

## Dynamiska effekter av tåg på broar



Raid Karoumi

Avdelning för Bro- och stålbyggnad, KTH



## Disposition

- Introduktion
- Vilka krav ställer normen
- Simulering av dynamisk respons
- Hur stämmer teorin med mätningar
- Pågående forskning på KTH
- Slutsatser & rekommendationer (erfarenheter från KTH)

CIR-dagen 2011

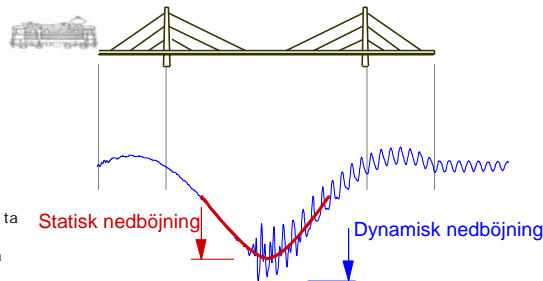
2



## Dynamisk & statisk respons

Det dynamiska tillskottet kan beaktas genom att ta statisk respons  $\times$  den dimension lösa dynamikfaktorn  $D$

$$D = \max(y_{\text{dyn}}) / \max(y_{\text{stat}})$$



CIR-dagen 2011

3




## Dynamiska effekter

Faktorer som påverkar förstöringsfaktorn:

- Brons dynamiska egenskaper (spännvidd, styvhet, massa och dämpning).
- Fordonens fart på bron.
- Fordonens massa, fjädring och dämpning.
- Fordonens utformning (antal axlar, axelavstånd, ...).
- Spårets dynamiska egenskaper.
- Ojämheter (räl och hjul).
- Förekomst av dämpande och energiuptagande system (som ballast mm.) mellan fordon och bro.

CIR-dagen 2011

4



## Varför så viktigt nu

---

Dynamiska effekter av tåg på broar har ökat som ett resultat av:

- Ökade tåghastigheter.
- Ökade axellaster för att förbättra transport effektiviteten.
- Större  $M_{tåg}$  /  $M_{bro}$  som ett resultat av lättare och slankare broar.
- Moderna broar har lägre energiupptagningsförmåga (dämpningskapacitet).

Den extra dynamiska delen av trafiklasterna måste bestämmas noggrant för att garantera den planerade livslängden och en ekonomisk dimensionering.

CIR-dagen 2011
5



"Within 25 years our goal is to give 80% of Americans access to high speed rail"  
*State of the Union address, January 25, 2011*



CIR-dagen 2011
6



Först och främst med teknik och IT  
Fredag 28 januari 2011



I början av december slog det kinesiska höghastighetståget CRH380A rekord med hastigheten 486,1 kilometer i timmen. Grafik: Jonas Åskengren

### Kinas revolution rullar rekordfort

Av: Helen Ahlborn, Marie Almqvist  
Publicerad 26 januari 2011 00:00 67 kommentarer

**Kommentarer**

Skriv en kommentar Senaste inlägget är Sortera: Senaste överst


Går det att få tag på artikeln på engelska?  
Google translate är förstås en möjlighet men inte tillräckligt bra. Svara

Cecilia 19 jan 10:21

Ta hit kineserna  
Ta hit kineserna och låt dem bygga våra höghastighetståg.  
Då kanske vi kan få dem färdiga inom fem år och till ett rimligt pris  
stället för om 100 år. Visst, det kommer att bli ett jätte liv på  
backbordet som tycks att höghastighetståg ska göra  
det. Men vi skulle naturligt få snabbtåg på rekordfart.

Johan B 19 jan 10:14 Svara

CIR-dagen 2011
7



## Normkrav

---

- $v \leq 200 \text{ km/h}$ , den vertikala tåglasten skall multipliceras med en dynamkoefficient
 
$$D = \frac{1,44}{\sqrt{L_{\phi} - 0,2}} + 0,82$$
- $v > 200 \text{ km/h}$ 
  - dynamisk beräkning för hastigheter upp till 1,2 x sth
  - kontrollera vertikala accelerationer, vertikala och horisontella nedböjningar, vinkeländring vid upplag/stöd samt vridning
  - kontroll av vertikala accelerationer för brobanan blir oftast avgörande (risk för ballastinstabilitet som kan resultera i förändrat spåräge med ökat underhåll och risk för urspårning som följd!)

CIR-dagen 2011
8

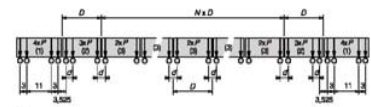
**Simulering av dynamisk respons**

För simulering av dynamisk respons behöver vi information om:

- **Bro**  
area, böjstyvhets, vridstyvhets  
dämpning  
Massa
- **Tåg**  
vilka tåg  
axellaster, axelavstånd...  
största hastighet
- **Spår**  
Ballasterat?, ballast tjocklek, ojämnheter, spår styvhets, ...

CIR-dagen 2011 9

**Tåglastmodell HSLM-A**



Key:  
(1) Power car (leading and trailing power cars identical)  
(2) End coach (leading and trailing end coaches identical)  
(3) Intermediate coach

Tågmodell: rörliga konstanta punktlaster

Universal Train	Number of intermediate coaches	Coach length $D$ [m]	Bogie axle spacing $a$ [m]	Point force $P$ [kN]
A1	18	18	2,0	170
A2	17	19	3,5	200
A3	16	20	2,0	180
A4	15	21	3,0	190
A5	14	22	2,0	170
A6	13	23	2,0	180
A7	13	24	2,0	190
A8	12	25	2,5	190
A9	11	26	2,0	210
A10	11	27	2,0	210

**High Speed Load Model (HSLM A1-A10)**

CIR-dagen 2011 10

**Att beakta vid modellering/analys**

Dämpning

Ojämnheter (hjul, räl)

Dynamisk E-modul

Övergångszone bank till bro

Spårsystemets styvhets & dämpning

Medverkande bredd

upplagsstyvhets

Sprucket/ospr tvärsnitt

Inverkan av anslutande mark

Lastspridning ballast/sliprar

Medverkande massa av tåg

Tågets dämpning

Bro-tåg interaktion

Tågmodell fjädrad/ofjädrad

CIR-dagen 2011 11

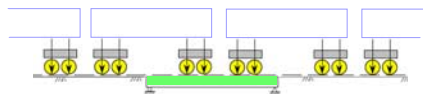
**Resonans pga. regelbundna axelavstånd**

Starta med en enkel första kontroll för resonans pga. regelbundna axel- och boggiavstånd. Det finns risk för resonans då dessa exciteringsfrekvenser ligger nära brons egenfrekvens.

Hastigheten vid vilken resonans inträffar kan uppskattas som:

$$v_{kritisk} = f_1 \cdot \lambda_i \quad (\text{m/s})$$

$f_1$  är den obelastade brons egenfrekvens, (Hz)  
 $\lambda_i$  är exciteringsfrekvensens våglängden (m)  
(t.ex. det regelbundna axelgruppernas avstånd)



CIR-dagen 2011 12

**Inverkan av styvhet & massa**

**Inverkan av styvheten**  
Overskattning av **E** och **I** leder till högre frekvens och högre hastighet för vilken resonans inträffar → Studera lägre gräns för styvheten för att få lägsta hastighet för vilken resonans inträffar.

$$\omega_k = \alpha_k^2 \sqrt{\frac{EI}{mL^3}}$$

**Inverkan av massan**  
Underskattning av **M** leder till högre frekvens och högre resonanshastighet. Vid resonans är accelerationen **A** proportionellt till **1/M**.

Två fall ska beaktas:

- 1) lägre gräns för **M** för att få max **A**
- 2) Högre gräns för **M** för att få lägsta hastighet för vilken resonans inträffar

Komplicerad inverkan av styvhet & massa → t.ex. att öka plättjockleken för att öka styvheten och  $v_{kritisk}$  behöver inte fungera i dynamik!

CIR-dagen 2011 13

**Dämpning som funktion av spannlängd**

Brottyp	Undre gränsvärde för dämpning (%)	
	L < 20 m	L ≥ 20 m
Stål och samverkanskonstruktion	$\zeta = 0.5 + 0.125(20-L)$	$\zeta = 0.5$
Förspända betongkonstruktioner	$\zeta = 1.0 + 0.07(20-L)$	$\zeta = 1.0$
Armerad betong	$\zeta = 1.5 + 0.07(20-L)$	$\zeta = 1.5$

Dämpning kan komma ifrån:

- intern materialdämpning
- friktion vid lager & fogar
- energiförlust i ballast
- öppning och stängning av sprickor (speciellt i btg)
- tågets dämpning

Nivån på dämpning påverkas av:

- svängningens amplitud
- sprucken/osprucken btg
- ballasterat/oballasterat spår
- ballastens kondition
- ballast tjocklek
- temperatur/is

CIR-dagen 2011 14

**Typiska resultat som ska redovisas**  
(Brustjärnsbäcken: förspänd betongbalkbro i ett spann L = 2.5 + 30 + 2.5 m)

HSLM-A9 med hastigheten 295 km/h

CIR-dagen 2011 15

**Hur stämmer teorin med mätningar**


CIR-dagen 2011 16

 **Syftet med KTHs mätprojekt**

Syftet är att få svar på följande frågor:

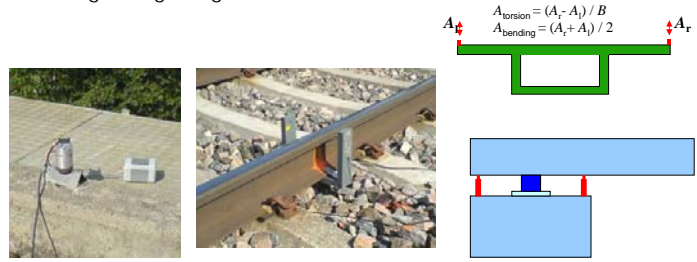
- Hur uppför sig våra broar i verklighet (förstå verkningssätt)?
- Är normkraven relevanta?
- Hur bra fungerar våra beräkningsmodeller? Behöver vi kalibrering m.a.p. dynamiska egenskaper, upplagsstyheter, randvillkor, verklig lastfördelning osv.
- Vad har vi för verkliga statiska/dynamiska trafiklaster?
- Hur förändras brons respons med tiden och med temperaturen (även för övervakning & skadedetektering)?

CIR-dagen 2011 17

 **Vad vill vi mäta?**

Mätning av förskjutning (oftast med induktiv givare LVDT)  
Mätning av accelerationer (ger dynamiska egenskaper)  
Mätning av töjningar  
Mätning av tåghastigheter och axellaster

$$A_{torsion} = (A_r - A_l) / B$$
$$A_{bending} = (A_r + A_l) / 2$$

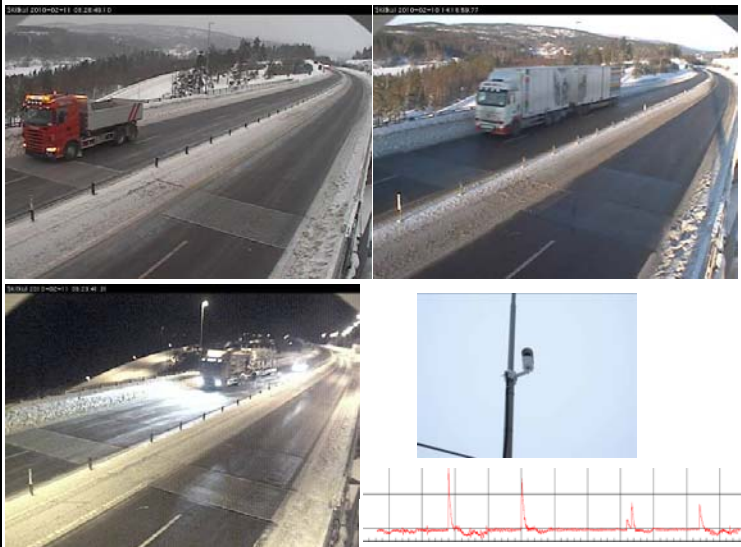


CIR-dagen 2011 18

 **Sprickövervakning med kamera**



19



20

KTH  
ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

## Exempel 1 Bro över Skidträskån

CIR-dagen 2011 21

KTH  
ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

## Skidträskån

Bron över Skidträskån

- Fritt upplagd, 36 m spännvidd
- Samverkansbro
- Ballasterad
- Trafikeras av bl.a. stålpendeln

Syfte

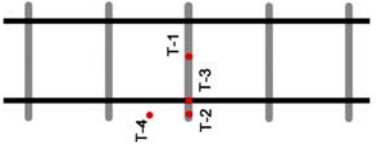
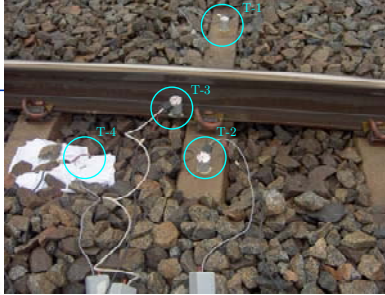
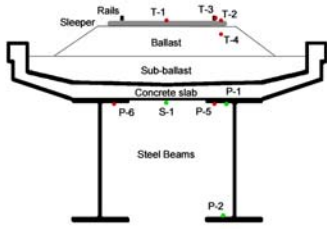
- Instrumentera för långtidsövervakning av temperatur, töjningar, accelerationer & taglaster
- Utveckla & testa *Twim* & *BRAVE*

Mätperiod  
nov 2005 – dec 2006



CIR-dagen 2011 22

KTH  
ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY



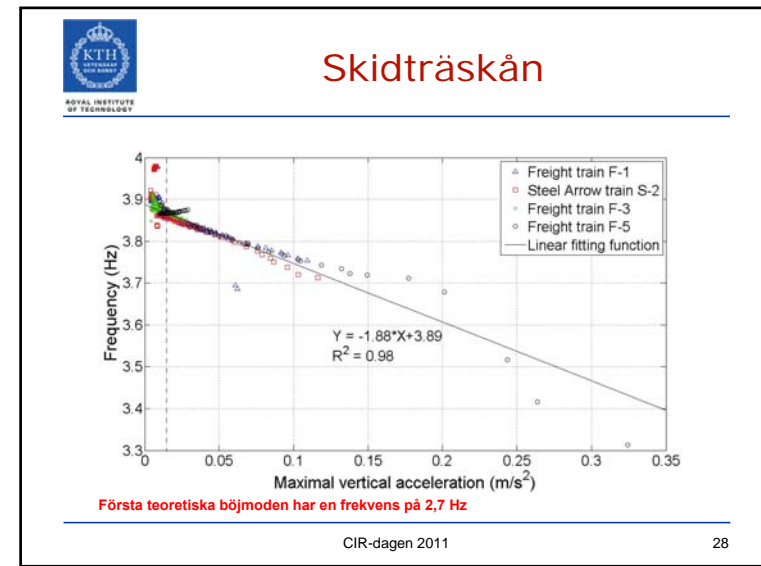
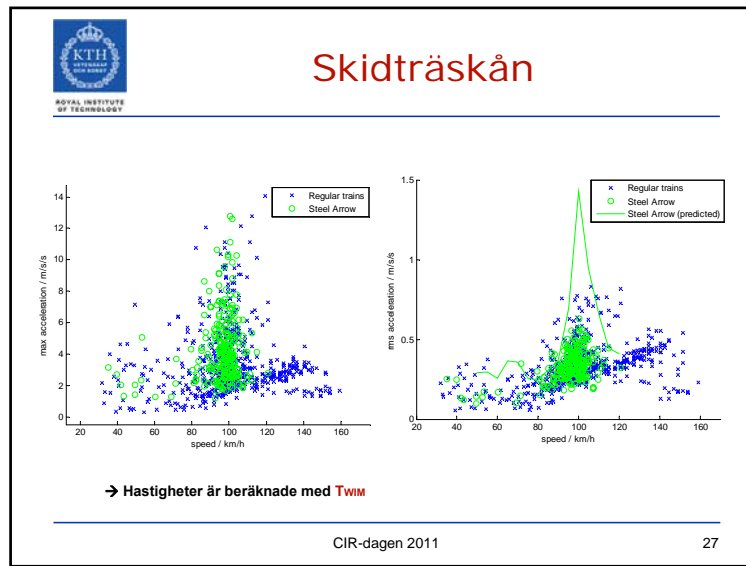
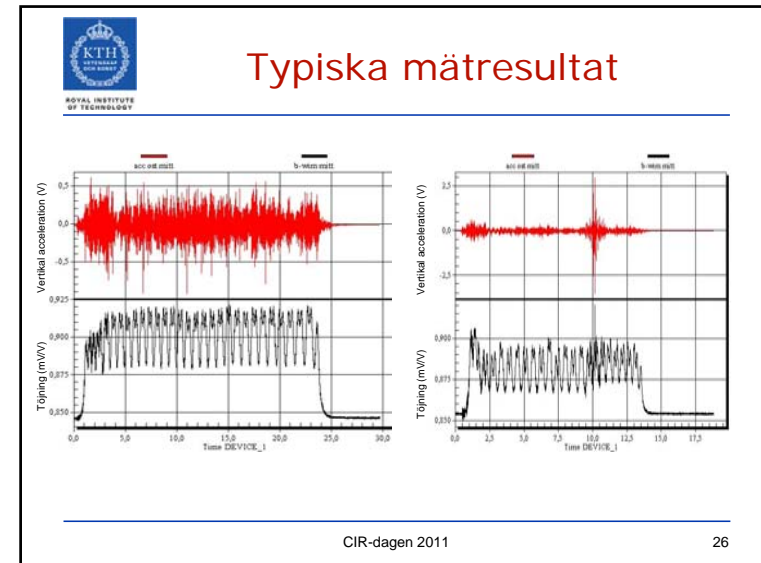
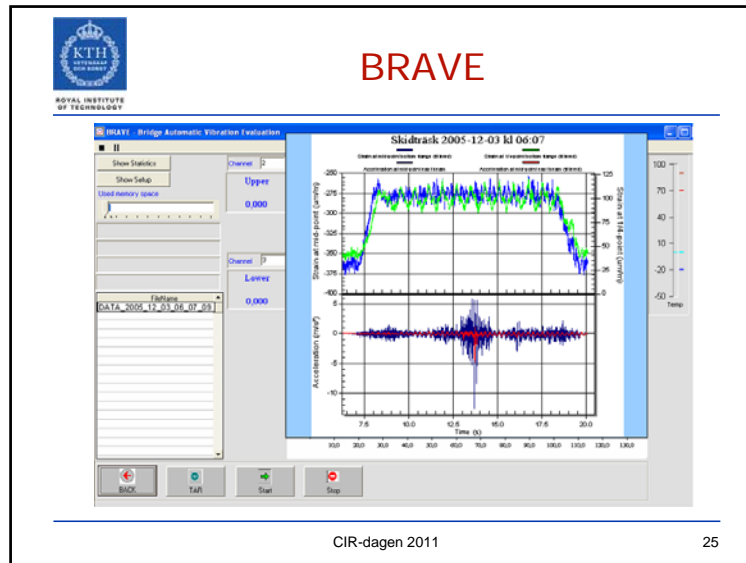
CIR-dagen 2011 23

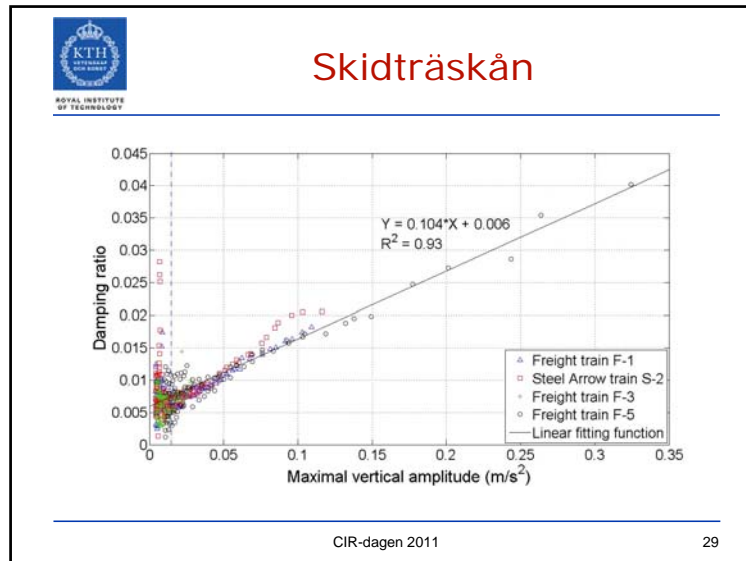
KTH  
ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

## Skidträskån



CIR-dagen 2011 24





- Skidträskån**
- Höga broaccelerationer uppmättes dock ej pga. resonans
  - Bron är mycket styvare än antagits (extra styvhet från spåret + mer gynnsamma randvillkor)
  - Dämpkvoten borde väljas högre än den som anges i normen (för resonansberäkning)
  - Frekvens och dämpning är starkt amplitudberoende (orsak: ballast, grundläggning, sprickor i btg, friktion i lager)
- CIR-dagen 2011 30

**Exempel 2**  
**Bron över Norra Kungsvägen**  
**Hörnefors, Botniabanan**

Inverkan av upplagens styvhet

CIR-dagen 2011

**Bro över Norra Kungsvägen**

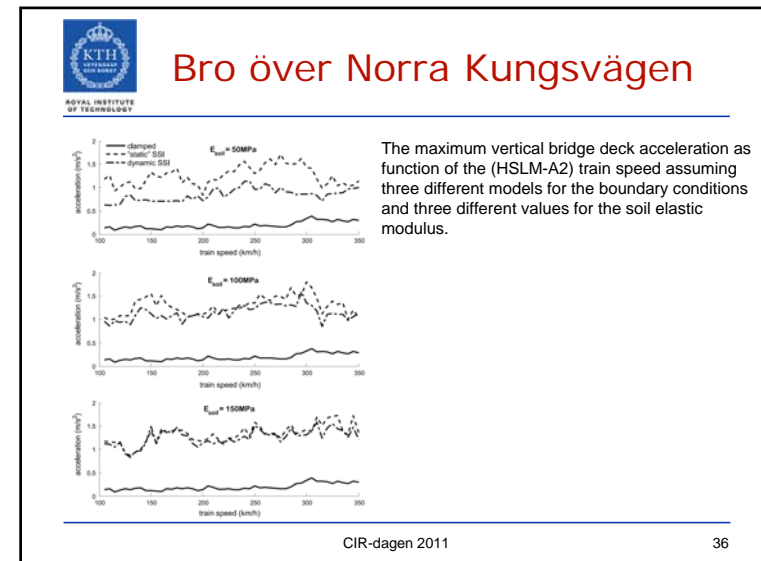
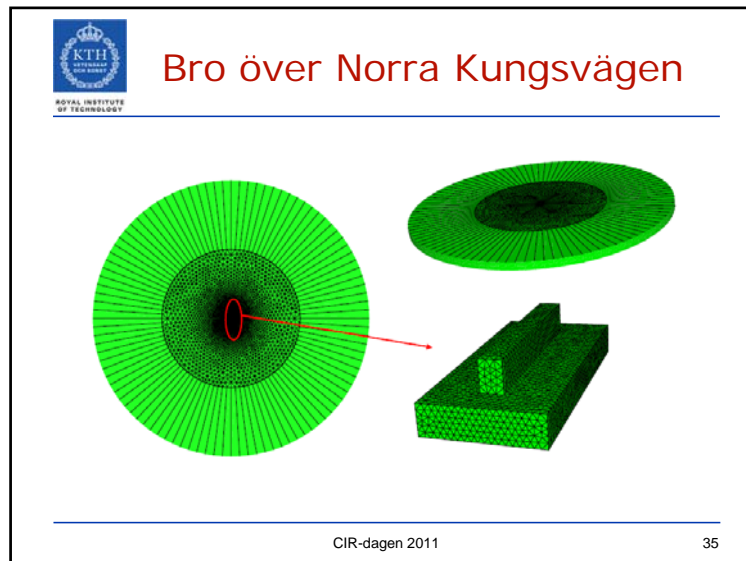
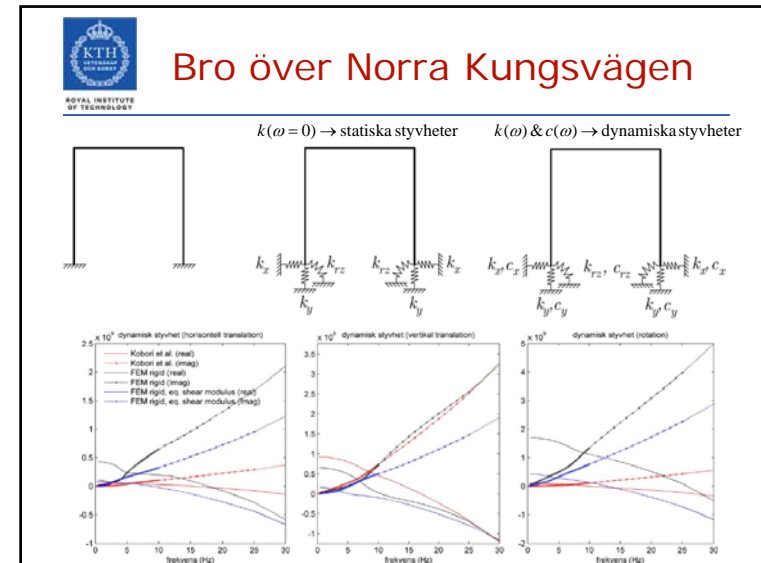
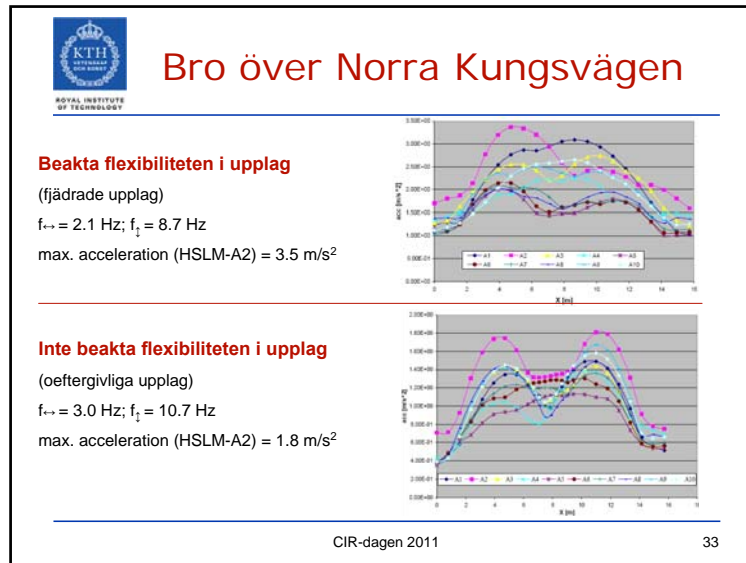
Plattrambro, Spännvidd ~15 m, grundlagd på pålar

Projekt genomförs i samarbete med Costin Pacoste på ELU. Doktoranden Mahir som är till hälften finansierad av Tyréns arbetar med projektet.

Första svängningsmod är longitudinell

CIR-dagen 2011 32







KTH  
ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

## Exempel 3

### Rörbroar i korrugerat stål

(projekt finansierade av Viacon och Trafikverket)

CIR-dagen 2011 38

KTH  
ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

## Rörbroar i korrugerat stål


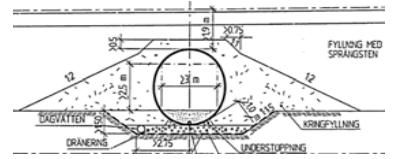

- Målsättning
  - Undersöka verkningsätt hos rörbroar (dynamik, lastfördelning...)
  - Bättre beräkningsmodeller för rörbroar (avseende påkänning)
  - Undersöka om rörbroar är lämpliga för tåg i höga farter
- Metodik
  - Fältmätningar (nedböjning, töjning, acceleration)
  - FE-analyser (2D/3D, statiskt och dynamiskt)

CIR-dagen 2011 39

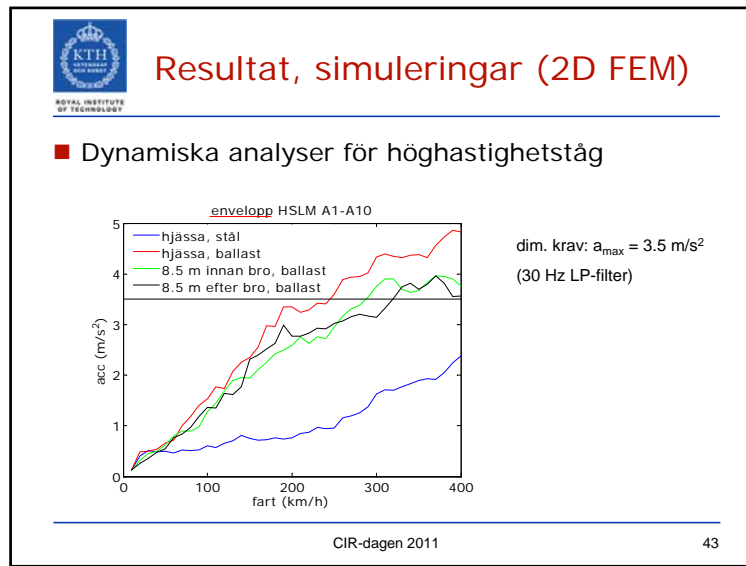
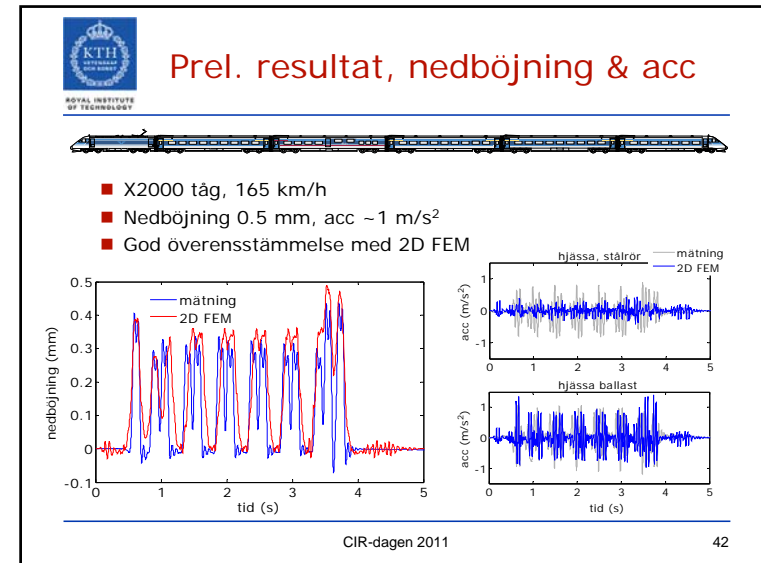
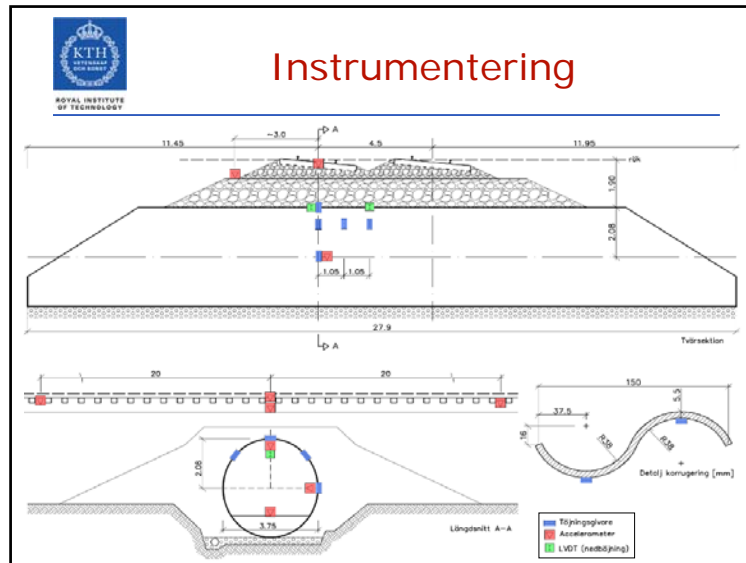
KTH  
ROYAL INSTITUTE  
OF TECHNOLOGY

## Fallstudie, rörbro i Märsta

- Geometri
  - Dubbelspårig järnvägsbro
  - Elliptiskt tvärsnitt,  $b = 3.75$  m,  $h = 4.15$  m
  - Fyllnadshöjd 1.7 m, längd 28 m
- Instrumentering
  - 12 töjningsgivare
  - 6 accelerometrar
  - 2 förskjutningsgivare (LVDT)




CIR-dagen 2011 39





## Pågående forskning på avd. för Brobyggnad KTH

CIR-dagen 2011 45



## Pågående forskning (doktorander/forskare som arbetar med järnvägsbroar)

**Andreas Andersson** (KTH/Trafikverket)  
Capacity assessment of existing bridges – case study on the old Årsta railway bridge


**John Leander**  
Enhanced assessment of the remaining service life of steel railway bridges

**Merit Enckell** (KTH/COWI)  
New monitoring techniques for bridge assessment

**Ignacio González**  
Monitoring systems for increased safety and improved operation and maintenance of railway bridges

**Christoffer Johansson** (KTH/ELU)  
Dynamic behavior of bridges subjected to high speed train

CIR-dagen 2011 46



## Pågående forskning (doktorander/forskare som arbetar med järnvägsbroar)

**Jean-Marc Battini & Yonming Tu**  
Ballast behavior and track-bridge interaction (postdoc project)


**Guangli Du & Mohammed Safi**  
LCC and LCA of railway bridges

**Mahir Ülker** (KTH/Tyréns)  
Soil-bridge interaction and its influence on the response to passing trains

**Joakim Wallin** (KTH/ELU)  
System identification and FE-model updating for increased accuracy in dynamic simulations (Strengthening of railway bridge and its impact on the dynamic response to passing trains)

**Therese Arvidsson & Johan Wiberg**  
Train-bridge interaction

CIR-dagen 2011 47



## Resultat från Christoffers parameterstudier

### Designkurvor

#### B.1 Acceleration, fritt upplagd balk

Accelerationen för en fritt upplagd balk kan beräknas med Ekv. (B.1). Inverkan av antalet fack kan tas med Ekv. (B.2).

$$A = \frac{B_r \cdot C_r \cdot (v_{tr} \cdot L_r \cdot \zeta)}{M} \quad (\text{m/s}^2) \quad (\text{B.1})$$

$$A_{\text{fack}} = D_r \cdot A_{\text{en fack}} \quad (\text{m/s}^2) \quad (\text{B.2})$$

**Fritt upplagd balk**

Det går att interpolera mellan intilliggande linjer i Figur A.1-A.6 och värden i Tabell B.1.

Tabell B.1: Aggressivitet för HSLM A1-A10 för olika dämpningar.

$\zeta$ [%]	0.5	1	1.5	2	2.5	3
$B_r$ [MN/m]	2.96	1.70	1.26	1.14	1.04	0.96

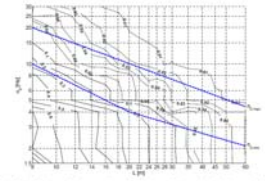


Figure B.1: Diagram för beräkning av  $G_r$  för en fritt upplagd balk med 0.3% dämpning, HSLM A1-A10, lasthastighet mellan 100 - 300 km/h.

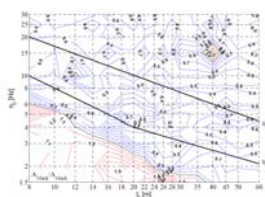
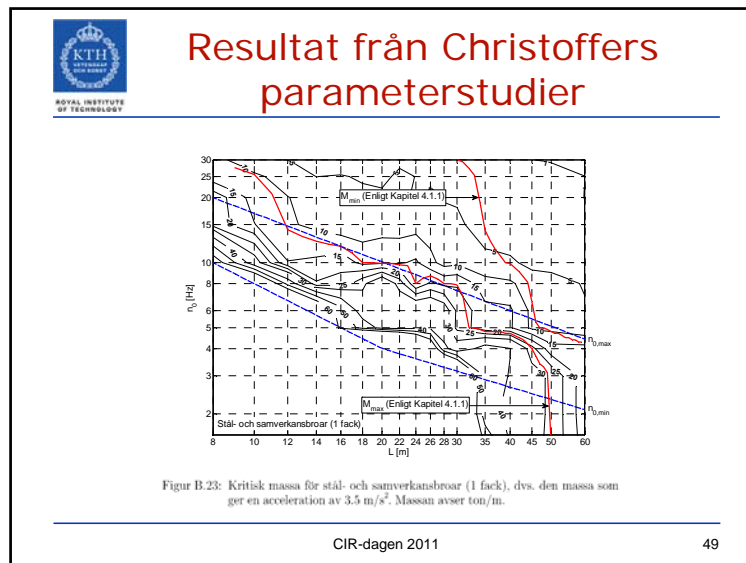


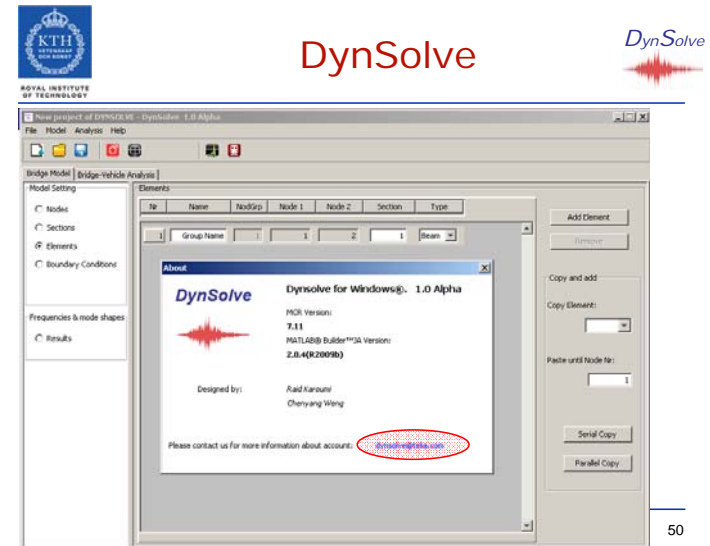
Figure B.2: Stiffnad i mass acceleration för fyrsprånadbro, HSLM A1-A10, lasthastighet mellan 100 - 300 km/h.

CIR-dagen 2011

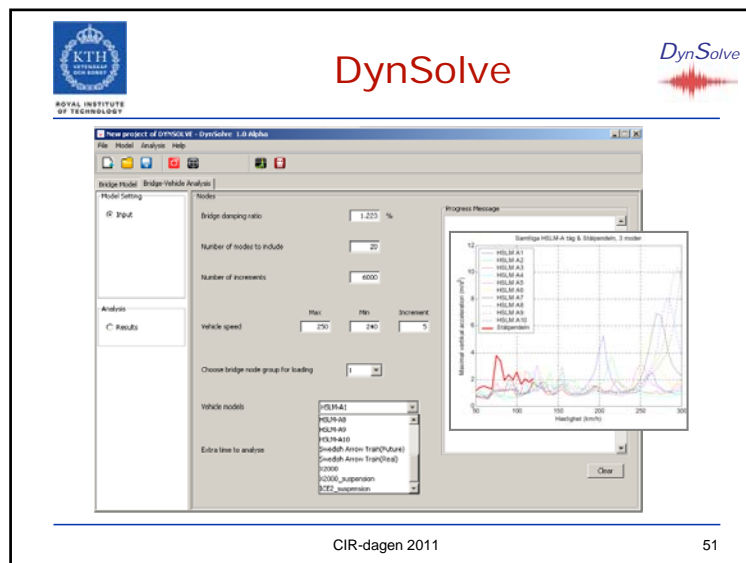


CIR-dagen 2011

49



50



CIR-dagen 2011

51


## Erfarenheter & rekommendationer

erfarenheter från analyser

- Börja alltid med en enkel modell och gör en parameter- & konvergensstudie. Kontrollera konvergens för förskjutningar, moment och accelerationer.
- Alla punkter längs en bro bör undersökas. Max respons kan vara vid olika punkter för olika hastigheter och olika tåg.
- Kravet på max acceleration är oftast avgörande.
- Upplagens styvhet har en stor inverkan på brons respons. Att anta oeftergivliga stöd är inte alltid på säkra sidan.
- Broar med ett spann är generellt mer känsliga än broar med flera kontinuerliga spann.
- Betongbroar tros vara lämpligare än samverkansbroar för tåg i höga hastigheter. (pga. låg massa och dämpning)

CIR-dagen 2011

52



## Erfarenheter & rekommendationer

erfarenheter från mätningar

---

- Mycket styvare broar i verkligheten (högre frekvenser). Orsak: starkare betong, extra styvhet från spåret, mer gynnsamma randvillkor mm.
- Mätningar har visat på höga broaccelerationer (> > normens gränsvärde) dock inträffar dessa ej pga. resonans utan beror ofta på dåliga hjul mm.
- Mätningar har visat att frekvens och dämpning är starkt amplitudberoende. Orsak: inverkan av ballast & grundläggning, sprickor i betongen och friktion i lager.
- Mätningar ger användbara resultat som kan utnyttjas vid kontrollberäkning av befintliga broar (mätningar ger uppgifter om verkliga upplagsstyvheter, randvillkor, frekvenser, dämpkvoter mm.)
- Vid kalibrering av beräkningsmodell baserat på mätningar ska man iakttä stor försiktighet då det inte räcker med en enkel justering av E-modul utan det oftast krävs även modifiering av upplagsvillkor/randvillkor mm.

---

CIR-dagen 201153

