

# En preliminär studie av brolagers dynamiska egenskaper

Sammanfattning av delresultat

Mahir Ülker-Kaustell

CIR-dagen 2017



TRAFIKVERKET



TYRÉNS

# Översikt

## Bakgrund

Resonanseffekter hos järnvägsbroar

Motivation

Stål-PTFE

## Projektbeskrivning

### Laboratorieförsök

Försökuppställning

Försöksresultat

### Teoretisk modellering av brolager

3D simuleringar

Makro-element

## Slutsats

## Resonanseffekter hos järnvägsbroar

Förekomsten av resonanseffekter under tågpassager på järnvägsbroar styrs primärt av:

- De första modernas egenfrekvenser.
- De första modernas dämpkvoter.

Egenfrekvenserna styr de kritiska tågfarter  $v_{cr}$  vid vilka reonanseffekterna uppträder

$$v_{cr} \sim f_n L \quad (1)$$

här är  $f_n$  en egenfrekvens hos strukturen och  $L$  en karaktäristisk längd hos lastsystemet.

Dämpkvoterna  $D_n$  styr maxamplituden  $A_{max}$  vid resonans

$$A_{max} \sim \frac{1}{2D_n}. \quad (2)$$

# Motivation

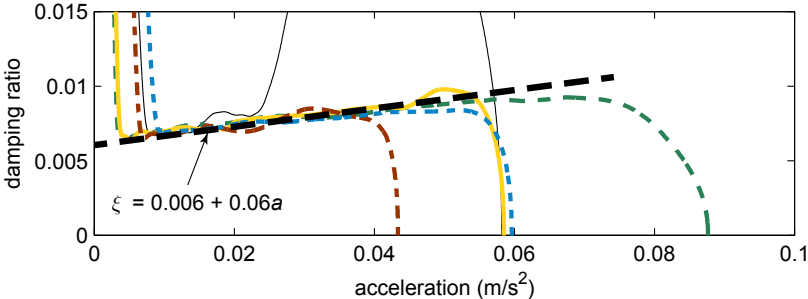
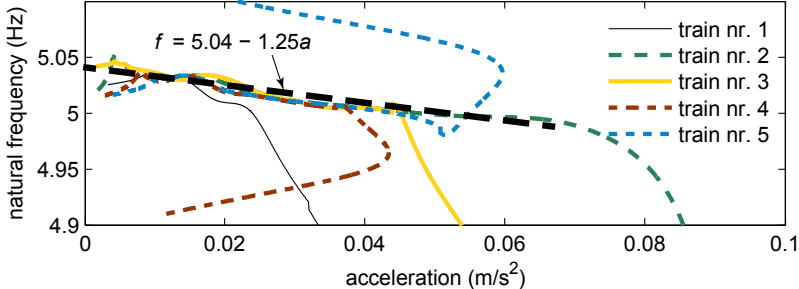
Flera studier visar att de dynamiska egenskaperna hos vanligt förekommande brotyper beror av svängningsamplituden:

- Rebelo et al. [1] visade t.ex., genom studier av fria svängningar efter tågpassager, att grundmodens egenfrekvens hos en fritt upplagd plattbro av betong minskar med ökande svängningsamplitud.
- Ülker-Kaustell & Karoumi [2] vidareutvecklade denna studie genom att inkludera dämpningskvotens variation med svängningsamplituden. Dessa studier visade att dämpningskvoten ökar med ökande svängningsamplitud.
- Ülker-Kaustell [3] tillämpade samma metodik på ytterligare broar och fann samma kvalitativa beteende.

# Motivation



# Motivation



# Motivation

För vissa broar gäller alltså att:

- Egenfrekvenserna minskar med ökande svängningsamplitud
- Dämpkvoterna ökar med ökande svängningsamplitud

Detta får följd effekter både vid utvärdering av de dynamiska egenskaperna hos befintliga broar och vid utformning av nya broar.

Forskningen inom detta fält söker alltså att uppfylla följande övergripande målsättning:

## Mål: Övergripande målsättningar

1. Identifiera källorna till dessa effekter.
2. Kvantifiera dess inverkan på dynamiska analyser av järnvägsbroar.
3. Definiera bedömningskriterier för när dessa effekter är relevanta.

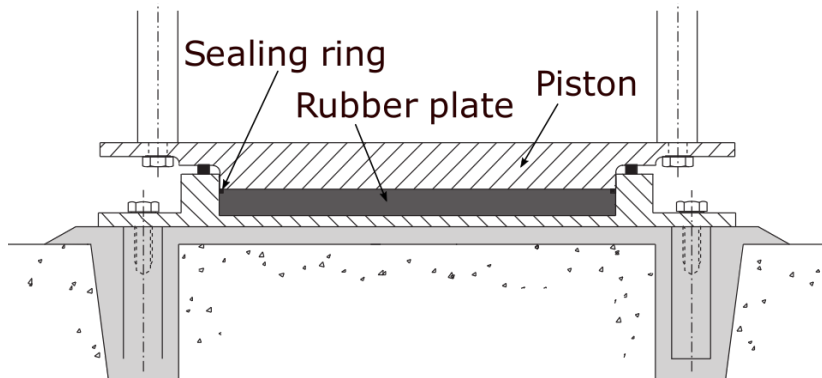
# Motivation

Flera fenomen kan tänkas ligga bakom de observationer som gjorts:

- Armerad betong
- Jord-struktur interaktion
- Banöverbyggnaden
- Friktion i skruvförband
- **Friktion i brolager**
- ...



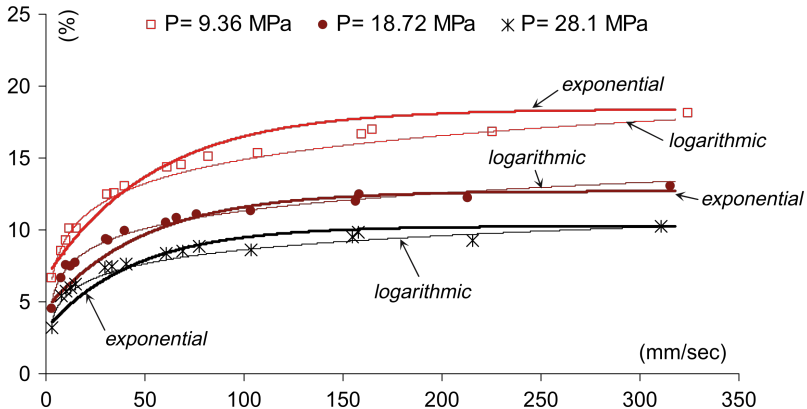
# Pottlager



# Stål-PTFE

Friktionskoefficienten hos stål-PTFE kontakter beror av [4]

- Glidhastighet
- Kontaktryck
- Temperatur



# Projektbeskrivning

Denna förstudie omfattar följande tre delar:

1. Laborrietester.
2. Modellutveckling.
  - a. Modeller baserade på Bouc-Wen-modellen [6].
  - b. 3D FE-modeller av hela lager.
3. Validering genom (befintliga) fullskaleförsök på verkliga broar.
  - a. Tågpassager.
  - b. Laststyrda tester med känd last.

# Projektbeskrivning - lägesrapport

1. Laborrietester. Skarpa tester utförs nu. Testerna kommer att slutföras under vintern 2016-2017.
2. Modellutveckling. Inkludera en mer detaljerad friktionsmodell för stål-PTFE
  - a. Modeller baserade på Bouc-Wen-modellen. Generalisering av den klassiska Bouc-Wen modellen till att inkludera Constantinou's [5] friktionsmodell för stål-PTFE med data från Dolce et al. (2005) [4].
  - b. 3D FE-modeller av hela lager. Lämpliga konstitutiva modeller för naturgummi och PTFE studeras.
3. Validering genom (befintliga) fullskaleförsök på verkliga broar.
  - a. Tågpassager.
  - b. Laststyrda tester med känd last. Två broar har studerats av KTH/Brobyggnad i andra sammanhang: Pershagen och Aspan.

# Försökuppställning

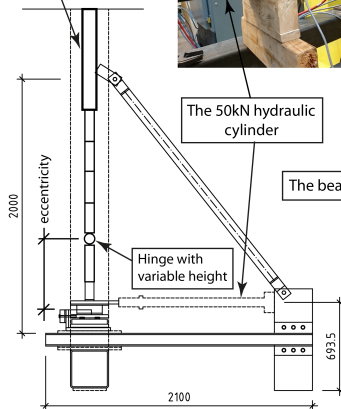


The 250kN hydraulic cylinder



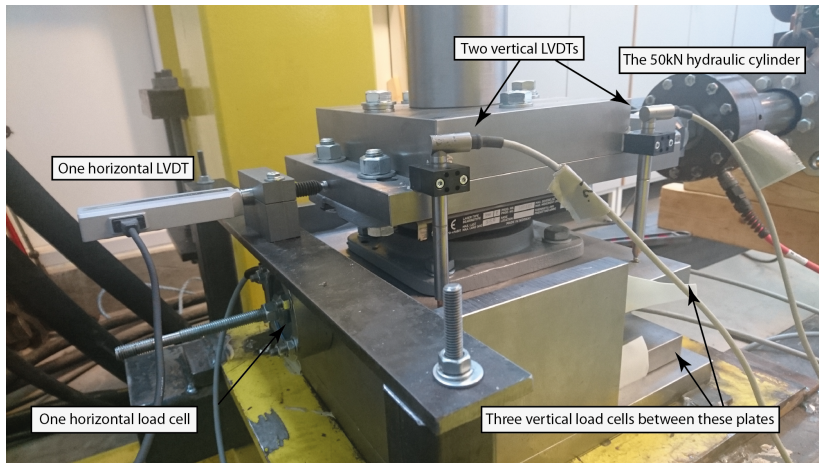
The 50kN hydraulic cylinder

The bearing

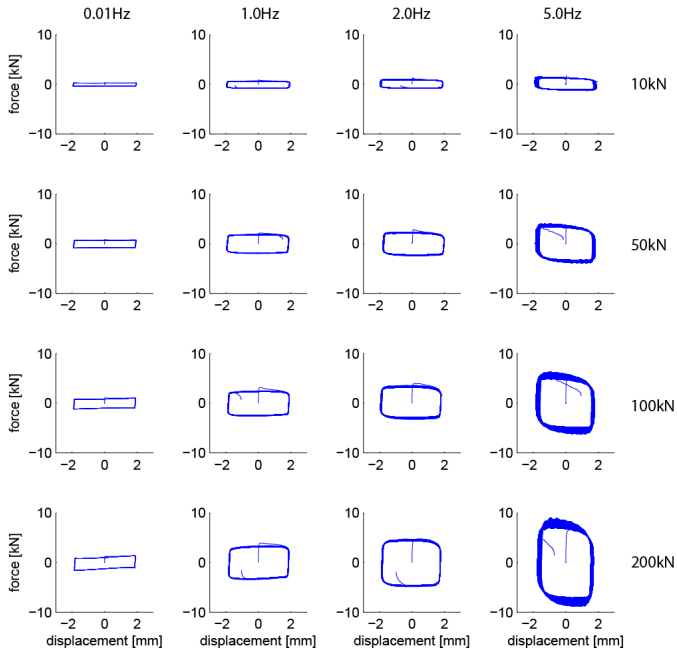


All measures are in mm

# Försöksuppställning - Instrumentering



# Försöksresultat



## 3D simuleringar

Simuleringar av lagermekanismer kan användas för att:

- Förbättra vår förståelse för lagermekanismerna.
- Studera andra dimensioner, tekniska detaljlösningar och lagertyper.
- Verifiera makro-elementet för parameteruppsättningar som vi inte har testat fysikaliskt.

Därmed kan storlekseffekter studeras varmed motsvarande tester på större lager skulle kunna utföras med hjälp av simuleringar.

Det finns dock storlekseffekter som är kopplade till det värme som friktionen ger upphov till [7].

För närvarande arbetar vi dock med att simulera de standardiserade tester (enligt SS-EN 1337) som utförs på pottlager parallellt med de dynamiska tester vi utför själva.



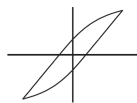
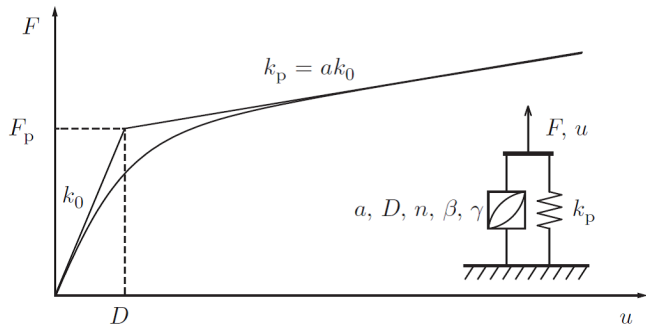
# Makro-element

Utvecklingen av ett makro-element som beskriver lagermekanismen består av följande delar:

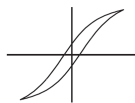
1. Den klassiska Bouc-Wen-modellen [6].
2. Friktionsmodell.
3. Koppling mellan vertikal last (kontakttryck) och horisontell rörelse/friktion.

Modellerna utvecklas i Matlab och implementeras som användardefinierade element i ABAQUS.

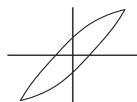
# Bouc-Wen-modellen



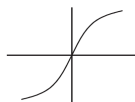
$$\beta = \gamma = 0.5$$



$$\beta < \gamma$$



$$\beta > \gamma$$

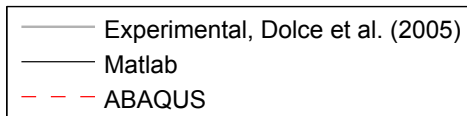
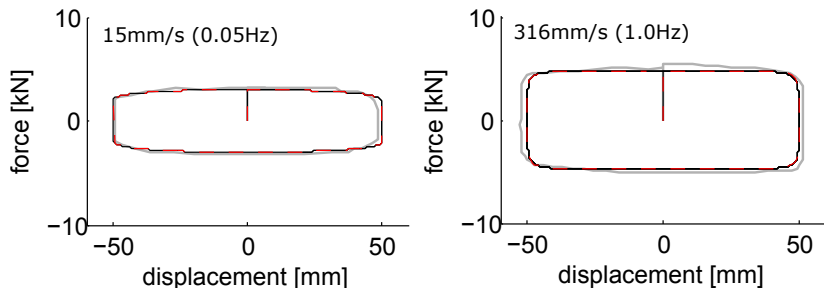


$$\beta = 0, \gamma = 1$$

## Bouc-Wen-Dolce-modellen

Vår generalisering av Bouc-Wen-modellen består i princip i att beskriva den plastiska gränsförskjutningen  $D$  med hjälp av friktionskraftens parametrar som beror av glidhastigheten  $v$  och kontaktrycket  $p$ .

$$D(v, p) = \frac{F_P}{k_0} = \frac{\mu(v, p) \cdot A_{\text{PTFE}} \cdot p}{k_0}$$



# Slutsats

Projektet har till dags dato:

1. Utformat, byggt och testat en testrigg för små pottlager.
2. Utfört delar av de tester som planerats.
3. Implementerat en friktionsmodell för stål-PTFE i ABAQUS.
4. Utvecklat en generaliserad Bouc-Wen-modell som inkluderar friktionsmodellen.
5. Implementerat den generaliserade Bouc-Wen-modellen i Matlab och ABAQUS.
6. Påbörjat utvecklingen av ett makro-element baserat på den generaliserade Bouc-Wen modellen.
7. Till stora delar implementerat makro-elementet i ABAQUS.
8. Till stora delar utvecklat 3D-modeller av pottlager i ABAQUS.

# Slutsats

Det arbete som kvarstår inom detta projekt är:

1. Slutföra laborietesterna.
2. Testa, färdigställa och dokumentera makro-elementet.
3. Verifiera makro-elementet mot alla försöksförhållanden.
4. Rapportera testerna (teknisk rapport + ev. tidskriftsartikel), delar av utvecklingsprocessen (1-2 tidskriftsartiklar) och makro-elementet (tidskriftsartikel).

## Fortsatt arbete

Använda 3D-simuleringar och/eller fullskaleförsök för att utvärdera de storlekseffekter som kan tänkas finnas.

Om storlekseffekterna befinns vara tillräckligt små kan man validera makro-elementet genom simuleringar av tågpassager och laststyrda tester på ett större antal verkliga broar av olika slag.

Annars måste man utföra försök på lager av, för broar, relevant storlek.

Andra lagertyper bör också utvärderas: sfäriska lager och "disklager" är vanligt förekommande internationellt sett och skulle kunna ge vissa fördelar jämfört med de pottlager som är vanligast i Sverige idag.

Tack för er uppmärksamhet!

# References I

- [1] C. Rebelo, L.S. da Silva and M. Pircher. Dynamic behaviour of twin single-span ballasted railway viaducts—field measurements and modal identification. *Engineering Structures*, 30(9):2460–2469, 2008.
- [2] M. Ülker-Kaustell and R. Karoumi. Influence of rate-independent hysteresis on the dynamic response of a railway bridge. *International Journal of Railway Transportation*, 1(4):237–257, 2013.
- [3] M. Ülker-Kaustell *Essential Modelling Details in Dynamic FE-analyses of Railway Bridges*. TRITA-BKN, Bulletin 120, 2013.
- [4] M. Dolce, D. Cardone and F. Croatto. Frictional behaviour of steel-PTFE interfaces for seismic isolation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 3:75–99, 2005.



## References II

- [5] M. Conastantinou, A. Mokha and A.M. Reinhorn. PTFE bearings in base isolation: modelling. *Journal of Earthquake Engineering*, 116(2), 455–472, 1990.
- [6] F. Ikhouane and J. Rodellar. *Systems with Hysteresis – Analysis, Identification and Control using the Bouc-Wen Model*. Wiley (2007).
- [7] G. Lomiento, N. Bonessio and G. Benzoni. Friction Model for Sliding Bearings under Seismic Excitation *Journal of Earthquake Engineering*, 17(8), 1162–1191, 2013.