

Brottbelastning av en 55 år gammal spännbetongbro i Kiruna - Kalibrering av modeller för tillståndsbedömning



Lennart Elfgren, Niklas Bagge, Jonny Nilimaa, Thomas Blanksvärd och Björn Täljsten, LTU

Jiangpeng Shu och Mario Plos, Chalmers

Oskar Larsson, LTH

Håkan Sundquist, KTH

Luleå tekniska universitet (LTU), Kungliga tekniska högskolan (KTH), Chalmers tekniska högskola och Lunds tekniska högskola (LTH)



Brottbelastning av en 55 år gammal spännbetongbro i Kiruna - Kalibrering av modeller för tillståndsbedömning

Slutrapport till BBT, oktober 2015

Lennart Elfgren, Niklas Bagge, Jonny Nilimaa, Thomas Blanksvärd och Björn Täljsten, Luleå tekniska universitet, LTU

Jiangpeng Shu och Mario Plos, Chalmers tekniska högskola, Chalmers

Oskar Larsson, Lunds tekniska högskola, LTH

Håkan Sundquist, Kungliga tekniska högskolan, KTH

Sveriges Bygguniversitet, SBU, Tema Byggkonstruktion
<http://www.sverigesbygguniversitet.se/>

LTU, Konstruktionsteknik, Projektrapport 170213-1
<http://www.ltu.se/research/subjects/Konstruktionsteknik>

Foto på omslag: Gruvbron i Kiruna vid brottbelastning juni 2014

Förord

I denna rapport redovisas ett projekt som avser brottbelastning av en 55 år gammal spännbetongbro i Kiruna och därigenom möjliggjord kalibrering av modeller för tillståndsbedömning. Projektet har utförts inom BBT - Branschprogram för forskning och innovation avseende byggnadsverk inom transportsektorn. Programmet har tagits fram av Trafikverket i samverkan med Sveriges Bygguniversitet och Sveriges Tekniska Forskningsinstitut. BBT-programmets övergripande effektmål är att bidra till att minska samhällets relativa kostnader för byggnadsverk inom infrastrukturen genom att åstadkomma ett effektivt och hållbart byggande innefattande även underhåll och förvaltning.

Trafikverket har beviljat medel för projektet: "Forskning och utvecklingstjänst gällande brottbelastning av spännbetongbro" under tiden 2014-03-28 – 2015-10-01, ärendenummer TRV2014/25757 med ett fast arvode om 1200 kkr. För att starta upp projektet erhöles även ett uppdragsprojekt: "Forskning och utvecklingstjänst gällande fullskaleförsök på spännarmerad betongbro" under tiden 2013-11-15 – 2014-10-01, ärendenummer TRV 2013/88097 med ett fast arvode om 600 kkr. Projektet har dessutom finansierats genom bidrag från Luossavaara-Kiirunavaara Aktiebolag, LKAB, och Hjalmar Lundbohm Research Center, HLRC, med 1200 kkr, från Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF, med 380 kkr och från Luleå tekniska universitet, LTU, med 420 kkr. Detta ger en total finansiering av 3800 kkr.

Försöken i projektet har varit omfattande och många goda resultat har erhållits. Mycket arbete återstår dock med fortsatt analys och tillämpning av de erfarenheter som gjorts. Samverkan har skett inom ramen för Sveriges Bygguniversitet med forskare från Kungliga tekniska högskolan, KTH, Chalmers tekniska högskola, Chalmers, och Lunds tekniska högskola, LTH.

Luleå, Göteborg, Lund och Stockholm i oktober 2015.

Lennart Elfgrén, Niklas Bagge, Jonny Nilimaa, Thomas Blanksvärd och Björn Täljsten, LTU; Håkan Sundquist, KTH; Mario Plos och Jiangpeng Shu, Chalmers; och Oskar Larsson, LTH.

Sammanfattning

En 55 år gammal spännbetongbro med fem spann med längden 121,5 m har provats till brott för att studera och kalibrera metoder för tillståndsbedömning av befintliga broar. Projektet har bidragit till att ge svar på flera av de frågor som ställs beträffande hållbart byggande och uppföljning av befintliga konstruktioner inom BBT - Branschprogram för forskning och innovation avseende byggnadsverk inom transportsektorn. Framför allt adresseras följande områden:

A.2.1 Säkerhet, robusthet och sårbarhet – En betydande robusthet finns i den studerade typen av broar och säkerheten mot brott är större än den som erhålls med modellerna i de europeiska betongnormerna.

A.2.4 Metodik för individuell bärighetsklassning av broar – En kombination av FE-modellering och analytiska studier baserade på verklig geometri och aktuella materialdata har goda förutsättningar att kunna ge betydligt mer kvalificerade bedömningar av kvarvarande bärförmåga än nu tillämpade metoder.

A.2.5 Beständighet och livslängd hos nya byggnadsverk – Projektet ger underlag för förbättrade metoder att bestämma beständighet och livslängd hos spännbetongbroar.

A.3.1 Mätmetoder – I projektet har en ny metod för fotografisk töjningsmätning provats. Resultaten har ännu inte hunnit helt utvärderas men de ser lovande ut.

A.3.2 Bedömning av tillstånd och livslängd – Projektet ger underlag för förbättrade metoder för bedömning av tillstånd och livslängd.

Projektet har hittills redovisats i en doktors- och en licentiatavhandling och i tio tidskrifts- och konferensartiklar.

Innehållsförteckning

Förord.....	III
Sammanfattning	V
Innehållsförteckning	VII
1 Mål och syfte	9
2 Bakgrund.....	11
2.1 Fullskaleförsök till brott	11
2.2 Modellering	13
2.3 Normer	13
3 Upplägg, metod och genomförande.....	15
3.1 Modellering	15
3.2 Provbekastning	16
3.3 Mätning	16
3.4 Analys	17
4 Projektorganisation och medverkande parter	19
4.1 Styrgrupp	19
4.2 Forskare.....	19
4.3 Provning.....	19
5 Resultat.....	21
5.1 Publikationer	21
5.2 Bärighet, robusthet och duktilitet.....	22
5.3 Förstärkning	23
5.4 Spännkablarna kondition och kvarvarande spännkraft	25
5.5 Genomstansning av brobaneplattan	26
5.6 Beräkningsmetodik	27
5.7 Temperaturdeformationer	28
5.8 Livscykelkostnader.....	28
5.9 Koppling till och relevans för branschprogrammet.....	28
5.10 Tidsplan	28
6 Fortsatta studier	31
7 Referenser	33
Bilagor	41

1 Mål och syfte

Det specifika målet för projektet var att studera den kvarvarande lastupptagningsförmågan och deformationskapaciteten hos en 55 år gammal spännbetongbro med syfte att ge underlag för att kunna kalibrera befintliga metoder och modeller för tillståndsbedömning av likartade konstruktioner.

Få storskaliga studier har genomförts på spännarmerade betongkonstruktioner och därför finns begränsad kunskap om verkningssätt, sprickbildning och faktisk bärförmåga. En provning kan öka tillförlitligheten i de bedömningar som görs med teoretiska metoder och modeller för andra spännarmerade broar.

2 Bakgrund

Brobeståndet ökar och åldras och det blir alltmer viktigt att korrekt kunna bedöma kvarvarande kapacitet och livslängd. Befintliga metoder och modeller behöver utvecklas och kalibreras mot fullskaleförsök.

2.1 Fullskaleförsök till brott

Det finns relativt få rapporter om fullskaleförsök av broar till brott. Detta beror framför allt på att försöken är kostsamma och krävande att genomföra. I Bagge (2014) och Puurula et al. (2014) sammanställdes tidigare utförda studier. De sammanfattas nedan (på engelska):

- A large-scale test (1:3) regarding combined shear-torsion-bending of a curved concrete box-girder bridge in California was reported by Scordelis et al. (1977, 1979) and Elfgrén (1975). Failure was initiated when concrete spalled off at the bottom corner of the outer girder due to high shear and torsion stresses.
- Two full scale tests of concrete bridges in Sweden were reported by Plos (1990, 1995) and Täljsten (1994). A portal slab frame bridge with a span of 21 m (9 years old) and a post-tensioned frame beam bridge with a span of 31 m (9 years old) were tested to failure in shear and bending. For the slab beam a brittle failure occurred when a new shear crack with a low slope emerged for a point load of 4.5 MN. For the prestressed bridge the failure occurred when one of the beams punched through the end support wall for a point load of 8.45 MN. Neither of the failures was predicted by available codes.
- In Switzerland 89 bridges were studied during their demolition, Zwicky and Vogel (2000), Vogel and Bargähr (2006). However, no detailed loading tests to failure were performed and no calibration of assessment methods was carried out. The authors recommend improved methods for the assessment of real loads and for corrosion damages in prestressed concrete bridges. The tests were also simulated using solid elements by Pimentel et al. (2007) and by fiber elements capable of considering shear effects by Ferreira et al. (2012).
- In Switzerland, Fernandez Ruiz et al. (2007) performed large scale tests of the load carrying capacity of box girder beams with thin webs including post-tensioning tendons. The tendons decreased the load-carrying capacity of the compression struts necessary to transform the shear forces.
- In the United States a continuous three-span reinforced concrete slab bridge was tested to flexural failure by Jorgensen et al. (1976).
- In the United States a simply supported two-span prestressed reinforced concrete girder bridge (4 years old) was tested to failure in Pennsylvania, McClure et al. (1984).
- In Canada a continuous three-span reinforced concrete girder bridge (34 years old) was tested to failure of the girder. At failure concrete crushing occurred in the compressive flange. Scanlon et al. (1987).
- In the United States a continuous three-span skew reinforced concrete slab bridge (38 years old) that had deteriorated due to alkali silica reactions and concrete spalling was tested to punching failure of the slab. The deterioration of the slab was concluded to have had a considerable impact on the failure, Miller et al. (1994).
- In South Korea a simply supported two-span prestressed reinforced concrete girder bridge (30 years old) was tested to failure of the girder by Oh et al. (2002).

- In China a simply supported three-span reinforced concrete girder bridge (43 years old), deteriorated due to severe concrete cracking, reinforcing steel corrosion and concrete spalling was tested to failure of the girder by Zhang et al. (2011a). They also tested a simply supported six-span reinforced concrete girder bridge built in 1992 with severe vertical and inclined concrete cracks. They obtained a failure of the girder, Zhang et al. (2011b).

- In Denmark a continuous three-span post-tensioned reinforced concrete girder bridge built in 1976, deteriorated due to aggressive alkali silica reactions. It was tested to punching failure of the slab by Schmidt et al. (2014).

- In Estonia a three-span concrete bridge on the road between Tallin and Narva was tested in 2013, Idnurm et al. (2013).

- In Sweden recently two tests have been performed on railway bridges, see Figur 2.1 and Figur 2.2:

1. A reinforced concrete trough bridge (50 years old), strengthened with CFRP was tested to failure in flexure, shear, torsion and bond. At the time of failure high bond stresses between the concrete and resin in the outermost groove initiated a bond failure after yielding of the bottom longitudinal steel reinforcement, SB (2008), SB-6.3 (2007), SB-7.3 (2008), Richard et al. (2010), Puurula et al. (2008, 2012, 2013, 2014).
2. A steel truss bridge, Mainline (2013), Blanksvärd et al. (2013), Häggström et al. (2014, 2015).

The Swedish test results indicated a substantial hidden capacity in the bridges. On the other hand, many bridges also do fail, both during construction and in service, see e.g. http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_bridge_failures. So, it is quite obvious that there is a need to develop better methods for the assessment of existing bridges.



Figur 2.1: Bro i Örnsköldsvik provad till brott 2006 i EU-projektet "Sustainable Bridges", SB(2008), Puurula et al. (2008, 2012, 2013, 2014).



Figur 2.2: Stålbros från Åby Älv provad till brott i september 2013 i EU-projektet "Mainline" Till vänster: Lastpåföring med domkrafter och injekteringsförankrade stag Nedtill: Knäckning i överrannsstänger i verkligheten och enligt finit element modell. Haggström et al. (2014, 2015).

2.2 Modellering

Modellering av broar med finit elementmetod har utförts av bland andra Broo et al. (2009), Malm (2009), Schlune et al. (2009) och Richard et al. (2010).

Beträffande genomstansning av brobanepplattor har försök utförts på KTH under lång tid under ledning av Henrik Nylander, Sven Kinnunen och Håkan Sundquist, se till exempel Sundquist (2005) and Tazaly (2011).

Temperaturens inflytande på deformationer och töjningar i broar har nyligen studerats av Oskar Larsson vid LTH, se Larsson (2012).

Ett doktorandprojekt om bärförmågan hos brobanor utförs för närvarande på Chalmers med stöd från Trafikverket, Shu (2015).

2.3 Normer

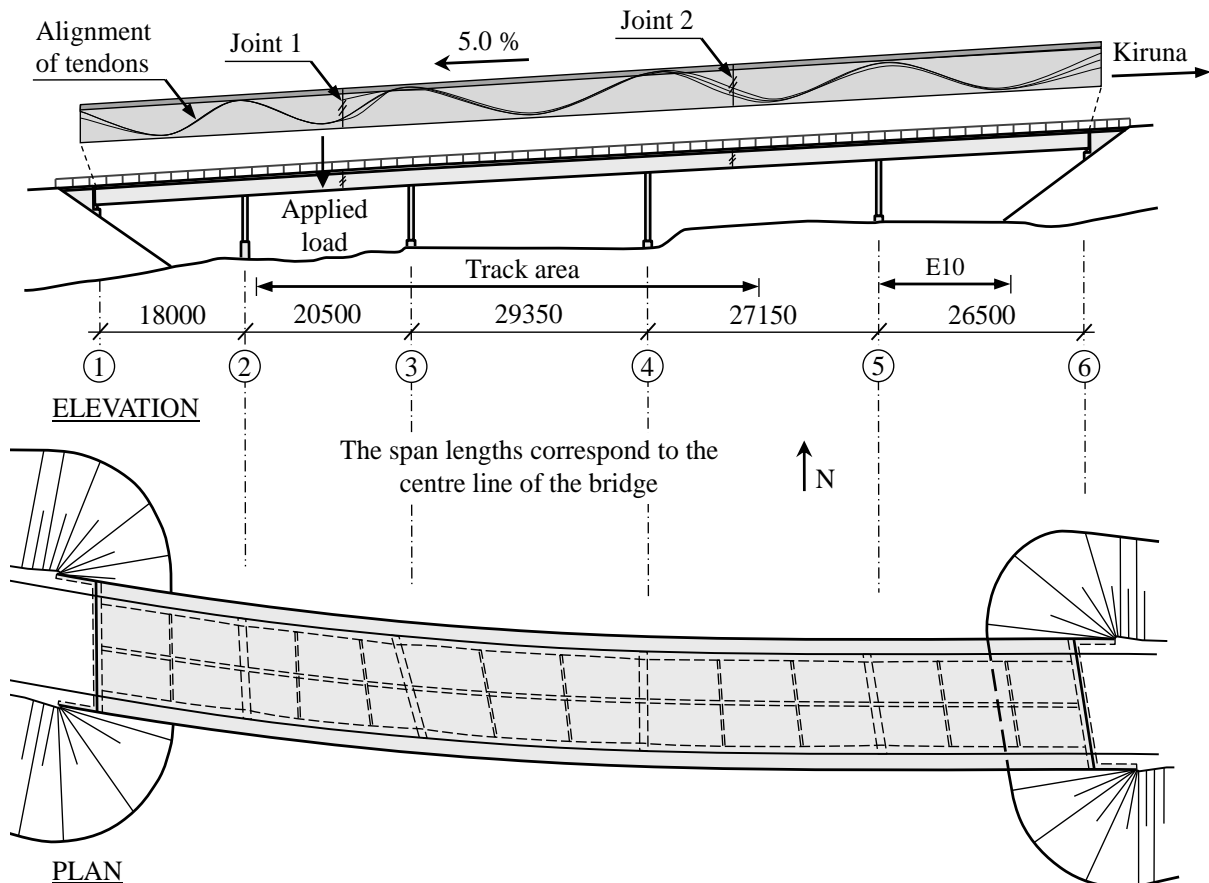
Några av de många normer som behandlar dimensionering och tillståndsbedömning av broar är ACI-318 (2011), ASCE-ACI 445(1998), Bentz et al. (2006), Brigade (2011), BV Bridge (2003), CEN (2004), Collins et al. (1991), CSA-A23.3 (2004), fib (2008), SB (2008) och SIA 269 (2011).

3 Upplägg, metod och genomförande

Gruvvägsbron är en 121,5 m lång spännarmerad betongbalkbro med fem spann, se Figur 3.1 och fotot på titelsidan. Bron konstruerades av civilingenjör Sven Hultquist konsulterande ingenjörbyrå, Stockholm, och byggdes 1959 av Contractor AB, Skellefteå. Den hade fram till 2014 gjort god tjänst i cirka 55 år. Detaljer om brons geometri framgår av Bagge et al. (2015f).

Bron påverkades av gruvbrytningen och markrörelser i form av att sättningar uppträdde vid brons västra sida närmast gruvan vid stöd 1 för att därefter sprida sig vidare i östlig riktning mot stöd 6. Beslut fattades därför att riva bron under 2014. I samband med rivningen fanns en möjlighet att provbelasta bron och studera dess verkliga last- och deformationskapacitet. Detta är av intresse för bedömning av bärigheten hos andra spännarmerade broar såväl längs Malmbanan som i övriga Sverige.

Projektet genomfördes i följande steg: (1) modellering, (2) provbelastning, (3) mätning och (4) analys, vilka sammanfattas i kommande avsnitt.



Figur 3.1: Elevation och plan av Gruvvägsbron i Kiruna. Detaljer med spännkablar. Bagge et al. (2015d).

3.1 Modellering

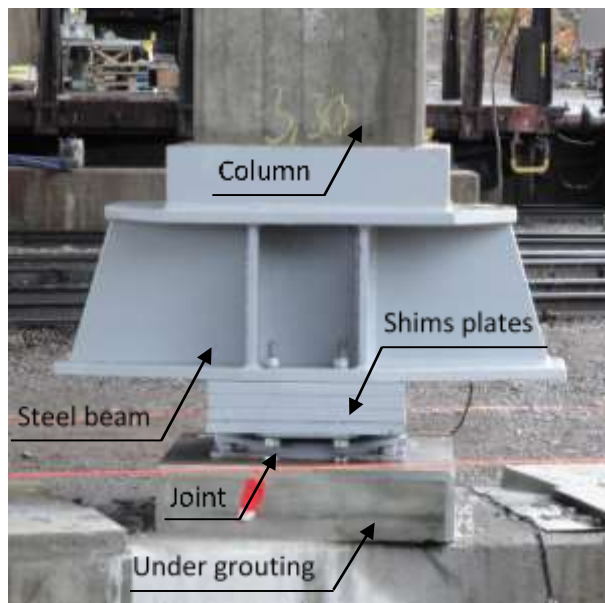
Bron modellerades analytiskt och med finit elementmetod under vintern 2013/14. Vid modelleringen undersöktes befintlig bärförmåga och spännkablarans inverkan på rådande bärförmåga samt relaxation. Vidare undersöktes även olika belastningsscenarios och hur

bron på bästa sätt kunde belastas till brott. Resultat från förberedande modellering framgår huvudsakligen av Bagge et al. (2015e).

3.2 Provbekastning

Bropelarna har försetts med ok i underkant för att möjliggöra justering av deras höjdläge, se Figur 3.2, Enochsson et al. (2011), Bagge et al. (2015c). Dessa ok utnyttjades aldrig för höjjustering eftersom deformationerna i undergrunden inte blivit så stora som befarats. Dessa ok har däremot nyttjats för att initialt belasta bron genom att höja pelarrad 3 och samtidigt mäta töjningar och deformationer i bron. Därefter genomfördes pålastningar genom att bron trycktes nedåt med hjälp domkrafter och stag som injekteras fast i berget i mittfält mellan pelarraderna 2 och 3. Detta genomfördes enligt samma princip som vid provningen av bron i Örnsköldsvik, se Figur 2.1 och bron från Åby älv, se Figur 2.2. Härvid genomfördes även stansprov på broplattan för att kalibrera de laboratorieförsök som genomförts på KTH, Sundquist (2005), Bagge et al. (2015b). Förfarandet för provbelastningarna beskrivs i detalj i Bagge et al. (2014).

Det exakta brottförloppet och tidsåtgången vid försök är svåra att uppskatta när provningar utförs i full skala. De erfarenheter som finns i Sverige från tidigare fullskaleförsök gör dock att rimligt säkra uppskattningar kan göras. Av naturliga skäl blir samtidigt kostnaderna svåra att uppskatta. Här gällde det att försöka ha en viss flexibilitet för att kunna möta oväntade förlopp.



Figur 3.2: Pelarfot efter ombyggnad. Höjdläget kan justeras genom att pelarfoten lyfts med två domkrafter och att antalet shimsplattor ändras. Bagge et al. (2015c).

3.3 Mätning

Bron instrumenterades med traditionella läges-, töjnings-, och temperaturgivare. För att få en mer nyanserad information om sprickbildning och töjningar användes även en ny fotometrisk deformations- och töjningsutrustning där större områden, ca 1 m², kan analyseras, se Figur 3.3. Fullständigt mätprogram framgår av Bagge et al. (2014).



Figur 3.3: Töjnings- och deformationsmätning med fotometrisk utrustning (skyddad mot ljuspåverkan) på utsida balk. Se Sas et al. (2011, 2012) och SB 7-3(2008) för motsvarande mätning vid provning av bron i Örnsköldsvik.

3.4 Analys

Efter genomförda provningar analyserades mätresultaten och slutsatser drogs under hösten 2014 och våren 2015, se vidare avsnitt 5 nedan.

4 Projektorganisation och medverkande parter

Projektet har letts av en styrgrupp bestående av erfarna byggkonstruktörer från Sveriges Bygguniversitet och Trafikverket. Den praktiska provningen utfördes av Complab vid Luleå tekniska universitet.

4.1 Styrgrupp

Professor Lennart Elfgren, professor Björn Täljsten och tekn dr Thomas Blanksvärd, LTU.

Professor Håkan Sundquist, KTH

Docent Mario Plos, Chalmers

Universitetslektor Oskar Larsson, LTH

Tekn dr Anders Carolin, Trafikverket

4.2 Forskare

Doktorand Niklas Bagge, LTU

Problem rörande stansning studeras dessutom vid KTH av Mikael Hallgren, rörande FEM-modellering vid Chalmers av Jiangpeng Shu och rörande förstärkning vid LTU av Jonny Nilimaa och vid Chalmers av Reza Haghani.

4.3 Provning

Provning och mätningar utfördes av Complab tillsammans med entreprenörer för avspärning, lastpåläggning, uppröjning mm. Provningen koordinerades av civ.ing. Niklas Bagge, tekn. lic. Jonny Nilimaa, civ. ing. Patrik Larsson och lab. chef Lars Åström. Dessutom deltog från Complab forskningsingenjörerna Georg Danielsson, Erik Andersson, Håkan Johansson, Roger Lindmark och Mats Petersson.

5 Resultat

5.1 Publikationer

I detta avsnitt sammanfattas de resultat som hittills framkommit i projektet. Resultaten har redovisats i följande publikationer: Bagge (2014), Bagge et al. (2014), Bagge et al. (2015 a-f), Nilimaa (2015), Nilimaa et al. (2015 a-b) och Sas et al. (2015). Publikationerna förtecknas nedan, i referenslistan i avsnitt 7 samt ges i sin helhet i bilaga:

- Bagge, N. (2014). *Assessment of Concrete Bridges: Models and Tests for Refined Capacity Estimates*. Licentiate Thesis. Luleå: Luleå University of Technology.
- Bagge, N., Nilimaa, J., Blanksvärd, T. & Elfgren, L., (2014). Instrumentation and Full-Scale Test of a Post-Tensioned Concrete Bridge. *Nordic Concrete Research*, 51, pp. 63-83.
- Bagge, N., Sas, G., Nilimaa, J., Blanksvärd, T., Elfgren, L., Tu, Y. & Carolin, A., (2015a). *Loading to failure of a 55 year old prestressed concrete bridge*. Helsinki, IABSE Workshop Helsinki – Safety, Robustness and Condition Assessment of Structures.
- Bagge, N., Shu, J., Plos, M. & Elfgren, L., (2015b). *Punching Capacity of a Reinforced Concrete Bridge Deck Slab Loaded to Failure*. Oslo, Nordic Concrete Federation: Residual capacity of deteriorated concrete structures.
- Bagge, N., Nilimaa, J., Enochsson, O., Sabourova, N., Grip, N., Emborg, M., Elfgren, L., Lundmark, T. & Tu, Y., (2015c). *Protecting a five span prestressed bridge against ground deformations*. Geneva, IABSE Workshop – Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges.
- Bagge, N., Nilimaa, J., Blanksvärd, T., Bernspång, L., Täljsten, B., Elfgren, L., Sas, G. & Tu, Y., (2015d). *Performance of a prestressed concrete bridge loaded to failure*. Geneva, IABSE Conference – Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges.
- Bagge, N. & Elfgren, L., (2015e). *Structural performance and failure loading of a 55 year-old prestressed concrete bridge*. Foz do Iguaçu, 8th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (submitted).
- Bagge, N., Nilimaa, J. & Elfgren, L., (2015f). Residual prestress force evaluation of a decommissioned concrete bridge through field tests and FEA. *Journal of Structural Engineering* (submitted).
- Nilimaa, Jonny (2015): *Concrete Bridges. Improved Load Capacity*. Doctoral Thesis. Luleå: Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, ISBN 978-91-7583-344-3 (pdf), 180 pp.
- Nilimaa, J., Bagge, N., Blanksvärd, T. & Täljsten B. (2015a). NSM CFRP strengthening and failure loading of a post-tensioned concrete bridge. *Journal of Composites for Construction* (accepted for publication).
- Nilimaa, J., Blanksvärd, T., Bagge, N., Haghani, R., Al-Emrani, M. & Täljsten B. (2015b). Validation of an innovative prestressed CFRP laminate system for strengthening post-tensioned concrete bridges. Submitted to: *Composites Part B: Engineering*.
- Sas, G., Bagge, N., Häggström, J., Nilimaa, J., Puurula, A., Blanksvärd, T., Täljsten, B., Elfgren, L., Carolin, A., & Paulsson, B., 2015. *Tested versus code capacity of existing bridges - Three examples*. Geneva, IABSE Conference – Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges, 8 pp.

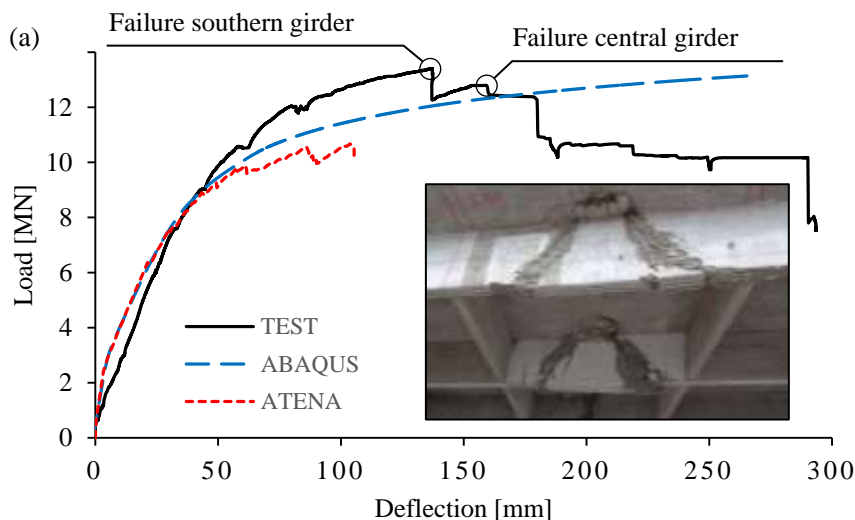
5.2 Bärighet, robusthet och duktilitet

Vid provbelastning av brons huvudbärverk studerades dess beteende och slutligen hur brottet utvecklades. Särskilt studerades vilka deformationer som uppkom innan bärförmågan var uttömd. Detta är av stort värde när konstruktionens säkerhet skall bedömas. Ett segt, duktilt brott innebär en förvarning om att något håller på att ske så att åtgärder kan vidtas, medan ett sprött brott utan förvarning innebär risk för olyckor med stora konsekvenser.

Vid provbelastningen erhöles ett kombinerat böj- och tvärkraftsbrott, vilket var av duktil karaktär, se ytterkalkens tillstånd efter brott i Figur 5.1 och last-deformationskurvan i Figur 5.2. Bron brottkapacitet var 2-3 gånger högre än erhållen kapacitet enligt modellerna i Eurokod 2, vilket påvisar ett behov av mer ingående studier av brottförloppet och gällande beräkningsmodeller. Provbekastningen, såväl som rivningen av bron, påvisade att en robust konstruktion med hög residualkapacitet även vid försämrade funktionalitet hos vissa bärande element, se Figur 5.3.



Figur 5.1: Segt böjskjuvbrott i den södra huvudbalken, Bagge (2014).

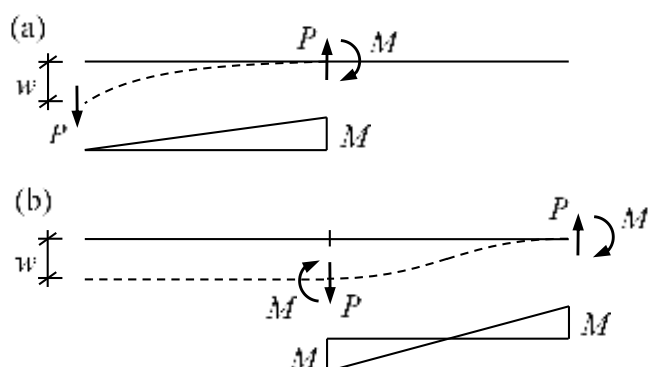


Figur 5.2: Last-deformationskurva för provning av brons huvudbärverk, Bagge et al. (2015e).



Figur 5.3: Segt brott tvärläng vid rivning av Gruvvägsbron.

Som ett led i att studera brons deformationskapacitet, har dess förmåga att motstå stora stödförskjutningar utretts. Både analytiska beräkningar och beräkningar med finita element har genomförts för ojämna stödförskjutningar i bron vertikala riktning respektive tvärriktning, se illustration av analytisk beräkningsmodell i Figur 5.4.



Figur 5.4: Analytisk beräkning av deformationskapacitet, Bagge et al. (2015c).

5.3 Förstärkning

För att öka brons momentkapacitet i fältmitt provades två förstärkningsmetoder, se Figur 5.5 – Figur 5.7. Istället för att erhålla ett renodlat böjbrott, välstuderat sedan tidigare, eftersträvades på så sätt ett kombinerat böj- och tvärkraftsbrott, där händelseutvecklingen är mindre känd och där de normer som finns i Europa och Amerika skiljer sig åt på väsentliga punkter.

De provade förstärkningsmetoderna var:

1. Förspända kolfiberlaminat som applicerades i ena ytterbalkens underkant med en metod som utvecklats av Stål- och träbyggnad vid Chalmers, se Figur 5.6.
2. Kolfiberarmeringsstänger som limrades fast i längsgående ursparingar som sågas ut i mittenbalkens underkant (Near Surface Mounted Reinforcement, NSMR) enligt en metod utvecklad vid LTU, se Figur 5.7.

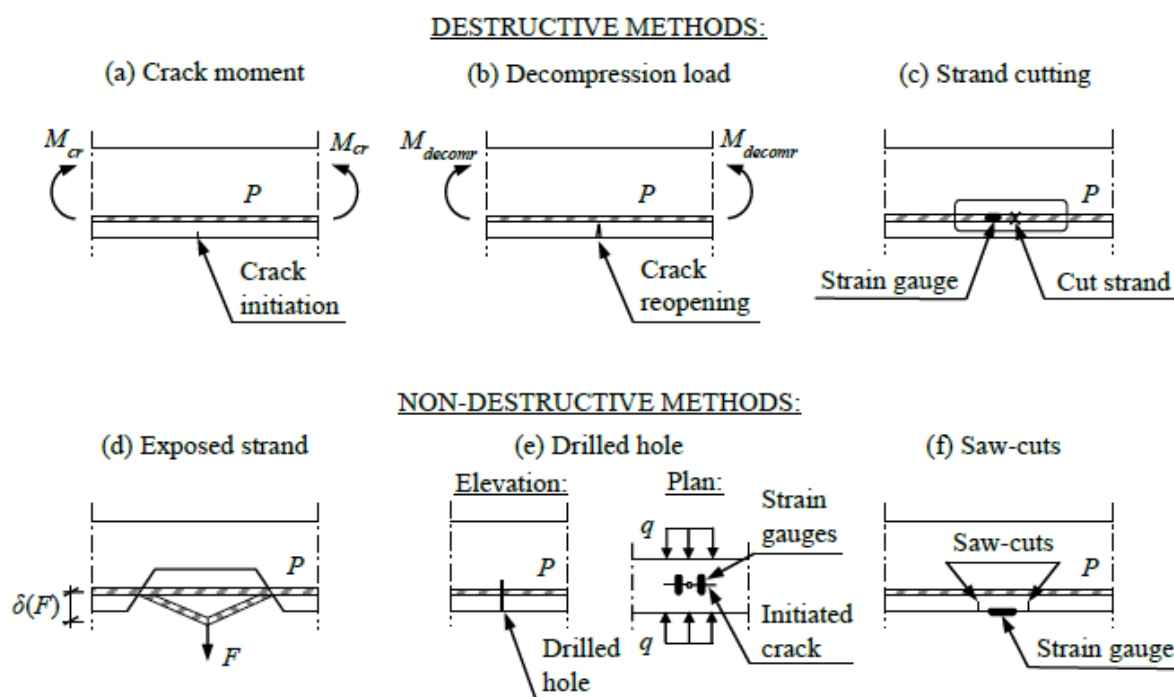
5.4 Spännkablarna kondition och kvarvarande spännkraft

Spännkablarnas kondition och kvarvarande spännkraft har studerats 55 år efter uppspänningen 1959. Konditionen var god med mycket få antydningar till rostangrepp, se Figur 5.8 och vidare Bagge et al. (2015f).



Figur 5.8: Kablar efter provning, Bagge et al. (2015f).

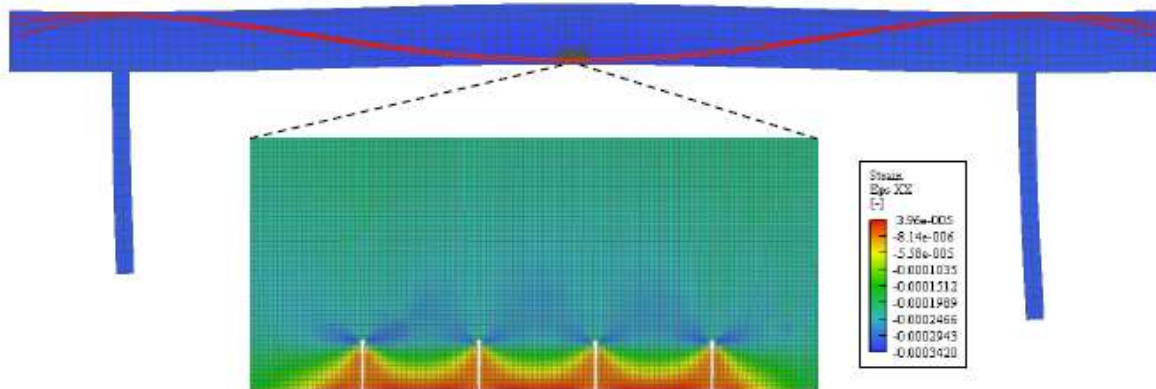
Utvärderingsmetoder för kvarvarande spännkraft kan kategoriseras som förstörande eller icke-förstörande, se Figur 5.9 som illustrerar existerande metoder. För Gruvvägsbron nyttjades två olika metoder, en i vardera kategorin, för att bestämma spännkrafterna, se Figur 5.9 (b) och (f). Ett led i utvärderingen var att vidareutveckla dessa metoder för mer generella förhållanden än de som studerats i tidigare försök.



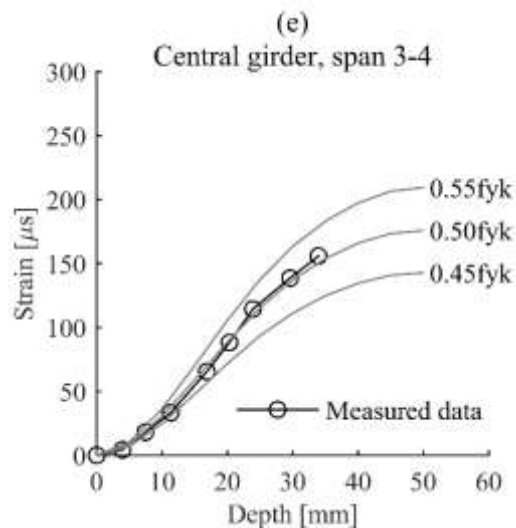
Figur 5.9: Förstörande och icke-förstörande provningsmetoder för att bestämma kvarvarande spännkraft, Bagge et al. (2015f).

En metod studerades där betongtöjningen mättes när snitt sågades upp i betongens underkant, se Figur 5.9f. Härigenom kunde man bestämma hur stor förändring som uppkom när förspänningens inverkan avlägsnades. I Figur 5.10 visas en finita elementmodell för att simulera responsen i betongen när spår sågas i balkens underkant och i Figur 5.11 jämförs

simulerad och uppmätt respons för att uppskatta aktuell spännkraft. Kvarvarande förspänning enligt icke-förstörande metod varierade mellan 25 och 80 % av spännkablarnas flytgräns beroende på i vilken snitt längs balken som bestämningen skedde.



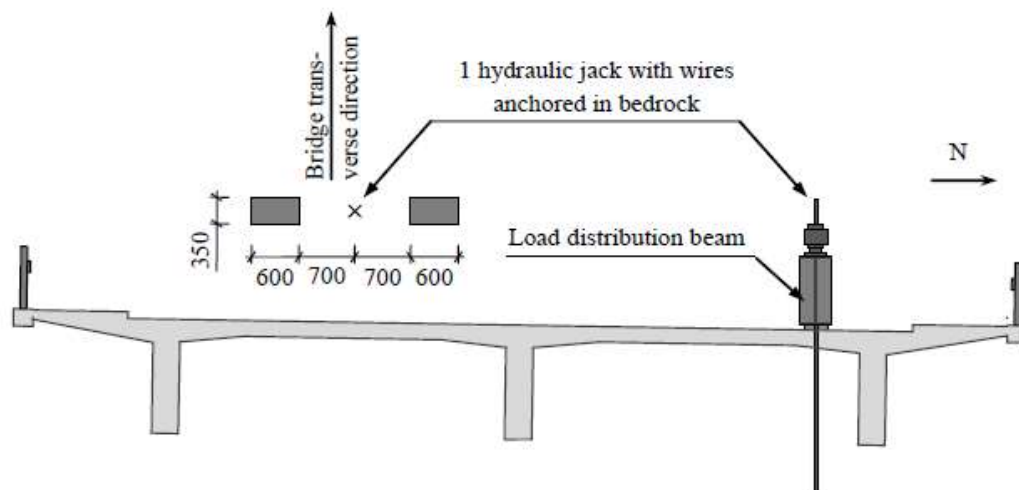
Figur 5.10: FE modellering av sågade snitt i betongen underkant, Bagge et al. (2015f).



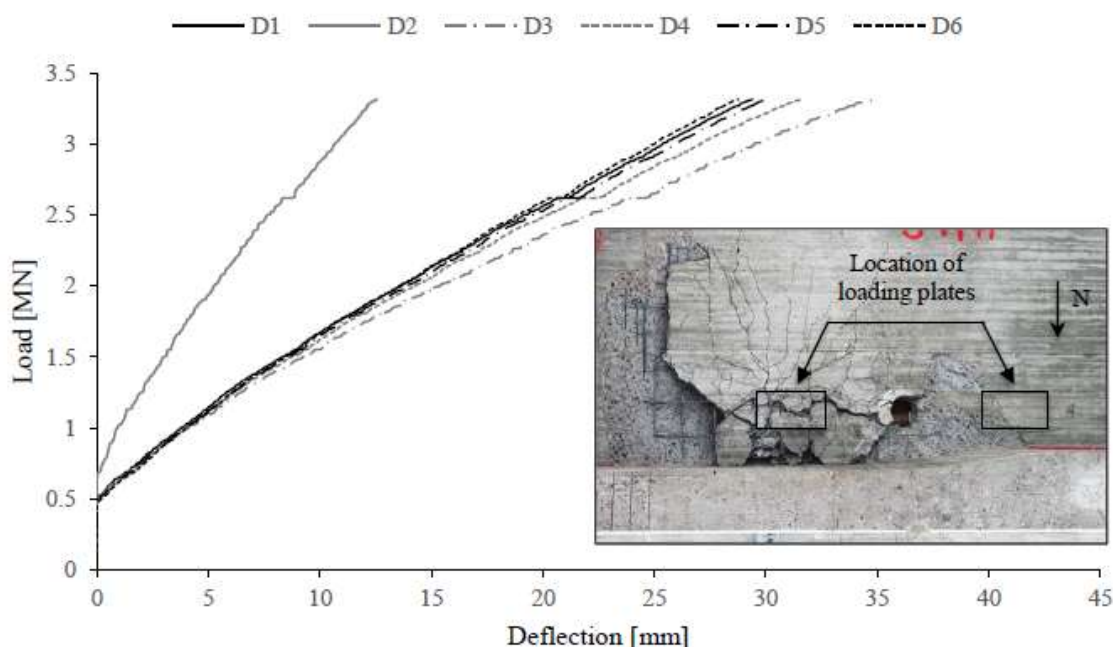
Figur 5.11: Uppmätta och modellerade betongtöjningar i underkant balk med avseende på sågdjup, Bagge et al. (2015f).

5.5 Genomstansning av brobaneplattan

Vid KTH har omfattande studier genomförts av genomstansbrott sedan lång tid tillbaka, se t ex Forsell & Holmberg (1946) och Sundquist (2005). Nya beräkningsmodeller håller nu på att tas fram i Europa och dessa har kalibrerats mot det fullskaleförsök som genomförts. Arbetet har av Mikael Hallgren rapporterats i den arbetsgrupp han leder för revision av nuvarande Eurokod inom området. Preliminära resultat har redovisats av Bagge et al. (2015b) vid ett nordiskt betongforskningsseminarium i Oslo. Brottet var sprött och lasten var ungefär 2-3 gånger högre än den som erhålls med nuvarande modell i de europeiska betongnormerna Eurokod 2. I Figur 5.12 ges uppställningen för försöket och i Figur 5.13 redovisas last-deformationskurvor tillhörande försöket (huvudbalkar och brobaneplatta). Fortsatta studier pågår vid Chalmers av Jiangpeng Shu.



Figur 5.12: Uppställning för provning av brobaneplatta, Bagge et al. (2015b).



Figur 5.13: Last-deformationskurva för provning av brobaneplatta, Bagge et al. (2015b).

5.6 Beräkningsmetodik

Utvärdering av brottbelastningen av såväl bronns huvudbärverk som brobaneplatta påvisade mycket kraftig överkapacitet jämfört med de beräkningsmetoder som vanligtvis tillämpas för klassning av befintliga betongbroar. Vid båda provningarna erhöles lastkapaciteter som var 2-3 gånger högre än vad som beräknats enligt beräkningsmodeller enligt Eurokod 2. Samtidigt är det svårt att genom normerna avgöra aktuell brottmod. Däremot kan förfinade icke-linjära analyser med finit element metod nyttjas för att tillförlitligt bestämma såväl bronns brottlast som respons, se Figur 5.2. Fortsatta studier pågår vid LTU av Niklas Bagge och vid Chalmers av Jiangpeng Shu.

5.7 Temperaturdeformationer

Vid LTH har studier genomförts av de dygns- och årstidsberoende deformationer som uppkommer i broar, Larsson (2012). För Gruvvägsbron har töjningarnas dygnsvariation studerats och jämförts med de töjningar som beror av påförd last. De första preliminära resultaten visar att stora töjningar uppkommer på grund av varierande temperatur. En mer förfinad analys krävs dock för att kunna dra några slutsatser angående resultaten. Fortsatta studier pågår vid LTH.

5.8 Livscykelkostnader

För att kunna göra kalkyler av livscykelkostnader behövs data om bärförmåga och nedbrytning för befintliga broar. Metoder för detta har tagits fram på KTH, ETSI (2013), Safi (2013), Du (2015). Livscykelkostnader har även studerats vid LTU, Ditrani (2010), och i Mainline (2013). För Gruvbrons har studier av livscykelkostnaderna påbörjats.

5.9 Koppling till och relevans för branschprogrammet

Projektet har bidragit till att ge svar på flera av de frågor BBT-branschprogrammet ställer beträffande hållbart byggande och uppföljning av befintliga konstruktioner inom framför allt följande områden:

A2. Hållbart byggande - säkerhet, bärighet, funktion och miljö

A.2.1 Säkerhet, robusthet och sårbarhet – En betydande robusthet finns i den studerade typen av broar och säkerheten mot brott är större än den som erhålls med modellerna i de europeiska betongnormerna.

A.2.4 Metodik för individuell bärighetsklassning av broar – En kombination av FE-modellering och analytiska studier baserade på verklig geometri och aktuella materialdata har goda förutsättningar att kunna ge betydligt mer kvalificerade bedömningar av kvarvarande bärförmåga än nu tillämpade metoder.

A.2.5 Beständighet och livslängd hos nya byggnadsverk – Projektet ger underlag för förbättrade metoder att bestämma beständighet och livslängd hos spännbetongbroar.

A3. Uppföljning och utveckling av befintliga konstruktioner – Projektet ger underlag för metoder för bättre uppföljning och utveckling av befintliga konstruktioner

A.3.1 Mätmetoder – I projektet har en ny metod för fotografisk töjningsmätning provats. Resultaten har ännu inte helt hunnit utvärderas men de ser lovande ut.

A.3.2 Bedömning av tillstånd och livslängd – Projektet ger underlag för förbättrade metoder för bedömning av tillstånd och livslängd.

5.10 Tidsplan

Modellering av bron ägde rum under januari-april 2014 och följdes av provbelastning i maj-juni. Därefter vidtog analys och kalibrering av använda modeller under hösten 2014 och våren 2015, se Tabell 5.1

Tabell 5.1: Övergripande tidplan.

Aktivitet	Jan-April 2014	Maj-Juli 2014	Augusti- December 2014	Januari – Juni 2015
Inledande analys. Detaljplanering	X			
Belastningsförsök		X		
Kalibrering av metoder för tillståndsbedömning			X	
Fortsatta analyser och rapportskrivning				X

6 Fortsatta studier

Fortsatta studier planeras av metoder och modeller för utvärdering av säkerhet, funktionskrav och hållbarhet hos andra befintliga spännbetongbroar. Specifikt behöver säkerhet, robusthet och sårbarhet, tekniska funktionskrav, hållbarhet och livscykelanalys studeras närmare för att göras praktiskt tillämpbara. Även analysen av temperatureffekter behöver förfinas för att kunna dra slutsatser från denna bro.

7 Referenser

- ACI-318 (2011). "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", Farmington Hills, Michigan: *American Concrete Institute*, 503 pp, ISBN 978-0-87031-744-6.
- ASCE-ACI 445. (1998). "Shear and Torsion: Recent approaches to shear design of structural concrete." *Journal of Structural Engineering*, 124(12), pp. 1375-1417.
- Amir, S. (2014): Compressive membrane action in prestressed concrete deck slabs. Doctoral Thesis. Delft: Delft University of Technology, 314 pp.
- Bagge, N. (2014). Assessment of Concrete Bridges: Models and Tests for Refined Capacity Estimates. Licentiate Thesis. Luleå: Luleå University of Technology, 132 pp. (46 pp + 3 papers). Available at <http://pure.ltu.se/portal/files/100674208/Niklas>
- Bagge, N., Nilimaa, J., Blanksvärd, T. & Elfgren, L., (2014). Instrumentation and Full-Scale Test of a Post-Tensioned Concrete Bridge. *Nordic Concrete Research*, 51, pp. 63-83.
- Bagge, N., Sas, G., Nilimaa, J., Blanksvärd, T., Elfgren, L., Tu, Y. & Carolin, A., (2015a). *Loading to failure of a 55 year old prestressed concrete bridge*. Helsinki, IABSE Workshop Helsinki – Safety, Robustness and Condition Assessment of Structures.
- Bagge, N., Shu, J., Plos, M. & Elfgren, L., (2015b). *Punching Capacity of a Reinforced Concrete Bridge Deck Slab Loaded to Failure*. Oslo, Nordic Concrete Federation: Residual capacity of deteriorated concrete structures.
- Bagge, N., Nilimaa, J., Enochsson, O., Sabourova, N., Grip, N., Emborg, M., Elfgren, L., Lundmark, T. & Tu, Y., (2015c). *Protecting a five span prestressed bridge against ground deformations*. Geneva, IABSE Workshop – Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges.
- Bagge, N., Nilimaa, J., Blanksvärd, T., Bernspång, L., Täljsten, B., Elfgren, L., Sas, G. & Tu, Y., (2015d). *Performance of a prestressed concrete bridge loaded to failure*. Geneva, IABSE Conference – Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges.
- Bagge, N. & Elfgren, L., (2015e). *Structural performance and failure loading of a 55 year-old prestressed concrete bridge*. Foz do Iguaçu, 8th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (submitted).
- Bagge, N., Nilimaa, J. & Elfgren, L., (2015f). Residual prestress force evaluation of a decommissioned concrete bridge through field tests and FEA. *Journal of Structural Engineering* (to be submitted).
- Bentz, E. C., Vecchio, F. J., and Collins, M. R. (2006). "Simplified modified compression field theory for calculating shear strength of reinforced concrete elements." *ACI Structural Journal*, 103(4), pp. 614-624.
- Blanksvärd, Thomas; Häggström, Jens; Nilimaa, Jonny; Sabourova, Natalia; Grip, Niklas; Täljsten, Björn; Elfgren, Lennart; Carolin, Anders; Paulsson, Björn; och Tu, Yungming (2014): "Test to failure of a steel truss bridge – Calibration of assessment methods". IABMAS 2014, Shanghai. To be published, 6 pp.
- Brigade (2011): Brigade software is described on www.scanscot.com. It is based on Abaqus, see <http://www.3ds.com/products/simulia/portfolio/abaqus/overview/>

- Broo, H., Plos, M., Lundgren, K., and Engström, B. (2009). Non-linear finite-element analysis of the shear response in prestressed concrete bridges. *Magazine of Concrete Research*, Vol 61, Issue 8, pp. 591 –608.
- BV Bridge (2003): "BVS 583.10 Broregler för nybyggnad – BV Bro, utgåva 9 (Rules for new bridges – version 9. In Swedish)". Borlänge: *Banverket*.
- CEN (2004). "Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings", *EN 1992:1-1.Brussels. European Committee for Standardization*, Revised November 2010, pp. 225, ICS: 91.010.30; 91.080.40 8
- Collins M. P. and Michell D. (1991): "Prestressed Concrete Structures". *Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., USA* 1991, 766 pp. ISBN 0-13-691635-x. Reprinted by Response Publications, Toronto 1997, 766 p, ISBN 0-9681958-0-6.
- CSA-A23.3 (2004). "Design of concrete structures", Mississauga, Ontario, *Canada: Canadian Standards Association*, pp. 352, Reaffirmed 2010, ISBN 1-55397-559-6.
- Ditrani, Marco (2010): *Improving Transportation Investment Decisions through Life-Cycle Cost Analysis. Comparative LCCA of Bridges*. Master Thesis 2009:189 CIV. Luleå University of Technology, Luleå, 201 pp, available at <http://pure.ltu.se/portal/sv/>
- Du, Guangli (2015): Life cycle assessment of bridges, model development and case studies. Doctoral Thesis. Stockholm: Royal Institute of Technology, Structural Engineering and Bridges, TRITA-BKN. Bulletin 129.36 pp + 5 papers.
- Elfgren, Lennart (1975): American Structural Engineering Research. A report from an academic year in the United States and Canada 1972-73. Division of Structural Engineering, Luleå University of Technology, Technical Report 1975:08T, 62+6 sid, available at <http://pure.ltu.se/portal/sv/>
- Enochsson, Ola; Sabourova, Natalia; Emborg, Mats och Elfgren, Lennart (2011): Gruvvägsbron i Kiruna – Deformationskapacitet. LTU, Konstruktionsteknik, Teknisk Rapport 2011-05-15, 102 sid, available at <http://pure.ltu.se/portal/sv/>
- ETSI (2013): Bridge Life Cycle Optimization. A Nordic Research Project. The name is an acronym formed from the Finnish: "Elinkaareltaan Tarkoituksenmukainen Silta" meaning "Life-long Adapted Bridge" or more freely Bridge Life Cycle Optimization. Several reports and Excel programs can be downloaded from <http://etsi.aalto.fi/Etsi3/TG5.html>
- Fernandez Ruiz, M., Muttoni, A., and Hars, E. (2007) "Experimental investigation on the load carrying capacity of thin webs including post-tensioning tendons", *fib symposium Dubrovnik, Croatia*, p 483-490.
<http://infoscience.epfl.ch/record/116121/files/Fernandez07.pdf>
- Ferreira, D., Bairan, J., and Mari, A. (2012): "Modelação numérica de estruturas porticadas de betão armado e pré-esforçado críticas ao esforço transversal e propostas de reforço (Numerical simulation of reinforced and prestressed frame structures critical to shear and strengthening proposals, in Portuguese)" *Proc. Encontro Nacional Betão Estrutural-BE2012*, Oporto, Portugal, 10 pp. http://paginas.fe.up.pt/~be2012/Indice/BE2012/pdf/files/029_Artigo.pdf
- fib (2008): "Practitioners' guide to finite element modelling of reinforced concrete structures. State-of -art report". *Bulletin 45, International Federation for Concrete Structures*, Lausanne, 344 pp, ISBN 978-2-88394-085-7

- fib MC 2010 (2013): fib Model Code for Concrete Structures 2010, International Federation for Structural Concrete (fib), Lausanne, Switzerland, 402 pp.
- Forsell, Carl och Holmberg, Åke (1946): Stämpellast på plattor av betong. *Betong*, Vol. 31, nr 2, februari 1946, 29 sid. Finns även som särtryck, 31 sid.
- Häggström, J, Blanksvärd, T, Collin, P & Täljsten, B (2014): Assessment and full scale failure test of a steel truss bridge. i *IABSE symposium Madrid 2014: Engineering for progress, nature and people*. International Association for Bridge and Structural Engineering, Zürich, s. 2757-2764. I A B S E Symposium Report, nr 102. , [10.2749/222137814814070299](https://doi.org/10.2749/222137814814070299)
- Häggström, J & Blanksvärd, T (2015): Assessment and full scale failure test of a steel truss bridge. i *IABSE Workshop Helsinki 2015: Safety, Robustness and Condition Assessments of Structures*. International Association for Bridge and Structural Engineering, Zürich, s. 288-295.
- Idnurm, Siim; Idnurm, John and Tönskiri, Kristjan (2013): Tallin-Narva mnt asuva Loobe silla Katsekoormamine. Lõpparuanne (Tallin-Narva Road. Bridge in Loobu Katsekoormamine. Final Report. In Estonian) Teedeinstituut, Leping nr 12161, Maanteeamet (Contract nr 12161, Road Administration), Tallin University of Technology, Tallin, 103 pp.
- Jorgensen, J.L. & Larson, W. (1976): Field testing of a reinforced concrete highway bridge to collapse. *Transportation Research Record*, 607, pp. 66-71.
- Larsson, Oskar (2012): "Climate Related Thermal Actions fort Reliable Design of Concrete Structures". Ph D, Report TVBK-1042, Lund University, 158 pp. Available at <http://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=2427973&fileId=2428890>.
- Mainline (2013): A European Community 7th Framework Program research project with the full title: MAINTenance, renewaL and Improvement of rail transport iNfrastructure to reduce Economic and environmental impacts. Research Project 2011-2014 with 19 partners. Grant agreement 285121, SST.2011.5.2-6. Dr. Björn Paulsson, UIC/Trafikverket acts as Project Coordinator. Most of the project reports are available at www.mainline-project.eu
- Malm, R. (2009): "Predicting shear type crack initiation and growth in concrete with nonlinear finite element method". *Ph D thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, TRITABKN, Bulletin 97*. Available at <http://kth.divaportal.org/smash/get/diva2:209582/FULLTEXT01>
- McClure, R.M. & West, H.H. (1984): Full-scale testing of a prestressed concrete segmental bridge. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 11(3), pp. 505-515.
- Miller, R.A., Aktan, A.E., & Shahrooz, B.M. (1994): Destructive testing of decommissioned concrete slab bridge. *Journal of Structural Engineering*, 120(7), pp. 2176–2198.
- ML-D1.2 (2013): *Assessment methods for elderly rail infrastructure*. MAINLINE Deliverable D1.2.132 pp, see <http://www.mainline-project.eu/>
- ML-D1.4 (2015): *Guideline for application of new technologies to extend life of elderly rail infrastructure*. MAINLINE Deliverable D1.4, 2014-09-30, revised March 2015, 146 pp, see <http://www.mainline-project.eu/>
- Nilimaa, J. (2013): Upgrading concrete bridges: Post-tensioning for higher loads. Licentiate Thesis. Luleå: Luleå University of Technology, 302 pp.
- Nilimaa, Jonny (2015): Concrete Bridges. Improved Load Capacity. Doctoral Thesis. Luleå: Luleå University of Technology, Division of Structural Engineering, ISBN 978-91-7583-

344-3 (pdf), 180 pp (72 pp + 5 papers), Available at
http://pure.ltu.se/portal/files/102823692/Jonny_Nilimaa.pdf

- Nilimaa, J., Bagge, N., Blanksvärd, T. & Täljsten B. (2015a). NSM CFRP strengthening and failure loading of a post-tensioned concrete bridge. *Journal of Composites for Construction* (accepted for publication).
- Nilimaa, J., Blanksvärd, T., Bagge, N., Haghani, R., Al-Emrani, M. & Täljsten B. (2015b). Validation of an innovative prestressed CFRP laminate system for strengthening post-tensioned concrete bridges. Submitted to: *Composites Part B: Engineering*.
- Oh, B. H., Kim, S. K. & Lew, Y. (2002): Ultimate load behavior of post-tensioned prestressed concrete girder bridge through in-place failure test. *ACI Structural Journal*, 99(2), pp. 172-180.
- Pimentel, P., Figueiras, J. and Brühwiler, E. (2007).” Numerical modelling of prestressed beams for structural examination of existing bridges.” *Proc. in Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia CMNE 2007 / Congresso Ibero Latino-Americano sobre Métodos Computacionais em Engenharia, XXVIII CILAMCE*, (eds. J. César de Sá, R. Delgado, A. Rodríguez Ferran, J. Oliver, P.R.M. Lyra, J.L.D. Alves), 13–15 Jun. 2007, Porto. APMTAC, Lisboa, ISBN: 978-972-8953-16-4.
- Plos, M. (1990): ”Skjuvförsök i full skala på platttrambro i armerad betong. (Full scale shear test of a reinforced concrete slab frame bridge. In Swedish)”. *Göteborg: Chalmers tekniska högskola, Konstruktionsteknik – Betongbyggnad, Rapport 90:3*, 45 +72 pp.
- Plos, M., Gylltoft, K. & Cederwall, K. (1990): Full-scale shear tests on modern highway concrete bridges. *Nordic Concrete Research*, 9, pp. 134-144.
- Plos, M. (1995): “*Application of Fracture Mechanics to Concrete Bridges. Finite Element Analysis and Experiments*”. *Ph D Thesis. Publication 95:3, Chalmers University of Technology, Division of Concrete Structures*, 57 + 70 pp.
- Plos, Mario; Shu, Jiangpeng; Zandi, Kamyab & Lundgren, Karin (2015): A multi-level structural assessment proposal for reinforced concrete bridge deck, 31 pp. Ingår i licentiatavhandlingen Shu (2015) och har sänts in till “Structure and Infrastructure Engineering”.
- Puurula, A., Enochsson, O., Thun, H., Nordin, H., Täljsten, B., Elfgren, L., Paulsson, B., and Olofsson, J., (2008): “*Full-Scale Test to Failure of a Strengthened Reinforced Concrete Bridge. Calibration of Assessment Models for Load-bearing Capacities of Existing Bridges.*” *Nordic Concrete Research, Vol. 2008:2, Publ. 38*, The Nordic Concrete Federation, Oslo, December 2008, pp 121-132.
- Puurula, A., (2012): “*Load-Carrying Capacity of a Strengthened Reinforced Concrete Bridge. Non-linear finite element modeling of a test to failure. Assessment of train load capacity of a two span railway trough bridge in Örnsköldsvik strengthened with bars of Carbon Fibre Reinforced Polymers (CFRP)*”. *Doctoral Thesis, Div. of Structural Engineering, Luleå University of Technology*, 328 pp, ISBN 978-91-7439-433-7. Available at http://pure.ltu.se/portal/files/36697444/Arto_Puurula.pdf [Accessed August 2012]
- Puurula, Arto M., Ola Enochsson, Gabriel Sas, Thomas Blanksvärd, Ulf Ohlsson, Lars Bernspång, Björn Täljsten & Lennart Elfgren (2013): “Loading to failure and 3D nonlinear FE modelling of a strengthened RC bridge”, *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance, Structure and Infrastructure Engineering* (2013): DOI: 10.1080/15732479.2013.836546, 14 pp.

- Puurula, A., Enochsson, O., Sas, G., Blanksvärd, T., Ohlsson, U., Bernspång, L., Täljsten, B., Carolin, A., Paulsson, B. & Elfgren, L. (2014): Assessment of the strengthening of an RC railway bridge with CFRP utilizing a full-scale failure test and finite element analysis. *Journal of Structural Engineering*, pp. 1-11. Available at [http://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001116](http://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001116)
- Richard, B., Epailard, S., Cremona, C., Adelaide, L., Elfgren, L. (2010): "Nonlinear finite element analysis of a 50 years old reinforced concrete trough bridge". *Engineering Structures*, Vol 32, No 12, pp 3899-3910. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.09.003>
- Safi, Mohammed (2013): Life-cycle costing: Applications and Implementations in Bridge Investment and Management. Doctoral Thesis. Stockholm: Royal Institute of Technology, Structural Engineering and Bridges, TRITA-BKN. Bulletin 121.
- Sas, G., (2011): "*FRP Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams*". Doctoral Thesis. Luleå University of Technology, ISBN 978-91-7439-239-5, 107 pp + 5 App. Available at http://pure.ltu.se/portal/files/32725277/Gabriel_Sas_PhD_Thesis.pdf [Accessed August 2012]
- Sas, G., Blanksvärd, T., Enochsson, O., Emborg, M., Täljsten, B., Puurula, A. & Elfgren, L. (2011): "Flexural-shear failure of a full scale tested RC bridge strengthened with NSM CFRP: Shear capacity analysis" *Nordic Concrete Research*. 2/2011, 44, s. 189-206. 18 pp.
- Sas, G., Blanksvärd, T., Enochsson, O., Täljsten, B., Elfgren, L., (2012): "Photographic strain monitoring during full-scale failure testing of Örnköldsvik bridge". *Structural Health Monitoring*, July 2012, vol 11, pp 489-498, <http://shm.sagepub.com/content/11/4/489.full.pdf+html>
- Sas, G., Bagge, N., Häggström, J., Nilimaa, J., Puurula, A., Blanksvärd, T., Täljsten, B., Elfgren, L., Carolin, A., & Paulsson, B., 2015. *Tested versus code capacity of existing bridges - Three examples*. Geneva, IABSE Conference – Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges, 8 pp.
- SB, (2008): "Sustainable Bridges – Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives", A European Integrated Research Project during 2003-2008 within FP6, No TIP3-CT- 2003-001653, see www.sustainablebridges.net [Accessed Nov 2013]. Four guidelines have been prepared. Background documents with state-of-art reports, analytical and numerical analyses and test results are also provided. 10
- SB-6.3 (2007): "*Field Tests. Örnköldsvik Bridge – Full scale testing; Vitmossen – Strengthening of the subsoil; Frövi Bridge – Strengthening and monitoring*". *Deliverable D6.3. Sustainable Bridges – a project within EU FP6*. Edited by Björn Täljsten and Anders Carolin. Available from: www.sustainablebridges.net. [Accessed August 2012]
- SB-7.3 (2008): "Field Test of a Concrete Bridge in Örnköldsvik, Sweden". *Deliverable D 7.3, Sustainable Bridges – Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives*. Edited by Lennart Elfgren, Ola Enochsson and Håkan Thun. Available from: www.sustainablebridges.net [Cited August 2012]
- SB-LRA (2007): *Load and Resistance Assessment of Railway Bridges*. Guideline developed in the EC-FP6 Project Sustainable Bridges 428 pp. Available at www.sustainablebridges.net
- Scanlon, A. & Mikhailovsky, L. (1987): Full-scale load test of three-span concrete highway bridge. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 14(1), pp. 19-23.

- Schlune, H., Plos, M., and Gylltoft, K. (2009) "Improved bridge evaluation through finite element model updating using static and dynamic measurements". *Engineering Structures*, 31(7), pp 1477-1485
- Schmidt, J.W., Hansen, S.G., Barbosa, R.A. & Henriksen, A. (2014): Novel shear capacity testing of ASR damaged full scale concrete bridge. *Engineering Structures*, 79, pp. 365-374.
- Scordelis, Alexander C; Larsen, Per K, and Elfgren, Lennart G (1977): "Ultimate Strength of Curved RC Box Girder Bridge". *Journal of the Structural Division*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol. 103, No ST 8, Proc. Paper 13113, New York, August 1977, pp 1525-1542
- Scordelis, Alex C; Elfgren, Lennart G, and Larsen, Per K (1979): "Time-Dependent Behaviour of Concrete Box Girder Bridges". *ACI Journal*, Vol. 76, Title 76-9, American Concrete Institute, Detroit, January 1979, pp 159-177.
- Shu, Jiangpeng (2015): Structural Analysis of Existing RC Bridge Deck Slabs. Licentiate Thesis 2015:03, Göteborg: Chalmers University of Technology, Division of Structural Engineering, ISSN 1652-9146, 8+17 pp + 3 appended papers.
- SIA 269 (2011): *Existing structures*. A series of Swiss Codes. Zürich: Swiss Society of Engineers and architects, (2011): SIA 269:2011 Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken (In German) English version: Existing structures - Basis for examination and interventions, 24 p. SIA 269/1:2011 Erhaltung von Tragwerken - Einwerken (Actions. In German), 24 p. SIA 269/2:2011 Betonbau (Concrete. In German), 44 p. SIA 269/3 Stahlbau (Steel. In German). SIA 269/4 Stahl-Beton-Verbundbau (Composite structures. In German). SIA 269/5 Holzbau (Timber/Wood. In German). SIA 269/6 Mauerwerksbau (Masonry. In German). SIA 269/7 Geotechnik (Foundation Engineering. In German).
- Sundquist, Håkan (2005): "Punching Research at the Royal Institute of Technology (KTH) in Stockholm 1929 – 2005. XIX Symposium on Nordic Concrete Research & Development", Sandefjord, Norway.
- Täljsten, B. (1994): Plate bonding. Strengthening of existing concrete structures with epoxy bonded plates of steel or fibre reinforced plastics. Doctoral Thesis. Luleå: Luleå University of Technology (LTU), 300 pp
- Tazaly, Zeinab (2011): "Punching Shear Capacity of fibre Reinforced Concrete slabs with Conventional reinforcement. Computational analysis of punching models". Master of Science Thesis TRITA-BKN 334, KTH, Stockholm, 104 pp. Available at <http://kth.divaportal.org/smash/get/diva2:610902/FULLTEXT01>
- Vogel, T. and Bargähr, R. (2006): "Zustandserfassung von Brücken bei deren Abbruch (ZEBRA) (Condition Survey of Bridges during their Demolition, In German)". Zürich, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen. Forschungsauftrag AGB 1998/101(86/98), 187 pp.
- Zhang, J., Peng, H., Cai, C. (2011a): Field study of overload behavior of an existing reinforced concrete bridge under simulated vehicle loads. *Journal of Bridge Engineering*. 16(2), pp. 226-237.
- Zhang, J.Q., Ren, H.W. & Yu, B. (2011b): Failure testing of a full-scale reinforced concrete T-girder bridge. *Advanced Material Research*, 243-249, pp. 1767-1773.

Zwicky, D. and Vogel, T (2000). "Bruchversuche an ausgebauten Brückenträgern (Ultimate load tests on dismantled bridge girders. In German)", *IBK-report Nr. 258, ETH Zurich*, Institute of Structural Engineering, Birkhäuser Basel, Nov. 2000, 167 pp.