

PM: Bro över Söderström (km 1+83)

Utmattningsanalys baserat på töjningsmätningar, april-maj 2011

Andreas Andersson, KTH Brobyggnad

Sammanfattning

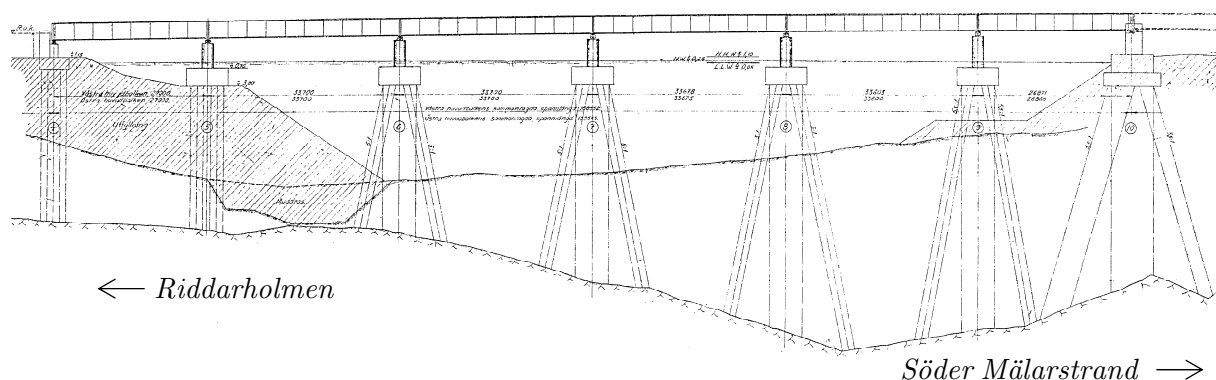
I föreliggande PM redovisas utmattningsanalyser avseende bro över Söderström (km 1+83), baserat på töjningsmätningar utförda under april och maj 2011. Kontinuerliga mätningar har utförts i två omgångar, före och efter bearbetning av kritiska anslutningspunkter på lång- och tvärbalk. Resultaten visar på en betydande ökning av uppskattad livslängd efter bearbetning av anslutningspunkterna. För långbalkarna beräknas en total livslängd på ca. 15 år, motsvarande för tvärbalkarna är ca. 40 år. Baserat på jämförelse mellan tidigare teoretiska analyser, mätningar och inspektioner är det inte osannolikt att en betydligt längre livslängd kan uppnås.

Nyckelord: Utmattningsanalys, töjningsmätningar, geometriska spänningar

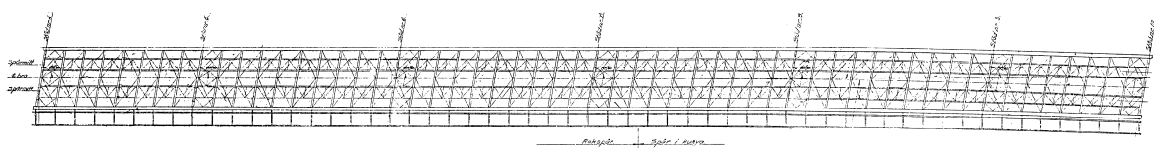
1 Inledning

1.1 Bro över Söderström

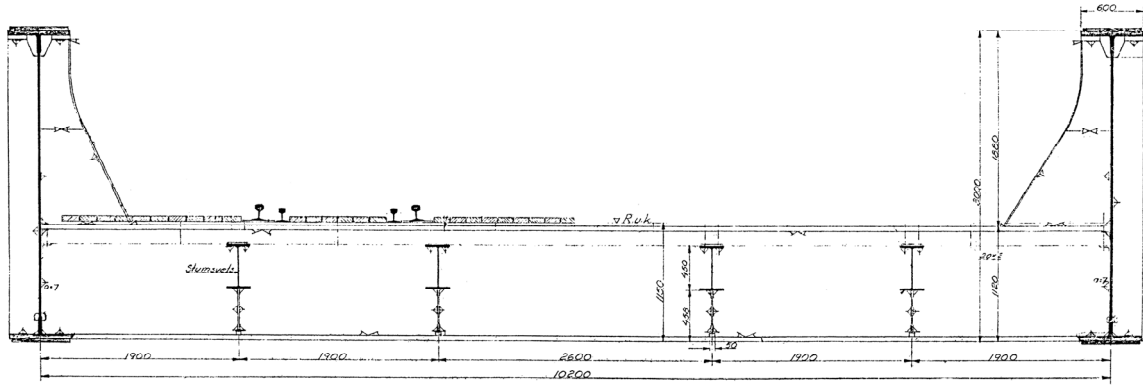
Bro över Söderström är en kontinuerlig balkrostbro i 6 fack, ytterfacken har en spännvidd på 27 m och innerfacken 34 m. bron uppbär två spår för järnvägstrafik. En elevation av bron visas i Figur 1, plan i Figur 2 och tvärsnitt i Figur 3. Balkrosten utgörs av huvudbalkar, tvärbalkar c/c 3.4 m och sekundära långbalkar. Spåren är upplaga på träslipor som ligger direkt på långbalkarnas ovansida. En sammanställning av balkarnas geometri framgår av Tabell 1 och Figur 4.



Figur 1: Elevation, originalritning B1208-1.



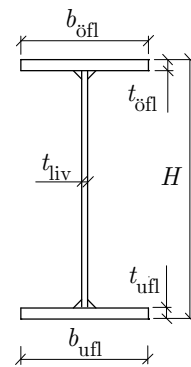
Figur 2: Plan, originalritning B1208-1.



Figur 3: Tvärsektion, originalritning B1208-5.

Tabell 1: Geometri stålbalkar.

(mm)	Huvudbalk	Tvärbalk	Långbalk
H	3000	1120	450
$b_{öfl}$	600	330	225
b_{ufl}	600	330	225
$t_{öfl}$	52	52	20
t_{ufl}	52	52	18
t_{liv}	26	16	12



Figur 4: Balktvärsnitt.

Anslutande slingerförband mot långbalkarnas överfläns samt vindförband mot tvärbalkarnas underfläns har varit föremål för både utredning och forskning, t.ex. (Andersson, 2009) och (Leander, 2010). Vid en särskild inspektion år 2010 påträffades ett antal indikationer på utmattningssprickor i anslutning till vindförbandets tvärplåt mot tvärbalk. Under 2011 har några av dessa punkter undersökts med magnetpulverprovning efter att färgen slipats bort, se Figur 5.



Figur 5: Påträffad utmattningsspricka i anslutning mellan tvärbalk och tvärplåt för vindförband, från (Ekelund, 2011).

1.2 Utmattningsanalys av kritiska anslutningspunkter

I (Andersson, 2010) redovisas analyser avseende modifierad geometri av anslutningsplåtarna till vind- och slingerförband. Utmattningsanalyser utförs baserat på teoretiskt beräknade spänningskoncentrationsfaktorer och uppmätta nominella spänningskollektiv. Resultaten visar att om anslutningen mellan tvärplåt och fläns bearbetas till en radie av minst 20 mm kan livslängden ökas markant. Beräkningar görs baserat på både geometriska spänningar samt elastiska kantspänningar. Båda dessa anges i (Hobbacher, 2007) som rekommenderade analysmetoder, dock återfinns endast metoden med geometriska spänningar (hot-spot) i Eurokod (CEN, 2005). Längst livslängd erhålls i aktuellt fall då elastiska kantspänningar används.

1.3 Töjningsmätningar

Bron instrumenterades 2008 med ett 50-tal töjningsgivare i punkter som bedömdes kritiska avseende utmattning. I (Leander, 2008) och (Leander, 2010) redovisas utmattningsanalyser baserat på en första mätperiod omfattande 43 dagars kontinuerliga mätningar. Resultaten visade likt tidigare teoretiska analyser stor risk för utmattning avseende långbalk och tvärbalk.

I april 2011 utfördes provslipningar av en anslutningspunkt på tvärbalk och en på långbalk, baserat på principerna i (Andersson, 2010). För att säkerställa att dessa bearbetningar ger avsett resultat har kompletterande töjningsmätningar utförts före och efter slipning av dessa punkter. Nya givare har placerats enligt anvisningar i (Hobbacher, 2007) nära anslutningarna som bearbetats med slipning. Kontinuerliga mätningar utfördes under perioden 2011-04-12 till 2011-04-16 innan slipning och under perioden 2011-04-28 till 2011-05-02 efter slipning. Mätningarna omfattade 32 kanaler med 400 mätpunkter per sekund, vilket resulterande i en total binär datamängd på ca. 70 GB. Under första mätperioden uppmättes ca. 2200 tågöverfarter, under andra mätperioden ca. 1700 tågpassager.

1.4 Syfte och omfattning

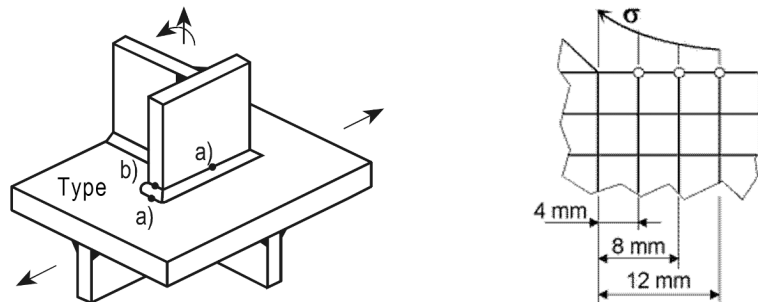
Syftet med föreliggande PM är att analysera mätdata från perioden april – maj 2011, avseende utmattning. För samtliga mätdata beräknas spänningskollektiv med Rainflow-analys varefter utmattningsanalys enligt Palmgren-Miners delskadehypotes utförs.

2 Utmattningsanalys baserat på mätdata

I följande avsnitt redovisas analys av töjningsmätningar utförda under perioden 2011-04-12 till 2011-04-16 (innan slipning) samt perioden 2011-04-28 till 2011-05-02 (efter slipning).

2.1 Instrumentering

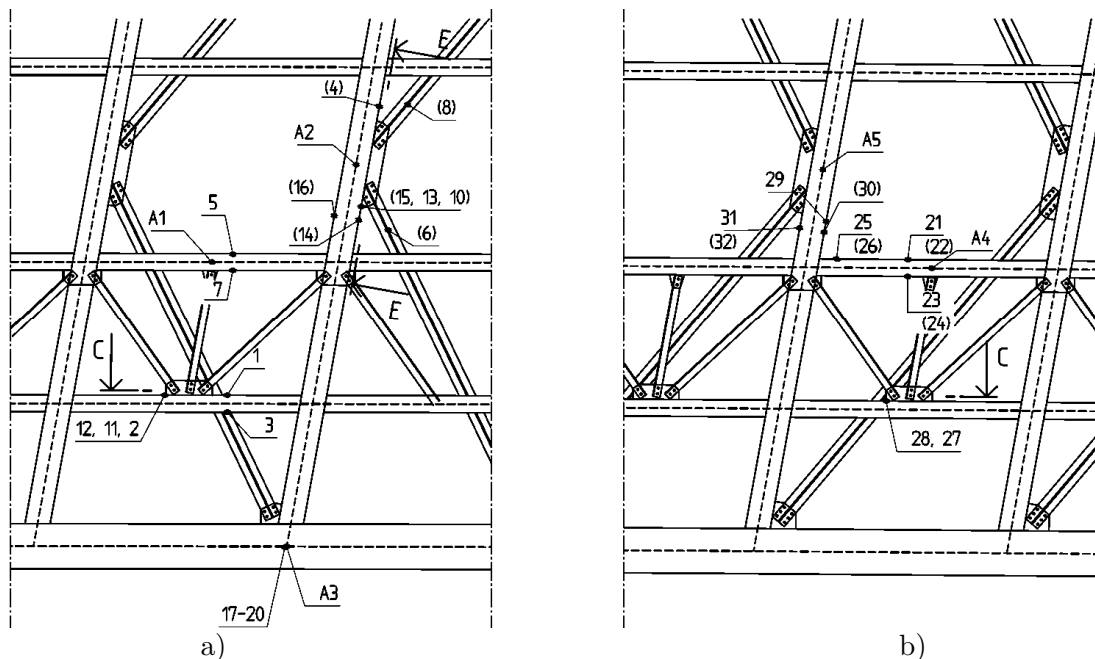
Placering av givare baseras på rekommendationer i (Hobbacher, 2007), Figur 6, gällande analys av geometriska (hotspot) spänningar. Tidigare instrumentering kompletteras med 3 töjningsgivare på vardera en tvärbalk och en längsbalk. Dessutom instrumenteras vindförbandet vid angränsande tvärbalk, analys av denna redovisas dock ej i föreliggande rapport. Hotspot-givarna placeras 4, 8 och 12 mm från fattningskanten på tvärplåten. Resulterande hotspot-spänning beräknas enligt Ekv. (1).



Figur 6: Typ av geometriska spänningskoncentrationer, från (Hobbacher, 2007).

$$\sigma_{hs} = 3\sigma_{4\text{ mm}} - 3\sigma_{8\text{ mm}} + \sigma_{12\text{ mm}} \quad (1)$$

Givarlängden är 1.5 mm och är paketerade c/c 2 mm på fabriksmonterade remsor. Vid instrumentering limmas hela remsan i föreskriven position varvid varannan givare kopplas in till mätsystemet. Plan av instrumenteringen visas i Figur 7. Detalj av geometri för hotspot-givare visas från foton i Figur 8 till Figur 12.



Figur 7: Placering av givare 2011, del av instrumenteringsritning från John Leander dat. 2011-05-04, a) fältsnitt, b) stödsnitt.

ARBETSKOPIA 2011-05-08

Inför mätningarna före bearbetning av anslutningspunkterna slipas anslutande svets för att efterlikna en 45° anslutning med så liten radie som möjligt vid fattningskanten. Efter bearbetning av anslutningspunkterna återinstrumenteras nya givare på samma position som tidigare. För att säkerställa att givarna återmonteras på samma position relateras dessa till markeringar på tidigare uppmätt avstånd.



a)

b)

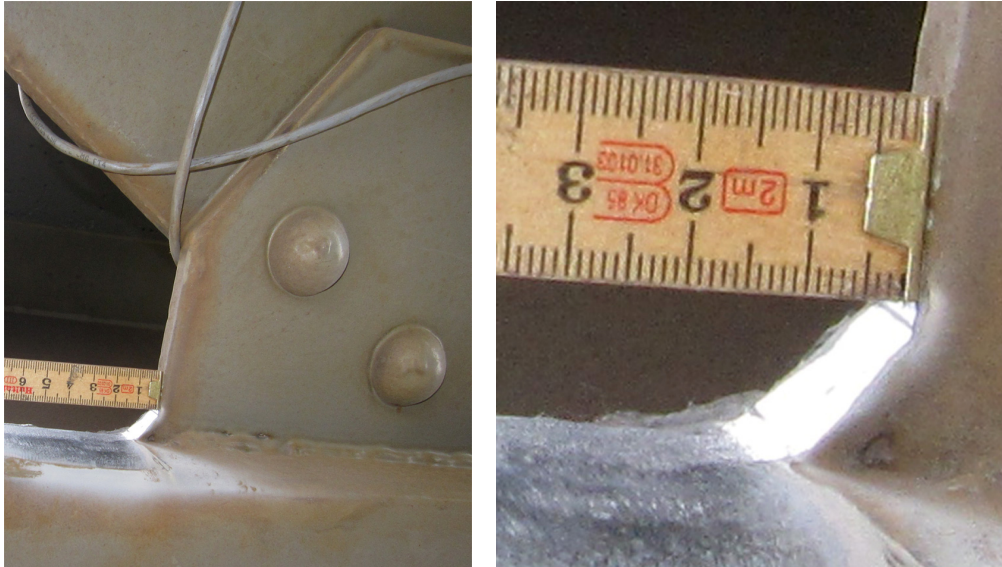
Figur 8: a) anslutning mellan tvärplåt och överfläns långbalk, före bearbetad geometri, b) detalj vid svets och placering av givare.



a)

b)

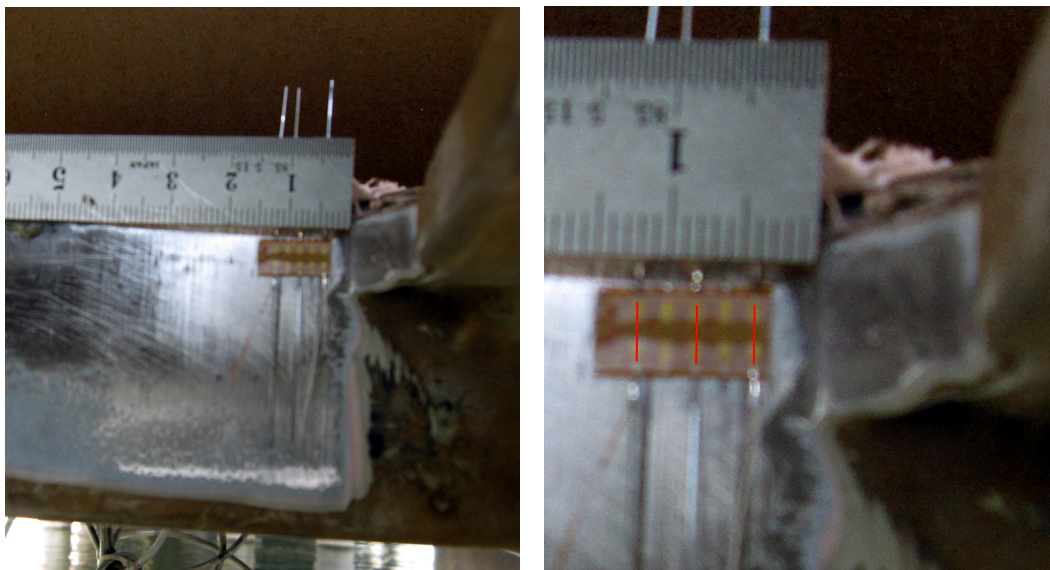
Figur 9: a) anslutning mellan tvärplåt och överfläns långbalk, efter bearbetad geometri, b) detalj vid svets och placering av givare, radie ca. 20 mm.



a)

b)

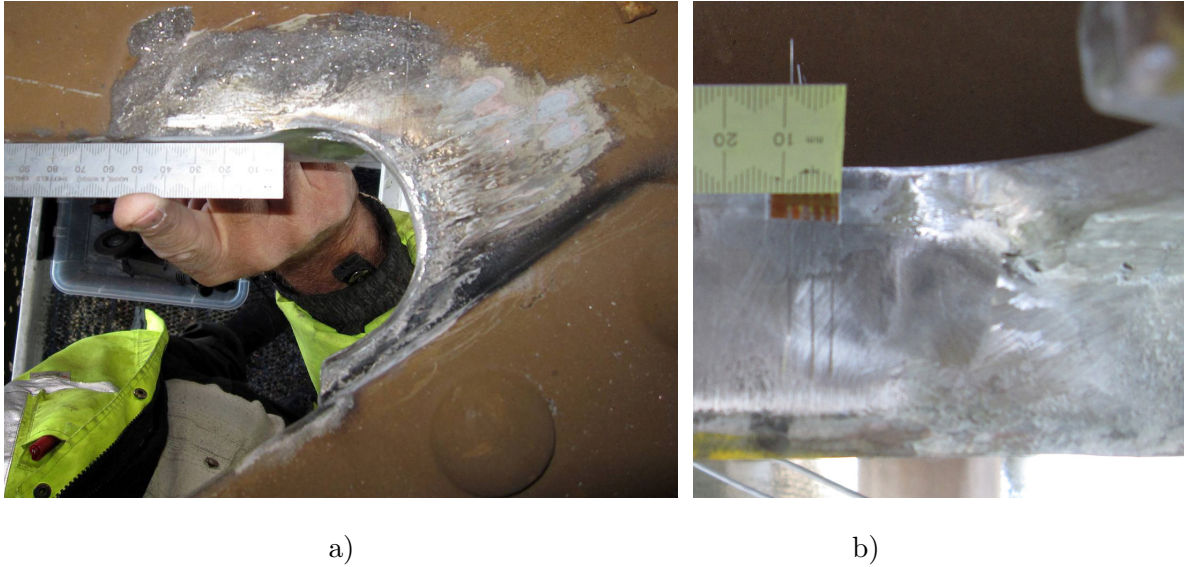
Figur 10: a) anslutning mellan tvärplåt och underfläns tvärbalk, före bearbetad geometri, b) detalj vid svets.



a)

b)

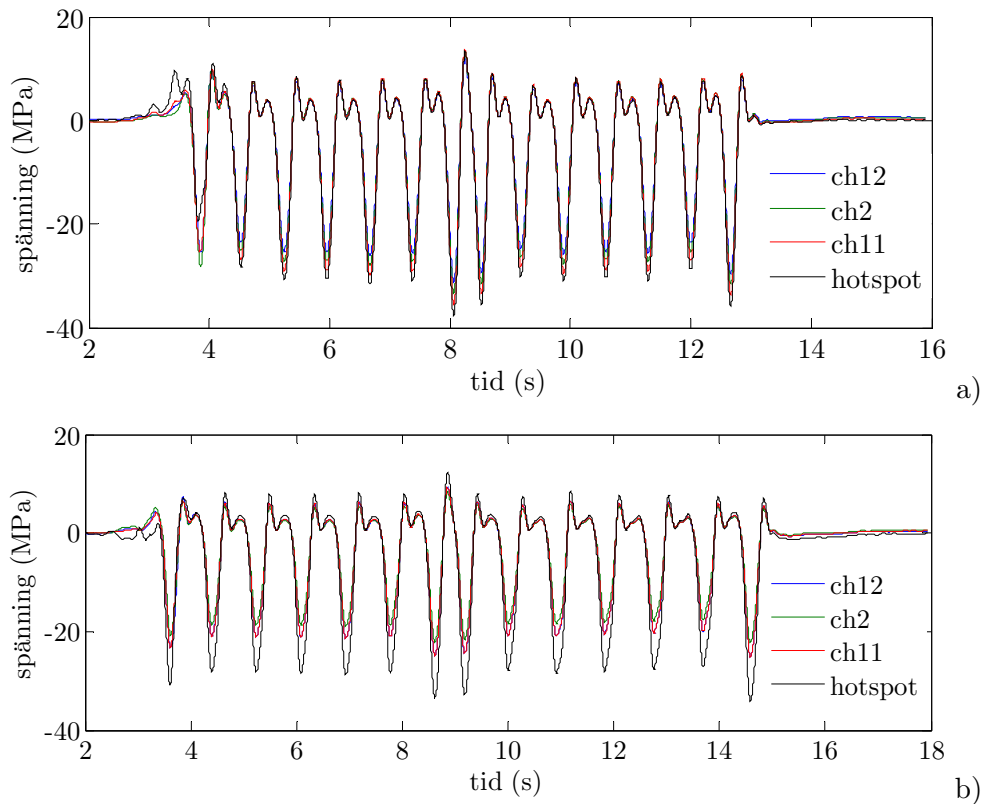
Figur 11: a) anslutning mellan tvärplåt och underfläns tvärbalk, före bearbetad geometri, b) detalj vid svets och placering av töjningsgivare.



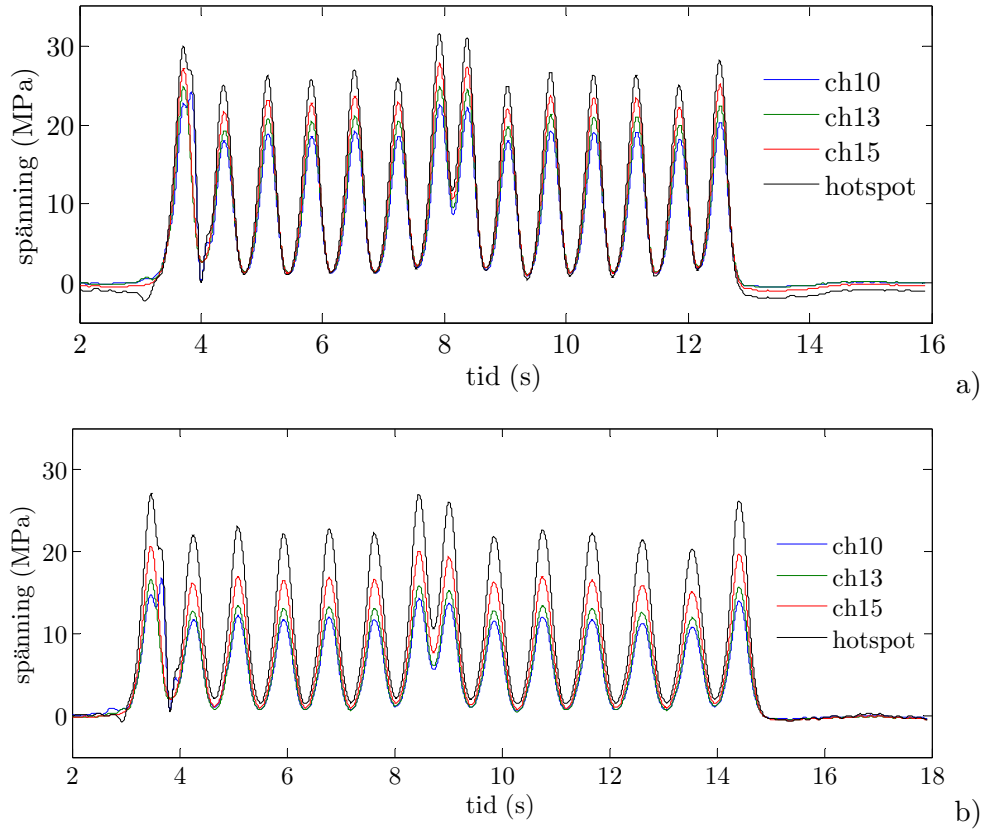
Figur 12: a) anslutning mellan tvärplåt och underfläns tvärbalk, efter bearbetad geometri, b) detalj vid svets och placering av töjningsgivare.

2.2 Signaler och spänningskollektiv

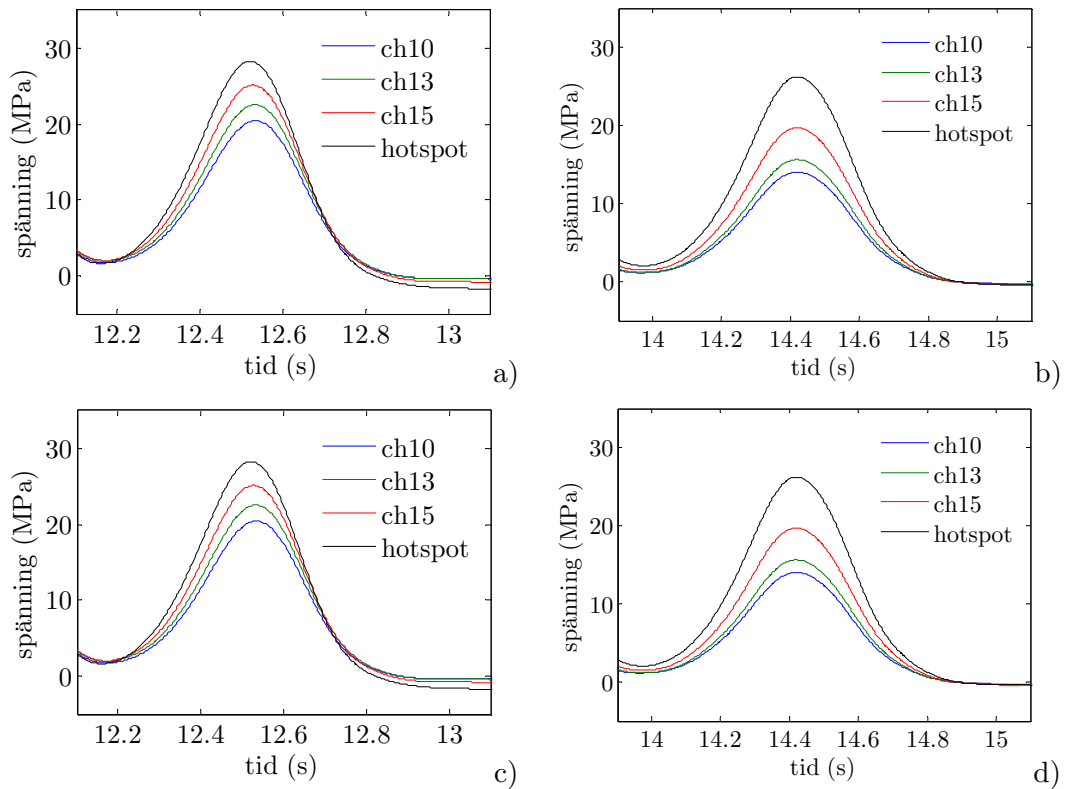
I Figur 13, Figur 14 och Figur 15 nedan redovisas några typiska signaler från mätningarna, avseende lokala spänningar vid tvärbalk och långbalk. Redovisade signaler är lågpas-filtrerade vid 5 Hz. Utmattningsanalyserna baseras dock på ofiltrerade signaler.



Figur 13: Lokala spänningar vid anslutning mellan tvärplåt och långbalk, passage av ett X60 pendeltåg, a) innan slipning, b) efter slipning.

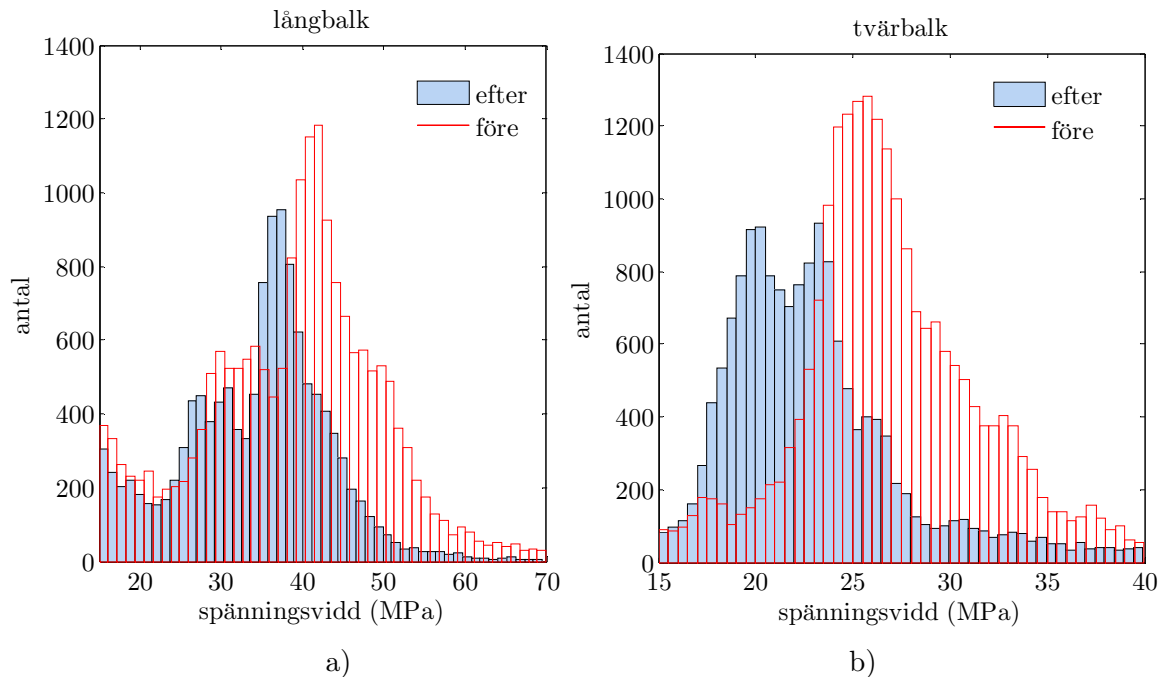


Figur 14: Lokala spänningar vid anslutning mellan tvärplåt och tvärbalk, passage av ett X60 pendeltåg, a) innan slipning, b) efter slipning.



Figur 15: Lokala spänningar, sista boggin av samma passage som ovan, a) långbalk före slipning, b) långbalk efter slipning, c) tvärbalk före slipning, d) tvärbalk efter slipning.

I Figur 16 visas spänningskollektiv för mätperioden, avseende hotspot-spänning vid långbalk och tvärbalk, jämfört före och efter slipning av anslutningspunkten.



Figur 16: Spänningskollektiv för hotspot spänning före och efter bearbetning av anslutningspunkter, a) långbalk, b) tvärbalk.

2.3 Utmattningsanalys

Spänningskollektiv liknande Figur 16 beräknas för samtliga givare för hela mätperioden och utgör grund för utmattningsanalys. För givare som mäter nominell spänning används förbandsklass $C = 45$, för hotspot-givare används $C = 90$. Resultat redovisas både med och utan faktorn $1.1\gamma_n = 1.1 \times 1.2$. Resultat utan denna faktor benämns f_{rk} . En total livslängd uppskattas genom att proportionera beräknad delskada under mätperioden med totalt antal tåg per år, baserat på 500 tåg/dygn. Med livslängd avses här tiden det tar att uppnå delskada 1.0. Beräknade livslängder redovisas i Tabell 2. Inverkan av slipning syns tydligt på hotspot-givarna. För långbalken ökar livslängden från 10 år till nästan 60 år, baserat på karakteristiska spänningar. Även med dimensioneringsvärden erhålls en livslängd på 15 år. För tvärbalken erhålls en dimensionerande livslängd på ca. 40 år.

Tabell 2: Uppskattad total livslängd baserat på töjningsmätningar 2011.

Total livslängd (år) givare: position:	före slipning		efter slipning	
	f_{rk}	f_{rd}	f_{rk}	f_{rd}
1 långbalk, nominell	25	8	41	11
7 långbalk, nominell	92	21	83	20
2,11,12 långbalk, hotspot	10	4	59	15
14 tvärbalk, nominell	>100	36	>100	96
4 tvärbalk, nominell	>100	63	>100	>100
10,13,15 tvärbalk, hotspot	23	8	>100	42
23 långbalk, nominell	10	3	11	4
25 långbalk, nominell	>100	>100	100	>100
32 tvärbalk, nominell	>100	36	100	38

ARBETSKOPIA 2011-05-08

Analys av signalerna har visat på höga spänningstoppar som möjligen har sitt ursprung i elektriska störningar. Dessa har tidigare undersökts och har inte kunnat förklaras med en statisk 3D FE-modell som i övriga avseende ger god överensstämmelse. Mycket approximativt undersöks om detta har påverkan på beräknad livslängd, genom att bortse från samtliga spänningsvidder överstigande 100 MPa. Uppskattad livslängd baserat på en sådan analys redovisas i Tabell 3. För hotspot-givarna är skillnaden marginell.

Tabell 3: Uppskattad total livslängd baserat på töjningsmätningar 2011, spänningsvidder större än 100 MPa medräknas ej.

Total livslängd (år) givare: position:	före slipning		efter slipning	
	f_{rk}	f_{rd}	f_{rk}	f_{rd}
1 långbalk, nominell	25	8	41	11
7 långbalk, nominell	92	21	83	20
2,11,12 långbalk, hotspot	14	6	59	15
14 tvärbalk, nominell	>100	51	>100	96
4 tvärbalk, nominell	>100	92	>100	>100
10,13,15 tvärbalk, hotspot	29	13	>100	44
23 långbalk, nominell	10	3	11	4
25 långbalk, nominell	>100	>100	>100	100
32 tvärbalk, nominell	>100	37	>100	38

Referenser

- Andersson, A., 2010. Järnvägsbro över Söderström: Spänningsanalyser och utmattningsberäkningar avseende förstärkningsförslag. 2010-10-26.
- Andersson, A., 2009. Utmattningsanalys av järnvägsbroar. *Licentiatuppsats, KTH Brobyggnad, TRITA-BKN Bulletin 96.*
- Andersson, A., 2008. Bro över Söderström, km 1+83: Instrumenteringsanvisningar för töjningsmätningar. *KTH Brobyggnad, 2008-04-08.*
- CEN, 2005. Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner – Del 1-9: Utmattning. *SS-EN 1993-1-9:2005.*
- Ekelund, 2011. Centralbron Söderström km 1+83, Förslag till smidesåtgärder avseende beslutade positioner i spann 3. *Rapport nr. 101402-2, Projektengagemang.*
- Hobbacher, A., 2007. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. *IIW document XIII-2151-07/XV-1254-07.*
- Leander, J., Karoumi, R., 2011. Statistical evaluation of monitored data intended for fatigue reliability assessment. *Submitted to Journal of Structural Safety.*
- Leander, J., 2010. Improving a bridge fatigue life prediction by monitoring. *Licentiatuppsats, KTH Brobyggnad, TRITA-BKN Bulletin 106.*
- Leander, J., Andersson, A., Karoumi, R., 2010. Monitoring and enhanced fatigue evaluation of a steel railway bridge. *Engineering Structures Vol. 32 nr. 3, pp. 854-863.*

ARBETSKOPIA 2011-05-08

- Leander, J., Andersson, A., Karoumi, R., 2009. Enhanced Assessment of the Remaining Service Life of a Steel Railway Bridge. *Key Engineering Materials, Vol. 413-414, pp. 245-252, 8th International Conference on damage Assessment of Structures (DAMAS09), Peking, Kina.*
- Leander, J., 2008. Bro över Söderström, Stockholm C. – Älvsjö km 1+83, Rapport 1: Mätning och utvärdering m.a.p. utmattning. KTH Brobyggnad, *TRITA-BKN-126*.
- Wallin, J., Leander, J., Karoumi, R., 2011. Strengthening of a steel railway bridge and its impact on the dynamic response to passing trains. *Engineering Structures, Vol. 33, nr. 2, pp. 635-646.*