



Dansk brodag 2017

Fuld-skala bæreevnepåforsøg på eksisterende betonbroer

Jacob Wittrup Schmidt

DTU BYG

jws@byg.dtu.dk

Arbejdsgruppe:

Rasmus Bang (Vejdirektoratet)

Arne Henriksen (Vejdirektoratet)

Jørn Andreas Kristensen (Vejdirektoratet)

Thomas Westergaard Jensen (COWI A/S)

Svend Engelund (COWI A/S)

Philip Skov Halding (DTU BYG)

Jacob Wittrup Schmidt (DTU BYG)



Baggrund

- Trafikmængden er forøget betydeligt siden de fleste af vore broer er blevet opført
- Overholde Trafikstyrelsens bekendtgørelse om køretøjers største bredde, længde, højde, vægt og akseltryk.
- Køretøjer der overholder kravene kan passere alle broer
- Tunge køretøjer der ikke overholder kravene skal have tilladelse (over klasse 55)



Baggrund

- Tilladelsen udstedes på grundlag af en klassificering af køretøjet og broen
- Passage af et køretøj jfr. "Vejledning til belastnings- og beregningsgrundlag annex A".
- Hvis broen har en bæreevneklasse, der overstiger køretøjets belastningsklasse kan særtransporten godkendes
- Overstiger køretøjets belastningsklasse broens bæreevneklasse, må transporten finde en alternativ rute eller tilrettelægges, så køretøjets belastningsklasse reduceres.
- Flere særtransporter må finde alternative ruter
- Stor økonomisk byrde for samfundet

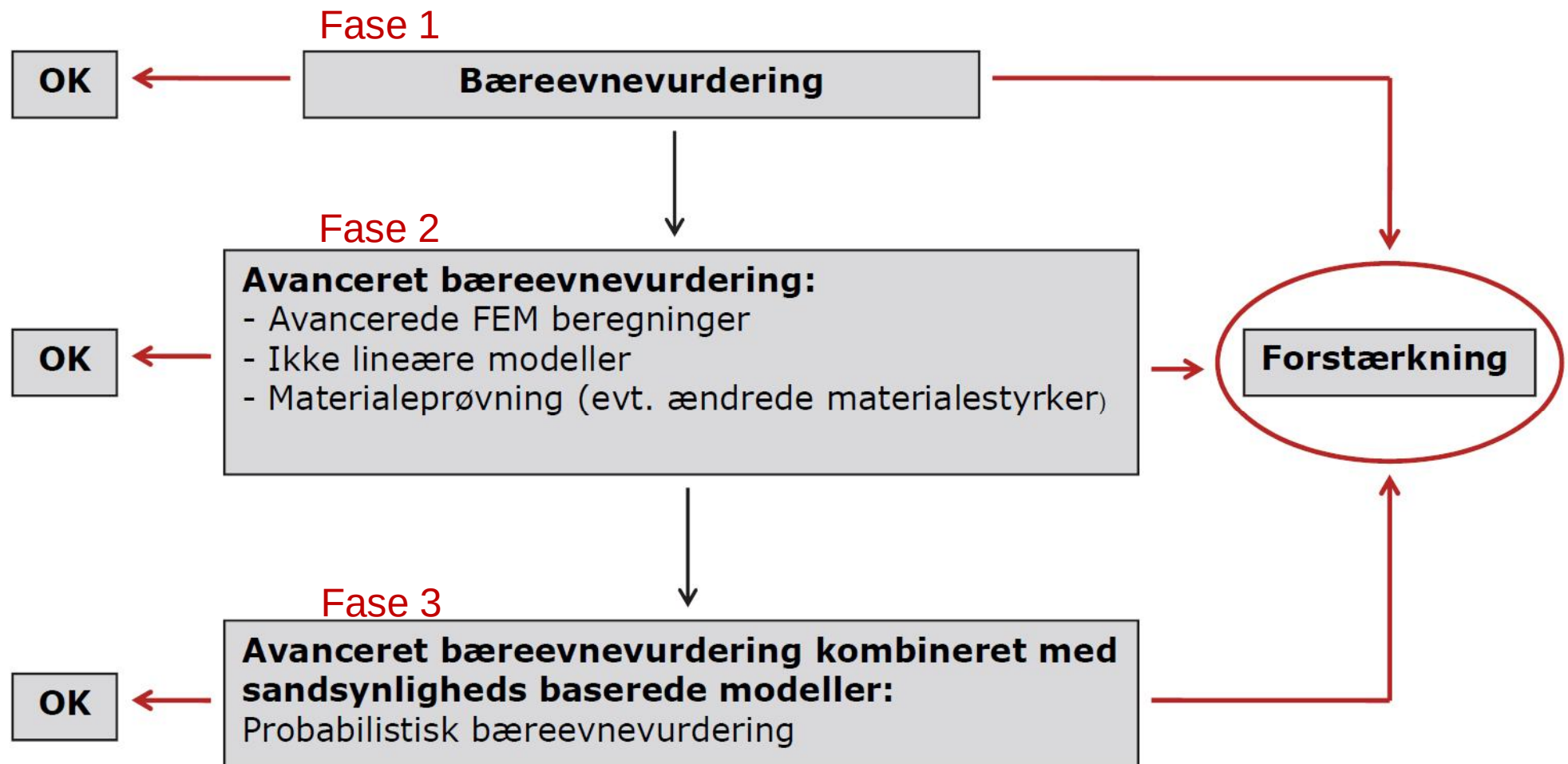
Torben Rafn & Co A/S



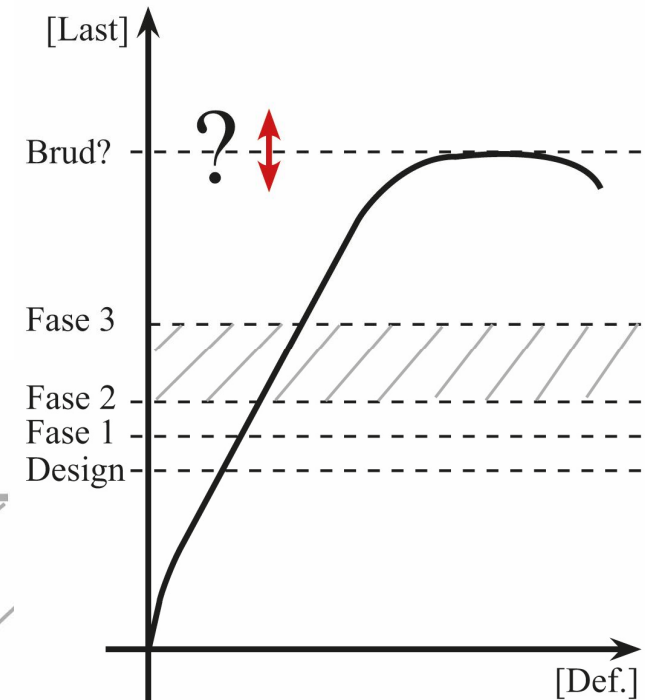
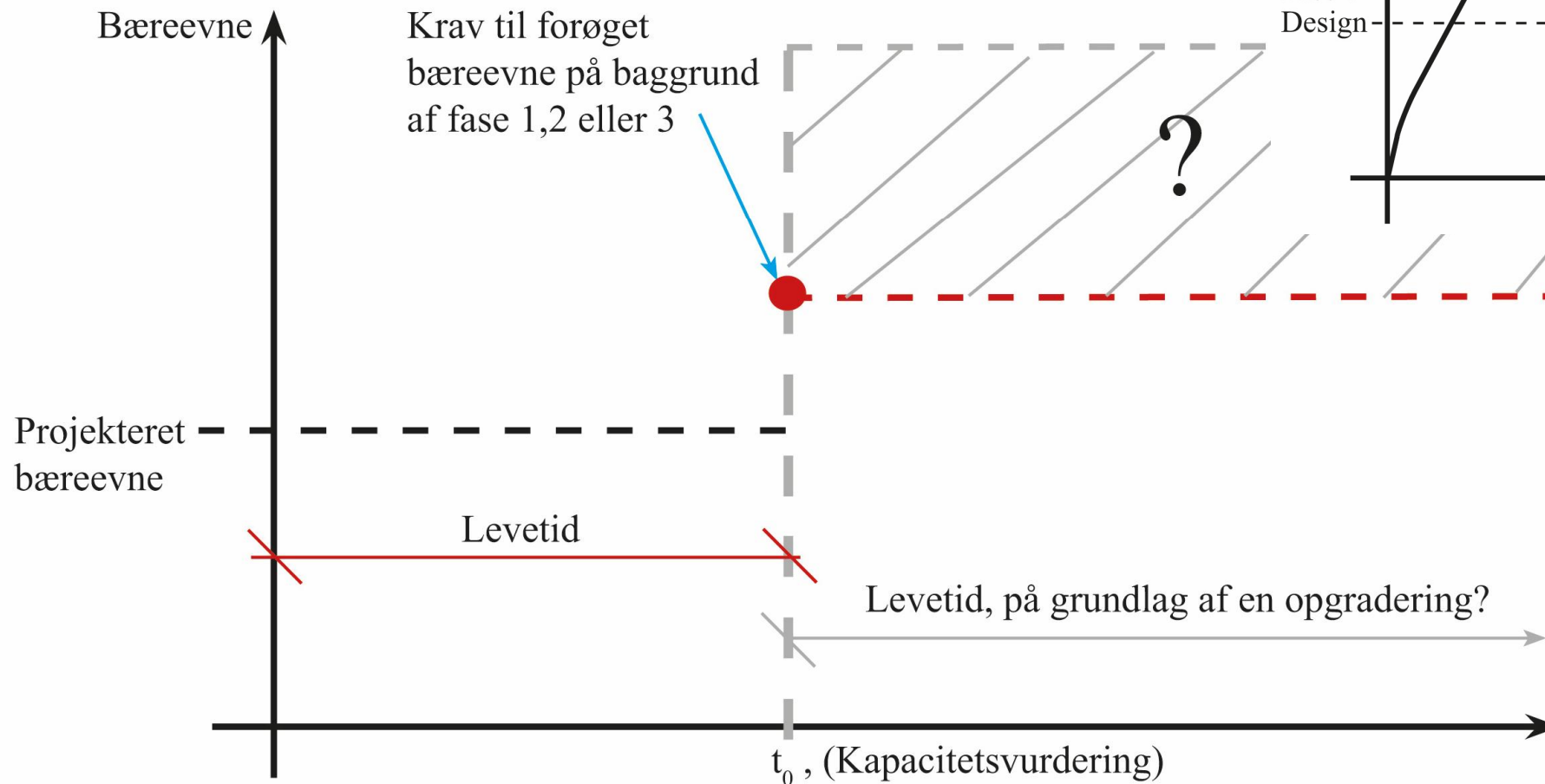
Klasse	Akselkonfiguration Akseltryk i tons og akselafstande i m	Sporvidde m
225	7,0 7,0 8,5 8,5 21,5 21,5 21,5 21,5 21,5 21,5 21,5 21,5 1,4 3,2 1,4 8,0 1,4 1,4 1,75 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4	2,8
250	7,0 7,0 8,5 8,5 21,7 21,7 21,7 21,7 21,7 21,7 21,7 21,7 1,4 3,2 1,4 8,0 1,4 1,4 2,0 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4	2,8
275	7,0 7,0 8,5 8,5 22,1 22,1 22,1 22,1 22,1 22,1 22,1 22,1 1,4 3,2 1,4 8,0 1,4 1,4 1,4 2,2 1,4 1,4 1,4 1,4	2,8
300	7,0 7,0 8,5 8,5 22,4 22,4 22,4 22,4 22,4 22,4 22,4 22,4 1,4 3,2 1,4 8,0 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4	2,8
350	7,0 7,0 8,5 8,5 22,7 22,7 22,7 22,7 22,7 22,7 22,7 22,7 1,4 3,2 1,4 8,0 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4	2,8
400	7,0 7,0 8,5 8,5 23,0 23,0 23,0 23,0 23,0 23,0 23,0 23,0 1,4 3,2 1,4 8,0 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4	2,8
450	7,0 7,0 8,5 8,5 23,2 23,2 23,2 23,2 23,2 23,2 23,2 23,2 1,4 3,2 1,4 8,0 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4	2,8
500	7,0 7,0 8,5 8,5 23,7 23,7 23,7 23,7 23,7 23,7 23,7 23,7 1,4 3,2 1,4 8,0 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4	2,8

Klasse	Akselkonfiguration Akseltryk i tons og akselafstande i m	Sporvidde m
10	2,0 4,4 4,4 3,2 1,4 1,4	2,6
20	3,0 5,0 6,8 6,8 3,2 3,2 1,4 1,4	2,6
30	5,0 8,0 9,3 9,3 3,2 3,5 1,4 1,4	2,6
40	5,5 5,5 5,5 4,2 10,8 10,8 3,2 1,4 3,5 1,4 1,4	2,6
50	6,5 6,5 6,5 10,9 11,8 10,9 3,2 1,4 4,5 1,4 1,4	2,6
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	2,6
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	2,6
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	2,6
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	2,6
100	7,0 7,0 9,5 9,5 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	2,6
125	7,0 7,0 9,5 9,5 6 × 16,4 1,4 3,2 1,4 6,0 1,4 1,4 1,4 1,4	2,8
150	7,0 7,0 9,5 9,5 7 × 17,8 1,4 3,2 1,4 6,0 1,4 1,4 1,4 1,4	2,8
175	7,0 7,0 9,5 9,5 7 × 19,6 1,4 3,2 1,4 6,0 1,4 1,4 1,4 1,4	2,8
200	7,0 7,0 9,5 9,5 8 × 21 1,4 3,2 1,4 6,0 1,4 1,4 1,4 1,4	2,8

- Fremgangsmåde ved evaluering af eksisterende broers bæreevne

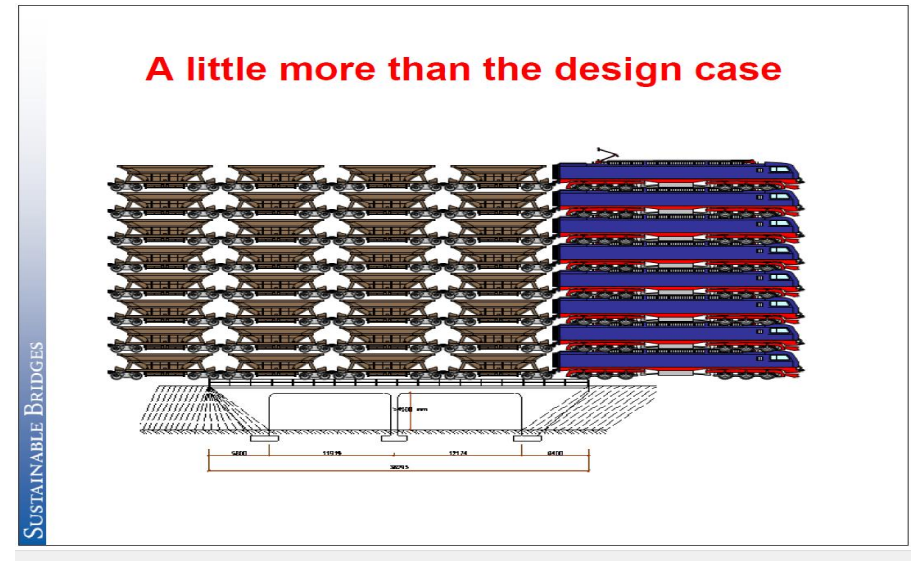


- Evaluering af den eksisterende brokonstruktion
- Faserne er beregnet på baggrund af givne input parametre
- Hvor tæt ligger bæreevnen på fase 3 resultatet?
- Kan vi vha. in-situ test og kalibrering af teori finde et mere præcist estimat af broens bæreevne?

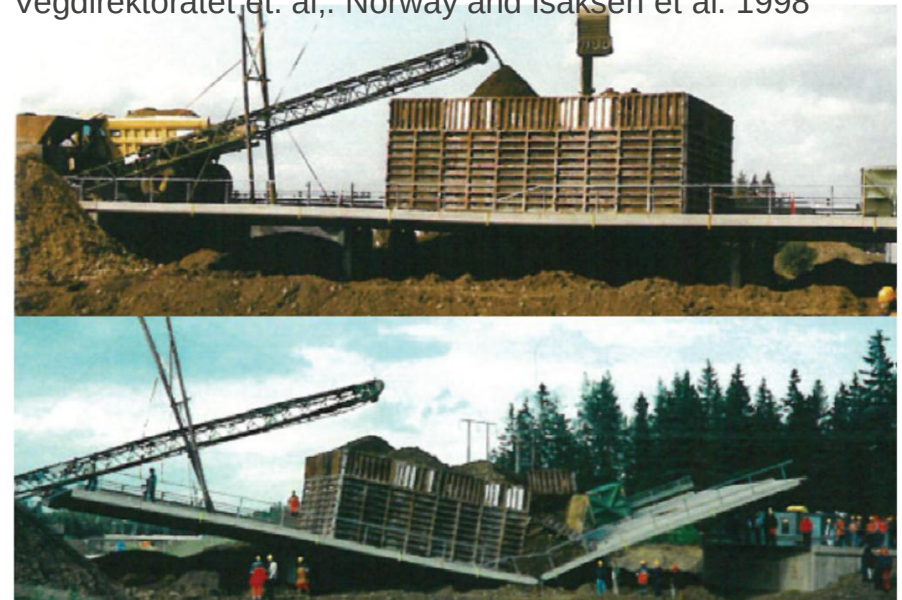


- Beregningsgrundlag sikrer, at broerne har en tilstrækkelig sikkerhed.
- Eventuelle bæreevnereserver:
 - Materialeparametre
 - Randbetingelser
 - Viden om konstruktionselementerne
 - Omfordeling af belastningen
 - Samvirkning af konstruktionselementer
 - Økonomisk ramme
 - Osv.
- Inputparametre er afgørende for beregningen
- Fastlæggelse af stopkriterier

Nogle highlights fra workshop med broejere, universiteter og rådgivere:



Vejdirektoratet et. al.; Norway and Isaksen et al. 1998



- Udvikle fuld skala forsøgsmetode:

Er det muligt at udvikle en forsøgsrig, som lever op til de krav der stilles til en hurtig in-situ fuld skala test?

- Simplificeret monitorering:

Kan avancerede monitoreringsmetoder udvikles til et niveau der gør at stopkriterierne kan findes via en optimeret og mere simpel monitoreringsprocedurer?

- Kalibrering af beregningsmodel:

Kan avancerede teoretiske modeller præsenteres på en måde, så de kan danne baggrund for simplificerede udtryk, der kan kalibreres (via input fra in situ test) til den anvendte monitoreringsmetode?

Initieringen af fuld-skala test

Overordnede krav til testmetoden:

- Højt belastningsniveau (destruktiv niveau)
- Kort testperiode
- Nemt at montere
- Præcis lastpå sætning
- Høj sikkerhed
- Præcis styring af belastningen
- Præcis placering af belastningen
- Belastningen skal afspejle belastningen fra beregninger
- Fastlæggelse stopkriterier ved udførelse af fuldska laforsøgene

Table 1: Full scale destructive tested concrete bridges

Built-Tested	Country	Static system	Span [m]	Material	Ref.
1957 - 1952	England	Continuous	23*/18/23/16/6	PS	35, 36
1955 - 1960	Switzerland	Continuous	8/23*/8	PS	28
1962 - 1967	Australia	Simple	18	PC/PS	14
1963 - 1970	USA	Simple	20	PC/PS	8
1938 - 1970	USA	Simple	15	RC	8
1967 - 1977	USA	Frame	6/8*/6	RC	18
1956 - 1978	Denmark	Continuous	20/20	PS	9, 24
1977 - 1981**	USA	Single	37	PC/PS	20
1950 - 1984	Canada	Continuous	12/18*/12	RC	29
1980 - 1989	Sweden	Frame	21	RC	26, 25
1980 - 1989	Sweden	Frame	31	PS	26, 25
1977 - 1997	England	Single	4	RC	10
1932 - 1997	USA	Simple	8/8/8	FR/RC	2
1938 - 1997	USA	Sim./Con.	6*/10*/11/10/6	RC	3, 4
1953 - 1997	USA	Continuous	10/12*/10	RC	1, 21
1959 - 1996	Switzerland	Continuous	20*/7-24/20	PS	19
1989 - 1996	Norway	Continuous	11/16*/11	RC	17
1939 - 1998	Australia	Continuous	4/5*/5/4	RC	13, 15
1957 - 2007	South Korea	Simple	11 · 12	RC	31
1967 - 2007	South Korea	Simple	9	RC	31
1977 - 2007	South Korea	Simple	12 · 30	PC/PS	23
1995 - 2007	China	Continuous	30/50*/30	PS	42
1969 - 2002	Australia	Continuous	5 · 8	RC	27
1992 - 2017	China	Simple	6·20	RC	41
1955 - 2006	Sweden	Frame	12/12	FR/RC	12
1964 - 2007	China	Simple	13/13/13	PC/RC	40, 39
1967 - 2010	USA	Simple	15/15/15	PC/PS	32
1959 - 2014	Sweden	Continuous	18/21*/3-28	FR/PS	11

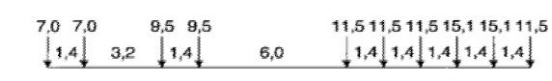
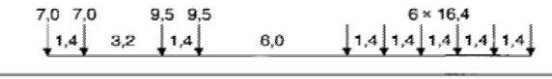
* Tested spans.

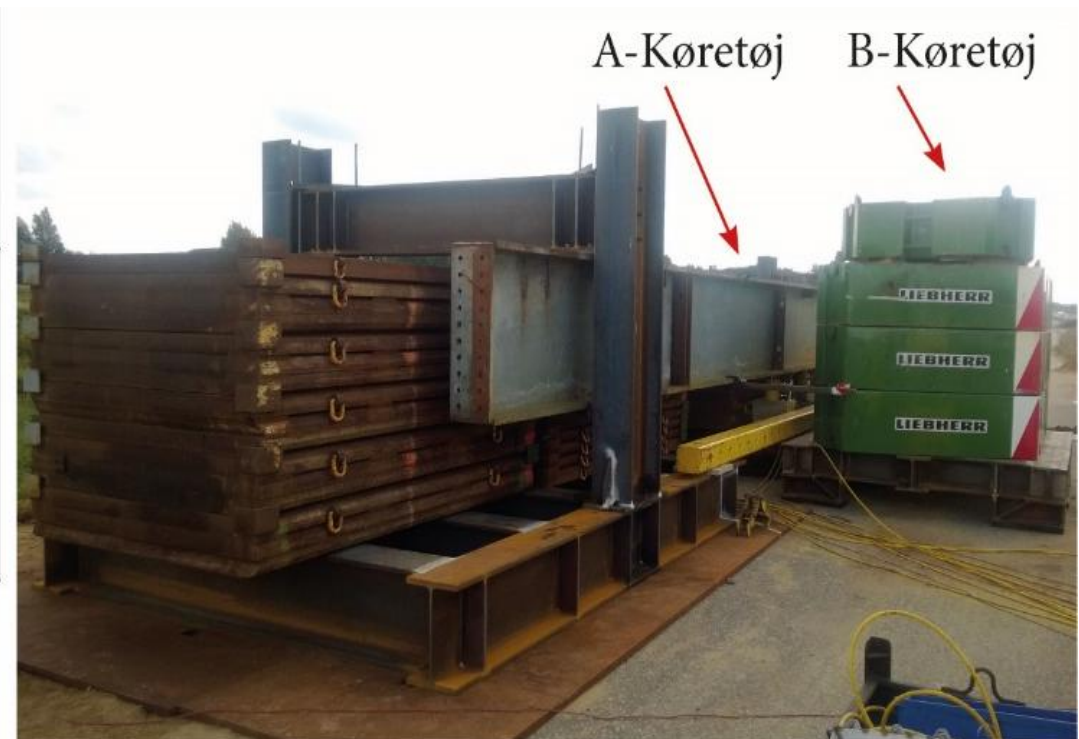
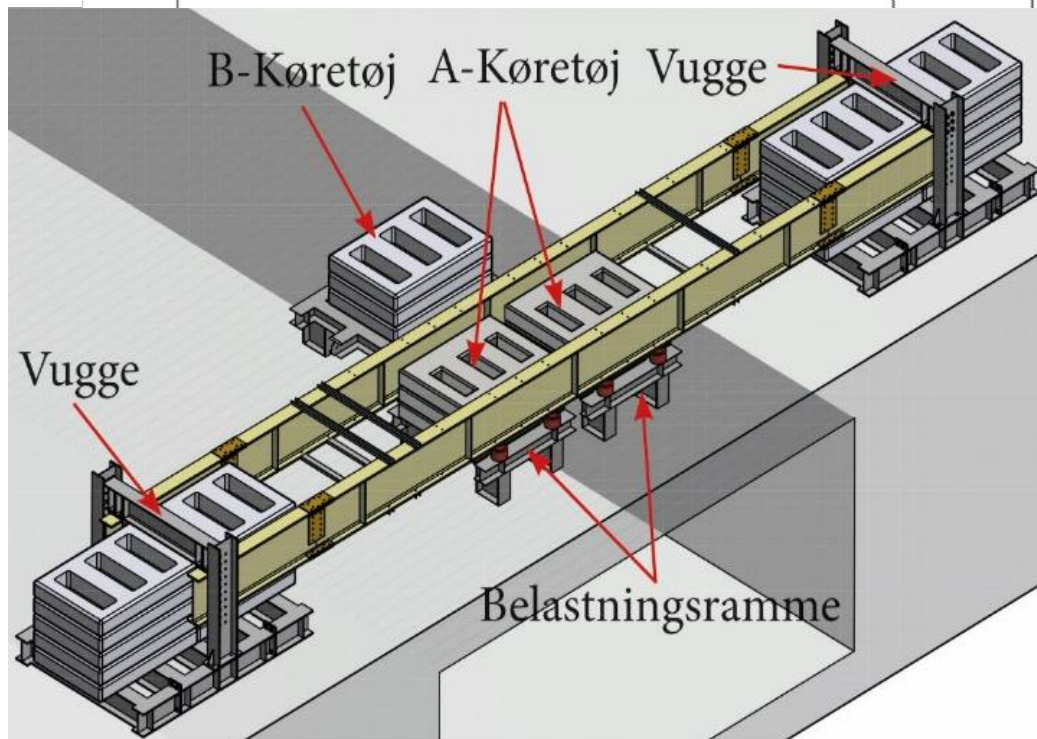
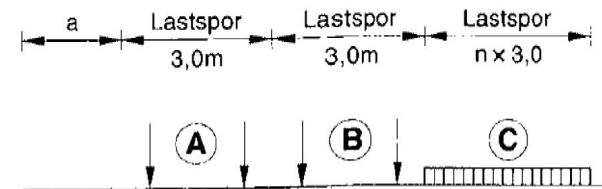
** Experimental bridge, never in service.

PC: Pre-Cast. PS: Pre-Stressed. RC: Reinforced Concrete. FR: Fibre Reinforced

Fuld-skala brotest, nyudviklet belastningsrig

- Lastkombinationssystem
- Vuggesystem
- Semi-deformationskontrolleret belastning
- For at sikre en præcis hjullastpåsætning
- Hjullastkonfigurationen er identisk med den, som anvendes i de teoretiske evalueringer
- Belastningsmetoden er ny, fleksibel og hurtig at påsætte (1-dag test)

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 1,4	2,6
125	 7,0 7,0 9,5 9,5 6 × 16,4 1,4 3,2 1,4 6,0 1,4 1,4 1,4 1,4 1,4	2,8



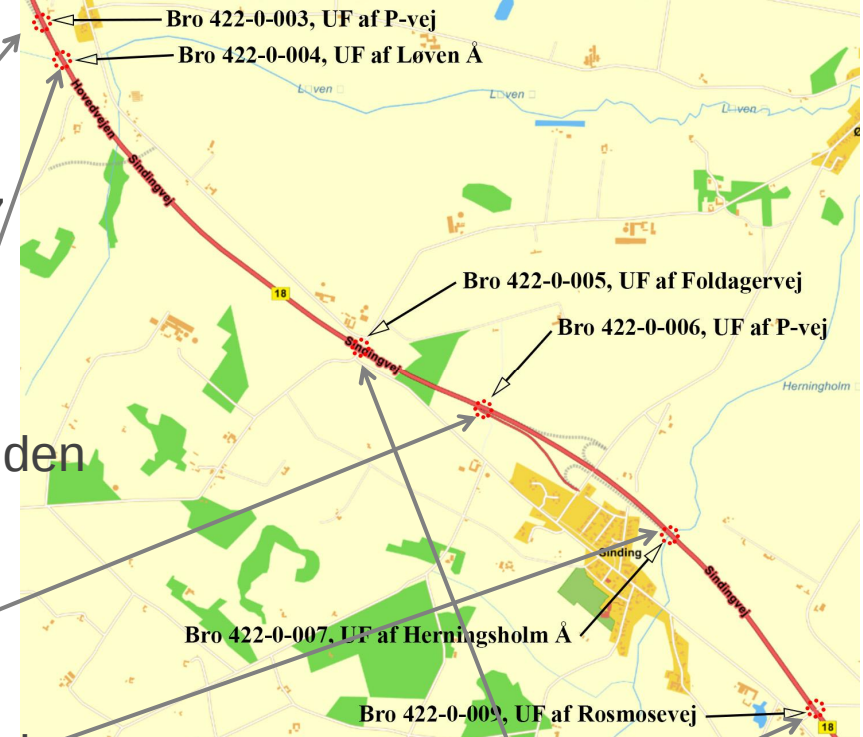
Fuld-skala brotest, nyudviklet belastningsrig

- Indledende test hos BMS
- Spænd op til ca. 12m
- 12 hjullastpunkter
- Verificere montage og lastpå sætning på broen som snart skal testes



Fuld skala brotest

- Fuldskala forsøg september 2016 og januar 2017
- Vejdirektoratet
- COWI
- DTU BYG
- Fuld-skala test på en række broer beliggende på den tidligere hovedvej mellem Herning og Holstebro
- Primært fokus på OT-bjælkebroer
- Verificering af belastningen
- Verificering af den indledende monitoreringsmetode



- Bro 422-0-0-003, UF af
- Bro 422-0-006, UF af



- Bro 422-0-004, UF af Løven Å
- Bro 422-0-005, UF af Herningsholm Å



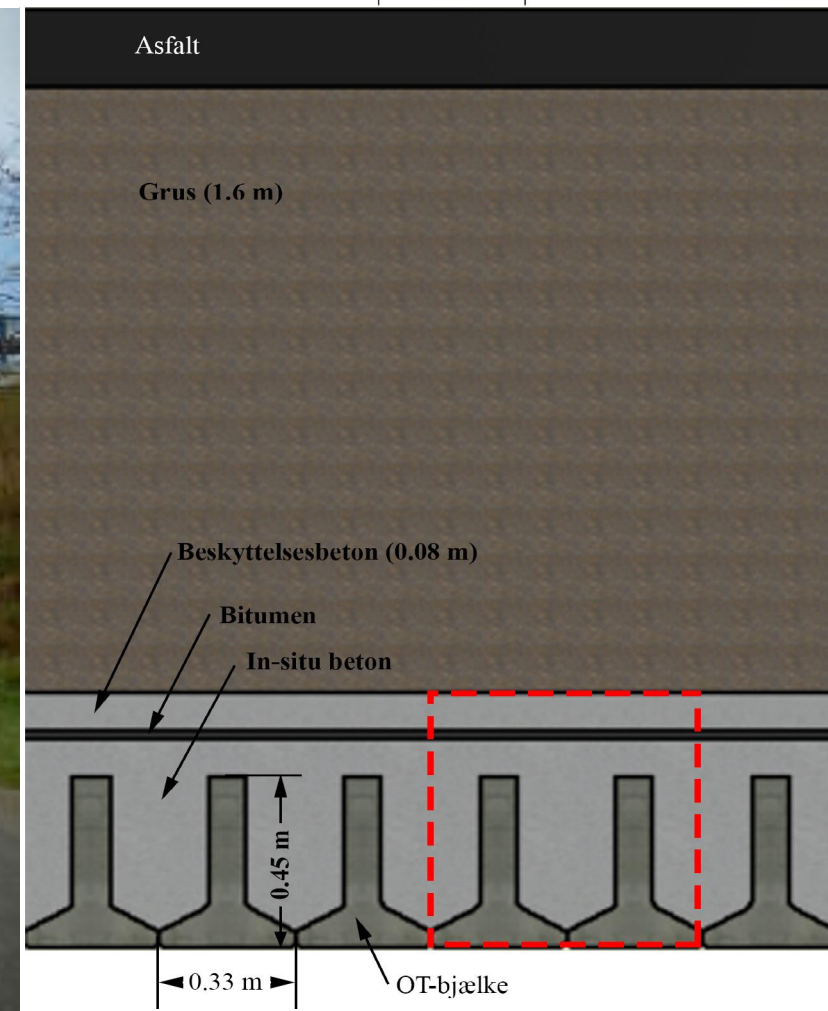
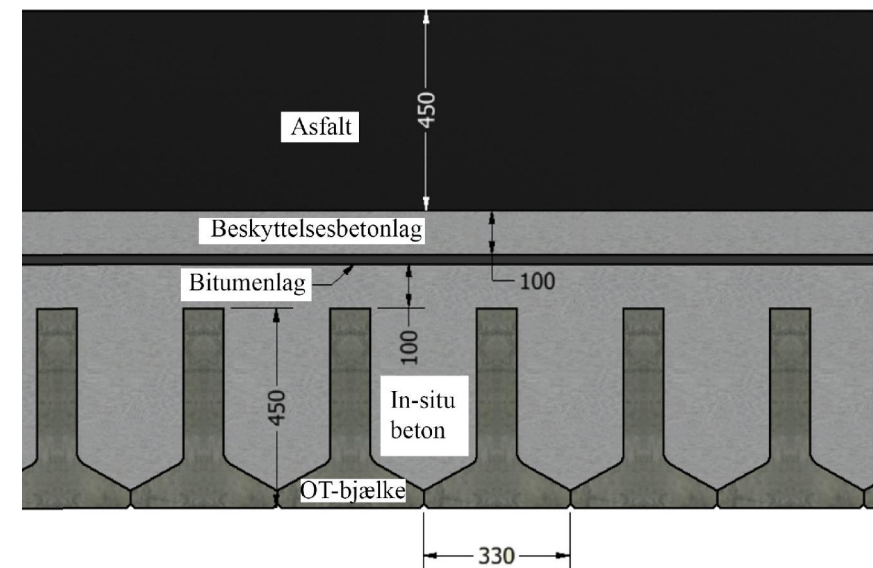
- Bro 422-0-005, UF af Foldagervej
- Bro 422-0-009, UF af Rosmosevej



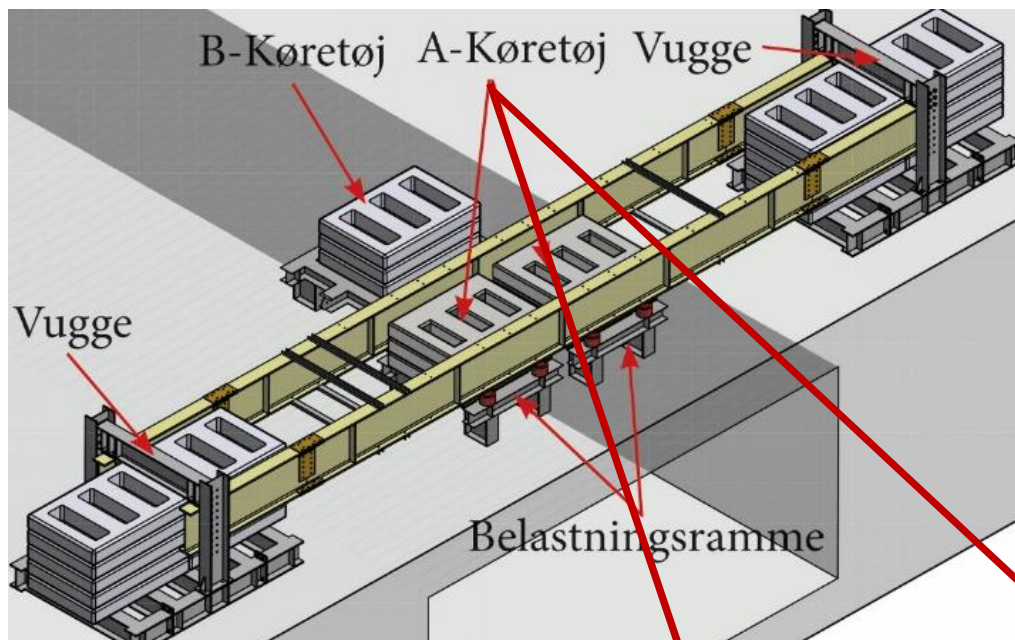
Fuld skala brotest

OT-bjælkebroer på strækningen:

- Bro 422-0-005, UF af Foldagervej
- Bro 422-0-009, UF af Rosmosevej
- Bro 422-0-004, UF af Løven Å
- Bro 422-0-005, UF af Herningsholm Å



Fuld skala brotest



Fuld skala brotest



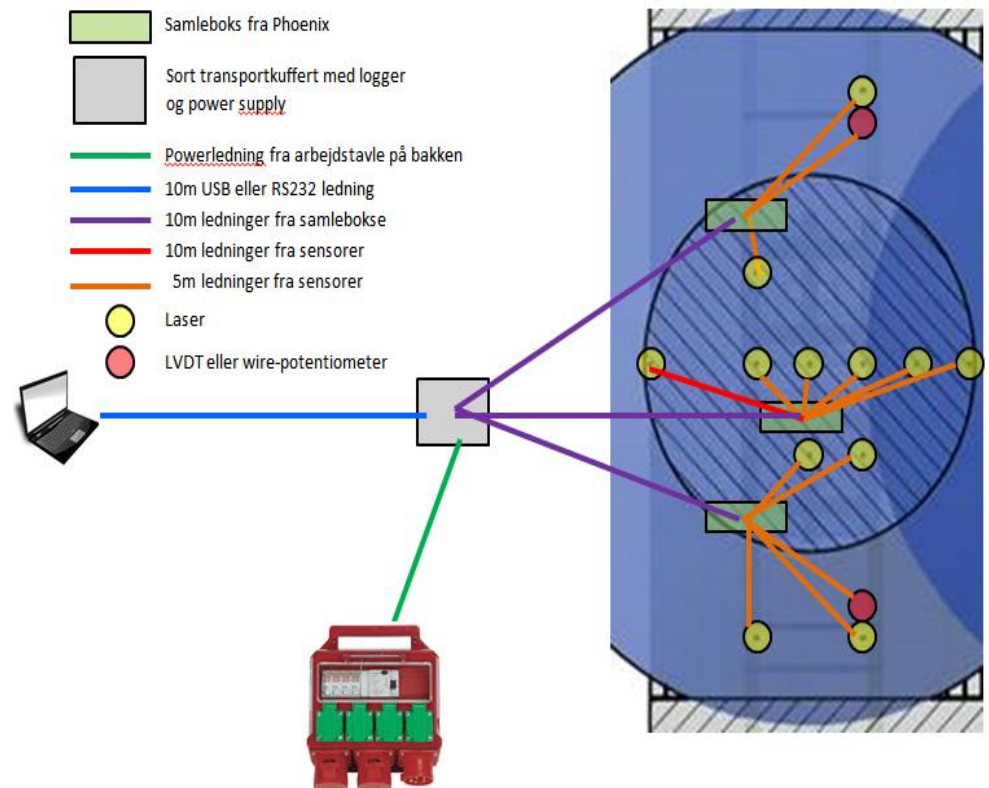
Fuld skala brotest

Indledende monitorering:

- 12 avancerede punktlasere
- 4 LVDT'er (Linear Variable Differential Transformer)
- 1 vidvinkelkamera – til DIC-software ARAMIS
- Landmåler – måler deformationer
- Last- og deformationsoutput fra donkrafte
- Deformationsmålinger mellem testrig-dele



Placeringsstegning over sensorer og andet udstyr



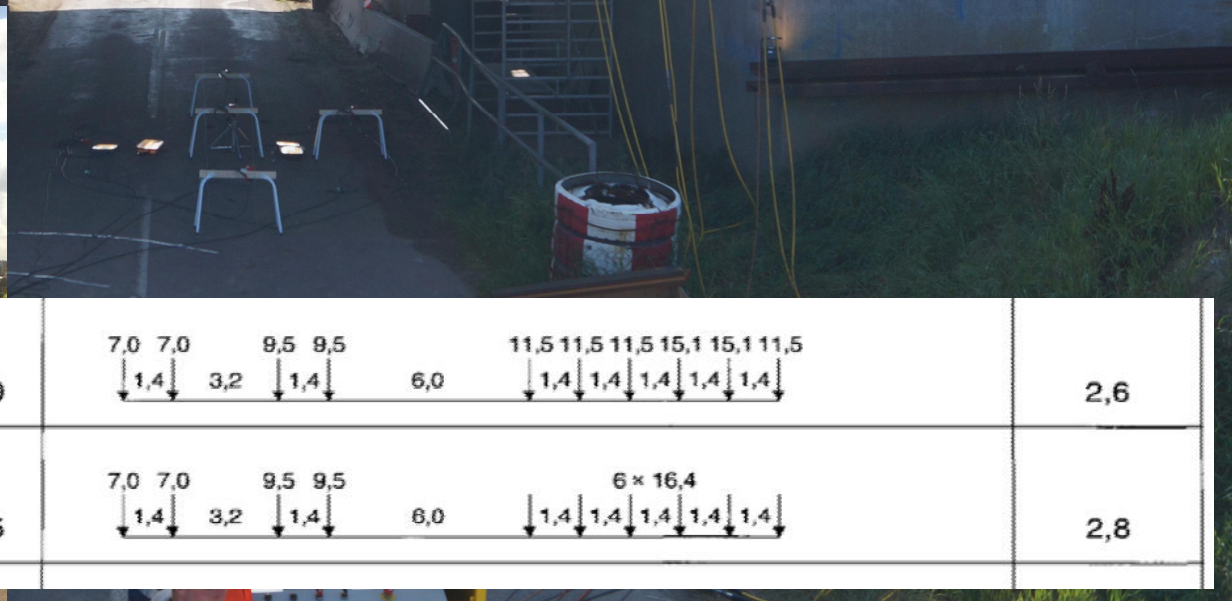
Fuld skala brotest

- Bro 422-0-005, UF af Foldagervej



Fuld skala brotest

- Bro 422-0-005, UF af Foldagervej
- Aksellast på 96 tons blev opnået
- Maksimum kapacitet for forsøgsriggen
- Ingen synlige revner



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 ↓ 1,4	2,6
125	7,0 7,0 9,5 9,5 6 × 16,4 ↓ 1,4 ↓ 3,2 ↓ 1,4 ↓ 6,0 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓ 1,4 ↓ 1,4	2,8

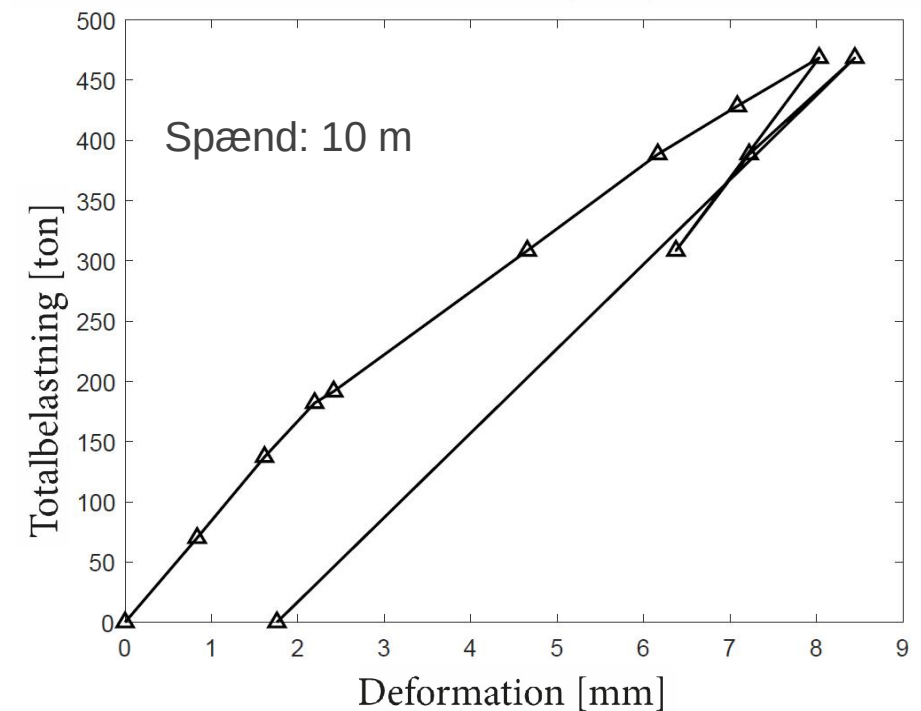
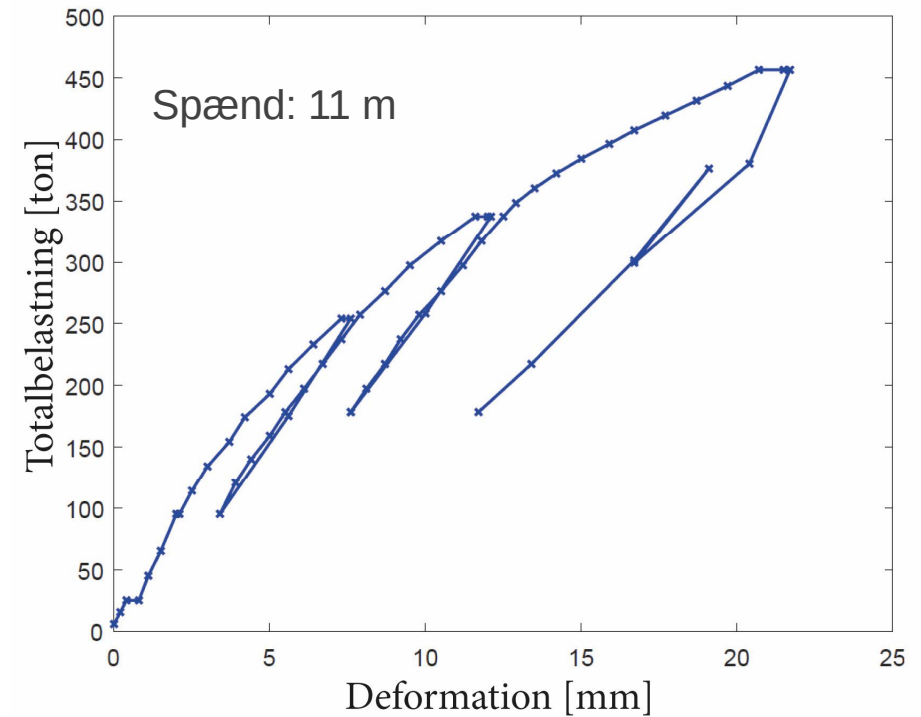
Fuld skala brotest

- Bro 422-0-009, UF af Rosmosevej, var næsten identisk med Foldagervej, Spændet var 11m på Foldagervej, hvorimod det var 10m på Rosmosevej



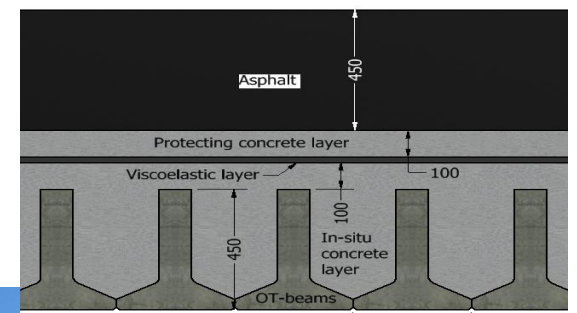
Fuld-skala brotest, sammenligning af respons

- Forsøg på Bro 422-0-005,
UF af Foldagervej: 456,4 ton,
akseltryk 96,6ton; def.: 21,7 mm
- Forsøg på Bro 422-0-009
UF af Rosmosevej: 468,4 ton, akseltryk
99,6ton; def.: 8,4mm



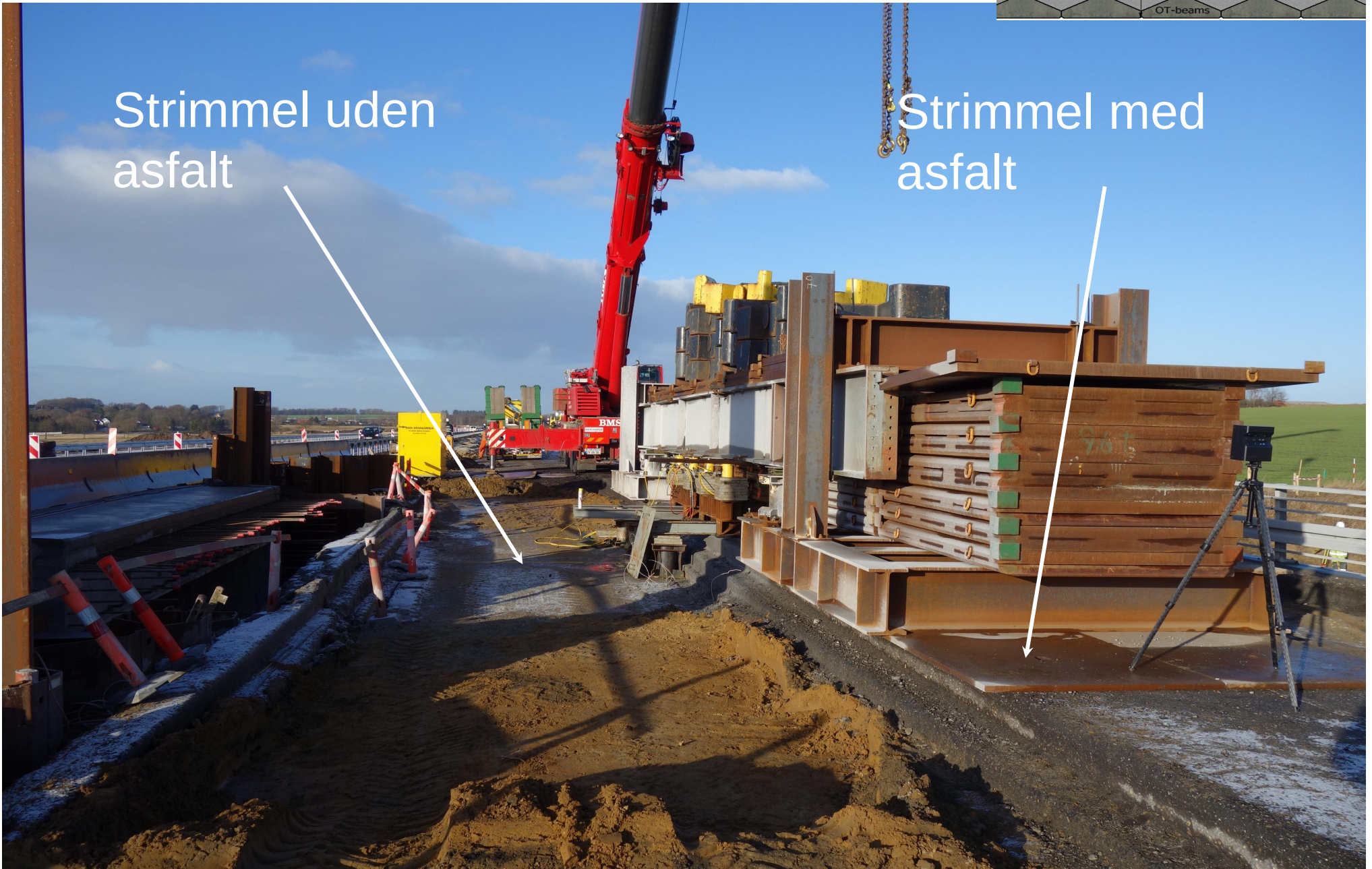
Fuld-skala brotest

- Strimmel med og uden asfalt og beskyttelsesbeton



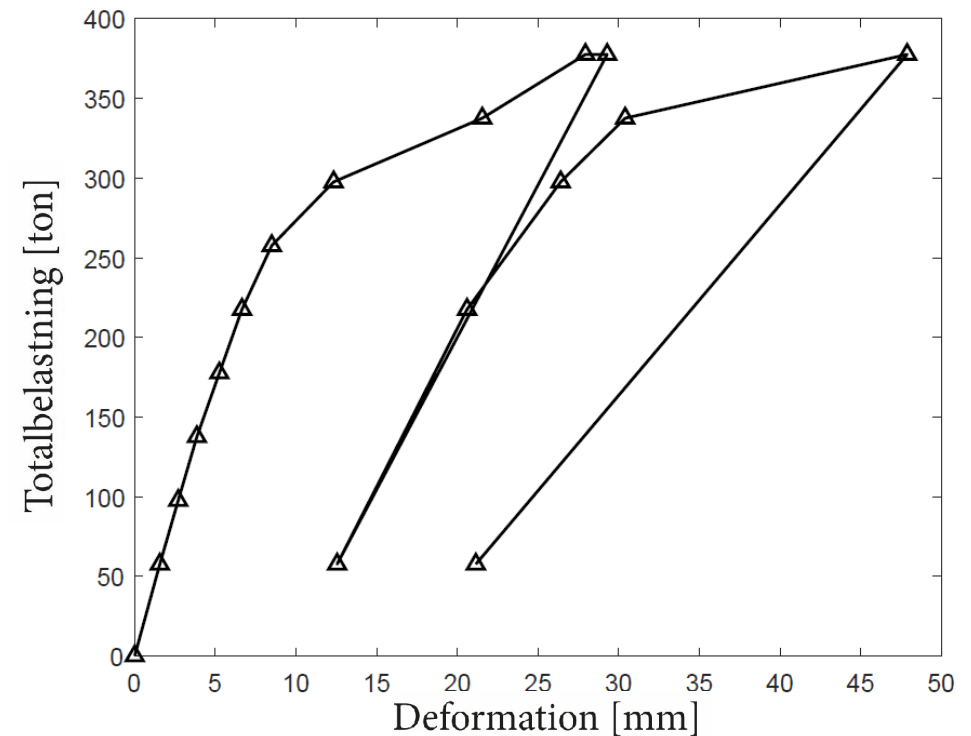
Strimmel uden
asfalt

Strimmel med
asfalt

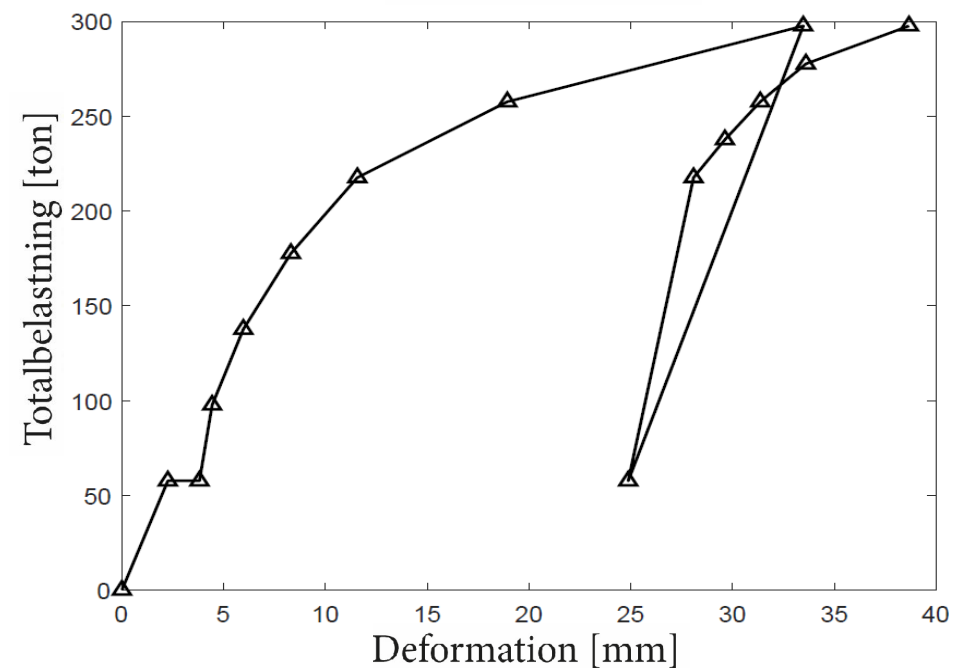


Rosmosevej - strimmeltest

- Strimmel med asfalt -
Rosmosevej: 377,6 ton, aksestryk
94,4ton Deformation: 47,9 mm

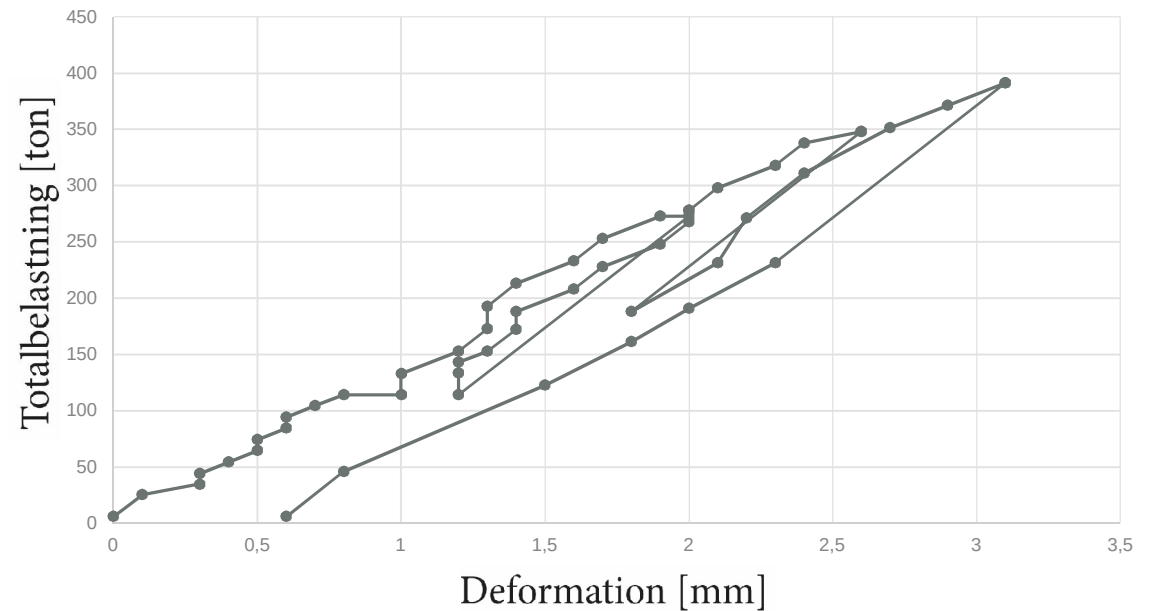


- Strimmel u. asfalt - Rosmosevej:
297,6 ton, aksestryk 74,4ton
Deformation: 38,7 mm

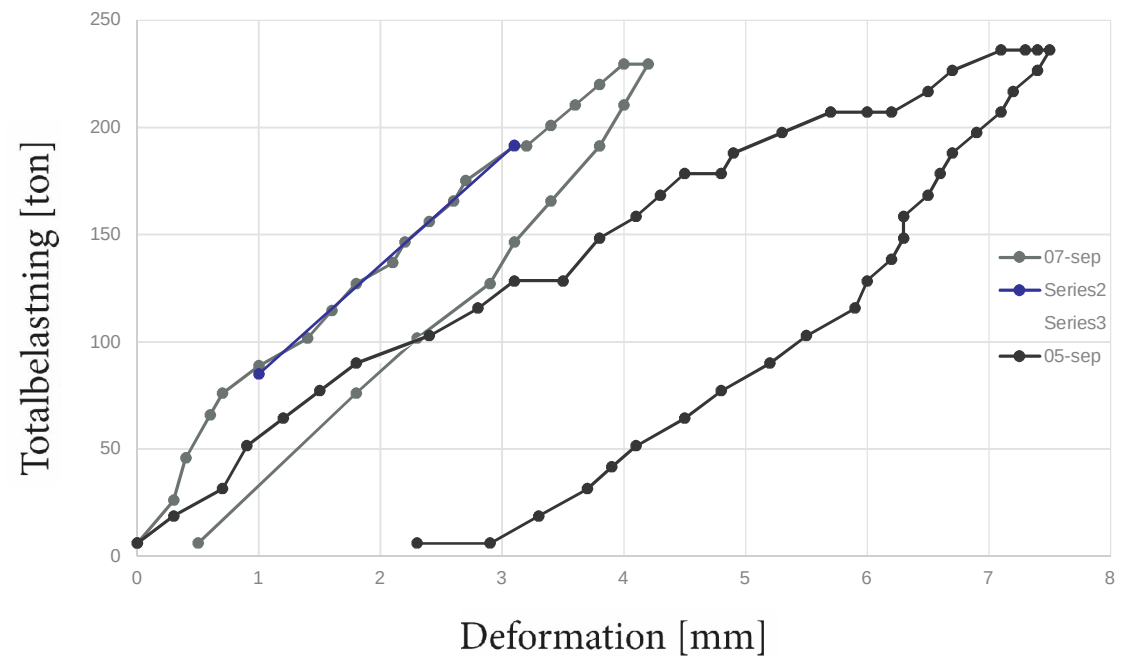


Fuld skala brotest, respons (små broer)

- Bro 422-0-004, UF af Løven Å



- Bro 422-0-003 og Bro 422-0-006 (prøvebelastning)



Indledende monitorering

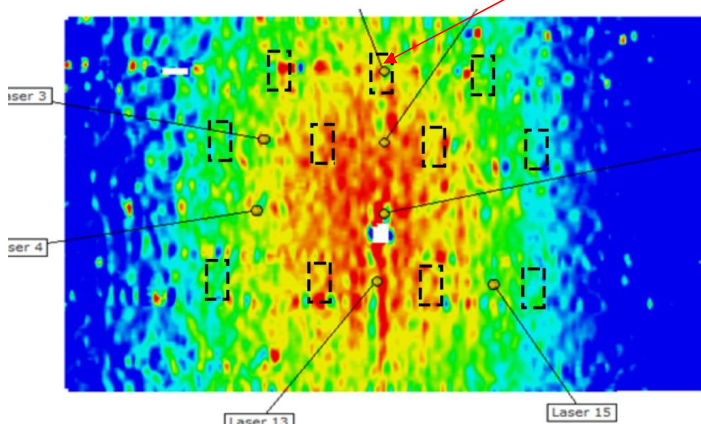
- Den indledende monitorering viste generelt gode resultater
- In-situ test monitorering er udfordrende, da det ikke foregår i et laboratorium (fugt, lys, tid, løbende evaluering, systemsammenkobling osv.)
- Evalueres stadig
- Præsenteres i konference- og internationale artikler



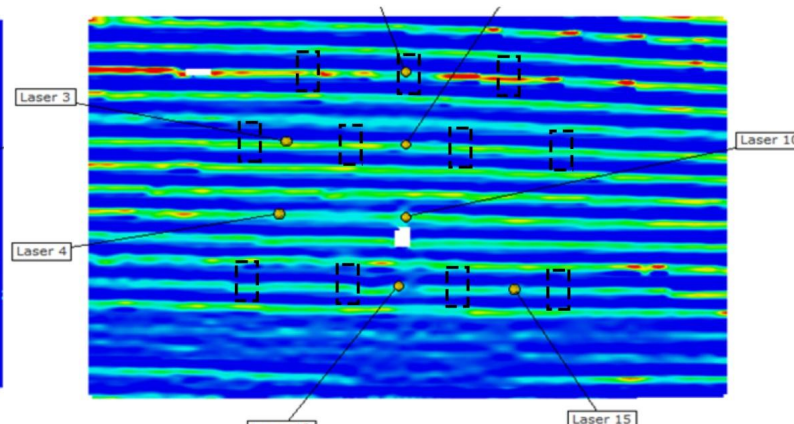
0 0 0



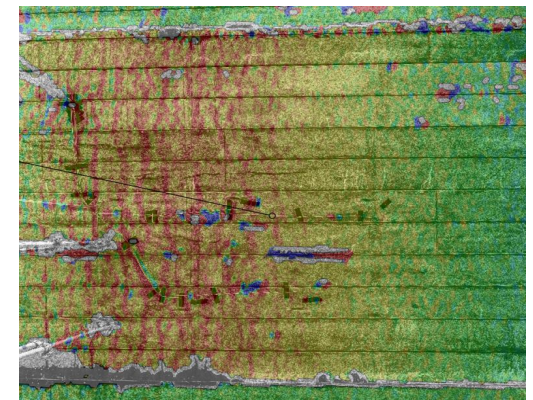
0 0 0



Kantbjælkeside



Kantbjælkeside



Konklusion

- Den nye belastningsrig gør det er muligt at gennemføre bæreevnepforsøg med meget højt belastningsniveau- og præcision på broer med spændvidder på op til 11,7m i løbet af én dag.
- De indledende monitoreringsmetoder fungerede godt. Disse justeres nu i forhold til vores erfaringer og optimeres. Målingerne og erfaringerne har dannet et godt grundlag for vurdering af anvendelige målemetoder
- Fremadrettet ligger der en stor arbejdsopgave i den teoretiske evaluering, vurdering af monitoreringsprincipper og kalibrering ift. testresultater – Vi er kun lige begyndt.
- Årsagerne til den høje bæreevne for OT bjælkebroerne skal fastlægges via et samspil mellem forsøg (input) - og relateret teoretisk modellering

Klasse 500:



Klasse 100:



Bro	Maksimal last	Maksimal udbøjning
422-0-003 , UF af P-vej	226,4 t	7,4 mm
422-0-004, UF af Løven Å	391,2 t	3,1 mm
422-0-005, UF af Foldagervej	456,4 t (96t akseltryk)	21,7 mm
422-0-006 UF af P-vej	229,6 t	4,2 mm
Bro 422-0-009 UF af Rosmosevej	468,4 t (100t akseltryk)	8,4mm
- Strimmel med asfalt	94,4 t (akseltryk)	47,9 mm
- Strimmel uden asfalt	74,4 t (akseltryk)	38,7 mm
Bro 422-0-007, UF af Herningsholm Å	362 t	4.4mm