

PM

Ärendenummer:
Projektnummer:

Till:

Från: Andreas Andersson
Box 1070
172 22 Sundbyberg

Datum: 2010-06-28



TRAFIKVERKET

Trafikverket
Box 1070
172 22 Sundbyberg
Besöksadress: Landsvägen 50A
Telefon: 08-762 22 00
www.trafikverket.se

Andreas Andersson
Trafik Teknik, Byggnadsverk
andreas.b.andersson@
trafikverket.se
Direkt: 08-762 35 46
Mobil: 070-491 14 29

UTKAST 100713

Gamla Årstabron, kompletterande beräkningar av nolledsbågarnas bärförmåga under förstärkningsetapper

Inledning

I föreliggande PM redovisas kompletterande beräkningar av gamla Årstabrons nolledsbågar, avseende bärförmåga under förstärkningsarbete. Kompletteringen utgörs främst av att kontrollera bärförmågan vid reducerad tvärsnittsbredd, med anledning av ökat vattenbilningsdjup i det som benämns fas 1. De ursprungliga beräkningarna återfinns i (Andersson, 2006), även sammanställt i (Andersson, 2007).

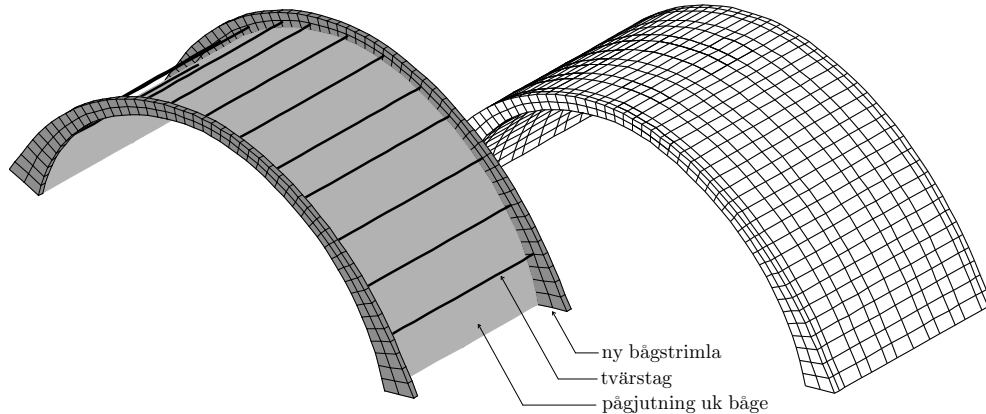
Förstärkningsetapper

Förstärkning av betongbågarna illustreras i Figur 1 och utgörs av nya betongbågstrimlor på var sida om bågens ytterkanter som efterspänns med tvärgående stag samt en armerad pågjutning på undersida bågen. Innan pågjutning tas delar av befintligt material bort genom vattenbilning samtidigt som full trafik tilläts på bron. För att minimera minskning i bärförmåga delas arbetet in i följande faser (i korthet):

- fas1a: vattenbilning av bågens första vertikala kant, ca. 250 mm,
- fas1b: pågjutning av ny betongbågstrimla ca. 250 mm,
- fas2a: vattenbilning av bågens andra vertikala kant, ca. 250 mm,
- fas2b: pågjutning av ny betongbågstrimla ca. 250 mm,
- fas2c: efterspänning med tvärgående stag,
- fas3a: vattenbilning max. 50 mm undersida båge,
- fas3b: pågjutning undersida båge ca. 100 mm, armering $\phi 16s100$ längsled och $\phi 12s100$ tvärlad.

Lägsta tillåtna bärförmåga innan förstärkning har angetts till D2 (stax 22.5, stvm 6.4). Efter förstärkning ska bron klara tåglast UIC71 (stax 25, stvm 8.0).

UTKAST 100713



Figur 1: Illustration av förstärkning av betongbågarna.

För nolladsbågarna har bågstrimlorna (fas 1 och 2) visats ge tillräcklig ökning i bärförmåga för att kunna utföra fas 3 med tillräcklig bärighet. En bidragande orsak är att nolladsbågarnas tvärgående bärförmåga ökas.

Förutsättningar och beräkningsmodeller

De kompletterande beräkningarna utförs med samma förutsättningar som tidigare (Andersson, 2006). Förutsättningarna i korthet sammanfattas som

- betongbågarna antas bestå av betongkvalitet C12,
- försvagningszoner kring gjutfogar antas ha halverad tryckhållfasthet,
- ingen befintlig armering medräknas,
- fyllning och sidomurar medräknas endast som yttre verkande last.

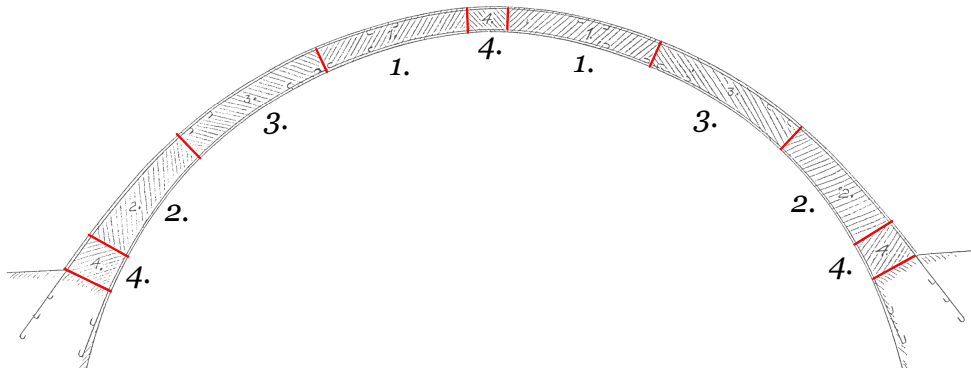
Tidigare beräkningar har visat att nolladsbågarnas tvärgående bärförmåga är av betydelse. För att dessutom medräkna inverkan av förstärkningar i olika etapper på ett noggrant sätt, baseras analyserna huvudsakligen på en 3D FE-modell, se Figur 1. Brottvillkoret utgörs av en icke-linjär materialmodell för betong, analyserna utförs i det generella FE-systemet SOLVIA03.

Från inspektioner har områden kring gjutetappfogar ofta visats vara i betydligt sämre skick än resterade delar av bågen, bl.a. urlakning av betongen. Därav har områden vid samtliga gjutetappfogar antagits ha halverad tryckhållfasthet jämfört mot övriga delar. Gjutetappfogarna visas i Figur 2, försvagade områden i FE-modellen visas i Figur 3.

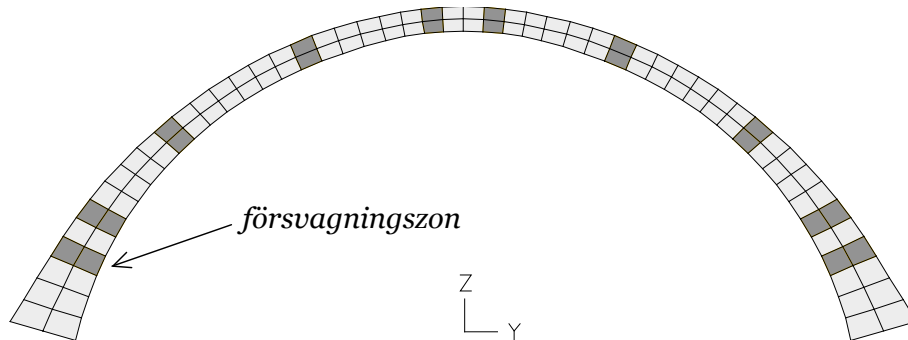
Från inspektioner visades den befintliga armeringen vara delvis korroderad, ibland frilagd och med dåligt omslutande betong. Överkantsarmeringen har ej kunnat statusbedömas. I beräkningarna har ingen befintlig armering medräknats.

I följande beräkningar beaktas endast last av egenvikt samt vertikal trafiklast.

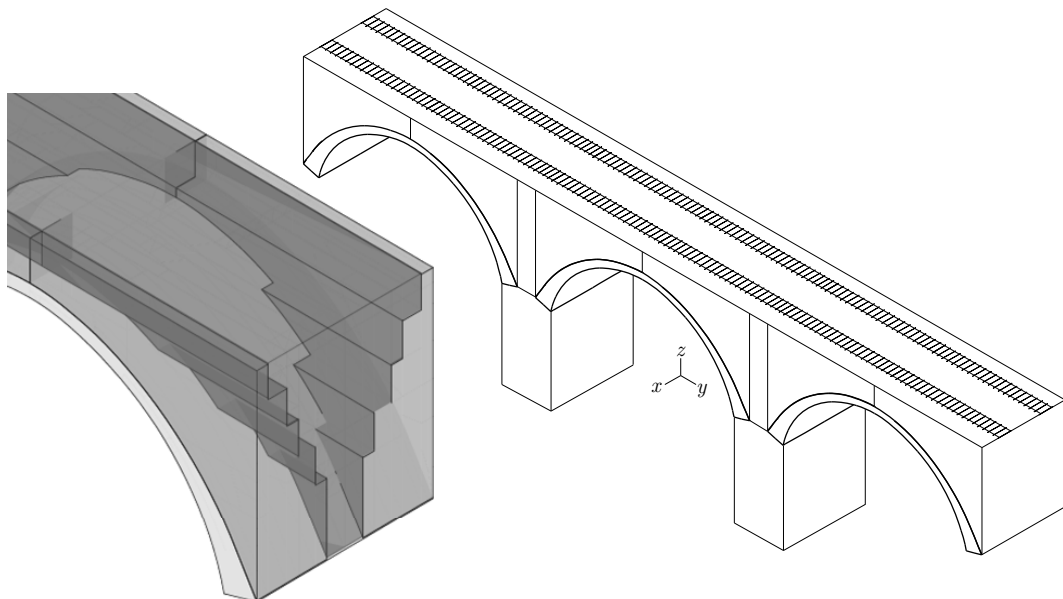
UTKAST 100713



Figur 2: Gjutetapper nollbågar, från originalritning B7050-56.



Figur 3: Antagna försvagningszoner, 3D FE-modell.



Figur 4: 3D FE-modell av tre spann, illustration av sidomur och fyllning.

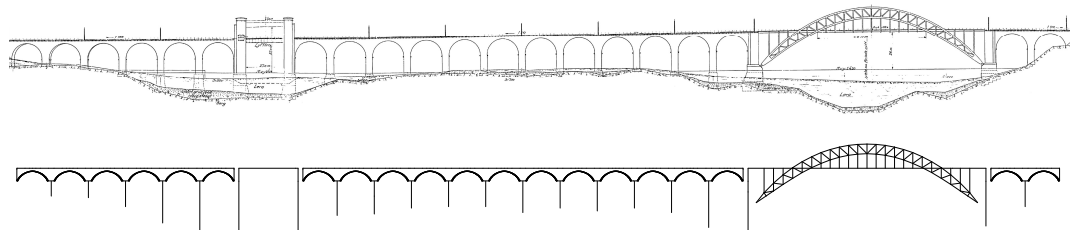
UTKAST 100713

3D MODELL

I Figur 4 visas en modell av bågarna där fyllning och sidomurar medräknas. Sidomurarna är skilda från bågen med asfaltpapp som även utgör det ursprungliga tätskiktet. Från töjningsmätningar på bågen har modellen kalibrerats. För brukslaser erhålls bäst överensstämmelse då full samverkan mellan båge, sidomurar och fyllning antas. Vidare ges en E-modul på ca. 100 MPa i fyllningen och 40 GPa i både sidomurar och båge bäst överensstämmelse. Verknings sättet i brottgränstillstånd är dock mer osäkert, därför betraktas både sidomurar och fyllning endast som yttre verkande last i dessa analyser. Lastfördelningen baseras dock på bruksmodellen med elastiska antaganden.

GLOBAL 2D BALKMODELL

I syfte att mer översiktigt uppskatta bågarnas bärförmåga har ett flertal 2D-modeller upprättats. Med en global 2D balkmodell, Figur 5, beräknas influenslinjer vilka används för att beräkna dimensionerande snittkrafter i bågarna. Brottkriteriet utgörs då av tvärsnittsbärförmågan för ett betongtvärsnitt belastat av en tryckande normalkraft och böjande moment, Ekv. (1) och Ekv. (2). Envelopper av bågarnas kapacitet beräknas, motsvarande lastposition sparas och används i övriga analyser.



Figur 5: Elevation av gamla Årstabron, överst från originalritning, nederst från 2D FE-modell.

$$m = 0.5(n - n^2) \quad (1)$$

$$m = \frac{M}{bh^2 f_{cc}}, \quad n = \frac{N}{bh f_{cc}} \quad (2)$$

2D DETALJMODELL

Med den globala 2D-modellen begränsas bågarnas kapacitet av dess lägsta tvärsnittskapacitet. För bågkonstruktioner uppnås den yttersta bärförmågan normalt då konstruktionen övergår till en mekanism, vilket innebär bildandet av fyra leder. För att undersöka bågarnas verknings sätt till yttersta brottlast har en 2D modell med antagande om plan spänning upprättats. Förutsättningarna är desamma som för 3D-modellen och brottkriteriet utgörs av en icke-linjär materialmodell för betongen.

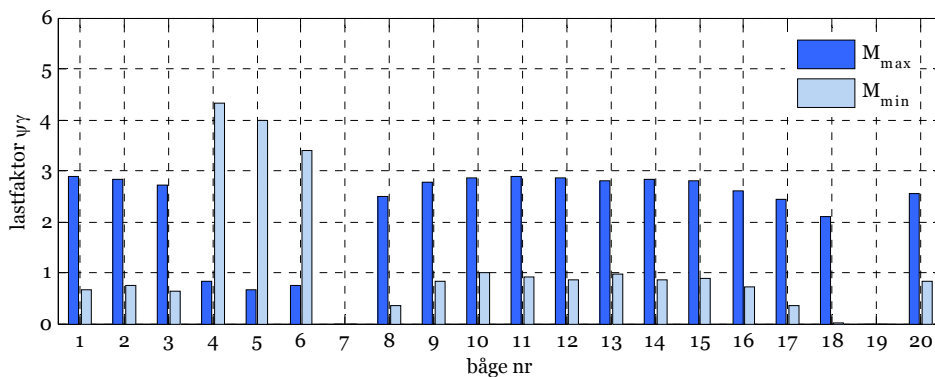
UTKAST 100713

Resultat

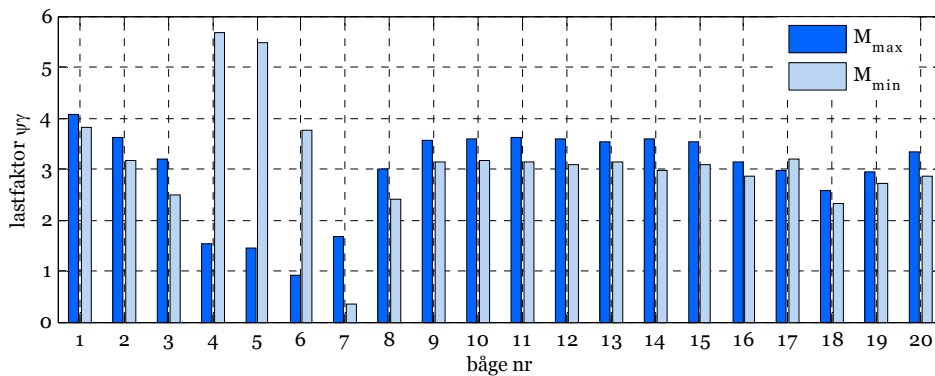
GLOBAL 2D BALKMODELL

Dimensionerande snittkrafter baseras på influenslinjer, vilka beräknas utifrån en linjär modell där fyllningen utgör både lastfördelning och mothållande styvhet. Fyllningen antas ha en E-modul på 100 MPa. P.g.a. fyllningens mothåll riskerar beräknade snittkrafter vara på osäkra sidan. Dock bedöms brottkriteriet baserat på lägsta tvärsnittskapacitet vara väl konservativt. Två antaganden om fyllningens kontakt mot bågen studeras, i modell 1 överförs inga tangentiella krafter längs bågen (nollfriktion), i modell 2 kan ingen glidning mellan båge och fyllning förekomma (full samverkan).

Fyra lastkombineringar utförs, största positiva och negativa böjande moment med tillhörande normalkrafter samt största positiva och negativa normalkraft med tillhörande böjande moment. I samtliga fall är max moment avgörande. Resultaten anges med omvänd teckennotation, det som benämns M_{min} motsvarar positivt böjande moment (drag i underkant på fritt upplagd balk). I Figur 6 och Figur 7 redovisas resultat för de båda modellerna. I Figur 8 visas resultat med modell 2 där fyllningens E-modul reducerats till 1 MPa.

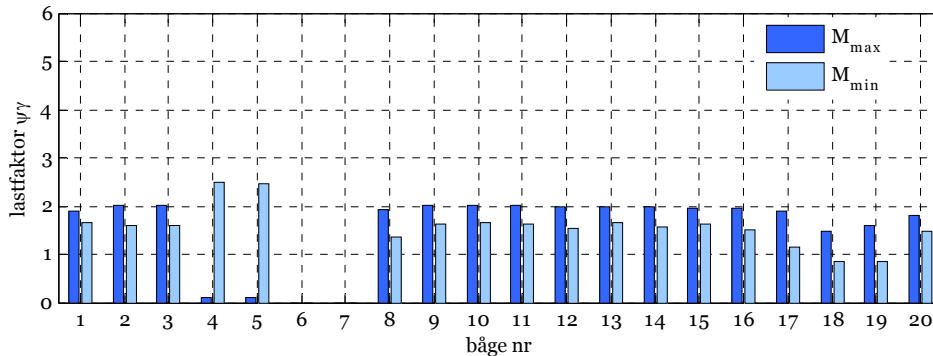


Figur 6: Beräknade lastfaktorer för tåglast D4, modell 1.

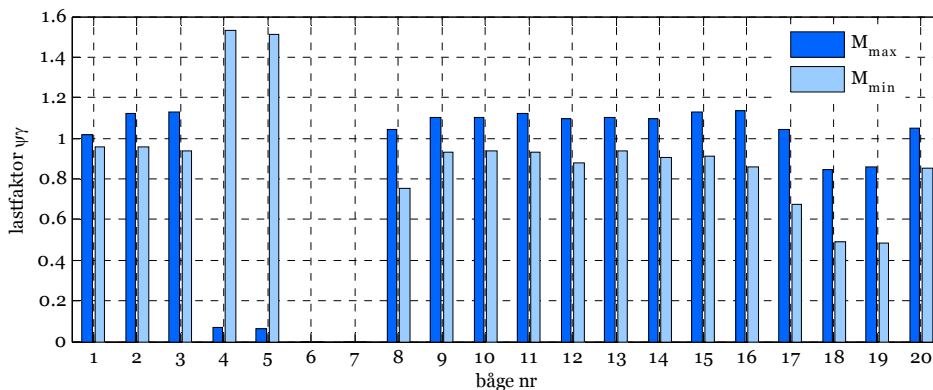


Figur 7: Beräknade lastfaktorer för tåglast D4, modell 2.

UTKAST 100713



Figur 8: Beräknade lastfaktorer för tåglast D4, modell 2 med $E_{jord} = 1$ MPa.

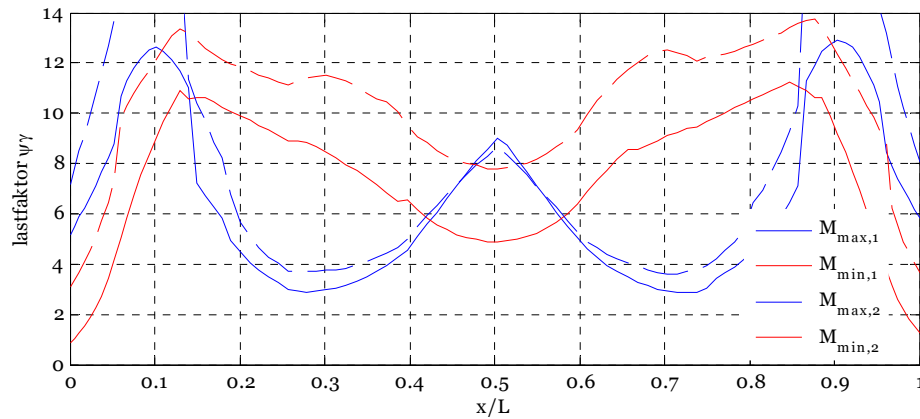


Figur 9: Beräknade lastfaktorer för tåglast UIC71, modell 2 med $E_{jord} = 1$ MPa.

I Figur 9 visas lastfaktorer för tåglast UIC71 med modell 2 och $E_{jord} = 1$ MPa. Resultaten baseras på en dimensionerande tryckhållfasthet $f_{ccd} = 6.5$ MPa motsvarande betongkvalitet C12. Försvagningszonerna beaktas ej. Enligt BVS 583.11 krävs en lastfaktor $\psi\gamma = 1.3$ för tåglast D4 och $\psi\gamma = 1.4$ för tåglast UIC71. Med modell 1 erhålls lastfaktorer ca. 0.5 – 1.0 för tåglast D4 på nolledsbågarna. För båge 7 söder om lyftspannet och båge 19 söder om stålbågen kan ingen lastfaktor beräknas eftersom de permanenta snittkrafterna överstiger bågens kapacitet. Med modell 2 erhålls lastfaktorer ca. 2 – 3 för tåglast D4 på nolledsbågarna, för båge 7 är dock motsvarande lastfaktor 0.4. Om fyllningens E-modul i modell 2 minskas till 1 MPa erhålls en lastfaktor ca. 1 – 1.5 för nolledsbågarna. Undantaget är båge 7 där kapaciteten överskrids för permanenta laster. För tåglast UIC71 på samma modell erhålls lastfaktorer ca. 0.5 – 1.0.

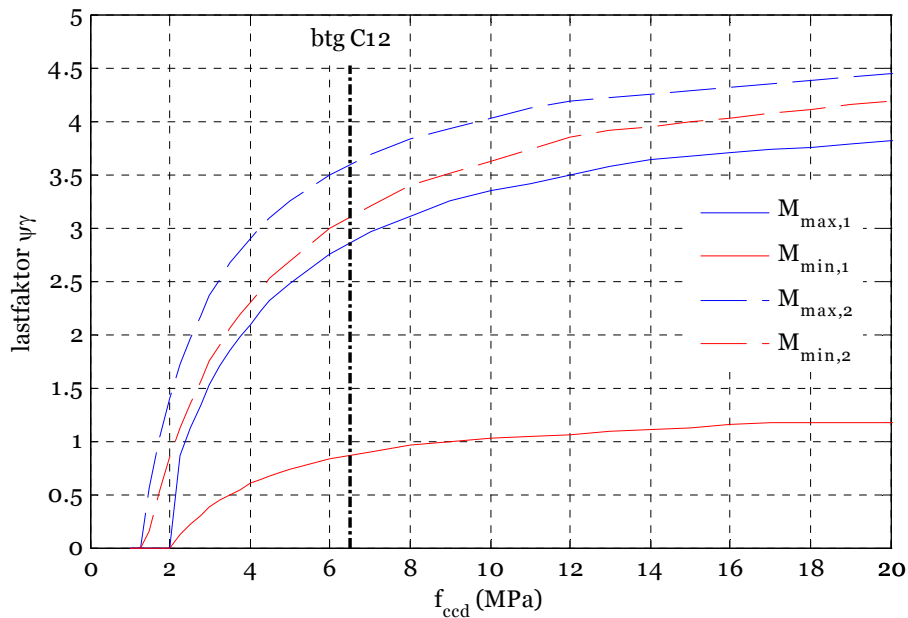
I samtliga fall är största negativa moment (M_{min}) vid anfangen avgörande, resulterande i dragpåkänning i överkant. För modell 2 ger dock största positiva moment (M_{max}) kring fjärdedelspunkten lastfaktorer i samma storleksordning, resulterande i dragpåkänning i underkant. För 3-ledsbågarna är största positiva moment i fjärdedelspunkten alltid avgörande. I Figur 10 visas envelopp av lastfaktor längs båge 12, för både modell 1 och modell 2.

UTKAST 100713



Figur 10: Envelop av lastkapacitet (tåglast D4) för båge 12, jämförelse mellan modell 1 och modell 2.

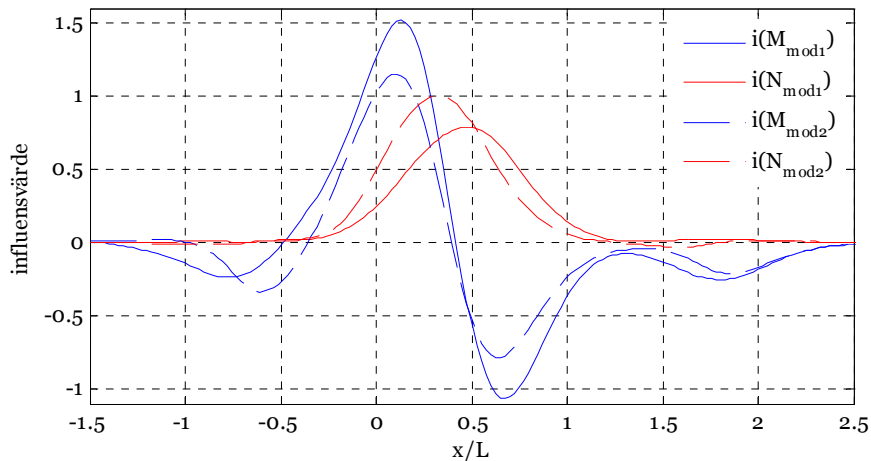
I Figur 11 visas inverkan av ändrad tryckhållfasthet. Över ca. 20 MPa erhålls ingen ökning i bärförmåga, beroende på trycklinjens läge i tvärsnittet. Det konstateras att det med modell 1 inte går att uppfylla erforderlig lastkapacitet i anfangen. Antagandet om halverad hållfasthet kring gjutfogar riskerar att dramatiskt minska bärförmågan om dessa befinner sig i närheten av de kritiska snitten.



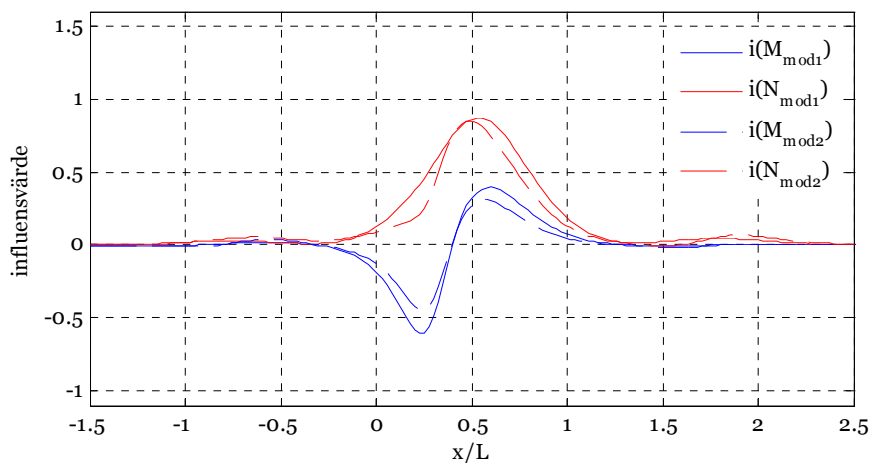
Figur 11: Inverkan av betongens tryckhållfasthet, båge 12, avser tåglast D4.

UTKAST 100713

Influenslinjer för moment och normalkraft i båge 12 visas i Figur 12 och Figur 13. teoretisk spännvidd är 20.3 m, avstånd räknas från norra anfanget. Med modell 2 minskar moment och ökar normalkraften vid anfanget, jämfört med modell 1. Det kan noteras att influenslinjerna är längre än spännvidden för en båge. I fjärdedelspunkten minskar både moment och normalkraft med modell 2.



Figur 12: Influenslinjer för böjande moment och normalkraft i norra anfanget ($\xi=0$) på båge 12.



Figur 13: Influenslinjer för böjande moment och normalkraft i norra fjärdedelspunkten ($\xi=0.28$) på båge 12.

För tåglast D4 är avståndet mellan de yttre axlarna på en vagn 8.25 m. För max positivt moment vid anfanget medverkar två vagnar till lasteffekten, första axeln står ca. 3 m från hjässan. För max negativt moment i fjärdedelspunkten medverkar endast en vagn, även om ytterligare en vagn inte ger något större bidrag, första axeln står ca. 4 m från hjässan.

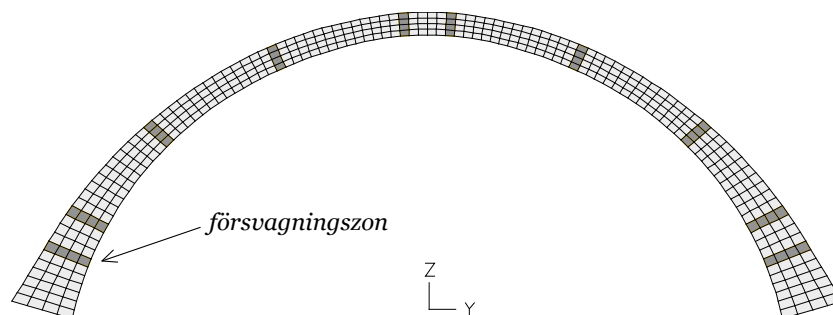
UTKAST 100713

2D DETALJMODELL

Resultaten från den globala 2D balkmodellen baseras på bågens tvärsnittsbärförmåga och kapaciteten anses uppnådd då en första flytled uppstår. Ofta uppnås den yttersta bärförmågan först då konstruktionen övergår till en mekanism, i detta fall då den fjärde leden bildas. Detta kan beaktas genom att successivt införa leder i modellen för beräkning av influenslinjer, baserat på en föreliggande beräkning av tvärsnittskapacitet enligt ovan. En alternativ metod som redovisas i följande avsnitt baseras på en 2D plan spänningsmodell och en icke-linjär materialbeskrivning av betongen.

Lastpositioner tas från den globala 2D-modellen. Eftersom lastpositionen för max moment i anfang och fjärdedelspunkt ligger nära varandra studeras endast ett lastfall, utgörande av två vagnar med första axeln 3 m från hjässan. Denna ger ca. 5% högre kapacitet för snittet kring fjärdedelspunkten baserat på den globala balkmodellen.

FE-modellen inklusive försvagningszoner visas i Figur 14. Även fyllningen modelleras med 2D plana element och används för att beräkna lastfördelning av fyllningens egenvikt samt tåglast. Fyllningen antas ha linjära egenskaper med E-modul 100 MPa och tvärkontraktion $\nu = 0.38$. Både båge och fyllning har bredden 9.0 m och lastens fördelning i tvärled antas konstant. Inverkan av sidomurar beaktas ej. I huvuddelen av beräkningarna medräknas ingen styvhet av fyllningen, dvs. denna tas bort när lastfördelningen beräknats.

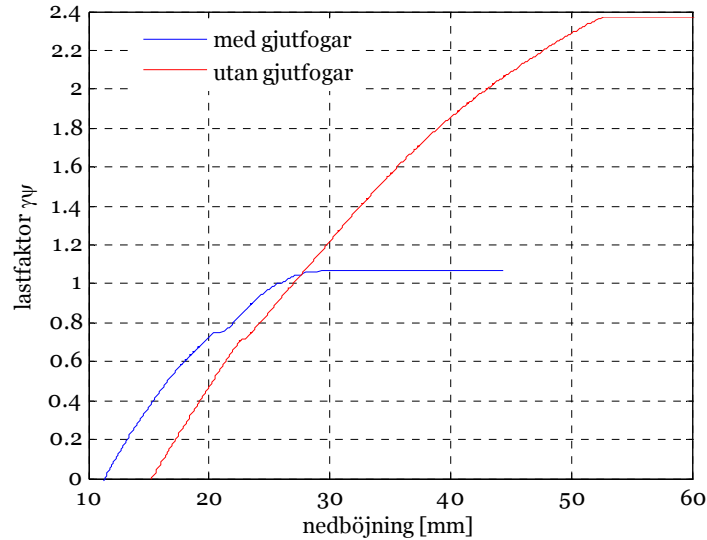


Figur 14: 2D plan-spänningsmodell av en båge och försvagningar.

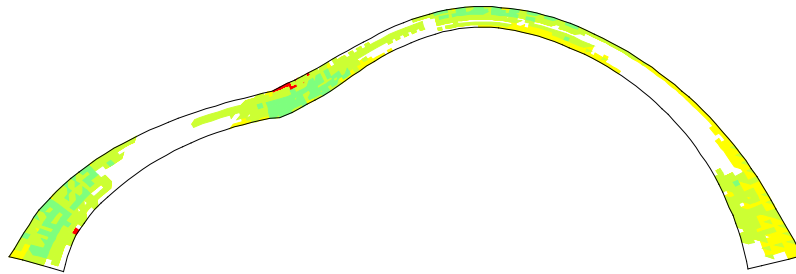
I Figur 15 visas samband mellan nedböjning i fjärdedelspunkten och lastfaktor för tåglast D4 på två spår i aktuell lastposition. Bågen antas bestå av betongkvalitet C12, ingen befintlig armering medräknas. Utan försvagningar i bågen erhålls en lastfaktor ca. 2.4, i samma storleksordning som för max positivt moment enligt 2D balkmodell, Figur 6. Med beaktande av försvagade gjutfogar minskar lastfaktorn till 1.05. Båda modellerna uppvisar spröda brott till följd av att ingen armering medräknas. Uppsprickning av bågen visas i Figur 16 och Figur 17. Vid lastfaktorn ca. 0.7 visar båda modellerna en mindre platå, vilket härrörs från uppsprickning av anfanget. I modellen med gjutfogar resulterar denna lastnivå till lokal betongkrossning i detta område. Omlagring av lasterna synes dock möjlig och brottet avgörs av kapaciteten kring fjärdedelspunkten. I modellen med gjutfogar

UTKAST 100713

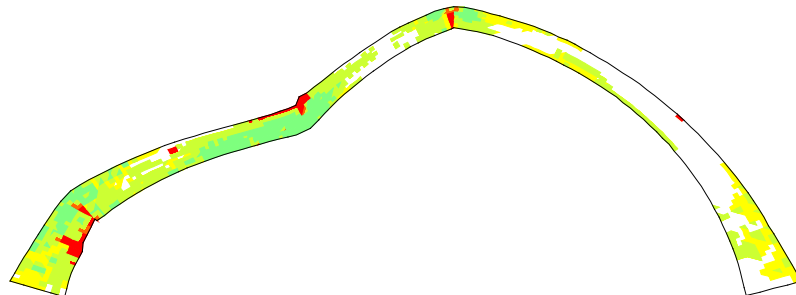
bildas slutligen en led i hjässan, Figur 17. Om hela bågen antas försvagad på samma sätt som gjutfogarna erhålls en lastfaktor ca. 0.85.



Figur 15: Last-deformationssamband för 2D modell, inverkan av försvagningar i gjutfogar.

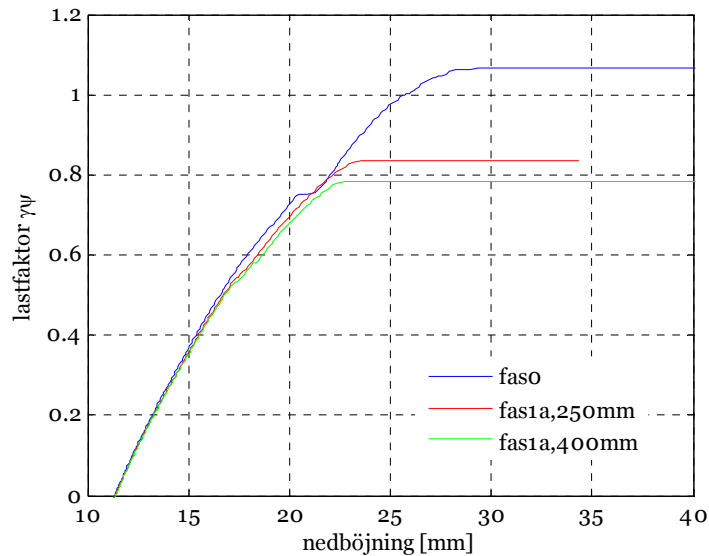


Figur 16: Uppsprickning av bågen, tåglast D4 vid brottlast, $\psi\gamma=2.4$, modell utan försvagade gjutfogar.



Figur 17: Uppsprickning av bågen, tåglast D4 vid brottlast, $\psi\gamma=1.05$, modell med försvagade gjutfogar.

UTKAST 100713



Figur 18: Last-deformationssamband för 2D modell, inverkan av minskad tvärsnittsbredd i fas 1a.

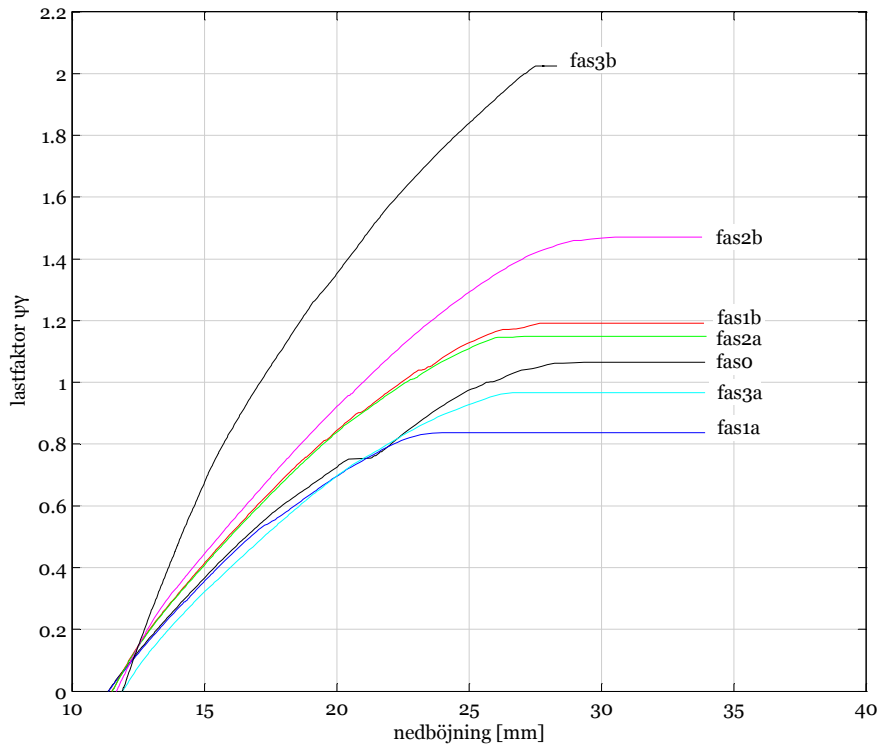
Under vattenbilning fas 1a minskas bågens tvärsnittsbredd med max 250 mm. För att undersöka inverkan av större tvärsnittsminskning har även 400 mm studerats. För 250 mm erhålls $\psi\gamma=0.84$, för 400 mm erhålls $\psi\gamma=0.78$. Jämfört med grundmodellen fas0 motsvara detta en minskning med 21% resp. 26%.

Resultat från samtliga etapper visas i Figur 19, motsvarande lastfaktorer redovisas i Tabell 1. Lägst lastfaktor erhålls under fas 1a, efter vattenbilning av bågens första kant. Under efterföljande etapper erhålls en lastfaktor över 1, undantaget fas 3a. Med dessa modeller försummas dock bågens tvärgående bärförmåga.

Tabell 1: Lastfaktorer, 2D plan modell, fyllning som yttre last.

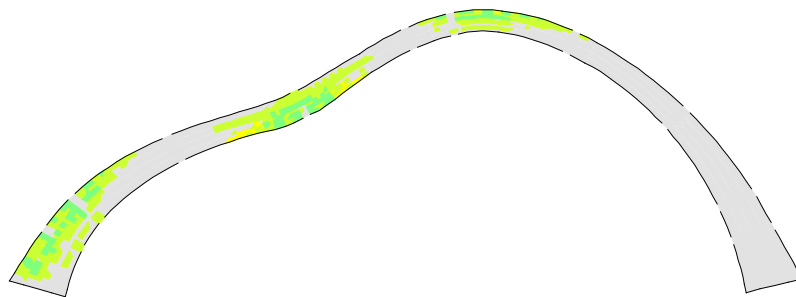
modell:	lastfaktor:	% mot fas0	not.
fas0	1.07	0%	ref. modell
fas0	2.37	123%	ej gjutfogar
fas1a	0.84	-21%	tar bort 250 mm
fas1a	0.79	-26%	tar bort 400 mm
fas 1b	1.19	12%	återgjuter 250 mm
fas2a	1.15	8%	tar bort 250 mm
fas2b	1.47	38%	återgjuter 250 mm
fas3a	0.97	-9%	tar bort 50 mm uk
fas3b	2.03	90%	återgjuter 100 mm uk

UTKAST 100713



Figur 19: Last-deformationssamband för 2D modell, före, under och efter förstärkning.

Vid medräknanden av fyllningens styvhet kan bärförmågan ökas avsevärt. Fyllningen beskrivs förenklat med en bilinjär arbetskurva för enaxiell spänning i tryck- och dragspänning. E-modulen i det linjära området sätts till 5 MPa, tryckhållfastheten 300 kPa och draghållfastheten 1 kPa används. I princip ingen töjhårdning medräknas. Full kontakt mellan båge och fyllning förutsätts. I Figur 19 visas uppsprickning av bågen vid brottlast. För fas0 med försvagande gjutfogar erhålls en lastfaktor ca. 3.5, motsvarande utan mothållande fyllning är 1.07.



Figur 20: Uppsprickning av nolledsbågen, modell med mothållande fyllning, fas0 med försvagande gjutfogar.

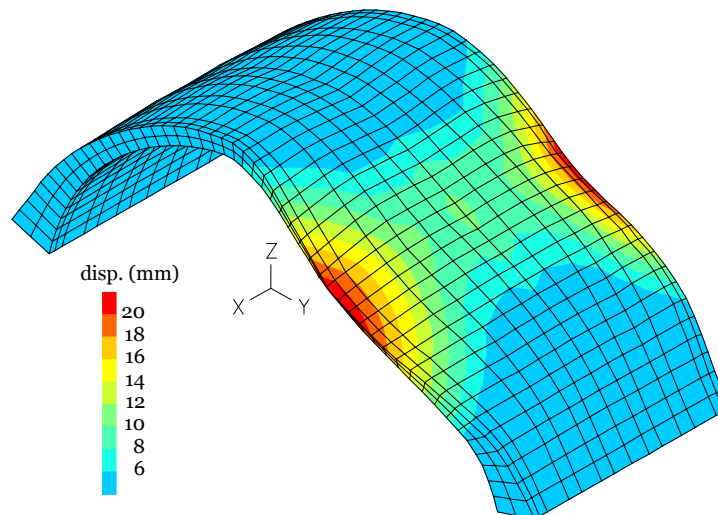
UTKAST 100713

3D MODELL

Ovan redovisade 2D-modeller visar på bågens längsgående bärförmåga. Fältmätningar utförda 2005 (Andersson, A., Sundquist, H, 2005) har visat att bågens tvärgående verkningsätt är betydande, främst p.g.a. lastomfördelning av sidomurarna, men även p.g.a. samband mellan bågens bredd. Sidomurarna utgör en betydande del av bågens belastande yta, även om dessa inte är utformade att samverka med bågen påverka de lastfördelning av såväl egenvikt som tåglast. Om bågen likt tidigare modeller räknas helt oarmerad innebär detta en mycket liten kapacitet i tvärlid p.g.a. avsaknad av tryckande normalkraft i den riktningen. Vidare beror bågens verkningsätt på dess randvillkor, minskat horisontalmothåll resulterar i dominerande längsgående brottmoder, ökad horisontalstyvhet aktiverar tvärgående brottmoder.

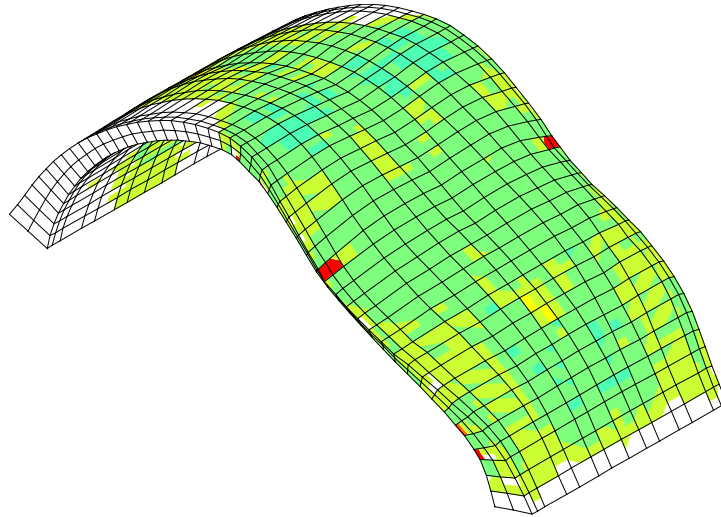
Beräkningarna utgår från en referensmodell där fyllning och sidomurar endast betraktas som yttre verkande last och lastfördelande element, på samma sätt som tidigare redovisade 2D-modeller. Ingen befintlig armering medräknas. Betongkvalitet i bågen och bågens gjutfogar är samma som tidigare. Modellen omfattar en båge och tillhörande pelare. Ett tillskott av horisontalstyvhet på 4 000 MN/m läggs till, beräknad från en modell utgörande av tre valv. Samma lastposition för tåglast D4 används som tidigare.

I Figur 21 visas deformation vid brottlast för ursprunglig bro (faso) och visar tydligt bågens tvärgående verkningsätt. I Figur 22 visas betongens uppsprickning och begynnande krossning vid samma last.



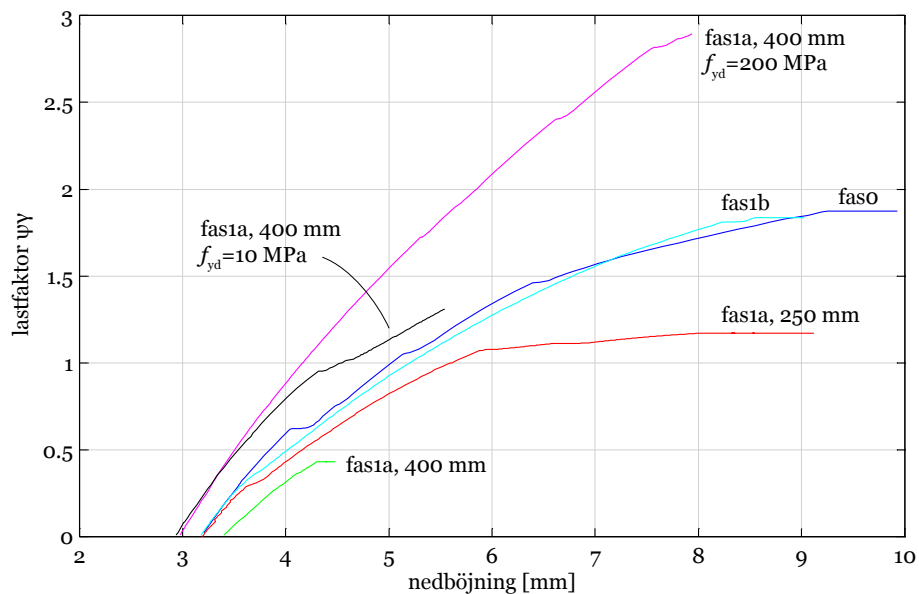
Figur 21: faso, nedböjning (magnitud) vid brottlast.

UTKAST 100713



Figur 22: fas0, uppsprickning av bågen vid brottlast (rött anger betongkrossning).

I Figur 23 redovisas last-deformationssamband för bågen under fas 0 – 1b. nedböjningen avser vertikal nedböjning av bågens undersida kring fjärdedelspunkten och längs centrumlinjen i tvärlid. För grundmodellen i fas0 beräknas en lastfaktor ca. 1.9 för tåglast D4 på två spår. Detta är högre än för motsvarande 2D-modell. 3D-modellen är dock känsligare för ändrade randvillkor jämfört med 2D-modellen, p.g.a. olika kombinationer av längs- och tvärgående verkningsätt.

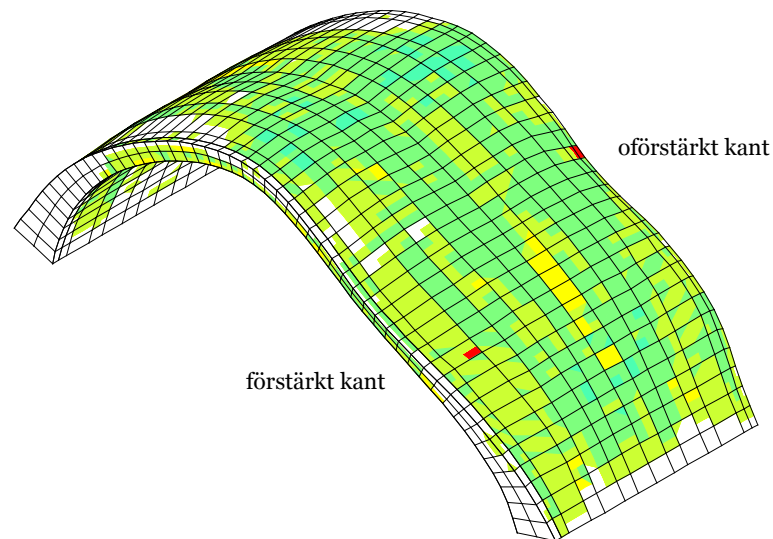


Figur 23: Last-deformation för 3D modell, fas0 – fas1b. Inverkan av minskad bredd i fas1a samt inverkan av befintlig armering.

UTKAST 100713

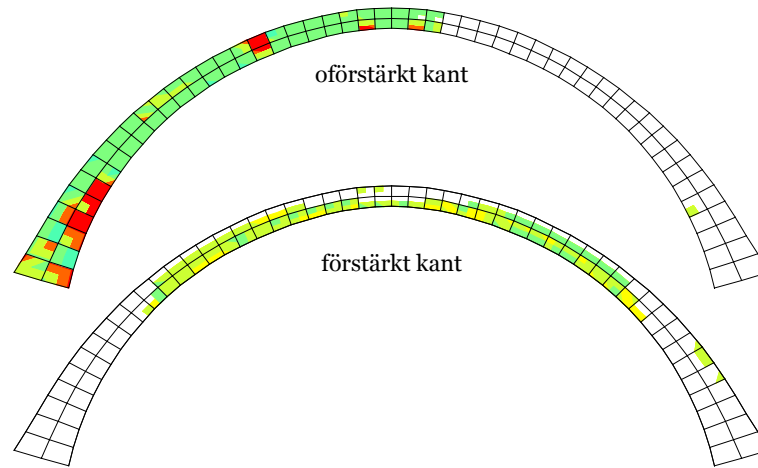
Då 250 mm av bågens ena kant vattenbilas bort under fas1a minskar lastfaktorn till 1.2, en minskning med nästan 40%. Om 400 mm tas bort minskar lastfaktorn dramatiskt. Om befintlig armering medräknas ökar både den längsgående och tvärgående kapaciteten. Lastfaktorn ökar då betydligt, även om armeringsspänningen begränsas kraftigt. Två fall studeras, båda med medräknande av 100% ursprunglig armering enligt originalritningar, i det ena fallet begränsas flytspänningen till 200 MPa resulterande i en lastfaktor 2.9, i det andra fallet antas armeringen flyta/sluta samverka vid armeringsspänningen 10 MPa, resulterande i en lastfaktor 1.3.

Efter återgjutning fas1b uppnås i princip samma lastfaktor som ursprunglig båge. I Figur 24 och Figur 25 visas bågens uppsprickning vid brottlast i fas 1b, kapaciteten begränsas främst av den oförstärkta sidan. Syftet med förstärkningarna i fas1 och fas2 är att öka bågens längs- och tvärgående bärförmåga samt att säkra en tillförlitlig kapacitet efter vattenbilning i fas3a. En sammanställning av beräknade lastfaktorer redovisas i Tabell 2.



Figur 24: fas1b, uppsprickning av bågen vid brottlast.

UTKAST 100713



Figur 25: fas1b, uppsprickning av bågen vid brottlast. Tvärsektion av ytterkanter.

Tabell 2: Lastfaktorer, 3D-modell, fyllning som yttre last.

modell:	lastfaktor:	% mot fas0	not.
fas0	1.87	0%	ref.modell
fas1a	1.17	-38%	tar bort 250 mm
fas1a	0.43	-77%	tar bort 400 mm
fas1a	2.89	55%	tar bort 400 mm, bef. armering, $f_{yd}=200$ MPa
fas1a	1.31	-30%	tar bort 400 mm, bef. armering, $f_{yd}=10$ MPa
fas1b	1.84	-2%	återgjuter 250 mm

Sammanfattning

I föreliggande PM redovisas beräkningar av nolledsbågarnas lastkapacitet, endast egenvikt och trafiklast medräknas. Beräkningar utförs med tre olika modeller, en global 2D balkmodell, en 2D detaljmodell och en 3D-modell. Likt tidigare beräkningar föreligger mycket stora osäkerheter i resulterande lastkapacitet, beroende på modellernas känslighet för ett antal mycket osäkra indataparametrar.

Med ovan redovisade förutsättningar och antaganden visar beräkningarna att befintlig armering delvis måste utnyttjas för att påvisa en tillräcklig säkerhet under förstärkningsetapperna, främst om vattenbilningsdjupet i fas1 ökar avsevärt jämfört med ursprungliga förutsättningar.

UTKAST 100713

Litteratur

- Andersson, A., Sundquist, H, 2005. Gamla Årstabron, Utvärdering av verkningssätt hos betongvalv genom mätning och FEM-modellering, Etapp 1. *Teknisk rapport 2005:13, KTH Brobyggnad.*
- Andersson, A., 2006. Gamla Årstabron, FEM-beräkning av förstärkningsåtgärders inverkan på betongbågarna. *Rapport 101, KTH Brobyggnad.*
- Andersson, A., 2007a. Gamla Årstabron, FEM-beräkningar av 3-ledsbågarnas verkningssätt och inverkan på förstärkningsåtgärder. *Rapport 104, KTH Brobyggnad.*
- Andersson, A., 2007b. Gamla Årstabron, Sammanställning av beräkningar avseende förstärkning av betongbågarna. *Rapport 105, KTH Brobyggnad.*
- Andersson, A., 2010. Gamla Årstabron, Analys av töjningsmätningar på båge 2. *Rapport KTH Brobyggnad, arbetskopla 100325.*
- Paulsson-Tralla, J., 2005a. Gamla Årstabron, Tillståndsbedömning 2005. *Rapport 7070800.*
- Paulsson-Tralla, J., 2005b. Gamla Årstabron, Skadeinventering av betongvalvens undersidor september – november 2005. *Rapport 7115500:F.*