Strukturel Bæredygtighedsindikator i beton

Jens Peder Ulfkjær
Lecturer VIA Horsens og UHPConsult
Per Goltermann
Professor og studieleder DTU Construct

Dagsorden

1. Hvad skal vi bruge en indikator til ?
2. Hvad er en strukturel bæredygtighedsindikator ?
3. Korte søjler
4. Søjler med søjlevirkning
5. Gevinst ved detaljeret søjleberegning
6. Bjælker
7. Konklusion

1. Hvad skal vi bruge en indikator til ?

LCA opgør CO_2-aftrykket, når designet ligger fast. Den siger ikke, hvilket design der skulle have været valgt.

Bygningsreglementets grænse gælder pr. m² bygning, men **valgene træffes pr. konstruktionsdel**: søjle for søjle, bjælke for bjælke. Der mangler et tal på det niveau.

Tallet skal koble ydeevne og CO_2, fordi de to følger af de samme valg: materiale, styrke, armeringsgrad og tværsnit. Vurderes de hver for sig, vælger man forkert.

Det skal **sammenligne materialer** på designs, der kan bygges, og gælde for alle konstruktionsdele. **Vi bruger søjler og bjælker som eksempler**.

Det skal vise retningen: mere eller mindre armering, stærkere eller svagere beton, hvilket stål. Parameterstudiet laves for en type konstruktionsdel ad gangen, ikke for hver enkelt søjle i projektet.

Indikatoren er et stærkt værktøj: Den viser, hvordan materialevalg, styrke og armering hænger sammen med CO_2 og muliggør en klar optimering.

Det er derfor, den strukturelle bæredygtighedsindikator indføres.

2. Hvad er en strukturel bæredygtighedsindikator ?

Indikatoren er forholdet mellem en ydeevne og det CO_2-aftryk, det koster at levere den

$$I_{UG} = \frac{\text{Ydeevne}}{GWP}$$

Vi indfører en ekstra parameter for beton og stål, deres CO_2-effektivitet, som er forholdet mellem styrke og CO_2-intensitet, hvor g_c og g_s er CO_2-intensiteten i kg CO_2 pr. m³ beton og stål:

$\frac{f_{ck}}{g_c}$ og $\frac{f_{yk}}{g_s}$ i MPa·m³/kg.

Datagrundlag

Beton g_c/m^3

Trykstyrke f_{ck} [MPa]	CEM I		Lav-CO_2 (Futurecem)		CCS (50% CO2 fangst)	
	CO_2 [kg/m³]	Styrke pr. CO_2 [MPa·m³/kg]	CO_2 [kg/m³]	Styrke pr. CO_2 [MPa·m³/kg]	CO_2 [kg/m³]	Styrke pr. CO_2 [MPa·m³/kg]
20	195	0,103	137	0,146	98	0,204
30	237	0,127	166	0,181	119	0,252
40	283	0,141	198	0,202	142	0,282

Stål g_s/m^3

Scenarie	CO_2 [kg/m³]	Styrke pr. CO_2 [MPa·m³/kg]	Produktion
Nuværende stål	13.000	0,038	Malm, højovn, kulbaseret el
Genanvendt stål	7.000	0,071	Skrot, EAF
Grønt stål	2.500	0,200	Skrot, EAF, grøn el

EAF = elektrisk lysbueovn · Flydespænding f_{yk} = 500 MPa i alle scenarier · Der regnes med karakteristiske værdier, indeks k

3. Korte søjler

Den korte søjle regnes stift-plastisk, materialerne udnyttes til deres styrke, og der er ingen søjlevirkning. Søjlen er centralt belastet og bæreevnen er

$$N_{Rk} = f_{ck}A_c + f_{yk}A_s = \left[f_{ck}(1-\rho) + f_{yk}\rho\right]A$$

CO_2-aftrykket er volumen gange intensitet af de to materialer, hvor L er søjlens længde

$$GWP = [g_c(1-\rho) + g_s\rho]AL$$

Sættes udtrykkene for bæreevnen og CO_2-aftrykket ind i indikatoren, finder vi

$$I_{UG} = \frac{N_{Rk}}{GWP} = \frac{\left[f_{ck}(1-\rho) + f_{yk}\rho\right]}{[g_c(1-\rho) + g_s\rho]L}$$

Om maksimum ligger ved ρ_{min} eller ρ_{max}, afgøres af bæredygtighedsparameteren Φ_{UG} :

$$\Phi_{UG} = \frac{f_{ck}/g_c}{f_{yk}/g_s}$$

$$\boldsymbol{\Phi_{UG} > 1 \Rightarrow \rho_{opt} = \rho_{min}}$$
$$\boldsymbol{\Phi_{UG} < 1 \Rightarrow \rho_{opt} = \rho_{max}}$$

Hvad er det optimale design

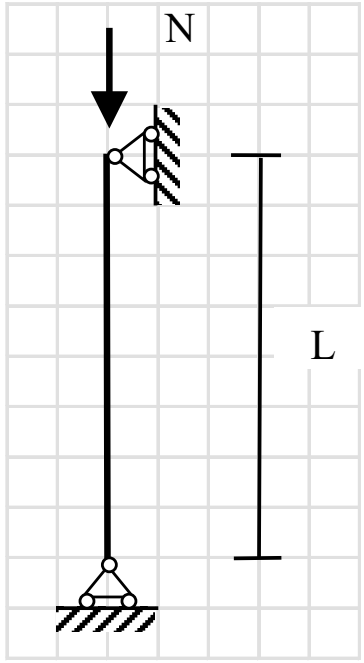
Bæredygtighedsparameteren Φ_{UG} for de ni kombinationer af beton og stål, f_{yk} = 500 MPa.

	CEM I			Lav-CO_2			CCS		
f_{ck} [MPa]	Nuv.	Genanv.	Grønt	Nuv.	Genanv.	Grønt	Nuv.	Genanv.	Grønt
20	2,7	1,4	0,5	3,8	2,0	0,7	5,3	2,9	**1,0**
30	3,3	1,8	0,6	4,7	2,5	0,9	6,5	3,5	1,3
40	3,7	2,0	0,7	5,2	2,8	**1,0**	7,3	3,9	1,4

Med nuværende eller genanvendt stål er Φ_{UG} over 1 overalt: minimumsarmering, uanset beton.

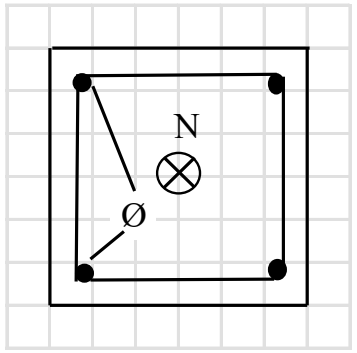
Med grønt stål afhænger svaret af betontypen: CEM I og lav-CO_2 (C20, C30) giver maksimumsarmering, CCS minimumsarmering.
I cellerne med 1,0 er armeringsgraden uden betydning.

Dimensioneringseksempel



En søjle med L = 4,5 m skal bære N_D = 3000 kN. Frit valg af sidelængde, betonstyrke mellem C20 og C40, ståltype og armeringsgrad mellem 0,2 % og 4 %.

Tværsnittet dimensioneres, så bæreevnen præcis dækker lasten. Arealet følger derefter af de øvrige valg.



Spørgsmålet er, hvilken kombination der giver det laveste CO_2-aftryk, og hvad den koster.

Eksempel: betonstyrkens betydning

Ved minimumsarmering, ρ = 0,2 %	C20	C30	C40
Sidelængde a [mm]	378	311	271
GWP [kg CO_2]	142	115	102
Pris [DKK]	1040	805	671

Stærkere beton giver et mindre tværsnit. Det mindre tværsnit sparer mere CO_2, end den højere intensitet koster.

C40 frem for C20 sænker aftrykket 28 % og prisen 35 %.
Betonstyrken vælges højest.

Eksempel: armering og ståltypes betydning

Ved C40	ρ = 0,2 %	ρ = 4 %
Sidelængde a [mm]	271	227
GWP, nuværende stål [kg CO_2]	102	183
GWP, genanvendt stål [kg CO_2]	98	128
GWP, grønt stål [kg CO_2]	95	86
Pris, nuværende og genanvendt stål [DKK]	671	752
Pris, grønt stål [DKK]	677	836

Armeringsgraden vælges efter stålet: minimum med nuværende og genanvendt stål, maksimum med grønt. Det følger af Φ_{UG} for de tre stålscenarier.

Genanvendt stål ved minimumsarmering sænker aftrykket 4 % til samme pris. Grønt stål ved maksimumsarmering sænker det 16 %, men koster 25 % mere.

4. Søjler med søjlevirkning

Bæreevnen regnes med Ritters søjleformel: betonen bærer den reducerede spænding σ_{crk}, og armeringen følger betonens tøjning,

$$N_{Rk} = \sigma_{crk} A_c + \sigma_s A_s$$

hvor

$$\sigma_{crk} = \frac{f_{ck}}{1+\frac{\lambda^2 f_{ck}}{\pi^2 E_{0crk}}} \text{ og } \sigma_s = E_s \varepsilon_c = \alpha\, \sigma_{crk} \leq f_{yk} \; og \;\; \alpha = \frac{E_s \varepsilon_{c1}}{f_{ck}}$$

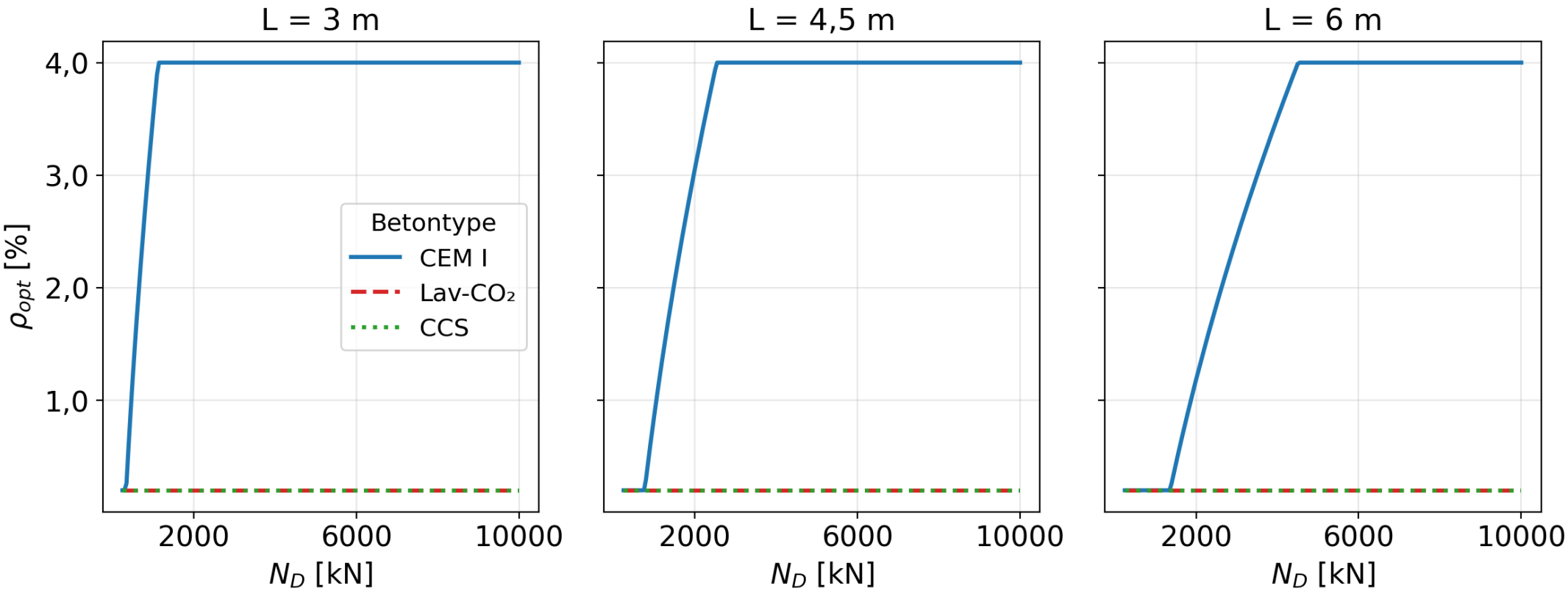
Bæreevnen sættes ind i bæredygtighedsindikatoren $I_{UG} = N_{Rk}/\text{GWP}$ som:

$$I_{UG} = \frac{[f_{ck}(1-\rho) + f_{se}\rho]}{[g_c(1-\rho) + g_s\rho]L} \frac{1}{1+\frac{\lambda^2 f_{ck}}{\pi^2 E_{0crk}}}$$

Første faktor er den korte søjles indikator med det elastiske loft f_{se} for stålspændingen i stedet for f_{yk} og den anden faktor er den tilbageværende trykstyrke σ_{crk}/f_{ck} og vi finder:

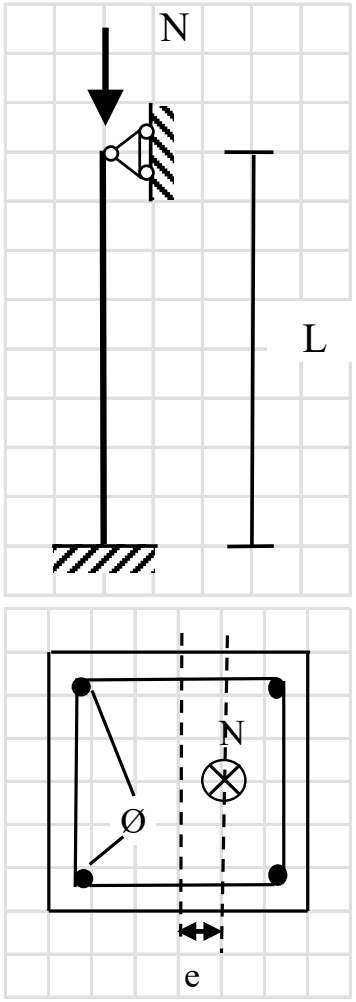
$$\Phi_{UG,\lambda} = \frac{f_{ck}/g_c}{f_{se}/g_s}$$

Søjlevirkning: hvornår armering betaler sig
Beton C30 og grønt armeringsstål



Med lav-CO_2-beton og CCS er $\rho_{opt} = \rho_{min}$ ved alle laster.
Det samme gælder med nuværende og genanvendt stål, uanset betontype.

5. Gevinst ved en avanceret søjleberegning
Beregningsudfordringen

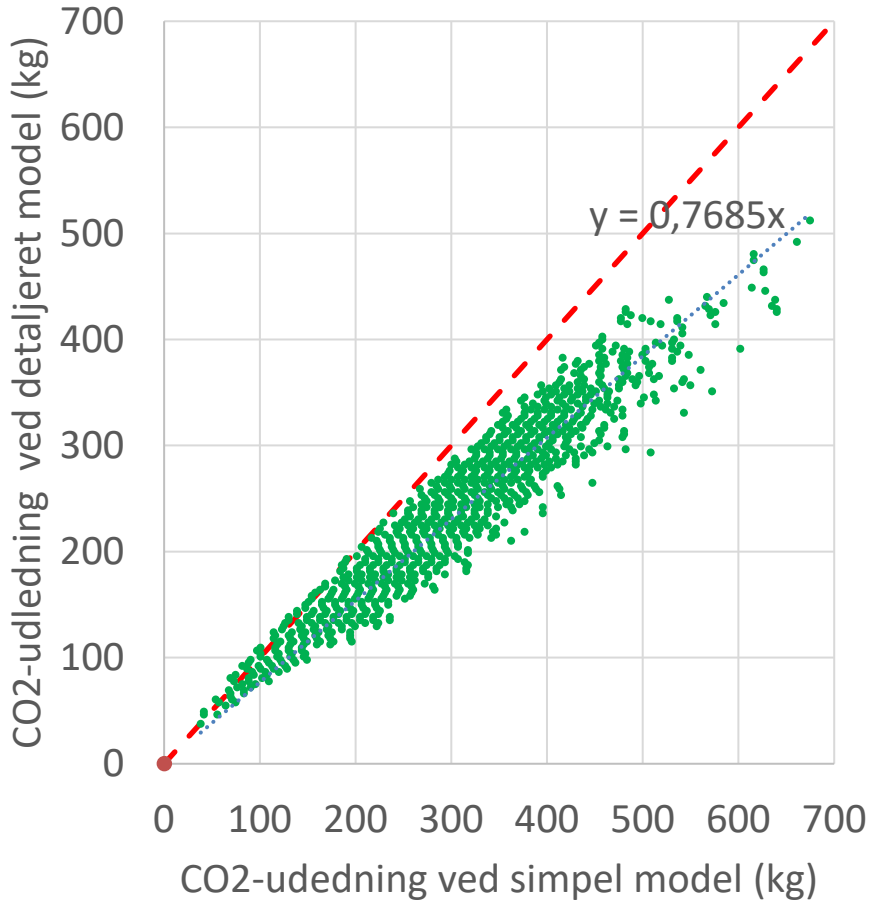


- **Modeller og arbejdskurver**
  - Simpel model fra lærebog i betonkonstruktioner
  - Numerisk model til avanceret beregning
  - Beton: Krum arbejdskurve, ingen trækstyrke
  - Stål: Lineært elastisk – stift plastisk

fck [MPa]	CO2 [kg CO2/m3]	Pris [DKK/m3]
13, 5	102	1420
18, 0	110	1500
22, 5	122	1600
27, 5	136	1710
33, 5	152	1830
40, 0	169	1970
45, 0	299	2510

Ø [mm]	CO2 [kg CO2/m3]	Pris [DKK/m3]
12	8870	34011
16		
20		
25		

Gevinst ved detaljeret beregning



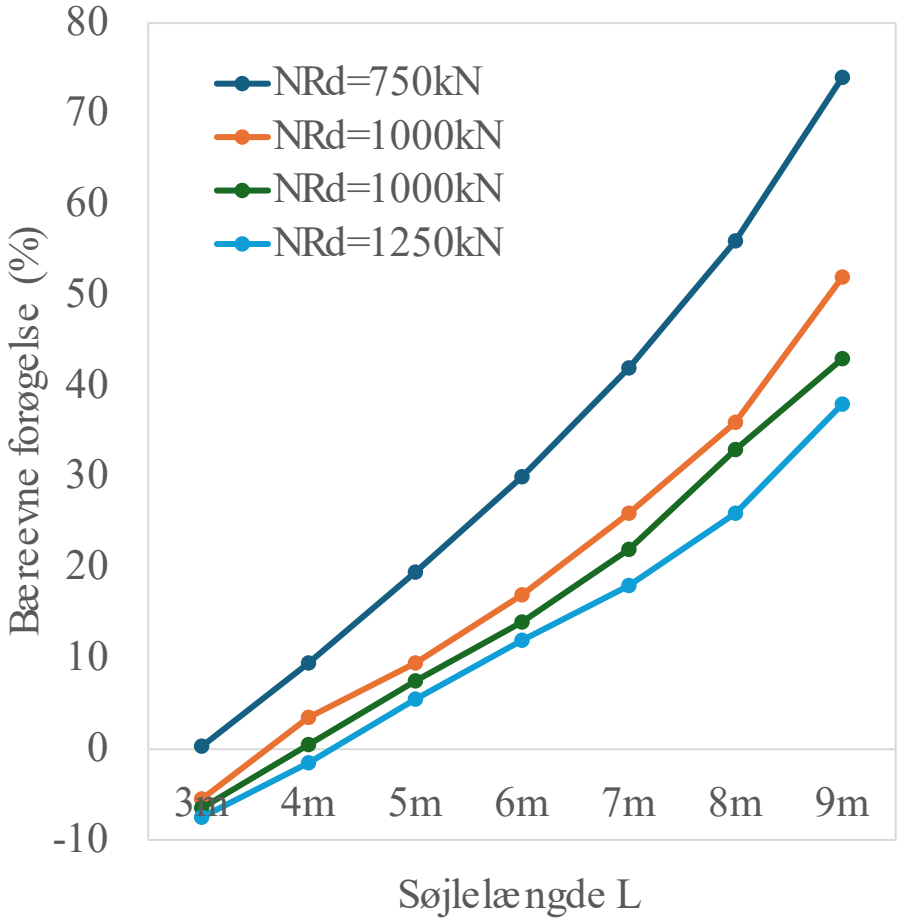
Kilde:Niels Frederik Ulf Schilling og William Stabel Ladefoged

- 196 kombinationer
  - L= 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 m
  - e = 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200 mm
  - N_{Ed} = 750, 1000, 1250, 1500 kN
- Optimer for CO2 indenfor
  - Bredde=højde i trin a 5 mm
  - fc=13.5,18, 22.5, 27.5, 33.5, 40, 45MPa
  - Ø=12, 16, 20, 24mm

  for både simpel, klassisk model og den detaljerede numeriske modellering

Der er ca 25% gevinst i snit – men det varierer

Bæreevneforøgelse ved detaljeret beregning

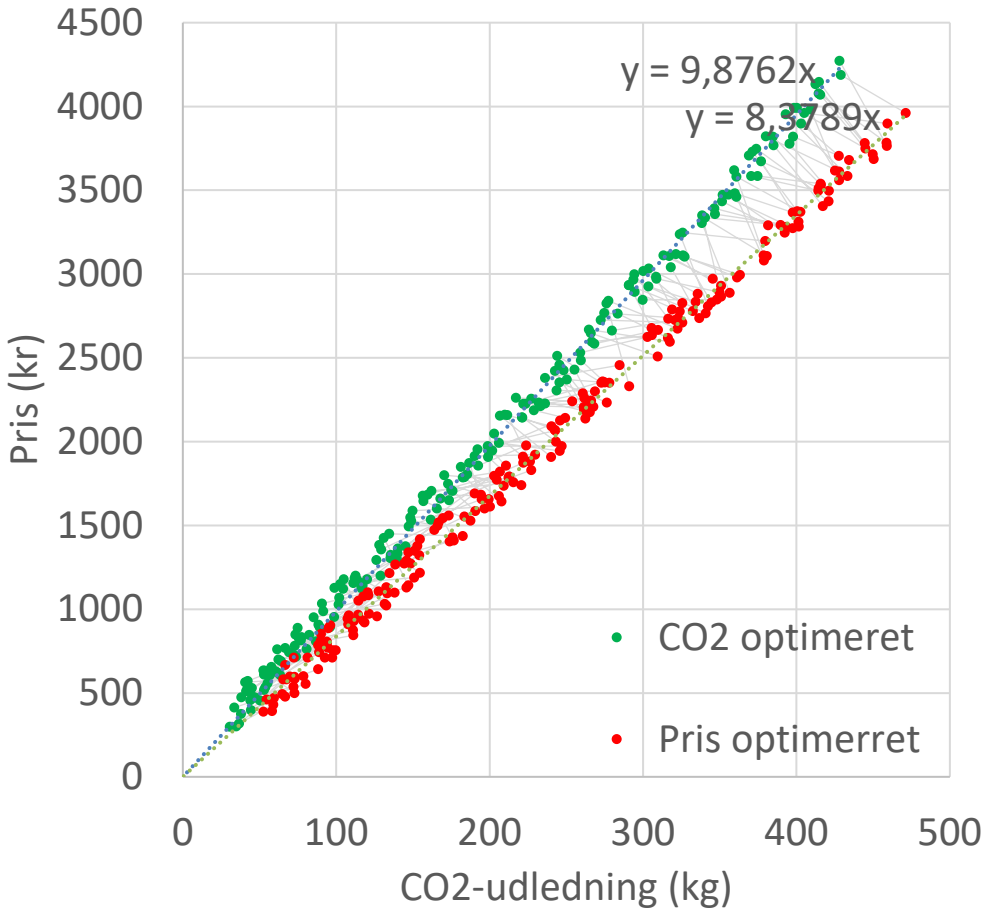


Kilde:Niels Frederik Ulf Schilling og William Stabel Ladefoged

- Optimeret tværsnit ved simpel model med e=100mm

- **Gevinsten er størst ved slanke søjler med stor søjlevirkning**

Optimering for pris versus for CO_2

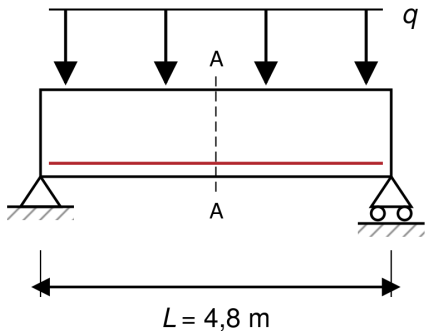


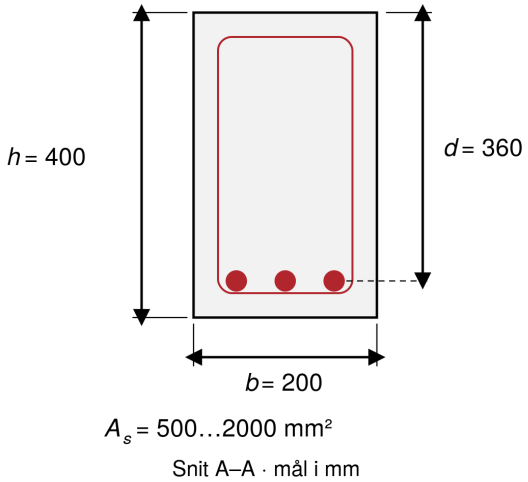
Kilde:Niels Frederik Ulf Schilling og William Stabel Ladefoged

- Samme 196 kombinationer, men optimer for hhv CO2 og pris

- **Der er ca 15% forskel imellem en prisoptimeret og en CO_2 optimeret søjle – uanset om det er pris eller CO_2 vi taler om**

6. Bjælker: fra normalkraft til moment





Ydeevnen er nu momentbæreevnen M_{Rk} i et normalarmeret tværsnit

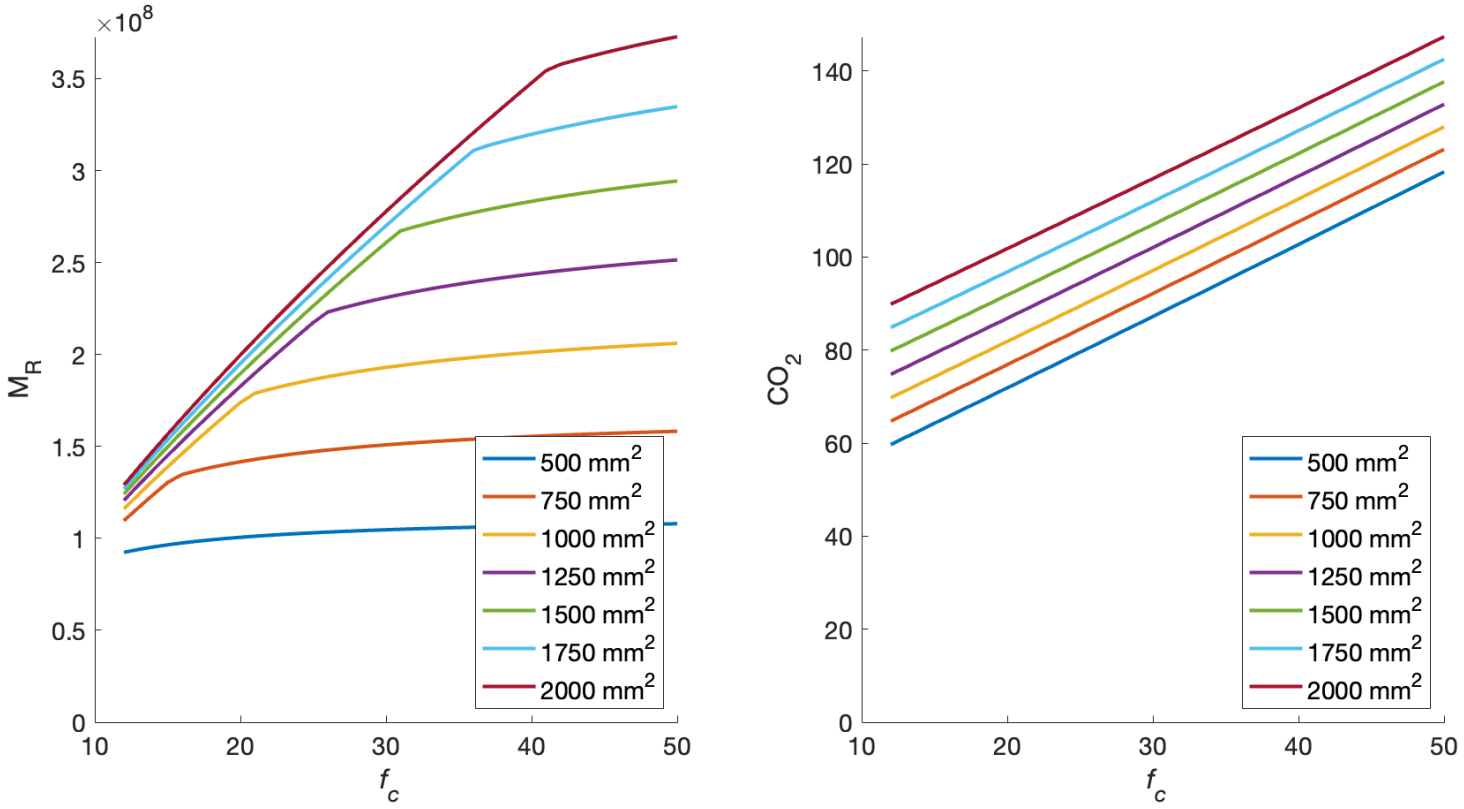
$$M_{Rk} = \left(1 - \frac{1}{2}\omega\right) \omega \; b \; d^2 f_{ck}$$

$$\omega = (As \; fyk)/(b \; d \; \eta \; fck)$$

I det overarmerede tværsnit knuses betonen, før armeringen flyder og hvor momentbæreevnen vokser langsommere med A_s. Det er mere komplicerede formler.

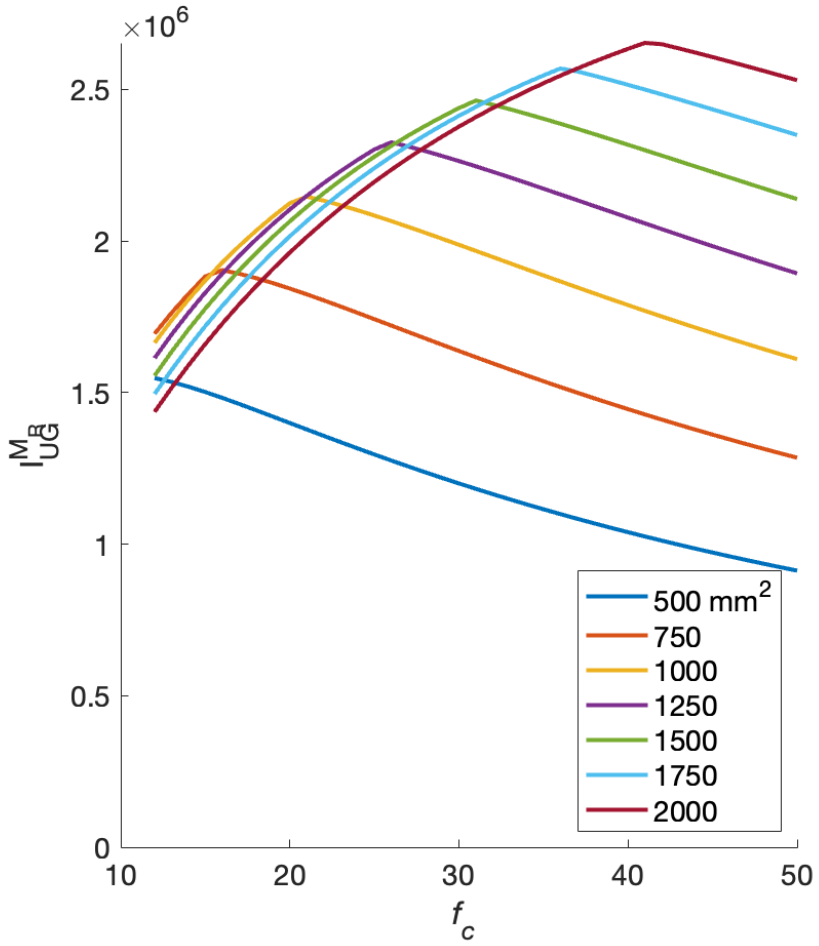
Det underarmerede tværsnit er ikke relevant af hensyn til sikkerheden

Bjælker: bæreevne og CO_2



Momentbæreevnen M_{Rk} vokser med betonstyrken, indtil tværsnittet går fra overarmeret til normalarmeret. Derefter vokser M_{Rk} kun svagt med f_{ck}, mens CO_2 vokser lineært i hele intervallet.

Bjælker: hvor optimum ligger



Optimum ligger, hvor tværsnittet går fra overarmeret til normalarmeret. Det er det balancerede tværsnit.

Stærkere beton end nødvendigt koster CO_2 uden at give moment.

For hver armeringsmængde er den svageste beton, der holder tværsnittet normalarmeret, den bedste.

I bjælken har I_{UG} maksimum ved det balancerede tværsnit.

7. Konklusion: søjler

Kort søjle: bæredygtighedsparameteren $\Phi_{UG} = (f_{ck}/g_c)/(f_{yk}/g_s)$ afgør armeringen. Over 1: minimumsarmering. Under 1: maksimumsarmering. Maksimum for I_{UG} ligger altid i et endepunkt af $[\rho_{min}, \rho_{max}]$.

Med nuværende og genanvendt stål er Φ_{UG} over 1 for alle betoner i datagrundlaget. Kun grønt stål sammen med CEM I eller lav-CO_2 giver maksimumsarmering.

Stærkere beton giver et mindre tværsnit og sparer mere CO_2, end den højere intensitet koster: C40 frem for C20 sænker aftrykket 28 % og prisen 35 %.

Søjlevirkning reducerer indikatoren med faktoren σ_{crk}/f_{ck}, men ændrer ikke fortegnet på $dI_{UG}/d\rho$. Betingelsen er den samme med f_{se} i stedet for f_{yk}.

Vælg den højeste betonstyrke, og lad stålets CO_2-intensitet afgøre armeringsgraden.

Konklusion: detaljeret beregning og bjælker

Den detaljerede søjleberegning giver i snit 25% lavere CO_2 end den simple model for samme last. Forskellen på en optimering for materialepris i stedet for CO_2 giver i snit 15% forskel. Bæreevneforøgelsen af en eksisterende søjle er op til 80% og gevinsten vokser med søjlelængden

Bjælker: I_{UG} har maksimum ved det balancerede tværsnit. Armeringen vælges efter momentet, og betonen er den svageste, der holder tværsnittet normalarmeret.

Over det balancerede tværsnit vokser M_{Rk} kun svagt med f_{ck}, mens CO_2 vokser lineært.

Konklusion: hvad indikatoren giver

Bæredygtighedsindikatoren I_{UG} er ét tal: ydeevne pr. kg CO_2. Den kræver kun materialedata, styrke og CO_2-intensitet, og kan bruges før detailprojekteringen.

Den er en indikator, ikke et dimensioneringsværktøj. Den viser retningen: hvilken armeringsgrad, hvilken betonstyrke og hvilket stål der reducerer aftrykket. Parameterstudiet laves én gang pr. type konstruktionsdel. Dimensioneringen sker som hidtil.

Er tværsnit og betonstyrke fastlagt, er armeringen det eneste håndtag, og svaret er den mindste armering, der bærer lasten. Dér tilføjer indikatoren intet; den er et værktøj til de valg, der endnu er åbne.

Fortegnet på $dI_{UG}/d\rho$ bestemmes af stålets EPD, ikke af den projekterende. Fremstillingen af materialerne betyder mere end noget designvalg.

De første besparelser er gratis: design rigtigt med de materialer, du har. De næste koster: skift materiale.