

Dansk Brodag 2024

Bæreevne og Bæredygtighed
– hvordan udnyttes ressourcerne bedst?

Dansk Brodag, 2024-04-09

RAMBOLL

Bright ideas.
Sustainable change.

Reparerer og levetidsforlænger

Drift og vedligehold

- Har broen tilstrækkelig kapacitet til at opretholde sin funktion, hvis den renoveres?

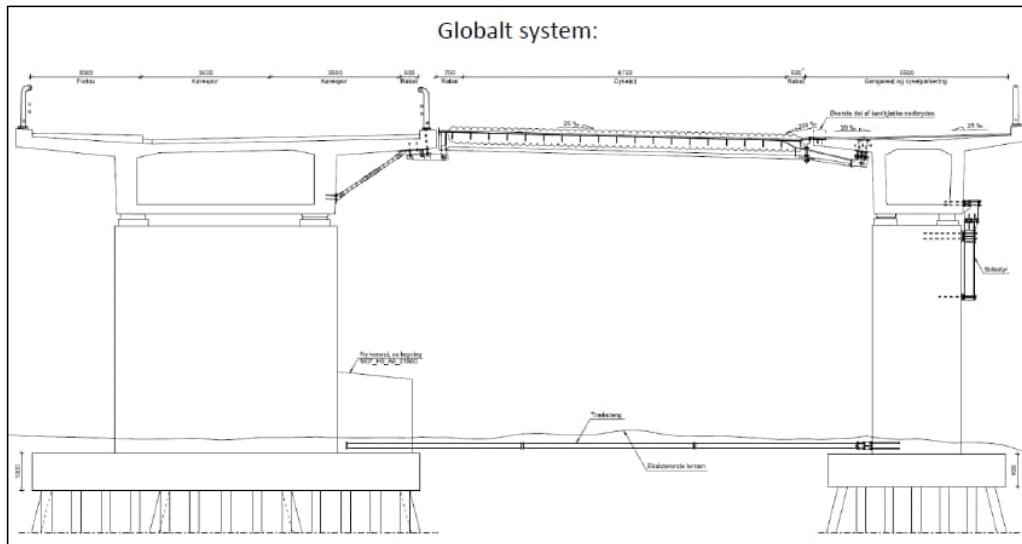
Eller skal den nedrives/forstærkes?



Bygger ovenpå

Dybbølsbro i København:
Ca. 10 m bred cykelsti

Hvad kunne de to eksisterende broer bære?



Bygger ovenpå

Vejlefjordbroen

Visualisering af stor sideudvidelse

Hvad kan den eksisterende bro bære?



Opgradering

Vægtbegrænset bro

Kan her tillades mere last?



Opgradering

Tunge
særtransporter

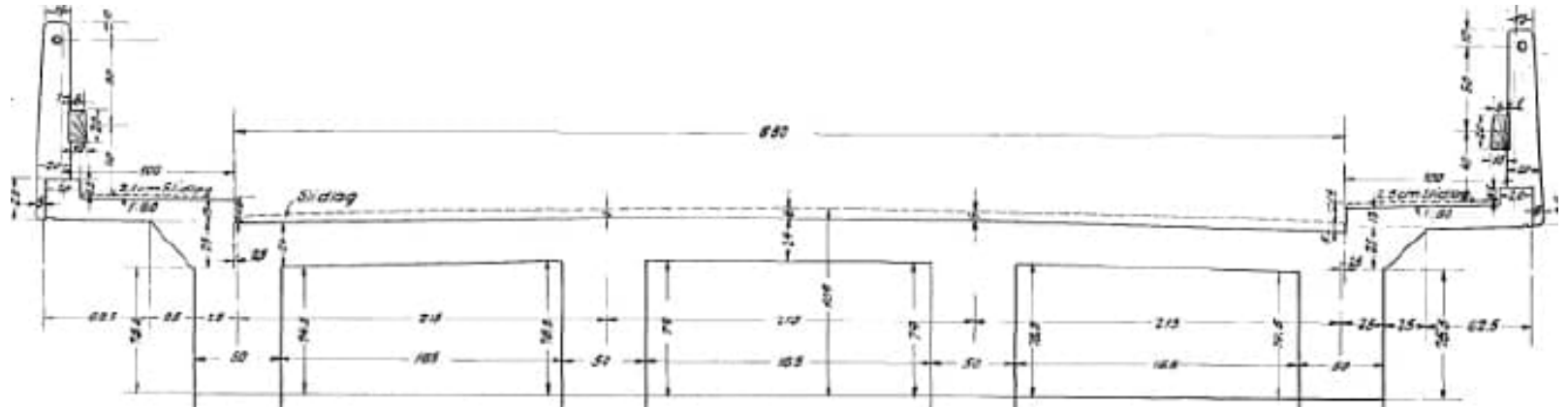
Kan der tillades
passage af broer
med restriktioner
på kørslen?



Ændringer

Ændring af kørebaner?

Hav respekt for kantopspring!



Ændringer

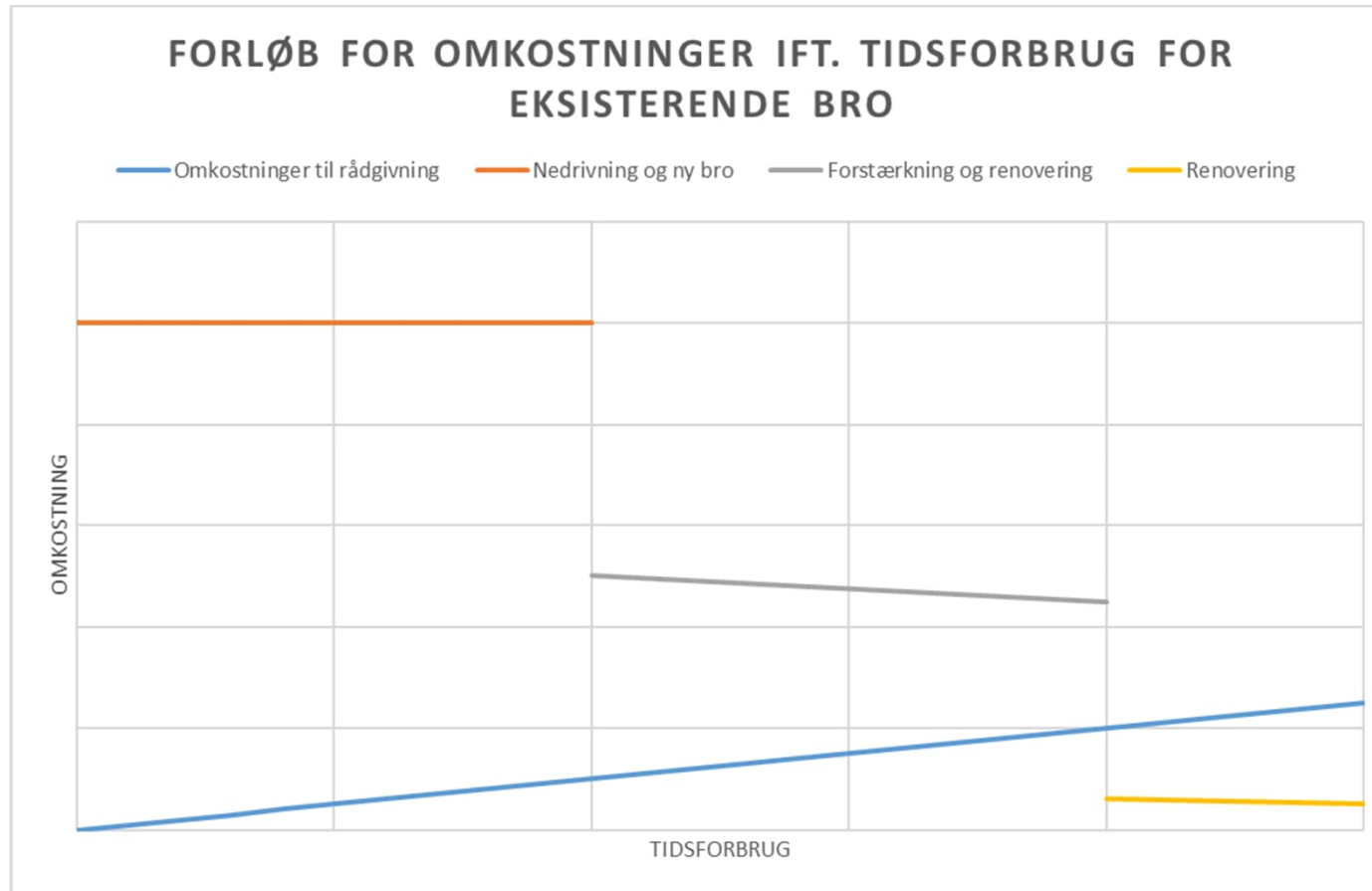
Opsætning af støjskærme

- Kalvebodbroerne
- Kan kantbjælkerne bære?

- Billede fra:
<https://www.vejdirektoratet.dk/projekt/amagermotorvejen/visualiseringer>



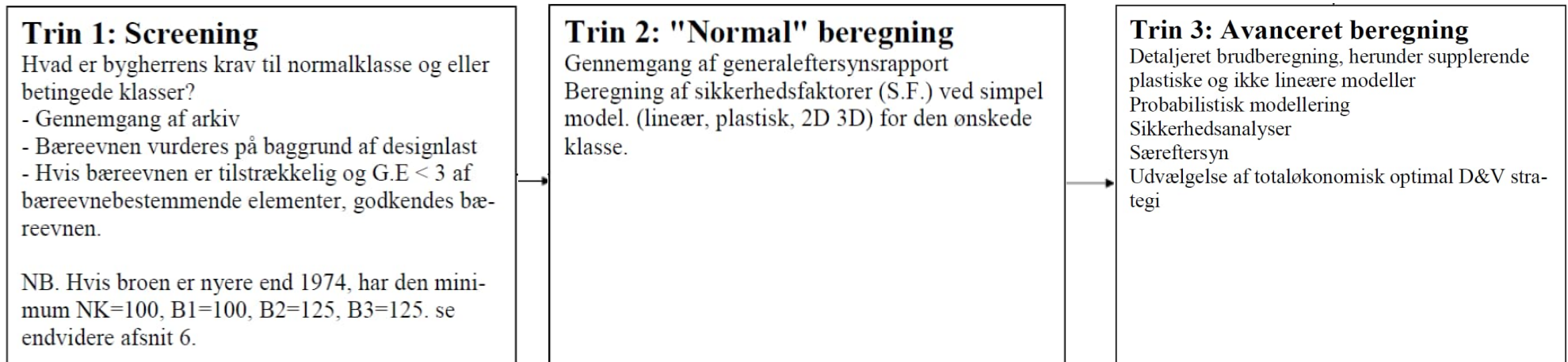
Hvad er forskelligt for eksisterende kontra nye?



Analyse af bæreevnen

Her er VD's bud fra 2013:

- Bæreevneanalyse opdeles i tre trin



Det ønskede resultat skal opnås billigst muligt.

Trin 1: Bæreevnescreening (arkiv & lastsammenligning)

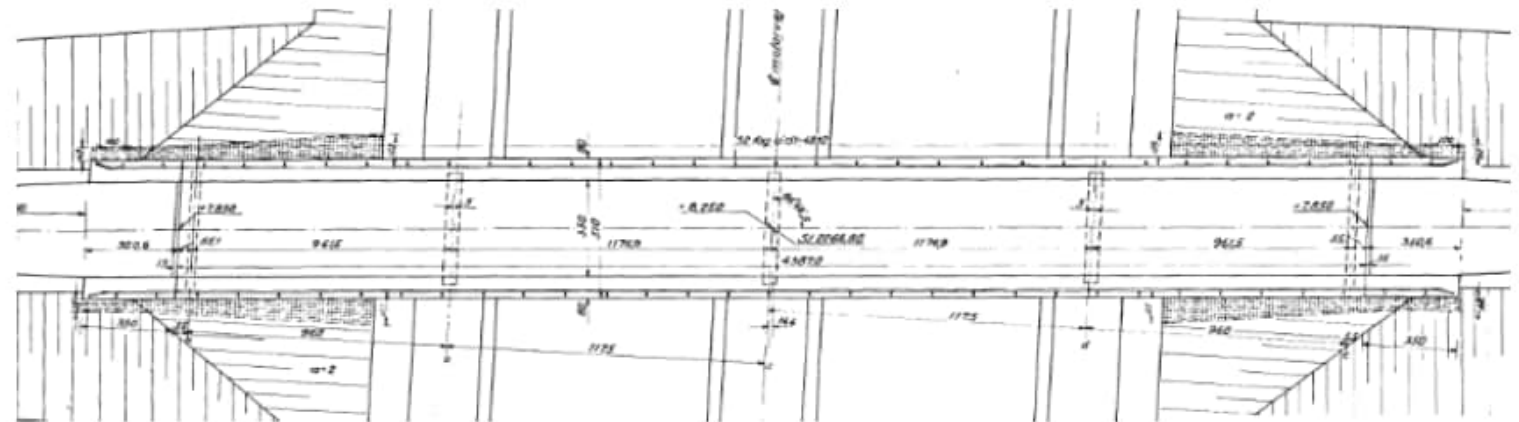
Eksempel med stibro:

Hvor stort et servicekøretøj kan der tillades?



Figur 3: Facade

Overbygningen er en forspændt plade, der spænder kontinuert over de fire fag og bæres af endevederlag og tre søjler.



Figur 4: Plan

Trin 1: Bæreevnescreening (arkiv & lastsammenligning)

Belastninger.

Broen er beregnet for belastninger som angivet i "Normer for bygningskonstruktion 1. Belastningsforskrifter = DS = 410, Marts 1945", idet den bevægelige lodrette last på brobanen dog sættes til 1 stk. 15 t tromle + $0,5 \text{ t/m}^2$ erstatningslast udbredt også under tromlens vognkasse. Belastningerne kan således optræde samtidig.

Alt er nemmere, hvis der haves et fuldendt arkivmateriale!

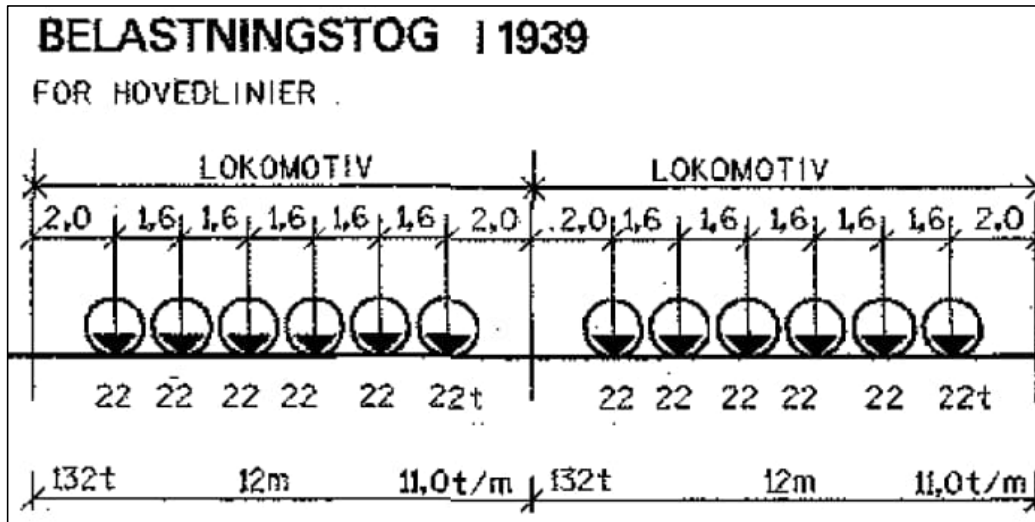
- Oprindelig designlast kendt
- Tilstand acceptabel

=> Tilladeligt servicekøretøj kan hurtigt bestemmes



Figur 9: Skitsering af lastspor for de forskellige passage typer. Gul: Normal passage, betinget passage type 1 og 2, Rød: Betinget passage, type 3.

Trin 1: Bæreevnescreening (arkiv & lastsammenligning)

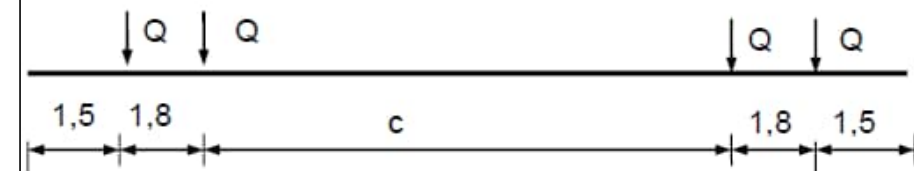


- Oprindelig designlast kendt
- Tilstand acceptabel

= > Højere hastighed kan tillades

Aksellast (kN)	Linjelast (kN/m)							
	48	50	64	72	80	88	100	110
160	A							
180		B1	B2					
200			C2	C3	C4			
225			D2	D3	D4			
250					E4 (LM71)	E5		
275					BS-R4	BS-R5		
300					BS-S4	BS-S5	BS-S6	
330						BS-T5	BS-T6	BS-T7

Figur 12.4-1 Bæreevneklasser for eksisterende sporbærende broer

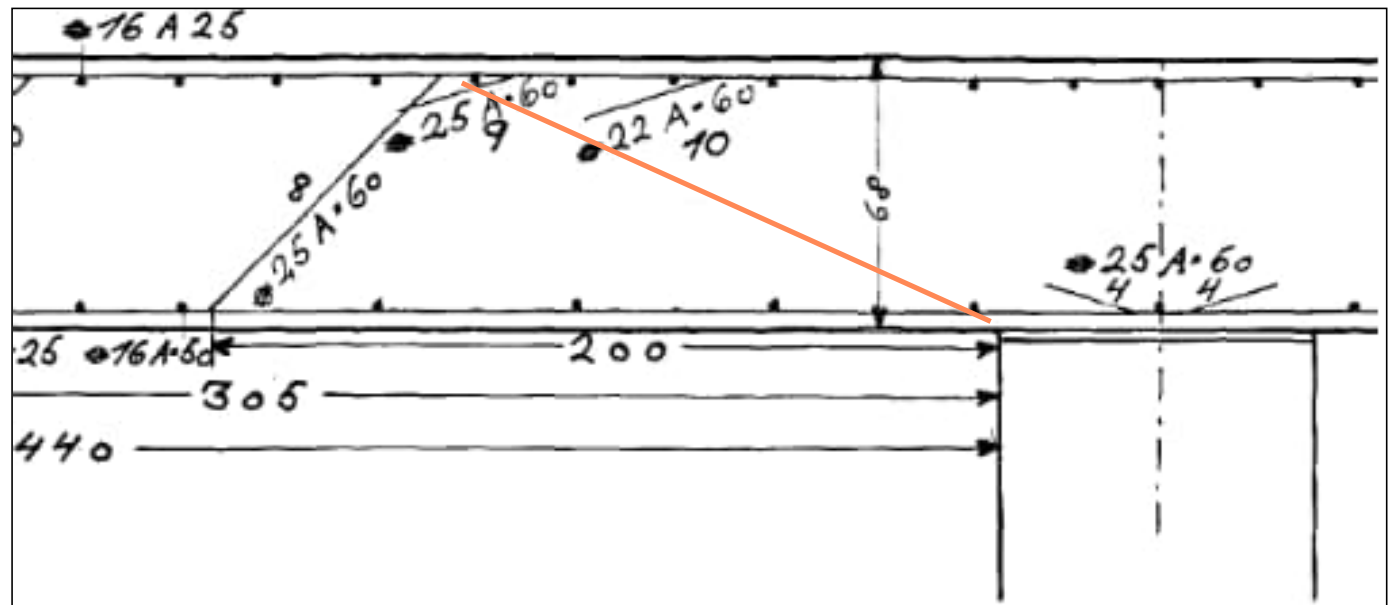


Figur 12.4-2 Akselafstande for reference-vogne

Bæreevnescreening – fordele og begrænsninger

- Fordele:
- Relativt hurtig og dermed billig
- Udnytter tidligere godkendelse af belastning

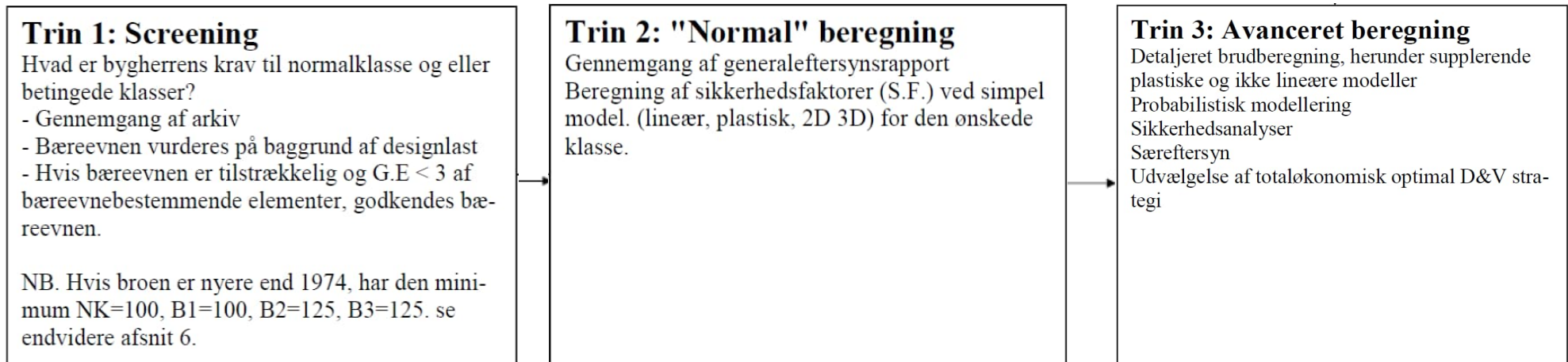
- Begrænsninger:
- Der fås ikke ny viden om sikkerhedsniveauet, der er uændret på godt og ondt
- OBS på ældre normers "ikke-konservative" metoder



Analyse af bæreevnen

Her er VD's bud fra 2013:

- Bæreevneanalyse opdeles i tre trin



Hvorfor får forskellige rådgivere forskellige resultater på samme bro, når de begge benytter en trin 2 beregning?

Trin 2: "Normal" beregning

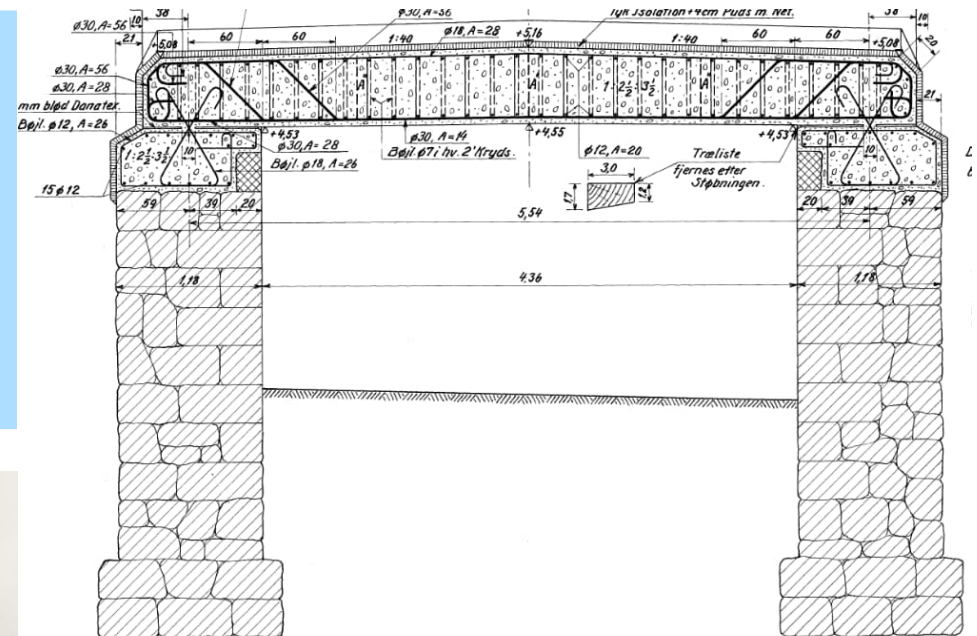
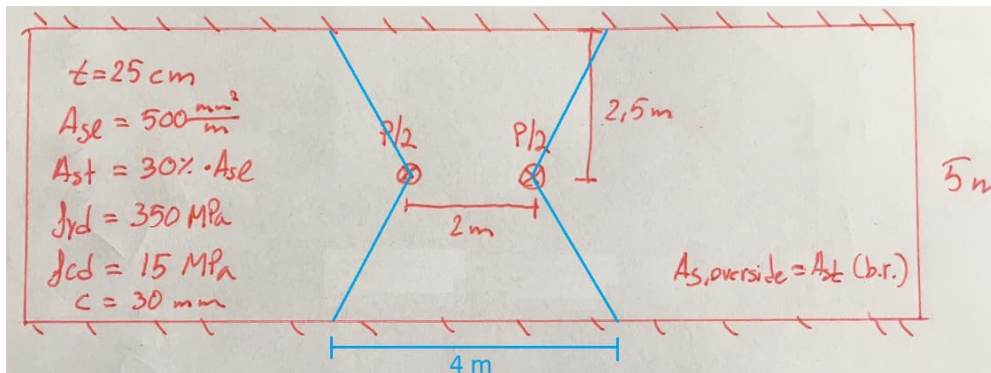
1) 2D Bjælkemodel

Skønnet fordelingsbredde på 4 m:

$$M_{Ed} = \frac{1}{4} \times 112 \text{ kN} \times 5 \text{ m} / 4 \text{ m} = 35 \text{ kNm/m}$$

Der kan bæres et akseltryk på ca. 11 ton

=ca KL 50



Trin 2: "Normal" beregning

1) 2D Bjælkemodel

Skønnet fordelingsbredde på 4 m:

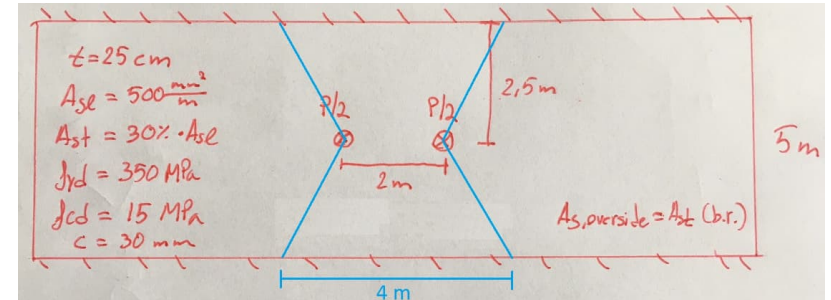
$$M_{Ed} = \frac{1}{4} \times 112 \text{ kN} \times 5 \text{ m} / 4 \text{ m} = 35 \text{ kNm/m}$$

Der kan bæres et akseltryk på ca. 11 ton
= ca KL 50

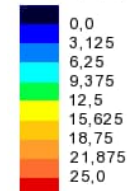
2) Elastisk FE-model

Et akseltryk på 13 ton giver $M_{Ed,max} = 35$
kNm/m

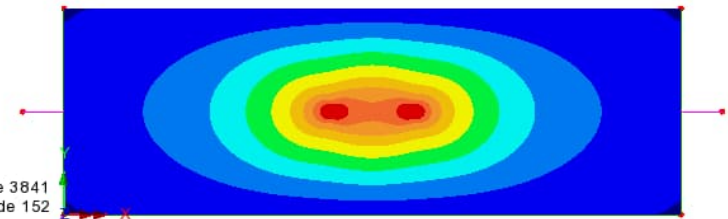
= ca KL 70



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



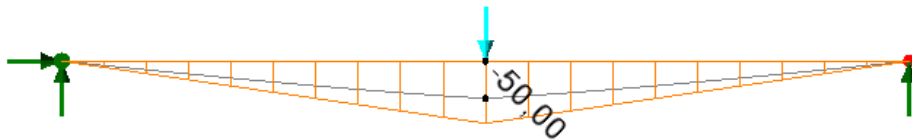
Trin 2: "Normal" beregning

Spredning af last fra hjultryk

Bro med spændvidde på 2,0 m og tværsnitshøjde på 200 mm.

Belastes af én aksel med akseltryk på 10 ton

$$M = \frac{1}{4} \times 10 \text{ ton} \times 2 \text{ m} = 5 \text{ tm} = 50 \text{ kNm}$$



Uden spredning

Trin 2: "Normal" beregning

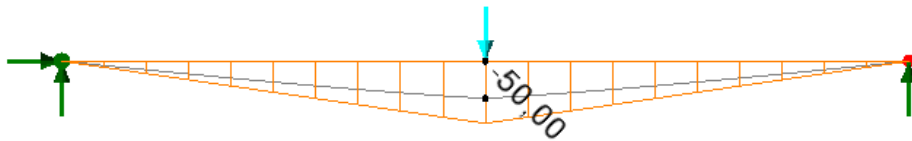
Spredning af last fra hjultryk

Bro med spændvidde på 2,0 m og tværsnitshøjde på 200 mm.

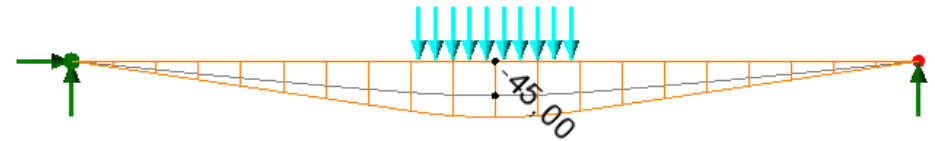
Belastes af én aksel med akseltryk på 10 ton

$$M = \frac{1}{4} \times 10 \text{ ton} \times 2 \text{ m} = 5 \text{ tm} = 50 \text{ kNm}$$

Ca. 10 % større akseltryk kan dokumenteres, såfremt lasten spredes



Uden spredning

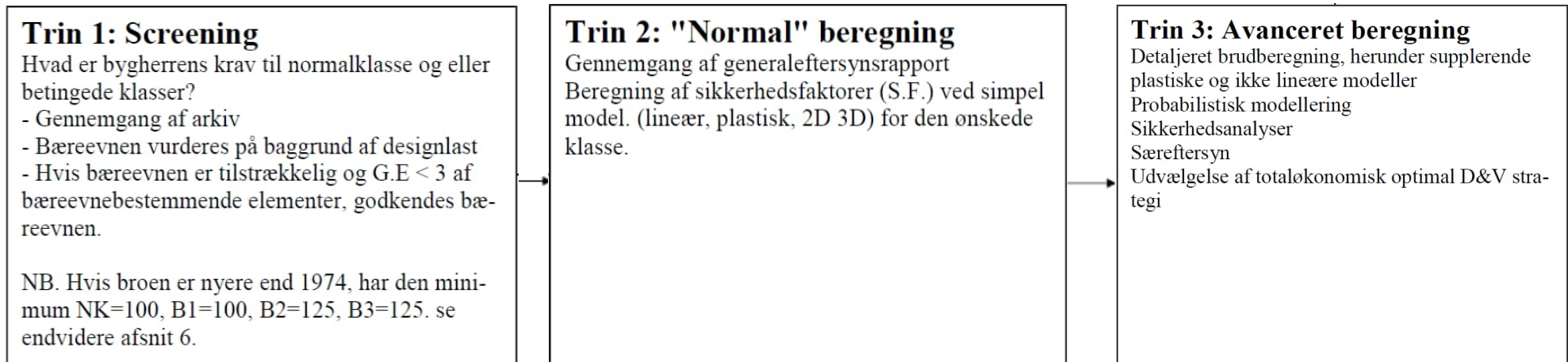


Spredning på 400 mm svarende til berøringsflade for dæk og spredning 1:1 fra overside tværsnit til center af tværsnit

Analyse af bæreevnen

Her er VD's bud fra 2013:

- Bæreevneanalyse opdeles i tre trin



Hvad haves i værktøjskassen ifm. avancerede beregninger?

Trin 3: Avanceret beregning, plastisk løsning

1) Bjælke-model

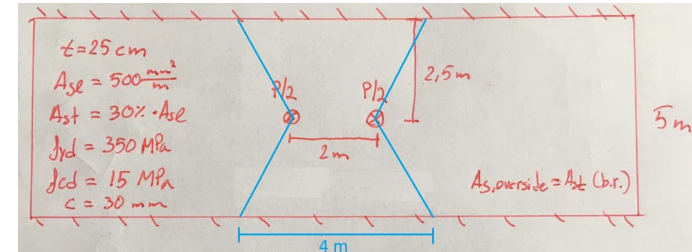
Et akseltryk på ca. 11 ton
= ca KL 50

2) Elastisk FE-model

Et akseltryk på 13 ton
= ca KL 70

3) Plastisk beregning

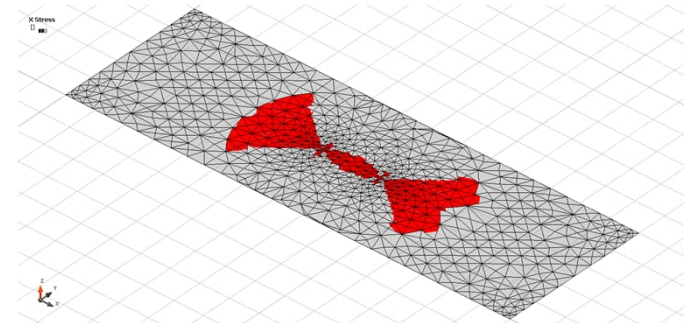
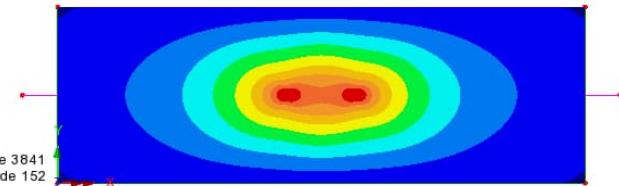
Ved en fuld plastisk beregning kan der eftervises et akseltryk på 16 ton, dvs. næsten 25 % mere end den elastiske FE-model
= ca. KL 120



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



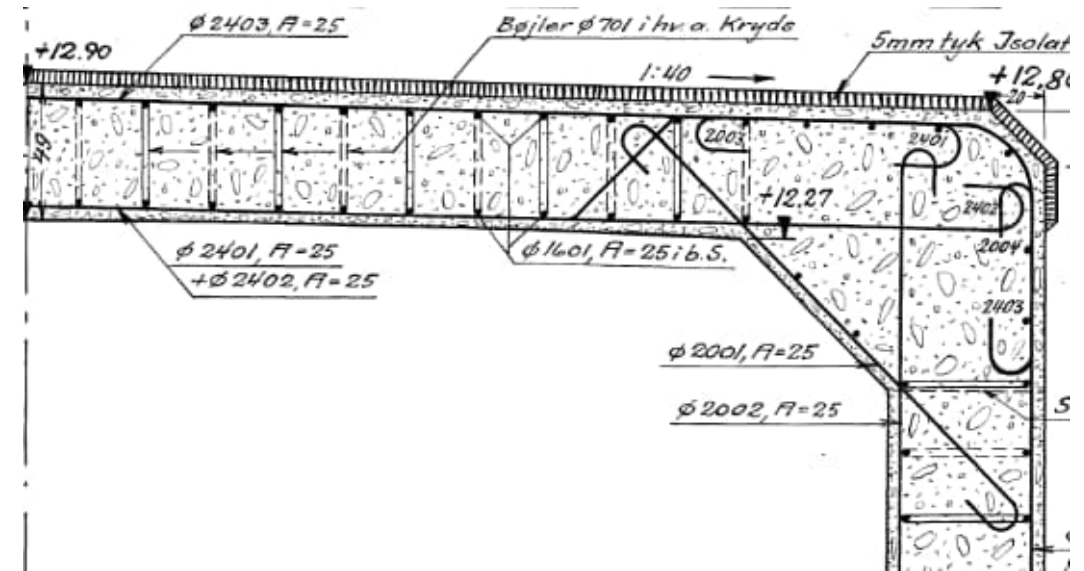
Trin 3: Avanceret beregning, forskydning

Kapacitet af ikke-forskydningsarmerede tværsnit – Hvorfor går det godt alligevel?

Nuværende regler er konservative i mange tilfælde, fx:

- Vouter og tværsnitsforøgelser
- Opbukkede jern
- Zoner med lav momentudnyttelse
- Etc.

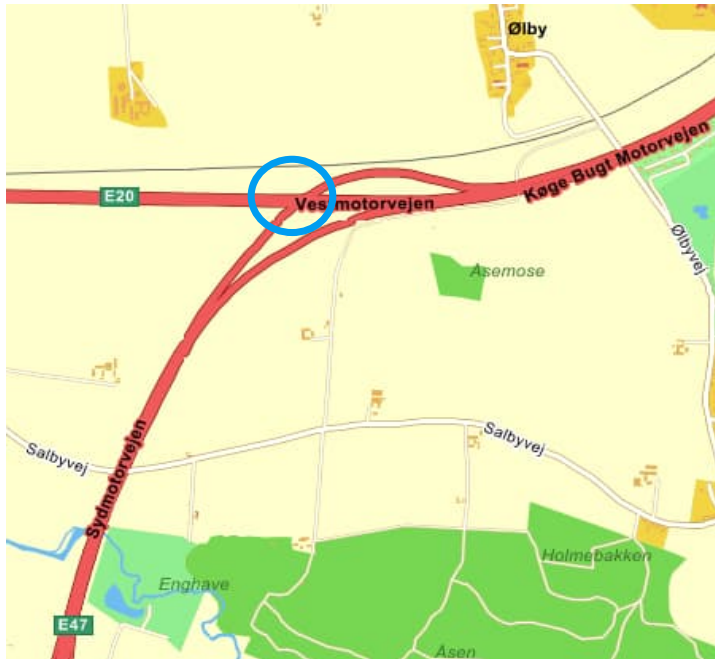
Dette kan udnyttes ved brug af øvre- og nedreværdiløsninger, samt speciallitteratur.



Trin 3: Sandsynlighedsbaserede bæreevneberegninger

Vestmotorvejen, bro 30-1-001

- Beregnet til broklasse 70 med normal beregning.



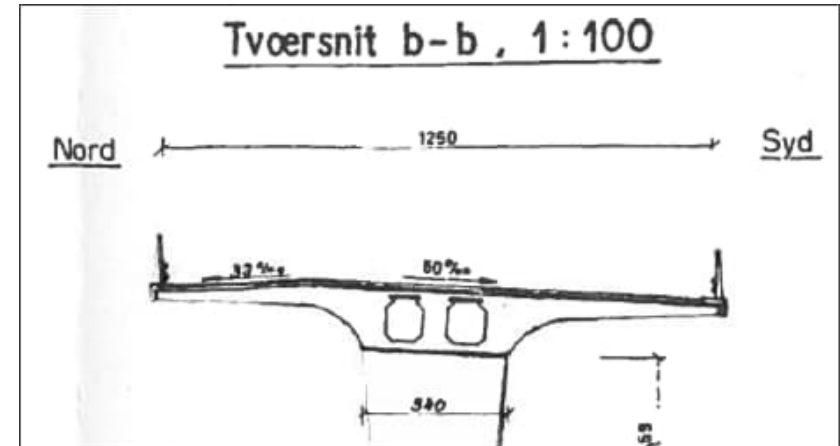
Trin 3: Sandsynlighedsbaserede bæreevneberegninger

Vestmotorvejen

Opgraderet til broklasse 115.

Roldsgaard et al., 2019 [3]

	Deterministisk	Sandsynlighedsbaseret 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
γ_{ck}	1,45	1,38
γ_{yk}	1,2	1,10
K_{FI}	1,1	1,0



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

Trin 3: Sandsynlighedsbaserede bæreevneberegninger

Det er dyrt at regne på eksisterende broer, men det er endnu dyrere at forstærke eller udskifte dem.



Bergeforsen, ca. 2,5 mio USD sparet ved avanceret analyse af udmattelse.

- (1) Deterministic assessment.
- (2) Advanced deterministic assessment incorporating updated structure models and rain flow analysis for fatigue assessment.
- (3) Probability based assessment performed at critical locations as determined in Phase (2).

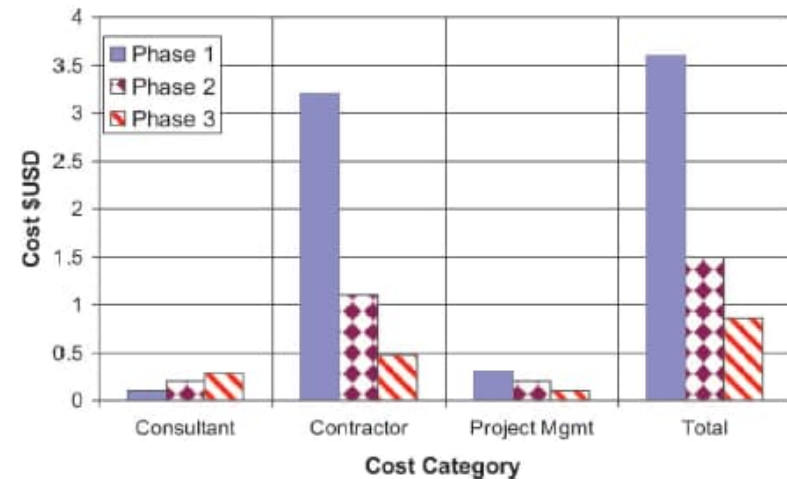


Figure 11. Bergeforsen rehabilitation cost (O'Connor *et al.* 2009).

Trin 3: Prøvebelastning

- Især anvendeligt ifm. svigtformer, hvor der haves varslede brud.
- Kan være nyttigt, når der mangler oplysninger vedr. broen - og et evt. undersøgelsesomfang bliver stort/besværligt
- Kan være nyttigt, hvis broens tilstand er dårlig/ubestemt - og et evt. undersøgelsesomfang bliver stort/besværligt



Afslutning

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

- Beregninger af eksisterende broer kan gøres med mange forskellige deltaljeringsniveauer.
- Omkostninger til rehabilitering sker i "spring" for eksisterende broer.
- Der kan spares penge og CO2 ved benyttelse af det til opgaven rigtige beregningsniveau.

