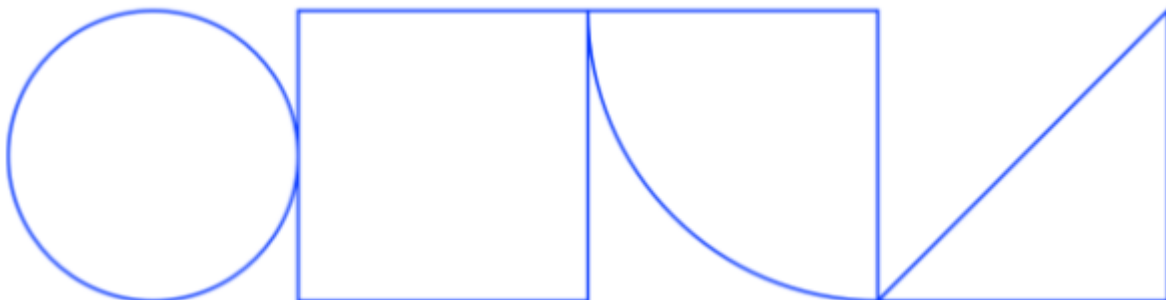


Demontering av E4-bron över Kalix älv

Erfarenhetsåterföring för underhåll och nybyggnad av förspända betongbroar

Tobias Larsson och Lennart Nilsson, NCC
Gabriel Sas, Jaimes Gonzalez-Libreros, Ulf Ohlsson, Cosmin Daescu och Lennart Elfgren

2023-02-28



Omslagsfoto; E4-bron över Kalix älv före rivning. Bygget av en ny bro pågår i förgrunden,

Förord

Detta SBUF-projekt om demonteringen av bron över Kalix älv har letts av Tobias Larsson, Tekn. Dr., Teknikchef, och Lennart Nilsson, Civ.ing., Platschef vid NCC, i samverkan med Gabriel Sas, Tekn. Dr., Professor och ämnesföreträdare i Bygghkonstruktion vid Luleå tekniska universitet, LTU.

Innan bron demonterades, provbelastades den av en grupp bestående av Jaime Gonzalez-Libreros, PhD; Chao Wang, PhD; Yongming Tu, PhD. Professor vid Southeast University, Nanjing, Kina, och gästprofessor vid LTU; Cosmin Daescu, PhD, Politehnica University Timisoara, Timisoara, Rumänien och gästforskare vid LTU; Lennart Elfgren, Tekn. Dr., seniorprofessor vid LTU; samt doktoranderna Angelica Agredo-Chavez, MSc, Silvia Sarmiento, MSc, Vanessa Saback, Tekn. Lic., Ali Mirzazade, Tekn. Lic. och Adrian Ulfberg, Civ.ing. Vidare har Mats Petersson, laboratoriechef, och Erik Andersson, laboratorieingenjör vid Comp Lab, LTU, planerat och genomfört huvuddelen av mätningarna. Även representanter från Lunds tekniska högskola, LTH, Chalmers tekniska högskola och Kungliga tekniska högskolan, KTH, har medverkat jämte företag från Finland, Norge och Danmark.

Trafikverkets representant vid byggandet av den nya bron över Kalix Älv och vid rivningen av den gamla bron har varit Erik Vallin, Civ.ing., Peter Viklund, Civ.ing., Oskar Aronsson, Civ.ing. och Robert Hällmark, Tekn. Dr.

Hanna Lundin, civilingenjörstudent vid LTU, har i ett examensarbete utfört en litteraturstudie och preliminära beräkningar. Övriga beräkningar har gjorts av Cosmin Daescu, som även sammanställt denna rapport, med bidrag från Tobias Larsson, Lennart Nilsson, Gabriel Sas, Jaimes Gonzalez-Libreros, Ulf Ohlsson och Lennart Elfgren. I en referensgrupp har Martin Laninge, PEAB, Mario Plos, Chalmers/Trafikverket och Raid Karoumi, KTH, medverkat.

Vi vill tacka

Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond, SBUF, som finansierat projektet
NCC, som har lett projektet och bidraget till dess finering
Trafikverket, som beställt såväl den nya bron som rivningen av den gamla bron
LTU och alla engagerade forskare som bidragit till att kunskap och erfarenhet tagits till vara vid rivningen av den gamla bron.

Luleå i februari 2023

Tobias Larsson och Lennart Nilsson, NCC

Gabriel Sas, Jaime Gonzalez-Libreros, Ulf Ohlsson, Cosmin Daescu och Lennart Elfgren, LTU

Sammanfattning

Många broar från tiden efter andra världskriget börjar närma sig sin tekniska livslängd. När de rivs, bör detta ske på ett sätt som tar vara på erfarenheter och data, som kan vara till nytta vid underhåll av andra broar och vid planerad nybyggnation. Med förbättrade metoder sparas kostnader såväl för entreprenörer som för beställare och samhälle.

I Kalix har en ny bro byggts för E4-an över Kalix älv och den befintliga spännbetongbron från 1957 har rivits. Kalix älv ingår i ett Natura 2000-område och därför måste rivningen vara miljövänlig. I projektet har vi studerat alternativa möjligheter och utvecklat en metod att genomföra rivningen i omvänd ordning mot när bron byggdes. En fördel var att den nya bron endast låg 5 m nedströms den gamla bron. Den nya bron kunde därför användas för transport av grävmaskiner försedda med knip- och krosskäftar som successivt kunde tugga sönder betongen. Avfallet tippades i pråmar under bron.

Demonteringen förlöpte utan större problem. En utmaning var losskoppling av ytterändarna av de fritt frambyggda konsolspannen där det fanns risk för inbyggda krafter. Det visade sig att så inte vara fallet. Det finns fall där ras inträffat, när man varit oförsiktig och inte förberett sig tillräckligt.

De studier som gjorts på bron i samband med rivningen visar att:

- betonghållfastheten ökat väsentligt från ca 48 MPa till ca 68 på grund av fortsatt härdning av grovmalen cement efter 28 dygn.
- spännkraften har visat sig sjunka med endast cirka 4 – 10 % mot ca 14 % enligt beräkningar grundade på gällande Eurokoder.
- ingen märkbar korrosion har observerats på spännarmeringen, trots litet täcksikt i farbanan.
- utmattningskapaciteten är opåverkad
- med hänsyn till ovanstående är den bärförmåga som beräknats vid en teoretisk tillståndsbedömningen 2015 väsentligt på säkra sidan.

Sammanfattningsvis kan framhållas att vi funnit värdefull information som den befintliga bron kunde ge beträffande hållbarhet och nedbrytningsprocesser och för kalibrering av metoder för tillståndsbedömning. Bättre metoder bidrar till ökad livslängd, ett mer hållbart samhälle och en mer cirkulär ekonomi.

Summary in English

Demolition of the bridge for route E4 over Kalix River.

Experiences for maintenance and construction of prestressed concrete bridges.

Report Project No. 13939 to SBUF (The Development Fund of the Swedish Construction Industry).

Many bridges from the 1950's era begin to get to the end of their designed technical lifespan. When demolished, it is a good idea also to take advantage of the possibility to improve experience and collect data that can be useful in maintenance of other existing bridges or in designs for new bridges.

A new bridge has been constructed in Kalix for the E4-road over the Kalix River in order to replace an old box-girder bridge, built in 1957, that has now been demolished.

With the bridges being located in a Natura 2000 site, the project approach created unique challenges for an eco-friendly demolition process. Thus, several options for the demolition have been studied, while creating the framework for collecting valuable data that the existing bridge can provide, in terms of degradation process, in time, and condition assessment through monitoring.

The bridge was demounted in opposite order to what it was constructed with the free cantilever method. An advantage was that the new bridge is situated only 5 m downstream of the old one. Thus, the new bridge could be used for transportation of diggers adapted with crushers to chew old concrete into pieces. The debris was then collected on a barge situated below the bridge.

The demounting of bridge could be carried out without large problems. One challenge was the demounting of the cantilever ends from each other and from the outer spans. Here a risk for internal forces was obvious. However, no big forces were at hand contrary to what has been seen in other demolition projects.

The studies carried out before the demolition showed:

- The concrete compressive strength had increased from about 48 MPa to about 68 due to continued hardening after 28 days of coarsely ground cement.
- The prestressing forces have been reduced only by 4 – 10% instead of the 14% predicted by the Euro Codes.
- No observable corrosion could be observed on the prestressing although they only had a cover of 100 mm in the top slab.
- The fatigue capacity is unaffected by time
- With regard to the results above, the capacity, which was found in 2015 in a theoretical assessment based on codes, is probably on the safe side.

In summary, condition assessment methods for existing bridges are very useful tools in identifying signs of degradation, remaining service life and possible local/global interventions necessary to extend the service life of structures.

Better assessment methods can certainly contribute to increased structural longevity, a more sustainable society and a more circular economy.

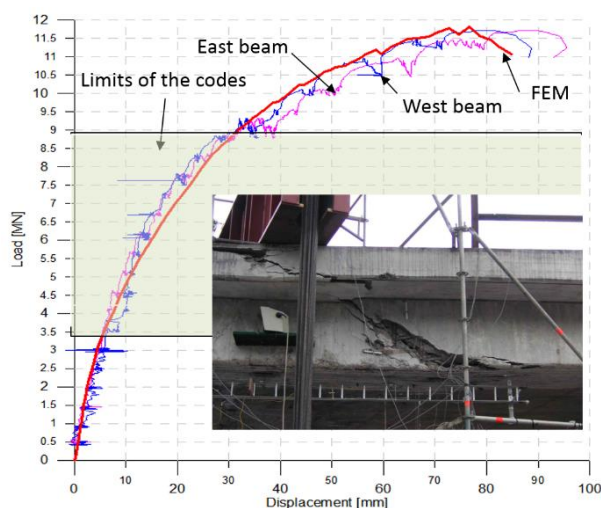
Innehåll

Förord	3
Sammanfattning	4
Summary in English	6
Innehåll	8
1. Bakgrund	10
2. Syfte	12
3. Metodik	13
4. Litteraturöversikt	14
5. Modeller	21
6. Evaluering	32
7. Diagnostisk provning	38
8. Demontering	41
9. Slutsatser	46
Litteraturlista	47
Appendix	51
A.1 Review of Literature	51
A.2 Demolishing Approach	51

1. Bakgrund

I Sverige förvaltar Trafikverket drygt 25 000 broar varav mer än 1 650 är av spännbetong. Till detta kommer broar som förvaltas av kommuner och företag. Många broar byggdes efter andra världskriget och närmar sig nu sin formella tekniska livslängd, Täljsten et al. (2019). Man genomför mer eller mindre avancerade bedömningar av broarnas tillstånd och tar sedan beslut om reparation/förstärkning eller rivning,

Stora summor kan sparas om broarnas liv kan förlängas och om man förstärker/river på ett sådant sätt att man drar nytta av erfarenheterna från de gamla broarna om hur och varför de brutits ned. Härigenom kan entreprenörer optimera sina kostnader för rivning respektive om/nybyggnad samtidigt som kundnyttan ökar för beställare och samhälle. Vi har vid studiet av rivningsmetoder varit i kontakt med tre tyska specialister på brorivning: Ralf Holst (2020), tyska vägverket (BAST); Stefan Franz (2020) tyska vägverket (DEGES), och Rolf Jung (2020), Leonhardt, Andrä und Partner. Vi har även i samarbete med många parter studerat bärförmåga och tillstånd och funnit att befintliga metoder ger mycket konservativa resultat. Det finns ofta en inneboende, outnyttjad kapacitet, som kan användas. Exempel på projekt är provbelastning och rivning av:



(1) en 50-årig trågbro av betong i Örnsköldsvik. Bron var mycket seg och klarade att bära ca 6 gånger sin dimensionerande last, SB 7.3 (2008), Puurula (2012), Puurula et al. (2013, 2015, 2016), Sas et al. (2012).



(2) en 55-årig fackverksbro över Åbyälven. Bron klarade att bära ca 3 gånger sin dimensionerande last innan överramstängerna knäckte ut, Mainline D1.2 (2013), Häggström (2016), Häggström et al. (2017 a, b).



(3) en 55-årig spännbetongbro i Kiruna. De dimensionerande balkarna var sega och klarade att bära ca 4 gånger sin dimensionerande last. Betongplattan fick ett sprött stansbrott för ca 6 gånger sin dimensionerande last, Bagge (2017, 2019), Bagge et al. (2014, 2015 a, b, 2017, 2018 a, b), Nilimaa (2015), Nilimaa et al. (2015 a-c, 2018, 2020), Enochsson et al. (2011) och Elfgren et al. (2015, 2018, 2019).

2. Syfte

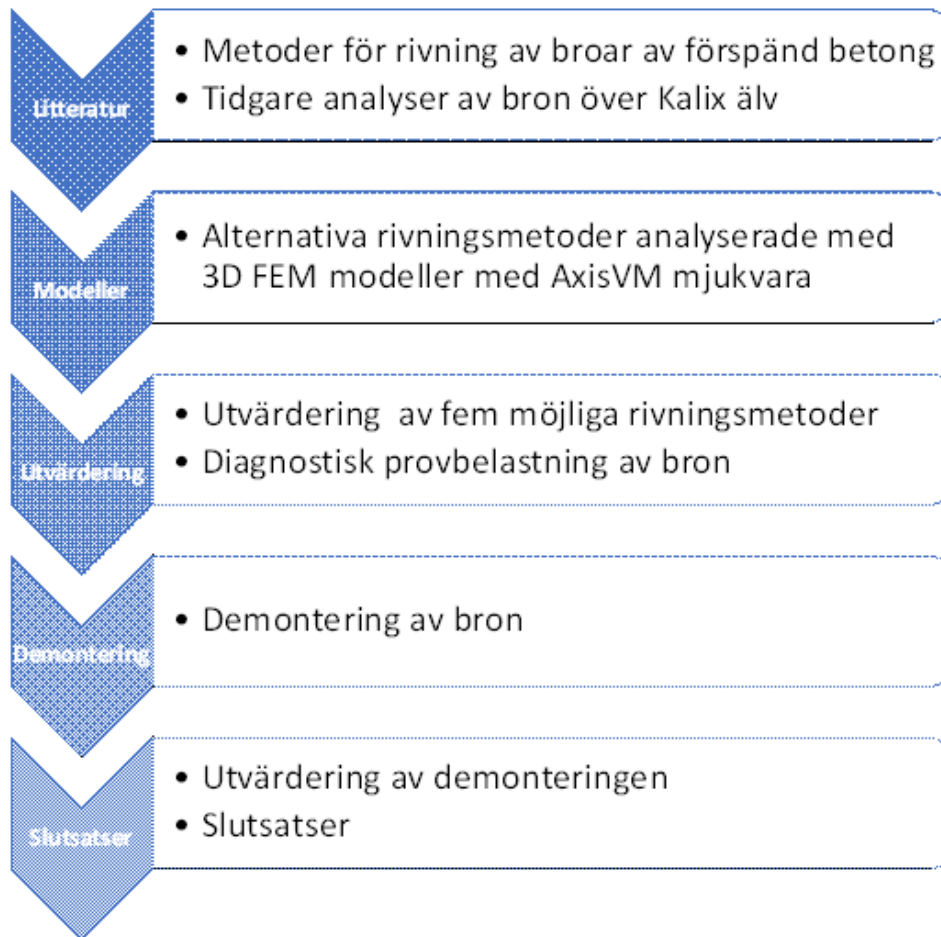
Syftet med projektet är att ta fram och dokumentera rivningsmetoder för den befintliga spännbetongbron för E4 över Kalix älv från 1957, så att erfarenheter tas till vara som kan användas vid rivning, underhåll/förstärkning och nybyggnation av andra broar. Genom att utveckla en optimal rivningsmetod kan entreprenören minska sina kostnader samtidigt som kundnyttan ökar för beställaren och samhället.

Data och kunskaper samlas in som kan användas vid planering av underhåll och nybyggnad av andra broar. Härigenom kan dessa broars hållbarhet förlängas och deras miljöpåverkan minimeras.

Projektet avgränsas till att gälla rivningen av E4-bron över Kalix älv, men erfarenheterna kan tillämpas på många andra broar. De är speciellt värdefulla för spännbetongbroar, vilka kan vara svåra att riva på grund av långa spännvidder. Innan bron revs, belastades den i bruksgränstillståndet upp till begynnande brottgränstillstånd med hjälp lastbilskonvojer. Beräknade deformationer jämförs med verkliga och de metoder som finns för tillståndsbedömning utvecklas och kalibreras så att de speglar verkliga förhållanden. Icke förstörande provningsmetoder för armeringskorrosion och spännkraftsförluster utvecklas och kalibreras.

3. Metodik

Nedanstående metodik/arbetsflöde användes:



Figur 3.1 Flödesschema för projektet.

4. Litteraturoversikt

4.1 Rivningsmetoder

Det enklaste sättet idag att riva en bro är att spränga sönder den. Om miljön inte tillåter detta får man tillgripa borrar, sågning och krossning av betong och skärning av stål med till exempel syrgas, plasma, laser eller vattenstråle, figur 4.1 och 4.2. Om tillräckligt utrymme finns kan man även använda en lanserställning och successivt demontera bron på den, figur 4.3, se Franz & Ansorge (2018), Schacht et al. (2018), Wagner (2017) och Nilimaa et al. (2020).



Figur 4.1 Demontering med grävmaskiner som tuggar sönder betongen. Bro över Main vid Gemünden (B27), spännvidd 110 m, Wagner (2017).

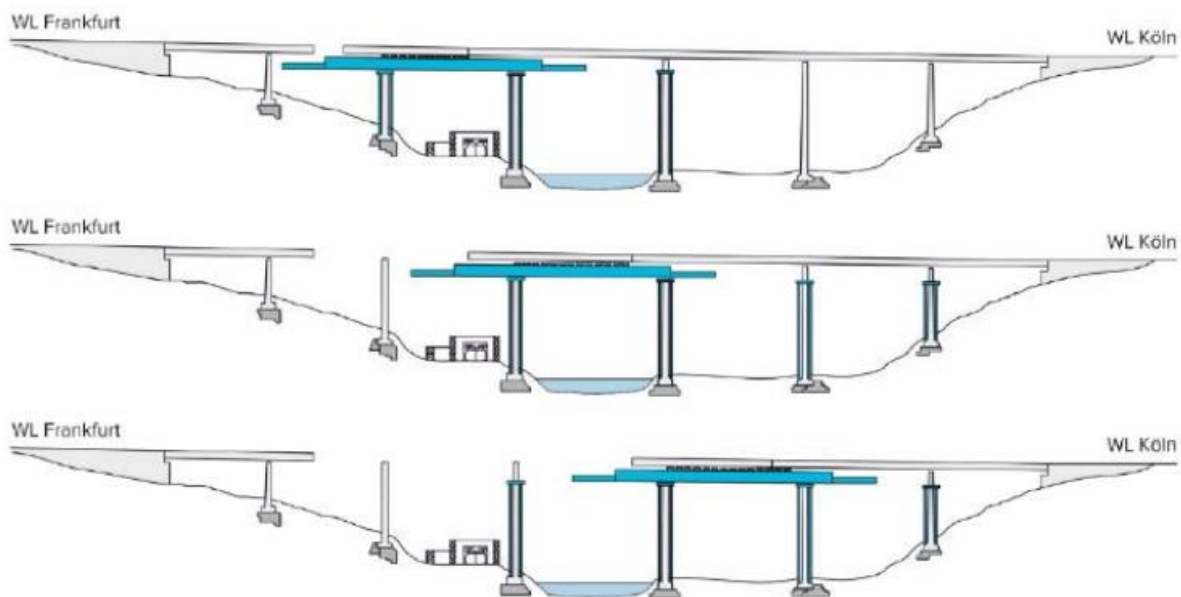
<https://www.beissnergmbh.de/referenz-01/>.

(54 sek) [Mainbrücke in Gemünden: So spektakulär läuft der Abriss](#)

Foto
Video



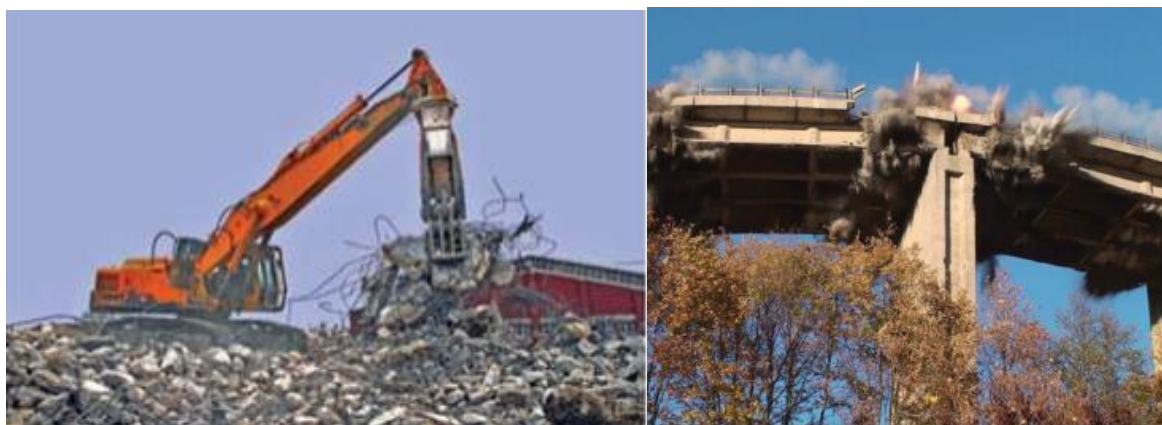
Figur 4.2. Rivning av Gruvbron i Kiruna efter försvagning av infästningar och knutpunkter. Nilimaa et al (2020).



Figur 4.3. Demontering av överbyggnad med lanserfackverk (engelska: movable scaffolding system, tyska: Vorschubrüstung, VSB), Schacht et al. (2018).

Förr byggde man ofta en ny bro där den gamla bron stått och återanvände/förstärkte vad man kunde av grundläggning mm. Om den gamla bron inte var helt uttjänt lät man den ofta stå kvar och fortsatte att använda den för lättare trafik medan man byggde en ny bro vid sidan om den gamla.

I ett examensarbete av Hanna Lundin (2022) har en litteratursökning genomförts beträffande demonteringsmetoder för betongbroar. Ett sammandrag av den redovisas i Appendix A.1 och nedan presenteras några resultat i Figur 4.4 och Tabell 4.1.



Figur 4.4. Vänster: Grävmaskin med knusare, Diven & Shaurette (2010); Höger: Sprängning av bro, Folchi & Auletta (2018). Från Lundin (2022).

Tabell 4.1 Metoder för rivning/demontering av betongbroar

<i>Demonteringsmetod</i>	<i>Fördelar</i>	<i>Nackdelar</i>
Maskinmonterad rivningsutrustning t ex hydraulisk hammare	<ul style="list-style-type: none"> • Hög produktivitet 	<ul style="list-style-type: none"> • Damm • Oväsen • Vibrationer • Skräp (betongfragment) • Hammaren kräver utrymme
Bilningsmaskin	<ul style="list-style-type: none"> • Hög produktivitet 	<ul style="list-style-type: none"> • Högt energibehov • Damm • Oväsen • Vibrationer • Skräp (betongfragment) • Hammaren kräver utrymme
Krossare	<ul style="list-style-type: none"> • Inget damm • Lågt ljud • Lätt att avlägsna avfall • Skiljer armering från betong 	<ul style="list-style-type: none"> • Hammaren kräver utrymme
Kran och kula		<ul style="list-style-type: none"> • Utrymmeskrävande • Oväsen • Damm • Skräp (betongfragment) • Vibrationer • Armeringen behöver kapas separat
Sprängning	<ul style="list-style-type: none"> • Hög produktivitet • Säker • Billig 	<ul style="list-style-type: none"> • Damm • Skräp (betongfragment) • Oväsen
Högtryckspump	<ul style="list-style-type: none"> • Avlägsnar nedbruten betong • Bra för att avlägsna partier med dålig betong 	<ul style="list-style-type: none"> • Slurry
Roterande cirkulär såg	<ul style="list-style-type: none"> • Rena sågsnitt • Inget damm • Låga vibrationer • Säker • Enkel hantering 	<ul style="list-style-type: none"> • Begränsat sågdjup • Långsam • Dyr
Sågning med diamantwire	<ul style="list-style-type: none"> • Rena sågsnitt • Inget damm • Inget skräp No debris • Låga vibrationer • Ingen skada på kvarvarande konstruktion • Obegränsat sågdjup 	
Mekanisk sönderdelning	<ul style="list-style-type: none"> • Inget damm • Inget ljud • Inga vibrationer • Enkelt förfarande • Billig 	<ul style="list-style-type: none"> • Armeringen behöver kapas separat • Begränsad kontroll av sprickriktningar
Kemisk sönderdelning	<ul style="list-style-type: none"> • Inget ljud • Inga vibrationer • Säker • Inga giftiga gaser 	<ul style="list-style-type: none"> • Långsam • Dyr • Armeringen behöver kapas separat • Begränsad kontroll av sprickriktningar



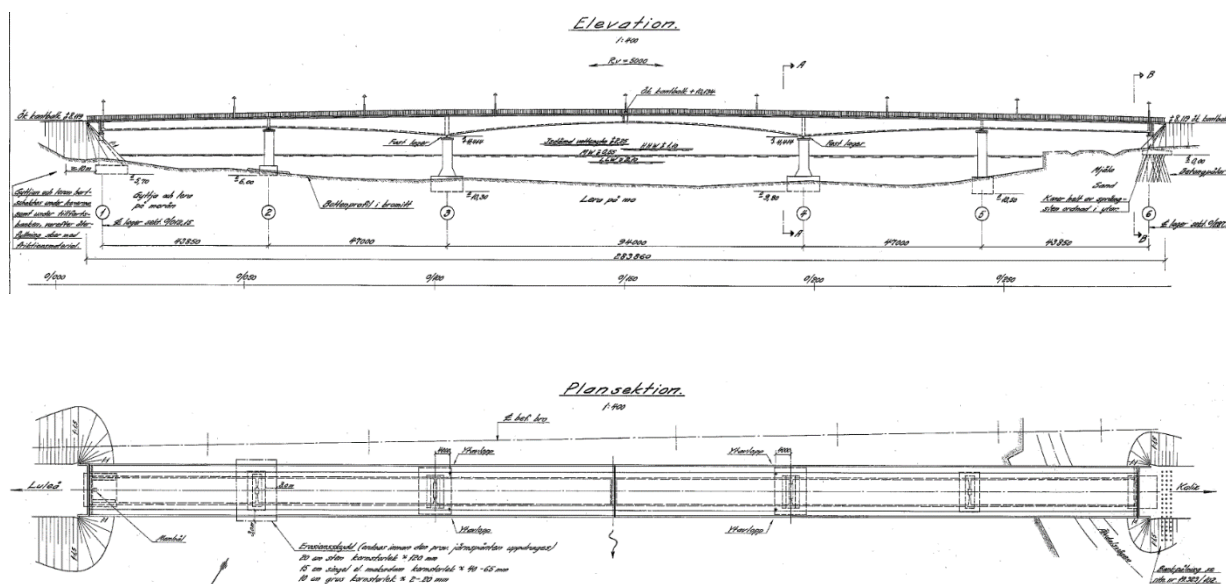
Figur 4.5. Rivning av 70 år gammal fritt frambygd konsolbro i nordvästra Indien, december 2022. Grävmaskinföraren klarade sig med blotta förskräckelsen.

[Rivningen misslyckas totalt – håller på att sluta i katastrof | Watch \(msn.com\)](#)

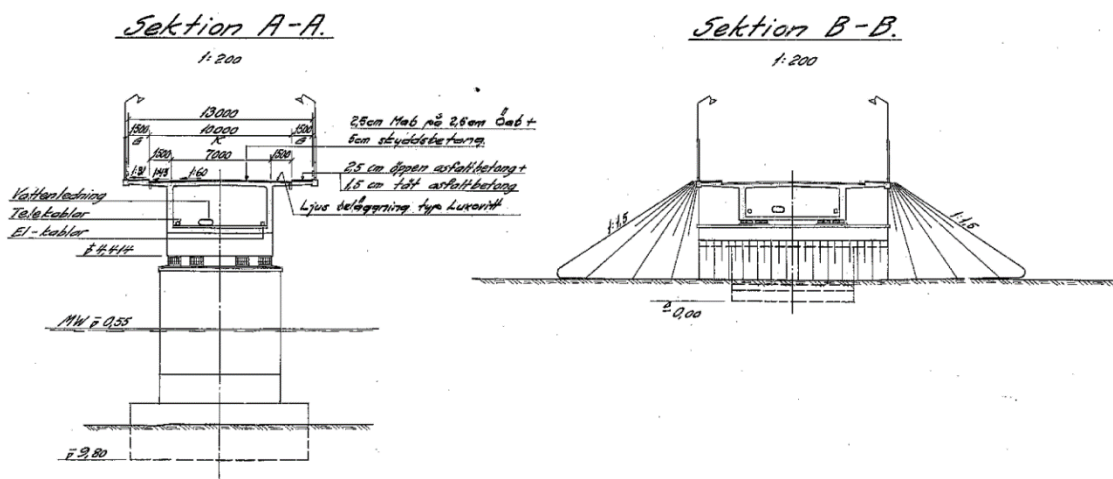
4.2 Tidigare analyser av bron över Kalix älv

Kalix älv har under lång tid varit en viktig transportled och under 1800-talet och början av 1900-talet var timmerflottning en omfattande verksamhet (Palumbo, 2017). På samma sätt som för övriga norrlandsälvar användes roddbåtar och senare färjor för att ta sig över älven. Den första bron byggdes 1930. Det var en 5 m bred fackverksbro av stål med största spännvidden 80m (Vägverket, 2005). Bron ersattes 1957 med en 13 m bred bro av förspänd betong med största spännvidden 94 m. Bron byggdes av Skånska Cementgjuteriet med successivt fritt frambyggda konsoldelar (tyska Freivorbau, engelska cantilevering construction) med ϕ 26 mm spännstål enligt Dywidag-förfarandet.

Dimensioneringsberäkningarna utfördes bland andra av Uko Müllersdorf enligt metoder som dokumenterats i Lorentsen (1963). Det var den andra bron i Sverige som byggdes med detta förfarande. En elevation och en plan av bron visas i Figur 4.6, två tvärsektioner i Figur 4.7 och några längdsektioner i Figur 4.8 och 4.9.

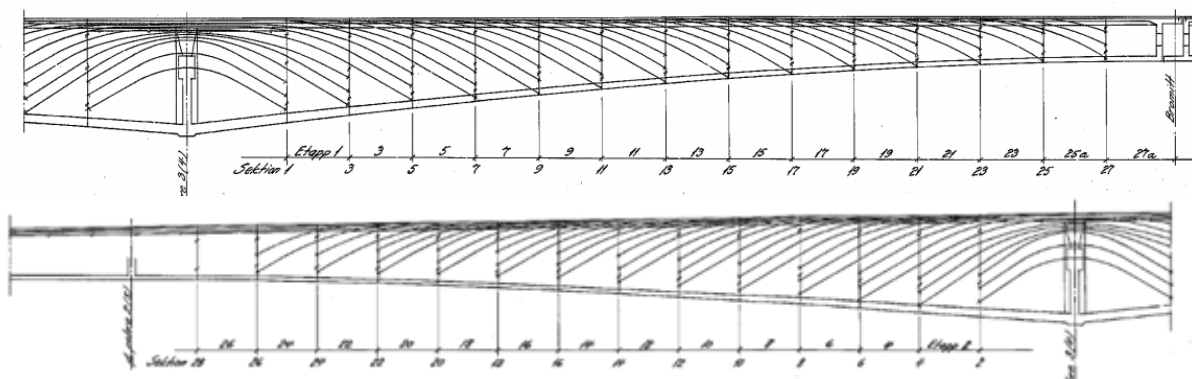


Figur 4.6. Elevation och plan av bron över Kalix älv byggd 1957. Den har fem spann med längderna $43,85 + 47 + 2 \cdot 47 + 47 + 43,85$ m. Vänster(väster) mot Luleå, höger(öster) mot Kalix. Ritning 19.323/15.

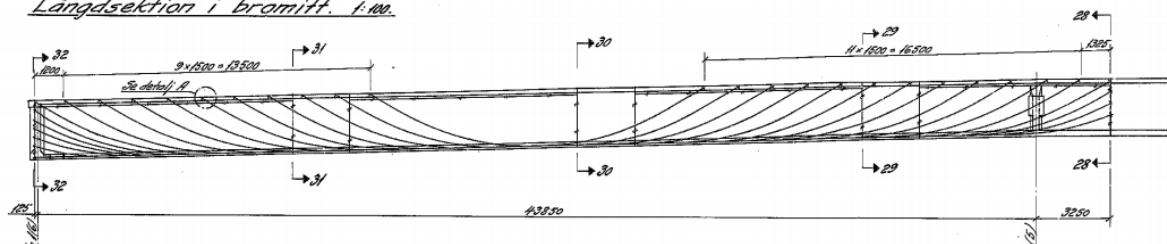


Figur 4.7 Tvärsektioner av bron över Kalix älv. Ritning 19.323/15.

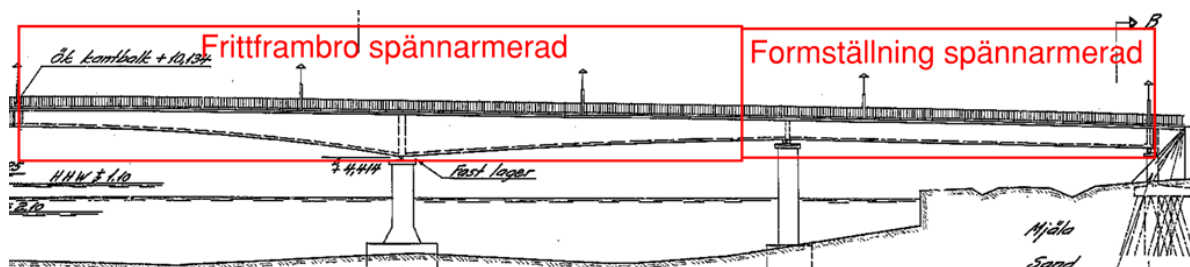
Längdsektion i bromitt. 1:100.



Längdsektion i bromitt. 1:100.



Figur 4.8. Längdsektioner i bronns mittsnitt. Överst de båda konsolerna från en mittpelare och därunder ett ändspann.



Figur 4.9. Principskiss för byggandet av bron med en mittdel som successivt byggdes ut som konsoler från mittpelarna 3 och 4 och två ändspänn med traditionell formsättning.

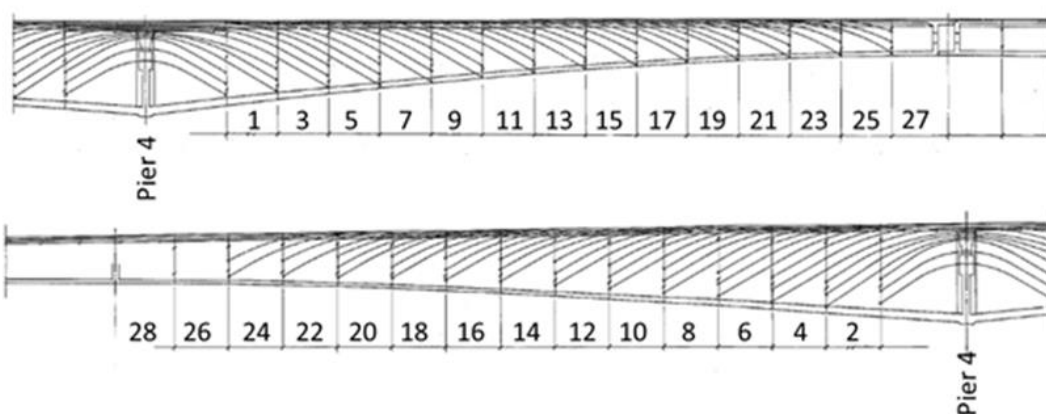
I samband med att önskemål fanns att öka bärigheten på bron gjordes en analys av brons bärighet med beräkningsprogrammen Stripstep 2 och 3, SWECO (2015). I sammanfattningen säger man: "Huvudbärningens kapacitet i bruksgränsberäkningarna och m.a.p. utmattning är mycket låg. För bruksgränstillståndet går det överhuvudtaget inte att tillåta trafik på bron dels eftersom avståndet från centrum spännstål till betongyta är mindre än kravet på 100 mm och dels eftersom krav på sprickfrihet och dragpåkänning inte går att uppfylla enligt TDOK 2013:0267(2013) avsnitt 4.3.1 och 4.4.1. Med anledning av dessa och andra brister beslöt man att bygga en ny bro.

5. Modellering

5.1 2D-modellering

Med programmet ATENA (2022) gjorde Hanna Lundin (2022) en tvådimensionell modell av bron i bruksgränstillstånd utan trafiklast och med spännkraft. För byggskedet gjordes ett antal linjära beräkningar där egentyngd och spännkraft lades på stegvis i den ordning som utbyggnaden en gång gjordes. Hela bron modellerades sedan med linjär och icke-linjär modell. Modellering av demonteringsprocessen utfördes sedan med ett antal linjära beräkningar där konsoldelarna successivt togs bort under en tänkt demonteringsprocess. Betongen antogs ha elasticitetsmodulen $E_c = 32$ GPa, Poissons tal $\nu = 0,2$, tryckhållfastheten $f_{cc} = 30$ MPa och draghållfastheten $f_{ct} = 2$ MPa. Armeringen antogs ha elasticitetsmodulen $E_s = 200$ GPa och flytspänningen $f_y = 390$ MPa för slakarmering med diametrarna $\phi = 10, 12$ och 16 mm, medan spännarmeringen med diametern $\phi = 26$ mm och arean $A_p = 531$ mm² antogs ha flytspänningen $f_y = 755$ MPa och initialt vara förspänd till $F_p = 272$ kN.

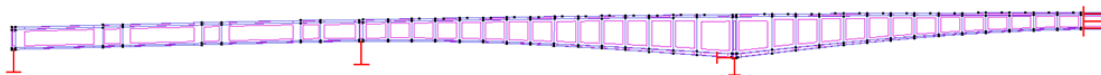
Den successiva utbyggnaden av konsolerna illustreras i Figur 5.1.



Figur

5.1 Utbyggnadsordning för konsoldelarna, Lundin (2022).

De randvillkor som antogs illustreras i Figur 5.2 för en halva av bron. Rotationer tillåts i alla upplag (utom i mittfogen där inga horisontella rörelser tillåts och fogen därför i praktiken inte kan rotera). Bron antas orörlig i såväl horisontal- som vertikalled i pelaren närmast mitten. Vid ändupplagen och mellanpelarna tillåts horisontalrörelser och i mittfogen vertikalarörelser.

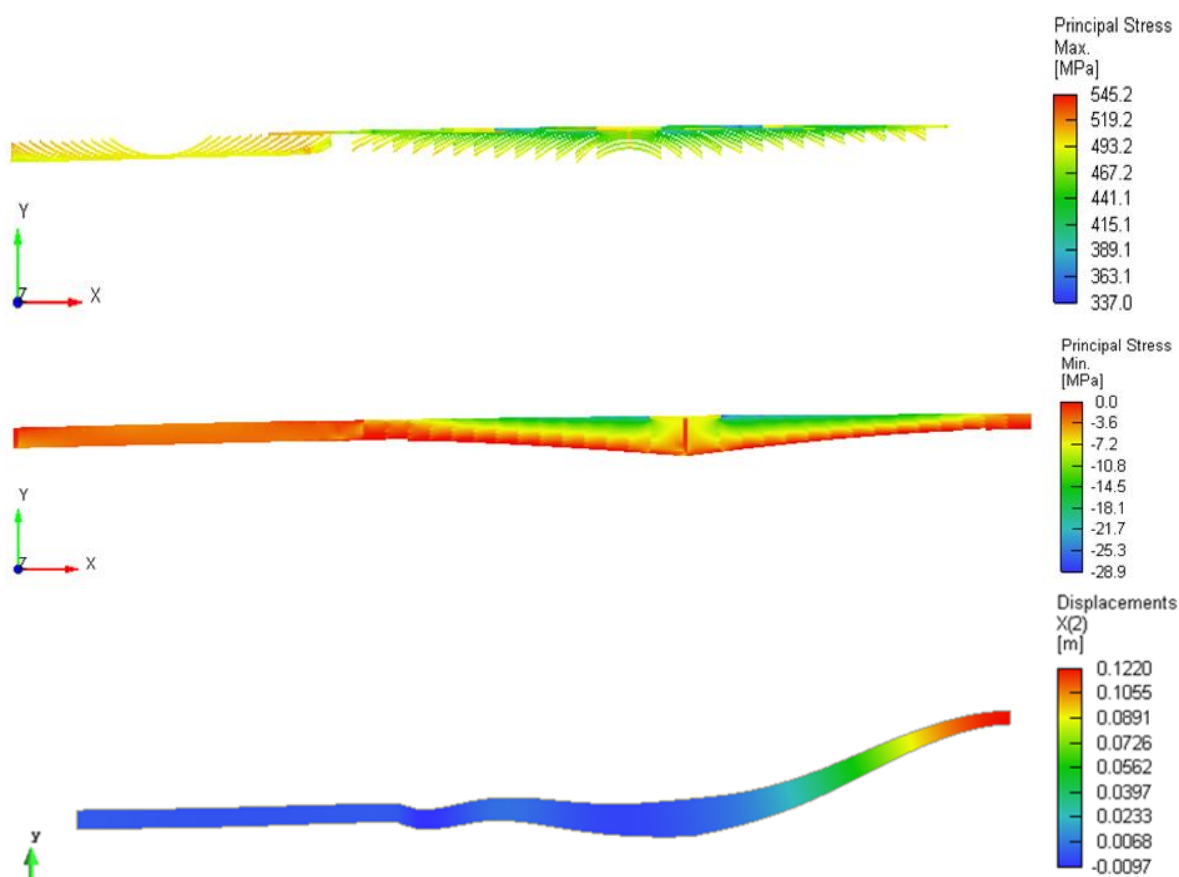


Figur

5.2. Randvillkor för ena halvan av bron. Rotationer tillåts i alla fyra upplagen.

Horisontalrörelser tillåts i de två upplagen till vänster och vertikalarörelser i mittfogen till höger, Lundin (2022).

Några resultat från slutet av byggskedet visas i Figur 5.3.



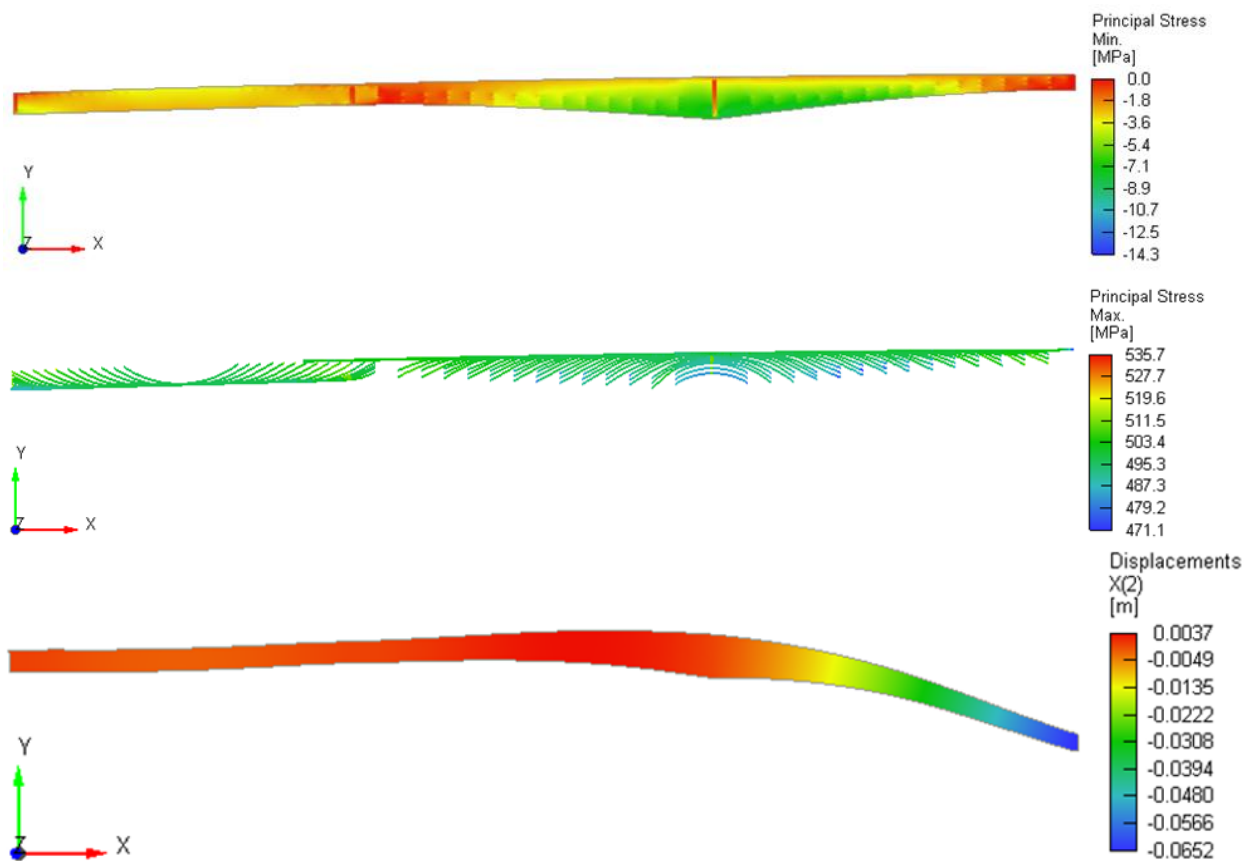
Figur 5.3. Beräkning vid slutet av byggskedet. Överst: Deformationer med 0,12 m max uppböjning av bronns mitt (till höger). Mitten: Spänningar i spännarmeringen med max 545 MPa över mellanstödet; Underst: Tryckspänningar i betongen med max 28,9 MPa över mittstödet. Lundin (2022).

Några data från modelleringen av byggskedet och av bruksgränstillståndet (egentyngd och spännkraft) visas i Tabell 5.1

Tabell 5.1. Sammanställning av beräkningar i byggskedet och i bruksgränstillstånd (egentyngd och spännkraft) med dels icke-linjär och dels linjär FEM-metod.

	Byggskede	Bruksgräns Icke-linjär beräkning	Bruksgräns Linjär beräkning	Antagen material- hållfasthet
Max nedböjning [m]	-0,12 (uppböjning)	0,065	0,050	
Max spänning, spännstål [MPa]	545	536	532	755
Max spänning, slakarmering [MPa]	72,6	401	36,8	390
Max betongdragspänning [MPa]	9,5	1,88	6,30	2
Max betongtryckspänning [MPa]	26,9	14,3	17,2	30

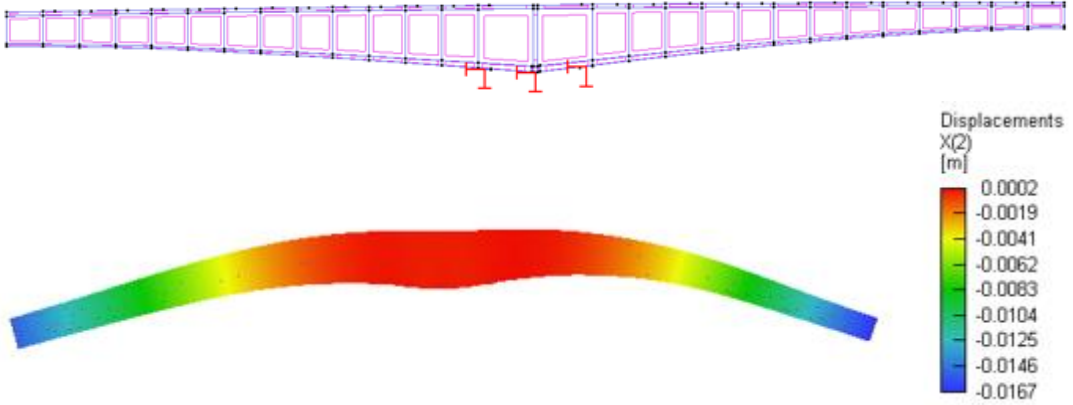
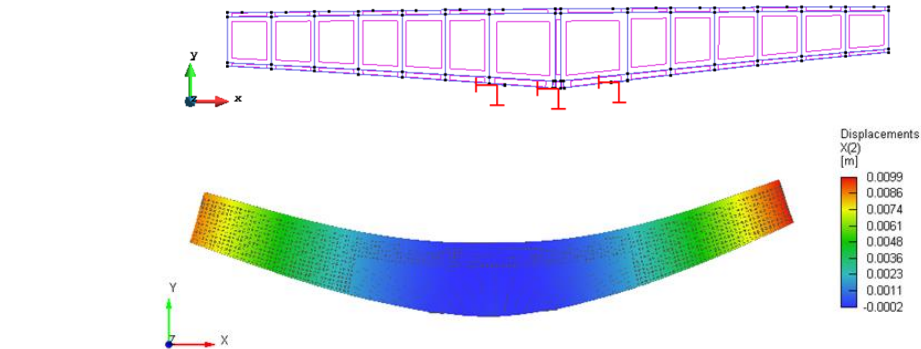
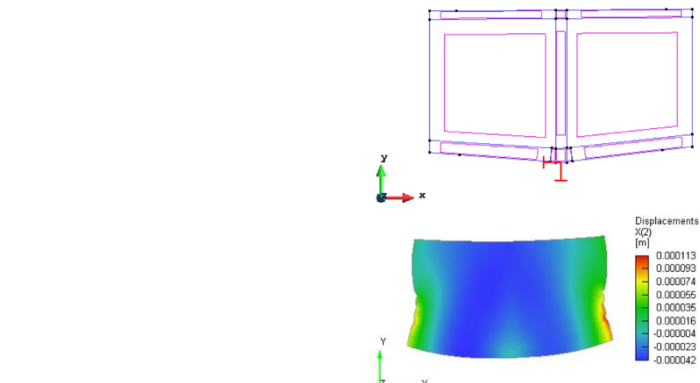
En icke-linjär beräkning av hela bron i bruksgränstillståndet före demontering visas i Figur 5.4.



Figur 5.4 Resultat av icke-linjära FEM-beräkningar i bruksstadiet. Överst: Deformationer med max 0,06 m nedböjning av brons mitt (till höger); Mitten: Spänningar i spännarmeringen med max 471 MPa i underkant vid mittstödet; Tryckspänningar i betongen med max 14,3 MPa vid underkanten av mittstödet. Lundin (2022).

I Tabell 5.2 redovisas några etapper i en linjärelastisk modellering av rivningsprocessen med successivt avlägsnade av konsoldelarna. Några tillhörande data redovisas i Tabell 5.3.

Tabell 5.2 Deformationsbilder vid successivt avlägsnade av konsoldelar enligt linjär FEM-modell, Lundin (2022)

Segment	Elevation av modellen jämte deformationsbild efter att aktuella segment successivt avlägsnats (jämför Figur 5.1)
27&28	 <p>Displacements $X(2)$ [m]</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.0002 -0.0019 -0.0041 -0.0062 -0.0104 -0.0125 -0.0146 -0.0167
13&14	 <p>Displacements $X(2)$ [m]</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.0099 0.0086 0.0074 0.0061 0.0048 0.0036 0.0023 0.0011 -0.0002
1&2	 <p>Displacements $X(2)$ [m]</p> <ul style="list-style-type: none"> 0.000113 0.000093 0.000074 0.000055 0.000035 0.000016 -0.000004 -0.000023 -0.000042

Tabell 5.3 Maximala deformationer och spänningar vid successivt avlägsnande av konsoldelar enligt linjär FEM-modell, Lundin (2022)

Segment som avlägsnats, se Figur 5.1	Maximalt värde för				
	Nedböjning mm	Spännstål MPa	Slakarmering MPa	Betongdrag MPa	Betongtryck MPa
27 & 28	16,7	511	26,5	5,3	12,3
23 & 24	-5,9	511	24,4	4,5	7,0
19 & 20	-13,6	510	22,9	3,9	7,3
13 & 14	-9,9	510	20,1	3,4	7,8
7 & 8	-2,2	511	14,6	2,4	4,5
1 & 2	-0,1	511	8,0	1,5	4,4
Material-hållfasthet	-	755	390	2	30

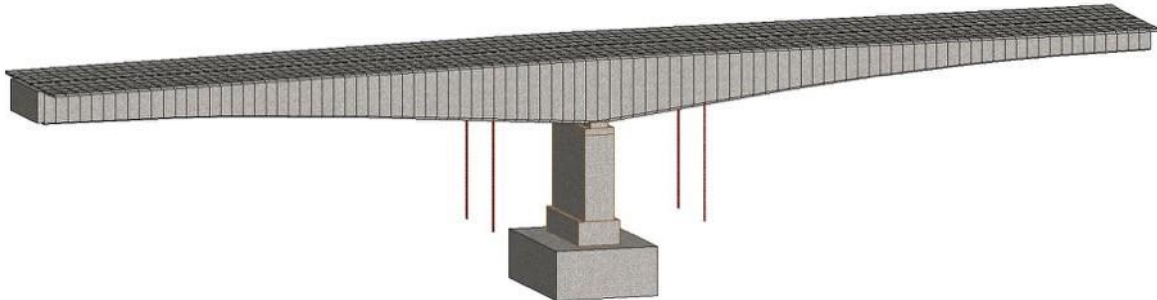
5.2 3D-modellering

Den tredimensionella analysen genomfördes i tre steg:

- Bedömning av rivningen av överdelen av konsolspannen
- Stabilisering av mittpelarna
- Bedömning av spänningarna i grunden under mittpelarna

En mer detaljerad beskrivning ges i Appendix A.2, En beskrivning ges även i Sas et al. (2023)

En 3D-modell av bron gjordes i AxisVM enligt Figur 5.5



Figur 5.5. 3D-modell av mittpelarna 3 och 4 med konsoler och grundläggning.

Konsolerna byggdes ut i etapper om 3,1 m och det bedömdes som mest lämpligt att riva bron i omvänd ordning. Följande punkter bedömdes som kritiska:

- Demonteringsordning och storlek på avlägsnade element
- Stabilisering av mittstöden 3 och 4
- Isärkoppling av brons olika delar, speciellt konsolspannan i brons mittpunkt och ytterspannen från konsolspannen
- Grundförhållandena under pelarna och pelarnas stabilitet

Följande antaganden gjordes i analysen

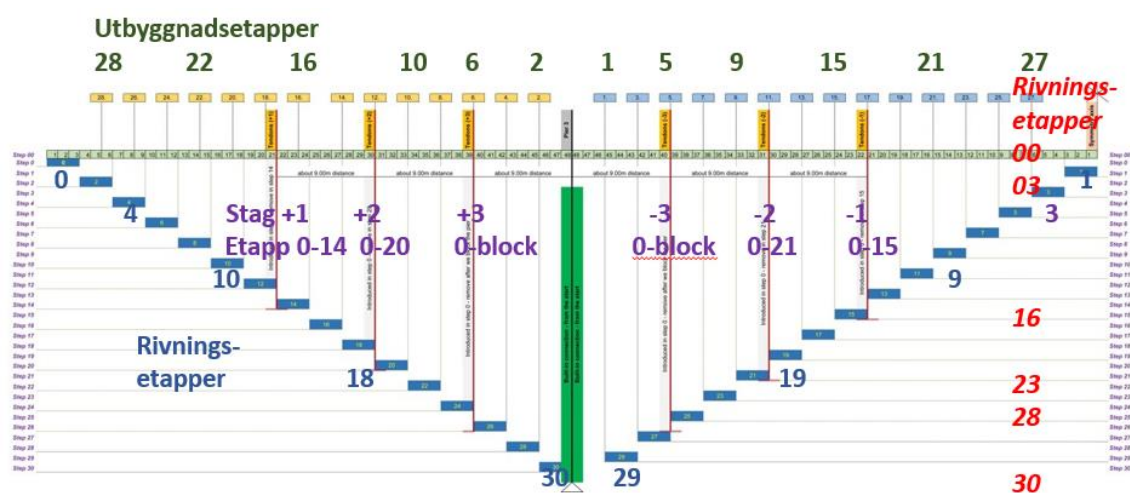
- Konsoldelarna avlägsnas i längder om 3,1 m från de två mittpelarna
- Mittstöden 3 och 4 stabiliseras innan demonteringen börjar
- säkerhetskoefficienten för egenvikt antas till $\gamma_G = 1,0$
- Egenvikten för rivningsutrustning antas till 300 kN och inkluderas endast i det första alternativet
- Ingen hänsyn tas till andra laster som vind och snö

Fem alternativ studerades successivt för att uppnå en optimal metod för entreprenören. se Tabell 5.4. Genom att klara stabiliseringen med mindre axialkraft i stagen erhålls en säkrare process. Grundläggningen inkluderades inte och fästpunkterna för förankringsstag antogs ledlagrat infästade i underliggande berg (i verkligheten användes förankring med bergankare).

Tabell 5.4 Antaganden vid olika alternativ vid 3D-modellering

Alternativ	Antal stag (förankringar)	Stabilisering av mittstöd 3 (och 4)	Maximal axialkraft i förankring [MN]	Tvärkraftskapacitet i kritiska snitt [MN]
1	2	Förankringar balanserar/förhindrar rotation	17.6	1,39
2	16		1.50	1,39
3	16	Platsgjutna betongblock förhindrar rotation	1.42	1,39
4	12		1,42	1,39
5	12		1,14	1,39

I Figur 5.6 redovisas ordningen för demonteringen enligt alternativ 5 och motsvarande krafter redovisas i Tabell 5.5.

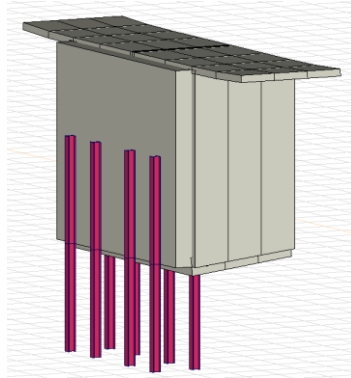


Figur 5.6. Schematisk bild av Alternativ 5 med de 28 utbyggnadsetapperna angivna överst. De 30 rivningsetapperna anges vertikalt och under respektive etapp. De 2x6 stabiliserande stagen är markerade som Stag +1, +2, +3, -3, -2, -1. Stag +3 och -3, närmast mittpelaren, är aktiva under nästan hela rivningsprocessen.

Tabell 5.5. Beräknade krafter N [kN] i de olika stagen (Tendons) för de olika etapperna (Steps) vid demonteringen av bron enligt Alternativ 5. I yttersta kolumnen till höger anges erforderligt moment för att balansera bron. Innan rivningen påbörjas spänner man upp stag (-3) med kraften 1143 kN. Sedan demonteras den yttersta vänstra delen (Step 0). Lasten i stag (-3) minskar då till 0 kN. Sedan demonterar man den yttersta högra delen (Step 1). Stag (-3) belastas då igen med kraften 108 kN, osv.

	$N_{x,min}$ [kN] 1.0*(Weight) - nonlinear analysis							MRd.req. [kNm/m]	
	Tendon (+1)	Tendon (+2)	Tendon (+3)	Tendon (+4)	Tendon (-4)	Tendon (-3)	Tendon (-2)		Tendon (-1)
Step 00	0	0	0	-	-	1143	0	0	2964
Step 0	0	0	0	-	-	0	0	0	1257
Step 1	0	0	0	-	-	108	0	0	1933
Step 2	0	0	12	-	-	0	0	0	1639
Step 3	0	0	0	-	-	7	0	0	1677
Step 4	0	0	140	-	-	0	0	0	1565
Step 5	0	0	0	-	-	0	0	0	1144
Step 6	0	0	235	-	-	0	0	0	1477
Step 7	0	0	0	-	-	0	0	0	746
Step 8	0	0	282	-	-	0	0	0	1366
Step 9	0	0	0	-	-	0	0	0	511
Step 10	0	0	322	-	-	0	0	0	1256
Step 11	0	0	0	-	-	0	0	0	306
Step 12	0	0	363	-	-	0	0	0	1152
Step 13	0	0	0	-	-	0	0	0	110
Step 14	-	71	284	-	-	0	0	0	983
Step 15	-	0	0	-	-	0	0	-	54
Step 16	-	133	203	-	-	0	0	-	815
Step 17	-	0	0	-	-	0	0	-	169
Step 18	-	180	139	-	-	0	0	-	659
Step 19	-	0	0	-	-	0	0	-	273
Step 20	-	-	441	-	-	0	0	-	721
Step 21	-	-	0	-	-	0	-	-	300
Step 22	-	-	407	-	-	0	-	-	590
Step 23	-	-	0	-	-	0	-	-	226
Step 24	-	-	336	-	-	0	-	-	450
Step 25	-	-	43	-	-	0	-	-	146
Step 26	-	-	-	-	-	0	-	-	1193
Step 27	-	-	-	-	-	-	-	-	73
Step 28	-	-	-	-	-	-	-	-	732
Step 29	-	-	-	-	-	-	-	-	20
Step 30	-	-	-	-	-	-	-	-	231

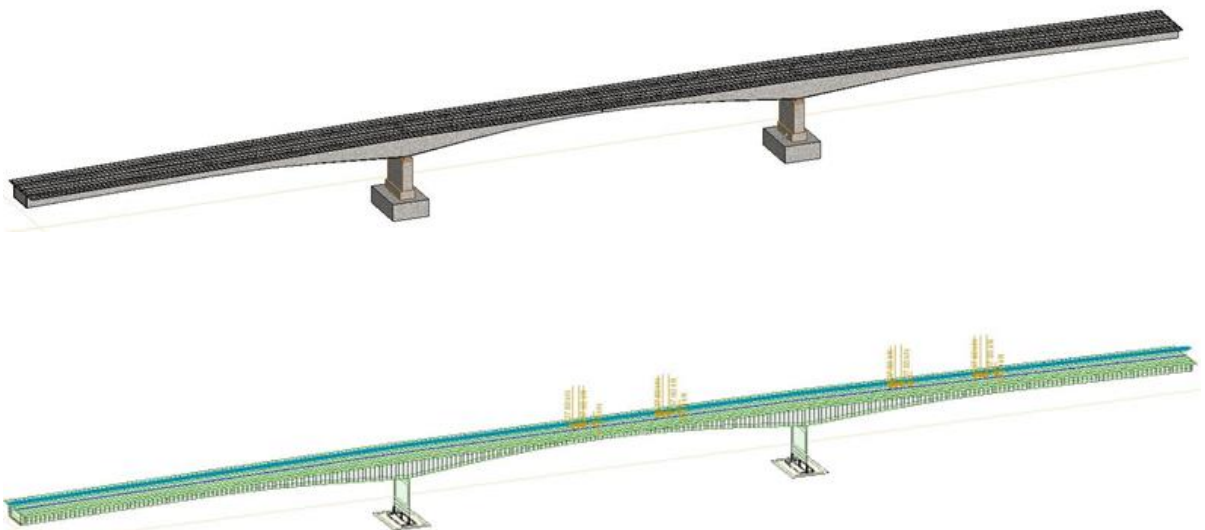
För stabilisering av bron ovanpå mittpelarna 3 och 4 studerades även möjligheten att som ett alternativ till en betonggjutning använda en ställåda som förankras i betongen i pelarna med limmade stålskruvar (kemankare) enligt Figur 5.7.



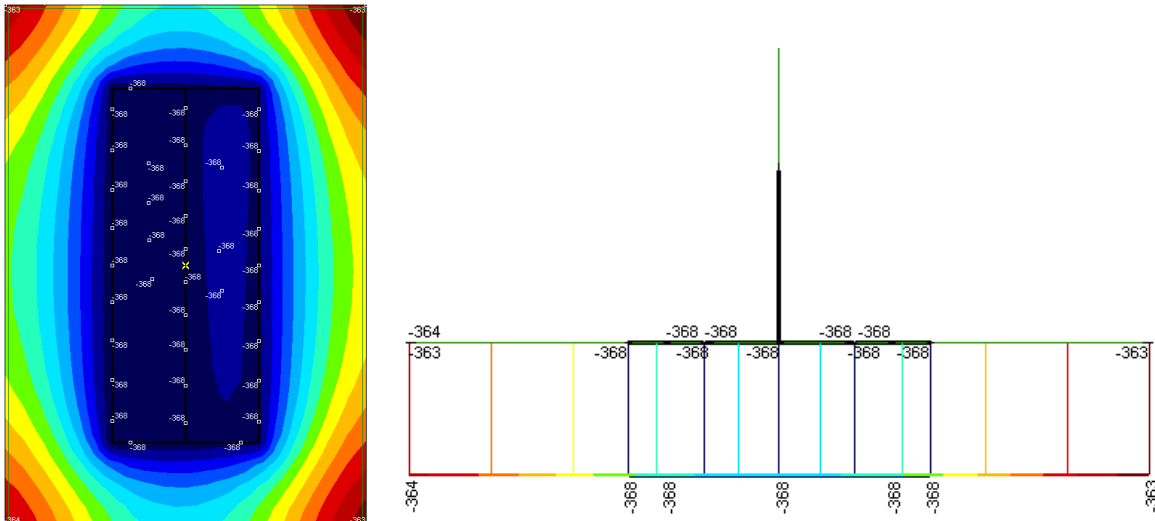
Figur 5.7. Stabilisering av bron ovanpå mittpelarna 3 och 4 med en låda av stålprofiler.

Bärigheten under mittpelarna 3 och 4 studerades i en modell enligt Figur 5.8. Två fall studerades:

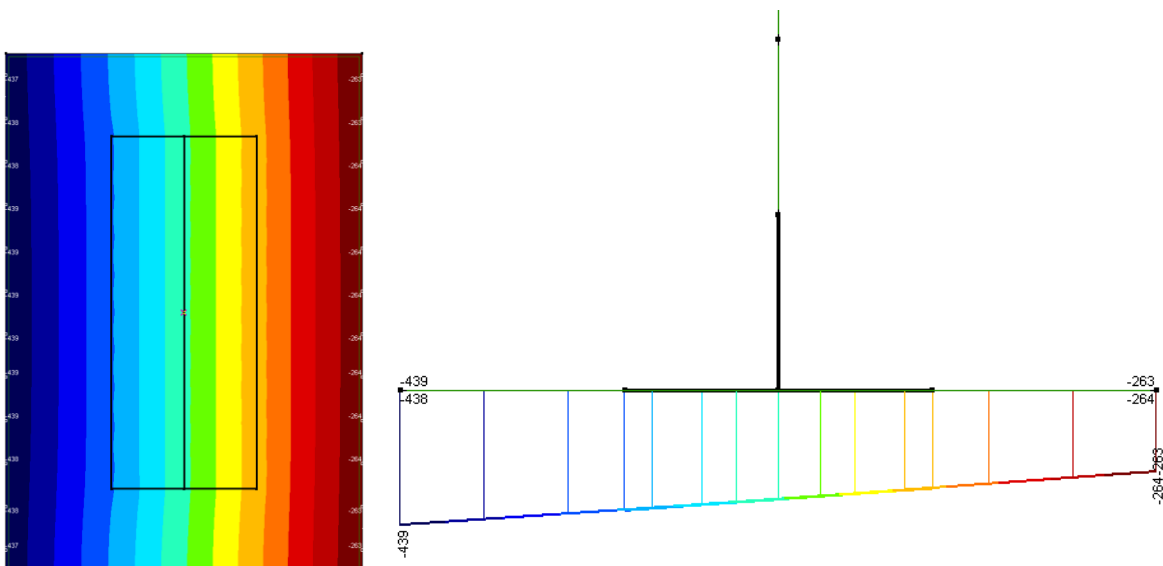
- med ledlagrad infästning, se Figur 5.9
- Med momentupptagande infästning, se Figur 5.10.



Figur 5.8. 3D- bild av bronns mittdel utan och med trafiklast.



Figur 5.9. Spänningsfördelning under mittpelarna 3 och 4 vid ledlagrad infästning, Maximal påkänning i hörnen 368 kPa (brun)



Figur 5.10 Spänningsfördelning under mittpelarna 3 och 4 vid inspänd infästning. Maximal påkänning till vänster -439 kPa (svart).

5.3 Utmattning

I den tillståndsbedömning som gjordes 2015 framkom att bron inte uppfyllde kraven för utmattning enligt de krav som ställs i Trafikverkets regler TDOK 2013:0267(2013) avsnitt 4.3.1 och 4.4.1. Dessa föreskriver att dragpåkänningarna i betongen skall vara så låga att sprickbildning inte uppstår. Målet är att spännarmeringen skall skyddas mot korrosion: "Spännbetongkonstruktion ska med hänsyn till uppträdande böjdragspänningar påvisas vara osprucken enligt BBK 04 (2004), avsnitt 4.5.3 och 3.3, varvid spricksäkerhetsfaktorn $\zeta = 1,5$ förutsätts." I SWECO (2015) redovisas dragspänningar som är högre än betongens draghållfasthet, För bruksgränstillståndet i avsnitt 6.2.2.6 på sid 618 sägs att "Det är främst i ytterspann problem uppstår, men även över pelare 3 (5) överskrids kravet m h t utmattning redan vid $B = 50$ kN. Det är alltså inte utmattning i sig som kontrolleras utan risken för att korrosion skall uppstå (som bryter ned utmattningshållfastheten). För brottgränstillståndet i avsnitt 6.3.2.7 på sid 630 erhålls inga dragspänningar. De spänningsvariationer som

uppträder i bron är - som i de flesta vägbroar - så små att de inte ger upphov till utmattning, se t ex Brühwiler (2012, 2013), Elfgren (2015).

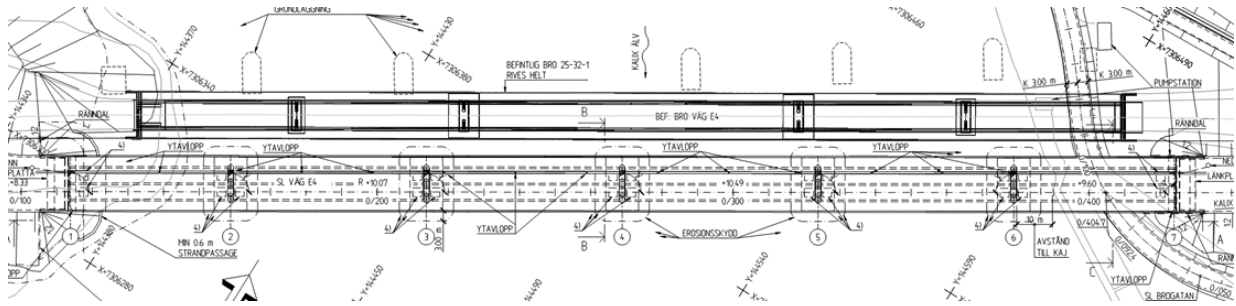
6. Evaluering

6.1 Förutsättningar

Bron ligger ca 5 m uppströms den nya bron, se Figur 6.1.

Överbyggnaden har volymen ca 2 023 m³. Underbyggnaden har volymen ca 1099 m³

Sprängning är inte tillåtet. Rivningen skall ske till bottenplatta i älv och 1m under marknivå för landfästen.



Figur 6.1 Situationsplan med den gamla bron belägen ovanför (uppströms) den nya bron.

Den befintliga bron är en spännarmerad bro som är byggd enligt metoden med "fritt frambyggda" konsoler. De byggdes successivt allteftersom bron byggdes ut, Varje spännvajer erhöll ett ändankare. För ändspannen användes traditionell formställning och hela spannet gjöts samtidigt varefter vajrarna spändes upp och låstes med ändankare.

Vid rivning av ett ändankare räknas spännstaget som överksamt fram till nästkommande utbyggnadsdel. Detta innebär att utbyggnadsstapperna teoretiskt endast bärs upp av den övriga sprickarmering som finns i snittet fram till nästkommande utbyggnadsstapp, där intakta spännstag finns.

Brons konsoländar förväntas även lyfta en aning då vikten succesivt minskar och spännstagen, om än teoretiskt borträknade, sannolikt fortfarande har påverkan på konstruktionen i form av friktion/vidhäftning längs med staget och därav även hjälper att lyfta konstruktionen, jämför med Tabell 5.2. (utfallet var relativt omfattande lyft av konstruktionen).

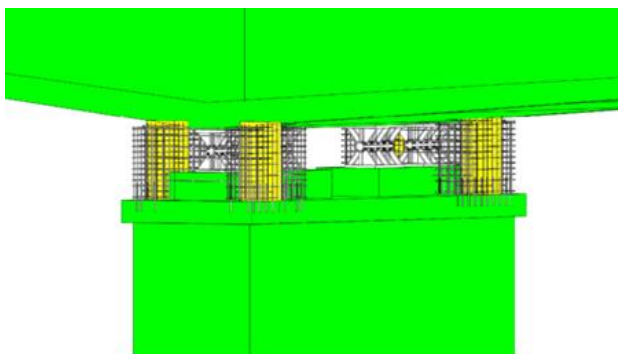
Rivning ska ske kontrollerat och temporära stabiliserande åtgärder behöver vidtas.

Brodelarna som byggts med traditionell formställning, dvs. Ändspannen, är självbärande även efter det att de frittframbyggda konsolerna rivs.

6.2 Förberedelser

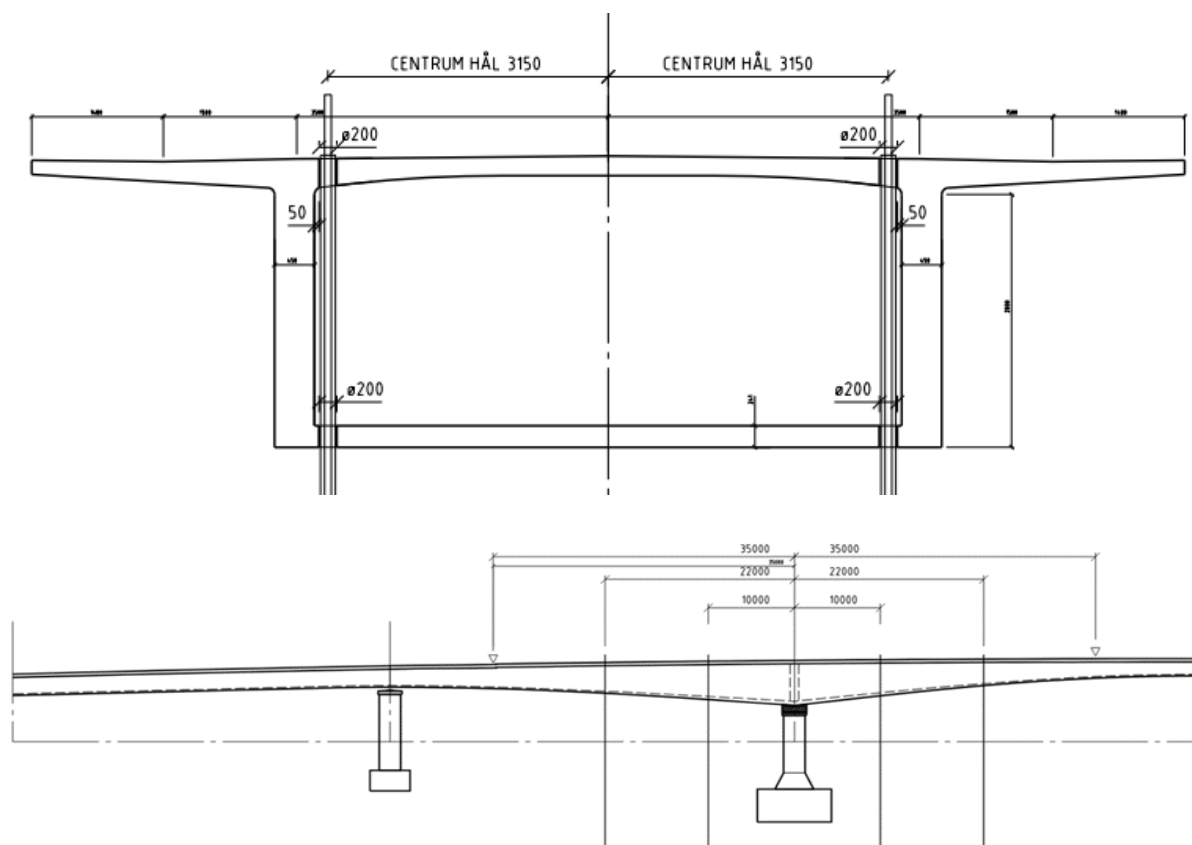
För att låsa bron i det sista rivningssteget gjuts en armerad klack upp på mittpelarna. Klackarna innesluter lagren på befintlig bro. Se Figur 6.2. Klackarna skulle även kunna utföras med en motsvarande stålkonstruktion, se Figur 5.7.

Syftet med denna åtgärd är att säkra stabiliteten, dels i horisontell riktning längs med bron, dels även vertikalt i rivningsskedets sista läge då övriga stabiliserande åtgärder demonteras.



Figur 6.2. En klack gjuts för att stabilisera brobanan ovanpå mittpelarna.

Stabilisering vid rivning av de frittframbyggda konsolerna åstadkoms huvudsakligen med dragstagspar som borras jämte liven på den befintliga bronns lådbalkar och förankras i berget, se Figur 6.3. Stagen placeras ca 10 och 22 m ut från centrumlinjen (CL) i fastlagret på mittpelarna för att skapa kapacitet för obalans vid rivning i princip enligt alternativ 5 i kapitel 5. Kompletterande beräkningar och ritningar utfördes av Hillstatik AB, Stockholm.



Figur 6.3. Stabiliserande stag borras ner i fast botten. Överst visas hur stagen förs genom betonglådan. Nederst visas stagens inbördes läge.

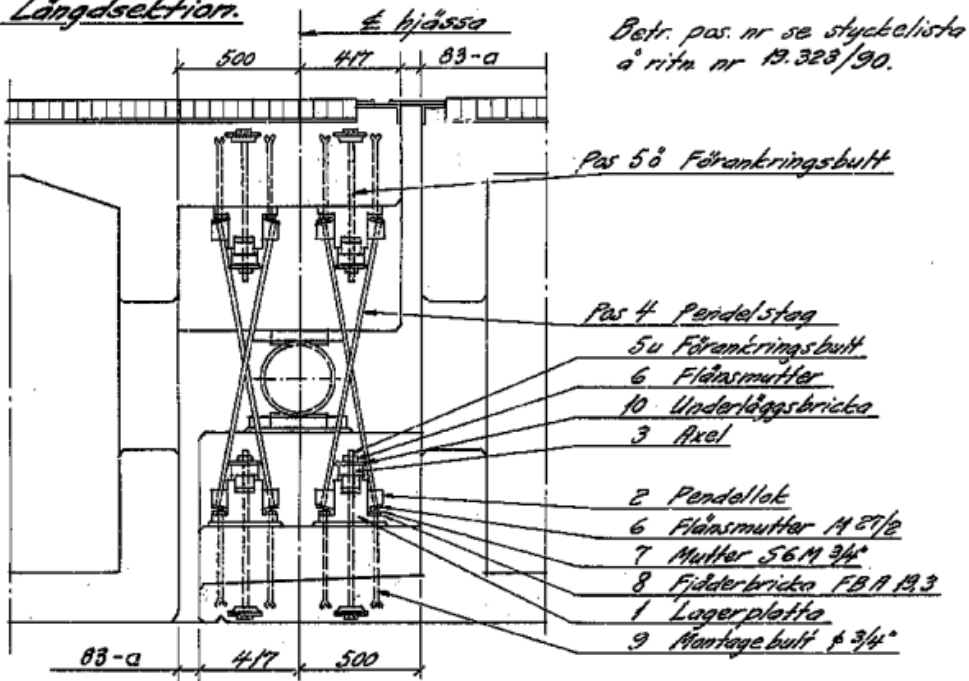
6.3 Delning av bro

Man planerade att börja dela bron i mittpunkten där den är försedd med en pendelpelare, se Figur 6.4. Bron är därvid i övrigt intakt och det finns därför stor kapacitet att ta hand om eventuellt inbyggda laster som skulle komma att släppas loss. Det finns inga anteckningar från byggtiden om att de båda mötande konsoländarna skulle hamnat på olika nivåer och därför

behövt spännas ihop. Skulle så ändå ha varit fallet, borde den krypning som ägt rum under de följande åren ha utjämnat eventuellt inbyggda vertikalkrafter.

Sammanställning av pendellager.

Längdsektion.



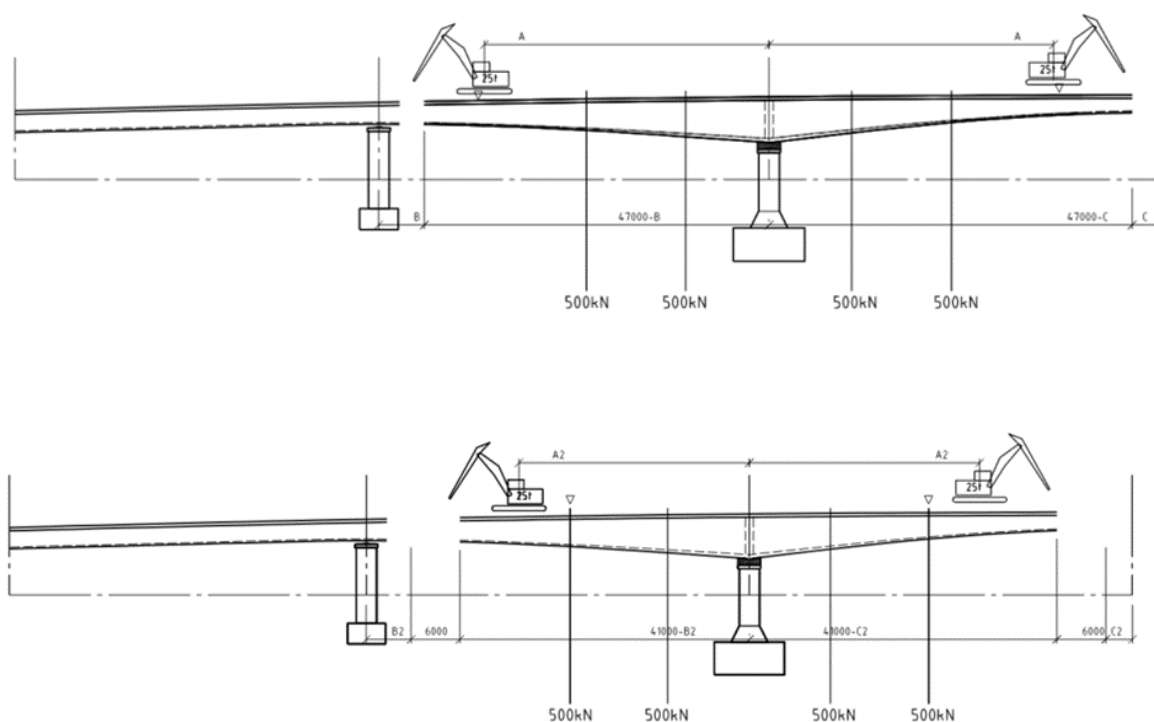
Figur 6.4. Pendellager i brons mittsnitt. Ritning 19.323/91 och foto

Bron har trafikerats under närmre 70 år och det finns en osäkerhet i hur stora de krypspänningar är som uppstått under drifttiden. Även utbyggnadsmetodens temporära stabiliserande delar, som togs bort när konstruktionen färdigställts, har förändrat lastfördelningen. När bron skall delas mellan ändspannen och konsolspannen (över stöd 2 och 5) är det svårt att förutse vilka spänningar och rörelser detta kommer att ge upphov till. De bedöms uppstå momentant vid delningen. Risken för ett dynamiskt tillskott hanteras genom att delningen och en tillhörande lastnedtagning görs på ett kontrollerat sätt.

6.4 Etappvis rivning

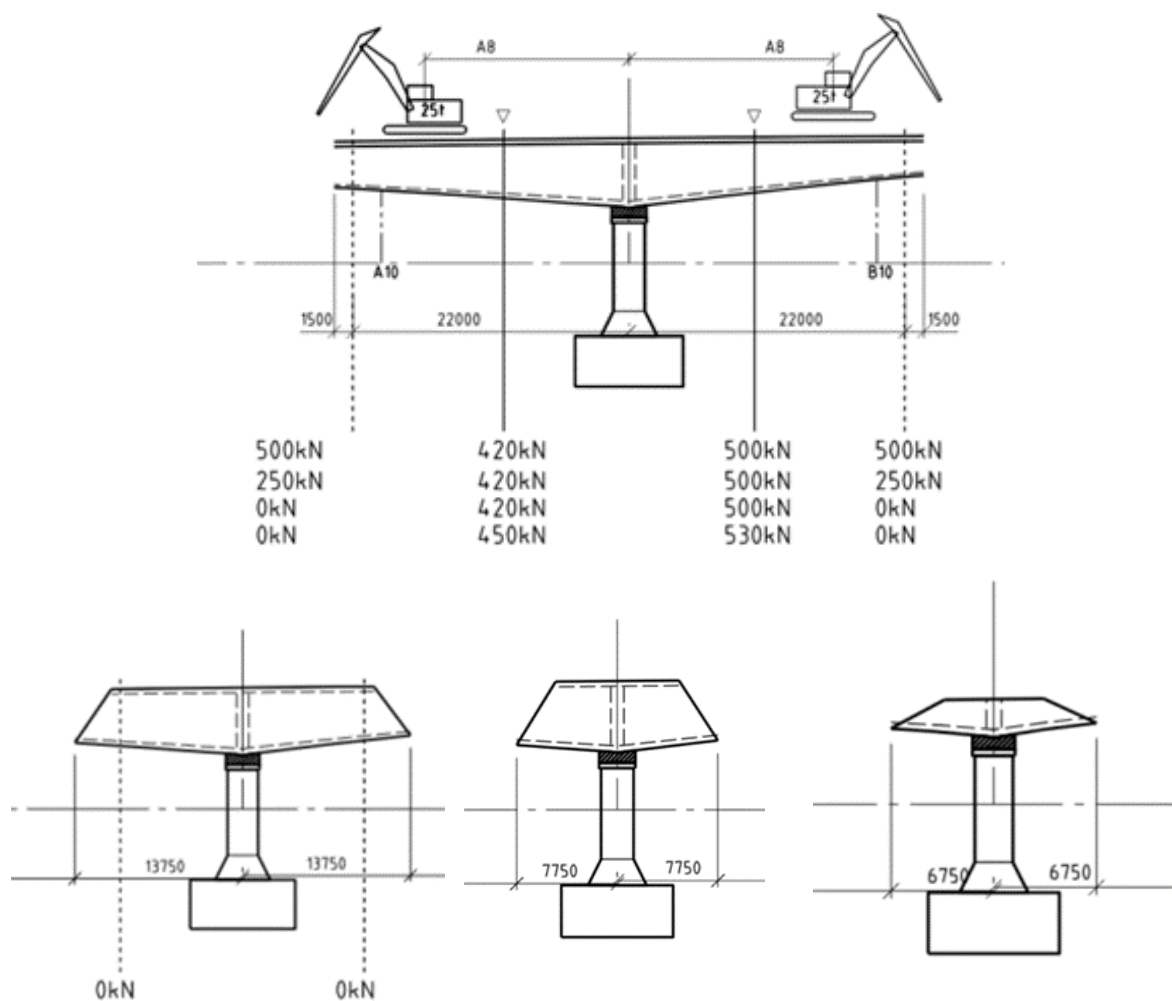
Grävmaskin river bron antingen genom att stå uppe på befintlig bro alternativt från nya bros GC-bana, se Figur 6.5.

Bron rivs etappvis vänster/höger enligt den principiella numreringen för att bibehålla så bra jämvikt som möjligt i konstruktionen. Grundprincipen är att brodelen rivs i samma etapper som den byggts och att förstärkande stag samt uppgjutna klackar ska klara den excentricitet som uppstår under detta skede.



Figur 6.5. Successiv rivning av bron enligt alternativ 5 i kapitel 5

Efter att rivning har utförts fram till de yttre dragstagen demonteras dessa och de inre spänns om till projekterade laster. När rivningen nått även de inre stagen avetableras eventuella grävmaskiner och de inre stagen spänns även ner, se Figur 6.6. Den uppgjutna klacken kommer i detta läge att kvarstå som en stabiliserande balk för rivning av resterande del över stödet. Denna rivning sker motsvarande vänster/höger för att minimera excentriska påkänningar i klacken.



Figur 6.6. Rivning av förstärkningsstag.

6.4 Rivningsmassor

Vid klippning/knackning av bron kommer betongstycken/grus damm mm alstras. Betongstycken kommer dock inte vara större än ca 300 mm.

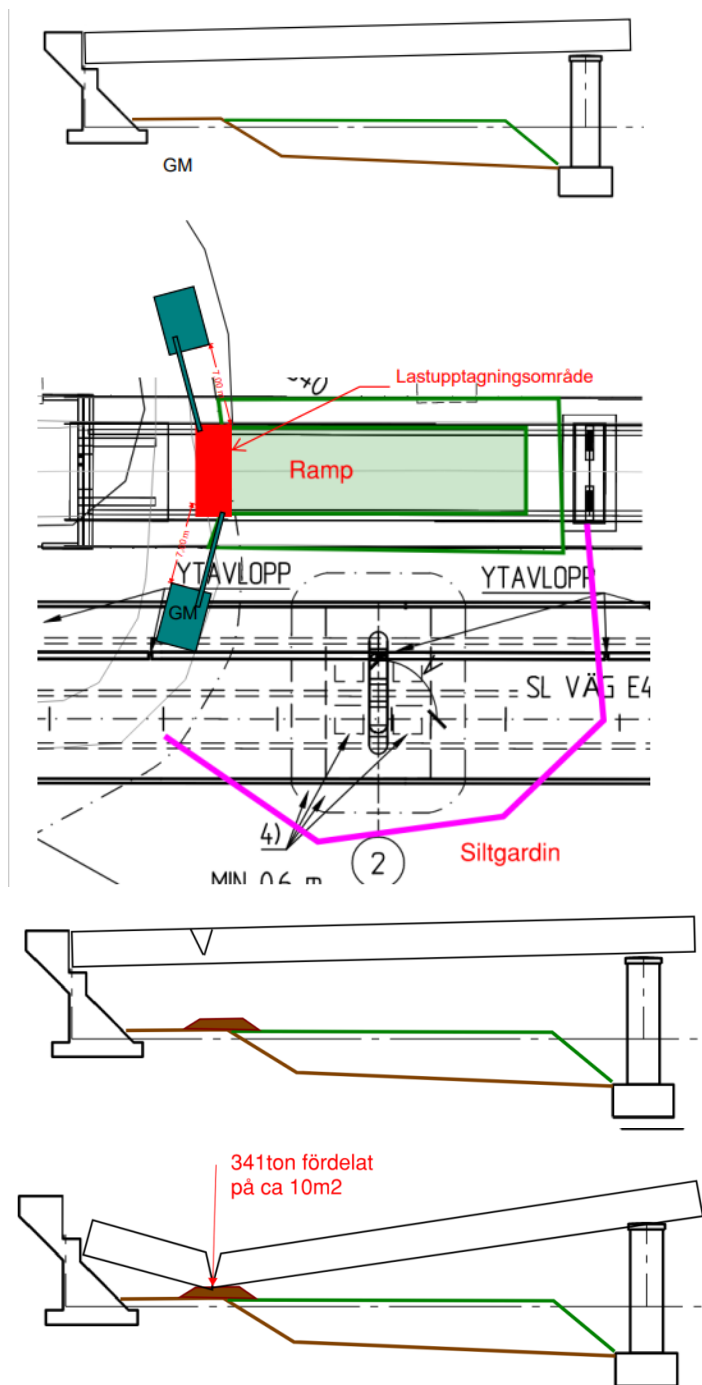
För att hantera rivningsmassorna nyttjas isen som materialbrygga (alt pråm sommartid). Isen förstärks med brädor för att uppnå lastkapacitet fortare.

Under brospannen läggs stötdämpande lager uppe på isen, exempelvis stockmattor. Detta för att minska risken för att sprickbildning uppstår i isen då det bromaterial som klipps/knackas ner faller från 10 m höjd.

Materialet hanteras med mindre grävmaskin/hjullastare allteftersom för att inte överbelasta isen lokalt. Massorna tas iland på östra/västra strand

6.5 Ändspann

Då ändspannens bärande armering återfinns i brosnittets bottenplatta kommer rivningen att ske genom försvagning av brosnittets väggar till dess att brodelen går till brott och landar på ett utfyllt område under brodelen, se Figur 6.7.



Figur 6.7. Princip för rivning av ändspannet på Lulesidan på utfylld ramp och på Kalixsidan på befintlig kaj. Planen visar även den nya bron nedanför den gamla på Lulesidan.

7. Diagnostisk provning

Inför rivningen har bron fungerat som en testbädd för olika provningsmetoder. Resultaten från dessa studier presenteras i en rapport, Sas et al, (2023). Där redovisas mätmetoder för nedböjningar, töjningar, accelerationer, vinkeländringar och temperatur. Här sammanfattas några delar av speciellt intresse för rivning och underhåll av förspända broar.

7.1 Materialegenskaper

Betongen hade tryckhållfastheten ca 30 MPa när bron byggdes. När den provades med slaghammare före rivningen hade den medeltryckhållfastheten 68 MPa. Cylindrar har även borrats ut för tryckprovning men dessa har ännu inte provats.

Likartad tillväxt i betongtryckhållfasthet har observerats även vid tidigare provade broar och torde bero på att cementen förr var mer grovmalen och därför inte nådde sin fulla hållfasthet vid provning efter 28 dygn, se t. ex. Nilimaa et al. (2020), Thun (2006), Thun et al. (2006), Betonghandbok Material (2021).

7.2 Tidsberoende reduktion av spännkraft

Förlusten av spännkrafter har tidigare studerats av bl. a. Bagge et al. (2017).

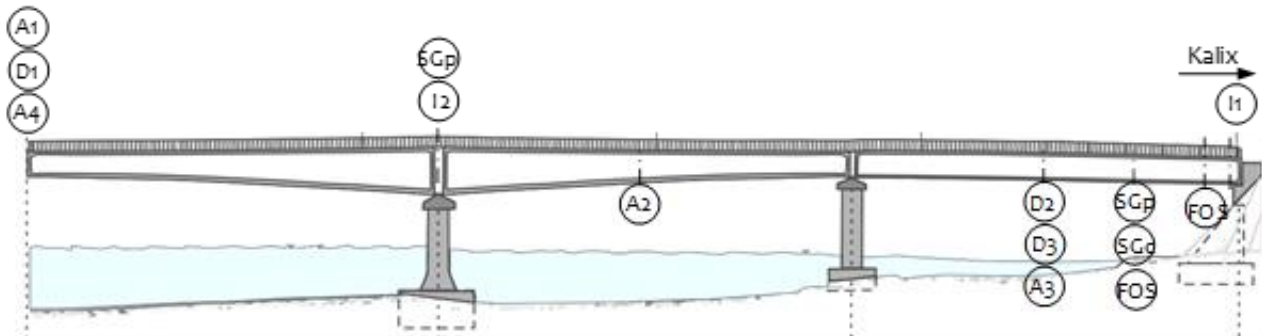
Enligt de ursprungliga dimensioneringsberäkningarna, se Sas et al. (2023), kan den ursprungliga spännkraften i bron uppskattas till cirka 277 kN (enligt spännlistor). Vid studier baserade på uppmätta deformationer har den kvarvarande spännkraften uppskattats till 266 kN. Genom att såga snitt i betongen har den uppskattats till 260 kN och genom att kapa spännarmeringsstänger till 254 kN. Detta kan jämföras med att beräkningar enligt EC2 (2005) ger en kvarvarande spännkraft efter 60 år om cirka 238 kN, De fyra metoderna ger för Kalixbron i tur och ordning reduktioner om cirka $11/277 = 4 \%$, $17/277 = 6 \%$, $23/277 = 9 \%$ och $39/277 = 14 \%$.

7.3 Digitalisering av bron

Brons yttre och inre har digitaliserats för att ge möjlighet att skapa en digital tvilling av den enligt metoder i Popescu et al. (2019), Mirzazade (2022) och Saback (2022). Resultat redovisas i Sas et al. (2023).

7.4 Icke-förstörande provningsmetoder

Placering av några av de givare som användes visas i Figur 7.1. Dessutom demonstrerades följande icke-förstörande provningsmetoder; slaghammare för bestämning av betongtryckhållfasthet, ultraljudspulshastighet (sprickdjup, elasticitetsmodul för betong), täcksiktsmätare, markradar (lägesbestämning av armering), skjuvvågstomografi (hålrum och delaminering i betong), vibrationsmätning (bestämning av dynamiska egenskaper som egenfrekvenser). Metoderna och erhållna resultat beskrivs närmare i Sas et al. (2023).

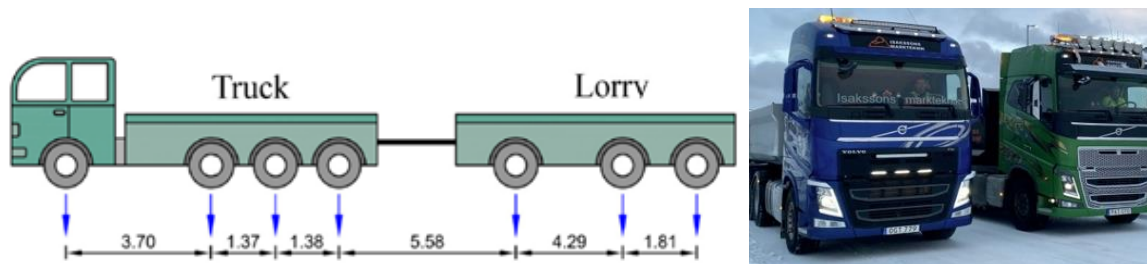


Figur 7.1. Lokalisering av mätinstrument: A1-A4 Accelerometrar i vertikalled, D1-D3 Deformationsgivare i vertikal- och horisontalled (D1), SGp Töjningsgivare på spännstål, SGc Töjningsgivare på betong, I1-I2 Inklinometrar, FOS Fiberoptiska töjningsgivare, TEM Temperaturgivare inuti och utanpå bron (5 givare ej markerade i figur).

7.5 Provbekastningar i bruksgränstillstånd

Enligt den tillståndsbedömning som gjorts av bron, SWECO(2015), bedömdes ytterspannet närmast Kalix som mest kritiskt och provbelastningen koncentrerades därför till detta, Sas et al. (2023). Lastfordon enligt Figur 7.2 användes. Tre lastfall studerades: (I) Tomt fordon, 22,7 ton, (II) Halv last, 43 ton och (III) Full last 62,9 ton. Fyra lastpositioner användes med följande avstånd från landfästet på Kalixsidan (1) 5 m, tvärkraftstörningar, (2) 13,8 m böjningstörningar, (3) 42,0 m tvärkraftstörningar och (4) vid bronns mittled, mittnedböjning. Figur 7.3 illustrerar ett fall där två bilar med släp med full last (lastfall III) passerar bromitt (lastposition 4). Resultaten av de omfattande mätningarna har ännu inte utvärderats.

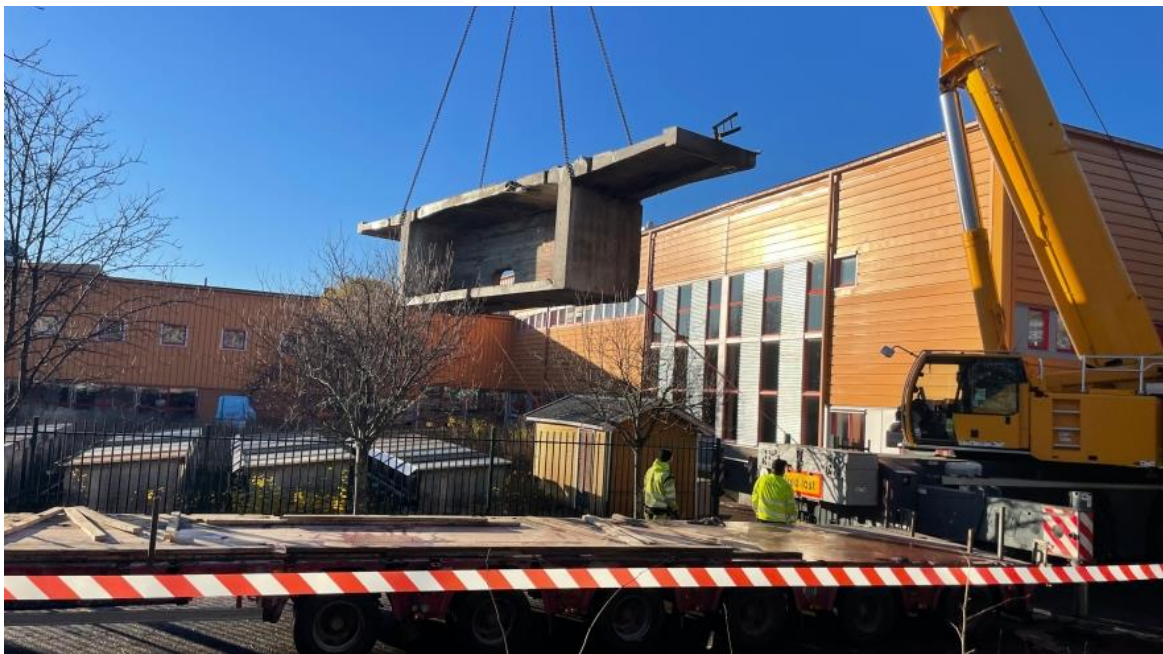
En tvärsektion av bron har sågats loss och transporterats till LTU för närmare studier, se Figur 7.4 och Figur 7.5,



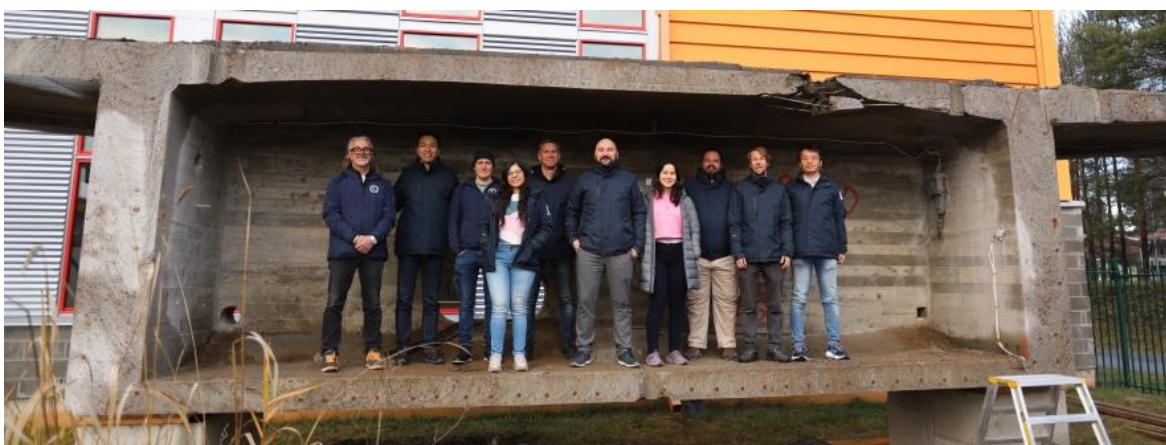
Figur 7.2 Mått för lastfordon som användes vid provbelastningen



Figur 7.3. Ett exempel på lastfall III i bromitt, position 4.



Figur 7.4. En tvärsektion av bron lyfts ned för vidare studier på LTU:s campus på Porsön.



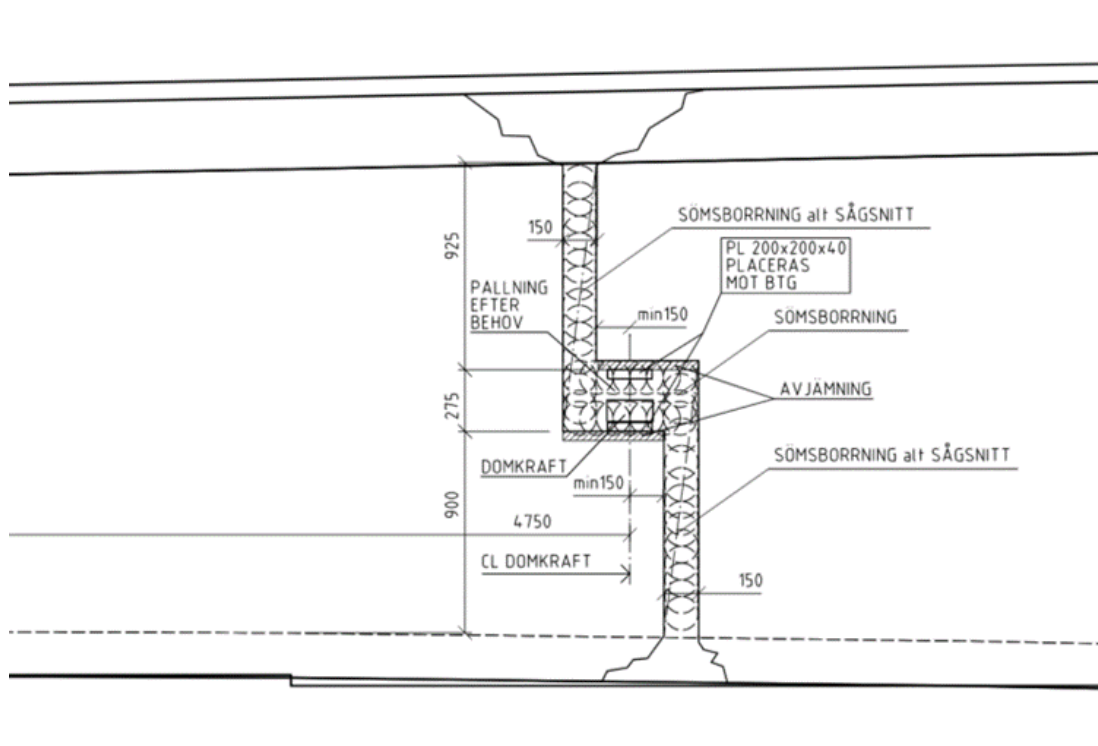
Figur 7.5. Tvärsektion på plats på LTU. På bilden visas några av deltagarna i provningen av bron, från vänster: Lars Åström, Chao Wang, Adrian Ulfberg, Silvia Sarmiento, Erik Andersson, Gabriel Sas, Angelica Agredo, Jaimes Gonzalez, Mats Petersson och Dongyun Liu.

8. Demontering

Demonteringen ägde rum under hösten 2022. Arbetet utfördes som en underentreprenad av Jansson Entreprenad AB enligt de principer som redovisats i kapitel 6.

Demonteringen började med att bron delades vid fogen mitt i bron enligt den ordning som beskrivs i avsnitt 6.3 och i Figur 6.4. För att dela bron knackade man med en hydraulhammare på pendelstagens infästningar. Stagen började därvid lösgöras, lasten i dem sjönk och konsolhalvorna skiljdes åt varvid delen mot Kalix sjönk och delen mot Luleå lyftes några mm. Kraften i pendelstagen före delningen kan uppskattas ha varit av storleksordningen ca 30–50 kN.

Därefter övergick man till att dela bron över stöd 2 och 5 i skarven mellan ändspannen och konsolspannen enligt avsnitt 6.3. Detta sker genom att brotvärsnittets väggar sömborrades enligt Figur 8.1 varefter domkrafter installerades och spändes upp. Efter det att domkrafterna installerats sömborrades även bottenplattan och farbanan knackades av. När detta skett kom all last som tidigare förts över genom brotvärsnittets väggar, farbana och bottenplatta att förflyttas till domkraftspunkterna. Lasten i domkrafterna mättes. På Kalixsidan ökade lasten i domkraften från 50 kN (uppspänd last före delning) till 270 kN. Vid avsänkning sänktes bron totalt 21 mm vid delningssnittet. Detta var mindre än förväntat från beräkningarna men inom intervallet av förväntad last. Domkraften sänktes sedan av så att frittframdelen av bron blev helt delad och skild från ytterspannet. I detta läge säkrades brons stabilitet av de installerade dragstagen. På Lulesidan var domkraftsupplaget ojämnt så laster kunde inte mätas exakt. De upplevdes vara i samma storleksordning som på Kalixsidan.



Figur 8.1 Ritning och foto av förfarande vid skiljande av konsolände från ytterspann. Lådtvärsnittets väggar sömborras, en domkraft installeras varefter även bottenplatta och farbana delas. All last koncentreras härvid till domkraften vilken successivt spänns av. Konsolspannet blir därmed losskopplat från ytterspannet.



Figur 8.2. Delning av bron vid ändpelaren på Kalix-sidan.

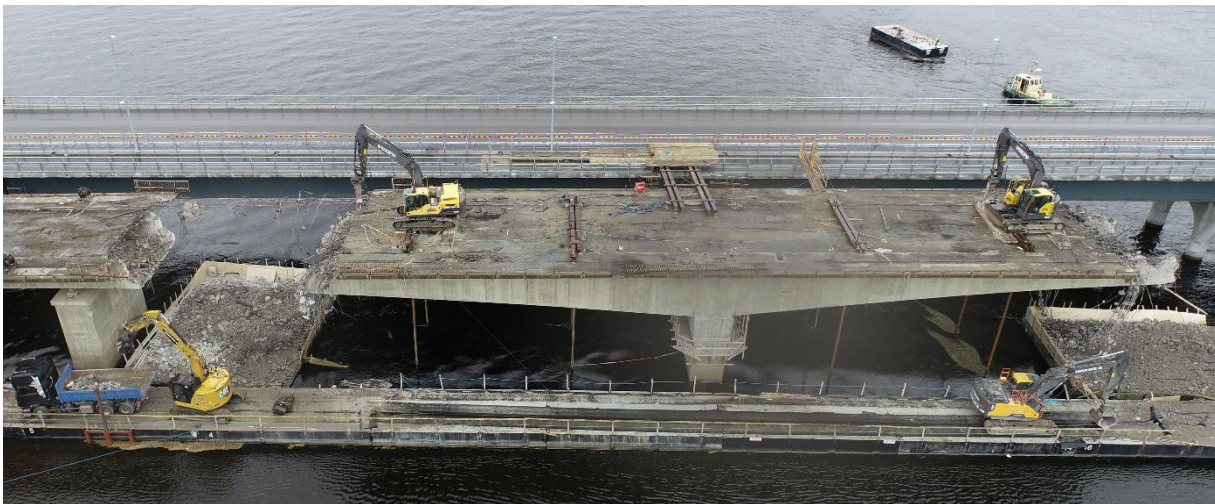


Figur 8.3. Översiktsbild

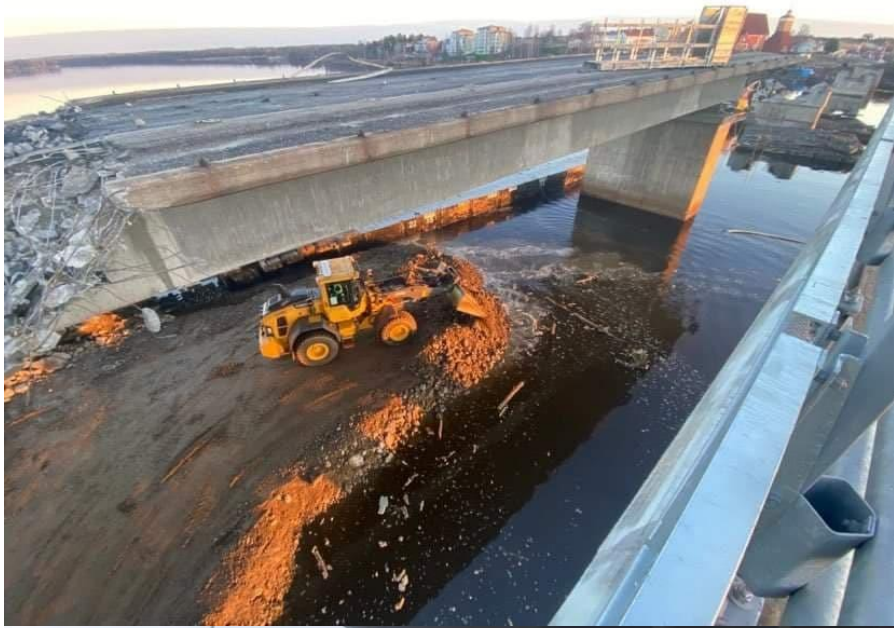
En anledning till att bron utrangerades var risk för korrosion i spännarmeringen på grund av för tunt täcksikt i överkant platta (< 100 mm), Vid rivningen har dock inga korrosionsangrepp observerats på spännarmeringen.



Figur 8.4. Två grävmaskiner tuggar i sig de bågge konsolspannen på båda sidor om mittpelaren mot Kalix-sidan.



Figur 8.5 Som Figur 8.4 men från ovan.



Figur 8.6. Rivning av ändspannat på Lulesidan, jämför Figur 6.8. Överst: Ramp byggs. Mitten: Den nya bron syns till höger och det rivna spannet till vänster. Nederst: Det gamla rivna spannet i förgrunden och den nya bron i bakgrunden.

9. Slutsatser

Demonteringen av bron komplicerades av att den ligger i ett Natura 2000-område vilket innebär att inga byggdelar får förorena älven. En sprängning, som är en vanlig och kostnadseffektiv metod, var därför utesluten. Istället valdes en stegvis demontering av bron i omvänd ordning mot när den byggdes. En fördel var att den nya bron endast låg 5 m nedströms den gamla bron. Den nya bron kunde därför användas för transport av grävmaskiner försedda med knip- och krosskäftar som successivt kunde tugga sönder betongen. Avfallet tippades i pråmar under bron.

Demonteringen förlöpte utan större problem. En utmaning var losskoppling av ytterändarna av de fritt frambyggda konsolspannen:

- Leden mitt på bron visade sig endast ha små inbyggda spänningar. Deformationen vid denna led medförde ett gupp som många trafikanter klagat på och som också varit en av anledningarna till att bron byttes ut.
- Losskopplingen av konsolspannen mot ytterspannen visade att det inte heller där fanns några större inbyggda spänningar.
- Det är emellertid mycket viktigt av att ha kontroll mot större plötsliga rörelser så att dynamiska lasttillskott vid losskoppling kan hanteras på ett säkert sätt.

De studier som gjorts på bron i samband med rivningen visar att:

- betonghållfastheten ökat väsentligt från 48 MPa till cirka 68 på grund av fortsatt härdning av grovmalen cement efter 28 dygn. Vid den tillståndsbedömning som gjordes 2015 räknade man med en karakteristisk hållfasthet av 30 MPa.
- spännkraften har visat sig sjunka med endast cirka 4 – 10 % mot ca 14 % enligt beräkningar grundade på gällande Eurokoder.
- ingen märkbar korrosion har observerats på spännarmeringen, trots litet täckskikt i farbanan.
- Utmattningsbeständigheten kopplas till eventuell korrosion på grund av sprickbildning och ingen korrosion har observerats. Spänningsvariationerna i förspänningsstålet - som ofta har kritisk inverkan - ger ingen risk för utmattning.
- med hänsyn till ovanstående slutsatser beträffande brons kondition vid rivningen ligger den bärförmåga som beräknades vid tillståndsbedömningen 2015 väsentligt på säker sida.

Sammanfattningsvis visar de provningar och studier som genomförts att Kalix-bron var i betydligt bättre kondition än en enbart teoretisk, normbunden, tillståndsbedömning gett. Detta är i överensstämmelse med resultat från tidigare provade svenska betongbroar. Det vore därför värdefullt att studera verkligt tillstånd i fler broar i samband med att de rivs, för att på så sätt ge underlag för mer verklighetsnära tillståndsbedömningar.

Litteraturförteckning

ATENA (2022). ATENA Science v.5.7, is an advanced tool for engineering nonlinear analysis by Cervenka Consulting, Prague, see <https://www.cervenka.cz/products/atena/>

AxisVM (2022) Structural analysis & design software, InterCAD, see <https://axisvm.eu/>

Bagge, Niklas (2017). Structural Assessment Procedures for Existing Concrete Bridges. Experiences from failure tests of the Kiruna Bridge. PhD Thesis, Luleå University of Technology, 310 pp.

Bagge, N (2019). Demonstration and examination of procedures for successively improved structural assessment of concrete bridges, Structural Concrete, 2019:1- 24, DOI: 10.1002/suco.201900265

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., Nilimaa, J., Enochsson, O., Sabourova, N., Grip, N., Emborg, M., Elfgren, L., Lundmark, T. & Tu, Y., (2015a). Protecting a five-span prestressed bridge against ground deformations. Geneva, IABSE Workshop – Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges, pp 255-262.

Bagge, N., Nilimaa, J., Blanksvärd, T., Bernspång, L., Täljsten, B., Elfgren, L., Sas, G. & Tu, Y., (2015b). Performance of a prestressed concrete bridge loaded to failure. Geneva, IABSE Conference – Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges, pp 1088-1095.

Bagge, N., Nilimaa, J. & Elfgren, L., (2017). " In-situ methods to determine residual prestress forces in concrete bridges" Engineering Structures, 135, 41-52.

Bagge, Niklas; Popescu, Cosmin and Elfgren, Lennart. (2018a). Failure tests on concrete bridges: Have we learnt the lesson? Structure and Infrastructure Engineering, 14(3) 292-319.

Bagge N, Plos M, Popescu C. (2018b) A multilevel strategy for successively improved structural analysis of existing concrete bridges: Examination using a prestressed concrete bridge tested to failure. J Structure & Infrastructure Engineering. 2018;15:27–53.

Betonghandbok Material (2021). Betonghandbok Material , Del II. Hårdnad betong. Fysikaliska egenskaper och beständighet. Svensk Byggtjänst, Stockholm 2021, ISBN 978-91-7917-088-2, 1083 sid.

BBK04 (2004). Boverkets handbok om betongkonstruktioner. Boverket, 271 sid. https://www.boverket.se/globalassets/publikationer/dokument/2004/boverkets_handbok_om_betongkonstruktioner_bbk_04.pdf

Brühwiler, Eugen (2012). Extending the service life of Swiss bridges of cultural value. Engineering History and Heritage, ICE Proceedings, Vol 165, Issue 4, pp 236-240, <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1682012>, 20130/ehah.11.00001

Brühwiler, Eugen (2013). Extending fatigue life of structures beyond 100 years using monitored data. IABSE Workshop Helsinki on Safety, Failures and Robustness of Large Structures, IABSE Zürich, pp 100-109

Diven, R. J., & Shaurette, M. (2010). Demolition: Practices, Technology, and Management. West Lafayette: Purdue University Press.

EC2 (2005). Eurokod 2: Dimensionering av betongkonstruktioner – Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader, Svensk Standard SS-EN 1992-1-1:2005, 236 sid

Elfgren, Lennart (2015). Fatigue Capacity of Concrete Structures: Assessment of Railway Bridges. Research Report, Luleå University of Technology, 103 pp.
<http://www.divaportal.se/smash/get/diva2:997704/FULLTEXT02.pdf>

Elfgren, L., Bagge N., Nilimaa, J., Blanksvärd, Th., Täljsten, B., Shu, J., Plos, M., Larsson, O. and Sundquist, H. (2015): "Loading to failure of a 55- year-old prestressed concrete bridge in Kiruna", Final Report to BBT 2013-29" (Slutrapport till BBT 2015- 10-25. Brottbelastning av en 55 år gammal spännbetongbro i Kiruna - Kalibrering av modeller för tillståndsbedömning. In Swedish) Luleå tekniska universitet (LTU), Kungliga tekniska högskolan (KTH), Chalmers tekniska högskola and Lunds tekniska högskola (LTH). Sveriges Bygguniversitet, SBU, Tema Byggkonstruktion <http://www.sverigesbygguniversitet.se/>. LTU, Konstruktionsteknik, Project Report 170213-1. 39 + 206 pp Available at <https://ltu.diva-portal.org/smash/>

Elfgren, L; Täljsten, B; Blanksvärd, T; Sas, G; Nilimaa, J; Bagge, N; Tu, Y; Puurula, A; Häggström, J; Paulsson, B. (2018). Load testing used for quality control of bridges. COST TU 1406, Wroclaw, 1-2 March, 6 pp,
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1177454/FULLTEXT02>

Elfgren, L, Täljsten, B & Blanksvärd, T. (2019). Load testing as part of bridge management in Sweden. "Load Testing of Bridges: Proof Load Testing and the Future of Load Testing", Editor Eva O L Landsoght (Vol 13). Series: Structures and Infrastructure, Dan M Frangopol, Editor, London/Leiden: Taylor and Francis Group, pp. 333–346.

Enochsson, O., Sabourova, N., Emborg, M. & Elfgren, L. (2011). Gruvvägsbron i Kiruna. Deformationskapacitet. (The Mine Bridge in Kiruna. Deformation capacity. In Swedish). Technical Report, Structural Engineering, Luleå University of Technology, 108 pp, Available at <https://ltu.diva-portal.org/smash>.

Folchi, R., & Auletta, G. (2018). Demolition of bridges with explosives: Experience in the last decade in Italy with reinforced concrete bridges. The Journal of Explosives Engineering, 30-37.

Franz, Stefan & Ansorge, Frank (2018). Der Rückbau der Lahntalbrücke Limburg (1964) (Demontering av Lahndalsbron i Limburg, Tyskland, byggd 1964). 28. 9 Dresdener Brückenbausymposium, 12-13 März 2018, Technische Universität Dresden, pp 59-86, ISBN 978-3-86780-544-5.
https://tudresden.de/bu/bauingenieurwesen/imb/ressourcen/dateien/veranstaltungen/dbbs/28_dbbs/DBBS2018-06-Franz_Ansorge.pdf?lang=en

Franz, Stefan (2020), Dr. Ing, Projektleiter, stellv. Bereichsleiter, DEGES, Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH, Zimmerstrasse 54, 1017 Berlin, Tel. +49 30 202 43 – 337, franz@deg.es.de

Holst, Ralph (2020), Bauoberrat, Dipl.-Ing., Stellvertretender Leiter des Referats B4 Grundsatzfragen der Bauwerkserhaltung, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Brüderstraße 53 + 51427 Bergisch Gladbach, Tel. +49 2204 43-6401, Holst@bast.de

Häggström, Jens (2016). Evaluation of the Load Carrying Capacity of a Steel Truss Railway Bridge: Testing, Theory and Evaluation. Lic. Thesis, Luleå University of Technology, 142 pp. <http://ltu.diva-portal.org/>

Häggström, Jens; Blanksvärd, Thomas; Täljsten, Björn (2017a). Bridge over Åby River – Evaluation of full-scale testing. Research Report, Div. of Structural Engineering, Luleå University of Technology, 180 pp. <http://ltu.diva-portal.org/>

Häggström, J., Bagge, N., Nilimaa, J., Sas, G., Blanksvärd, T., Täljsten, B., Puurula, A., Rydberg-Forssbäck, L., Carolin, A. and Elfgrén, L (2017). " Testing Bridges to Failure – Experiences" IABSE Symposium – Engineering the Future, Sept 2017, Vancouver, Canada, 8 pp.

Jung, Rolf (2020), Dipl.-Ing. Vorstand, Leonhardt, Andrä und Partner, Beratende Ingenieure VBI AG, Am Schießhaus 1 – 3, 01067 Dresden, Tel.: +49 351 49485-13, rolf.jung@lap-consult.com

Mainline D1.2 (2013). Assessment methods for elderly rail infrastructure, MAINLINE Deliverable 1.2, 2013, 112 pp. Available at: <http://www.mainline-project.eu>.

Lorentsen, Mogens, redaktör (1963). Spännbetong. SVR:s Förlags AB, Stockholm, 216 s,

Lundin, Hanna (2022). Study of demolition processes for prestressed concrete bridges: Kalix bridge. Degree Project, Master's Level, Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, 152 p., <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1627953/FULLTEXT01.pdf>

Mainline D1.2 (2013). Assessment methods for elderly rail infrastructure, MAINLINE Deliverable 1.2, 2013, 112 pp. Available at: www.mainline-project.eu

Marx, Steffen; Gebauer, Daniel & Schacht, Gregor (2020). Versuchsbalken Verankerung, Laboruntersuchung zum Rückbau der Lahntalbrücke, Pos. 6; Zwischenbericht (Förankringsförsök, Labstudier vid demontering av Lahndalbron, Del 6, Delrapport), Technische Universität Dresden, Institut für Massivbau, 2020- 07-29, 55 pp.

Mirzazade, Ali (2022). Autonomous bridge inspection based on a generated digital model. Licentiate Thesis, Structural Engineering, Luleå University of Technology, ISBN 978-91-8048-097-0, 100p. <http://ltu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1656940/FULLTEXT01.pdf>

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 Posttensioned Concrete Bridge. Journal of Composites for Construction, ASCE, vol 20(3), 04015076-1—7.

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, 20 pp, see Nilimaa (2015).

Nilimaa, J., Häggström, J., Blanksvärd, Th., Täljsten, B., Tu, Y., Carolin, A., Paulsson, B. & Elfgrén, L. (2015c). Extend the life of existing railway bridges – Results from EU FP7 project MAINLINE. IABSE

Conference – Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges September 23-25 2015, Geneva, Switzerland,

Nilimaa, J., Sabau, C., Bagge, N., Puurula, A., Sas, G., Blanksvärd, Th., Täljsten, B., Carolin, A., Paulsson, B., Elfgren, L. (2018). "Assessment and Loading to Failure of Three Swedish RC Bridges." In Evaluation of Concrete Bridge Behavior through Load Testing: International Perspectives, [ed] Eva Lantsoght and Pinar Okumus, Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2018, Vol. SP 323, s. 8.1-8.18, artikel-id SP-323-8.

Nilimaa, Jonny; Nilforoush, Rasoul; Bagge, Niklas & Elfgren, Lennart (2020). Testing to Failure of a 55-year-old Prestressed Concrete Bridge in Kiruna. Bending, Shear and Punching of Girders and Slab. Fracture Properties of Materials Test Results, Modelling and Assessment. Final Report to BBT 2017-030 (Slutrapport till BBT. Riktlinjer för tillståndsbedömning av betongbroar - Erfarenheter från provning till brott av en 55-årig spännbetongbro i Kiruna). Luleå University of Technology, 80 + 100 pp.

Palmbo, F. (2017). Flottning - en förfluten del av Norrbottens historia. Från Kulturmiljö vid Norrbottens museum, Publicerat 24 mars 2017:
<https://kulturmiljonorrbotten.com/2017/03/24/flottning-en-forfluten-del-av-norrbottens-historia/>

Popescu, C; Täljsten, B; Blanksvärd, T and Elfgren, L (2019). 3D reconstruction of existing concrete bridges using optical methods, *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 15, no. 7, pp. 912–924, Jul. 2019, doi: 10.1080/15732479.2019.1594315

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, Division of Structural Engineering, Luleå Univ. of Technology, Luleå, Sweden, 328.

Puurula, A.M., Enochsson, O., Sas, G., Blanksvärd, T., Ohlsson, U., Bernspång, L., Täljsten, B., Elfgren, L. (2013). "Loading to failure and 3D nonlinear FE modelling of a strengthened RC bridge," *Structure and Infrastructure Engineering*, September 2013, 1-14 pp.

Puurula, Arto, Enochsson, O, Sas, G, Blanksvärd, T, Ohlsson, U, Bernspång, L, Täljsten, B, Carolin, A, Paulsson, B, Elfgren, L. (2015). Assessment of the Strengthening of an RC Railway Bridge with CFRP Utilizing a Full-Scale Failure Test and Finite-Element Analysis, *J. Struct. Engineering, ASCE*, 2015, 141, D4014008, 11 p

Puurula, A., Enoksson, O., Sas, G., Blanksvärd, T., Ohlsson, U., Bernspång, L., Elfgren, L. (2016). 3D non-linear FE analysis of a full-scale test to failure of RC Railway Bridge strengthened with carbon fibre bars. 19th IABSE Congress Stockholm 2016, September 2016. Zürich, pp. 2527 – 2535. ISBN 978-3-85748-144-4. 11

Saback, Vanessa (2022). Digital Twins for Asset Management of Structures. Licentiate Thesis, Structural Engineering, Luleå University of Technology, ISBN 978-91-8048-148-9, 127 pp.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1697673/FULLTEXT01.pdf>

Sas, G., Blanksvärd, T., Enochsson, O., Täljsten, B., & Elfgren, L. (2012). Photographic strain monitoring during full-scale failure testing of Örnsköldsvik Bridge. *Structural Health Monitoring*, 11(4), 489–498.

Sas, Gabriel; Gonzalez, Jaime and Elfgren, Lennart (2022). Gamla bron över Kalix älv - Kalibrering av mät- och analysmetoder. *Bygg & Teknik* 4/22,

Sas, Gabriel, Gonzalez-Librero, Jaime,(2023). Kalix Bridge Project. Testbed and Demolition, Research Report, Luleå University of Technology, To be published

SB 7.3 (2008). "Field Test of a Concrete Bridge in Örnsköldsvik, Sweden". Deliverable D 7.3, EC FP6 Sustainable Bridges – Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives. Edited by Lennart Elfgren, Ola Enochsson and Håkan Thun, 406 pp. Available at: <https://ltu.diva-portal.org/smash/>.

Schacht, G.; Müller, L.; Kromminga, S.; Krontal, L.; Marx, S. (2018). Tragwerksplanung beim Rückbau von Spannbetonbrücken (Planering av demontering av spännbetongbroar i Tyskland), Bautechnik 95 (2018) Heft 1, S.6-15. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bate.201700093>

Sweco (2015). Bärighetsberäkning bro 25-32-1 över Kalixbron vid Kalix. Konstruktionsberäkning. Uppdragsnummer 2478012. Upprättad av Markus Bergström, granskad av Filip Pastuhoff, konstruktionsansvarig Ann-Sofi Wuopi-Kumppani.1586 sid. (utan militära laster. Totalt inkl. militära laster 2712 sid).

TDOK 2013:0267. Krav. Bärighetsberäkning för Broar. Trafikverket, TDOK 2013:0267 Version 4.0, 2017-02-20, 142 sid.

Thun, H. (2006). Assessment of Fatigue Resistance and Strength in Existing Concrete Structures. PhD Thesis 2006:65, Luleå University of Technology, 187p. 2006.

Thun, H., Ohlsson, U. & Elfgren, L. (2006). Concrete strength in old Swedish concrete bridges. Nordic Concrete Research, vol 35, no 1–2, pp 47–60.

Täljsten, Björn; Paulsson, Björn & Elfgren, Lennart (2019). Prestressed Concrete Bridges, Condition Assessment and Future Challenges. A State-of-Art Report. BBT 2017-011, Trafikverket, Luleå University of Technology, Research Report, 121 pp.

Vägverket. (2005). Broarna i Norrbottens län - Inventering av kulturhistoriskt värdefulla broar. (The bridges in Norrbotten. An inventory of bridges of historical interest. In Swedish). Rapport 4/2005, Länsstyrelsen i Norrbottens Län, Kulturmiljöenheten. Luleå: Elanders Gummessons AB, 134 p.

Wagner, Peter (2017). Rückbau großer Talbrücken – Konzepte und Verfahren aus Sicht eines Generalunternehmers (Demontering av stora broar över dalar. Koncept och utföranden ur en generalentreprenörs synvinkel). VSVI Hessen Brücken für die Zukunft 24.05.2017. 41 pp.

Appendix

A.1 Review of Literature

A.2 Demolishing Approaches