



DANSK BRODAG 2010

BEREGNING AF BÆREEVNE

- NÅR KNOWHOW ER BILLIGERE
END BETON OG STÅL

RAMBØLL

FORSKELLIGE TYPER BÆREEVNEBEREGNING



Byggeværket

Beregningsregler
for eksisterende
broers bæreevne



RAMBØLL



FORSKELLIGE TYPER BÆREEVNEBEREGNING

Screening

- Hurtigt overblik
- Få og simple beregninger
- Typisk 5-20 timer



Bæreevnekontrol

Udvidet analyse

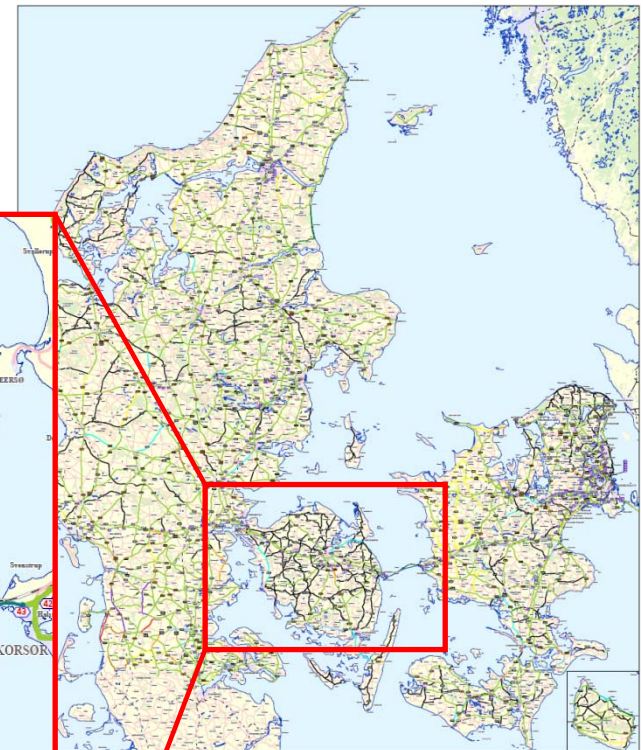


Avanceret bæreevneberegning

- Stor FE-model hvis krævet
- Hele værktøjskassen
- Typisk 200-1000+ timer



TUNGVOGNSNETTET



Vejdirektoratet
Tungvogns - Vejnettet

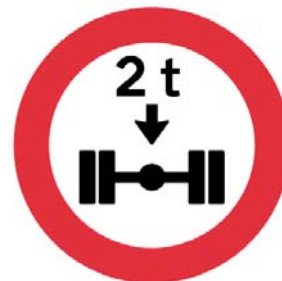
Signatur :

			Frakørsel
			Rutenr.
			KL100
			KL90
			KL80
			KL70
			KL60
			KL50
			KL40
			KL30
			KL24
			Ejklas
			Uoplyst



KØRETØJSKLASSER OG AFSKILTNING

		Klasse	Akselkonfiguration Akseltryk i tons og akselafstande i m
20			3,0 5,0 6,8 6,8 ↓ 3,2 ↓ 3,2 ↓ 1,4 ↓
	40		5,5 5,5 5,5 4,2 10,8 10,8 ↓ 3,2 ↓ 1,4 ↓ 3,5 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓
50		10	2,0 4,4 4,4 ↓ 3,2 ↓ 1,4 ↓
		20	3,0 5,0 6,8 6,8 ↓ 3,2 ↓ 3,2 ↓ 1,4 ↓
		30	5,0 8,0 9,3 9,3 ↓ 3,2 ↓ 3,5 ↓ 1,4 ↓
		40	5,5 5,5 5,5 4,2 10,8 10,8 ↓ 3,2 ↓ 1,4 ↓ 3,5 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓
		50	6,5 6,5 6,5 10,9 11,8 10,9 ↓ 3,2 ↓ 1,4 ↓ 4,5 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓
		60	6,5 7,0 7,0 9,3 12,8 11,5 9,3 ↓ 3,2 ↓ 1,4 ↓ 6,0 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓
		70	6,5 9,0 9,0 11,6 11,0 13,5 11,6 ↓ 3,2 ↓ 1,4 ↓ 6,0 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓
		80	8,0 9,0 9,0 9,0 9,0 14,0 14,0 10,5 ↓ 3,2 ↓ 1,4 ↓ 6,0 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓
		90	7,0 7,0 9,5 9,5 11,0 11,0 14,7 14,7 11,0 ↓ 1,4 ↓ 3,2 ↓ 1,4 ↓ 6,0 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓
		100	7,0 7,0 9,5 9,5 11,5 11,5 11,5 15,1 15,1 11,5 ↓ 1,4 ↓ 3,2 ↓ 1,4 ↓ 6,0 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓
100			7,0 7,0 9,5 9,5 11,5 11,5 11,5 15,1 15,1 11,5 ↓ 1,4 ↓ 3,2 ↓ 1,4 ↓ 6,0 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓
			7,0 7,0 9,5 9,5 11,5 11,5 11,5 15,1 15,1 11,5 ↓ 1,4 ↓ 3,2 ↓ 1,4 ↓ 6,0 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓



HVAD ER REGNINGSMÆSSIG BÆREEVNE?

- MODEL FOR BEREGNING AF KAPACITET
- STATISTISK USIKKERHED
- USIKKERHED PÅ LAST
- TOLERANCE PÅ UDFØRELSE
- USIKKERHED PÅ MATERIALE
- BEREGNINGSMODEL
- VIKARIERENDE STYRKE
- MODELUSIKKERHED
- KOMBINATION AF LASTER
- BROENS TILSTAND

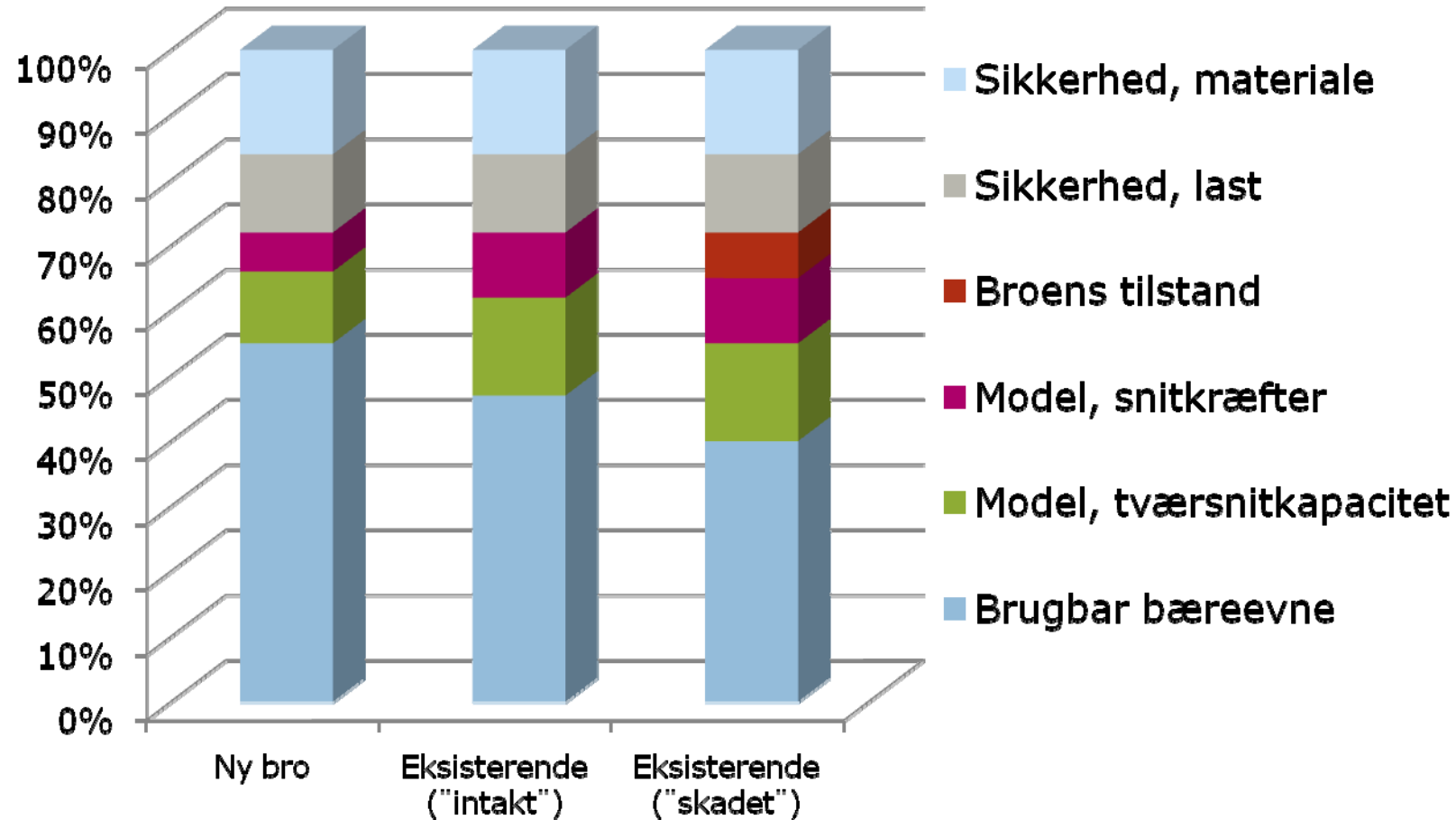
• HØJ SIKKERHEDSKLASSE



• KAN KUN UDNYTTE DOKUMENTERET BÆREEVNE

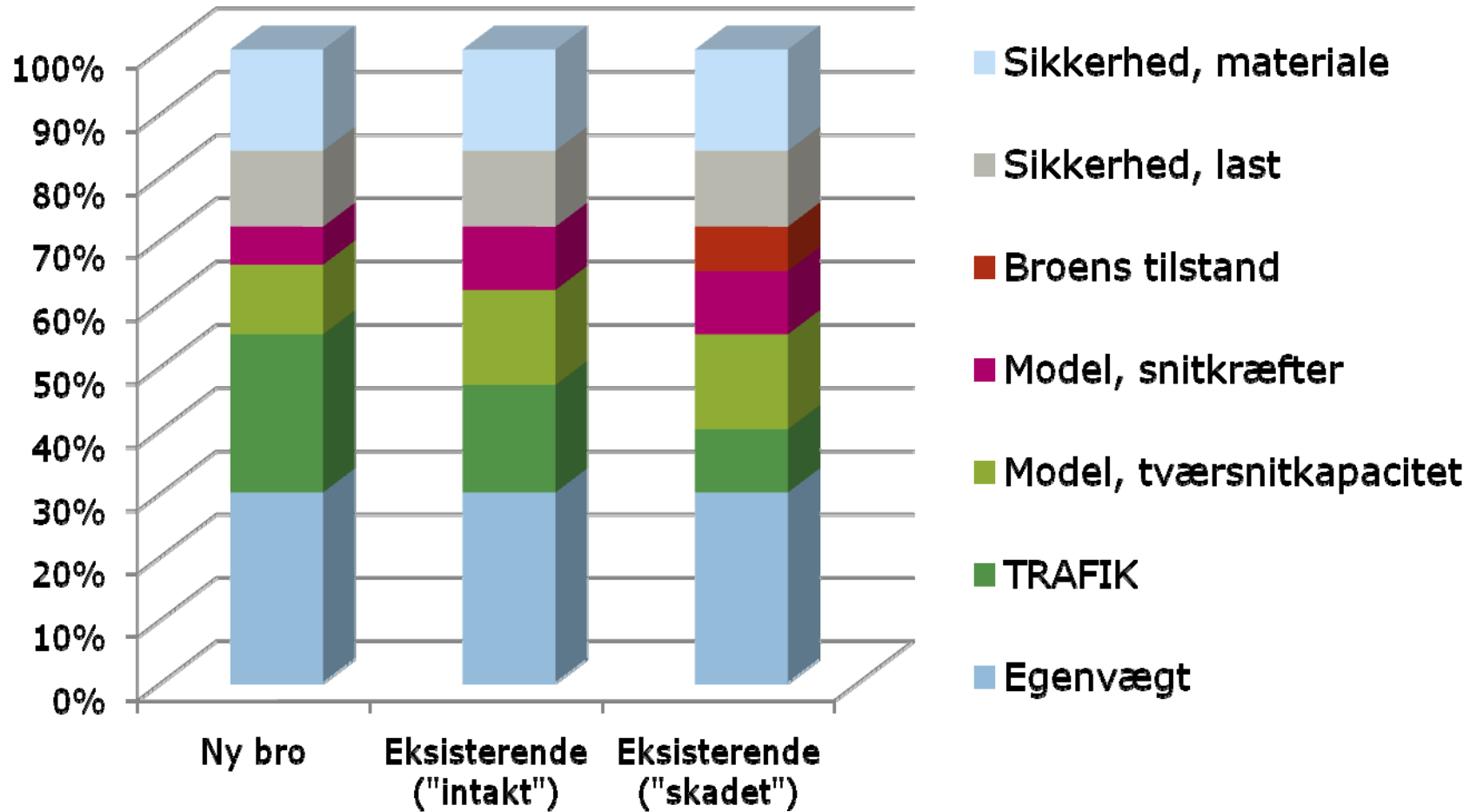
REGNINGSMÆSSIG BÆREEVNE

- HVOR "TABER" VI BÆREEVNEEN?



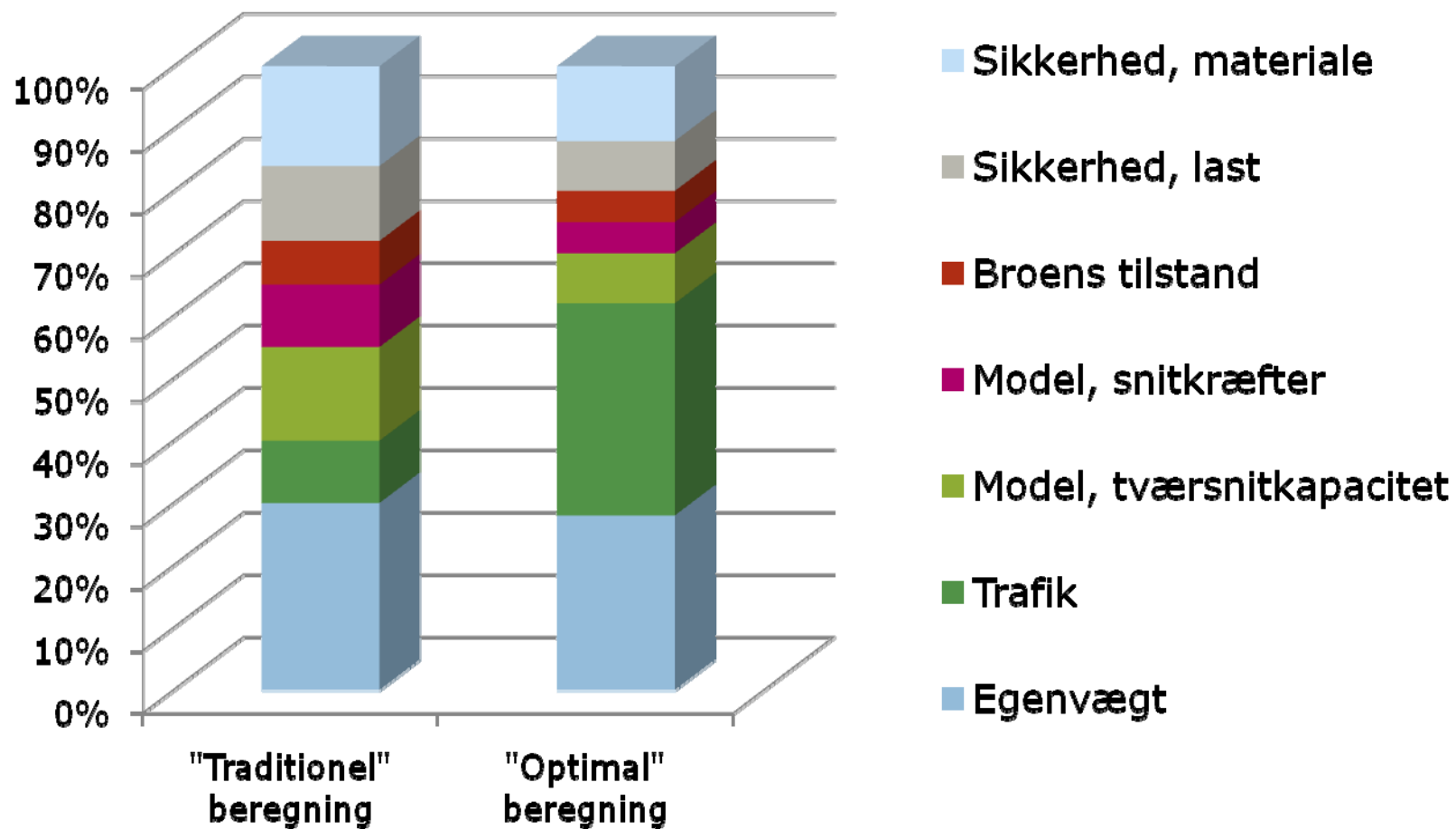
REGNINGSMÆSSIG BÆREEVNE

- HVOR "TABER" VI BÆREEVNEEN?



REGNINGSMÆSSIG BÆREEVNE

- "OPTIMAL" BÆREEVNEBEREGNING FOR SKADET BRO



HVORDAN GENNEMFØRES EN BEREGNING?

1. Skaffe overblik
 - Overslagsberegninger
 - Hvad er ikke kritisk
 - Hvad er kritisk
2. Opstille beregningsmodel for de enkelte konstruktionsdele
 - Hovedkonstruktion
 - Sekundær konstruktion
 - Bropladen
3. Gradvis justering og forbedring af beregningsmodel for de kritiske dele
4. Indhentning af ekstra viden om de kritiske dele

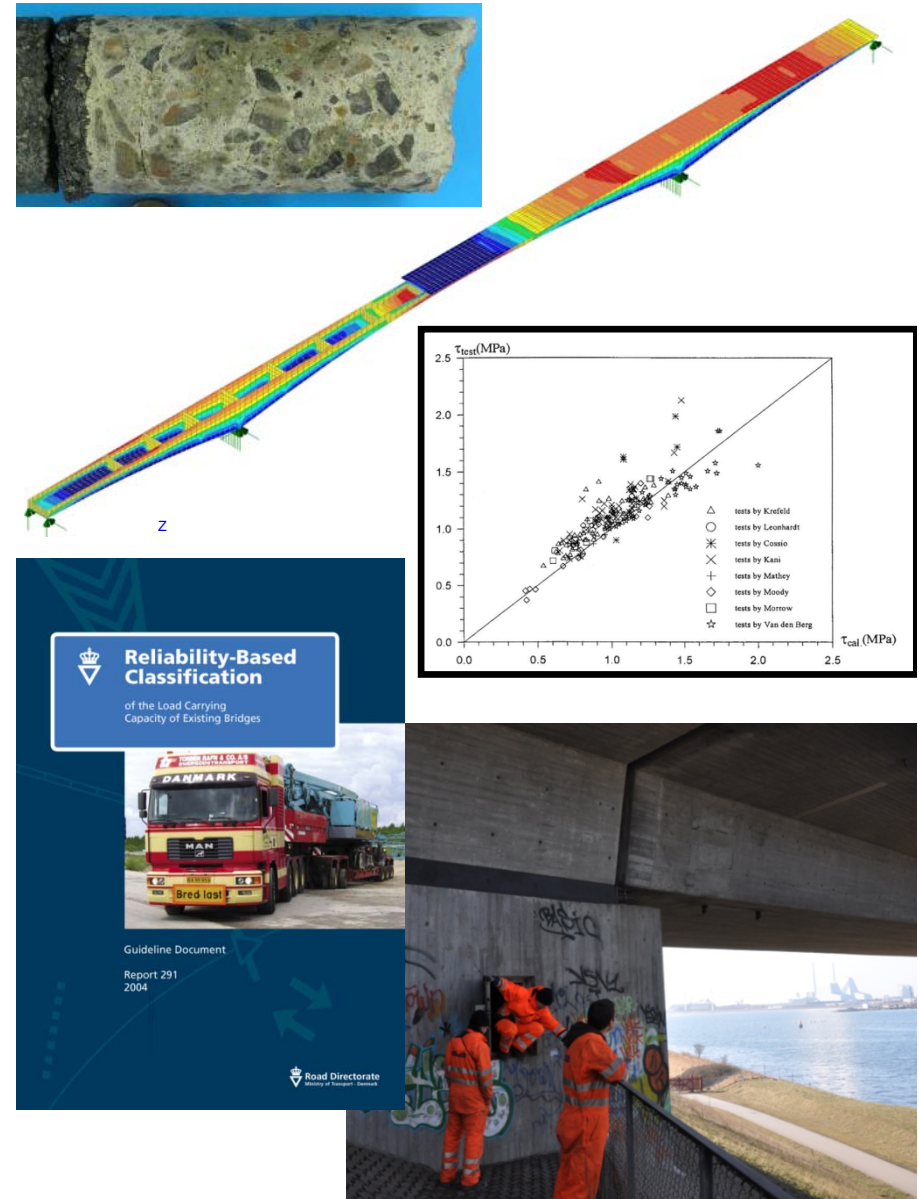
RAMBOLL



MULIGE TILTAG FOR AT FORØGE BÆREEVNE

1. Bedre beregning af snitkræfter
 - Udnytte eksisterende bæreevne
 - Plastisk omfordeling af kræfter
2. Bedre model for beregning af tværsnitkapacitet
3. Inspektion, materialeprøvning, nedbrydningsmekanismer
4. Pålidelighedsbaseret beregning af bæreevne
5. Prøvebelastning

RAMBOLL



FOKUS PÅ KRITISKE KONSTRUKTIONSDELE

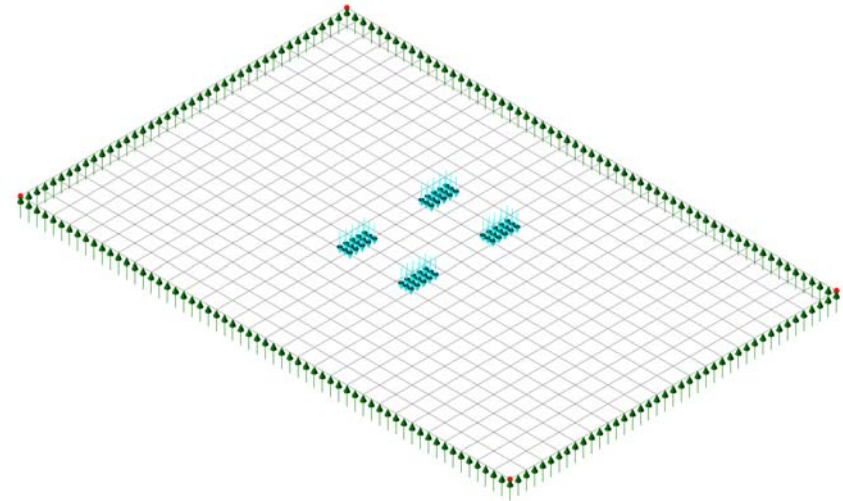
Konstruktionsdel	Indledende beregning	Optimeret beregning
Kørebaneplade	Klasse 40	Klasse 60
Tværbjælker	Klasse 100	Klasse 80
Indvendige hovedbjælker	Klasse 50	Klasse 60
Udvendige hovedbjælker	Klasse 80	Klasse 70
RESULTAT	Klasse 40	Klasse 60

RAMBOLL



EKSEMPEL: BEREGNING AF SNITKRÆFTER

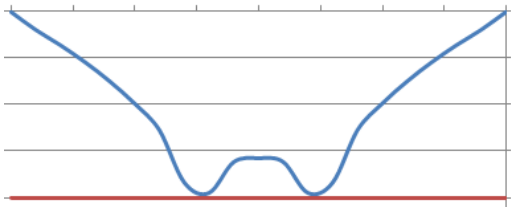
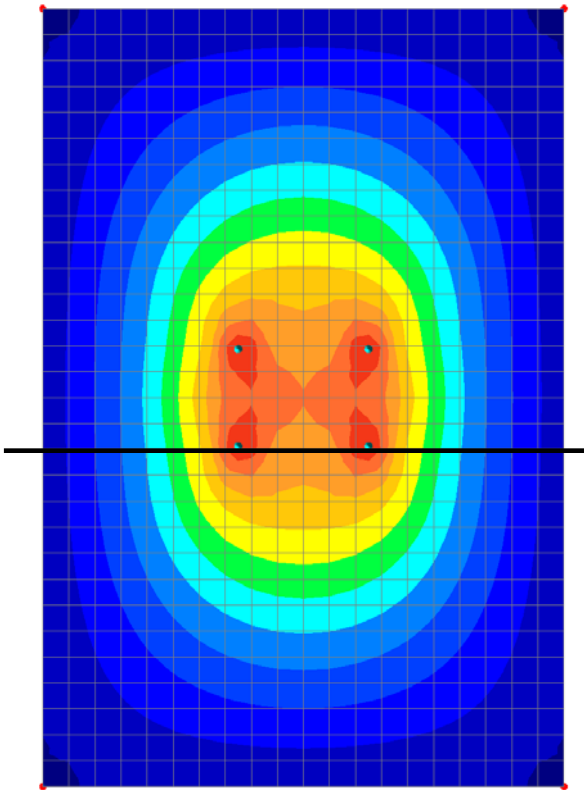
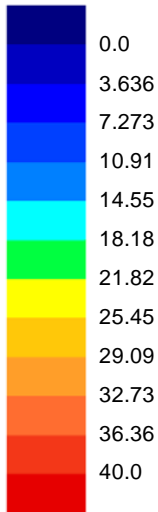
- FE skalmodel
- Spændvidder: 8 x 12 m
- Simpelt understøttet langs alle 4 sider
- Last: 2 aksestryk (2P)
- Momentbæreevne: 40 kNm/m i begge retninger



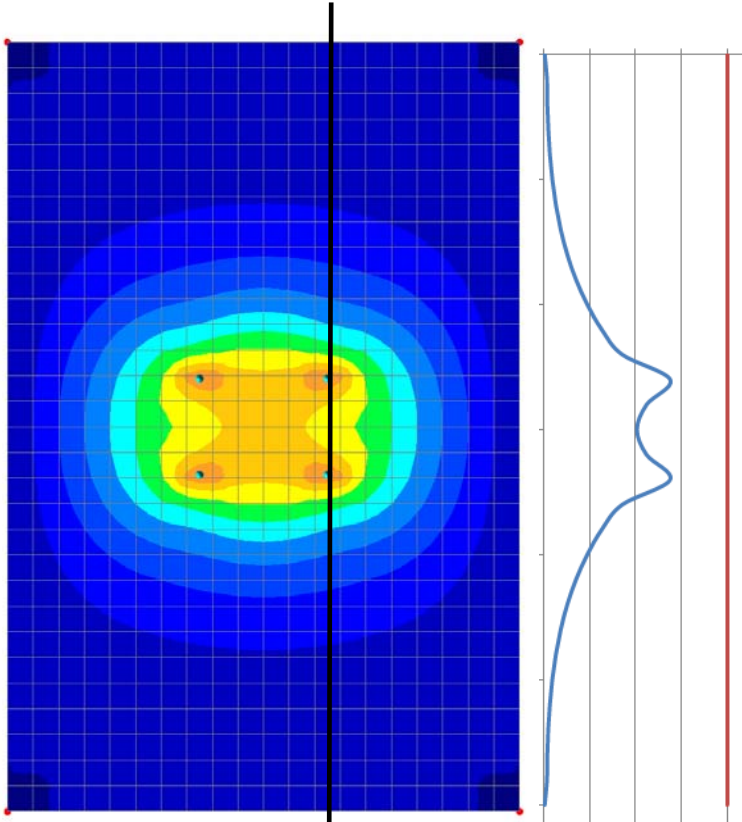
RAMBOLL



MODEL 1: KONCENTRERET PUNKTLAST OG ISOTROP MODEL



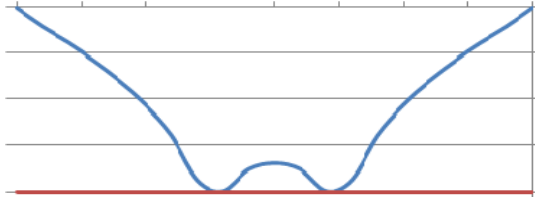
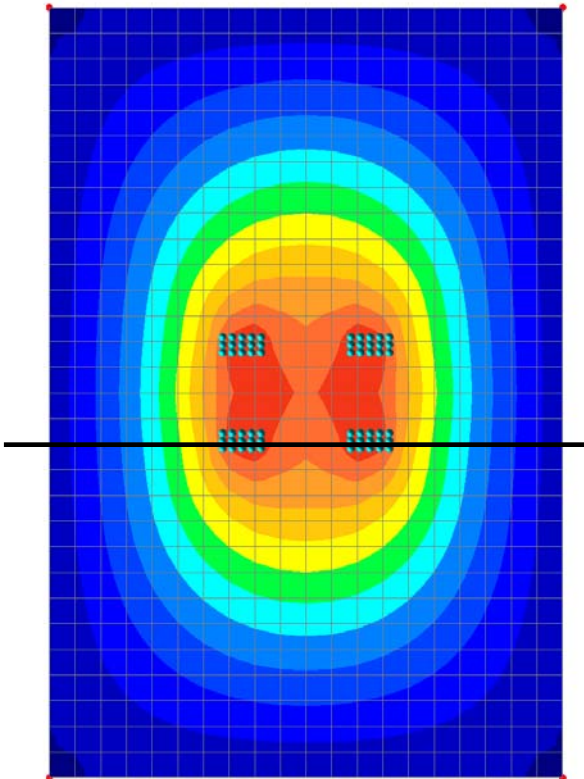
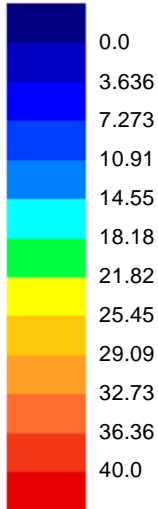
$M_x = 40 \text{ kNm/m}$



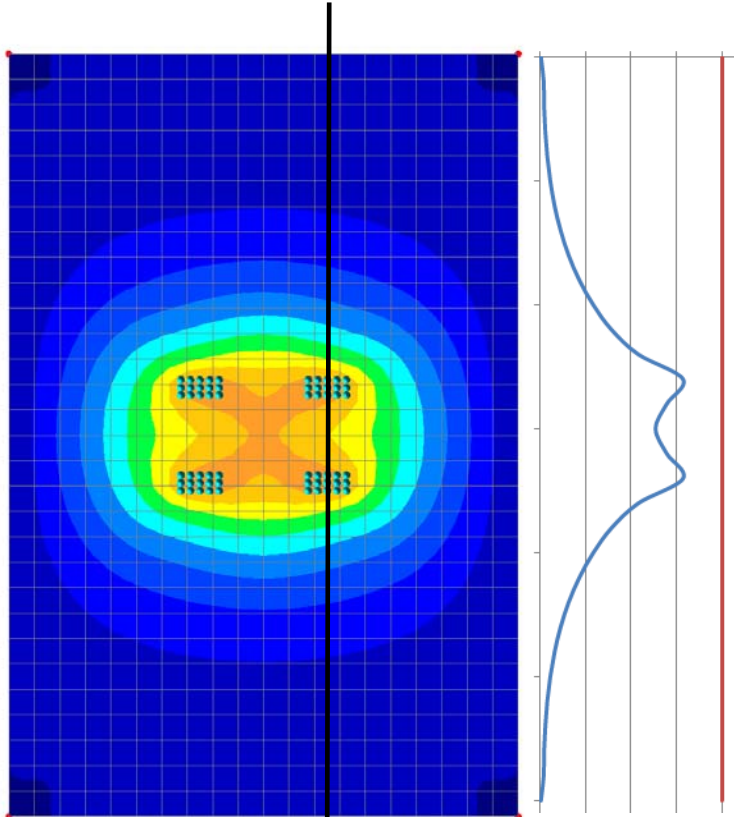
$M_y = 27 \text{ kNm/m}$

AKSELTRYK: $P = 11,4 \text{ T}$

MODEL 2: LASTSPREDNING OG ISOTROP MODEL



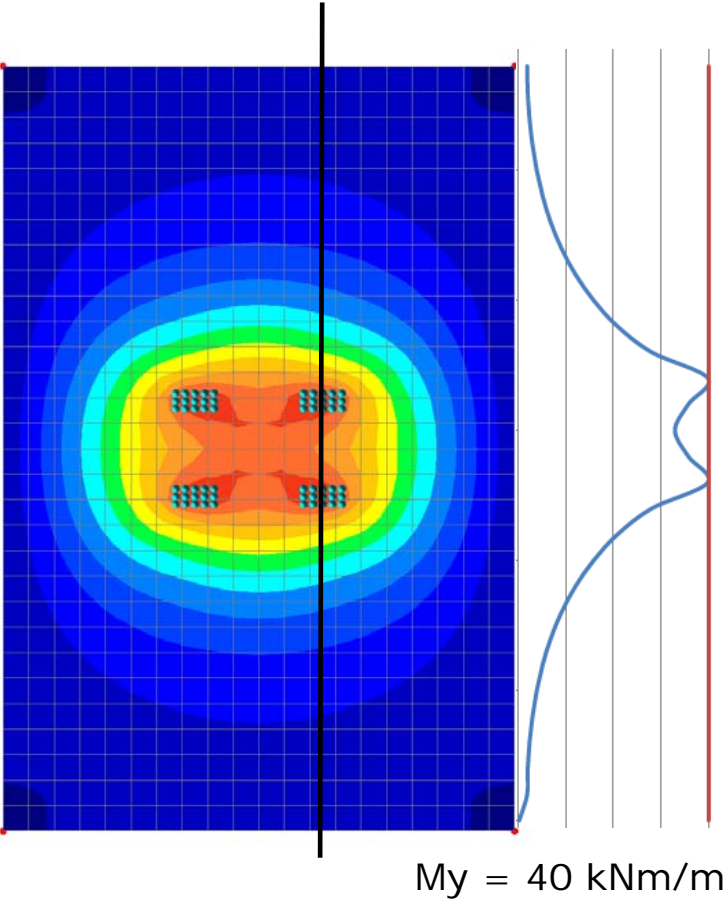
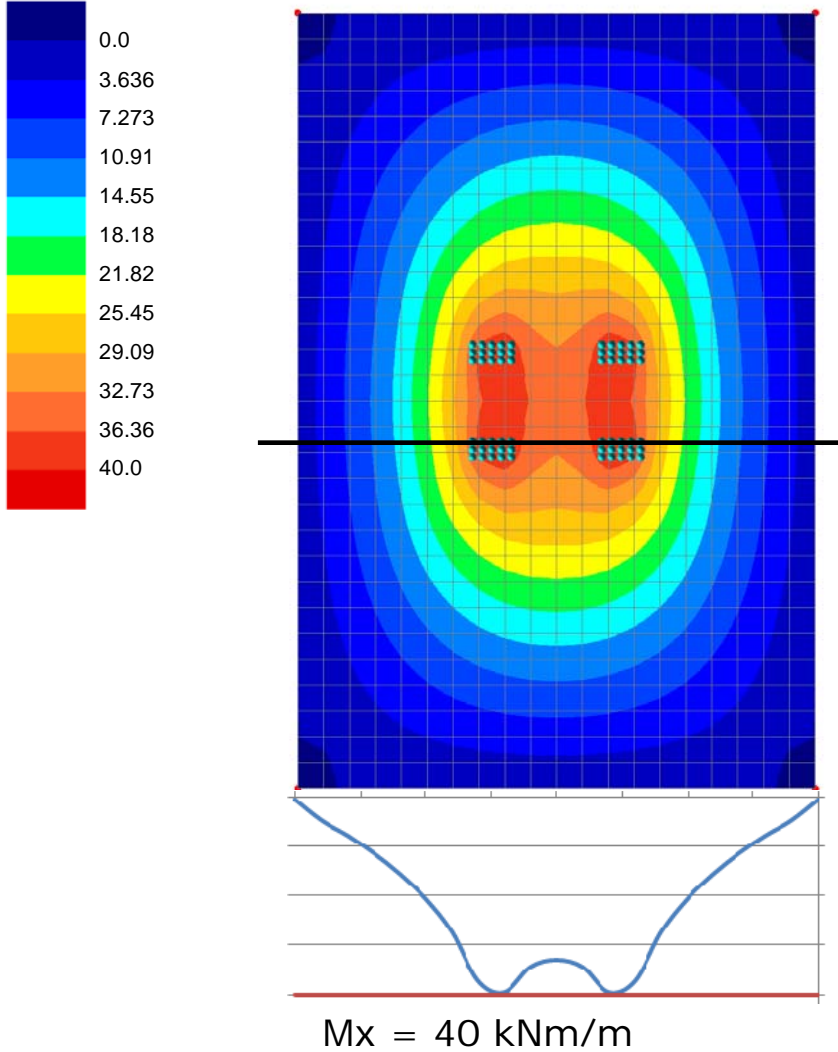
$M_x = 40 \text{ kNm/m}$



$M_y = 31 \text{ kNm/m}$

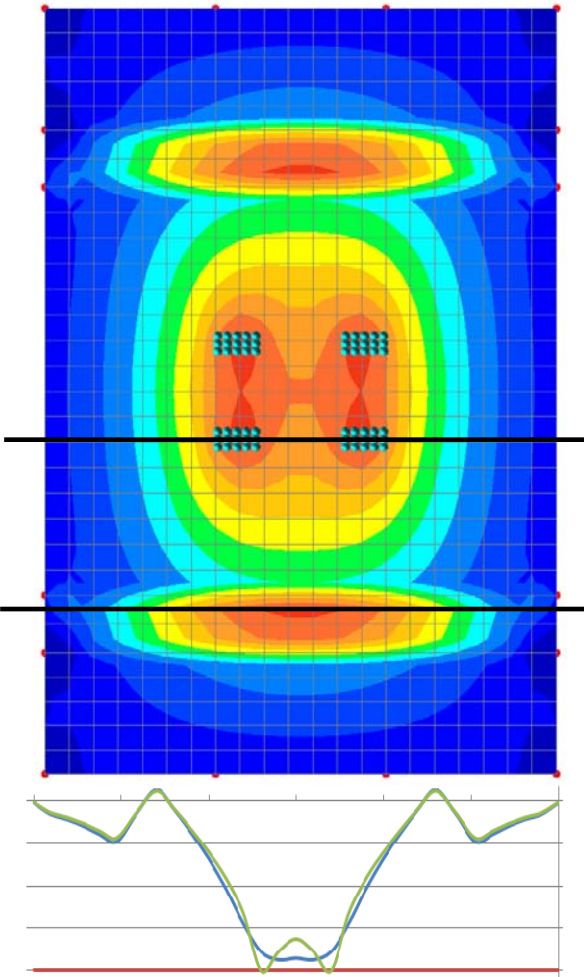
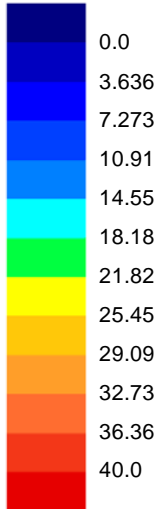
AKSELTRYK: $P = 12,4 \text{ T}$

MODEL 3: ORTHOTROP MODEL

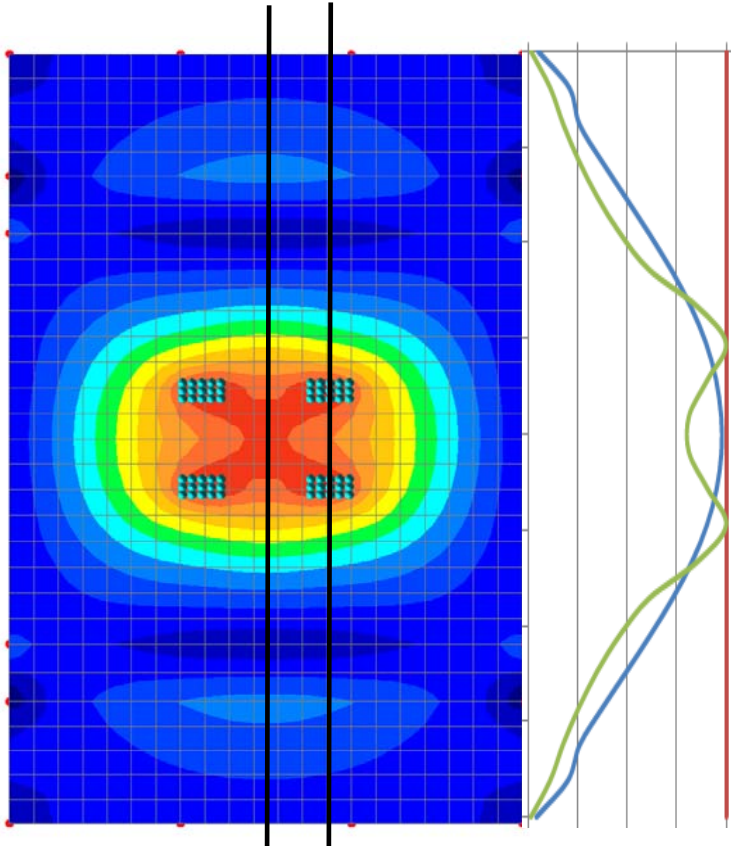


AKSELTRYK: $P = 14,5 \text{ T}$

MODEL 4: ORTHOTROP MODEL OG "SKJULT" BJÆLKE



$M_x = 40 \text{ kNm/m}$



$M_y = 40 \text{ kNm/m}$

AKSELTRYK: $P = 15,8 \text{ T}$



SAMMENFATNING FOR MODEL 1-4

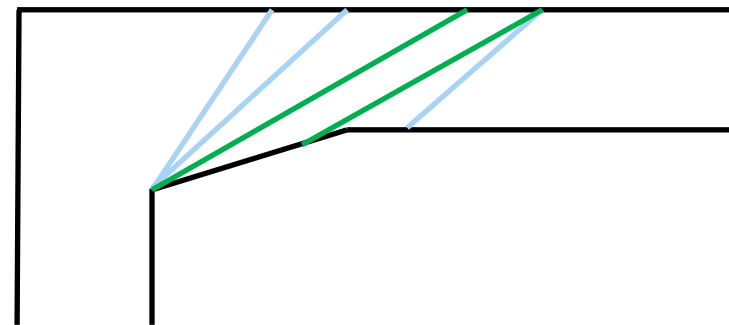
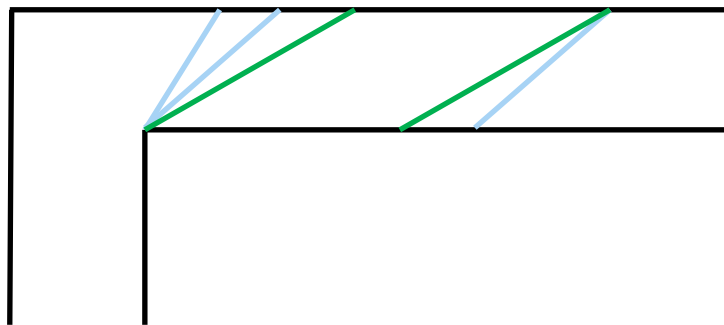
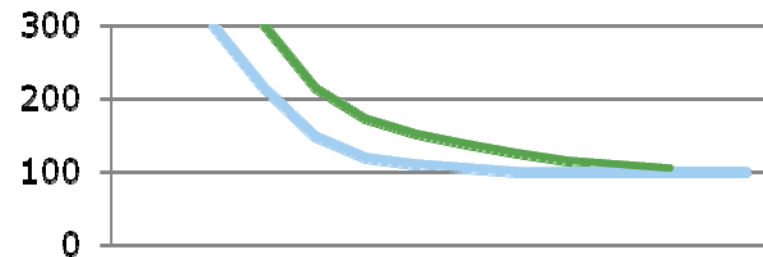
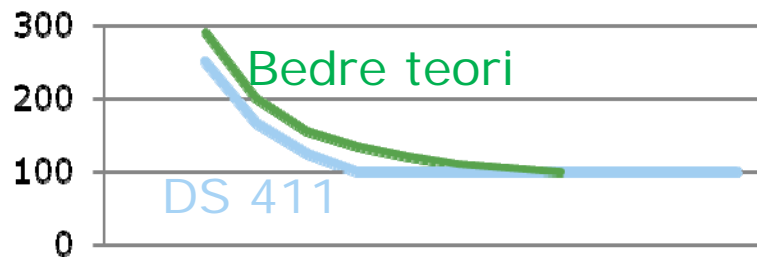
Beregningsmodel	Bæreevne
1: Isotrop og koncentreret punktlast	11,4 t
2: Isotrop og lastspredning	12,4 t
3: Orthotrop	14,5 t
4: "Skjulte" bjælker	15,8 t
...	...
Fuld plastisk model	~18,5 t

- "Simpel beregning" med fordelingsbredde
- Strimmelmetode
- Brudlinier
- Forskellige typer FE-modeller (stivhed)
- Fuldt plastisk FE-program (ligevægt)

EKSEMPEL: BEREGNING AF FORSKYDNINGSKAPACITET

Grundlag: DS411, Norm for betonkonstruktioner

- Simplificerede beregningsregler – praktisk anvendelig
- Skal gælde for alle typer konstruktioner
- Er skrevet med henblik på design af nye konstruktioner



EKSEMPLER PÅ TYPISKE FOKUSPUNKTER

- Før 1973: Sikkerhedssystem
- Broer ældre end 1984: Forskydningsbæreevne for ikke-forspændte broer
- Broer fra ca. 1960-1975: AKR-skader
- Skævvinklede broer: Armeringsretninger
- Geometrisk "komplicerede" broer
- Visse konstruktører / firmastandarder
- Sporbærende stålbroer: Udmattelse



EKSEMPEL: BERGEFORSSEN

- Stålgitter: $42 + 84 + 42 = 168$ m
- Opført 1920
- Toglast: Et spor



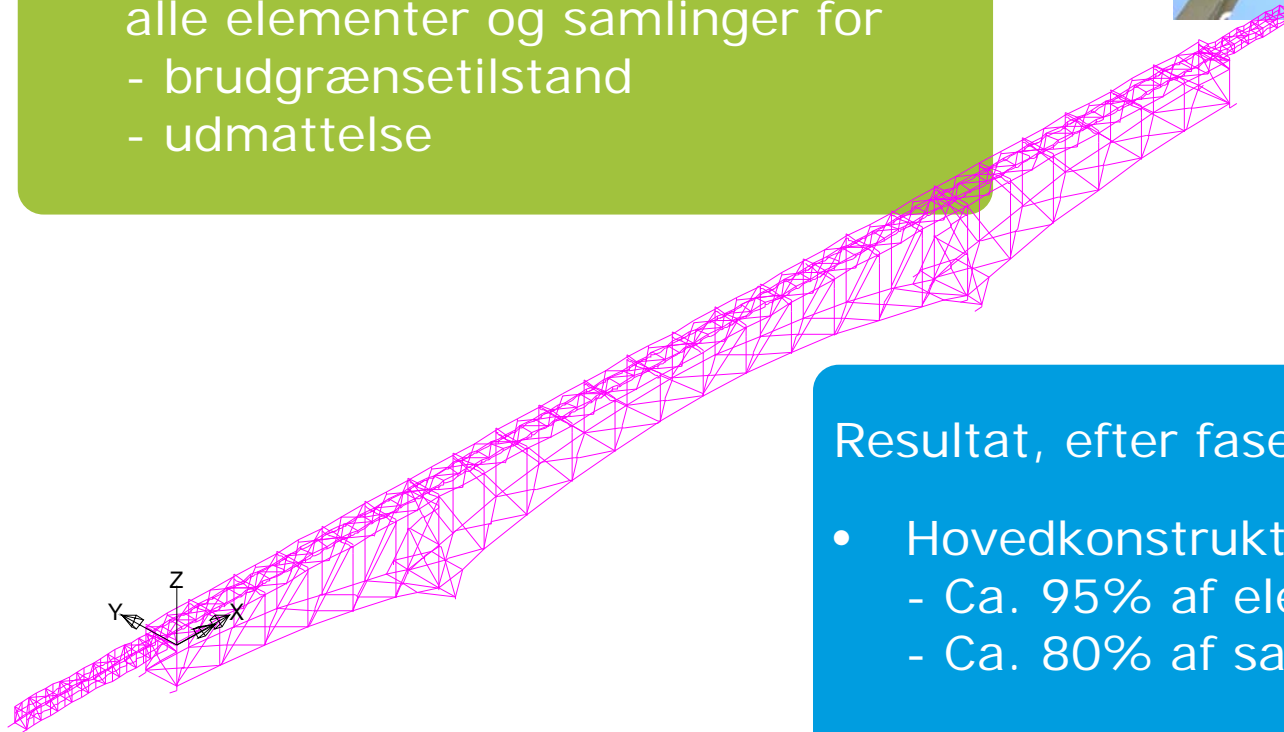
RAMBOLL



BERGEFORSSEN: FASE 1

“Traditionel” beregning

- Global 3D FE model
- Beregning af udnyttelsesgrader for alle elementer og samlinger for
 - brudgrænsetilstand
 - udmattelse



RAMBØLL

Resultat, efter fase 1:

- Hovedkonstruktion:
 - Ca. 95% af elementer OK
 - Ca. 80% af samlinger OK
- Skinnedragere og tværbjælker kritiske både i brud og udmattelse

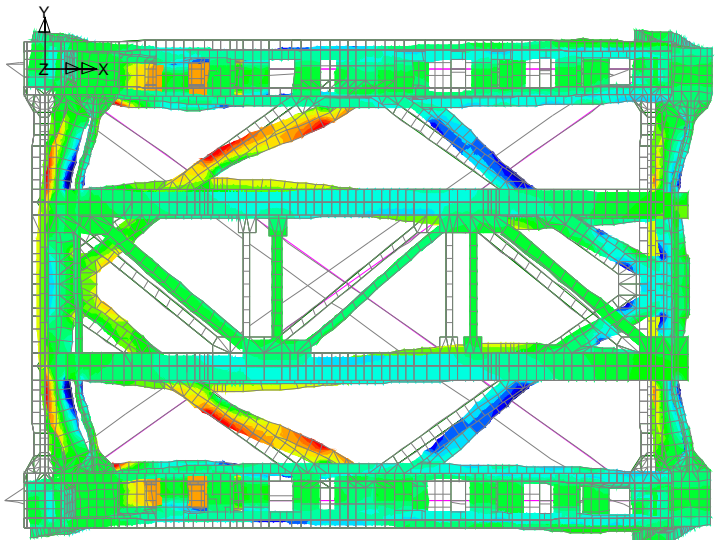
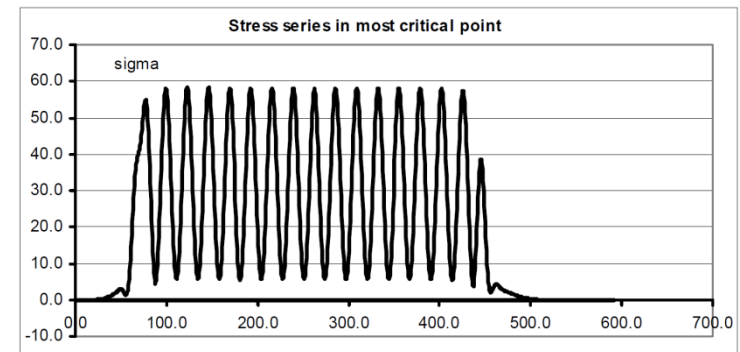
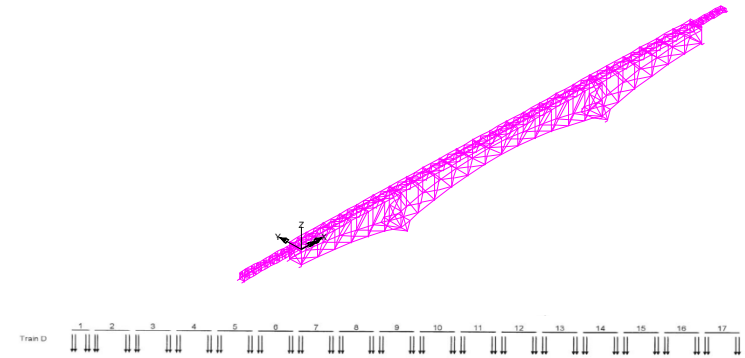
BERGEFORSEN: FASE 2

Mere detaljeret analyse

- Prøvning af stålmaterialer og nitter (flydespænding, arb-kurve, sejhed)
- Opdatering af beregningsmodel
 - supp. FE-model (skalmodel)
 - kalibrering af global bjælkemodel
- Nuanceret beregning af udmattelse
 - aktuelle tog (antal og akselkonfig.)



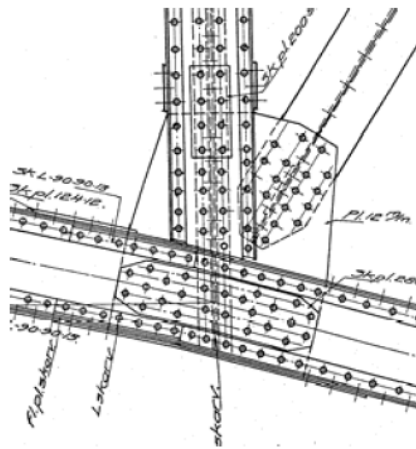
RAMBOLL



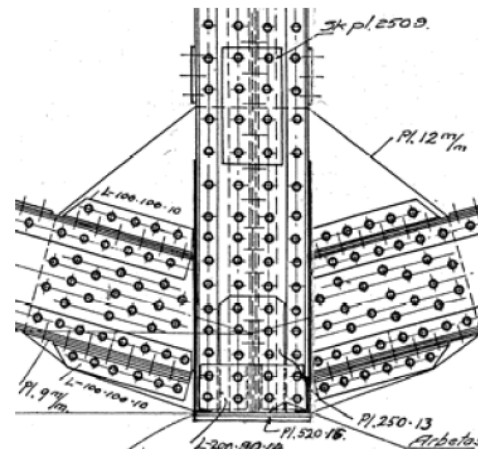
BERGEFORSEN: FASE 2

Resultat, efter fase 2:

- Hovedkonstruktion:
 - Ca. 98% af elementer er OK
 - Ca. 90% af samlinger er OK
- Skinnedragere og tværbjælker:
 - alt OK, dog undtagen samlinger i skinnedragere



Punkt 6

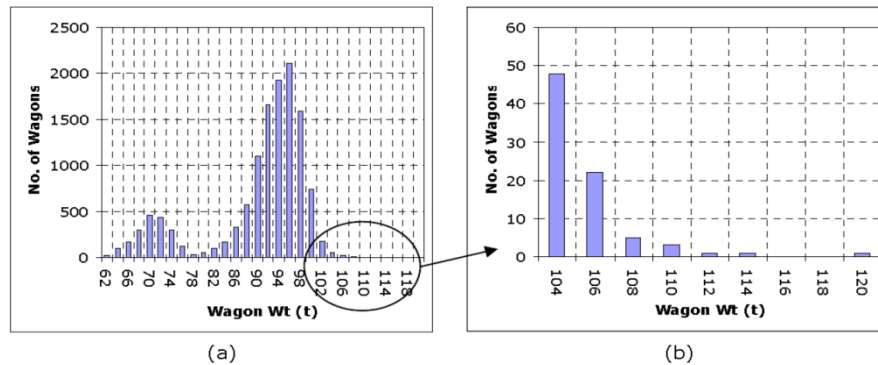


Punkt 7

BERGEFORSEN: FASE 3

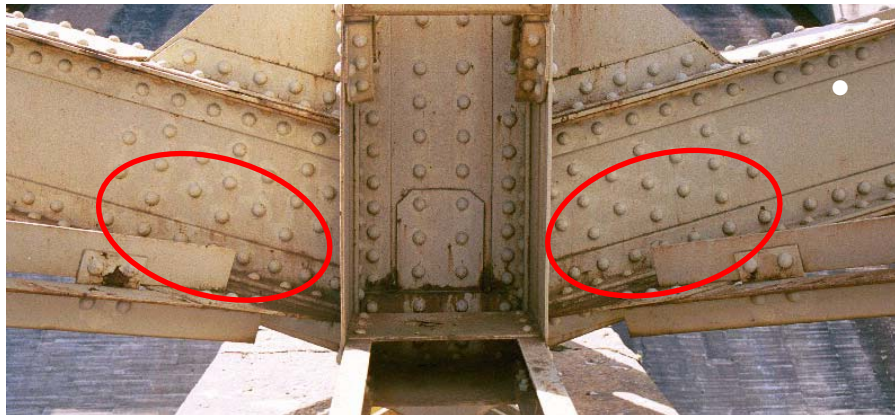
Pålidelighedsbaseret beregning

- Samlinger og kritisk element i hovedkonstruktion



Usikkerhed om fase 3:

- Entreprenørudgift til hovedkonstruktion: Ca. 3-5 mill.
- eller
- Rådgivning: Ca. 0,5 mill.
Entreprenørudgift: Ca. 0-4 mill.



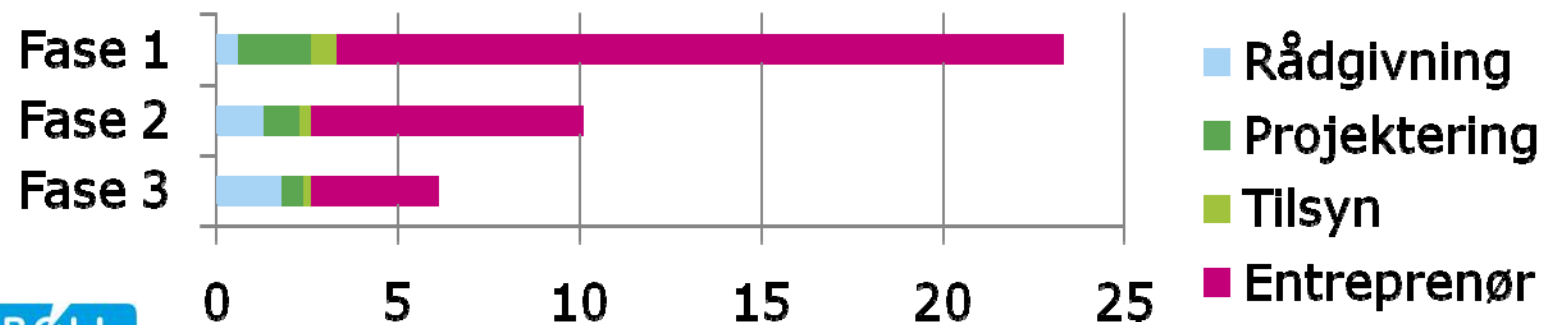
RAMBOLL

Resultat, efter fase 3:

- Alle elementer nu OK
- Antal af kritiske samlinger reduceret
- Ca. 300 nitter skal udskiftes til bolte (mod tidligere 2000)

BERGEFORSEN: SAMMENFATNING

- Fase 1: "Traditionel" bæreevnekontrol
 - Rådgivning, bæreevne: Ca. 0,6 mill.
 - Udgifter til forstærkning: Ca. 20 mill. (entreprenør)
Ca. 2 mill. (projektering)
- Fase 2: "Detaljeret" bæreevnekontrol
 - Rådgivning, bæreevne: Ca. 1,3 mill. (totalt, incl. fase 1)
 - Udgifter til forstærkning: Ca. 6-8 mill. (entreprenør)
Ca. 1 mill. (projektering)
- Fase 3: Pålidelighedsbaseret analyse
 - Rådgivning, bæreevne: Ca. 1,8 mill. (totalt, incl. fase 1+2)
 - Udgifter til forstærkning: Ca. 3-4 mill. (entreprenør)
Ca. 0,6 mill. (projektering)



TAK FOR OPMÆRKSOMHEDEN

RAMBOLL