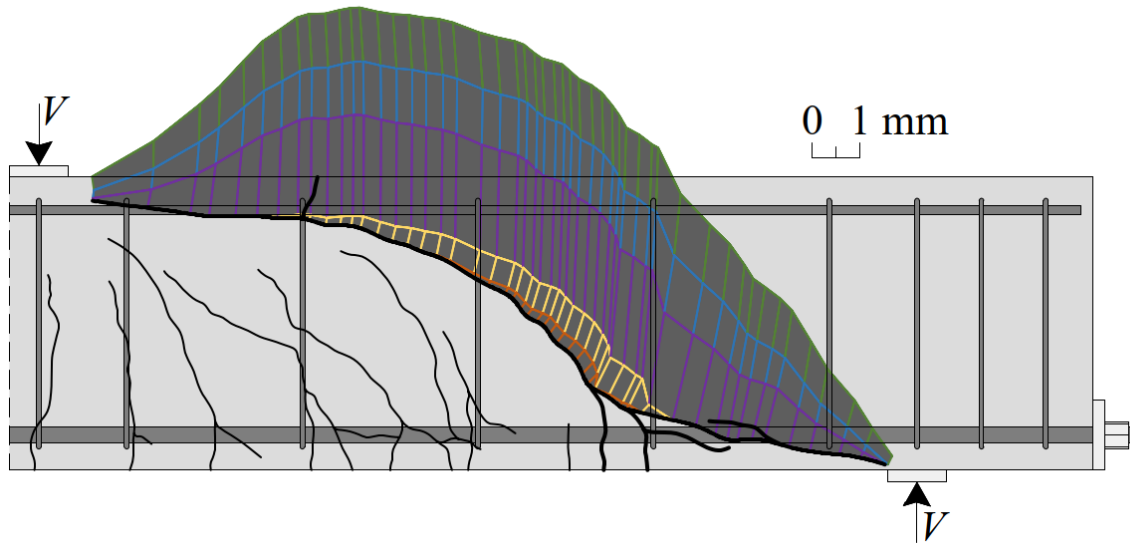
Parametre:

- $f_{cm} \approx 40 \text{ MPa}$
- $f_{yw} = 500 - 580 \text{ MPa}$
- $\rho_{w,min} \approx 0,1\% \text{ (EC2)}$
- $a/d = 3,4$

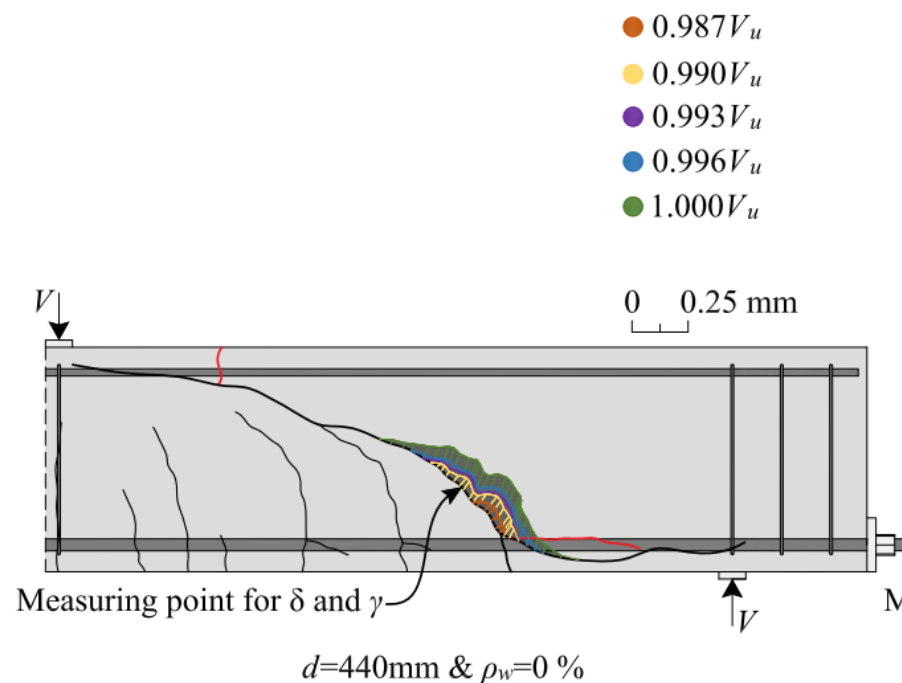


Observeret forskydningsopførsel

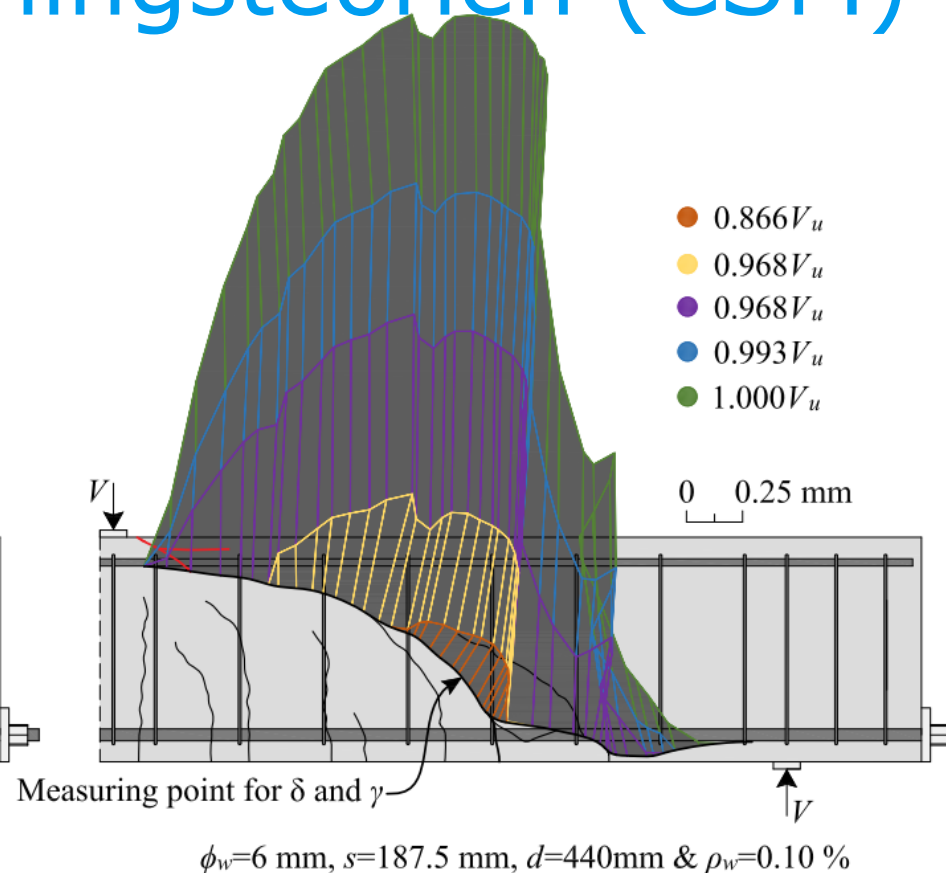
- Ved små revnevidder $\rightarrow$ betonbidrag, V_c
- Ved større revnevidder $\rightarrow$ armeringsbidragene, V_s



Udvidelse af revneglidningsteorien (CSM)

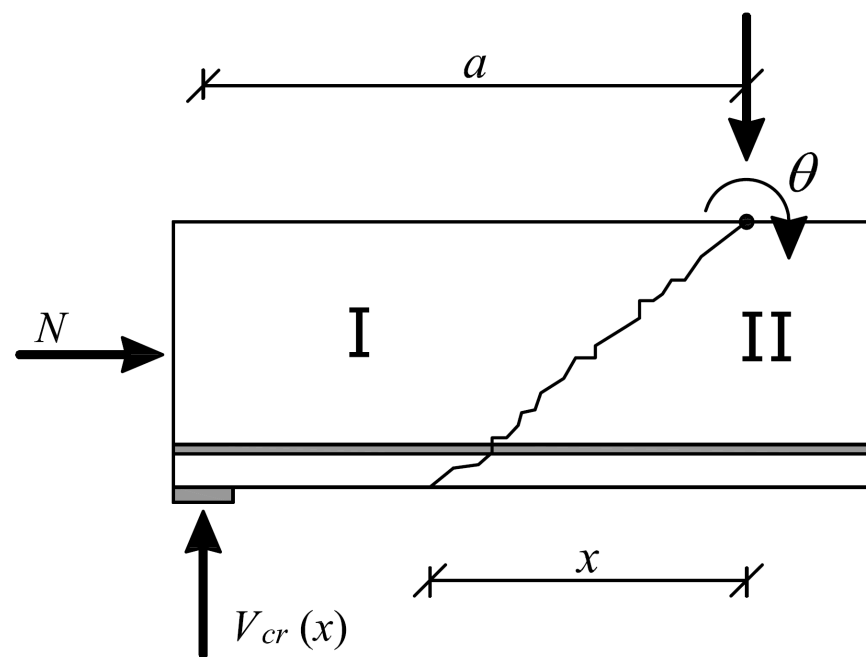


Dækket af CSM

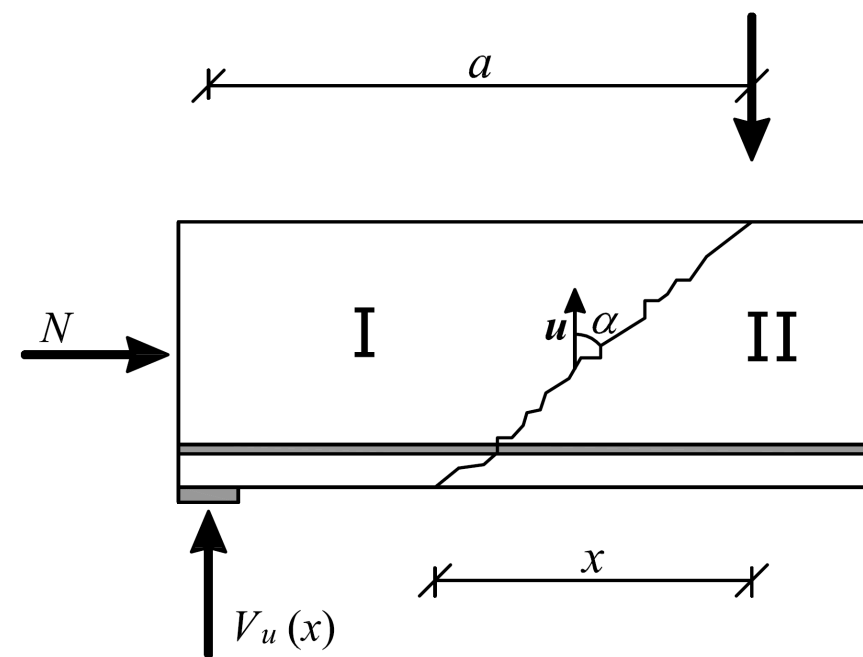
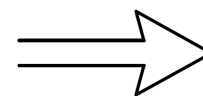


Udvidelse til CSM

Revneglidningsteorien (CSM)



Revnedannelse



Revneglidning

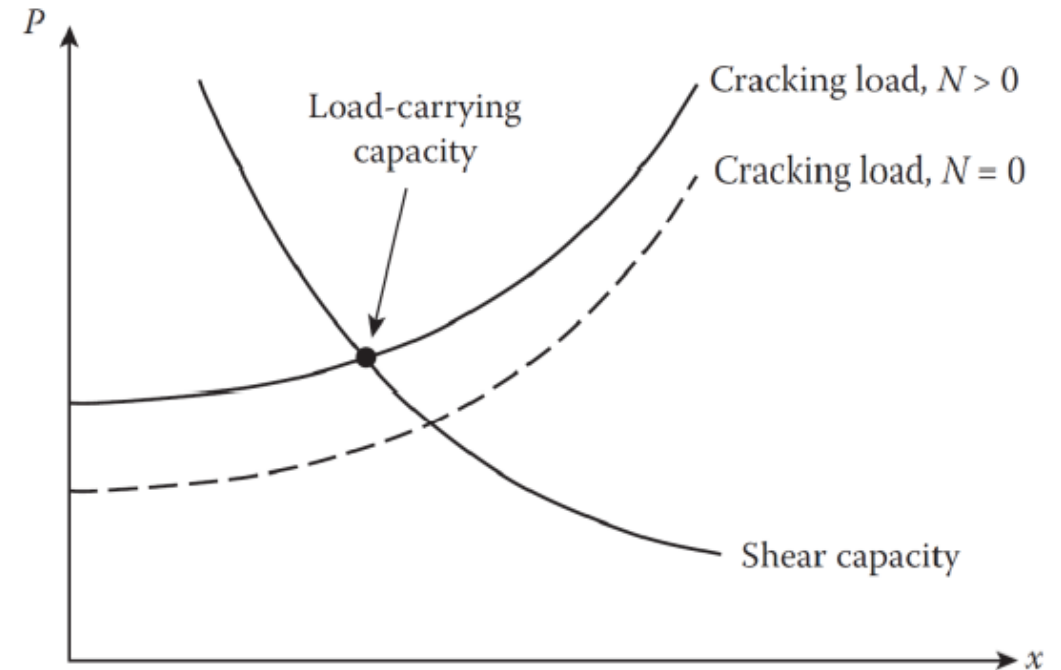
Revneglidningsteorien (CSM)

Glidningsmodstanden for revnet beton:

$$V_{uc} = \frac{1}{2} \cdot v_c \cdot f_c \cdot \left(\sqrt{1 + \left(\frac{x}{h} \right)^2} - \frac{x}{h} \right) \cdot b \cdot h$$

Revnelasten:

$$V_{cr} = \frac{\frac{1}{2} \cdot b \cdot f_{ct.ef} \cdot (h^2 + x^2)}{a}$$



Bidrag fra dornvirking

Indre inkrementelt lagret elastisk arbejde:

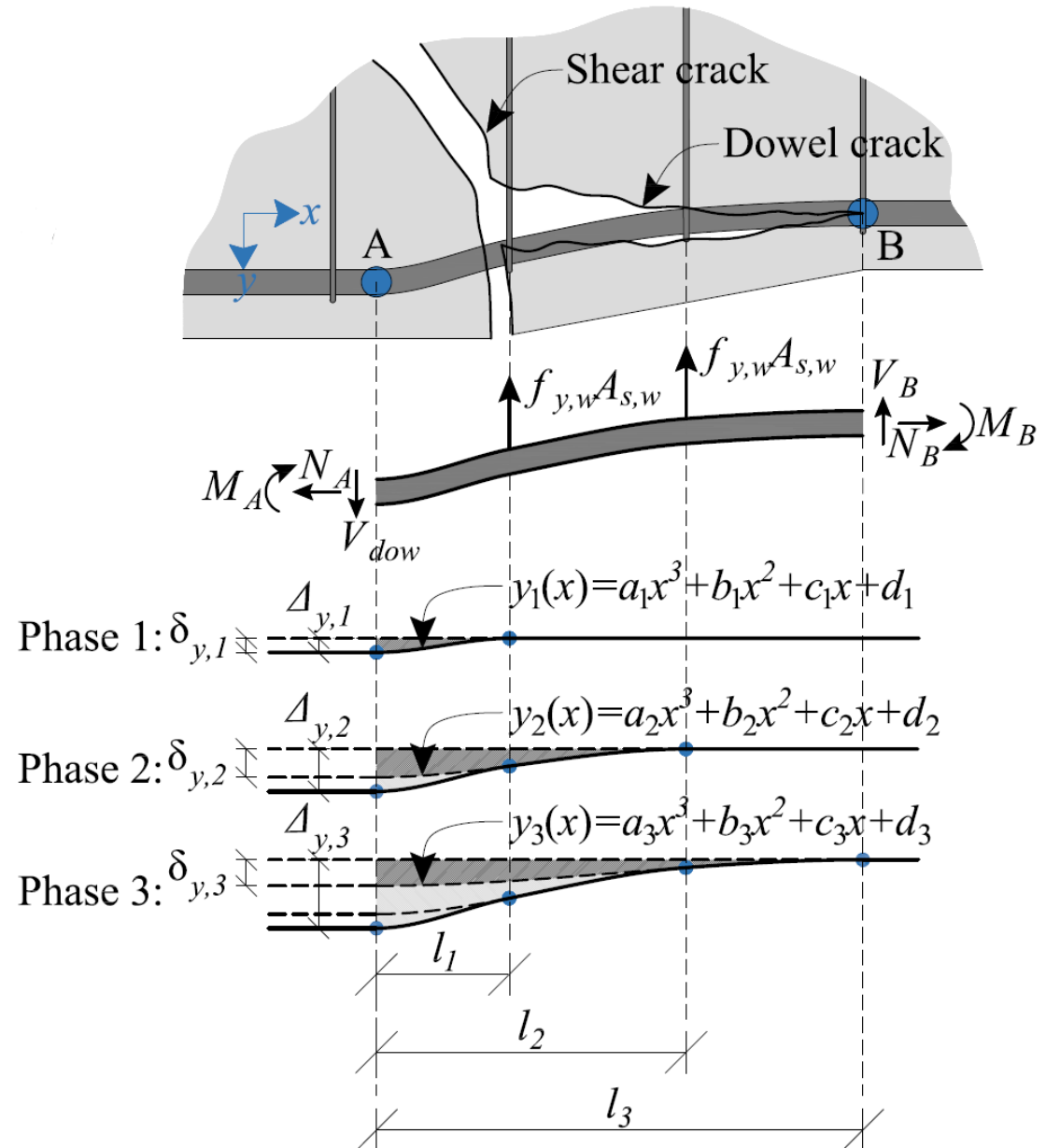
$$\dot{W}_{i,d} = \sum_{j=1}^i \int_0^{l_j} M_j(x) \dot{\kappa}_j(x) dx$$

Indre inkrementelt dissiperet plastisk arbejde:

$$\dot{W}_{i,w} = \sum_{j=1}^i \int_0^{l_j} \rho_w \cdot \sigma_{sw} \cdot b_w \cdot \dot{\Delta}_{y,ji}(x) dx$$

Ydre inkrementelt arbejde:

$$\dot{W}_E = V_{dow} \cdot \dot{\Delta}_{y,i}$$



Armeringsbæreevnen

Forskydningsbæreevnen af dornvirkning

$$V_{dow} = 12 \cdot E_{sl} \cdot I_l \cdot n_l \cdot \frac{\Delta_y}{l_{dow}^3} + \frac{1}{2} \rho_w \cdot \sigma_{sw} \cdot b_w \cdot l_{dow}$$

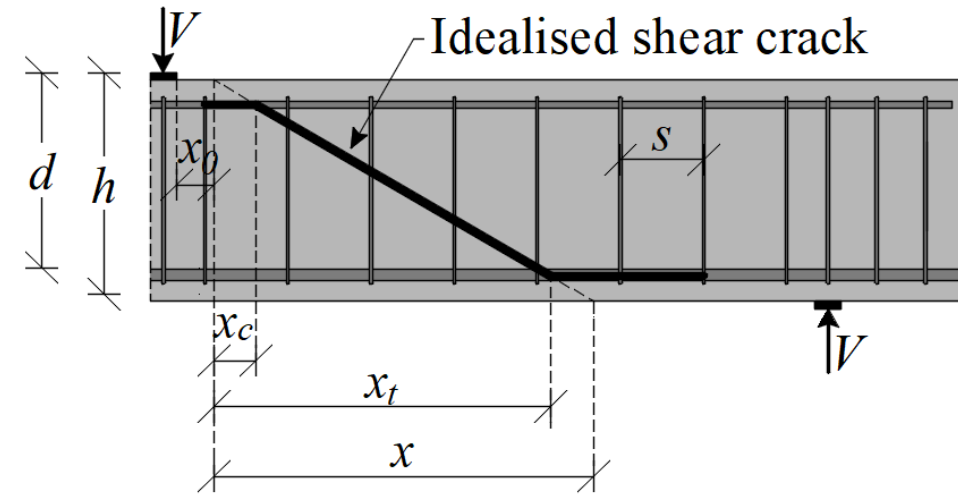
$$l_{dow} = \left(\frac{72 \cdot E_{sl} \cdot I_l \cdot n_l \cdot \Delta_y}{b \cdot \sigma_{sw} \cdot \rho_w} \right)^{1/4}$$

Forskydningsbæreevnen af bøjler

$$V_{sw} = \int_{x_c}^{x_t} \rho_w \cdot \sigma_{sw} \cdot b_w dx = \rho_w \cdot \sigma_{sw} \cdot b_w \cdot x \left(\frac{2d}{h} - 1 \right)$$

Armeringsbæreevnen

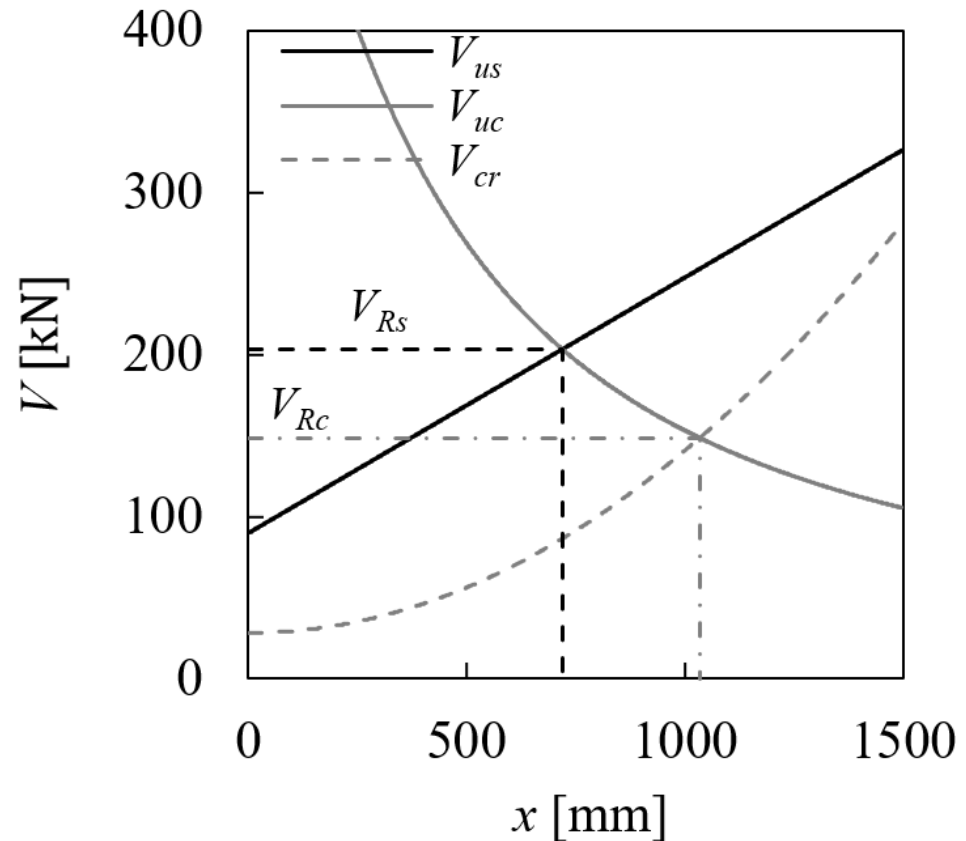
$$V_{us} = V_{sw} + V_{dow,t} + V_{dow,c}$$



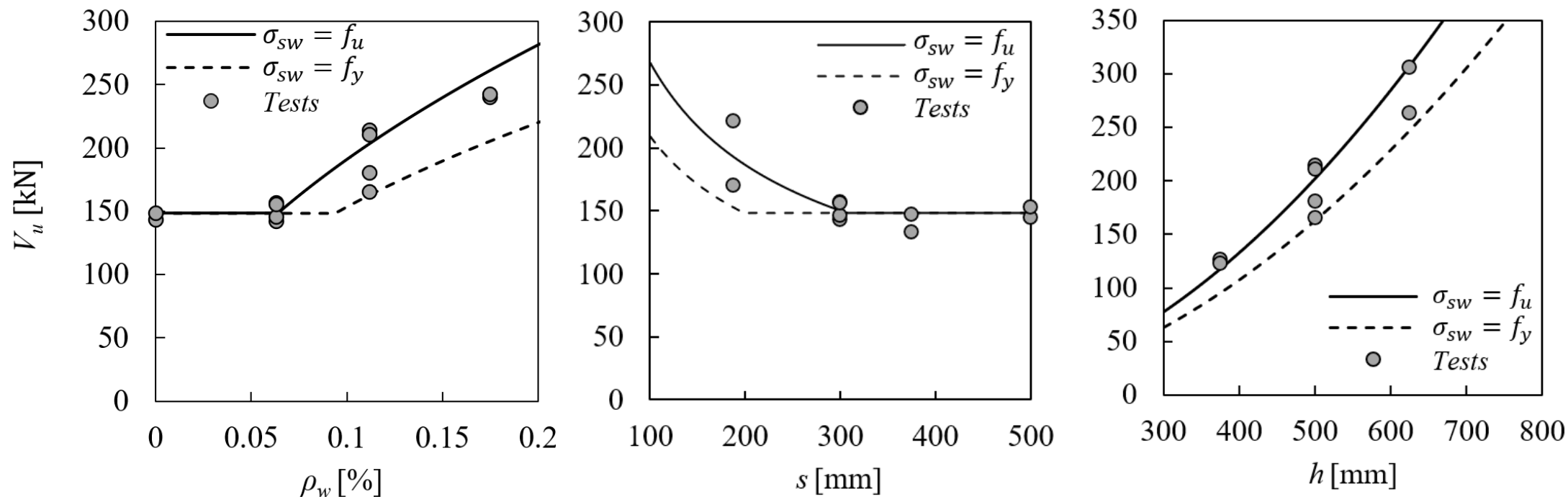
Bestemmelse af forskydningskapaciteten

Forskydningskapaciteten er den maksimale af:

- $V_{uc} = V_{us}$ (Revneglidning = Armeringsbæreevnen)
- $V_{uc} = V_{cr}$ (Revneglidning = Revnelasten)



Sammenligning med forsøg



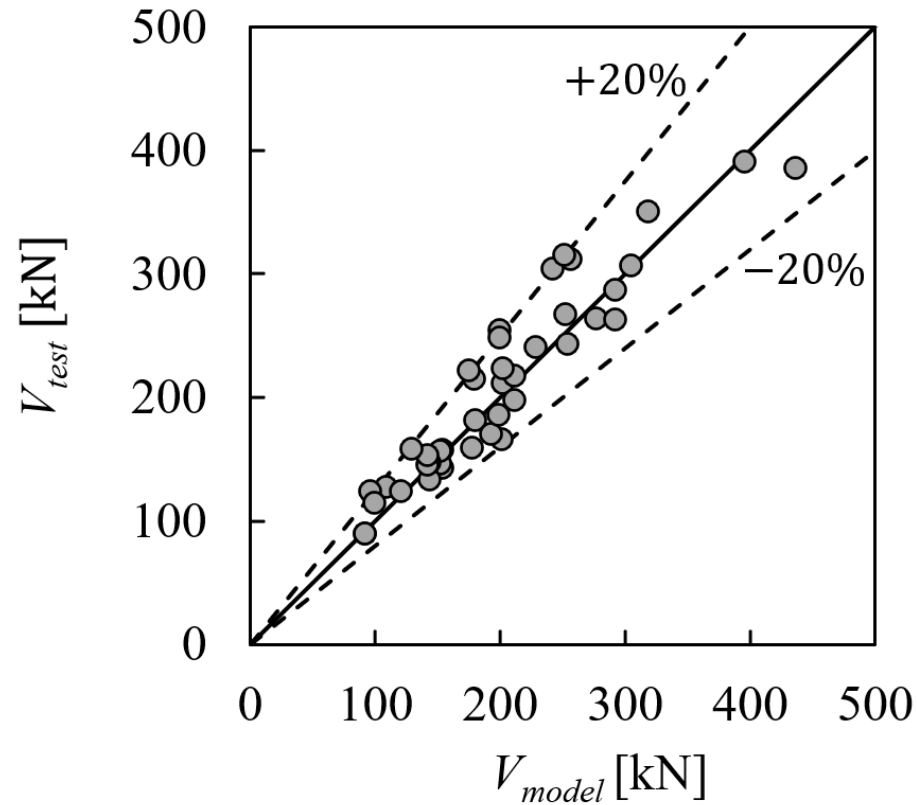
Sammenligning med forsøg

Modelusikkerheder:

- Middel: 1.04
- COV: 11,9%

Varieret parametre:

- ρ_w , armeringsgraden
- s , bøjleafstand
- ϕ_w , diameter for bøjler
- duktilitetsklasse A, B og C
- f_c , betonstyrke
- d , effektiv højde
- b_w , bjælkebredde

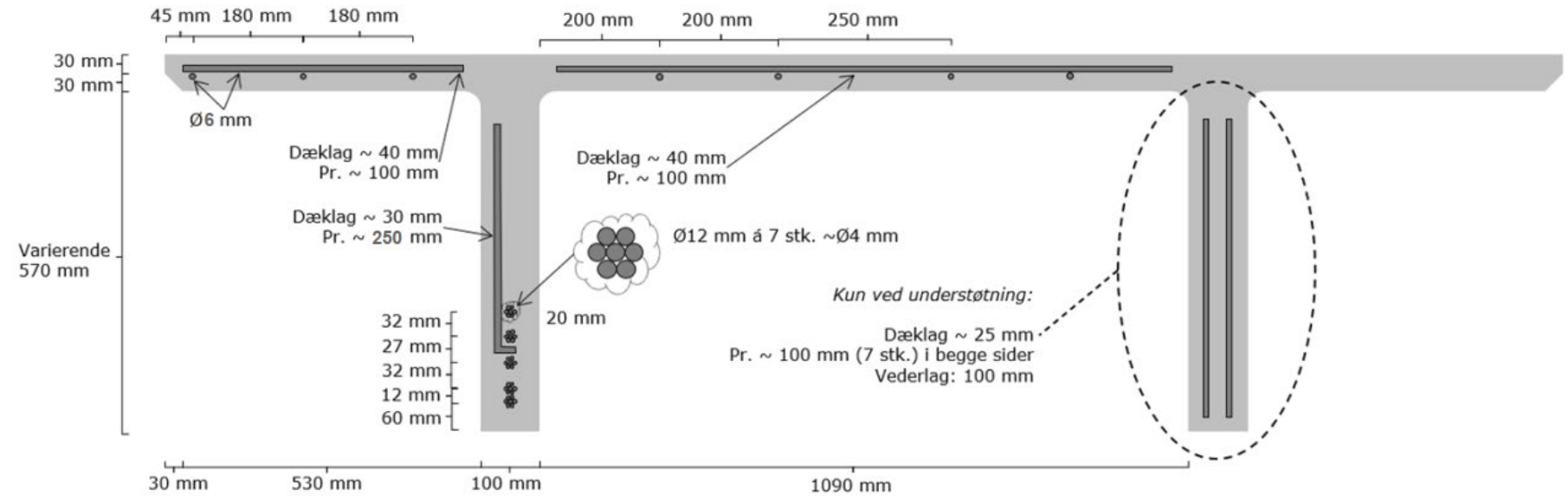


Praktisk eksempel

Genberegning af tag pga. Observerede revner

Parametre:

- $l = 18,5m$
- $f_{ck} = 35MPa$
- $f_{yw} = 500MPa$
- $\rho_w = 0,11\%$
- $\rho_{w,min} = 0,075\%$
- $s = 250mm$
- $\phi_w = 6mm$



Praktisk eksempel

Bæreevne iht. Eurocode 2

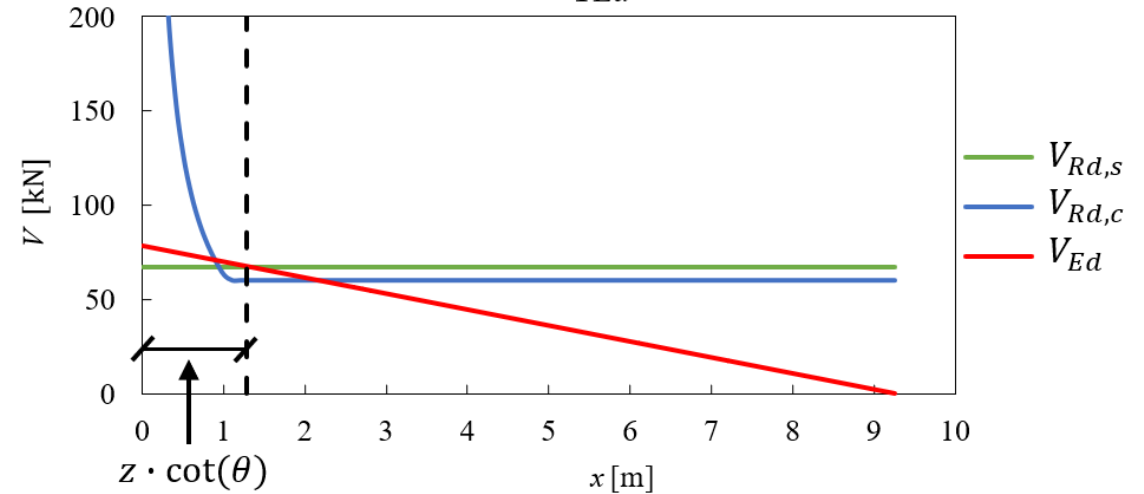
- $V_{Rd,s,EC2} = 67,5 \text{ kN}$
- $V_{Rd,c,EC2} = 60,4 \text{ kN}$
- Max $q_{Ed} = 8,5 \text{ kN/m}$

Bæreevne iht. Præsenteret model

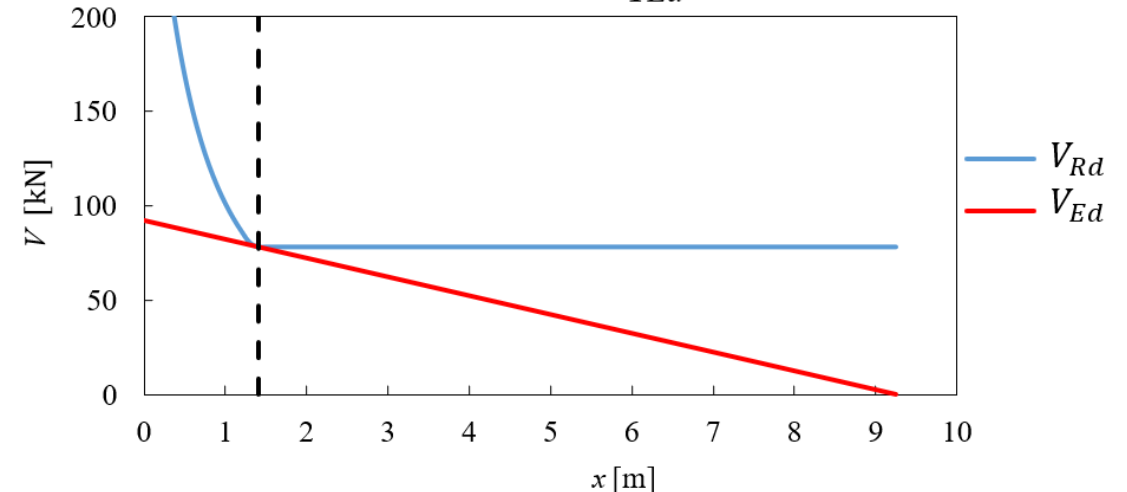
- $V_{Rd,s} = 78,1 \text{ kN}$
- Max $q_{Ed} = 10 \text{ kN/m}$
- Øget med 17%

2,7 tons CO₂ sparet pr. element

Eurocode 2, $q_{Ed} = 8,5 \text{ kN/m}$



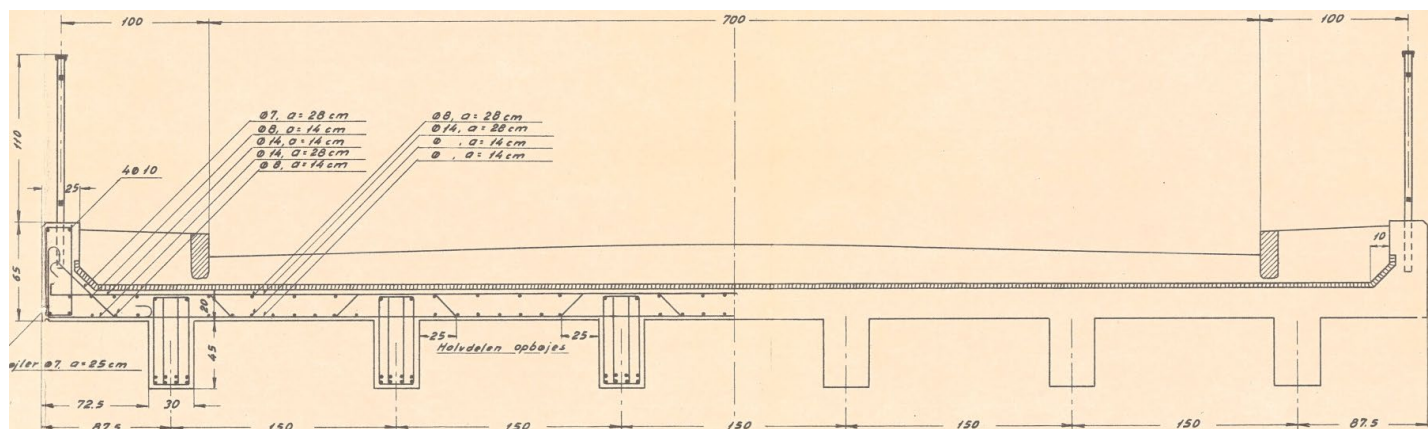
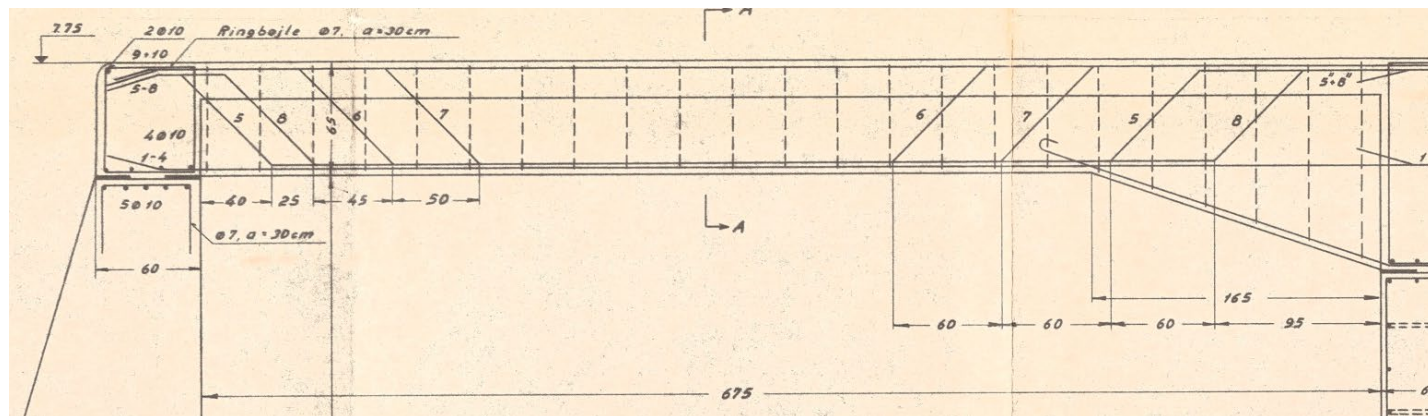
Præsenteret model, $q_{Ed} = 10 \text{ kN/m}$



Igangværende initiativer

PhD projekt om opbukket armering

- Muligt at øge bidraget fra opbukket armering med min. 20%
- VD har ca. 800 betonbroer fra før 1980
- Mange af disse broer udformet med opbukket armering
- Typisk kritisk i forskydning



Afslutning

Jeg håber, at jeg er kommet igennem med følgende budskaber:

- Beregninger af eksisterende konstruktioner kan gøres med mange forskellige detaljeringsniveauer.
- Resultatet af en beregning afhænger meget af den anvendte beregningsmetode.
- Der kan spares penge og CO2 ved benyttelse af den til opgaven rigtige beregningsmetode.

Frederik Autrup, Chef Specialist, PhD

Afdeling for Monitoring og Analyse af Eksisterende konstruktioner

FAU@ramboll.dk

RAMBOLL

Bright ideas.
Sustainable change.