



**KTH Architecture and
the Built Environment**

Gamla Årstabron

Sammanställning av töjningsmätningar
utförda 2009-06-23



Brobyggnad

KTH – Brinellvägen 34, SE-100 44 Stockholm
Tel: 08-790 79 58, Fax: 08-21 69 49
www.byv.kth.se/avd/bro

©Andreas Andersson 2009
Royal Institute of Technology (KTH)
Department of Civil and Architectural Engineering
Division of Structural Design and Bridges
Stockholm, Sweden, 2009

Sammanfattning

I föreliggande rapport redovisas analyser av töjningsmätningar på gamla Årstabrons båge 2, efter utförd förstärkning av bågen. Mätningarna utfördes den 23 juni 2009, tidigare mätningar under olika förstärkningsetapper av samma båge har utförts under 2007 och 2008.

Syftet med mätningarna har varit att verifiera brons verkningssätt under olika förstärknings-etapper för att säkerställa brons säkerhet och upprättade beräkningsmodellens giltighet. Utförda analyser av uppmätta mätningar visar att den förstärkta bron fungerar som avsett under vanlig trafikbelastning, dvs. den trafik som dagligen passerar bron. Likt tidigare mätningar motsvarar tilläggsspänningen i armeringen av trafiklast endast ca. 1 MPa. En jämförelse mot upprättade beräkningsmodeller visar att förstärkningen tar något mer kraft än förväntat. Detta anses vara gynnsamt, eftersom förstärkningen är överstark i förhållande till den ursprungliga konstruktionen som då avlastas. Bättre överensstämmelse mellan teoretiska beräkningar och mätningar erhålls för givare placerade i den östra bågstrimlan, jämfört med den västra sidan. Orsaken till detta är inte helt klarlagd, men kan bero på skillnader i utformning mellan den östra och västra sidan. Utökade kunskaper om den utförda förstärkningen kan erhållas genom fortsatta parameteranalyser av beräkningsmodellen, i kombination med ytterligare indata från utförd entreprenad.

Det bör betonas att utförda analyser avser brukslaster, dvs. den trafik som dagligen passerar bron. För säkerställande av brons bärförmåga i brottgränstillstånd bör denna baseras på utförda materialprovningar, dock lämpligen med en beräkningsmodell kalibrerad för brukslaster.

Stockholm i juni 2009



Andreas Andersson

Innehåll

Sammanfattning	i
1 Instrumentering	1
1.1 Omfattning och syfte	1
1.2 Givarplacering och datainsamling	1
2 Resultat	5
2.1 Beräkningsmodell	5
2.2 Töjningsmätningar	6
2.2.1 Signalkvalitet och signalbehandling	6
2.2.2 Pendeltåg X60	8
2.2.3 Fjärrtåg X2, östra spåret.	11
2.2.4 Övriga tågpassager	12
3 Slutsatser	15
A Mätningar 2009-06-23	17
A.1 Mätschema.	17
B Mätdata	19
B.1 Filttrade mätsignaler, pendeltåg X60 (data D19).	19
B.2 Filttrade mätsignaler, fjärrtåg X2 (data D2)	21

1 Instrumentering

1.1 Omfattning och syfte

I föreliggande rapport redovisas resultat från töjningsmätningar på gamla Årstabrons båge 2. Mätningarna utfördes den 23 juni 2009 efter färdigställda förstärkningar. Mätningarna omfattar tilläggs-spänningar av trafiklaster i syfte att verifiera brons verkningssätt efter förstärkning. Mätningarna jämförs med förväntade resultat från de beräkningsmodeller som ligger till grund för förstärkningens utformning.

Tidigare mätningar har utförts på valv, dels för oförstärkt bro, dels under olika förstärknings-etapper. Under olika etapper har mätningar utförts i både ursprunglig konstruktion och förstärkta delar. I föreliggande är samtliga givare placerade i förstärkta områden.

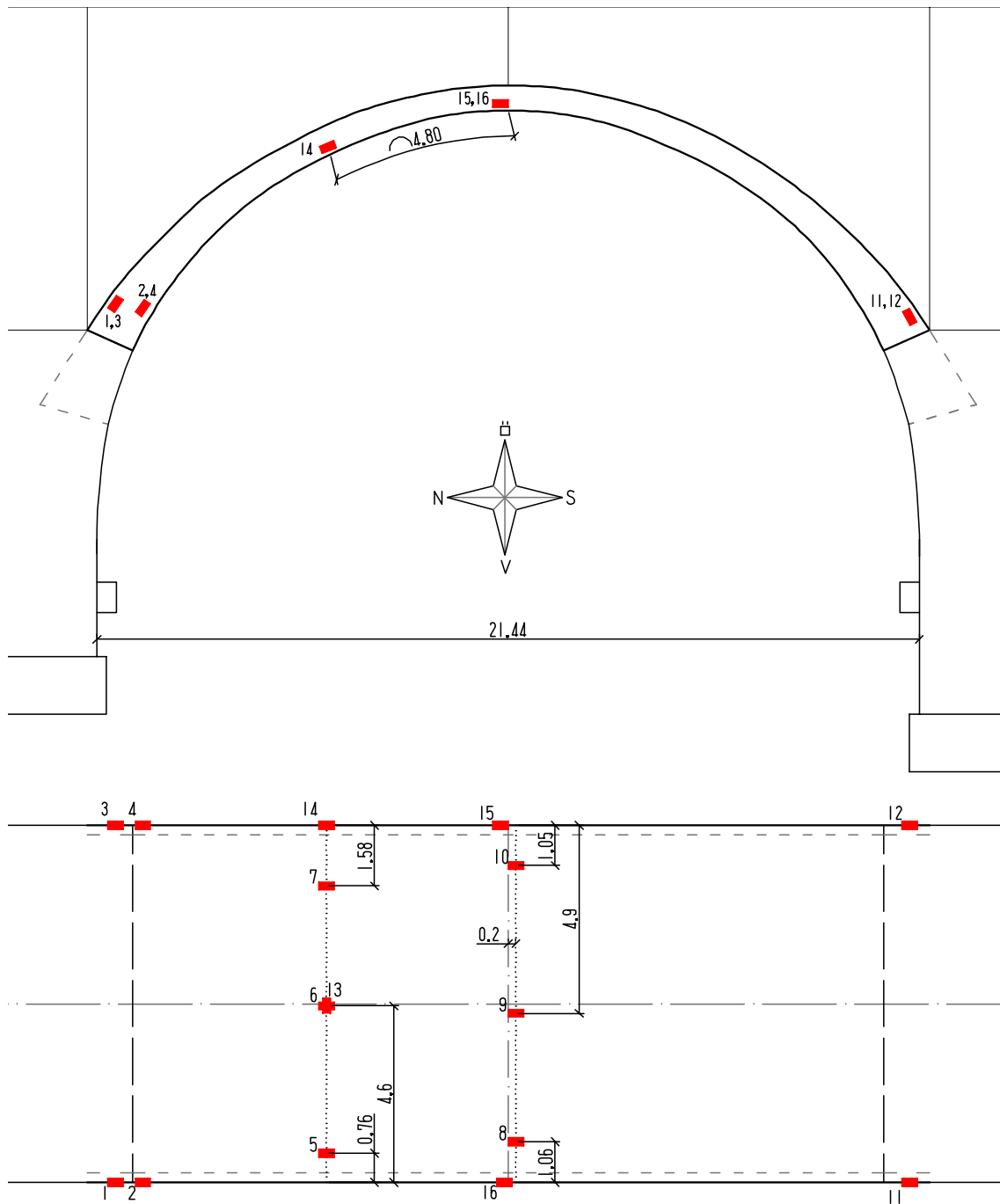
1.2 Givarplacering och datainsamling

Instrumenteringen på båge 2 omfattar totalt 16 trådtöjningsgivare¹, samtliga placerade på armering i pågjuten förstärkning. Instrumenteringen har utförts av Gerard James, Projektengagemang i Stockholm AB. Givarnas placering framgår av Figur 1.2, Figur 1.3 och Figur 1.4. Samtliga givare mäter på längsgående armering, undantaget givare 13 som mäter tvärgående armeringstöjning. Givare 5 – 10 samt 13 är placerade på bågens undersida (förstärkning fas 3), övriga är placerade på förstärkta bågstrimlor (förstärkning fas 1 och fas 2).

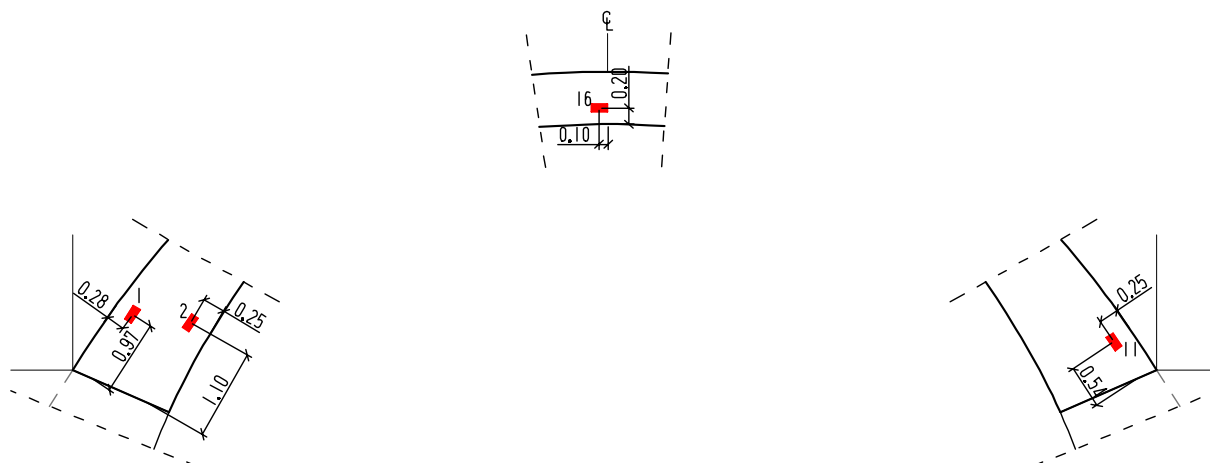


Figur 1.1: Instrumenterade givare, a) givare 14 i fjärdedelspunkten på den östra bågstrimlan, b) detalj av givare 16, i hjässan på den västra bågstrimlan.

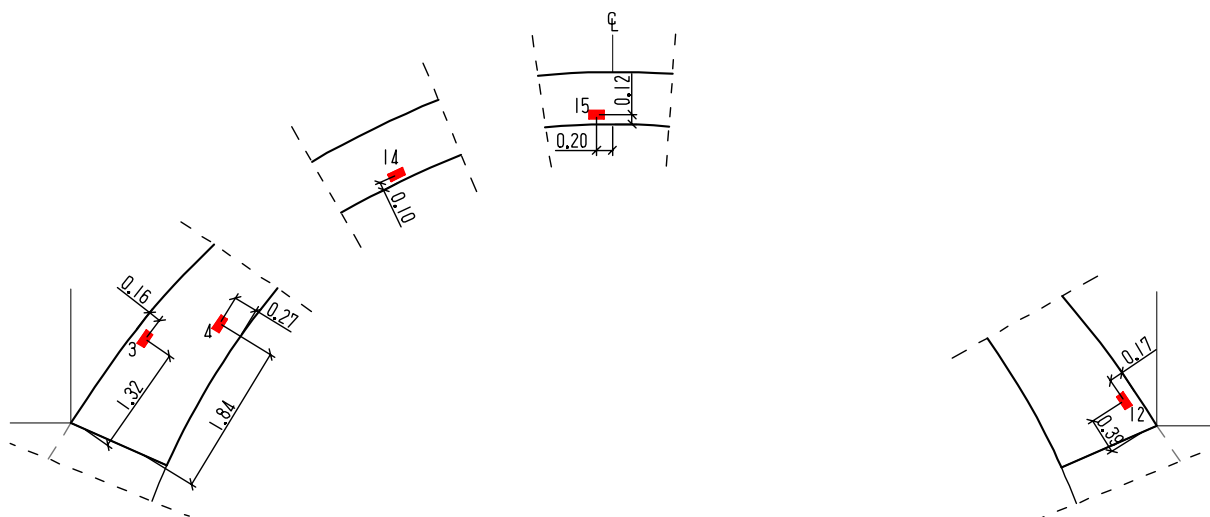
¹ samtliga givare är halvbyggor av fabrikat HBM K-XY31-6/120-3 som är temperaturkompenserade för stål med längdutvidgningskoefficienten $10.8 \cdot 10^{-6} / ^\circ \text{C}$. Givarnas mätlängd är 6 mm.



Figur 1.2: Placering av givare på båge 2, elevation och plan undersida båge.



Figur 1.3: Placering av givare på båge 2, elevation detalj av givare på den västra bågstrimlan.



Figur 1.4: Placering av givare på båge 2, elevation detalj av givare på den östra bågstrimlan.

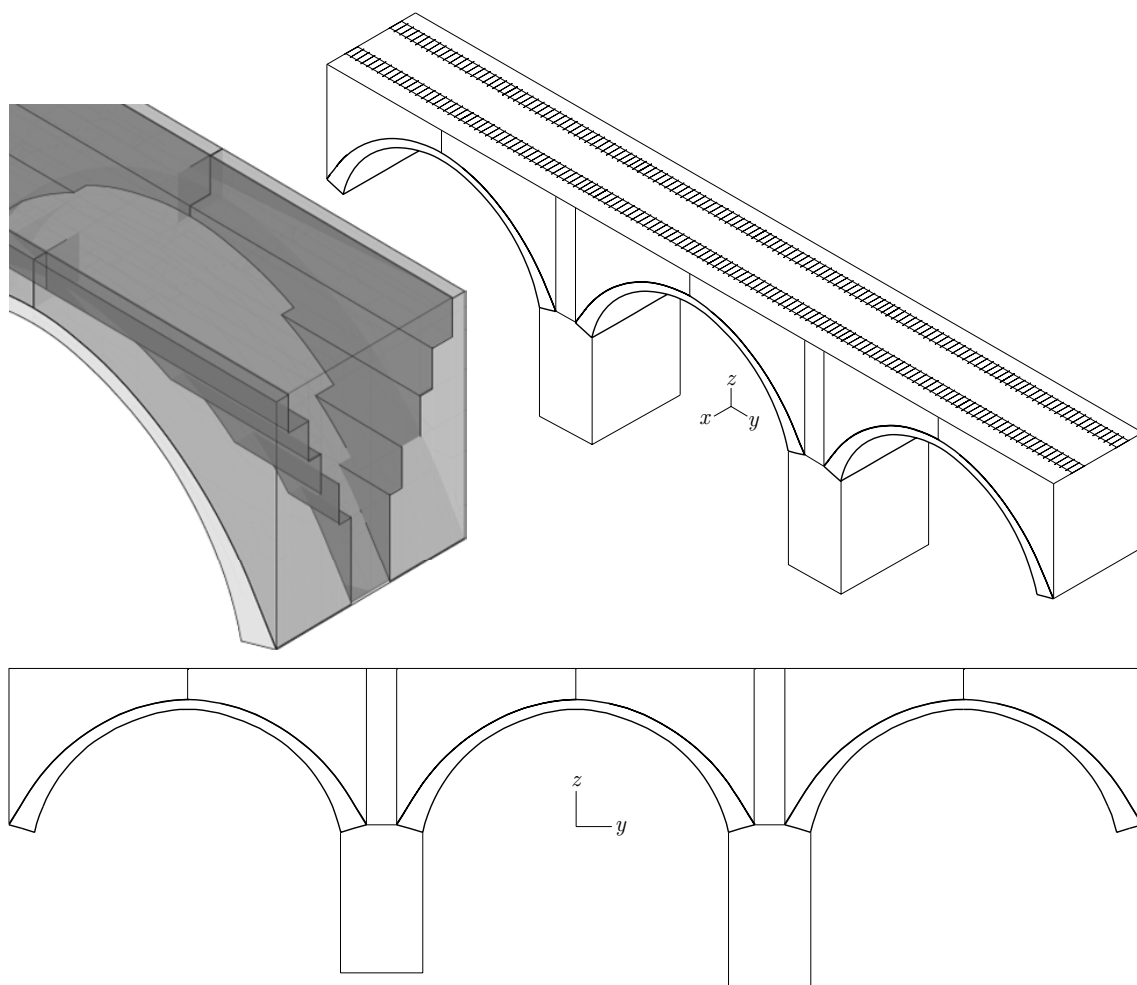
Mätningarna utfördes med en A/D omvandlare av typ HBM MGCPlus med 24 bit upplösning. Data samlades in kontinuerligt från kl. 09:40 – 11:50 med en samplingsfrekvens på 400 Hz. För att reducera brusnivåer användes ett analogt Bessel lågpassfilter med filtergränsen 20 Hz.

2 Resultat

2.1 Beräkningsmodell

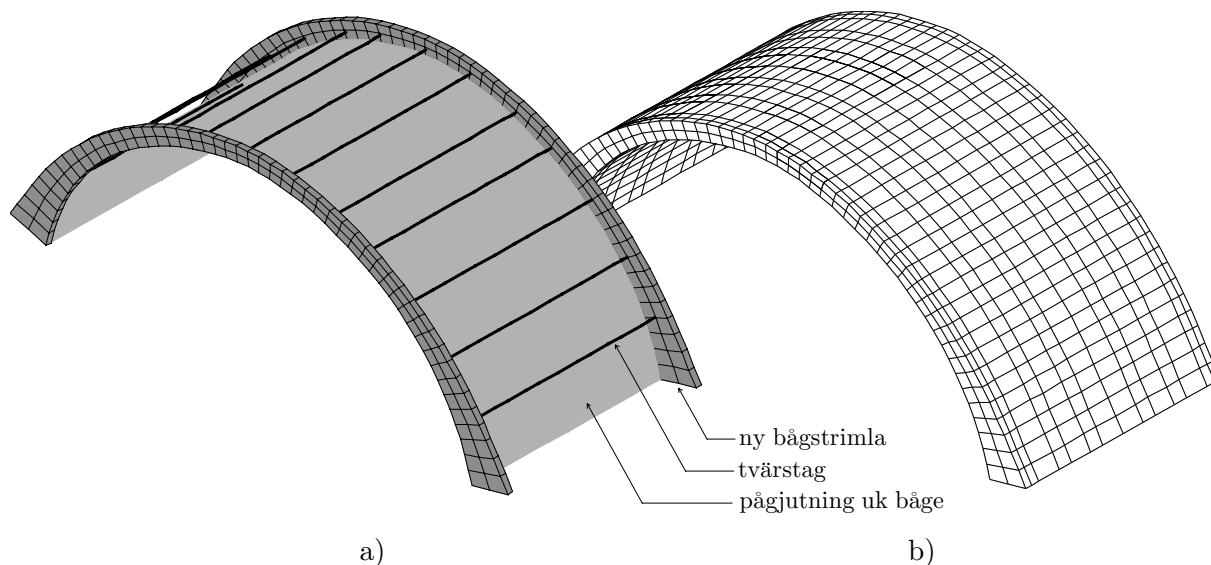
Jämförande beräkningar har utförts för att avgöra om resultaten från töjningsmätningarna ger förväntade resultat. Beräkningsmodellen består av en 3D FE-modell där fyllning, båge och sidomurar utgörs av volymselement, Figur 2.1. Modellen har tidigare kalibrerats och uppvisat god överensstämmelse mot töjningsmätningar utförda 2005. P.g.a. modellens storlek studeras endast 3 spann, motsvarande båge 1 – 3. Eftersom responsen från töjningsmätningarna visar på låga spänningar, analyseras modellen helt linjärelastiskt. Influenslinjer beräknas i punkter motsvarande töjningsgivarnas placeringar, varvid responsen från godtyckliga trafiklaster kan beräknas.

För studerade brukslaster medräknas full samverkan mellan såväl sidomurar som fyllning, eftersom det visat bäst överensstämmelse mot tidigare mätningar. För beräkningar i brottgränstillstånd betraktas dessa delar främst som yttre verkande last. Betongens E -modul i ursprunglig konstruktion antas till 30 GPa. Fyllningen antas ha E -modulen 100 MPa och tvärkontraktionen 0.38.



Figur 2.1: 3D FE-modell av 3 spann.

Förstärkningarna på båge 2 modelleras enligt Figur 2.2. Nya bågstrimlor, fas 1 och fas 2, modelleras med volymselement med armering som inbäddade stånelement. Tvärstagen efterspänns efter att båda bågstrimlorna är gjutna. Pågjutning undersida båge modelleras med skalelement med inbäddad armering $\phi 16s100$ längsled och $\phi 12s100$ tvärled. Pågjutningen antas vara 100 mm och betongens E -modul 35 GPa.



Figur 2.2: Detalj av båge 2, a) förstärkningsetapper, b) ursprunglig båge.

2.2 Töjningsmätningar

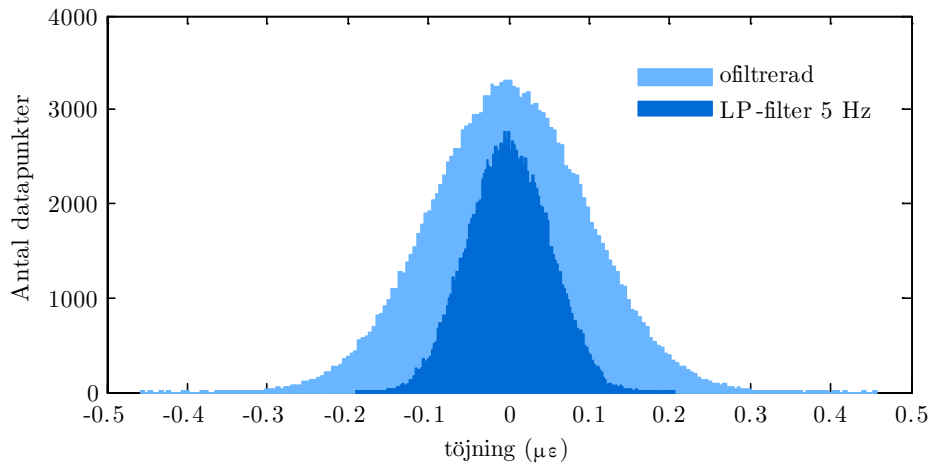
I föreliggande rapport presenteras resultat från töjningsmätningarna utförda 23 juni 2009 avseende slutlig förstärkning av båge 2. Tidigare mätningar efter gjutning av den östra bågstrimlan utfördes 21 januari 2008 och efter gjutning av den västra bågstrimlan den 26 mars 2008. Båda dessa delar är således mer än 1 år gamla.

2.2.1 Signalkvalitet och signalbehandling

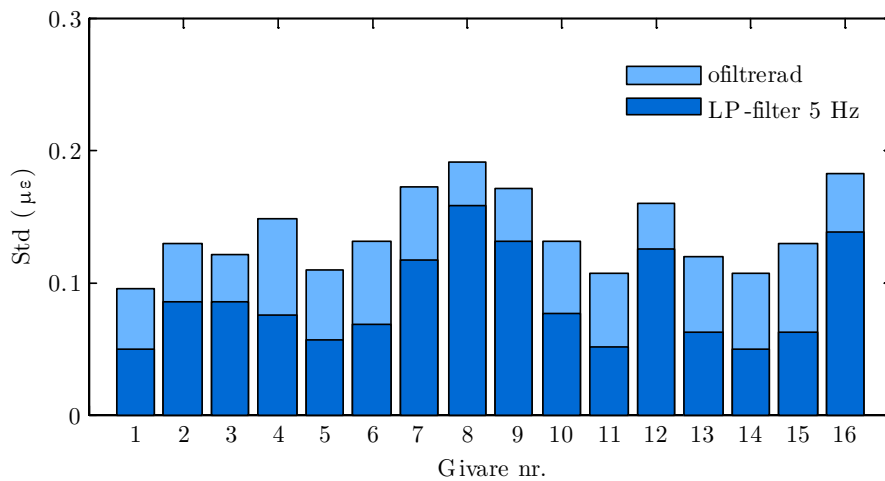
Mätningarna utförs under vanlig trafik där tilläggsspänningar i armeringen beräknas från töjningsgivare. Motsvarande spänningsnivå är ca. 1 MPa. För att utföra relevanta analyser av insamlad mätdata är god signalkvalitet av stor vikt. Förväntad respons domineras av det som kan beräknas från en statisk analys. En analys av bakgrundsbruset visar i Figur 2.3 att detta kan antas vara normalfördelat. Tidigare analyser av frekvensinnehållet under tågpassager har visat låga energinivåer över 4 Hz vid aktuella hastigheter och tågkonfigurationer. Samtliga signaler filtreras därför i efterhand med ett 8:e ordningens digitalt Butterworth lågpas-filter med filtergränsen 5 Hz. Syftet är att minimera brusinnehållet samtidigt som brons respons från trafiklast bibehålls.

I Figur 2.4 visas standardavvikelsen i bakgrundsbruset från mätning D19. Analysen baseras på ca. 7 min bakgrundsbrus, motsvarande ca. 200 000 mätpunkter per kanal. Standardavvikelsen efter filtrering är ca. 0.1 microstrain ($\mu\epsilon$), motsvarande ca. 0.02 MPa.

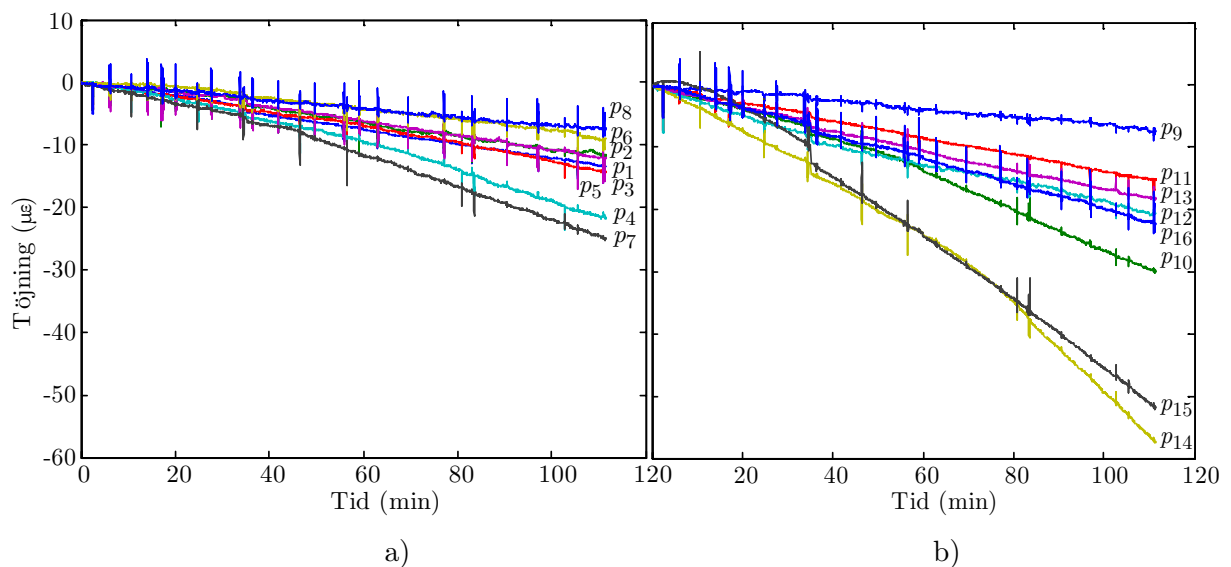
I Figur 2.5 visas en översikt av samtliga mätningar mellan kl. 9:40 – 11:50. Enskilda "spikar" i signalerna är tågpassager. Givare 14 och 15 uppvisar större linjär drift än övriga givare. En möjlig orsak till detta kan vara att dessa givare var utsatta för direkt solljus under mätperioden. Dess inverkan under enskilda tågöverfarter bedöms dock vara försumbar.



Figur 2.3: Mätning D19, histogram av bakgrundsbrus från givare 1, 5 Hz digitalt Butterworth LP filter.

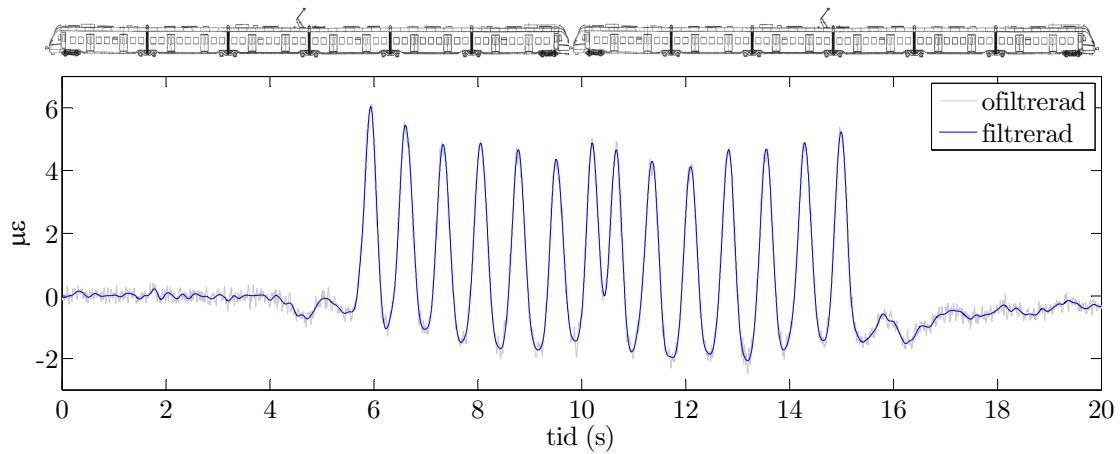


Figur 2.4: Mätning D19, standardavvikelse av bakgrundsbrus, med och utan 5 Hz digitalt Butterworth LP filter.

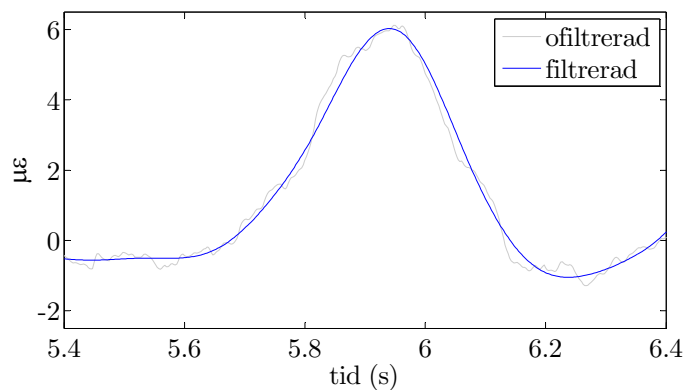


Figur 2.5: Variation i givarna under mätperioden, a) givare 1-8, b) givare 9-16. Spikar i signalerna är tågpassager.

I Figur 2.6 visas responsen i givare 16, placerad i hjässan på den västra bågstrimlan, under en passage av ett X60 pendeltåg på samma spår. I Figur 2.7 visas en detalj av den första boggi-passagen, vilken visar att den filtrerade signalen återger responsen som till form och amplitud väl efterliknar den ofiltrerade signalen.



Figur 2.6: Pendeltåg X60 på västra spåret, givare 16 från mätning D19, jämförelse mellan filtrerad och ofiltrerad signal.



Figur 2.7: Pendeltåg X60 på västra spåret, givare 16 från mätning D19, jämförelse mellan filtrerad och ofiltrerad signal, detalj av första boggi-passagen.

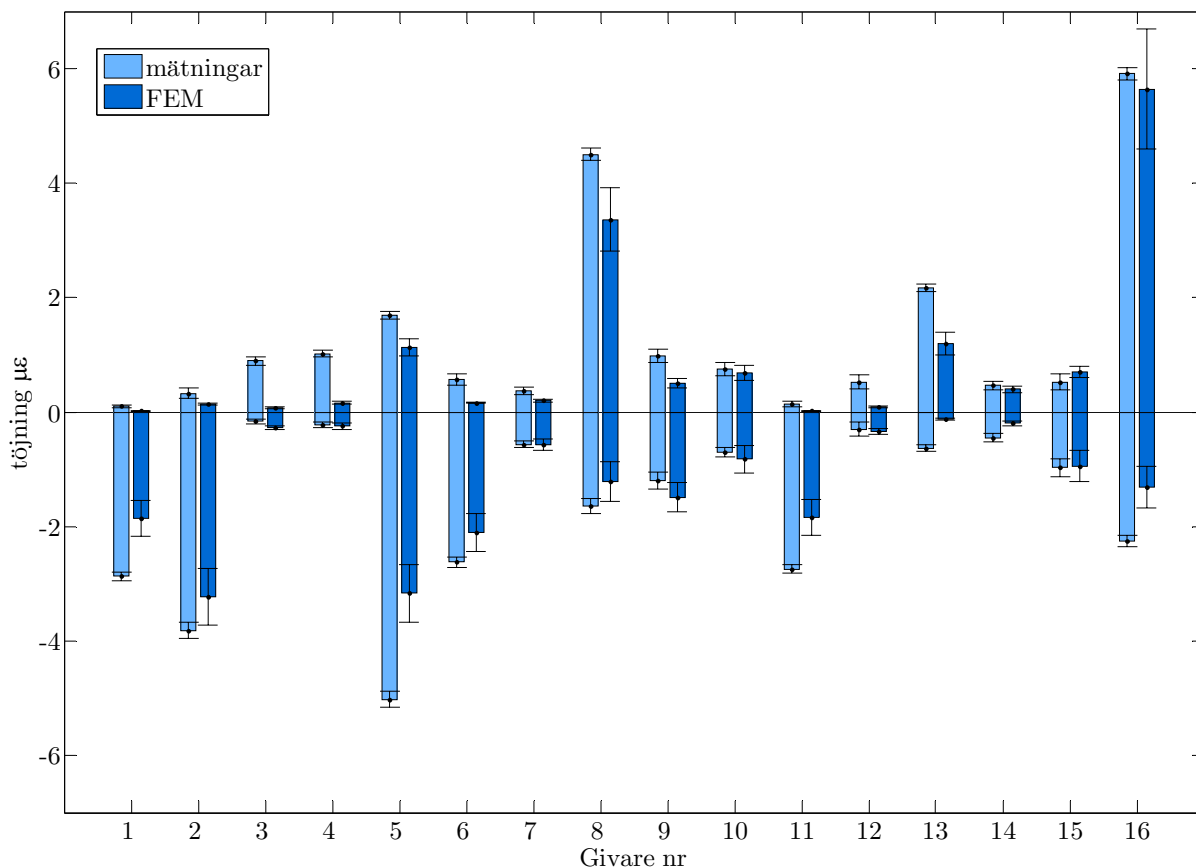
2.2.2 Pendeltåg X60

Under mätperioden registrerades totalt 18 passager med pendeltåg X60, den på senare år dominerande tågtypen för pendelstågstrafik på sträckan. Av dessa framfördes samtliga på det västra spåret, undantaget en enskild passage, benämnd mätning D20. I Figur 2.8 visas statistik på max- och mintöjning från de 17 mätningar på västra spåret samt motsvarande beräkning med FE-modellen. För mätningarna anges spridningsmättet som ± 1 standardavvikelse från medelvärdet, särskilt från dragtöjning (+) och trycktöjning (-). Från FE-modellen anger istället spridningsmättet intervallet från 0-100% personlast i samtliga vagnar, staplarna anger 50% personlast.

Resultaten visar att aktuell FE-modell återger brons förhållandevis komplexa verknings sätt med rimlig noggrannhet. Generellt uppmäts större påkänning än vad FE-modellen förespar. Troliga anledningar till detta kan vara att den verkliga strukturen är styvare än beräkningsmodellen och därför tar åt sig mer last. Detta anses dock vara positivt, eftersom förstärkningen då bör avlasta den ursprungliga konstruktionen mer än förväntat. Den till sitt

belopp största skillnaden återfinns i givare 5 och givare 8, placerade på undersida båge i fjärdedelspunkten respektive hjässan, ca. 1 m från den västra bågstrimlan. den västra bågstrimlan antas i FE-modellen ha bredden 250 mm, i verkligheten varierade dock bredden p.g.a. dålig betong i den ursprungliga bron. En ökad styvhet i bågstrimlan kan innebära att en större andel av lasten tas upp av angränsande områden. Liknande ökning påvisas även i givare 1, 2 och 11 i den västra bågstrimlans anfang. Dock visar givare 16 i bågstrimlans hjässa, stor överensstämmelse med FE-modellen.

För att med större säkerhet förklara orsaken till skillnaderna mellan mätningarna och beräkningarna krävs dock omfattande parameteranalyser, om möjligt även med uppdaterad information kring verklig pågjutningstjocklek och materialegenskaper.



Figur 2.8: Pendeltåg X60 på västra spåret, jämförelse mellan mätningar och beräkningar.

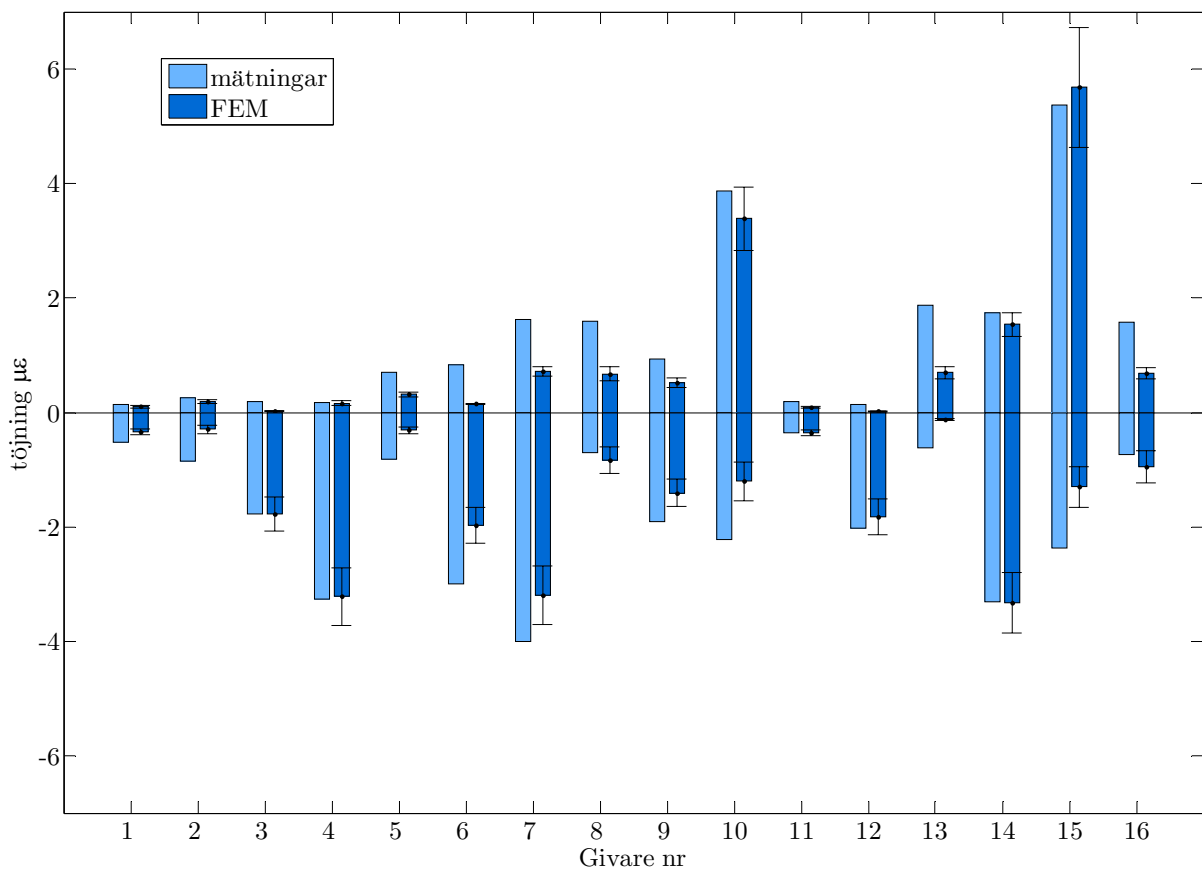
I Tabell 2.1 redovisas variationskoefficienten (standardavvikelse/medelvärde) baserat på de 17 studerande tågpassagerarna. För givare med relevant storleksordning i respons är variationskoefficienten ca. 2-12%, vilket i många fall är lägre än möjlig variation i personlast och i genomsnitt motsvarar en standardavvikelse i samma storleksordning som bakgrundsbruset.

Tabell 2.1: Variationskoefficient för givare 1-16, värden med låg respons är markerade i grått.

givare:	1	2	3	4	5	6	7	8
drag (+)	0.26	0.27	0.09	0.06	0.04	0.18	0.16	0.02
tryck (-)	0.03	0.04	0.27	0.23	0.03	0.04	0.11	0.08
givare:	9	10	11	12	13	14	15	16
drag (+)	0.11	0.15	0.37	0.24	0.03	0.17	0.26	0.02
tryck (-)	0.12	0.11	0.03	0.42	0.09	0.17	0.17	0.05

Baserat på kända avstånd mellan varje boggipar, har tågets fart uppskattats. för passage på det västra spåret baseras denna skattning av data från givare 5, 8, 9, 13 och 16 eftersom dessa ger tydliga responser från varje boggipar. Resultaten visar att medelhastigheten är ca. 80 km/h, lägsta beräknad till 64 km/h och högsta till 85 km/h. Samtliga givare gav likvärdiga farter. Enligt BVS 583.11 (Banverkets standard för bärighetsberäkning av järnvägsbroar) skulle detta motsvara en dynamisk förstöringsfaktor på ca. 10%. Detta medräknas inte i FE-analyserna. Eftersom mätningar i olika farter ej har utförts föreligger svårighet att särskilja osäkerhet i materialparametrar och randvillkor med dynamiska effekter.

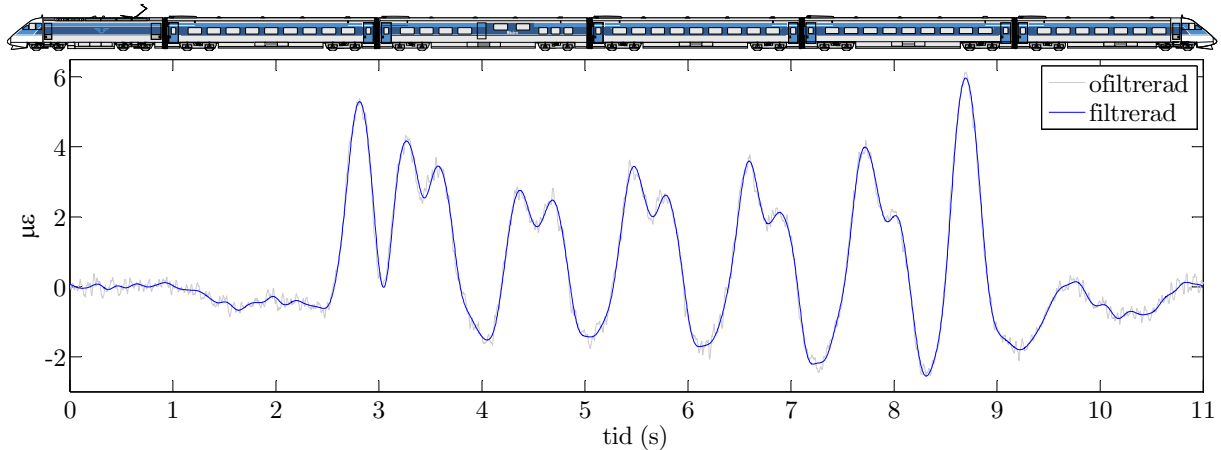
I Figur 2.9 redovisas motsvarande resultat från X60 tåget på östra spåret. Eftersom endast en passage registrerades kan ingen uppskattning om spridning i mätdata utföras. Likt Figur 2.8 visar resultaten i Figur 2.9 större påkänningar i förstärkningarna från mätningarna än vad FE-modellen förutspår. Dock visar samtliga givare i den östra bågstrimlan, givare 3, 4, 12, 14 och 15, mycket god överensstämmelse med beräkningarna. En möjlig orsak kan vara att bredden på den östra bågstrimlan bättre överensstämmer med beräkningsförutsättningarna. En jämförelse mellan Figur 2.8 och Figur 2.9 visar att full symmetri inte föreligger, t.ex. givare 1 ca. 40% större tryckspänning på västra spåret jämfört med givare 4 på östra spåret. Möjliga orsaker är skillnad i placering av givare, att bron går i horisontalkurva över båge 2 men även på skillnader i förstärkning av östra och västra sidan av bron. Sammantaget bedöms dock jämförelsen mellan beräkningar och mätningar vara tillfyllen och förstärkningen synes medverka på avsett vis.



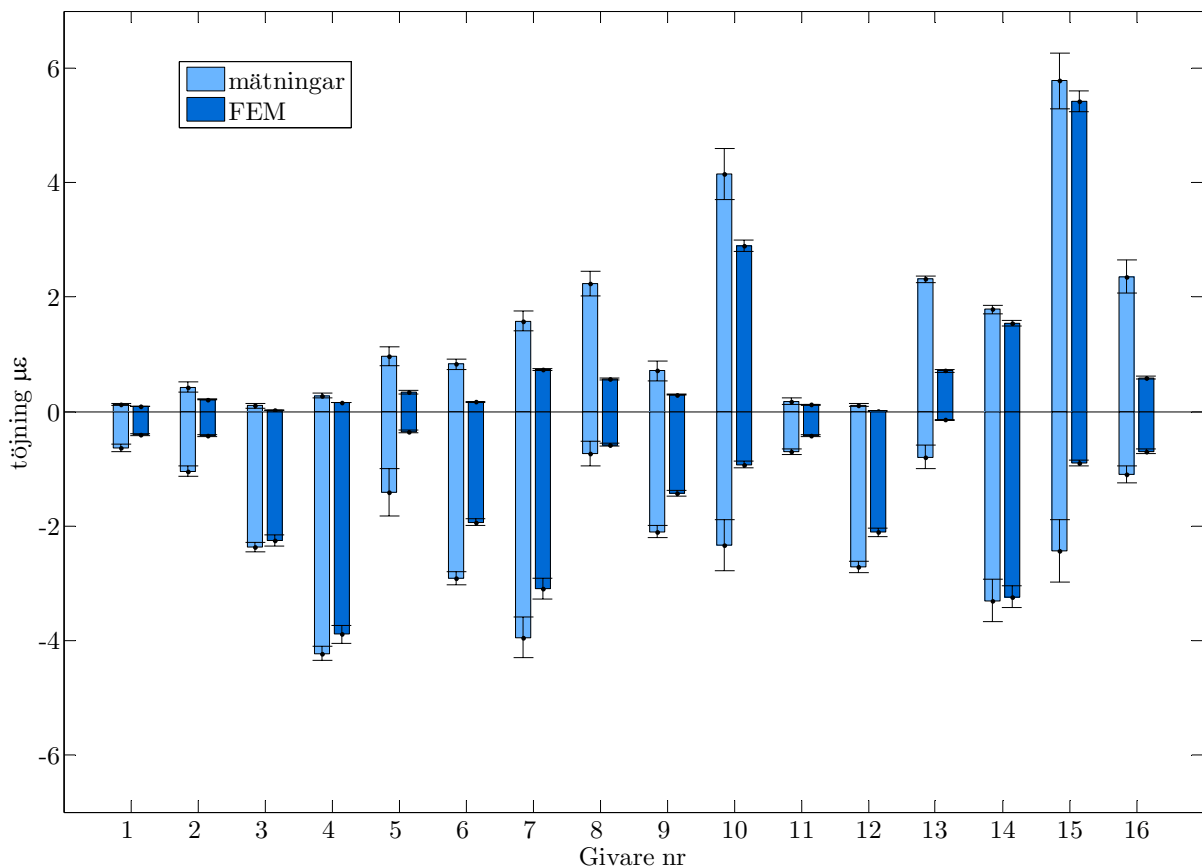
Figur 2.9: Pendeltåg X60 på östra spåret, jämförelse mellan mätningar och beräkningar.

2.2.3 Fjärrtåg X2, östra spåret

Trafiken på gamla Årstabron har under utförda mätningar varit likartad, på västra spåret framförs främst pendeltågstrafik och på östra främst fjärr- och regionaltåg. Enstaka godståg har framförts på båda spåren. De flesta analyserna av responsen på bronns östra sida baseras därför på fjärrtåg av typ X2, vanligen benämnda X2000. Under mätningarna registrerades totalt 5 st överfarter, samtliga på det östra spåret. I Figur 2.10 visas responsen i givare 15 i hjässan på den östra bågstrimlan. Statistiska data redovisas i Figur 2.11.



Figur 2.10: Respons från givare 15 i hjässan på den östra bågstrimlan, passage av ett fjärrtåg av typ X2 med 6 vagnar på östra spåret, från mätning D2.



Figur 2.11: Fjärrtåg X2 på östra spåret, jämförelse mellan mätningar och beräkningar.

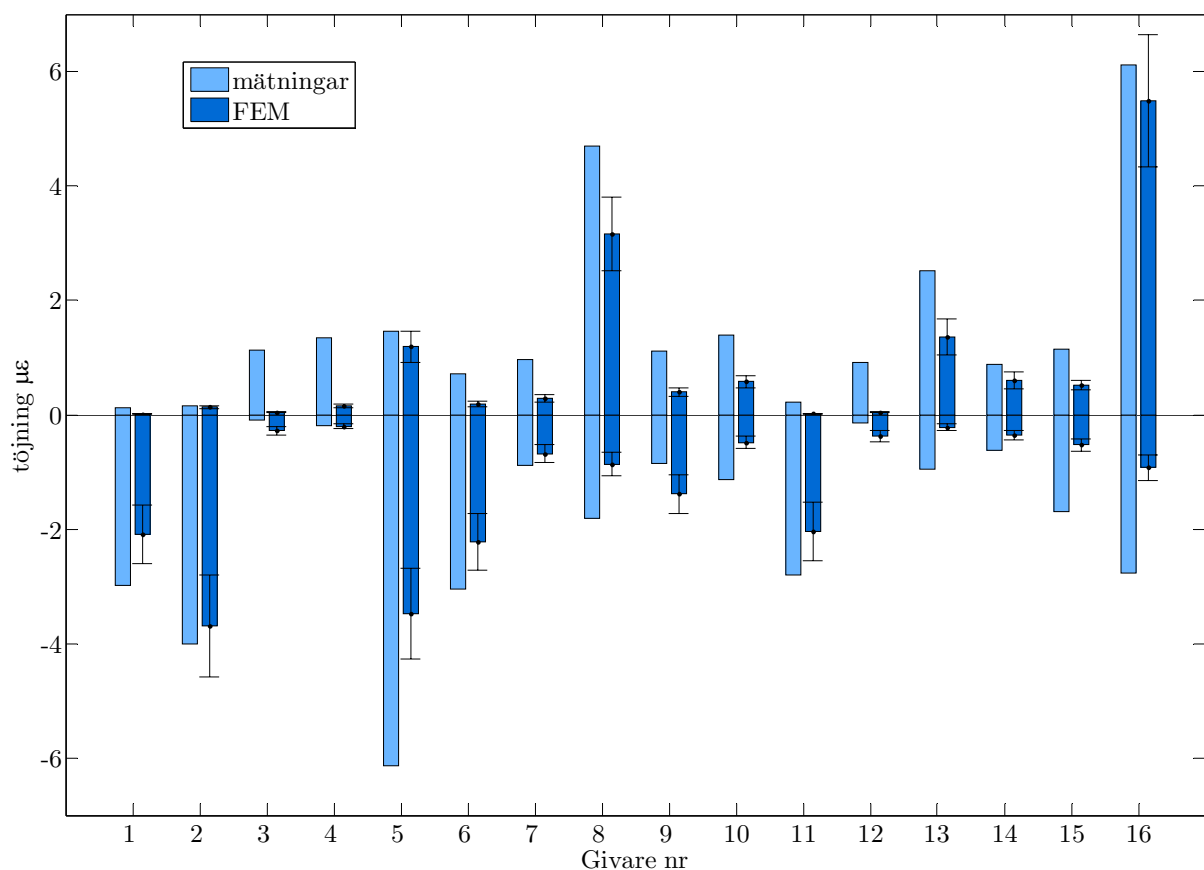
Resultaten i Figur 2.11 visar stor likhet med Figur 2.9, god överensstämmelse erhålls för givare i den östra bågstrimlan samtidigt som uppmätt töjning är större i övriga delar jämfört med FE-modellen.

Skillnaden mellan inbördes mätningar är större än för motsvarande analys av X60-tåg, detta beror sannolikt på att X2-tågen kan bestå av 4-6 vagnar, till skillnad mot X60-tågen som alltid består av 2 vagnar. FE-beräkningarna är utförda för X2-tåg med 6 vagnar.

2.2.4 Övriga tågpassager

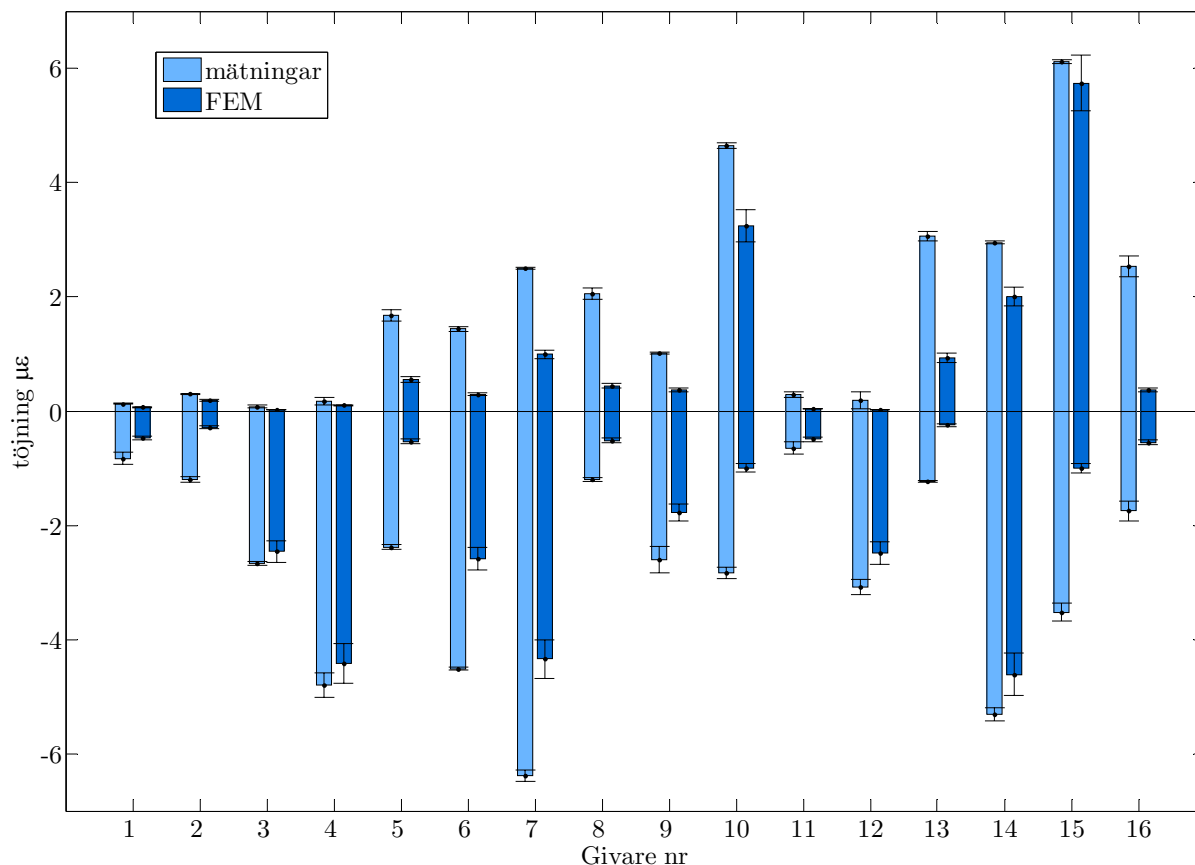
I Figur 2.12, Figur 2.13 och Figur 2.14 nedan redovisas resultat från några enskilda tågpassager, där data inte är tillräcklig för att bedöma statistisk kvalitet men som ändå bedöms som relevanta.

Resultat från ett pendeltåg av typ X10 på västra spåret visas i Figur 2.12. Anmärkningsvärt stor skillnad mellan beräkningar och mätningar erhålls för givare 5 och 8 på undersida båge ca. 1 m från den västra kanten samt givare 16, i hjässan på den västra bågstrimlan. Orsaken till detta är inte klar även om samma givare uppvisar liknande beteende för pendeltåg X60 på västra spåret, om än i mindre omfattning.



Figur 2.12: Pendeltåg X10 med 8 vagnar på västra spåret, jämförelse mellan mätningar och beräkningar.

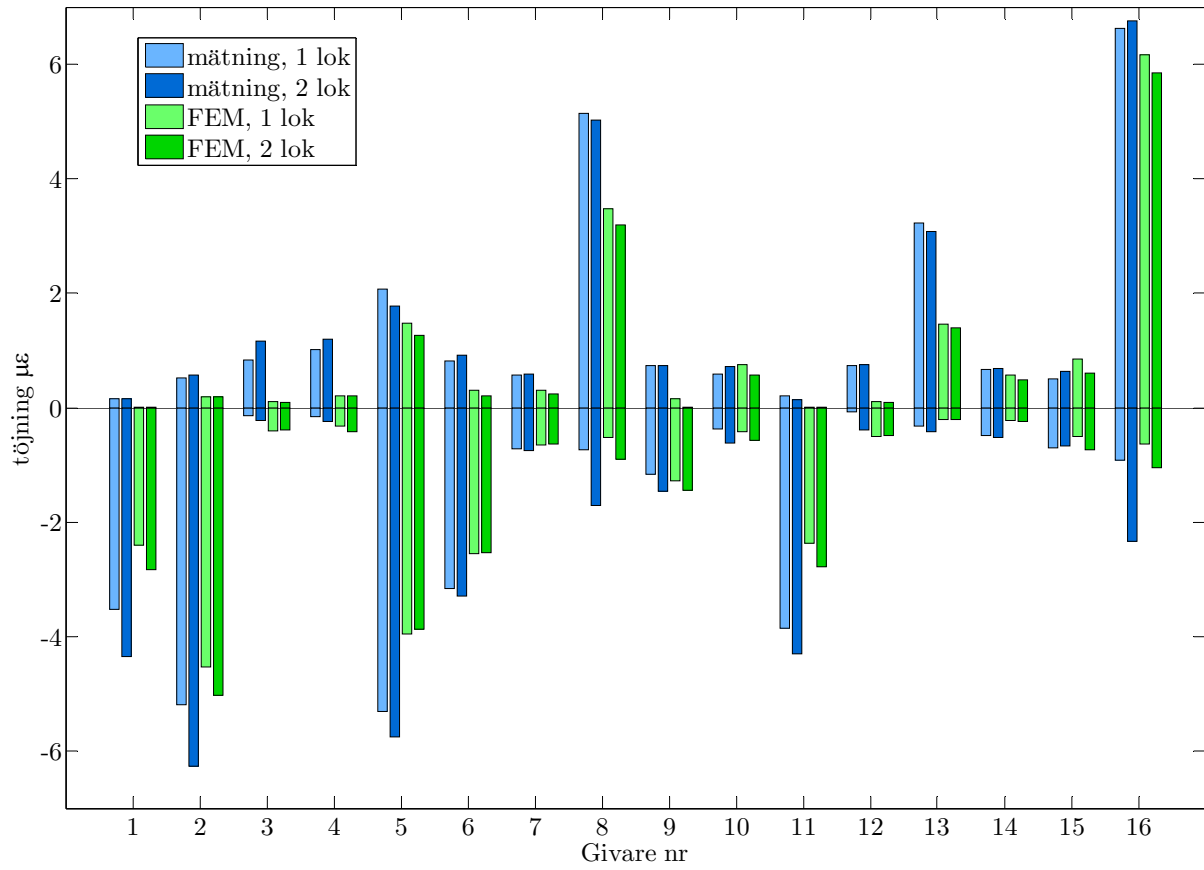
I Figur 2.13 redovisas resultat från regionalståg X40 på östra spåret. Eftersom endast två passager har registrerats indikerar ingiven standardavvikelse avvikelser dessa emellan snarare än ett statistiskt mått. Även för denna tågtyp underskattar FE-modellen uppmätt respons, även om god överensstämmelse nås för givarna i den östra bågstrimlan. Beräkningarna är utförda med ett tågset bestående av 3+2 vagnar.



Figur 2.13: Regionalståg X40 på östra spåret, jämförelse mellan mätningar och beräkningar.

Två godståg registrerades under mätningarna, båda på västra spåret. Eftersom godståg ofta består av vagnar med okänd vikt och axelavstånd studeras endast lokets respons. I det ena fallet bestod tågsetet av 1 RC4-lok, i det andra fallet av två efterföljande RC4-lok. I Figur 2.14 visas resultat från dessa analyser samt motsvarande FE-beräkningar. Egenskaperna hos RC4-loken är väl kända och har liten variation, varför dessa resultat bör vara tillförlitliga trots enskilda tågpassager.

En tydlig skillnad i respons mellan ett och två lok kan urskiljas, både från mätningar och beräkningar. Likt övriga mätningar på västra spåret erhålls störst skillnad för givare 5 och givare 8. Att flera olika tågtyper uppvisar samma karakteristika i mätsignalerna tyder på en entydig skillnad mellan FE-modell och mätningar.



Figur 2.14: RC4-lok på västra spåret, jämförelse mellan mätningar och beräkningar.

3 Slutsatser

Av ovan utförda analyser kan följande slutsatser sammanfattas:

- resultaten visar att den utförda förstärkningen är verksam och fungerar som avsett under aktuell trafiklast,
- uppmätt töjning är i samma storleksordning som tidigare mätningar, motsvarande en tilläggsstress på ca. 1 MPa i armeringen p.g.a. aktuell trafiklast,
- mätningarna uppvisar att förstärkningarna tar något större last än vad teoretiska beräkningar förutspått, detta anses dock gynnsamt då förstärkningen är överstark i förhållande till ursprunglig konstruktion som avlastas,
- bättre överensstämmelse mellan mätningar och beräkningar erhålls för givare instrumenterade i den östra bågstrimlan än för den västra bågstrimlan.

I övrigt kan konstateras att signalernas kvalitet är mycket god vilket bidrar till att minska osäkerheten i uppmätta signaler. Jämförelse mellan samma tågtyp på östra och västra spåret visar viss osymmetri i resultaten. En anledning till detta kan vara olika avstånd i instrumentering, men kan även bero på att bron går i horisontalkurva eller viss osymmetri i förstärkningen mellan östra och västra sidan. Dessa skillnader bedöms dock som marginella och mätningarna visar att förstärkningen fungerar som avsett under aktuella laster. Det bör betonas att huvudsyftet med mätningarna är att verifiera brons verkningssätt under brukslaster, vilket inte ger någon ytterligare information om brons egenskaper i ett brottgränstillstånd.

A Mätningar 2009-06-23

A.1 Mätschema

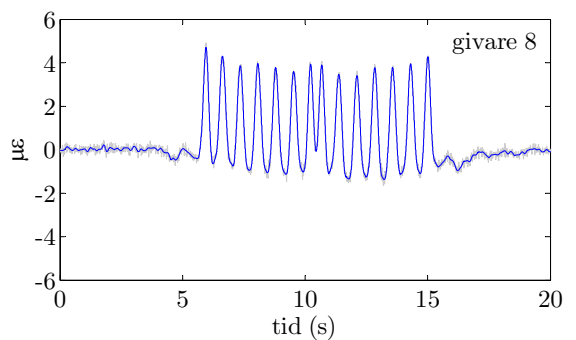
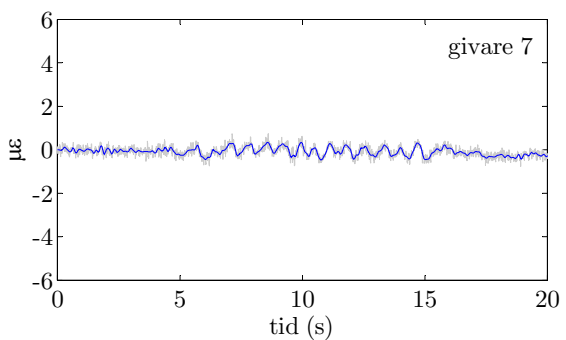
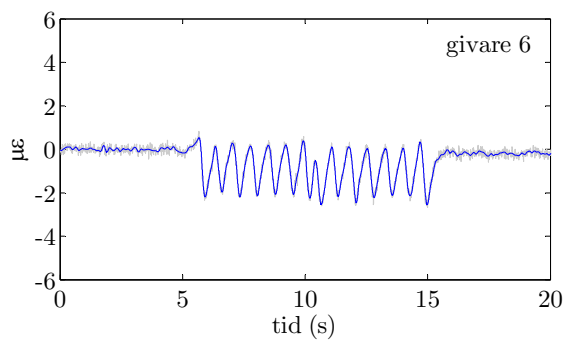
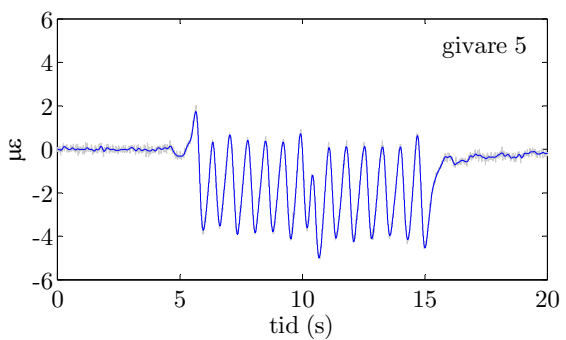
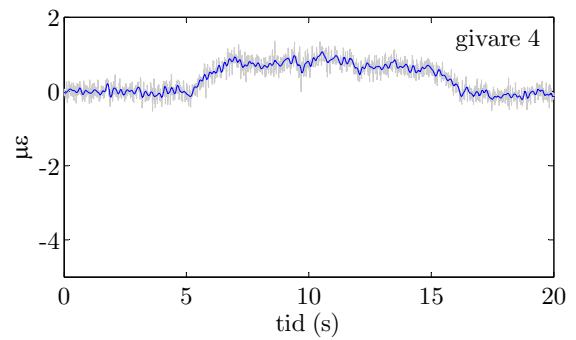
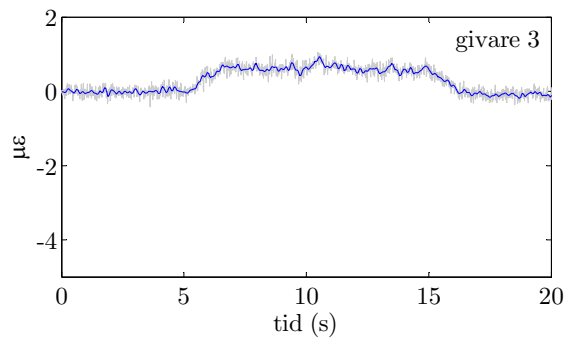
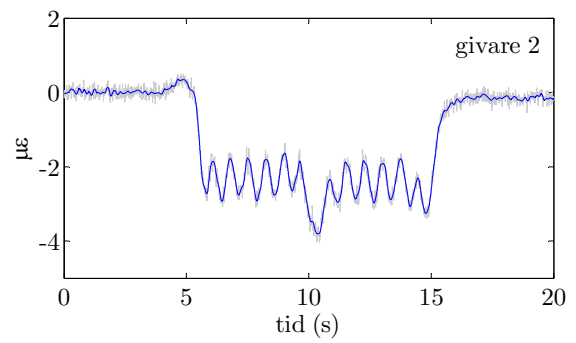
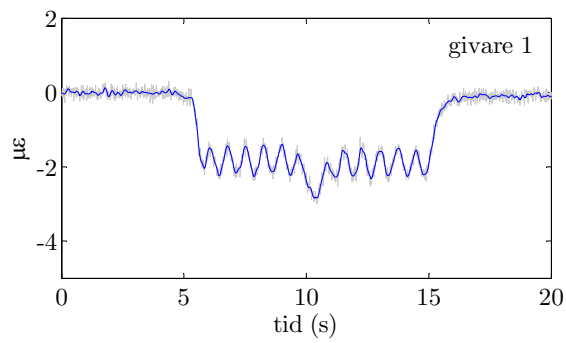
Tabell A.1: Mätschema, registrering av tågpassager.

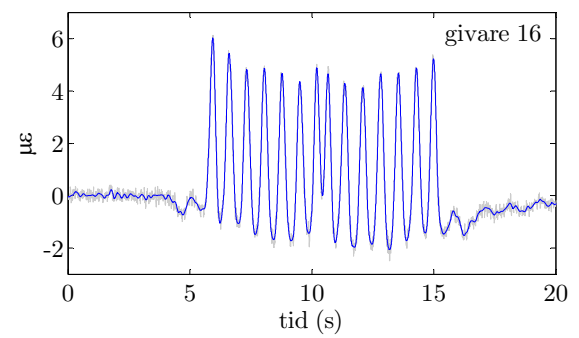
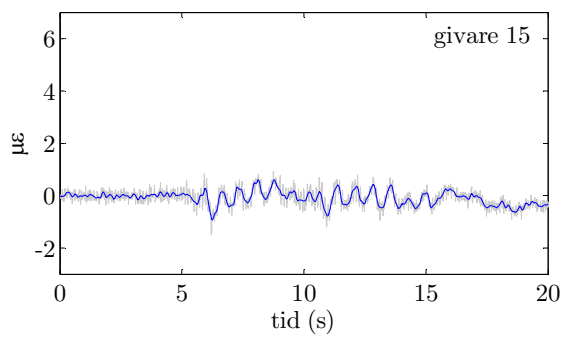
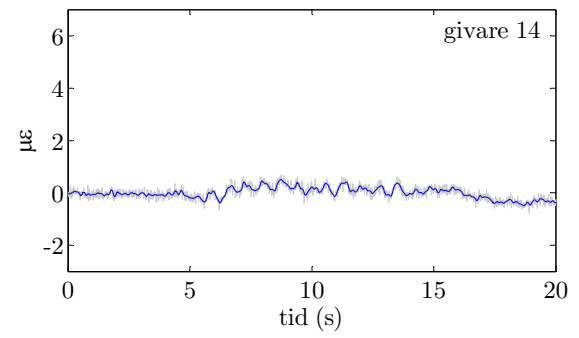
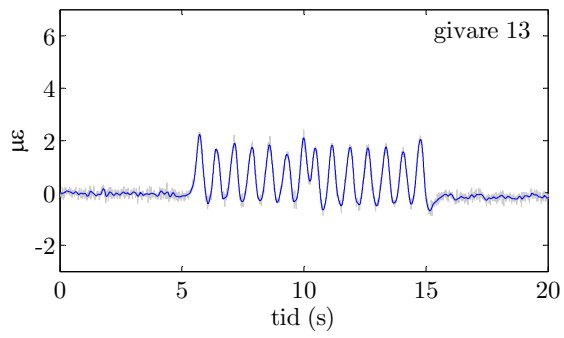
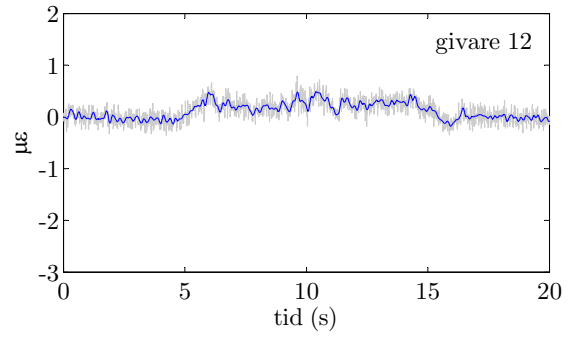
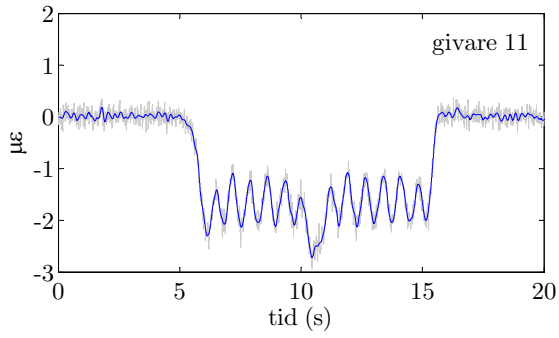
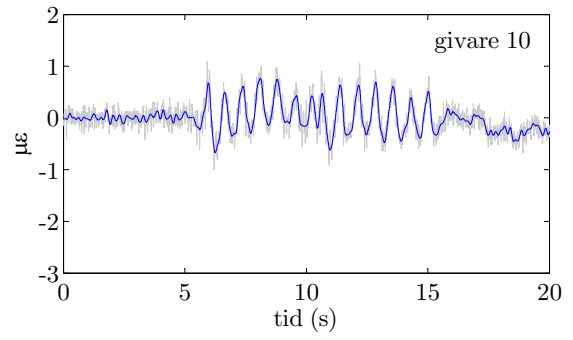
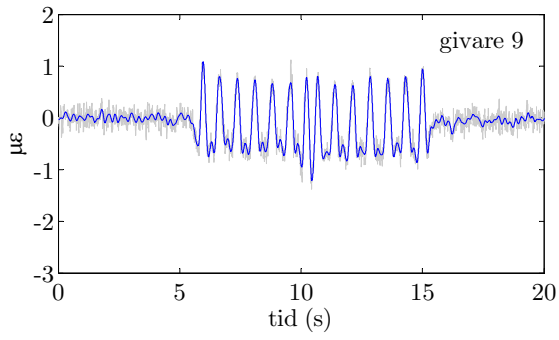
datum: 2009-06-23
etapp: båge 2, efter slutlig förstärkning.
Allmänt: Mätningar utförda med MGCPlus, 400 Hz med 20 Hz Bessel LP filter. Väder: soligt +22 °C, givare på östra sidan delvis direkt i sol.

Tid:	datafil (*.bin)	tågtyp:	antal vagnar:	spår (Ö/V):	notering:
09:39	Test1	X60	2		västra spåret?
09:53	D1	X60	2	v	jordning kontrollerades (hack i signal)
09:58	D2	X2	6	ö	inkl motorvagn
10:01	D3	X60	2	v	
10:06	D4	goods	22	v	2 RC-lok, foto Gerry?
10:08	D5	X60	2	v	
10:13	D6	X2	6	ö	inkl motorvagn
10:16	D7	X60	2	v	
10:23	D8	X60	2	v	
10:24	D9	X2	6	ö	inkl motorvagn
10:32	D10	X60	2	v	
10:38	D11	X60	2	v	
10:43	D12	X40	2+2?	ö	vagnkonfiguration?
10:46	D13	X60	2	v	
10:53	D14	X60	2	v	
10:53	D15	X40	3+2	ö	
10:57	D16	goods	15	v	foto Gerry?
11:02	D17	X60	2	v	
11:08	D18	X60	2	v	
11:16	D19	X60	2	v	
11:20	D20	X60	2	ö	östra spåret?
11:23	D21	X60	2	v	
11:24	D22	X2	2	ö	
11:31	D23	X60	2	v	
11:38	D24	X60	2	v	
11:44	D25	X2	2?	ö	antal vagnar?
11:47	D26	X10	4	v	A+B som en vagn?
11:53	D27	X60	2	v	

B Mätdata

B.1 Filtrerade mätsignaler, pendeltåg X60 (data D19)





B.2 Filtrerade mätsignaler, fjärrtåg X2 (data D2)

