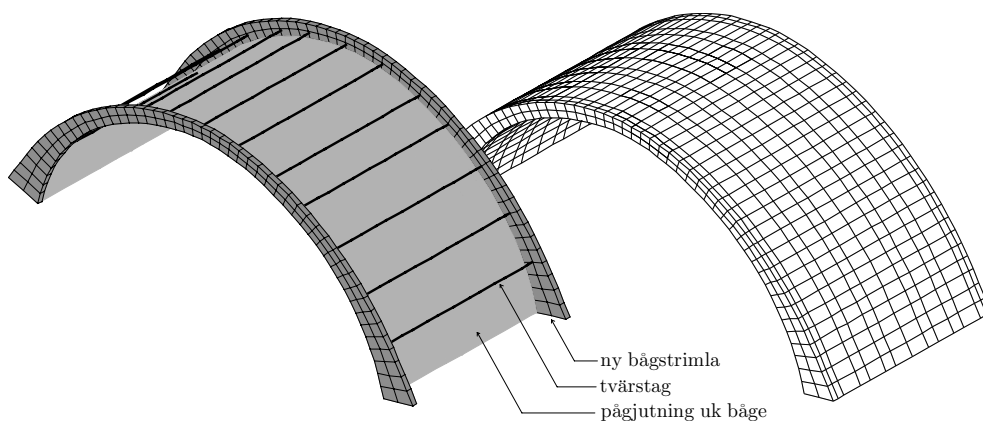




**KTH Architecture and  
the Built Environment**

# Gamla Årstabron

Några beräkningar inför fältmätningar 2007



---

*Brobyggnad*

**KTH** – Brinellvägen 34, SE-100 44 Stockholm

Tel: 08-790 79 58, Fax: 08-21 69 49

[www.byv.kth.se/avd/bro](http://www.byv.kth.se/avd/bro)

©Andreas Andersson 2007  
Royal Institute of Technology (KTH)  
Department of Civil and Architectural Engineering  
Division of Structural Design and Bridges  
Stockholm, Sweden, 2007

# Förord

Föreliggande rapport redovisar några beräkningar inför kommande fältmätningar på gamla Årstabrons betongvalv. Mätningarna ska utföras under förstärkningsarbetet med betongbågarna och avser båge 2 på bronns norra sida. Syftet med mätningarna är att verifiera bronns verkningssätt under samtliga förstärkningsetapper samt jämföra resultaten med tidigare upprättade beräkningsmodeller.

Några resultat från tidigare fältmätningar, utförda i juli 2005, redovisas tillsammans med motsvarande påkänningar i upprättade beräkningsmodeller. De kalibrerade beräkningsmodellerna har använts för att beräkna förväntade responser under förstärkningsarbetet. De beräknade responserna ska jämföras mot de nya mätningarna för att verifiera förstärkningens samverkan med den befintliga konstruktionen under brukslaster.

Stockholm i juli 2007



*Andreas Andersson*



# Sammanfattning

I denna rapport redovisas beräkningar av förväntade responser inför kommande fältmätningar av gamla Årstabron under förstärkning av betongbågarna. Resultaten baseras på en beräkningsmodell som är kalibrerad mot tidigare mätningar, utförda i juli 2005.

Förstärkningarna består av bortbilning och pågjutning av bågans kanter, vilka spänns ihop med tvärgående stag samt bortbilning och pågjutning av nytt armerat betongskikt på bågans undersida. Beräkningarna visar på ökade påkänningar i storleksordningen 10 – 20 % under förstärkning av bågans kanter, främst då material bilas bort från bågans första kant. Då bågans båda sidor är pågjutna är dessa verksamma under trafiklast. Tvärstagen synes inte ha någon märkbar inverkan på trafiklasten i ett brukstillstånd, men beräkningar redovisade i [2, 3] har visat att dessa är av stor betydelse i ett brottgränstillstånd. Då bågans undersida vattenbilas ökar påkänningarna ca: 10 – 20 % och som mest ca: 35 % jämfört med oförstärkt bro. Den procentuella ökningen på 35 % motsvarar dock en måttlig ökning uttryckt i spänning. I ett slutligt skede innebär förstärkningarna att nya pågjutningar är verksamma samtidigt som påkänningarna i den befintliga konstruktionen är i princip oförändrade för brukslaster.

Beräkningarna visar, likt tidigare fältmätningar, på små spänningar för de studerade lasterna. Syftet med kommande mätningar är att jämföra skillnaden i respons mellan olika förstärkningsetapper samt verifiera dessa mot beräkningarna. För att möjliggöra detta krävs mätningar med hög noggrannhet och tillräcklig upplösning. Brusnivåer och yttre störande signaler bör minimeras. Signalkvaliteten bör ej understiga den från tidigare mätningar.

Då mätningarna utförs under normal trafik, främst bestående av lättare pendeltåg, kommer resultaten att innehålla osäkerheter eftersom den yttre lasten inte är helt känd. Dock är många av dessa tåg relativt väldefinierade, främst de nya X60 pendeltågen, där en stor andel av lasten består av tågets egenvikt. Det är därför viktigt att registrera vilken typ av trafik som passerar bron under mätningarna för att minimera osäkerhet i yttre last.



# Innehållsförteckning

Förord	i
<b>Sammanfattning</b>	<b>iii</b>
<b>1 Inledning</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrund . . . . .	1
1.2 Syfte och omfattning . . . . .	1
<b>2 Fältmätningar</b>	<b>3</b>
2.1 Instrumentering 2005. . . . .	3
2.2 Instrumentering 2007. . . . .	5
2.3 Signalanalys av fältmätningar 2005 . . . . .	7
<b>3 FE-beräkningar</b>	<b>11</b>
3.1 Modellbeskrivning . . . . .	11
3.2 Kalibrering mot fältmätningar 2005 . . . . .	13
3.3 Beräkningar inför fältmätningar 2007 . . . . .	14
<b>4 Slutsatser</b>	<b>23</b>
4.1 Tidigare fältmätningar och beräkningar. . . . .	23
4.2 Förväntade resultat av nya fältmätningar 2007 . . . . .	23
<b>Litteraturförteckning</b>	<b>25</b>
<b>A Utvärderade resultat 2005</b>	<b>27</b>
<b>B Förväntade resultat 2007</b>	<b>31</b>





# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

Tidigare tillståndsbedömningar och skadeinventeringar [7, 8, 9] har uppvisat omfattande skador och systematiska försvagningar av brons betongbågar. Banverkets direktiv är att bron ska ha en återstående livslängd på minst 50 år med en trafiklast motsvarande STAX25.

Beräkningar för att bedöma betongbågarnas bärförmåga i brottgränstillstånd har utförts och återfinns i [2, 3]. För att verifiera beräkningsmodellen utfördes fältmätningar 2005, där brons respons av kända trafiklaster uppmättes med trådtöjningsgivare. Dessa mätningar har använts för att kalibrera beräkningsmodellerna, redovisade i [1]. Med antagna värden på material och randvillkor framgår att bron inte klarar en trafiklast motsvarande STAX25 utan förstärkning av betongbågarna. En systemhandling avseende reparation och förstärkning av betongbågarna har utarbetats av [10] och beräkningar avseende förstärkningarnas inverkan i brottgränstillstånd återfinns i [2, 3, 4].

För att verifiera att de förstärkningar som utförs överensstämmer med upprättade beräkningsmodeller är det nödvändigt att utföra nya fältmätningar, vilka ska genomföras under de olika förstärkningsetapperna. Ett mätprogram har utarbetats av [5], omfattande mätning av armeringstöjningar. Dessa mätningar är planerade att utföras under hösten 2007.

## 1.2 Syfte och omfattning

Föreliggande rapport syftar till att uppskatta storleken på de responser som kommer att mätas, baserat på mätprogrammet i [5]. Inverkan av förstärkningarna mäts som skillnaden i respons mellan förstärkt och oförstärkt bro. Tidigare mätningar har visat på små påkänningar, då det som mäts är trafiklaster i ett brukstillstånd. Kommande mätningar förväntas ge liknande responser, vilka främst syftar till att verifiera förstärkningarnas samverkan med den befintliga konstruktionen under brukslaster.

I kapitel 2 redovisas instrumentering från fältmätningarna utförda 2005 samt placering av givare för kommande mätningar. En analys av signalkvalitet utförs även.

I kapitel 3 beskrivs de beräkningsmodeller som har används för kalibrering av tidigare mätningar och som även används för att uppskatta responser under kommande mätningar.

I kapitel 4 sammanfattas några slutsatser kring utförda fältmätningar och beräkningar.

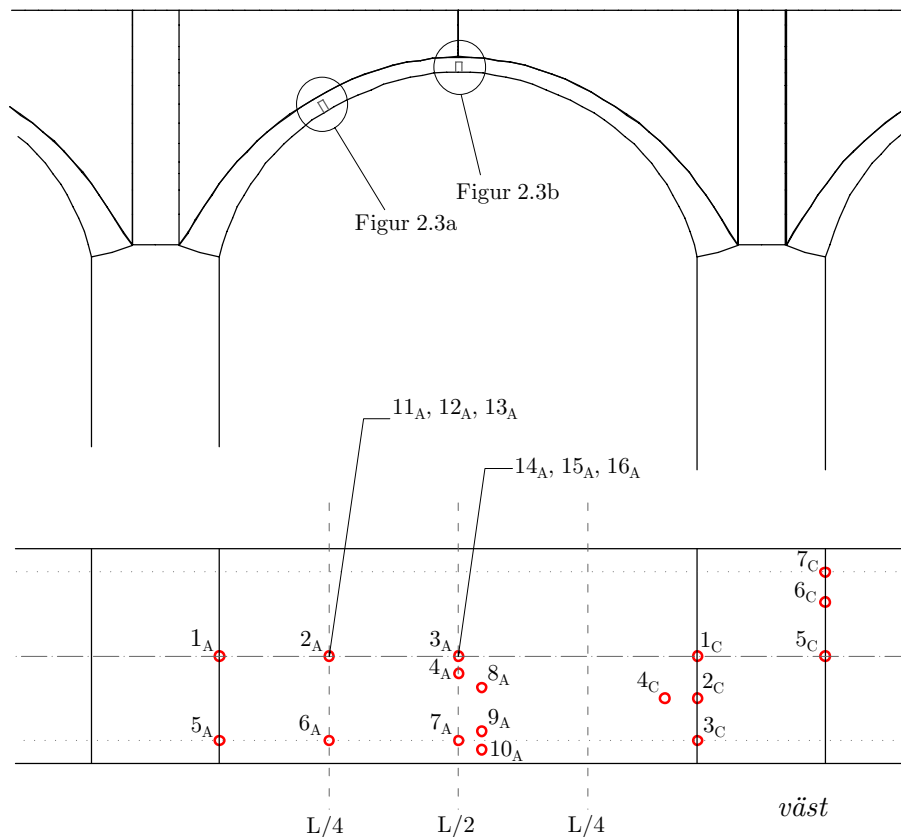


## 2 Fältmätningar

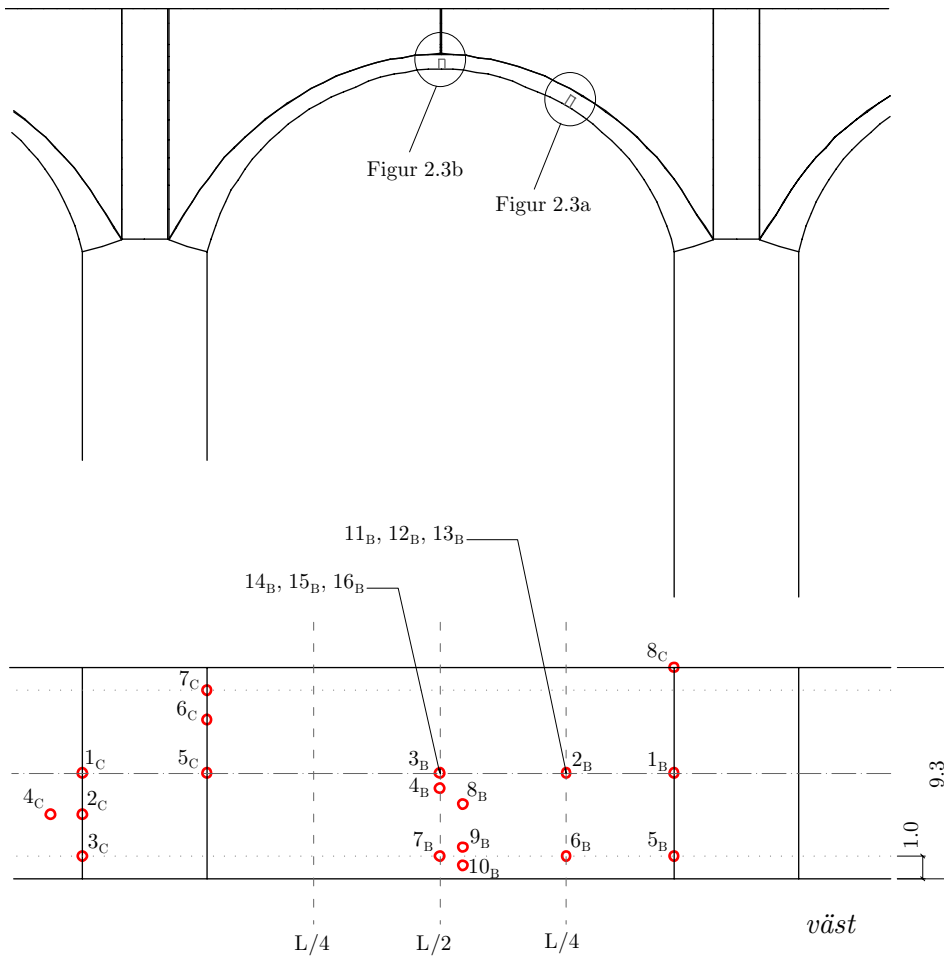
### 2.1 Instrumentering 2005

Fältmätningarna som utfördes under 2005 omfattade båge 2 och 3 på brons norra sida. Placering av givare redovisas i Figur 2.1 och Figur 2.2 och avser bågens undersida. Mätningarna utfördes med två separata mätsystem, Givare med index A och index B avser båge 2 respektive båge 3 med mätsystem från KTH Brobyggnad. Mätning med givare A och B utfördes ej samtidigt. Givare med index C tillhörde mätsystem från Carl Bro och användes vid samtliga mätningar. Signaler från givare A och B samlades in med en förstärkare (A/D omvandlare) av typ *MGCplus* med 24 bits upplösning. Givare C samlades in med förstärkare av typ *Spider8* med 16 bits upplösning.

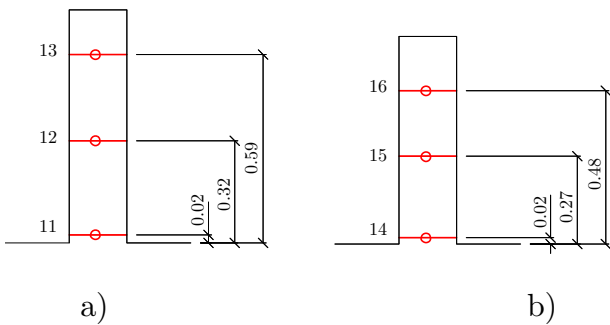
Av KTH:s mätsystem mätte givare 1 - 3 och 5 - 7 betongtöjningar, givare 4 samt 8 - 10 armeringstöjningar och givare 11 - 16 längdändringar i betongen med LVDT (Linear Voltage Differential Transformer). LVDT-givarnas placering återfinns i Figur 2.3a och Figur 2.3b. Samtliga av Carl Bro:s givare mätte töjningar på längsgående armering på bågens undersida.



Figur 2.1: Instrumentering av båge 2 under fältmätningar 2005.

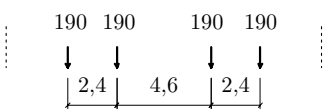


Figur 2.2: Instrumentering av båge 3 under fältmätningar 2005.



Figur 2.3: Instrumentering av LVDT-givare i borrhål vid a) fjärdedelspunkt, b) hjässa.

Mätningar utfördes för känd trafiklast bestående av två diesellok med 19 tons axeltryck, se Figur 2.4. Dieselloken körde parallellt på varsitt spår i ca: 5 km/h. Exempel på uppmätta signaler återfinns i Bilaga A.



Figur 2.4: Diesellok GCT44, 190 kN/axel.

## 2.2 Instrumentering 2007

Instrumentering under förstärkning av båge 2 redovisas i Figur 2.5 och Figur 2.6, vilka baseras på mätprogram framtaget av [5]. Samtliga givare kommer att mäta armeringstöjningar och placeras i hjässa, fjärdedelspunkt och anfang på båge 2. Givare med index 1 respektive index 2 utgår respektive tillkommer under olika förstärkningsetapper, resulterande i totalt 5 olika mätuppställningar enligt följande:

### Mätuppställning 1,

*avser oförstärkt båge samt under och efter det att bågens första kant har bilats bort*

- givare 1 – 10, 11<sub>1</sub> – 12<sub>1</sub> mäter töjning på längsgående armering, givare 13<sub>1</sub> – 16<sub>1</sub> mäter töjning på tvärgående armering.

### Mätuppställning 2,

*avser skede då bågens första kant har återgjutits med ny bågstrimla samt under och efter det att bågens andra kant har bilats bort*

- givare 13<sub>1</sub> och 14<sub>1</sub> utgår och ersätts med givare 13<sub>2</sub> och 14<sub>2</sub> som mäter töjning på längsgående armering i ny bågstrimla.

### Mätuppställning 3,

*avser skede efter det att bågens andra bågstrimla har återgjutits*

- givare 11<sub>1</sub> och 12<sub>1</sub> utgår och ersätts med givare 11<sub>2</sub> och 12<sub>2</sub> som mäter töjning på längsgående armering i den andra bågstrimlan.

### Mätuppställning 4,

*avser skede efter det att tvärstagen har monterats samt innan och under vattenbilning av bågens undersida*

- givare 15<sub>1</sub> och 16<sub>1</sub> utgår, ersätts med givare 15<sub>2</sub> och 16<sub>2</sub> som mäter töjning på tvärgående spännstag.

### Mätuppställning 5,

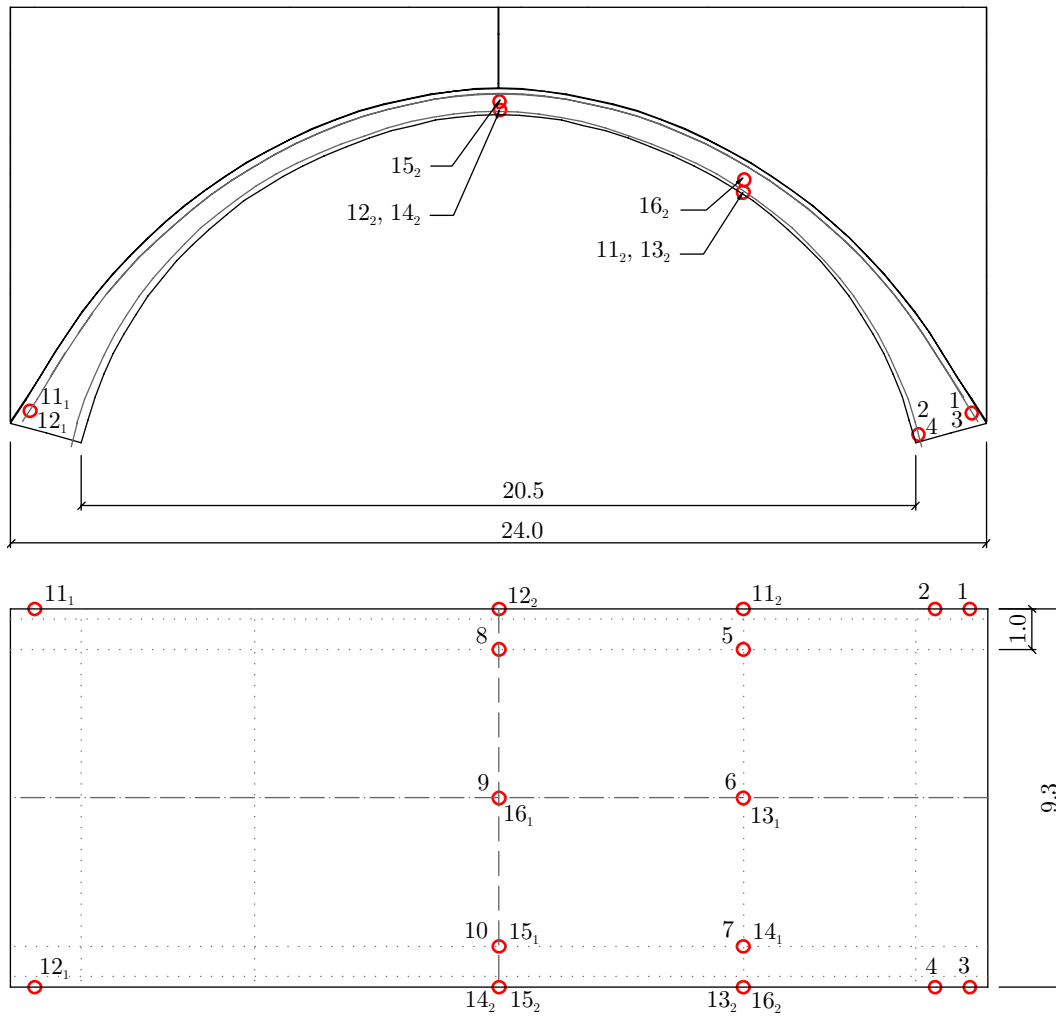
*avser skede då förstärkningarna är slutförda*

- givare 5 – 10 utgår och ersätts med nya givare på samma position på längsgående armering på ny pågjutning undersida båge.

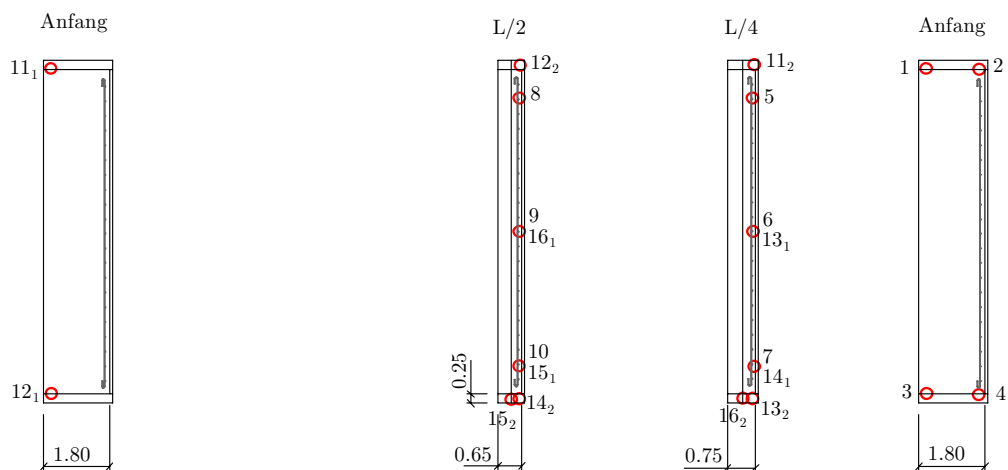
Mätningarna avser, likt mätningar utförda 2005, respons av trafiklaster. Endast relativmätningar kommer att utföras varvid förändring av permanent last ej registreras. Trafiklasten kommer att utgöras av aktuell trafik vid tidpunkten för mätningarna, vilken främst utgörs av pendeltågstrafik. Ingen separat registrering eller mätning av faktiska axellaster kommer att göras.

Utöver töjningsmätningar kommer ett antal mätdubbar och avvägningsprismor monteras.

## 2. FÄLTMÄTNINGAR



Figur 2.5: Instrumentering av båge 2 inför kommande fältmätningar 2007.



Figur 2.6: Placering av givare i tvärsnitt vid anfang, fjärdedelspunkt och hjässa.

## 2.3 Signalanalys av fältmätningar 2005

De uppmätta signalerna har filtrerats för att ta bort brus och ev. dynamiska tillskott, så att endast den statiska responsen återstår. KTH-signalerna mättes med samplingsfrekvensen 50 Hz och Carl Bro givarna med 10 Hz. Samtliga signaler har filtrerats med ett 6:e ordningens Butterworth lågpas filter i MATLAB® [6]. Cutoff frekvensen valdes till 0.2 Hz men beror på tågets hastighet. Den filtrerade signalen jämförs med den ofiltrerade, se Figur 2.7 och Figur 2.10, för att kontrollera att form och amplitud inte ändras vid filtrering. Då de två dieselloken passerar bron i ca: 5 km/h är ev. dynamiska effekter små och om differensen mellan den filtrerade och ofiltrerade signalen endast består av gausiskt brus bör detta vara normalfördelat. En jämförelse visas nedan mellan givare 5<sub>A</sub> och 3<sub>C</sub>, placerade på motstående sidor av anfanget till bäge 2. Givare 5<sub>A</sub> mäter betongtöjningar och 3<sub>C</sub> mäter armeringstöjningar. Signalen studeras i frekvensdomän för att identifiera ev. elektriska störningar, vid t.ex. 50 Hz och 16<sup>2</sup>/<sub>3</sub> Hz. Signalen studera även i tidsdomän, där signalkvaliteten, eller brusinnehållet, analyseras med statistiska moment enligt Ekv. (2.1)

$$M_n = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^n \quad (2.1)$$

där  $M_1$  är det aritmetiska medelvärdet,  $\sqrt{M_2} = \sigma$  är standardavvikelsen,  $x_{\max}/\sigma$  är det *s.k.* crest-värdet,  $M_3/\sigma^3$  är skevheten och  $\sqrt{M_4}/\sigma^4$  är det *s.k.* kurtosis-värdet. Crest-värdet, även kallad toppfaktor, är ett mått på fördelningens form, vilken för en normalfördelning bör vara ca: 5. Skevheten är ett mått på hur symmetrisk fördelningen är, vilken bör vara noll. Brussignalen bör även ha väntevärdet noll. Kurtosis-värdet är ett mått på hur sannolika extrema utfall är för fördelningen och en perfekt normalfördelning har kurtosis = 3. Kurtosis större än 3 ger en fördelningen med en hög smal topp kring medelvärdet samt höga svansvärden. Från mätningar med likvärdiga signaler bör alla kanaler ge samma kurtosis.

Figur 2.7 och Figur 2.10 visar en passage med de två dieselloken och de första 2 minuterna är tågets inverkan liten. Maximal respons fås vid tiden 210 s och en tydlig skillnad i brusnivå kan urskiljas i Figur 2.8 före och efter denna punkt. Differensen kan bero på dynamiska effekter från loken. Brusnivån i Figur 2.11 ser något annorlunda ut, sannolikt *p.g.a.* förstärkarens upplösning vid A/D omvandling. Givare 5<sub>A</sub> är samplad med 24 bits upplösning och givare 3<sub>C</sub> med 16 bits upplösning. Skillnaden mellan 16 bit och 24 bit är en faktor 16. Detta innebär för givare 3<sub>C</sub> en noggrannhet på ca: ±0.04 MPa i armeringen. Då max responsen är ca: 0.6 MPa för givare 3<sub>C</sub> ger det en relativ osäkerhet på ca: ±7 % på maxvärdet. Givare 5<sub>A</sub> har en motsvarande osäkerhet på ca: ±0.4 %. De statistiska momenten för givare 5<sub>A</sub> och 3<sub>C</sub> återfinns i Tabell 2.1.

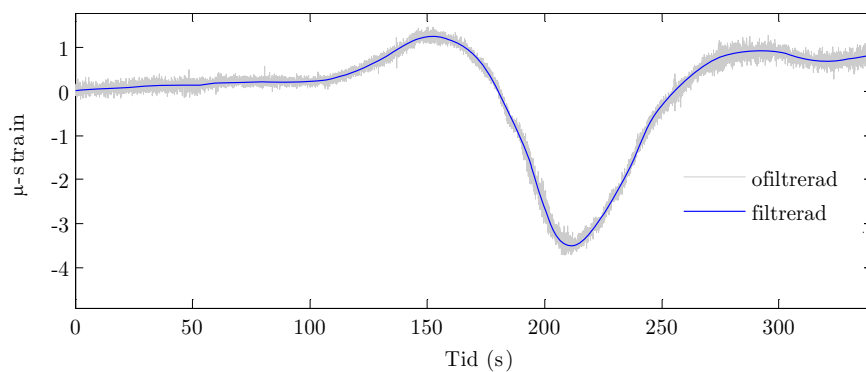
Tabell 2.1: Jämförelse av statistiska moment för givare 5<sub>A</sub> och 3<sub>C</sub>.

	Givare 5 <sub>A</sub>	Givare 3 <sub>C</sub>
Medelvärde ( $\mu\epsilon$ )	0.00	0.00
Standardavvikelse ( $\mu\epsilon$ )	0.09	0.16
Crest-värde (-)	5.78	4.86
Skevhet (-)	0.01	-0.18
Kurtosis-värde ( $\mu\epsilon^{-2}$ )	4.23	5.18

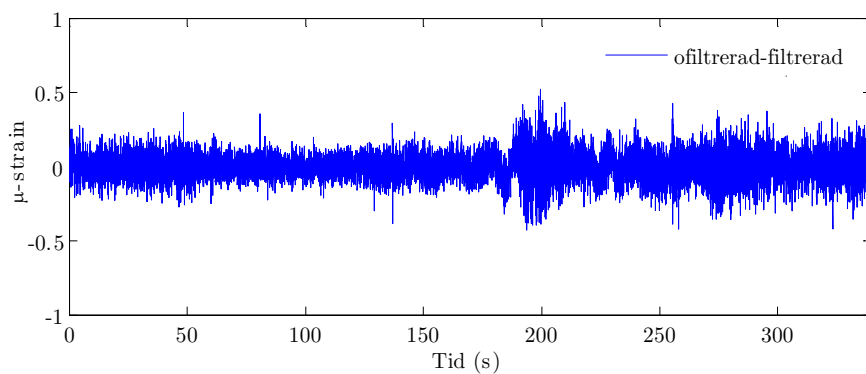
Resultaten visar att båda givarna har ett medelvärde kring noll, vilket innebär att gausiskt brus bör kunna filtreras bort med hög noggrannhet. Givare 5<sub>A</sub> har betydligt lägre standardavvikelse än 3<sub>C</sub> vilket till stor del beror på förstärkarens upplösning. Givare 5<sub>A</sub> har ett crest-värde som avviker ca: 3 % medan givare 3<sub>C</sub> har ett crest-värde som avviker ca: 15 %, vilket även kan ses om man jämför fördelningarna i Figur 2.9 och Figur 2.12 *m.a.p.* formen kring medelvärdet. Givare 3<sub>C</sub> har dessutom en betydande skevhet vilket inte givare 5<sub>A</sub> har. Slutligen har givare 5<sub>A</sub> även ett bättre kurtosis-värde än givare 3<sub>C</sub>, 40 % respektive 70 % differens. Då kurtosis-faktorn ges av fjärde ordningens statistiska moment resulterar några få större störningar i signalen, *t.ex.* elektriska spänningstoppar, stor inverkan på detta värde. Då den statistiska signalen är en kontinuerlig funktion kommer dessa spikar att försvinna vid filtrering.

Samtliga signaler har bedömts ge tillförlitliga responser och i jämförelse med upprättade FE-modeller är osäkerheterna större i antagna materialparametrar, randvillkor och exakt placering av givarna. *P.g.a.* sidomurarnas lastfördelning på bågen fås olika form och amplitud på responserna i närliggande punkter. En 2D modell ger således inte en tillräcklig förklaring av lastfördelningen.

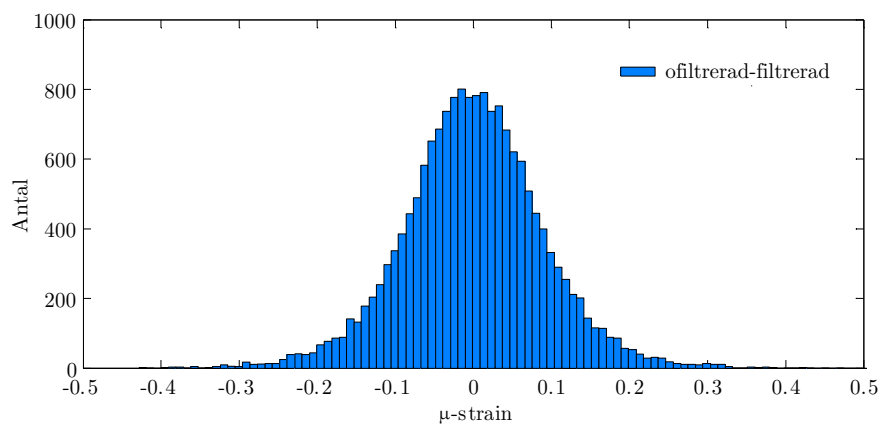




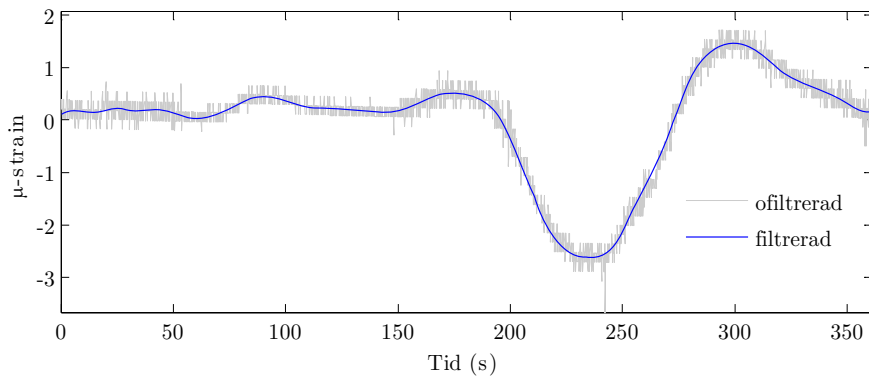
Figur 2.7: Givare 5<sub>A</sub>, jämförelse mellan ofiltrerad och filtrerad signal.



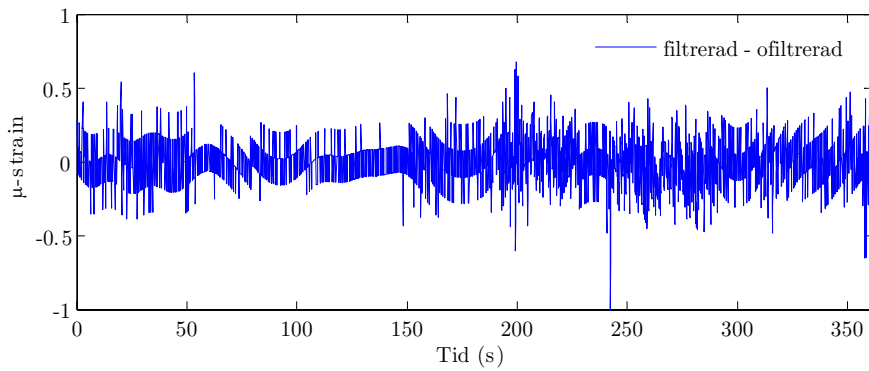
Figur 2.8: Givare 5<sub>A</sub>, kvarvarande brusnivåer efter lågpassfiltrering.



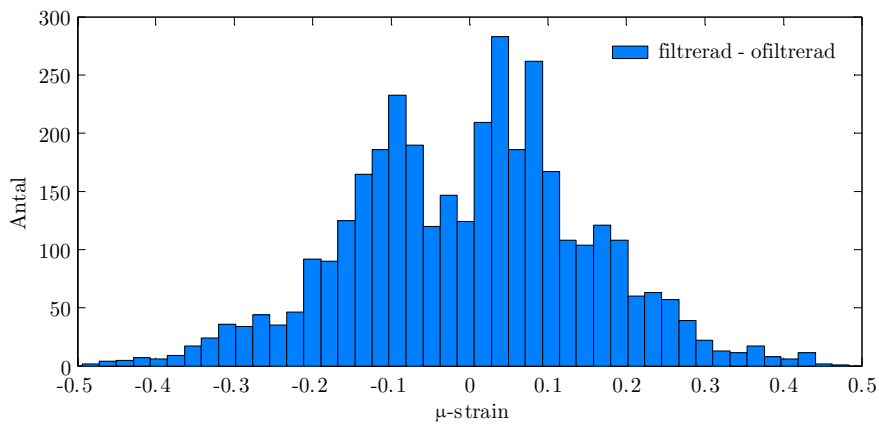
Figur 2.9: Givare 5<sub>A</sub>, statistisk fördelning av brusnivåer.



Figur 2.10: Givare 3<sub>C</sub>, jämförelse mellan ofiltrerad och filtrerad signal.



Figur 2.11: Givare 3<sub>C</sub>, kvarvarande brusnivåer efter lågpassfiltrering.

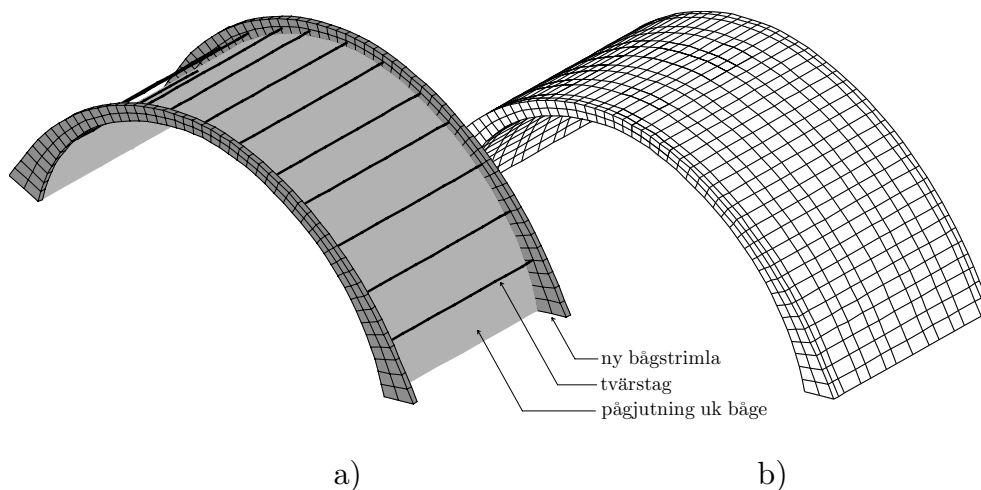


Figur 2.12: Givare 3<sub>C</sub>, statistisk fördelning av brusnivåer.

## 3 FE-beräkningar

### 3.1 Modellbeskrivning

Följande avsnitt visar kort de beräkningsmodeller som används för beräkning av bågens respons av trafiklast. Beräkningarna är utförda med finita element i det generella FE-programmet SOLVIA03 [11]. FE-modellen omfattar båge 1 – 3 och är modellerad med 8-nodiga volymselement. Bågens elementindelning återfinns i Figur 3.1b. De element som utgör förstärkningen visas i Figur 3.1a, omfattande nya betongbågstrimlor, tvärgående stag samt pågjutning av ny armerad betong på bågens undersida. Armering modelleras med 4-nodiga skalelement med ortotropa egenskaper och tvärstagen som 2-nodiga stängelement. Motsvarade brottgränsberäkningar återfinns i [2, 3, 4].

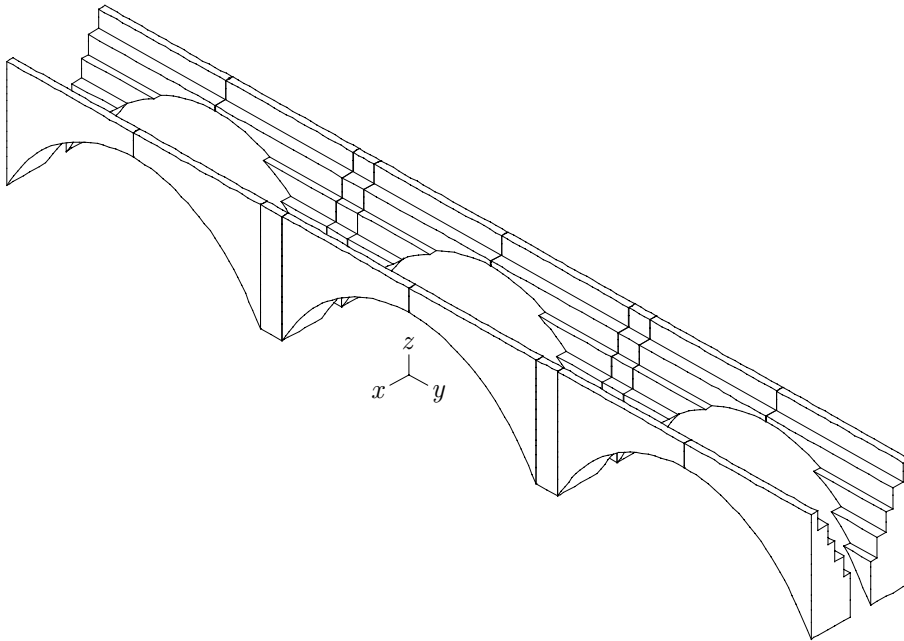


Figur 3.1: FE-modell av båge 2, a) förstärkningar, b) oförstärkt båge.

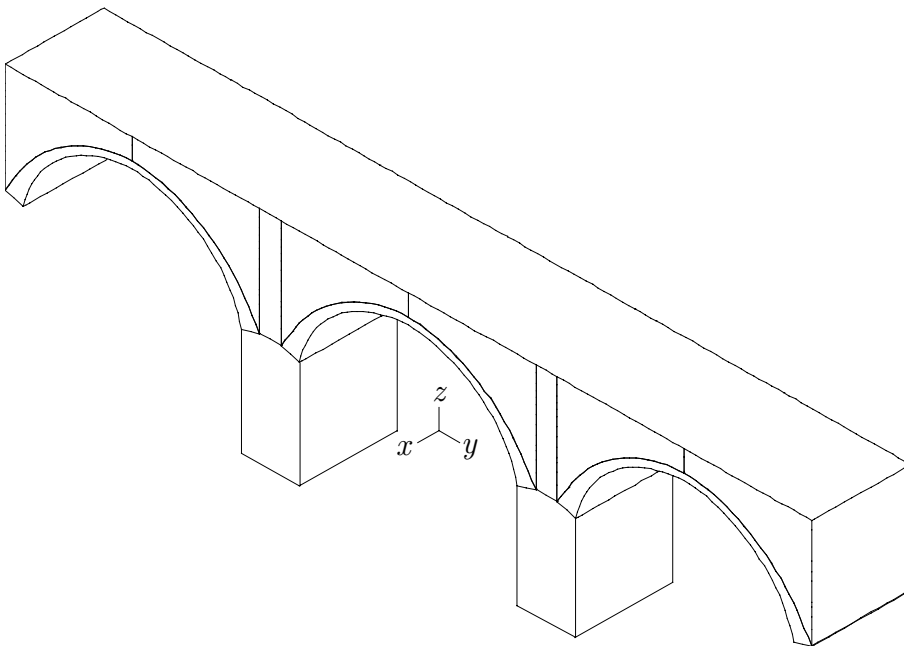
Inverkan av sidomurarnas utbredning har från tidigare fältmätningar visats ha stor inverkan på uppkomna responser. Sidomurarna är fristående från bågarna med undantag för några genomgående armeringsjärn i bakkant sidomur. Kontaktytan mellan båge och sidomur utgörs av asfaltpapp och isolering, kontaktytor mellan båge och fyllning utgörs av två lager asfaltmastix [12]. Sidomurarna har genomgående fogar i hjässa samt vid anfang. Sidomurarnas geometri visas i Figur 3.2. Trots att sidomurarna inte är kontinuerliga med bågen har de visats samverka med bågen under uppmätta brukslaster, p.g.a. friktion. I beräkningsmodellerna avseende brukslaster har därför sidomurarna betraktats som stelt kopplade till bågen.

Hela beräkningsmodellen avseende brukslaster är linjär med avseende på material och deformationer. Under de olika förstärkningsetapperna beaktas spänningsomlagring av permanent last genom att ta bort eller lägga till element efter det att permanent last

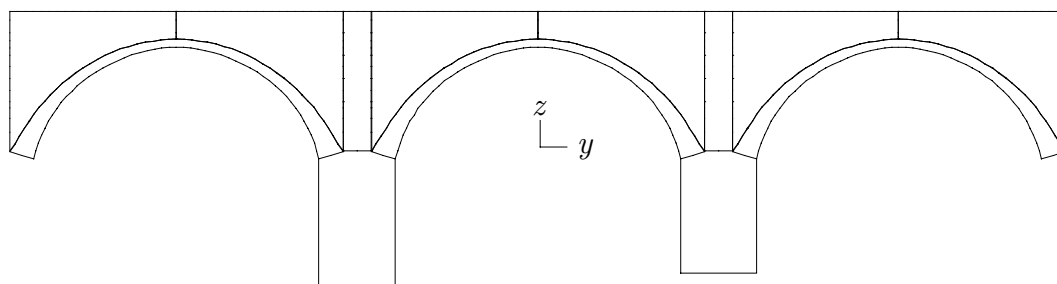
påförts, motsvarande bortbilning och återgjutning. Hela FE-modellen visas i Figur 3.3 och Figur 3.4.



Figur 3.2: 3D FE-modell, sidomurarnas geometri.



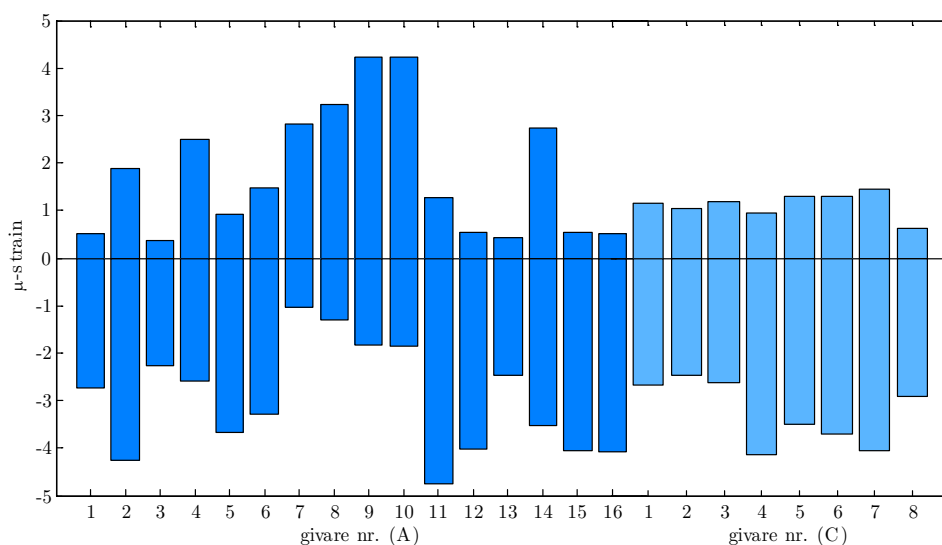
Figur 3.3: 3D FE-modell omfattande tre valv, isovy.



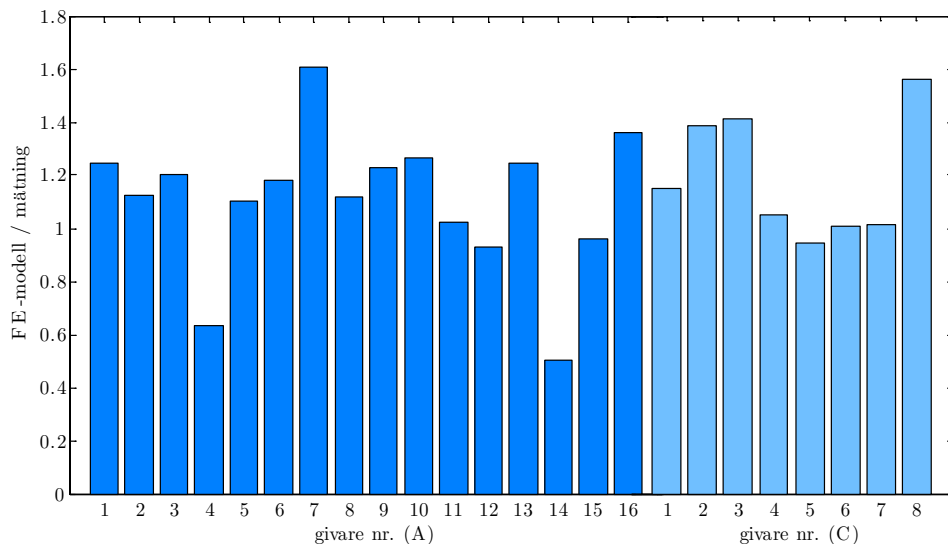
Figur 3.4: 3D FE-modell omfattande tre valv, elevation.

## 3.2 Kalibrering mot fältmätningar 2005

De uppmätta responserna har använts för att kalibrera ovan redovisade FE-modell. Parameterstudier har genomförts avseende material och randvillkor, vilket redovisas i [1]. I Figur 3.5 nedan redovisas töjningsvidderna från mätning på båge 2. Givare 1 – 3 och 5 – 7 mäter betongtöjningar och givare 11 – 16 mäter längdändringar i betongen med LVDT-givare. Övriga givare mäter armeringstöjningar. Motsvarande spänningsvidder är ca: 0.1 – 0.2 MPa i betongen och 1.0 – 1.2 MPa i armeringen. Figur 3.6 visar kvoten mellan FE-modell och mätningar, vilken ger en maximal överskattning på 60 % för givare 7<sub>A</sub> och 8<sub>C</sub> samt en maximal underskattning på ca: 40 % för givare 4<sub>A</sub> och 14<sub>A</sub>. En jämförelse mellan hela signalerna återfinns i Bilaga A.



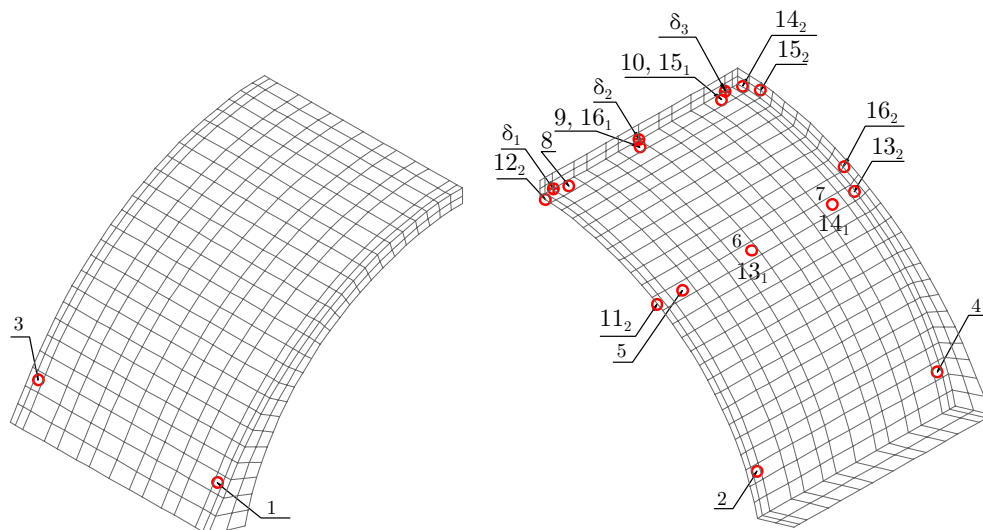
Figur 3.5: Töjningsvidder från fältmätningar 2005.



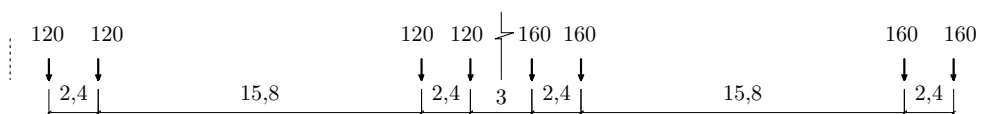
Figur 3.6: Jämförelse i töjningsvidd mellan FE-modell och fältmätningar.

### 3.3 Beräkningar inför fältmätningar 2007

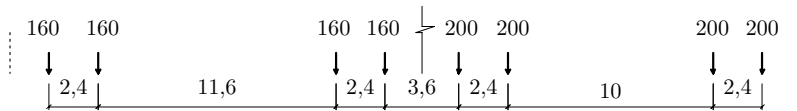
Under förstärkningarna kommer mätningar att utföras enligt avsnitt 2.2. Då tidigare mätningar har visat på små påkänningar har linjära materialegenskaper antagits i FE-modellen. Detta gör att responser från godtyckliga trafikklaster kan beräknas baserat på influenslinjer. Influenslinjer beräknas i punkter enligt Figur 3.7 för en axellast på ett spår. En beräkningsrutin skriven i MATLAB® [6] används därefter för att beräkna responserna av trafikklasterna i Figur 3.8 - Figur 3.11, motsvarande fullastade pendeltåg.



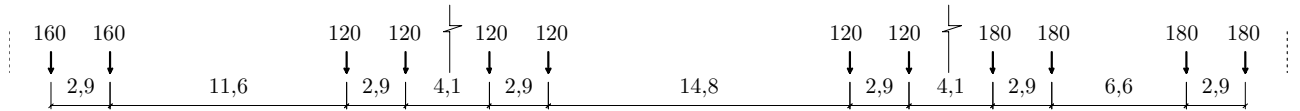
Figur 3.7: Resultatpunkter i FE-modell.



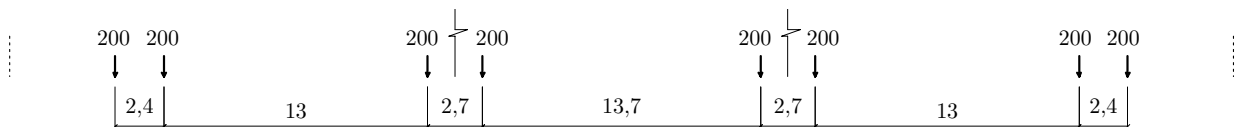
Figur 3.8: Tågtyp X1, motorvagn 160 kN/axel, övriga vagnar 120 kN/axel.



Figur 3.9: Tågtyp X10, motorvagn 200 kN/axel, övriga vagnar 160 kN/axel.



Figur 3.10: Tågtyp X2, motorvagn 180 kN/axel, mittvagnar 120 kN/axel, bakre boggi 160 kN/axel, antalet mittvagnar är 4 st.

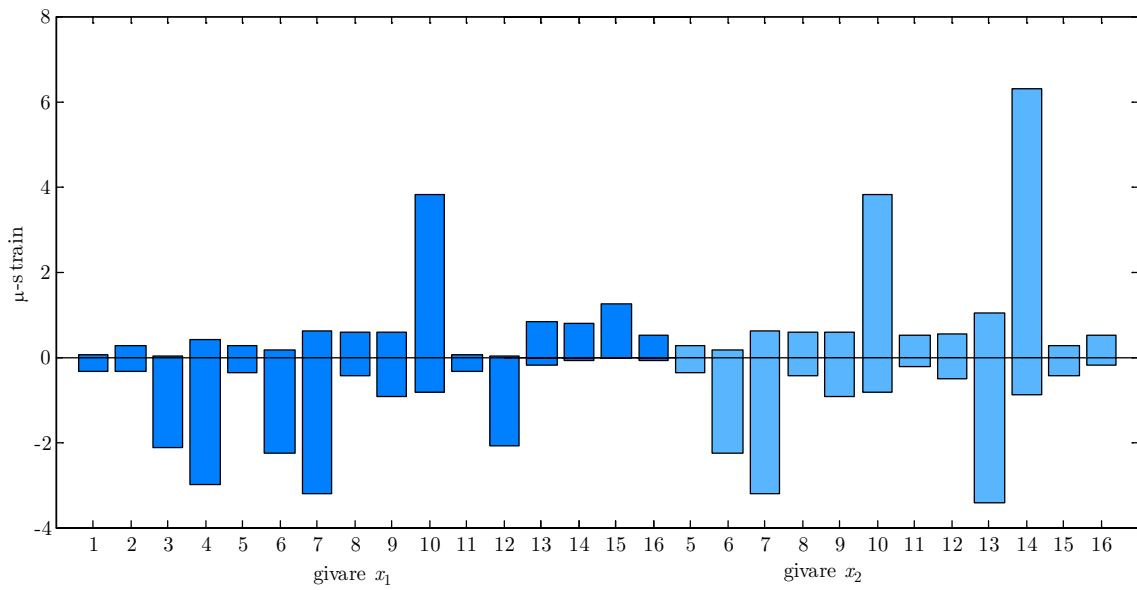


Figur 3.11: Tågtyp X60, samtliga vagnar 200 kN/axel.

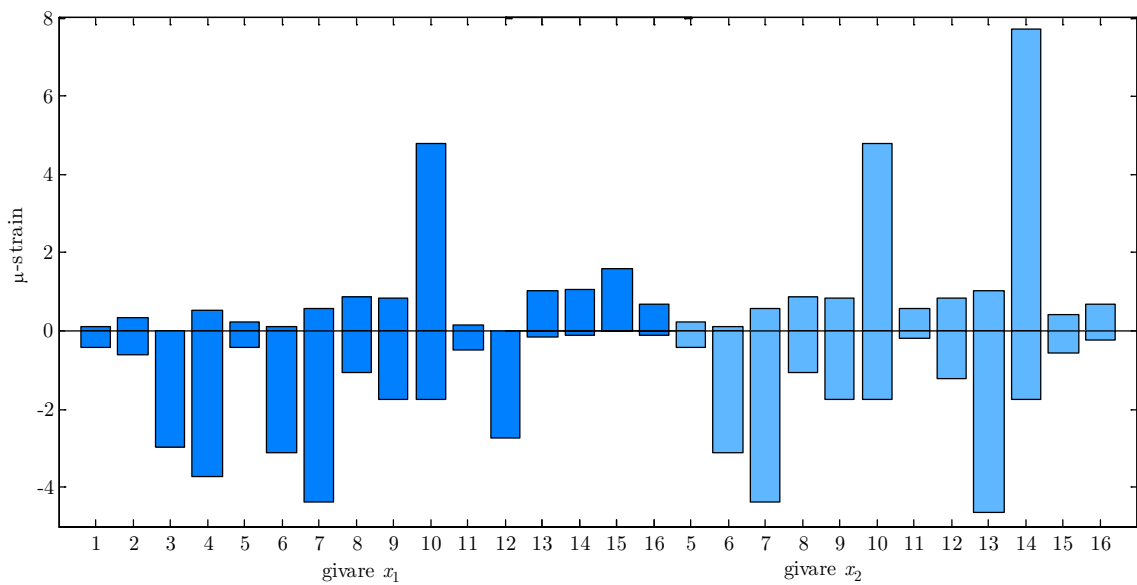
En uppsättning influenslinjer beräknas efter varje etapp av förstärkningsarbetet, vilka betecknas enligt:

- Etapp 0: *Befintlig oförstärkt båge.*
- Etapp 1: *Tar bort 250 mm betong från bågens första sida.*
- Etapp 2: *Återgjuter 250 mm ny armerad betong på bågens första sida.*
- Etapp 3: *Tar bort 250 mm betong från bågens andra sida.*
- Etapp 4: *Återgjuter 250 mm ny armerad betong på bågens andra sida.*
- Etapp 5: *Installerar tvärgående spännstag som vardera uppspanns 150 kN.*
- Etapp 6: *Tar bort 50 mm betong underkant båge.*
- Etapp 7: *Pågjutning 80 mm ny armerad betong underkant båge.*

I Figur 3.12 - Figur 3.15 nedan visas töjningsvidder för olika tågpassager på oförstärkt bro, *dvs.* Etapp 0. Trafiken påförs spåret närmast givare 3<sub>1</sub>, 4<sub>1</sub>, 7<sub>1</sub> och 10<sub>1</sub>. Givare på motstående sida ger betydligt lägre påkänning. Givare 3<sub>1</sub> och 4<sub>1</sub> vid anfang samt givare 6<sub>1</sub> och 7<sub>1</sub> vid fjärdedelspunkt ger tryckspänningar av trafik medan givare 10 i hjässan primärt ger dragspänningar. Givare 13<sub>1</sub>, 14<sub>1</sub> och 15<sub>1</sub> ger dragspänningar i tvärled. Givare 10<sub>1</sub> kan jämföras med 14<sub>2</sub> på samma sätt som givare 7<sub>1</sub> kan jämföras med 13<sub>2</sub>. Givare 14<sub>2</sub> ger 50 % större dragspänning än 10<sub>1</sub> *p.g.a.* sin placering längre ut mot kanten.

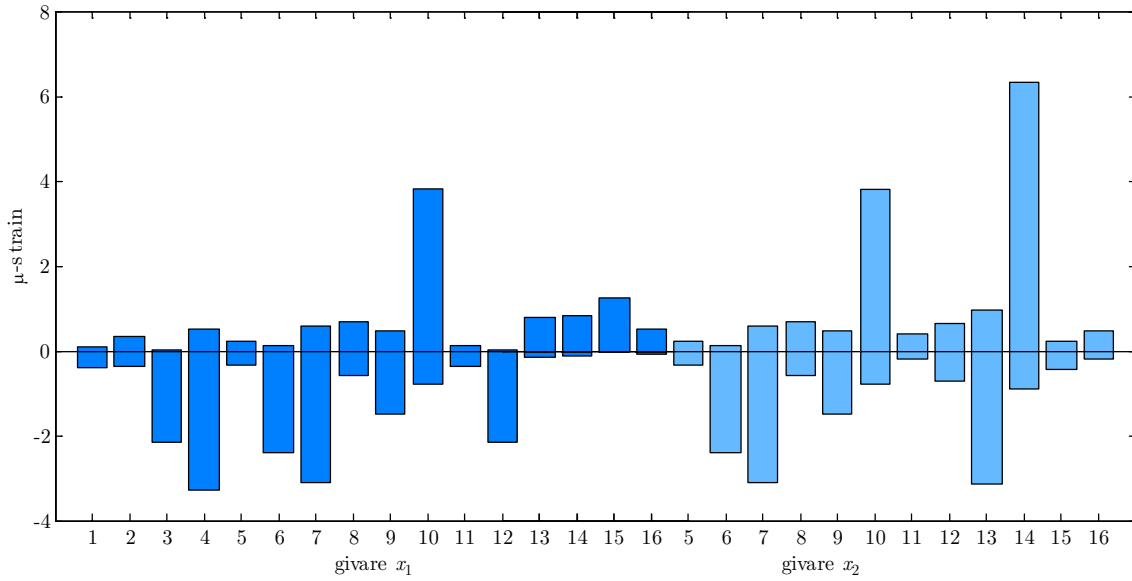


Figur 3.12: Töjningsvidder av ett X1 tåg med 8 vagnar på oförstärkt bro, givare  $1_1 - 16_1$ ,  $5_2 - 16_2$ . Tåget passerar på spåret närmast givare 10.

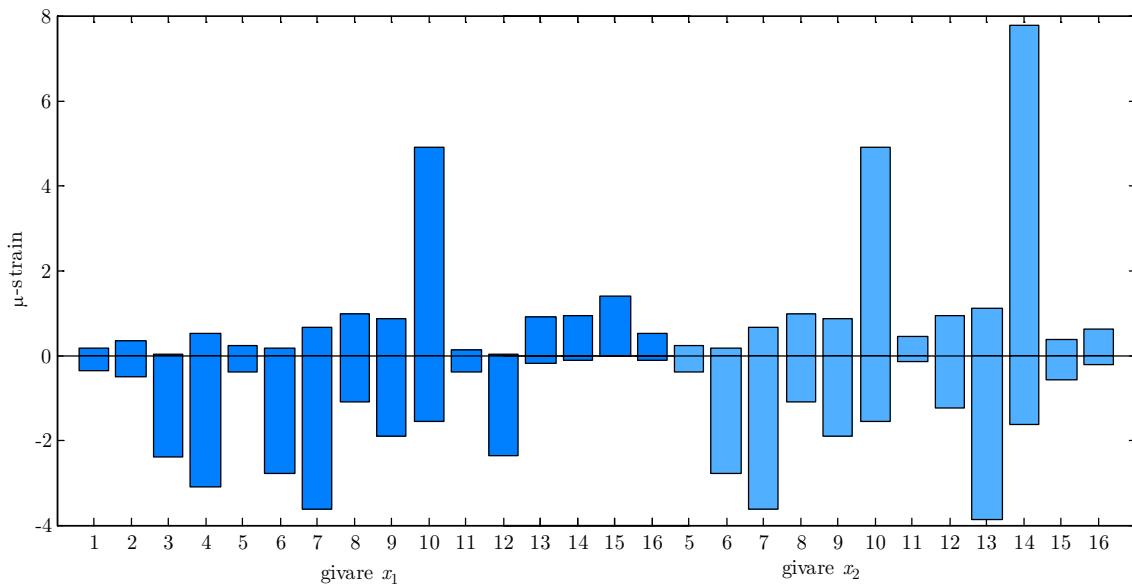


Figur 3.13: Töjningsvidder av ett X10 tåg med 8 vagnar på oförstärkt bro, givare  $1_1 - 16_1$ ,  $5_2 - 16_2$ . Tåget passerar på spåret närmast givare 10.





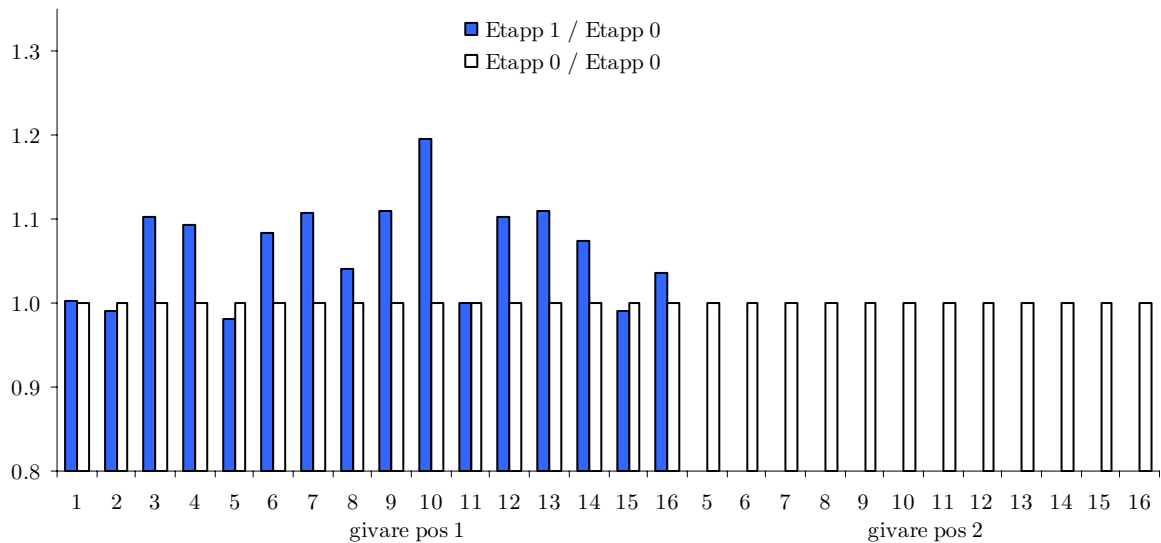
Figur 3.14: Töjningsvidder av ett X2 tåg med 8 vagnar på oförstärkt bro, givare  $1_1 - 16_1$ ,  $5_2 - 16_2$ . Tåget passerar på spåret närmast givare 10.



Figur 3.15: Töjningsvidder av ett dubbelkopplat X60 tåg på oförstärkt bro, givare  $1_1 - 16_1$ ,  $5_2 - 16_2$ . Tåget passerar på spåret närmast givare 10.

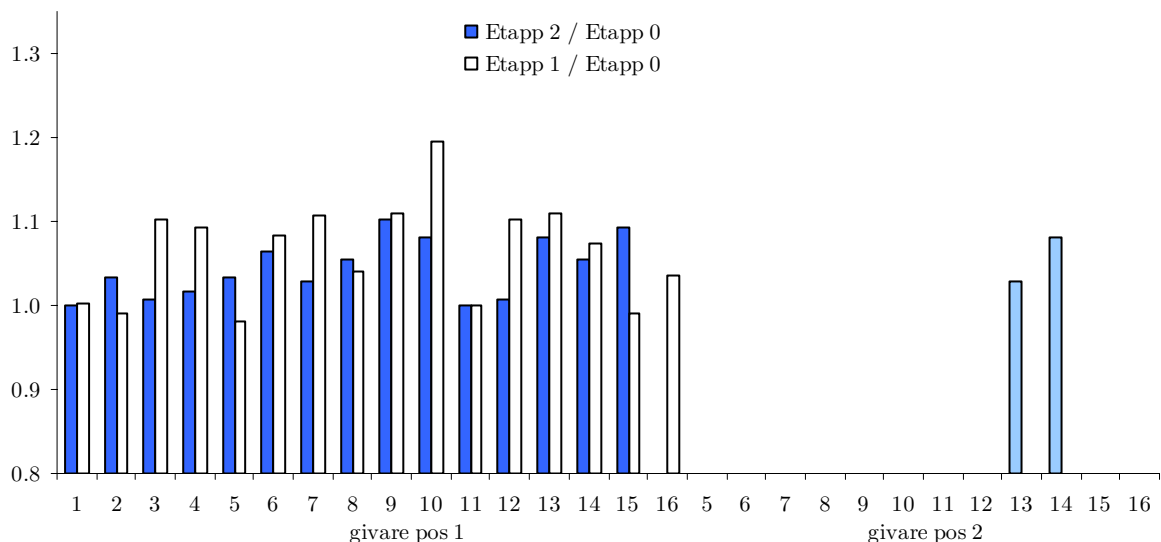
Figur 3.16 - Figur 3.24 nedan redovisar kvoten av töjningsvidderna mellan förstärkt och oförstärkt bro under Etapp 1 - Etapp 7. Trafiken består av en dubbelkopplad X60 med 12 vagnar och 20 tons axeltryck.

Figur 3.16 visar resultat efter etapp 1, då 250 mm av bågens första sida har tagits bort. De närliggande givarna visar på ca: 10 % ökning utom givare  $10_1$  i hjässan som ger ca: 20 % ökning. På motstående sida är responserna i princip oförändrade.



Figur 3.16: Ändring i töjningsvidd efter ettapp 1, tagit bort 250 mm från bågens första sida, trafiklast en dubbelkopplad X60 på spåret närmast sida 1.

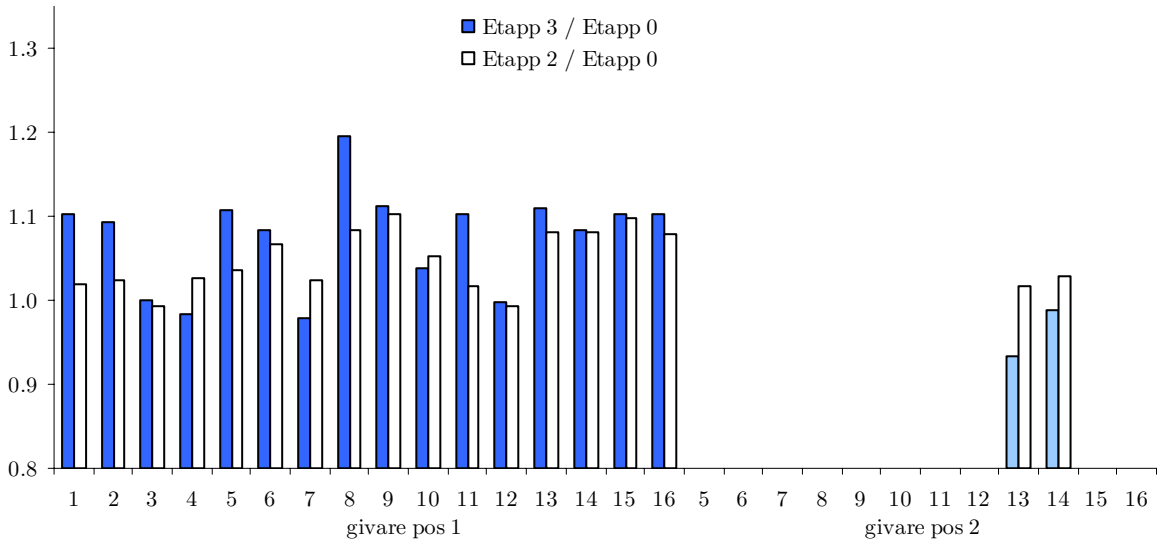
Efter återgjutning av sida 1, Figur 3.17, förs en del av lasten över till den nya pågjutningen, som *p.g.a.* sin ökade styvhet i förhållande till befintlig betong (ny betong C35/40 mot befintlig C12/15) tar upp större andel trafiklast än oförstärkt bäge, givare 13<sub>2</sub> och 14<sub>2</sub>, samtidigt som framför allt givare 10<sub>1</sub> avlastas. Vita staplar anger värde från tidigare etapp. Givare 15<sub>1</sub> som mäter töjning i tvärgående armering i hjässan, visar en ökning på ca: 10 % från tidigare etapp beroende på förändring i inspänningsgrad mot den nya bågstrimlan.



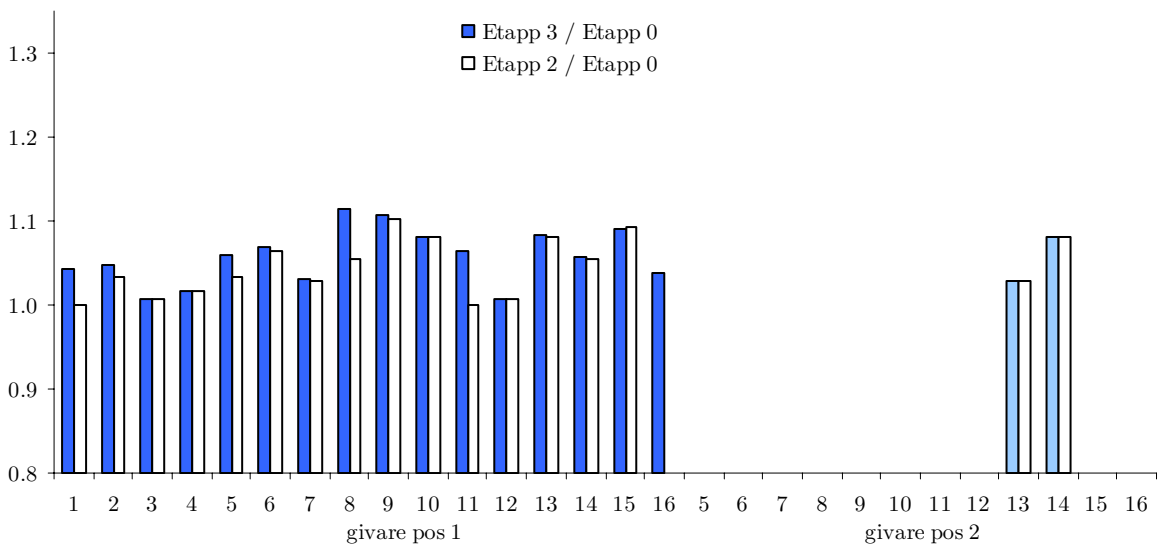
Figur 3.17: Ändring i töjningsvidd efter ettapp 2, återgjutit bågens första sida, trafiklast en dubbelkopplad X60 på spåret närmast sida 1.

Då 250 mm av bågens andra sida tagits bort ökar påkänningarna i motsvarande grad jämfört med första sidan. Störst ökning fås i givare 8<sub>1</sub> vilken liknas med givare 10<sub>1</sub> för motstående spår. Den först pågjutna bågstrimlan, givare 13<sub>2</sub> och 14<sub>2</sub>, visar en minskad

respons jämfört med tidigare etapp, dock avses trafik på motstående spår, varvid den totala responsen är liten. Inverkan av trafiklast närmast sida 1 då material vid sida 2 tagits bort, Figur 3.19, visar oförändrad respons i givare 13<sub>2</sub> och 14<sub>2</sub> samt liten ökning av respons längs sida 1.

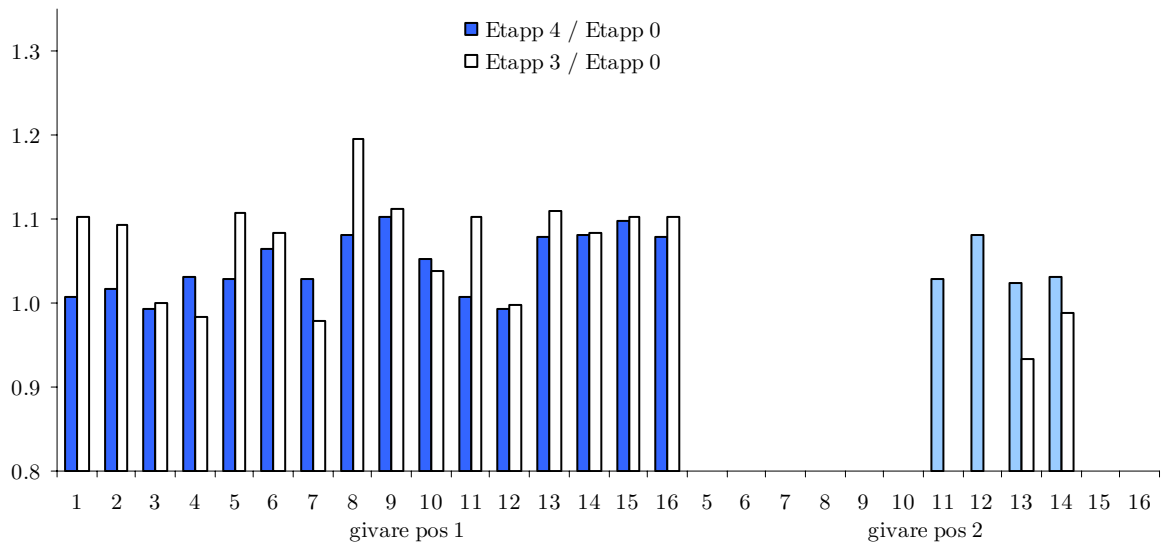


Figur 3.18: Ändring i töjningsvidd efter etapp 3, tar bort 250 mm bågens andra sida, trafiklast en dubbelkopplad X60 på spåret närmast sida 2.

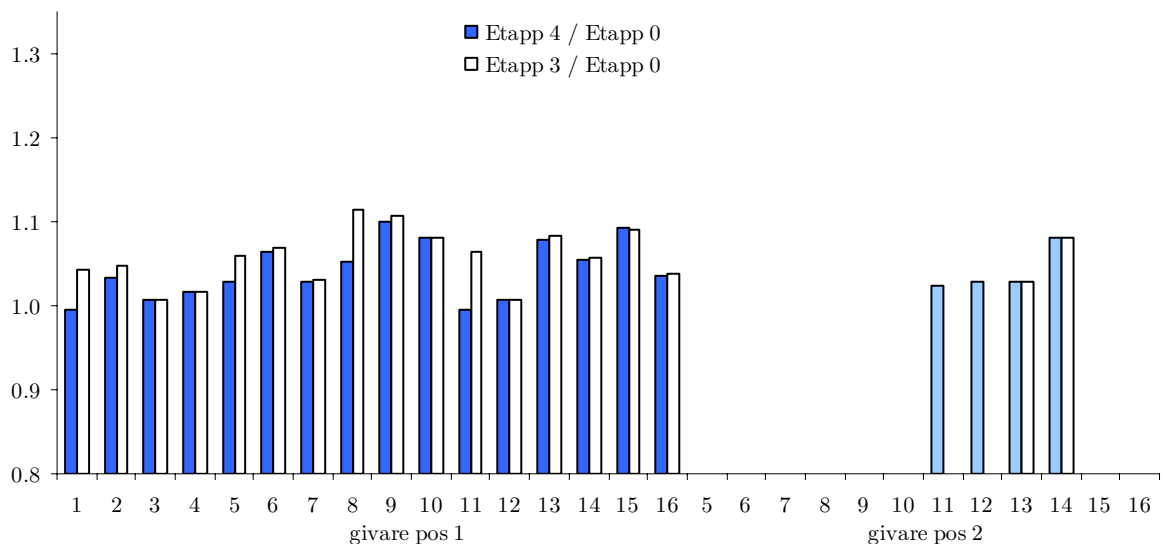


Figur 3.19: Ändring i töjningsvidd efter etapp 3, tar bort 250 mm bågens andra sida, trafiklast en dubbelkopplad X60 på spåret närmast sida 1.

Då bågens andra sida är återgjuten, Figur 3.20, tar den nya bågstrimlan ca: 5 – 10 % mer last än oförstärkt bäge, *p.g.a.* styvhetsökningen. Den ursprungliga delen av bågens andra kant, givare 1<sub>1</sub>, 2<sub>1</sub>, 5<sub>1</sub>, 8<sub>1</sub> och 11<sub>1</sub> avlastas ca: 15 – 20 %. Påkänningen i den första bågstrimlan, givare 13<sub>2</sub> och 14<sub>2</sub>, har ökat, dock är den totala responsen här liten då trafiken går mot motstående spår. Trafik på spår närmast sida 1, Figur 3.21, visar likt tidigare på små förändringar.

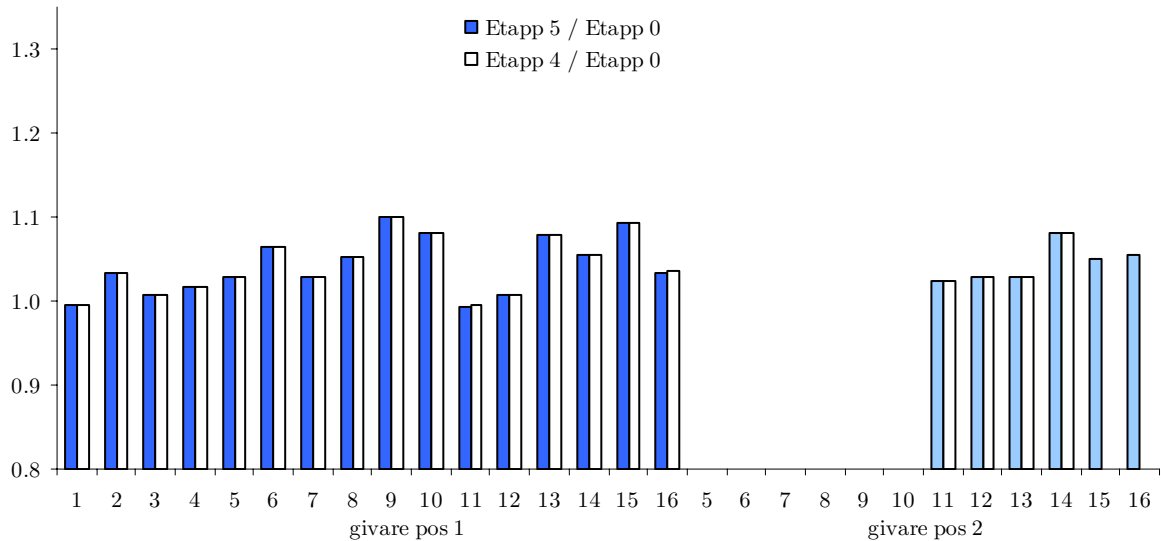


Figur 3.20: Ändring i töjningsvidd efter etapp 4, återgjutit bågens andra sida, trafiklast en dubbelkopplad X60 på spåret närmast sida 2.



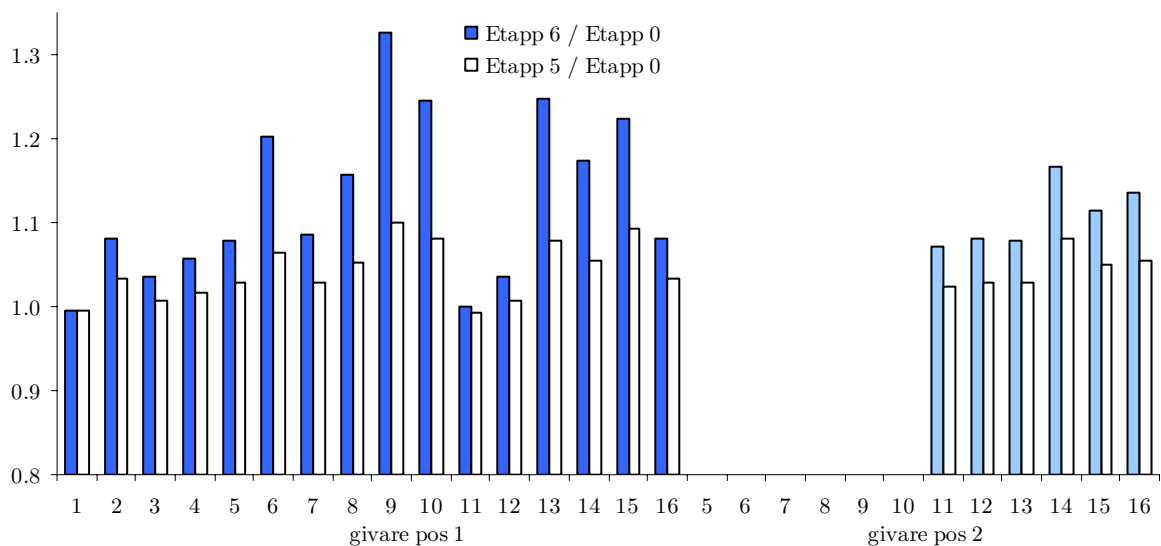
Figur 3.21: Ändring i töjningsvidd efter etapp 4, återgjutit bågens andra sida, trafiklast en dubbelkopplad X60 på spåret närmast sida 1.

Då tvärstagen är uppspända efter etapp 5 i Figur 3.22, kan ingen märkbar skillnad i respons noteras. Givare 15<sub>2</sub> och 16<sub>2</sub> mäter töjning i tvärstag vid fjärdedelspunkt respektive hjässa, vilka är verksamma under trafiklast. Dock är den totala töjningsvidden låg, se *t.ex.* Figur B.5 i Bilaga B.



Figur 3.22: Ändring i töjningsvidd efter etapp 5, monterat tvärstag som uppspanns 150 kN, trafiklast en dubbelkopplad X60 på spåret närmast sida 1.

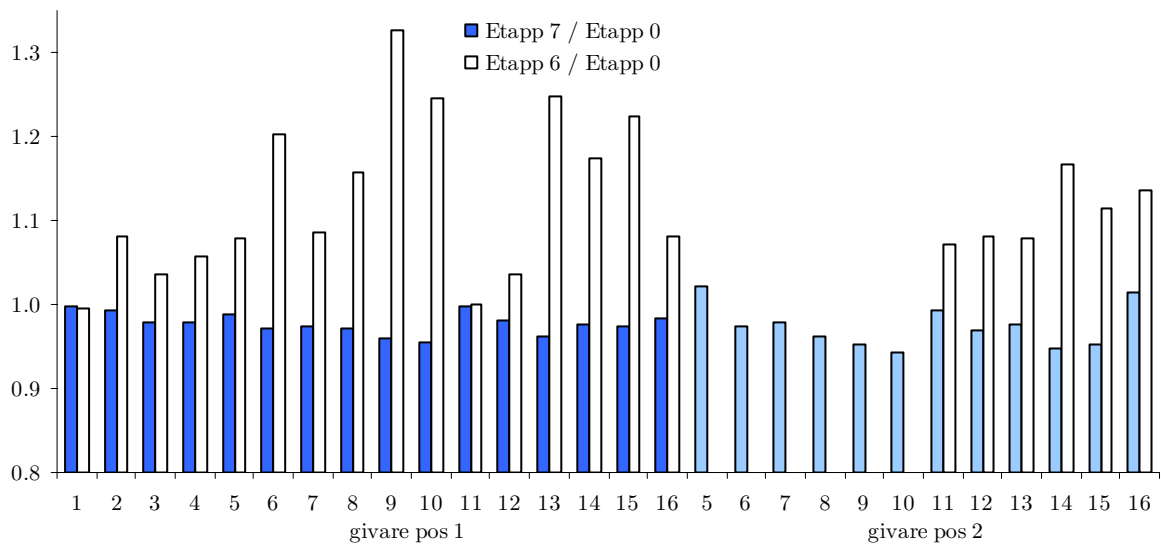
Figur 3.23 visar resultat när 50 mm av bågens undersida har tagits bort, etapp 6. Störst skillnad fås i givare  $9_1$ , placerad centriskt i hjässan, som får ca: 20 % ökning i respons, oberoende av vilket spår trafiken går på. Dock är skillnaden i töjningsvidd större vid den sida trafiken passerar, givare  $10_1$  i längsled och givare  $14_1$  och  $15_1$  i tvärlädd, vilka ger ca: 10 – 15 % ökning. Påkänningarna i de nya bågstrimlorna ökar ca: 10 %.



Figur 3.23: Ändring i töjningsvidd efter etapp 6, tar bort 50 mm av bågens undersida, trafiklast en dubbelkopplad X60 på spåret närmast sida 1.

Efter etapp 7, Figur 3.24, blir påkänningarna i den nya pågjutningen underkant båge, givare  $5_2 - 10_2$ , nästan lika som innan oförstärkt båge. Samtidigt har samtliga övriga givare minskat till i princip samma nivå som innan förstärkningen. Man har således förstärkt bron utan att i större utsträckning öka påkänningarna i den befintliga

strukturen av trafiklast, samtidigt som de nya pågjutningarna är lika verksamma som motsvarande områden i den ursprungliga bågen. Detta ger en bärförmåga i brottgränstillstånd för förstärkt bro motsvarande STAX25 [2, 4].



Figur 3.24: Ändring i töjningsvidd efter ettapp 7, återgjutit bågens undersida med 80 mm armerad betong, trafiklast en dubbelkopplad X60 på spåret närmast sida 1.

## 4 Slutsatser

### 4.1 Tidigare fältmätningar och beräkningar

Fältmätningarna utförda i juli 2005 har använts för att kalibrera upprättade FE-modeller. För att återge de uppmätta responserna har en 3D volymsmodell varit nödvändig, då brons verkningsätt återspeglas av sidomurarnas utbredning i tvärled samt lastfördelning genom fyllningen. Beaktande av dessa har gett överensstämmelse för de flesta mätpunkter i storleksordningen  $\pm 10\%$ . Några givare underskattar respektive överskattar responserna mer än detta, vilket sannolikt kan bero på differenser i placering av givare jämfört med FE-modellen. Detta kan ibland ses som en horisontell förskjutning mellan mätning och FE-modell, se *t.ex.* givare 8<sub>C</sub> i Figur A.4, Bilaga A. De brukslaster som uppmättes, bestående av två diesellok med 19 tons axeltryck, motsvarade en spänningsvidd på ca: 0.1 – 0.2 MPa i betongen och 1.0 – 1.2 MPa i armeringen. Dessa små påkänningar ställer stora krav på noggrannhet i mätutrustning, framför allt upplösning vid A/D omvandling.

### 4.2 Förväntade resultat av nya fältmätningar 2007

Under kommande fältmätningar, omfattande olika etapper under förstärkning av båge 2, kommer trafiklasten att bestå av de tåg som normalt trafikerar bron, främst pendeltåg. Då trafiklasten inte är helt känd och inte mäts separat, kommer detta att innebära större osäkerhet vid jämförelse mot FE-modeller. Då trafiken sannolikt passerar på ett spår per passage ger detta mindre respons än tidigare mätningar med två parallellt körande lok. Dessutom kommer trafiken att passera bron i högre hastighet än tidigare mätningar, som utfördes vid ca: 5 km/h. Detta kan resultera i viss inverkan av dynamiska effekter, även om dessa förväntas vara måttliga *p.g.a.* fyllningen, som fungerar som ett lågpasfilter.

Då mätningarna syftar till att jämföra responser under olika förstärkningsetapper, kommer inverkan av dessa mätas som differenser mellan olika mätningar. Teoretiska beräkningar med kalibrerade FE-modeller under kända laster ger en differens på ca: 10 – 20 % under förstärkning av bågens sidor och som mest ca: 35 % då bågens undersida vattenbilas. I ett slutskede fås i princip samma respons som innan förstärkning, vilket innebär att brons verkningsätt bibehålls i ett brukstillstånd, men med förstärkta områden som ökar bärförmågan betydligt i brottgränstillstånd. Kommande mätningar syftar till att verifiera dessa beräkningar genom att mäta på både oförstärkta och förstärkta partier under olika förstärkningsetapper.

Då de teoretiska differenserna är betydligt mindre *mellan* olika förstärkningsetapper än tidigare uppmätta *totalresponser*, ställs höga krav på mätnoggrannhet.



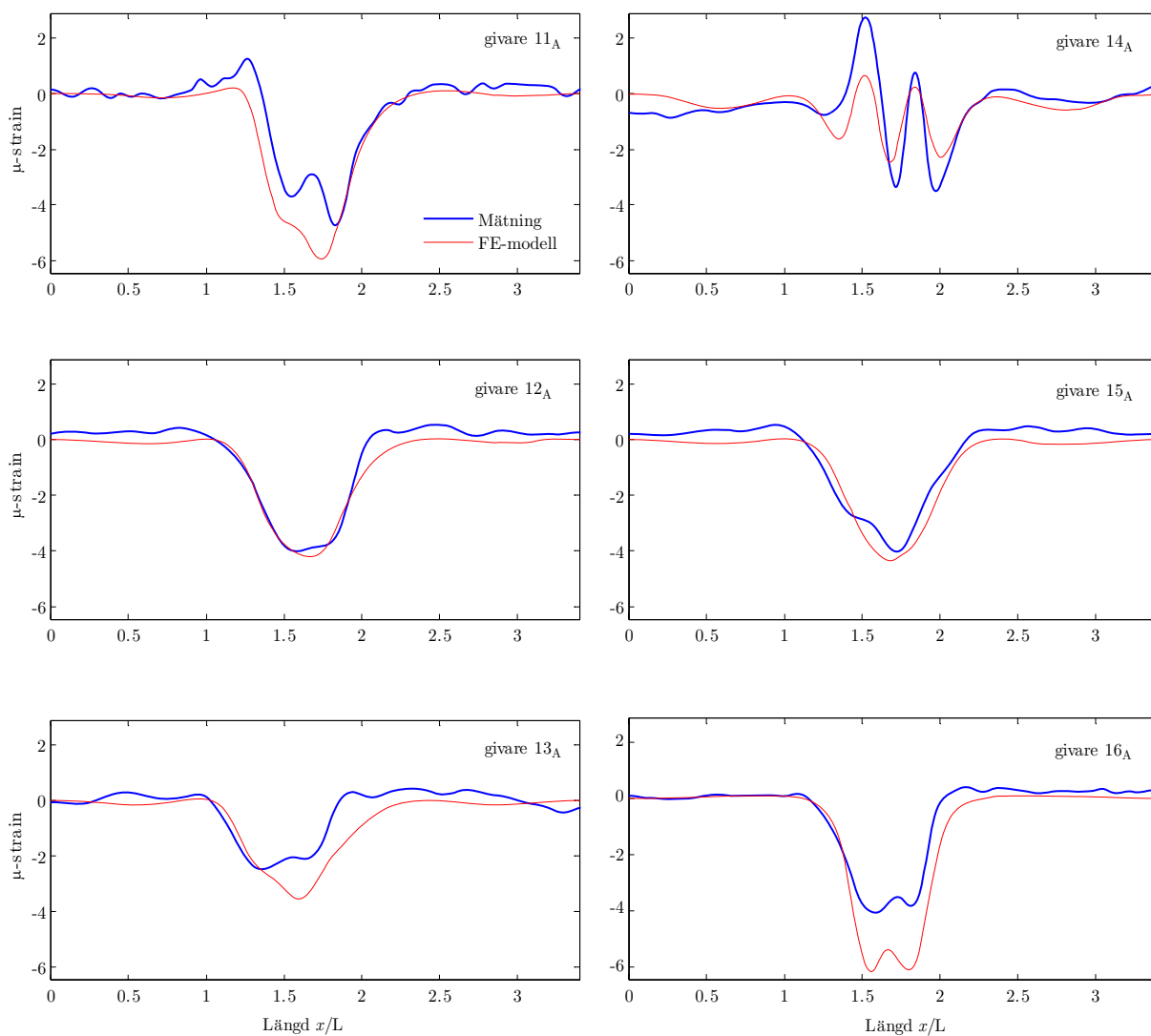


# Litteraturförteckning

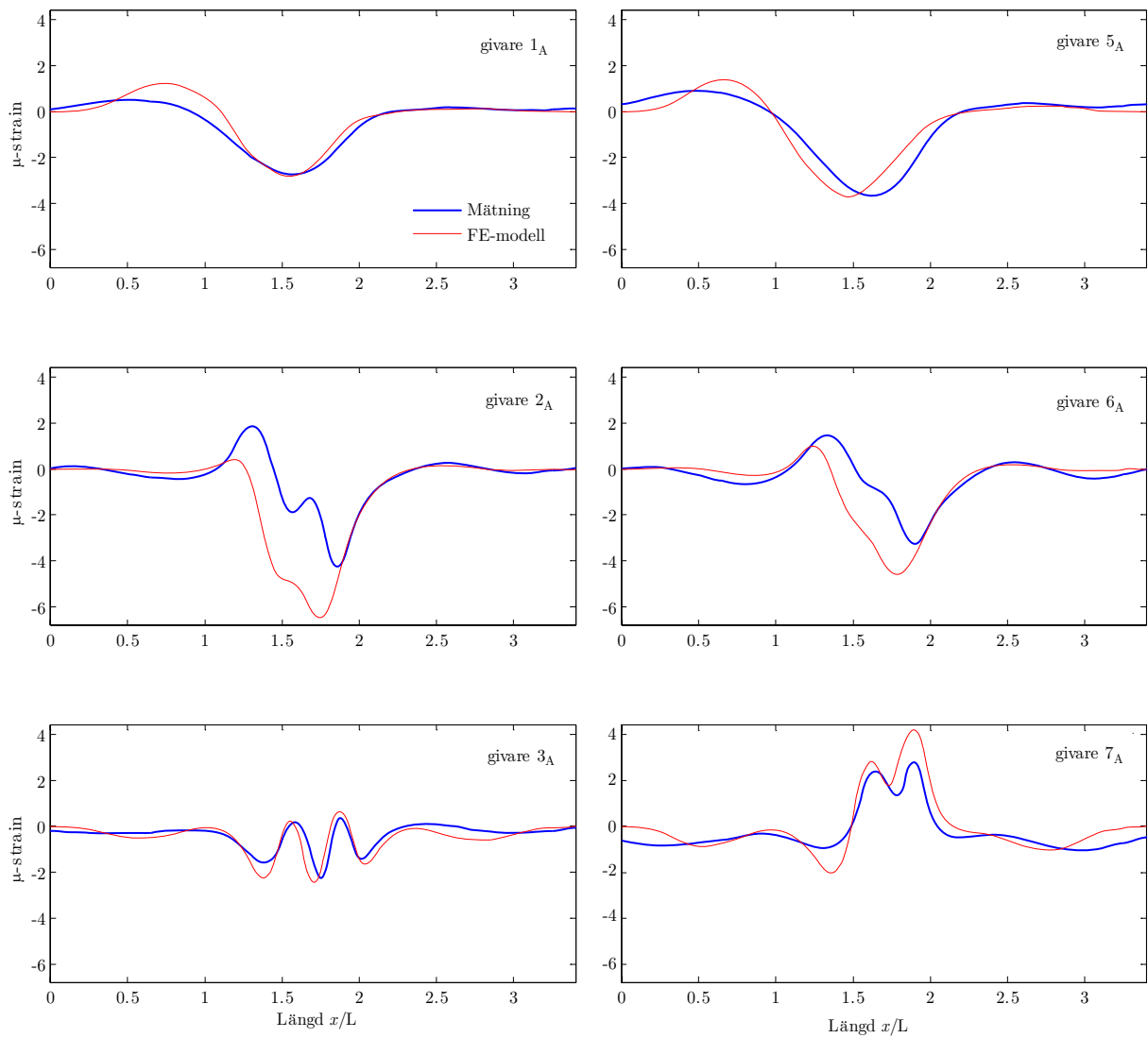
- 1/ Andersson, A., Sundquist, H., 2005. Gamla Årstabron, Utvärdering av verkningssätt hos betongvalv genom mätning och FEM-modellering, Etapp 1. *Teknisk Rapport 2005:13, ISSN 1404-8450.*
- 2/ Andersson, A., 2006. Gamla Årstabron, FEM-beräkning av förstärkningsåtgärders inverkan på betongbågarna. *Rapport 101, ISSN 1103-4289, ISRN KTH/BKN/R-101-SE.*
- 3/ Andersson, A., 2007. Gamla Årstabron, FEM-beräkningar av 3-ledsbågarnas verkningssätt och inverkan på förstärkningsåtgärder. *Rapport 104, ISSN, 1103-4289, ISRN KTH/BKN/R-104-SE.*
- 4/ Andersson, A., 2007. Gamla Årstabron, Sammanställning av beräkningar avseende förstärkning av betongbågarna. *Rapport 105, ISSN, 1103-4289, ISRN KTH/BKN/R-105-SE.*
- 5/ James, G. 2006. Gamla Årstabron: Reparation och förstärkning av betongvalven, Förslag till mätprogram för provvalv (valv 2). *Rapport 714700:A, Carl Bro Gruppen.*
- 6/ MathWorks, 2007. MATLAB® manual, <http://www.mathworks.com/access/helpdesk>
- 7/ Paulsson-Tralla, J., 2005. Gamla Årstabron – Förstudie inför betongreparationer av valv och stöd. *Rapport 2005, 7070800.*
- 8/ Paulsson-Tralla, J., 2005. Gamla Årstabron – Tillståndsbedömning 2005. *Rapport 2005, 7070800.*
- 9/ Paulsson-Tralla, J., 2006. Gamla Årstabron – Skadeinventering av betongvalvens undersidor september – november 2005. *Rapport 2006, 7115500:F.*
- 10/ Paulsson-Tralla, J., 2006. Gamla Årstabron – Systemhandling reparation och förstärkning av betongvalven. *Dokument nr. 0208-14-010.*
- 11/ SOLVIA Engineering AB, 2006. SOLVIA® Finite Element System, SOLVIA-PRE for Stress Analysis, Users Manual, *Report 03-1.*
- 12/ Statens Järnvägar, Stockholms bangårdsombyggnader, Brobyggnadsavdelningen, 1925. Originalritningar Årstabron.



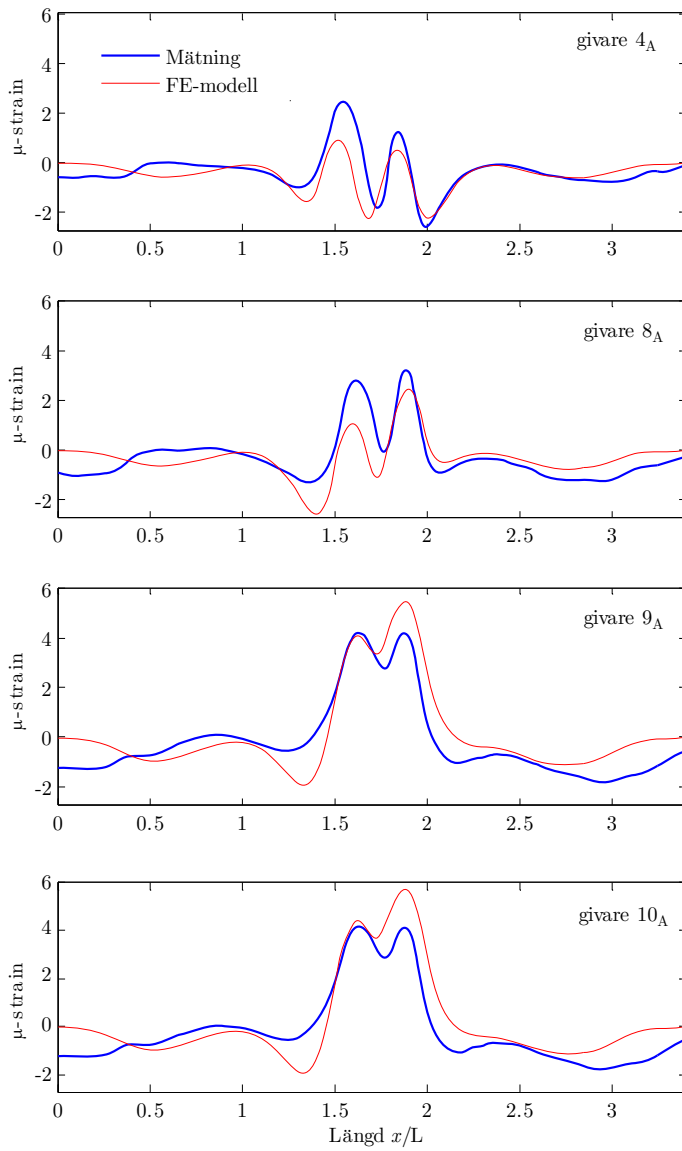
# A Utvärderade resultat 2005



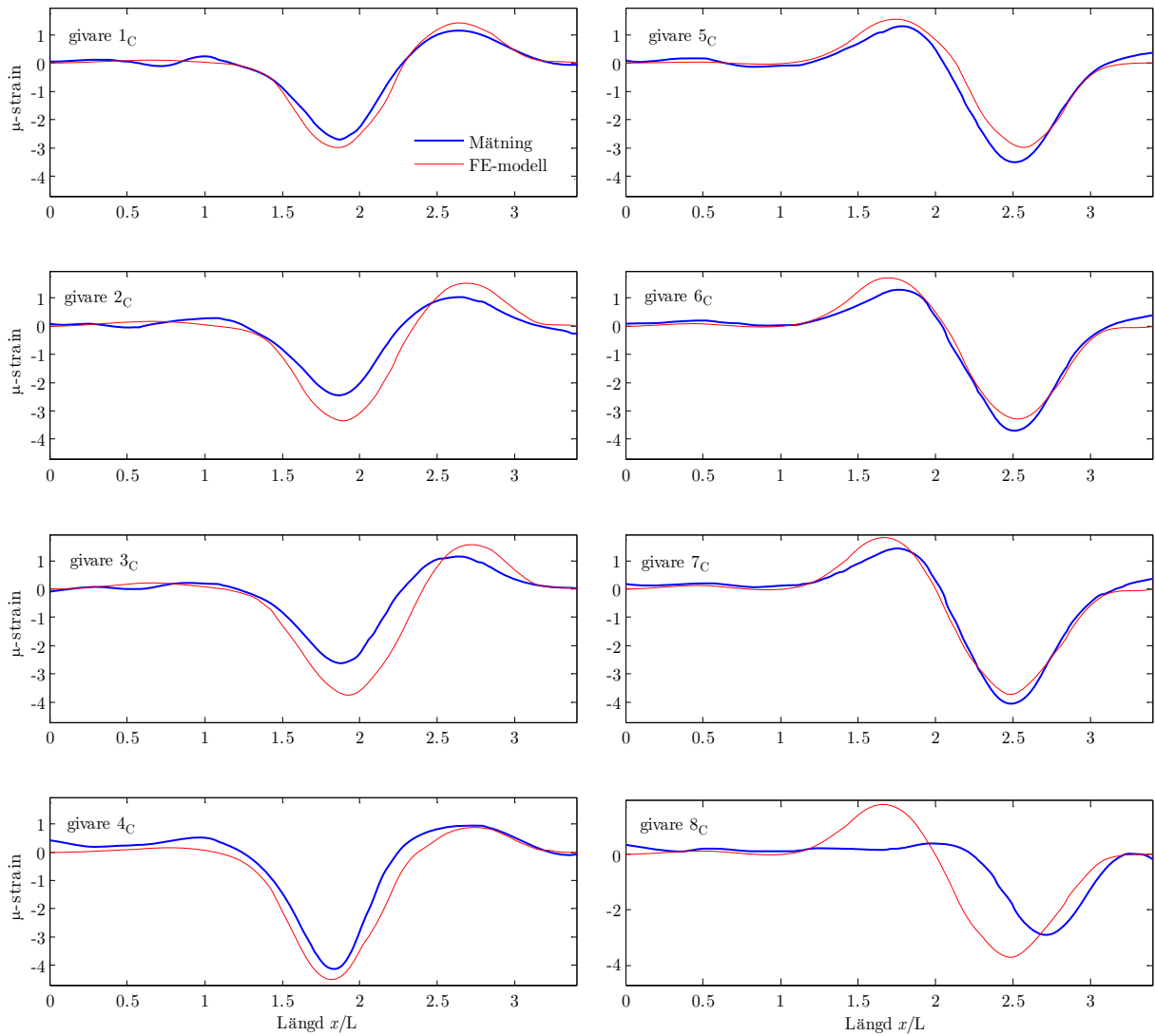
Figur A.1: Betongtöjningar i fjärdedelspunkt (*givare 11 - 13*) och hjässa (*givare 14 - 16*), båge 2. Givarnas placering återfinns i Figur 2.3.



Figur A.2: Betongtöjningar i anfang, fjärdedelpunkt och hjässa båge 2, givare 1 – 3 är placerade i centrum bro och givare 5 – 7 1 m från bågens ytterkant. Givarna avser längsgående betongtöjningar.

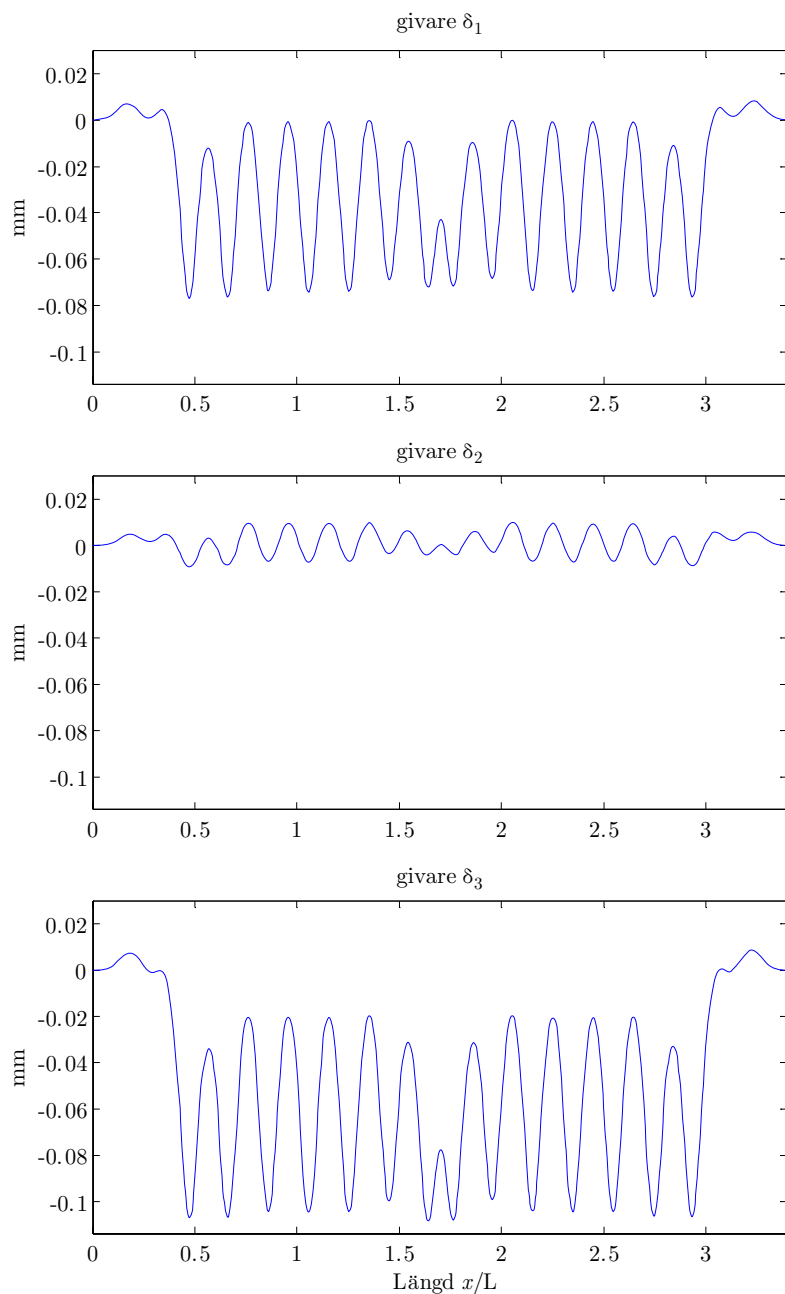


Figur A.3: Armeringtöjningar i hjässa bäge 2.

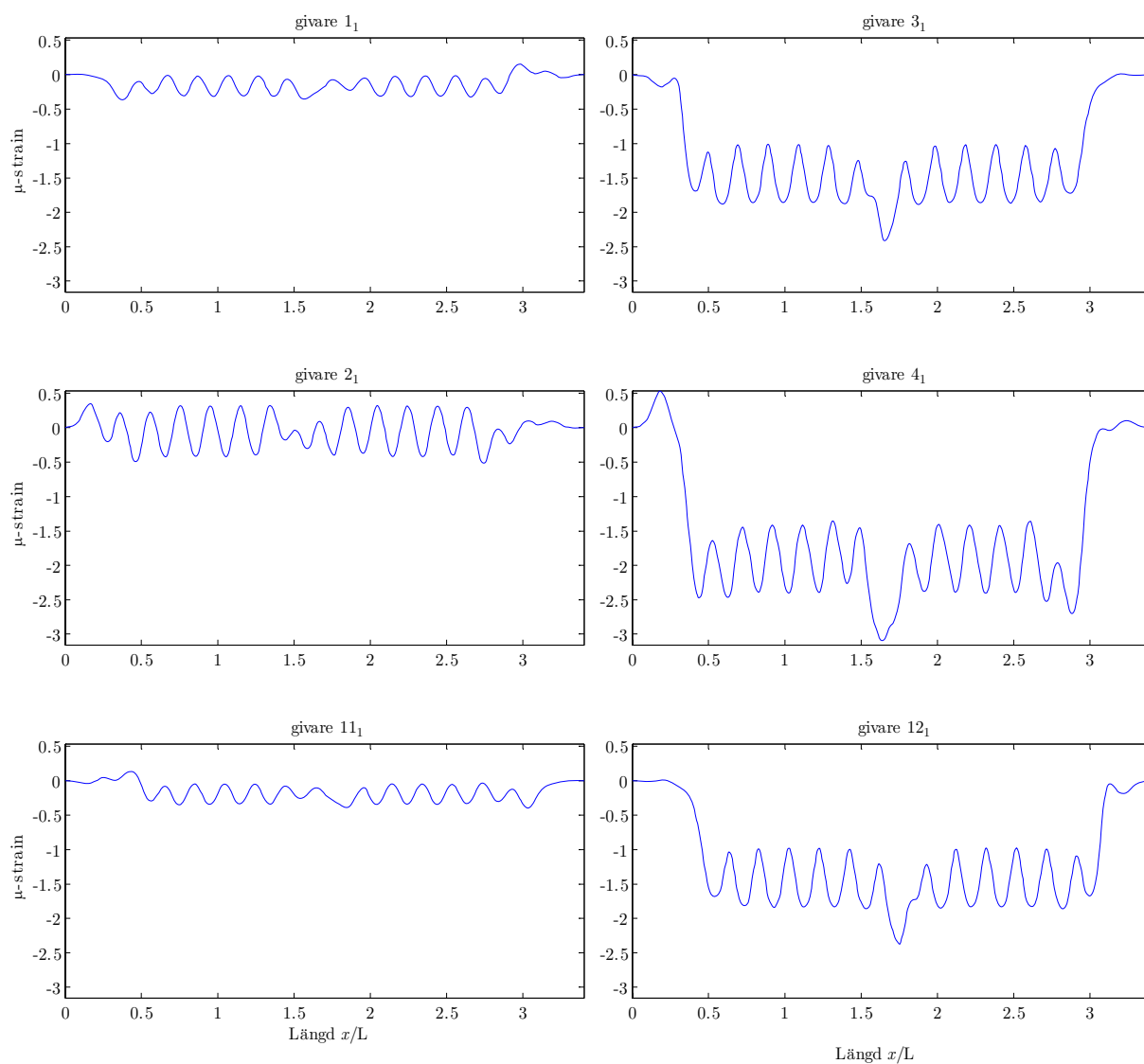


Figur A.4: Armeringstøjningar vid anfang båge 2 och anfang båge 3 (givare 8<sub>C</sub>).

## B Förväntade resultat 2007

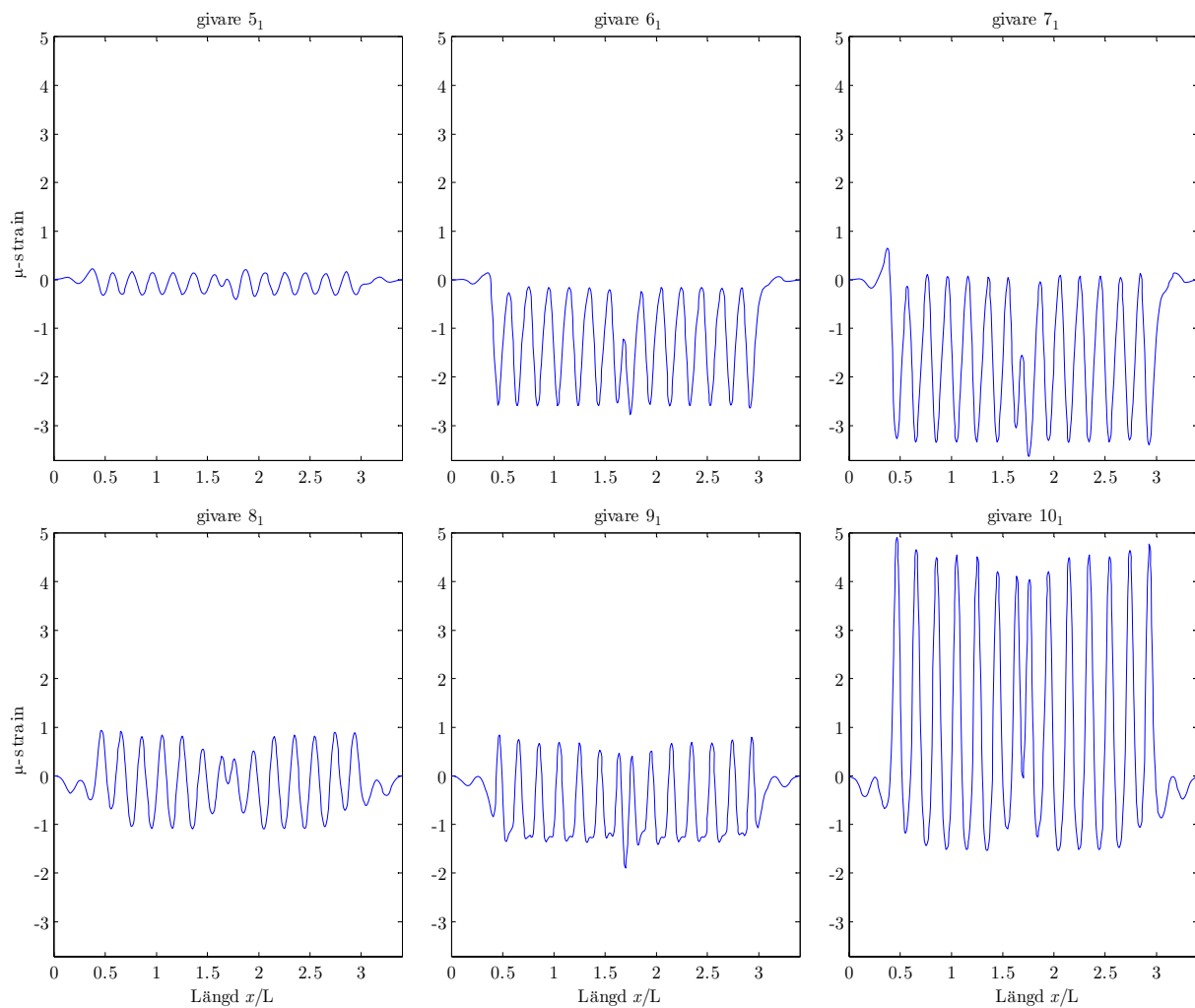


Figur B.1: Nedböjning i hjässan, trafiklast X60 (12 vagnar, 20 ton/axel, passerar på spår närmast givare  $\delta_3$ ).

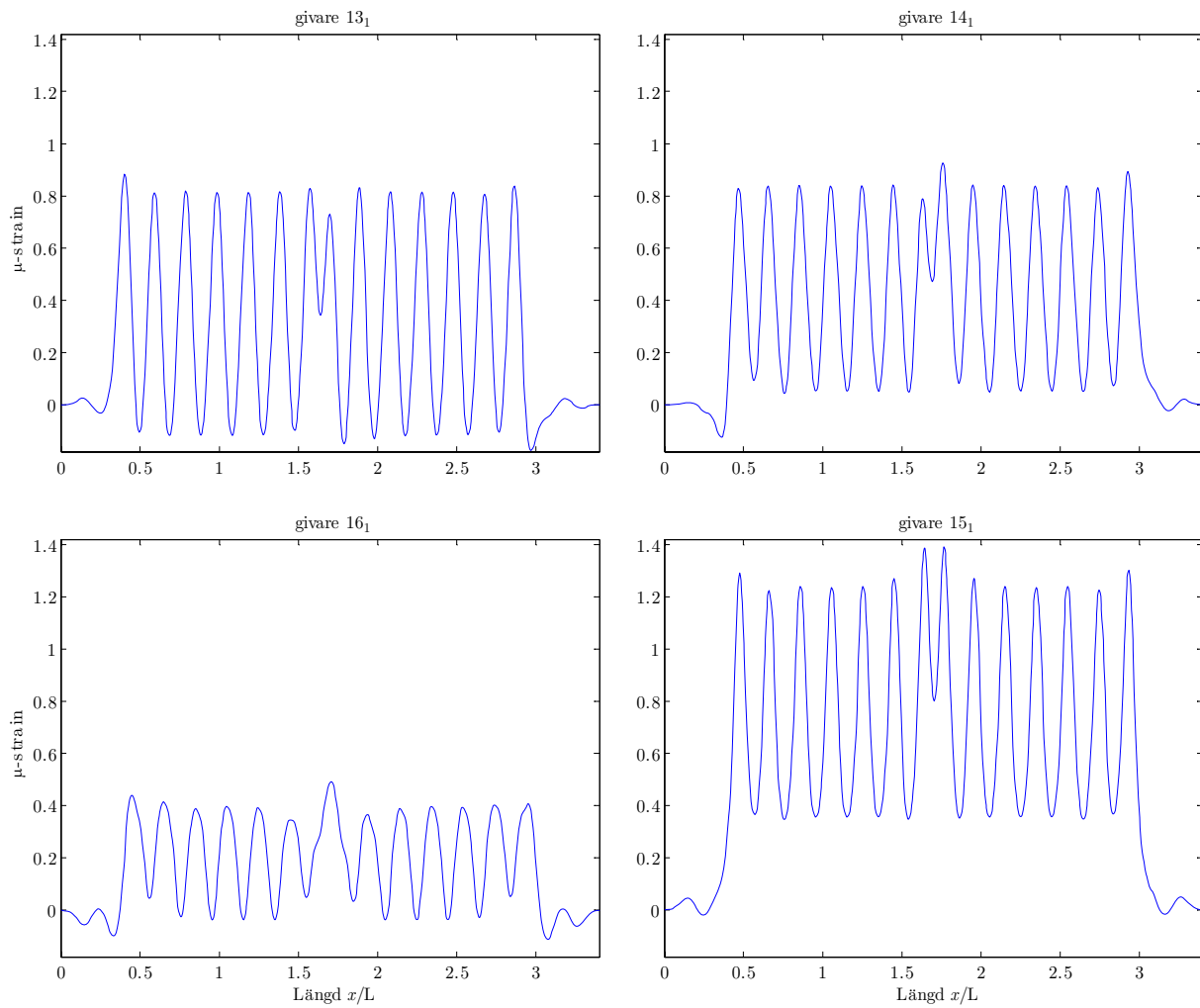


Figur B.2: Längsgående armeringstøjningar vid anfangen, trafiklast X60 (12 vagnar, 20 ton/axel, passerar på spår närmast givare 3<sub>1</sub>, 4<sub>1</sub> och 12<sub>1</sub>).

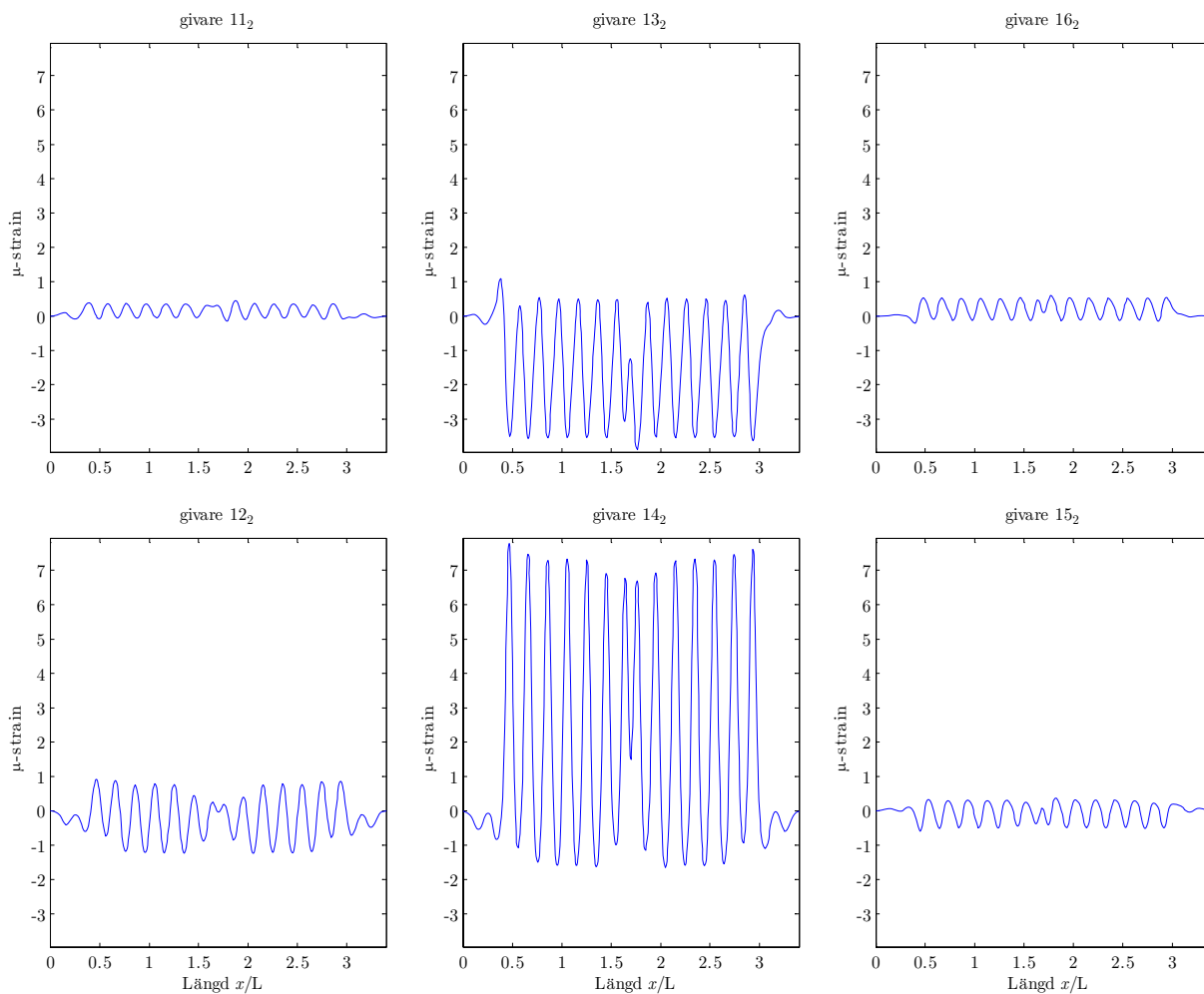




Figur B.3: Längsgående armeringstøjningar vid hjässa och fjärdedelspunkt, trafiklast X60 (12 vagnar, 20 ton/axel, passerar på spår närmast givare 7<sub>1</sub> och 10<sub>1</sub>).



Figur B.4: Tvärgående armeringstörningar vid hjässa och fjärdedelspunkt, trafiklast X60 (12 vagnar, 20 ton/axel, passerar på spår närmast givare 14<sub>1</sub> och 15<sub>1</sub>).



Figur B.5: Armeringstøjningar vid hjässa och fjärdedelspunkt, trafiklast X60 (12 vagnar, 20 ton/axel, passerar på spår närmast givare 13<sub>2</sub>, och 14<sub>2</sub>). Givare 11<sub>2</sub> – 14<sub>2</sub> mäter längsgående töjning, givare 15<sub>2</sub> och 16<sub>2</sub> tvärgående töjning.