



LUND
UNIVERSITY



ANALYS AV PLATTRAMBROAR MED KRÖKTA RAMBEN

FRIDA HULT

Structural
Mechanics

Master's Dissertation

Department of Construction Sciences
Structural Mechanics

ISRN LUTVDG/TVSM--11/5180--SE (1-101)
ISSN 0281-6679

ANALYS AV PLATTRAMBROAR MED KRÖKTA RAMBEN

Master's Dissertation by
FRIDA HULT

Supervisors:

Kent Persson, *PhD*,
Div. of Structural Mechanics

Tore Nilsson och Fredrik Carlsson,
Brosys AB, Malmö

Examiner:

Per Johan Gustafsson, *Professor*,
Div. of Structural Mechanics

Copyright © 2011 by Structural Mechanics, LTH, Sweden.
Printed by Media-Tryck LU, Lund, Sweden, October 2011 (*PJ*).

For information, address:
Division of Structural Mechanics, LTH, Lund University, Box 118, SE-221 00 Lund, Sweden.
Homepage: <http://www.byggmek.lth.se>

Symboler

Latinska versaler

B	Bredd
E_{cm}	Sekantvärde för betongs elasticitetsmodul
L	Spännvidd
K_0	Viljordtryckskoefficient
T_0	Initial temperatur
$T_{e,max}$	Maximal jämnt fördelad temperaturkomponent
$T_{e,min}$	Minimal jämnt fördelad temperaturkomponent
T_{max}	Högsta lufttemperatur, den temperatur som med sannolikheten 0,02 överstigs en gång per år
T_{min}	Minsta lufttemperatur, den temperatur som med sannolikheten 0,02 understigs en gång per år
ΔT_{cool}	Temperaturändring vid avkylning
ΔT_{heat}	Temperaturändring vid uppvärmning
$\Delta T_{N,con}$	Maximal temperaturkomponent som ger upphov till förkortning
$\Delta T_{N,exp}$	Maximal temperaturkomponent som ger upphov till förlängning
OCR	Överkonsolideringsgrad
Q_k	Karakteristisk axellast
Q_{lk}	Karakteristiskt värde på broms- och accelerationskraft

Symboler

Q_{trk}	Karakteristiskt värde på sidokraft av broms- och accelerationskraft
R	Radie

Latinska gemener

f_{ck}	Betongs karakteristiska tryckhållfasthet (efter 28 dagar)
k_0	Konstruktionens fiktiva höjd
k_h	Koefficient som beror på konstruktionens fiktiva höjd
k_{sur}	Korrektionsfaktor för temperaturändring vid annan beläggningstjocklek än 50 mm
z	Nivå under markytan
$p(z)$	Viljordtryck vid nivå z
p_t	Ökat jordtryck till följd av överlast
q_k	Karakteristiskt värde på utbredd last från trafik

Grekska bokstäver

α	Nationell anpassningsfaktor för trafiklast
γ	Materials tunghet
γ_d	Partialkoefficient som beror av säkerhetsklass, används vid lastkombinering
δ_h	Horisontal stödförskjutning
δ_v	Vertikal stödförskjutning
ε_{ca}	Autogen slutkrympning
ε_{cd}	Slutvärde på uttorkningskrympning
$\varepsilon_{cd,0}$	Nominellt värde på uttorkningskrympning
ε_{cs}	Total krympning
φ'	Friktionsvinkel för jordmaterial
ν	Poissons tal
ψ_0	Faktor för kombinationsvärde för variabel last

Sammanfattning

En av Sveriges vanligaste brotyper är plattrambro. Det som kännetecknar denna brotyp är att den gjuts utan lager och övergångskonstruktioner. Fördelen med konstruktionen är att horisontala krafter kan tas upp genom ramverkan. Ett problem är tvångskrafter som bland annat uppkommer på grund av temperaturförändringar. Plattrambroar har i större utsträckning börjat utformas med i horisontal krökta ramben. Detta görs för att de upplevs som tryggare då krökningen möjliggör större ljusinsläpp. Broarna ska numera beräknas tredimensionellt vilket medför att effekten av tvångskrafterna blir större. Syftet med detta examensarbete var att fastställa grundläggande skillnader i verkningssätt mellan plattrambroar med raka respektive krökta ramben genom finita elementmodellering. Laster som har negativ effekt då rambenen kröks har identifierats och hur snittkrafter i bron påverkas av dess geometri har utretts. Vidare studerades hur spänningsfördelningen påverkades av rambenens krökningsradie för dimensionerande laster och modellering av grundinfästningen.

Permanent laster som har ingått i analyserna var egentygnd, vilojordtryck, stödförskjutning samt krympning. Variabla laster som behandlades var trafik-, broms- och temperaturlaster samt ökat jordtryck. Ökat jordtryck kan uppkomma då fordon är placerade utanför bron samt på grund av rörelser i bron. Lastkombinering som användes var STR-A och STR-B.

Analys genomfördes i det generella finita elementprogrammet BRIGADE/plus. Finita elementmetoden är en numerisk beräkningsmetod som ger approximativa lösningar.

För att identifiera laster som har ogynnsam effekt då rambenen kröks jämfördes snittkrafter genererade av ovanstående grundlastfall för en plattrambro med raka respektive krökta ramben. Laster som konstaterades ha störst effekt på snittkrafterna då rambenen kröks är krympning och temperaturlaster.

Studier av hur bronns geometri inverkar på snittkrafterna gjordes också. Detta gjordes för det mest ogynnsamma grundlastfallet som konstaterades vara krympning. Vid minskad krökningsradie ökade snittkrafternas storlek. Det konstaterades även att olika längd- och breddförhållande på brobanan påverkar snittkrafternas storlek. Snittkrafter som påverkades mest då rambenen kröks var normalkrafterna i båda riktningarna.

Spänningsfördelningen i broar som belastades med dimensionerande laster i brottgränstillstånd undersöktes. Detta gjordes genom att belasta bromodeller med olika krökningsradier och sedan undersöktes skillnader i snittkrafter och spänning. Minskad radie gav större spänning.

Brons grundinfästning modellerades på fem olika sätt för att utreda hur detta påverkade spänningsfördelningen vid infästningen. Modelleringsätt som studerades var fast inspänning, låsning i cylindriskt koordinatsystem, låsning i en balk utan stångverkan, modellering av hela grundplattan samt modellering av grundplattan som en balk. Modelleringsstrategin med fast inspänning gav klart störst spänning.

Denna studie belyste några problem som kan uppkomma då plattrambroar utformas med krökta rambenen. Det har visats att trots problem med ökade spänningar som uppkom i bron var de till synes hanterbara.

Abstract

One of the most common types of bridges in Sweden is the integral bridge. What characterizes the integral bridge is the lack of bearings and expansion joints. The advantage of this construction is that the horizontal forces can be distributed throughout the structure. A problem is the restraint forces that occur due to, for instance, changes in temperature. Integral bridges are now often designed with horizontally curved abutment walls. This is because they are perceived as safer as this enables more light. These bridges should be analyzed three dimensionally and this increases the effect of the restraint forces. The aim of this study was to establish basic differences between integral bridges with straight respectively curved abutment walls through finite element analysis. Loads which have negative effect on the section forces have been identified. How the geometrical properties on bridges affects the section forces have been investigated, and different ways of modeling the ground attachment have been examined.

This study has included the permanent loads, self-weight, earth pressure, support displacement and shrinkage. The included variable loads was traffic load, break-and acceleration force, different temperature loads, increased earth pressure due to overload and due to movement of the construction. The load combinations described are STR-A and STR-B.

Analyses were carried out in a finite element program called BRIGADE/plus. The finite element method is a numerical calculation which gives approximate results.

To identify the loads with negative effect, sections forces in an integral bridge with straight abutment walls was compared with the section forces for an integral bridge with curved abutment walls. The loads which have been found to have negative effect were temperature loads and shrinkage.

Thereafter the bridges geometrical impact on the section forces from the shrinkage was analyzed. Shrinkage had been found to have the most negative effect on the section forces. With reduced curvature radius increases the section forces. It is also found that the ratio between width and length affects the section forces. The section forces that were affected most by the curvature of the abutment walls were the normal forces in both directions.

The stress distributions in bridges exposed to ultimate state loads was examined. Bridges with different curvature radius were analyzed and differences between the stresses was investigated. Differences in the stress distribution when the abutment walls were designed with a curvature are found compared to straight abutment walls. Decreasing radius resulted in increasing stresses.

The ground attachment was modeled in five different ways to investigate how this affects the stress distribution. The different methods is; fixed supports, fixed in a cylindrical coordinate system, fixed in a girder without the capacity to resist normal force, modeling of the ground slabs and modeling the ground slab with a girder. The strategy with fixed supports resulted in largest stresses.

This study illustrated some problems that occur when an integral bridge is designed with curved abutment walls. Stress levels increases but was seemingly manageable.

Förord

Detta examensarbete har skrivits som avslutning på mina studier till Civilingenjör i Väg- och Vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola. Arbetet har pågått under våren och sommaren 2011. Examensarbetet är utfört på Brosys AB i Malmö, i samarbete med avdelningen för Byggnadsmekanik.

Jag vill rikta ett tack till alla mina handledare; Fredrik Carlsson, Tore Nilsson och Kent Persson för deras kunskap och tålmod. Ett särskilt tack riktar jag till Folke Nilsson och Jill Gjørstrup för deras hjälp.

Jag vill även tacka min sambo, Christian Antonius, min familj och vänner som varit till stort stöd under hela utbildningens gång.

Malmö, augusti 2011

Frida Hult

Innehåll

Symboler	i
Sammanfattning	v
Abstract	vii
Förord	ix
1. Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte.....	3
1.3 Metod.....	3
1.4 Avgränsning	4
1.5 Definitioner	4
1.6 Rapportdisposition.....	5
2. Brolaster och lastkombinering	7
2.1 Permanenta laster	7
2.1.1 Egentyngd	7
2.1.2 Vilojordtryck.....	7
2.1.3 Stödförskjutning.....	8
2.1.4 Krympning	9
2.2 Variabla laster.....	10
2.2.1 Trafiklast.....	10
2.2.2 Broms- och accelerationslast	12
2.2.3 Temperaturlast	12
2.2.4 Ökat jordtryck till följd av överlast.....	14
2.2.5 Ökat jordtryck till följd av konstruktionsdelars rörelse	15
2.3 Lastkombinering.....	16

3. Finta elementmetoden och BRIGADE/plus	19
3.1 Finita elementmetoden, (FEM)	19
3.2 BRIGADE/plus	20
3.2.1 Utförda beräkningar i BRIGADE/plus	21
4. Identifiering av laster med ogynnsam effekt på snittkrafter storlek vid krökta ramben	23
4.1 Broars geometri	23
4.2 Material	24
4.3 Laster	25
4.4 Modellering	28
4.5 Resultat	29
4.6 Fastställning av laster med ogynnsam effekt på snittkrafter storlek.....	41
5. Brogeometrins inverkan på snittkrafter storlek	43
5.1 Rambenens krökningsradie	43
5.1.1 Studerade broars geometrier	43
5.1.2 Modellering.....	44
5.1.3 Resultat	44
5.1.4 Diskussion av resultat	52
5.2 Förhållande mellan bobaneplattans längd och bredd	52
5.2.1 Metod	53
5.2.2 Resultat	54
5.2.3 Diskussion av resultat	56
5.3 Slutsats.....	56
6. Spänningsfördelning för dimensionerande laster	57
6.1 Broars geometri	57
6.2 Laster	57
6.3 Lastgrupper och lastkombinering	58
6.4 Resultat	58

6.5 Slutsats.....	60
7. Modellering av grundinfästning	61
7.1 Cylindriskt koordinatsystem.....	61
7.1.1 Metod.....	62
7.1.2 Resultat	62
7.1.3. Diskussion av resultat	64
7.2 Balk utan stångverkan	64
7.2.1 Metod.....	64
7.2.2 Resultat	66
7.2.3. Diskussion av resultat	66
7.3 Grundplatta.....	66
7.3.1 Metod.....	67
7.3.2 Resultat	68
7.3.3. Diskussion av resultat	69
7.4 Grundplattan som balk	69
7.4.1 Metod.....	69
7.4.2 Resultat	70
7.4.3 Diskussion av resultat	70
7.5 Jämförelse mellan olika metoder.....	70
7.6 Slutsats.....	71
8. Slutsatser	73
Referenser	75
Appendix	77
A - Resultat plattrambro med raka ramben	79
B - Resultat plattrambro med krökta ramben	87

Kapitel 1

Introduktion

Syftet med kapitlet är att ge en bakgrund till ämnet och presentera arbetets syfte. Metoder beskrivs översiktligt och använda begrepp definieras. Rapportens disposition redovisas.

1.1 Bakgrund

Platrambron är en av Sveriges vanligaste brotyper. Spännvidden är vanligtvis mellan 2 och 25 m. Materialet som används är slakarmerad betong. Fördelar med platrambroar är att horisontala laster kan tas upp genom ramverkan. Maximala moment av vertikala laster blir följaktligen mindre då dessa fördelas till både fält och stöd. Jordtrycket vid rambenen tas till viss del upp som normalkraft i brobanepattan. Konstruktionen är relativt billig då lager och övergångskonstruktioner inte behövs. Nackdelen är att vid större spännvidd blir konstruktionen tung och kräver mycket armering, vilket kan medföra högre grundläggningskostnader. Konstruktionen är statiskt obestämd vilket innebär att det behövs både jämviktsekvationer och deformationssamband för att bestämma kraftfördelningen. Tvångskrafter kan uppstå då en konstruktion vid belastning är förhindrad att röra sig. Tvångskrafter i platrambroar uppkommer på grund av krympning, temperaturförändringar och stödförskjutningar (Sundquist 2000).

Platrambroar har numera i allt större utsträckning börjat utformats med i horisontalled krökta ramben. Detta görs då denna brotyp upplevs som tryggare av fotgängare och cyklister eftersom krökningen möjliggör större ljusinsläpp. Problem som uppstår vid dimensioneringen av dessa broar är att de krökta rambenen ger upphov till större tvångskrafter än platrambroar med raka ramben. I Figur 1-1 respektive 1-2 visas platrambroar med raka respektive krökta ramben.



Figur 1-1 Plattrambro med raka ramben (BaTMan)



Figur 1-2 Plattrambro med krökta ramben (Brosys AB)

Snittkrafter i plattrambroar med krökta ramben har tidigare analyserats tvådimensionellt. Bron har delats upp i strimlor med olika spännvidd. Utifrån dessa har armeringsbehovet interpolerats fram. Broarna skall numera analyseras tredimensionellt för att få med inverkan av rambenens krökning. Det innebär att större effekter på snittkrafternas storlek fås av tvångskrafterna jämfört med den tvådimensionella analysen. Idag saknar branschen riktlinjer för hur denna brotyp skall behandlas.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet var att:

- Fastställa grundläggande skillnader i verkningsätt mellan plattrambroar med raka respektive krökta ramben genom tredimensionell finita elementmodellering.
- Identifiera vilka laster som ger störst inverkan på snittkrafterna då rambenen utformas krökta.
- Utreda hur snittkrafter i bron påverkas av geometriska parametrar (längd och bredd på brobanan samt krökningsradien på rambenen).
- Utreda hur spänningsfördelningen vid lastkombinering påverkas då rambenen utformas krökta
- Undersöka hur en elastisk modellering av grundinfästningen påverkar tvångskrafterna i bron och hur detta elastiska randvillkor kan modelleras.

1.3 Metod

För att identifiera laster som ger ökade snittkrafter då rambenen kröks jämfördes en ordinär plattrambro med en med krökta ramben. Lasterna som identifierades på detta sätt användes för att studera hur snittkrafterna påverkades då geometriska parametrar varierades.

Analyserna av hur snittkrafterna påverkades av geometriska parametrar genomfördes som en parameterstudie. De undersökta geometriska parametrarna var; förhållandet mellan brons längd och bredd, L/B samt olika krökningsradier, R för rambenen.

Spänningarnas fördelning beroende av krökningsradien vid lastkombinering undersöktes. Detta gjordes genom att analysera olika broar med varierande krökningsradie.

Olika strategier för att modellera grundinfästningen studerades också. Detta gjordes för att kunna minska effekterna av tvångskrafterna som uppkommer i bron då rambenen modelleras som fast inspända.

Analyser genomfördes i finita elementprogrammet BRIGADE/plus, version 3.1-1 som är utvecklat av Scanscot Technology AB och bygger på Abaqus/CAE version 6.8, utvecklat av Dassault Systèmes Simulia Corp.

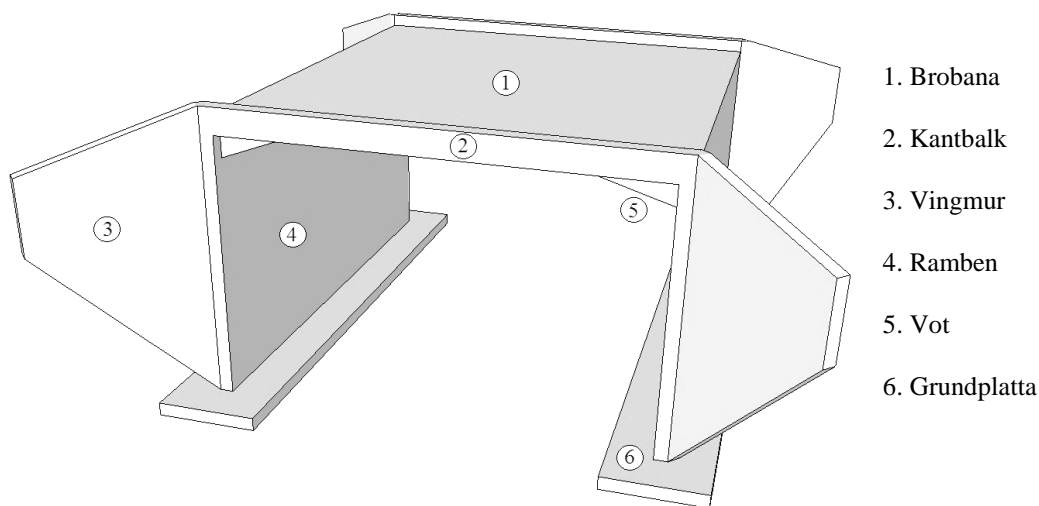
1.4 Avgränsning

Studien behandlade endast öppna plattrambroar i ett fack utan voter. Följande avgränsningar har gjorts:

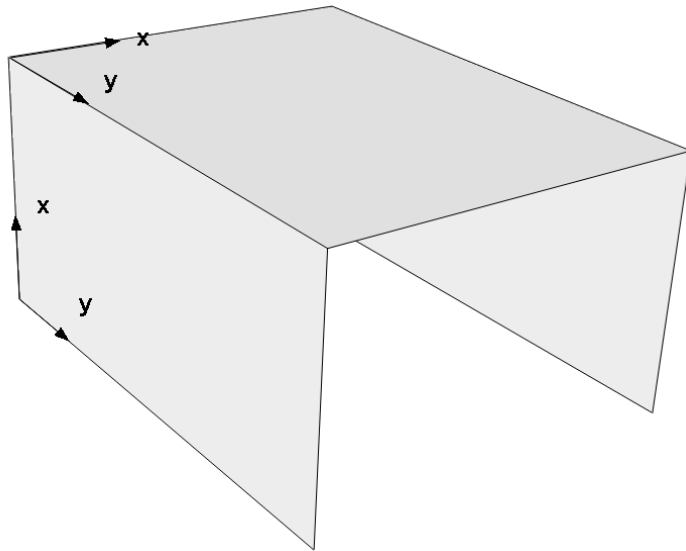
- Betongkvalitet C55
- Ingen hänsyn togs till att armeringen påverkar styvheten
- Broarna ansågs ospruckna, stadium 1
- Ingen hänsyn togs till grundvattentryck
- Broarna analyserades enligt linjärelastisk teori
- Snö-, vind-, olycks- samt utmattningslast beaktades ej
- Lastkombinering genomfördes endast i brottgränstillståndet

1.5 Definitioner

I Figur 1-3 anges definitioner av bronns beståndsdelar som användes i rapporten. Materialriktningar som används i rapporten definieras i Figur 1-4.



Figur 1-3 Brons beståndsdelar



Figur 1-4 Använda materialriktningar

Moment i x-led, M_x är således moment kring x-axeln. Moment kring y-axeln betecknas M_y .

1.6 Rapportdisposition

Kapitel 1 Inledning: Bakgrunden till ämnet beskrevs. Frågeställningar, syften och mål med arbetet presenterades. Vidare gjordes en begreppsbeskrivning.

Kapitel 2 Broaster och lastkombinering: Aktuella laster enligt gällande normer för broar samt lastkombinering beskrevs.

Kapitel 3 Finita elementmetoden och BRIGADE/plus: Finita elementmetoden beskrevs översiktligt och beräkningsprogrammet presenterades och beskrevs.

Kapitel 4 Identifiering av laster med ogynnsam effekt på snittkrafters storlek vid krökta ramben: Viktiga laster identifierades. Syftet var att fastställa vilka laster som har negativ effekt på snittkrafterna då rambenen utformades med radie. Metod samt geometrier på broarna som analyserades redovisades. Utifrån analyser i detta kapitel valdes laster ut som sedan används i kommande kapitel.

Kapitel 5 Brogeometrins inverkan på snittkrafters storlek: Samband mellan snittkrafters storlek och geometriska parametrar studerades. Detta undersöktes genom att variera krökningsradien på rambenen samt förhållandet mellan brobanans längd och bredd. Funna samband sammanställdes och redovisades.

Kapitel 6 Spänningsfördelning för dimensionerande laster: Dimensionerande lasters inverkan på spänningsfördelningen studerades.

Kapitel 7 Modellering av grundinfästning: Olika metoder för att modellera grundinfästningen redovisades. Metoderna beskrevs och jämfördes.

Kapitel 8 Slutsatser: Slutsatser från studien sammanfattades och förslag gavs till fortsatt arbete.

Kapitel 2

Brolaster och lastkombinering

I detta kapitel beskrivs brolaster samt lastkombinering som användes i rapporten. Dessa beräknades enligt Eurocode (SS-EN 1990-1997). Först beskrivs permanenta laster och därefter variabla laster. Laster som togs upp och beskrivs var:

- *Egentyngd*
- *Viljordtryck*
- *Stödförskjutning*
- *Krympning*
- *Trafiklast*
- *Broms- och accelerationslast*
- *Temperaturlaster*
- *Ökat jordtryck till följd av överlast*
- *Ökat jordtryck till följd av konstruktionsdelars rörelse*

Lastkombinering enligt STR-A samt STR-B beskrivs.

2.1 Permanenta laster

2.1.1 Egentyngd

Egentyngd för ingående delar bestäms enligt SS-EN 1991-1-1 Bilaga A.

2.1.2 Viljordtryck

Viljordtryck, $p(z)$ bestäms enligt SS-EN 1997-1, avsnitt 9.5.2. För friktionsjord utan inverkan av grundvatten beräknas viljordtrycket enligt ekvation 2.1 respektive 2.2.

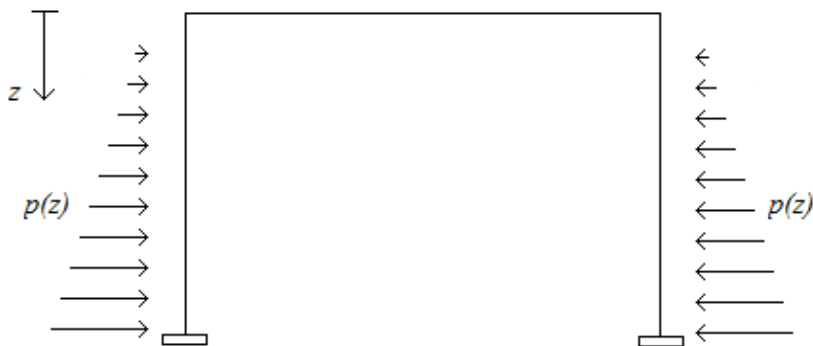
$$p(z) = K_0 \cdot z \cdot \gamma \quad (2.1)$$

$$K_0 = (1 - \sin\varphi') \cdot \sqrt{OCR} \quad (2.2)$$

där:

- K_0 vilojordtryckskoefficient
- z nivå under markytan, i m
- γ jordmateriallets tunghet
- φ' friktionsvinkel för jordmaterial
- OCR överkonsolideringsgrad

K_0 betecknar förhållandet mellan vertikal- och horisontalspänning då ingen rörelse existerar. OCR är överkonsolideringsgrad, det vill säga förhållandet mellan förkonsolideringstryck och rådande effektivspänningar. Jordtryckets verkningsätt visas i Figur 2.1-1.

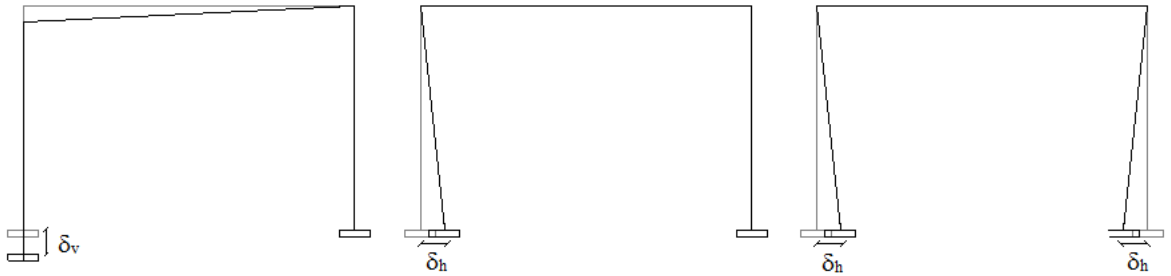


Figur 2.1 -1 Verkan av vilojordtryck

2.1.3 Stödförskjutning

Broar med stöd som inte är grundlagda på berg ska dimensioneras för vertikala och horisontala stödförskjutningar. Stödförskjutningarna ska kombineras på ogynnsammaste sätt. Dock behöver inte samtidig vertikal och horisontal stödförskjutning beaktas. Vid vertikala stödförskjutningar, δ_v skall en partialkoefficient, $\gamma_{Rd} = 1,3$ som beror av modellens osäkerhet användas enligt TK Bro (2009) för att förstora sättningarna. Horisontala stödförskjutningar, δ_h skall baseras på verkliga grundläggningsförhållanden.

Enligt SS-EN 1997-1, Bilaga H *Gränsvärden för bärverksdeformationer och fundamentrörelse*, ska den maximala rotationen ligga mellan 1/2000 och 1/300. Möjliga kombinationer av stödförskjutningar visas i Figur 2.1-2.



Figur 2.1 -2 Kombinationer av stödförskjutningar

2.1.4 Krympning

Betongkrympning är en lastoberoende deformation som består av två delar, uttorkningskrympning och autogen krympning. Uttorkningskrympning uppkommer på grund av vattenavgång och utbildas under lång tid. Den andra delen, autogen krympning, uppstår på grund av kemiska reaktioner som uppkommer vid betongens hårdnande. Denna deformation uppkommer under de första dagarna. Slutkrympningen skall beräknas vid RH 80 %.

Enligt SS-EN 1992-1-1, avsnitt 3.1.4 beräknas den totala krympningen, ε_{cs} enligt ekvation 2.3.

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{ca} + \varepsilon_{cd} \quad (2.3)$$

Där ε_{ca} och ε_{cd} är autogen- respektive uttorkningssslutkrympning och beräknas enligt ekvation 2.4 respektive 2.5.

$$\varepsilon_{ca} = 2,5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} \quad (2.4)$$

där f_{ck} är karakteristisk tryckhållfasthet.

$$\varepsilon_{cd} = k_h \cdot \varepsilon_{cd,0} \quad (2.5)$$

där ε_{0} är nominellt värde på uttorkningskrympningen. k_h är en korrektionsfaktor som beror på konstruktionens fiktiva höjd och kompenserar för annan höjd än 100 mm. Värden på k_h redovisas enligt Tabell 2-1.

Tabell 2-1. Värden på k_h enligt SS-EN-1991-1

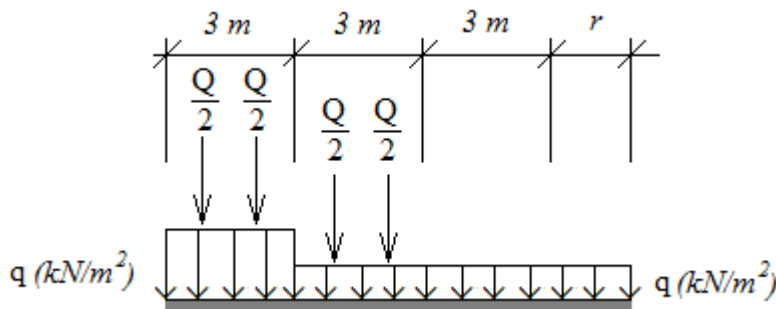
k_0 [mm]	k_h
100	1,0
200	0,85
300	0,75
≥ 500	0,7

Var krympningen uppkommer beror på placering av gjutfogar.

2.2 Variabla laster

2.2.1 Trafiklast

Trafiklaster beskrivs i SS-EN 1991-2 avsnitt 4.3.1. Bron delas in i lastfält med bredden 3 m. Lastfälten placeras så att den mest ogynnsamma verkan erhålls. Lastmodell 1, som används för beräkningar av lokala och globala effekter, består av två delsystem, en lastgrupp i form av punktlaster och en som består av utbredda laster. Lastmodellen i brons tvärriktning visas nedan i Figur 2.2-1.



Figur 2.2 -1 Lastmodell 1

där:

- r återstående yta som inte innefattas av lastfält
- Q axellaster som verkar som en koncentrerad last
- q utbredda laster som varierar vid olika lastfält

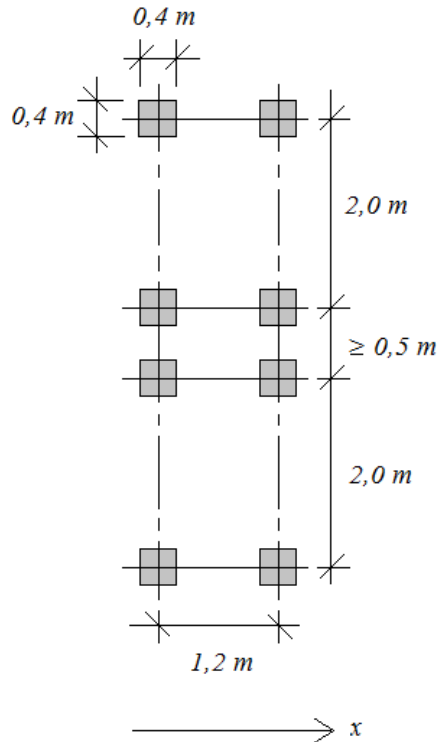
Karakteristiska värden på axellaster, Q_k ska multipliceras med en nationell anpassningsfaktor, α . Detta beskrivs i uttryck 2.6

$$\alpha_Q Q_k \quad (2.6)$$

där:

- α_Q nationell anpassningsfaktor med värde enligt Tabell 2-2
- Q_k karakteristisk axellast

Laster för en boggie utgörs av två axellaster. Axellasterna i boggie verkar på ytor som symboliserar hjul. Båda hjulen i boggien har samma axellast. Kontaktytan för vardera hjulet är en kvadrat med sidan 0,4 m. Hjulen sitter 2 respektive 1,2 meter ifrån varandra, se Figur 2.2-2.



Figur 2.2-2 Boggiesystem för lastmodell 1, där x betecknar färdriktningen

Den andra delen i lastmodell 1 består av utbredda laster. Jämn utbredd last per kvadratmeter lastfält beskrivs i uttryck 2.7.

$$\alpha_q q_k \quad (2.7)$$

där:

α_q nationell anpassningsfaktor

q_k karakteristisk utbredd last

En sammanställning av trafiklaster redovisas i Tabell 2-2.

Tabell 2-2 Lastmodell 1: karakteristiska värden samt anpassningsfaktorer

Läge	Boggisystem Axellast Q_{ik} [kN]	Anpassningsfaktor α_{Qi}	Utbredd last q_{ik} [kN/m ²]	Anpassningsfaktor α_{qi}
Lastfält 1	300	0,9	9	0,7
Lastfält 2	200	0,9	2,5	1,0
Lastfält 3	100	0	2,5	1,0
Övriga lastfält	0	-	2,5	1,0
Återstående yta	0	-	2,5	1,0

Karakteristiska laster erhålls utifrån SS-EN 1991-2 och nationella värden på anpassningsfaktorerna, α enligt VVFS 2009:19.

2.2.2 Broms- och accelerationslast

Broms- och accelerationslast bestäms enligt SS-EN 1991-2, avsnitt 4.4.1. Den horisontella kraft, Q_{lk} som uppkommer av bromsande och accelererande fordon på brobanan beräknas enligt ekvation 2.8 med tillägg från ekvation 2.9 nedan.

$$Q_{lk} = 0,6\alpha_{Q1}(2Q_{1k}) + 0,1\alpha_{q1}q_{1k}w_1L_f \quad (2.8)$$

$$180\alpha_{Qi}(kN) \leq Q_{lk} \leq 900(kN) \quad (2.9)$$

där:

Q_{lk} karakteristiskt värde på broms- och accelerationskraft

α_{Q1} nationell anpassningsfaktor

w_i lastfältsbredd

L_f lastfältslängd

Accelerationskraften anses vara lika stor som bromskraften men motriktad. Båda lasterna är riktade horisontellt i broms längdriktning.

Sidokrafter från inbromsning bestäms enligt SS-EN 1991-2 avsnitt 4.4.2. En sidokraft kan uppkomma från sned inbromsning eller sladd och ska därför beaktas. Bromskraften i sidled, Q_{trk} är 25 % av broms- eller accelerationskraften och angriper samtidigt med denna. En centrifugalkraft behöver även beaktas om brobanan är krökt i horisontalled.

2.2.3 Temperaturlast

Temperaturlast definieras som den last på ett bärverk eller en bärverksdel som orsakas av ändringar i temperatur inom ett tidsintervall och klassas som en variabel indirekt last. Relevanta lastkomponenter som skall tas hänsyn till i detta

fall är jämnt fördelade temperaturkomponenter samt linjära temperaturskillnader.

Brons längdutvidgning samt förkortning är beroende av den initiala temperaturen T_0 , med andra ord temperaturen vid gjutning. Denna temperatur sätts normalt till 10°C. Temperaturhöjningen som orsakar längdutvidgningen ges av ekvation 2.10.

$$\Delta T_{N,exp} = T_{e,max} - T_0 \quad (2.10)$$

Temperaturminskningen som ger upphov till längdkontraktion beskrivs av ekvation 2.11 nedan.

$$\Delta T_{N,con} = T_0 - T_{e,min} \quad (2.11)$$

Där $T_{e,max}$ och $T_{e,min}$ beror av konstruktionens geografiska placering samt typ av konstruktion. Detta bestäms enligt SS-EN-1991-1-5 avsnitt 6.1.3.1.

Temperaturskillnader, det vill säga uppvärmning och nedkylning av broöverbyggnadens yta kommer leda till att temperaturen varierar mellan brobanans övre och undre sida. Detta kan ge upphov till tvångskrafter då brobanepattan är förhindrad att kröka. En vertikal, linjär temperaturskillnad används enligt SS-EN 1991-1-5 avsnitt 6.1.4.1. En temperatur sätts på broöverbyggnadens ovansida och en annan på undersidan och temperaturen varierar linjärt mellan dessa. Temperaturskillnad vid uppvärmning, ΔT_{heat} och nedkylning ΔT_{cool} , bestäms enligt SS-EN 1991-1-5 Tabell 6.1. Dessa värden skall modifieras med faktorn k_{sur} om annan beläggningstjocklek än 50 mm används enligt SS-EN 1991-1-5 Tabell 6.2. Detta görs enligt ekvation 2.12 respektive 2.13 nedan.

$$\Delta T_{heat} \cdot k_{sur,heat} \quad (2.12)$$

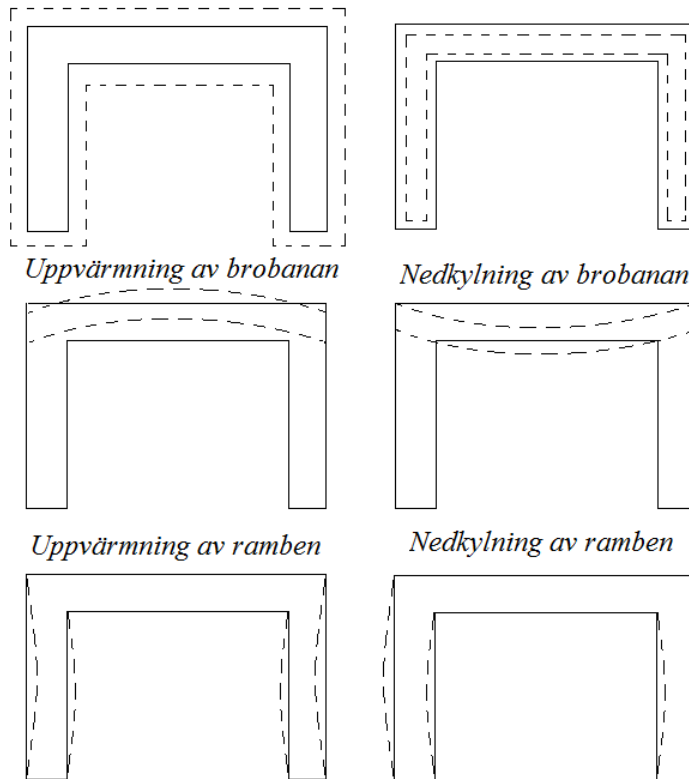
$$\Delta T_{cool} \cdot k_{sur,cool} \quad (2.13)$$

Denna temperaturdifferens appliceras som linjärt varierande på brobanan.

Enligt 1991-1-5 avsnitt 6.2.2 bör även temperaturskillnader på rambenen beaktas. Dessa skillnader bör föreskrivas till 15 °C. Detta medför att insidan på rambenen kan vara 15 °C varmare eller kallare än utsidan.

En sammanställning av de olika temperaturlasterna visas i Figur 2.2-3 nedan, där de streckade linjerna visar brodelarnas rörelse på grund av temperaturförändringen.

Jämnt utbredd temperaturhöjning Jämnt utbredd temperatursänkning



Figur 2.2-3 Temperaturlastfall med streckade konstruktionsrörelser

2.2.4 Ökat jordtryck till följd av överlast

Ökat jordtryck, p_t till följd av överlast uppkommer då fordon står utanför brobanan, intill rambenet. Det ökande jordtrycket beräknas enligt ekvation 2.14 respektive 2.15.

$$p_t = K_0 \cdot q_{eq} \quad (2.14)$$

$$q_{eq} = \frac{\alpha_{Q1} Q_{1k}}{2,2 \cdot 3} + \alpha_{q1} q_{1k} \quad (2.15)$$

där:

q_{eq} ekvivalent utbredd last på vägbank, denna är beroende av aktuell last, se ekvationerna 2.6 och 2.7.

α_{Q1} , Q_{1k} , α_{q1} samt q_{1k} är faktorer som beskriver trafiklast och redovisas i stycke 2.2.1.

Den dimensionerande boggielasten förutsätts verka på en rektangulär yta med bredden 3,0 m och längden 2,2 m enligt SS-EN 1991-2 avsnitt 4.9.1. Fördelningen av det ökade jordtrycket visas nedan i Figur 2.2-4. Detta ökade jordtryck kan verka på ett eller båda rambenen.



Figur 2.2-4 Ökat jordtryck från överlast

2.2.5 Ökat jordtryck till följd av konstruktionsdelars rörelse

Enligt SS-EN 1997-1, avsnitt 9.5.2 skall ökat jordtryck till följd av konstruktionsdelars rörelser beaktas. Vilojordtrycket bör användas om konstruktionsrörelsen understiger $5 \cdot 10^{-4} \cdot h$ m. Där h är konstruktionens systemhöjd, se Figur 2.2-5.



Figur 2.2-5. Definition av konstruktionens systemhöjd, h

2.3 Lastkombinering

I brottgränstillstånd kombineras lasterna enligt SS-EN-1990 avsnitt A1.3. Lastkombinationer som kan användas är STR-A eller STR-B och beräknas enligt Tabell 2-3 och Tabell 2-4.

Tabell 2-3 Lastkombination STR-A

Last	Partialkoefficient, ogynnsam	Partialkoefficient, gynnsam
Permanent		
Egentyngd	$\gamma_d \cdot 1,35$	1,0
Viljordtryck	$\gamma_d \cdot 1,35$	1,0
Stödförskjutning	$\gamma_d \cdot 1,35$	0
Variabel		
Huvudlast	$\gamma_d \cdot 1,50 \cdot \psi_0$	0
Övriga laster	$\gamma_d \cdot 1,50 \cdot \psi_0$	0

Tabell 2-4 Lastkombination STR-B

Last	Partialkoefficient, ogynnsam	Partialkoefficient, gynnsam
Permanent		
Egentyngd	$\gamma_d \cdot 1,20$	1,0
Viljordtryck	$\gamma_d \cdot 1,20$	1,0
Stödförskjutning	$\gamma_d \cdot 1,20$	0
Variabel		
Huvudlast	$\gamma_d \cdot 1,50$	0
Övriga laster	$\gamma_d \cdot 1,50 \cdot \psi_0$	0

där:

γ_d partielkoefficient som beror av säkerhetsklass

ψ_0 faktor för kombinationsvärde för variabel last

För broar används vanligtvis säkerhetsklass 3 vilket innebär att $\gamma_d = 1,0$. Den lastkombination som är mest ogynnsam skall väljas. Lastkombination STR-A är vanligen dimensionerande om konstruktionens har stor egentyngd. I övriga fall är STR-B dimensionerande. Värdet för ψ_0 redovisas i Tabell 2-5.

Tabell 2-5 Värden för ψ_0

Last	ψ_0
Trafik, boggie	0,75
Trafik, utbredd	0,40
Broms-och acceleration	0
Temperatur	0,6
Överlast	0,75

Värdena för ψ_0 fås av SS-EN 1990, bilaga A. I avsaknad av ψ_0 -värde för överlast används samma värde som för boggielast då överlast uppkommer på grund av trafik utanför bron.

Kapitel 3

Finita elementmetoden och BRIGADE/plus

I detta kapitel ges en kort beskrivning av finita elementmetoden och beräkningsprogrammet BRIGADE/plus som använts i analyserna. Analyserna gödes för att beräkna snittkrafter, spänningar och förskjutningar. För mer information om finita elementmetoden, se Ottosen och Petersson (1992).

3.1 Finita elementmetoden, (FEM)

Ingenjörsmässiga beräkningsproblem är ofta så komplicerade att de är mycket svåra att lösa med analytiska metoder. FEM möjliggör en numerisk lösning av differentialekvationer. Differentialekvationerna beskriver spänningsproblemet i ett område som kan vara en-, två- eller tredimensionellt. Det som karakteriserar FEM är att kroppen som skall analyseras delas in i små delområden. Över dessa små delområden kan relativt enkla approximationer göras som ger god noggrannhet även om kroppen som helhet kan ha mycket olinjära egenskaper och komplicerad geometri. Hörnen i varje delområde kallas noder. Noderna bygger tillsammans upp ett finit elementnät. Valet av elementnätets utseende är viktigt för att få en exakt lösning, Ottosen och Petersson (1992).

FEM är en generell beräkningsmetod som går att använda för olika tillämpningar. Dock är lösningarna ofta komplexa och beräkningsprogram lämpar sig därför för analyserna. FEM-programmet som används för analyser i arbetet heter BRIGADE/plus. BRIGADE/plus är ett generellt FEM-program som är anpassat för analys av broar.

3.2 BRIGADE/plus

BRIGADE/plus är utvecklat av Scanscot Technology AB och bygger på Abaqus/standard och Abaqus/CEA. I detta arbete används version 3.1-1. BRIGADE/plus hanterar både statiska och dynamiska analyser. Programmet liknar till stora delar Abaqus men med vissa tillägg för broanalyser. Vid genomförande av analyser går man igenom programmets olika moduler. Nedan beskrivs de som används för beräkningar i detta arbete.

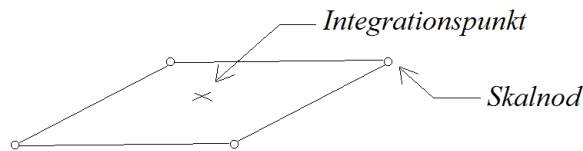
- *Part Module* – Geometrier byggs upp som senare kan tilldelas olika egenskaper. BRIGADE/plus hanterar en mängd olika typer av element, exempelvis solid-, membran- och skalelement.
- *Property Module* – Material- och sektionsegenskaper definieras. Materialegenskaper kan exempelvis vara densitet, Youngs modul och olika temperaturegenskaper. Definierade egenskaper tilldelas de skapade geometrierna.
- *Assembly* – Delar som tidigare skapats sätts samman. Hur de olika delarna ska interagera med varandra bestäms.
- *Step* – Här definieras vilka typer av analys som ska genomföras.
- *Load* – Laster skapas och upplagsvillkor definieras. Lasterna kan vara exempelvis temperaturlaster, punktlaster och utbredda laster.
- *Live Load* – Används för att skapa trafiklast. Trafiklasten kan vara av typen utbredd last, linjelast eller rörliga fordon med valbart antal axlar och axelavstånd. Här finns även möjligheten att importera fordon som beskrivs i olika normer.
- *Mesh* – Formen och storleken på element bestäms och elementnät skapas.
- *Job* – Beräkningsjobb skapas och genomförs.
- *Visualization* – De valda utparametrarna från analysen visas.

Det stora tillägget från Abaqus är modulen *Live Load*. Vid användandet av denna skapas först en yta, vilken trafiklasten ska verka på. För att ange hur trafiken tillåts röra sig på ytan skapas lastlinjer. Trafiken kan då endast belasta linjen centriskt. Det sista steget är att precisera hur trafiklasterna ser ut. Lasten kan vara en utbredd last som verkar över hela ytan, en linjelast som verkar på en trafiklastlinje eller en fordonslast. Fordon med godtyckligt antal axlar och storlek på axellasterna kan definieras av användaren. Möjlighet finns även att importera färdiga fordon som beskrivits i olika normer. Vid analysen låter programmet valda fordon ”köra” över ytan längs trafiklinjerna. Om trafiklastlinjerna placeras närmare varandra än halva fordonsbredden för fordon som skall trafikera dessa ser programmet till att överlappande linjer inte belastas samtidigt. För varje

fordonsposition beräknas största och minsta värden för de valda utparametrarna för varje individuell nodpunkt.

3.2.1 Utförda beräkningar i BRIGADE/plus

Alla broar som i detta arbete analyserats i BRIGADE/plus byggdes upp av skalelement. Reducerad integration används då det dels gör beräkningstiden kortare och kan ge mer korrekta lösningar. FE-lösningar ger ofta för styva lösningar, enligt Ottosen och Petersson (1992). Vid den reducerade integrationen beräknas lösningen för en punkt i mitten av ett skalelement, enligt Figur 3-1, och sedan extrapoleras det beräknade värdet ut till noderna.



Figur 3-1 Skalelement med en integrationspunkt

Skalelement har använts i analyserna och snittkrafterna som beräknats har följande enheter, enligt Dassault Systèmes Simulia Corp.(2010):

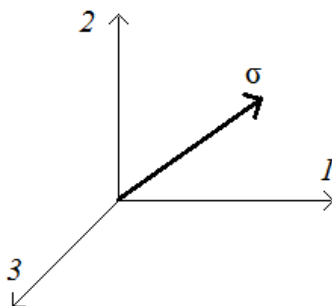
- Normalkraft [N/m]
- Tvärkraft [N/m]
- Skjuvkraft [N/m]
- Moment [Nm/m]

Förutsatt att SI-enheter använts.

Positivt tecken för normalkraft innebär en dragkraft och negativt tecken tryckkraft. Koordinatsystemen i BRIGADE/plus är högerorienterade.

För spänningsberäkningar användes von Mises effektivspänning, σ vilket även kallas ekvivalent spänning. Denna spänning är ett mått på spänningen där alla riktningar sammanvägts och beräknas enligt ekvation 3.1 med riktningssdefinitioner enligt Figur 3-3.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (3.1)$$



Figur 3-3 Definitionsriktningar för von Mises effektivspänning

Kapitel 4

Identifiering av laster med ogynnsam effekt på snittkrafter storlek vid krökta ramben

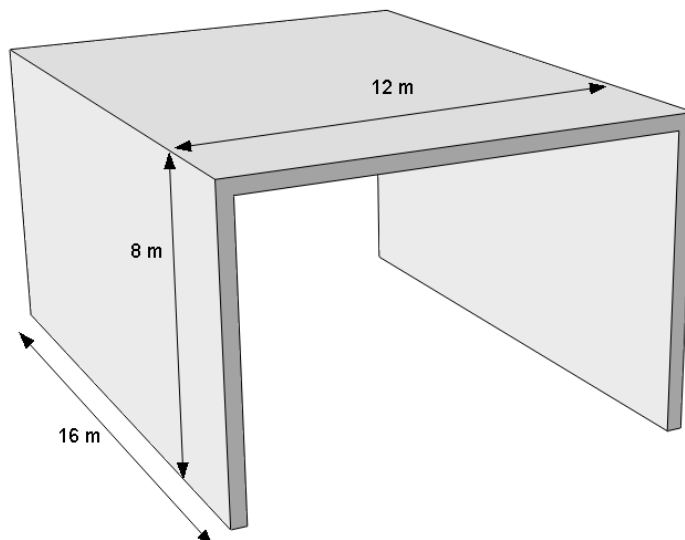
Syftet med arbetet som presenteras i detta kapitel var att identifiera vilka laster som ger ogynnsam effekt på snittkrafterna då rambenen kröks. För broar som analyserats redovisas geometri, ingående materials egenskaper samt använda grundlastfall. En sammanställning av resultaten presenteras och laster valdes ut för fortsatta analyser.

För att identifiera vilka laster som ger upphov till ogynnsam påverkan på snittkrafter då rambenen utformas krökta jämfört med raka applicerades samma laster på två plattrambroar, en med raka och en med krökta ramben, båda av samma material och snarlika geometrier. Mellan de två broarna jämfördes sedan snittkrafter.

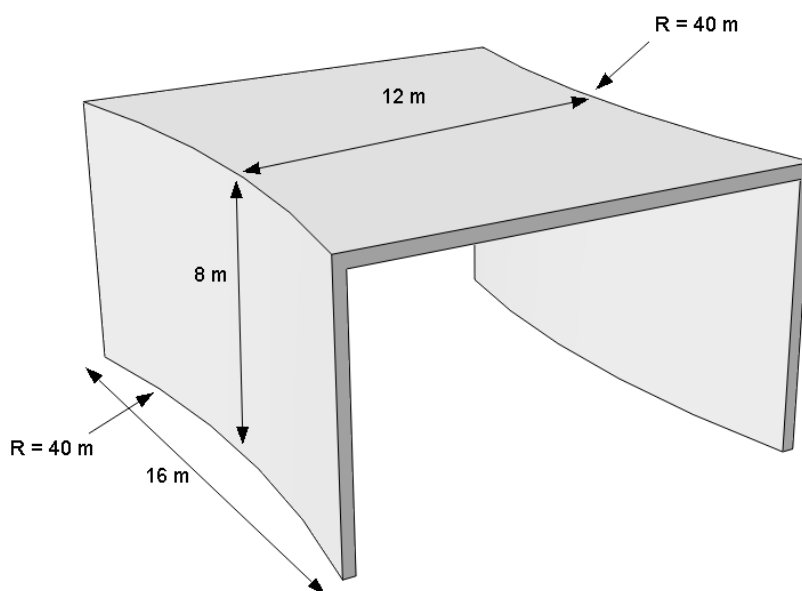
Alla analyser som genomfördes i det finita elementprogrammet BRIGADE/Plus. SI enheter användes.

4.1 Broars geometri

Alla broar som analyserades har höjden 8 m och bredden 16 m. Minsta spännvidd var 12 m. Broarna utformades utan voter och kantbalkar. Tjockleken på brobanepattan och rambenen sattes till 0,4 m och tjockleken på beläggningen till 100 mm. Plattrambroar med raka ramben visas i Figur 4.1-1. Plattrambroar som utformades med krökta ramben hade krökningsradien 40 m och visas i Figur 4.1-2.



Figur 4.1-1 Geometri för plattrambro med raka ramben



Figur 4.1-2 Geometri för plattrambro med krökta ramben

4.2 Material

Broarna bestod av betong med kvalitet C55 vilket enligt SS-EN 1992-1-1 avsnitt 3.1.3 ger ett sekantvärde på elasticitetsmodulen, E_{cm} på 38 GPa. Poissons tal (tvärkontraktionstalet), ν sätts till 0,2 då betongen anses osprucken. Längdutvidgningskoefficienten för betong sätts till $1 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.

4.3 Laster

Egentyngd

För betong med normal ballast inklusive armering är tungheten, $\gamma=25 \text{ kN/m}^3$. Tungheten för vägbeläggning på bron är $\gamma=2,1 \text{ kN/m}^2$. Egentyngden från betongen inkluderas genom en verkande tyngdacceleration. Egentyngden från beläggningen beaktas genom att en utbredd last på $2,1 \text{ kN/m}^2$ föreskrivs brobanan.

Viljordtryck

Viljordtryck, $p(z)$ beräknas enligt ekvation 4.1 där K_0 beräknas enligt ekvation 4.2.

$$p(z) = K_0 \cdot z \cdot \gamma \quad (4.1)$$

$$K_0 = (1 - \sin\varphi') \cdot \sqrt{OCR} \quad (4.2)$$

där:

φ' friktionsvinkel grus, 37° enligt SGI, 2008

z 8 m under markytan

γ 19 kN/m^3

OCR 1

Viljordtrycket varierade linjärt i vertikalled på rambenen med sambandet som beskrivs i ekvation 4.3.

$$p(z) = 7,6 \text{ kN/m}^3 \cdot z \quad (4.3)$$

Vid djupet 8 m motsvarade det en last på $60,8 \text{ kN/m}^2$.

Stödförskjutning

Stödförskjutningarna som ansattes är 10 mm i horisontalled och 13 mm i vertikalled. Dessa skulle kombineras på ogynnsammaste sätt men inte samtidigt. Detta innebar att förskjutningen i vertikalled kunde ske på höger eller vänster ramben. I horisontalled kunde ett, eller båda stöden förskjutas inåt då jordtrycket antogs kunna förhindra rörelser utåt.

Krympning

Autogen slutkrympning bestäms enligt ekvation 4.4 där f_{ck} är 55 MPa.

$$\varepsilon_{ca} = 2,5(f_{ck} - 10) \cdot 10^{-6} = 0,1125 \text{ ‰} \quad (4.4)$$

Slutvärde på uttorkningskrympningen är $\varepsilon_{cd} = 0,2025 \text{ ‰}$. Slutkrympningen, ε_{cs} är då $0,32 \text{ ‰}$ och appliceras som en temperatursänkning vilken beräknas enligt ekvation 4.5.

$$T = -\frac{0,32 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-6}} = -32 \text{ °C} \quad (4.5)$$

Respektive bro förutsattes vara gjuten i ett stycke, vilket medförde att krympning verkar över hela bromodellerna.

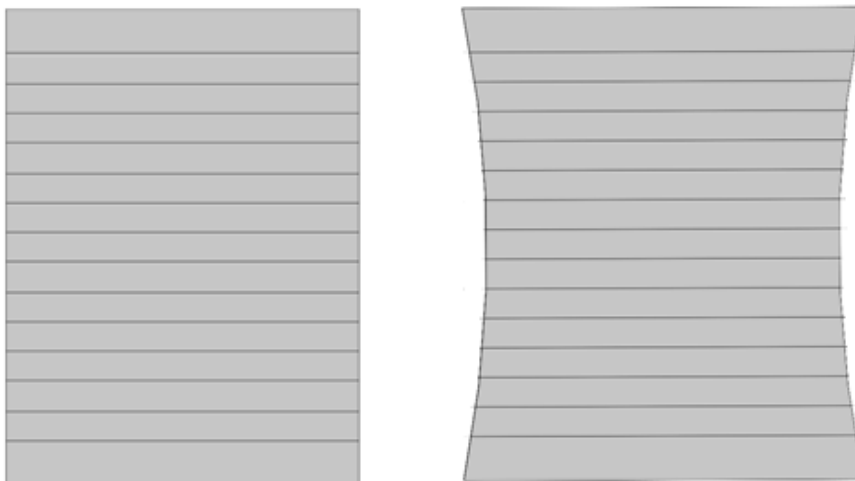
Trafiklast

Trafiklaster appliceras enligt Tabell 4-1.

Tabell 4-1. Trafiklaster

Läge	Boggiesystem Axellast [kN]	Utbredd last [kN/m²]
Lastfält 1	270	6,3
Lastfält 2	180	2,5
Lastfält 3	0	2,5
Lastfält 4	0	2,5
Lastfält 5	0	2,5
Återstående yta	0	2,5

För att beräkna snittkrafterna som trafiklasten gav upphov till välades trafiklastlinjer med en meters mellanrum. Programmet kunde då beräkna de mest ogynnsamma snittkrafterna som genereras. Enligt gällande normer antas trafiken endast kunna röra sig centriskt i trafiklastfältet. Därför placerades de yttersta trafiklastlinjerna 1,5 m från bronns ytterkanter. Placeringen av trafiklastlinjerna visas i Figur 4.3-1.



Figur 4.3-1 Trafiklastlinjer för studerade broar

Broms- och accelerationskrafter

Broms- och accelerationskraftens storlek beror av brobaneytans storlek. Därför beräknades denna separat för respektive bro. För plattrambro med raka ramben har broms- och accelerationskraften, Q_{lk} beräknades till $1,81 \text{ kN/m}^2$ enligt ekvation 4.6 vilket gav en sidokraft, Q_{trk} på $0,45 \text{ kN/m}^2$.

$$Q_{lk} = \frac{0,6 \cdot 0,9(2 \cdot 300) + 0,1 \cdot 0,7 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 12}{16 \cdot 12} \quad (4.6)$$

För plattrambro med krökta ramben har broms- och accelerationskraften, Q_{lk} beräknats till $1,71 \text{ kN/m}^2$ enligt ekvation 4.7 och sidokraften, Q_{trk} beräknades till $0,43 \text{ kN/m}^2$.

$$Q_{lk} = \frac{0,6 \cdot 0,9(2 \cdot 300) + 0,1 \cdot 0,7 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 13,6}{16 \cdot 12,8} \quad (4.7)$$

Den längsta körfältslängden var $13,6 \text{ m}$ och den genomsnittliga längden på bron med krökta ramben var $12,8 \text{ m}$.

Temperaturlast

Vid beräkning av temperaturlaster förutsattes broarna vara belägna i Malmö, vilket ger $T_{max}=33^\circ\text{C}$ och $T_{min}=-22^\circ\text{C}$. Detta ger enligt SS-EN-1991-1-5 avsnitt 6.1.3.1 $T_{e,max}=33^\circ\text{C}$ och $T_{e,min}=-16^\circ\text{C}$. Initialtemperaturen förutsattes vara 10°C och det motsvarar en jämnt utbredd temperaturhöjning på 23°C och en jämnt utbredd temperatursänkning på -26°C .

Temperaturskillnad vid uppvärmning bestäms enligt SS-EN 1991-1-5 Tabell 6.1. och ger för en plattrambro i betong med en ytbeläggning på 50 mm : $\Delta T_{heat} = 15^\circ\text{C}$. Detta ger för avkyllning: $\Delta T_{cool} = 8^\circ\text{C}$. Dessa värden multipliceras med två olika korrektionsfaktorer enligt ekvation 4.8 respektive 4.9 nedan.

$$\Delta T_{heat} \cdot k_{sur,heat} = 11^\circ\text{C} \quad (4.8)$$

Där:

$$k_{sur,heat} = 0,76$$

$$\Delta T_{cool} \cdot k_{sur,cool} = 8^\circ\text{C} \quad (4.9)$$

Där:

$$k_{sur,cool} = 1,0$$

Temperaturgradienter applicerades också på rambenen, en med varmare utsida och kallare insida och en med varmare insida och kallare utsida. Gradient vid både uppvärmning och nedkyllning var 15°C .

Överlast

Ett ökat jordtryck till följd av överlast, p_t lades som ett tryck på ett eller båda rambenen. Det ökade jordtrycket beräknades till, $p_t = 18,9 \text{ kN/m}^2$ enligt ekvation 4.10.

$$p_t = 0,4 \cdot 47,2 \text{ kN/m}^2 \quad (4.10)$$

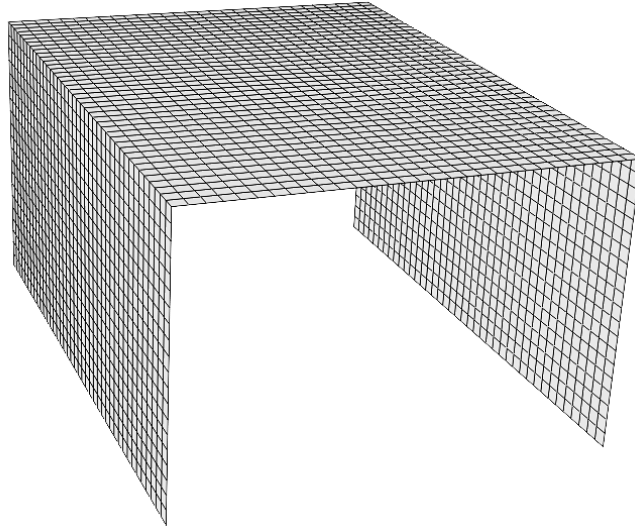
Ökat jordtryck på grund av konstruktionsrörelser

Då en konstruktion med höjden 8 m rör sig mer än 4 mm skall ökat jordtryck användas. Den största sidoförskjutningen uppkom då broms- och accelerationskraften applicerades. För den analyserade plattrambron med raka ramben blev sidoförskjutningen maximalt 3,5 mm. För plattrambron med krökta ramben blev den maximala sidoförskjutningen 1,9 mm. Detta lastfall var med andra ord inte aktuellt.

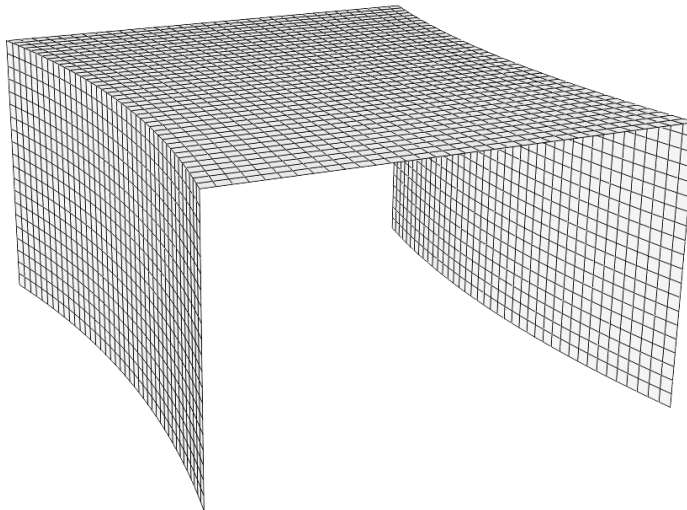
4.4 Modellering

Modellerna av broarna delades in med deformerbara skalelement. För identifiering av laster med ogynnsam effekt på snittkrafternas storlek modellerades grundinfästningarna som fast inspända. Ytorna gavs lokala elementriktningar så att x-riktningen riktades i brons längdled och y-riktningen i brons tvärriktning, se avsnitt 1.5.2.

Hela bron utgjordes av samma betongmaterial som modellerades som ett isotropt linjärelastiskt material. Betongens materialegenskaper som användes var densitet, elasticitetsmodul, Poissons tal samt längdutvidgningskoefficienten. Värdet på parametrarna visades i avsnitt, 4.2. Modellerna tilldelades ett fyrkantigt elementnät med sidan 0,4 m. Elementnätet för plattrambron med raka rambenen visas i Figur 4.4-1. Figur 4.4-2 visar modellen av plattrambron med krökta ramben och det tilldelade elementnätet.



Figur 4.4-1 Platttrambro med raka ramben med tilldelat elementnät



Figur 4.4-2 Platttrambro med krökta ramben med tillhörande elementnät

4.5 Resultat

För att utvärdera de studerade snittkrafterna studerades de längs tre valda linjer. På dessa linjer valdes fyra punkter ut. För dessa punkter presenterades numeriska resultat.

Läge för studerade linjer och punkter för platttrambro med raka ramben

Linjernas placering visas i Figur 4.5-1 och valda punkter visas i Figur 4.5-2.

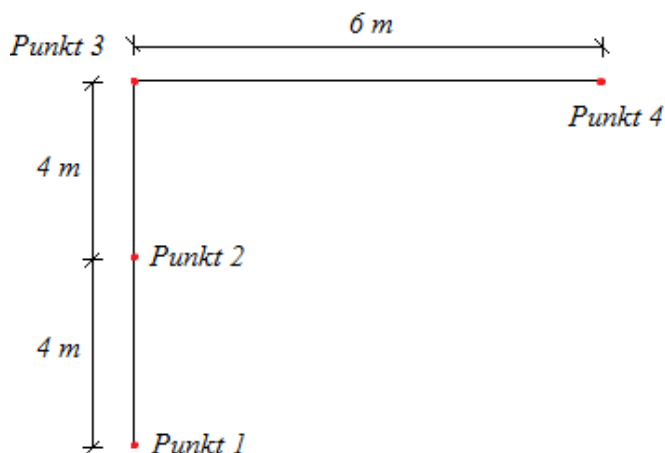
Linje 1: 0,8 m från brons ytterkant

Linje 2: 4,4 m från brons ytterkant

Linje 3: 8,0 m från brons ytterkant, det vill säga på mitten av bron



Figur 4.5-1 Linjernas placering



Figur 4.5-2 Punkternas placering på valda linjer

Punkterna på linjerna placerades enligt följande:

Punkt 1: vid grundinfästningen

Punkt 2: i mitten på rambenet

Punkt 3: i hörnet mellan ramben och brobana

Punkt 4: i mitten på brobanaplattan

Läge för studerade linjer och punkter för plattrambro med krökta ramben

Linjernas placering visas i Figur 4.5-3 och valda punkter visas i Figur 4.5-4.

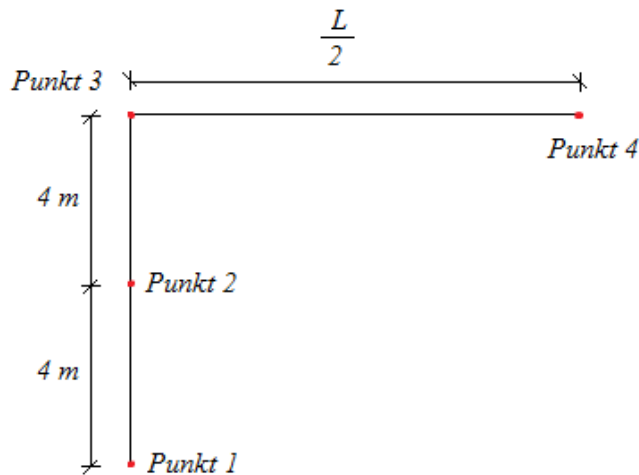
Linje 1: 0,8 m från brons ytterkant

Linje 2: 4,4 m från brons ytterkant

Linje 3: 8,0 m från brons ytterkant, det vill säga på mitten av bron



Figur 4.5-3 Linjernas placering



Figur 4.5-4 Punkternas placering på valda linjer

Punkterna på linjerna placeras enligt följande:

- Punkt 1: vid grundinfästningen
- Punkt 2: i mitten på rambenet
- Punkt 3: i hörnet mellan ramben och brobana
- Punkt 4: i mitten på brobaneplattan

Där L betecknade bronns spännvidd i aktuellt snitt, som på grund av rambenens krökning är varierande.

Resultat

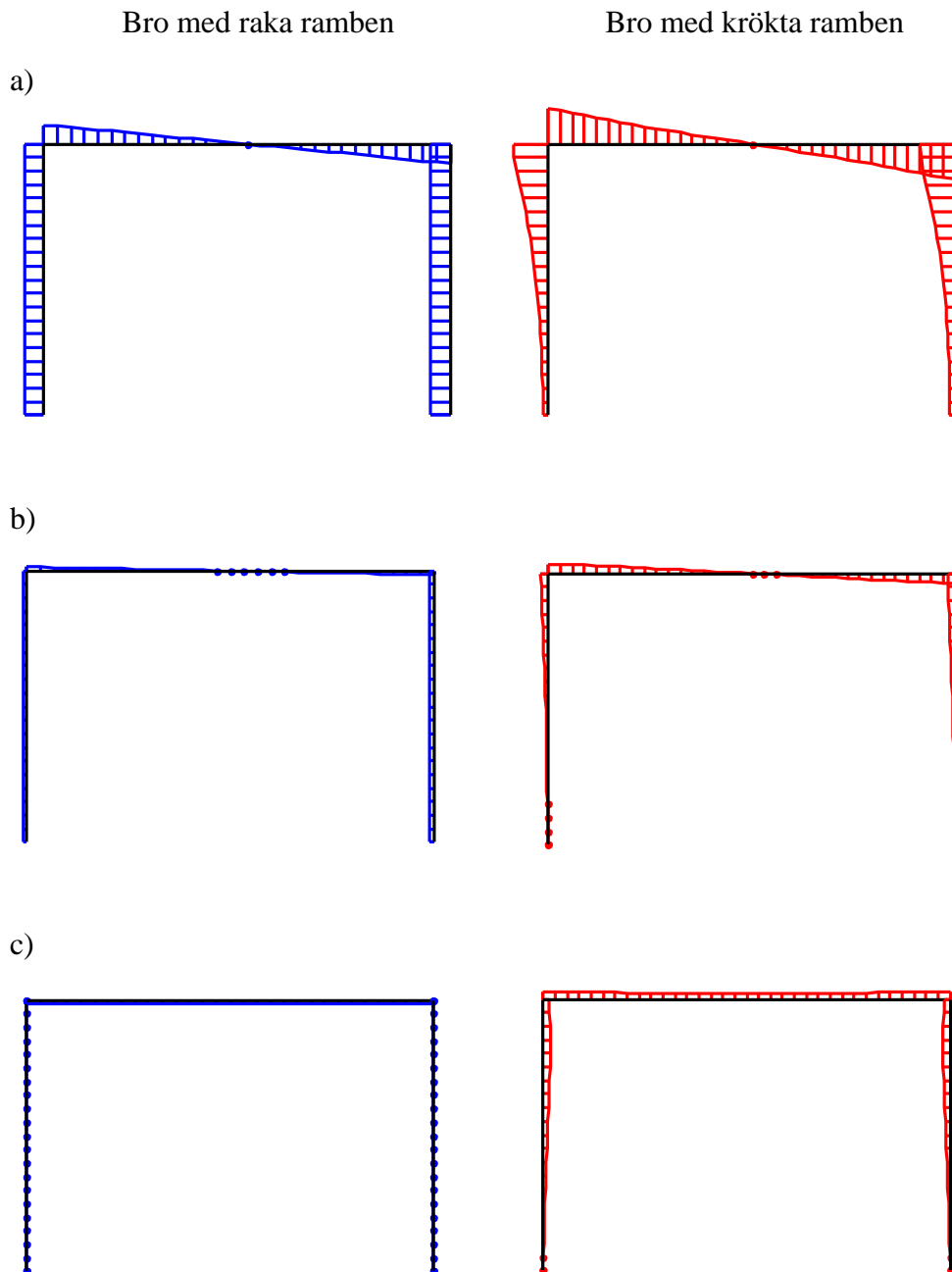
Fullständiga resultat från analysen med karakteristiska laster för plattrambron med raka ramben redovisas i appendix A, och med krökta ramben visas i appendix B. Snittkrafterna som har utvärderats är momenten M_y och M_x samt tvärkraft i längdled, V_x . Lasterna som gett ogynnsam effekt på snittkrafternas storlek studerades mer noggrant och redovisas nedan. Utifrån resultatbilagorna drogs följande slutsatser angående inverkan på snittkrafter då rambenen utformas krökta jämfört med raka:

Egentyngd	Skillnader i snittkrafters storlek fanns mellan de studerade snittkrafterna men dessa ansågs bero på skillnaden i materialvolymen och inte på grund av rambenens krökning.
Viljordtryck	Då rambenen kröks gav det en gynnsam inverkan på snittkrafternas storlek.
Stödförskjutning	Viss ogynnsam verkan på snittkrafters storlek fås, se Figur 4.5-5, 4.5-6 och 4.5-7.
Krympning	Lasten har ogynnsam effekt på snittkrafters storlek, se Figur 4.5-8.
Trafiklast	Förändringen i snittkrafters storlek bedöms bero på den ökade trafikerade arean.
Bromslast	En gynnsam effekt på snittkrafters storlek fås då rambenen kröks.
Temperaturlaster	Lasterna har ogynnsam effekt på snittkrafternas storlek, se Figur 4.5-9, 4.5-10, 4.5-11 och 4.5-12.
Överlast	En gynnsam effekt på snittkrafters storlek fås då rambenen kröks.

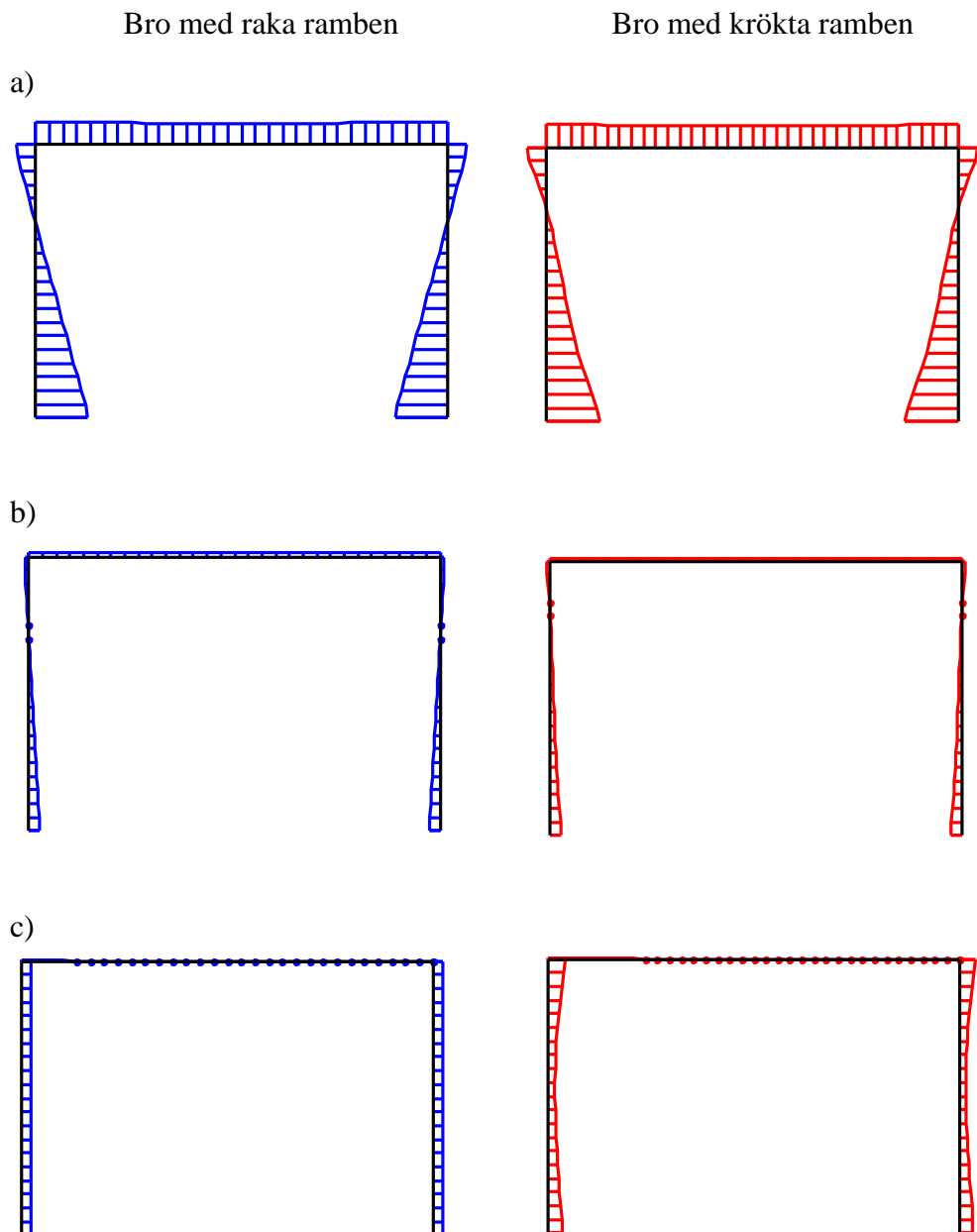
Lastfallet ökat jordtryck till följd av konstruktionsdelars rörelse är inte aktuell.

Både krympning och en jämnt utbredd temperatursänkning föreskrivs på samma sätt. Därför redovisas endast lastfallet krympning. Krympning är en permanent last och effekten av en jämnt utbredd temperaturhöjning kommer då vara försumbar. Därför redovisas, från temperaturlastfallen endast de olika gradienterna.

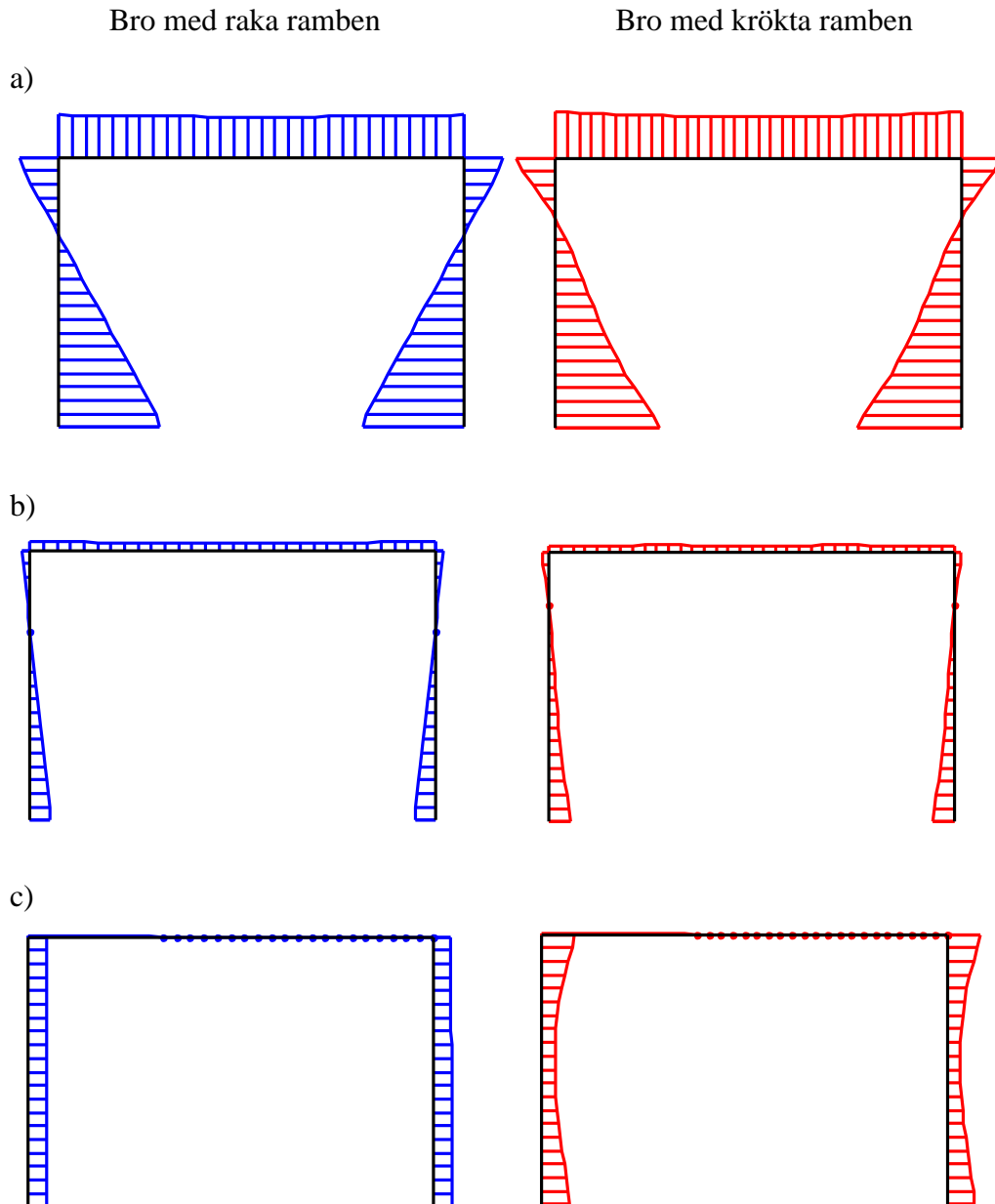
Snittkrafterna redovisas längs linje 3 då båda broarna där har samma spännvidd.



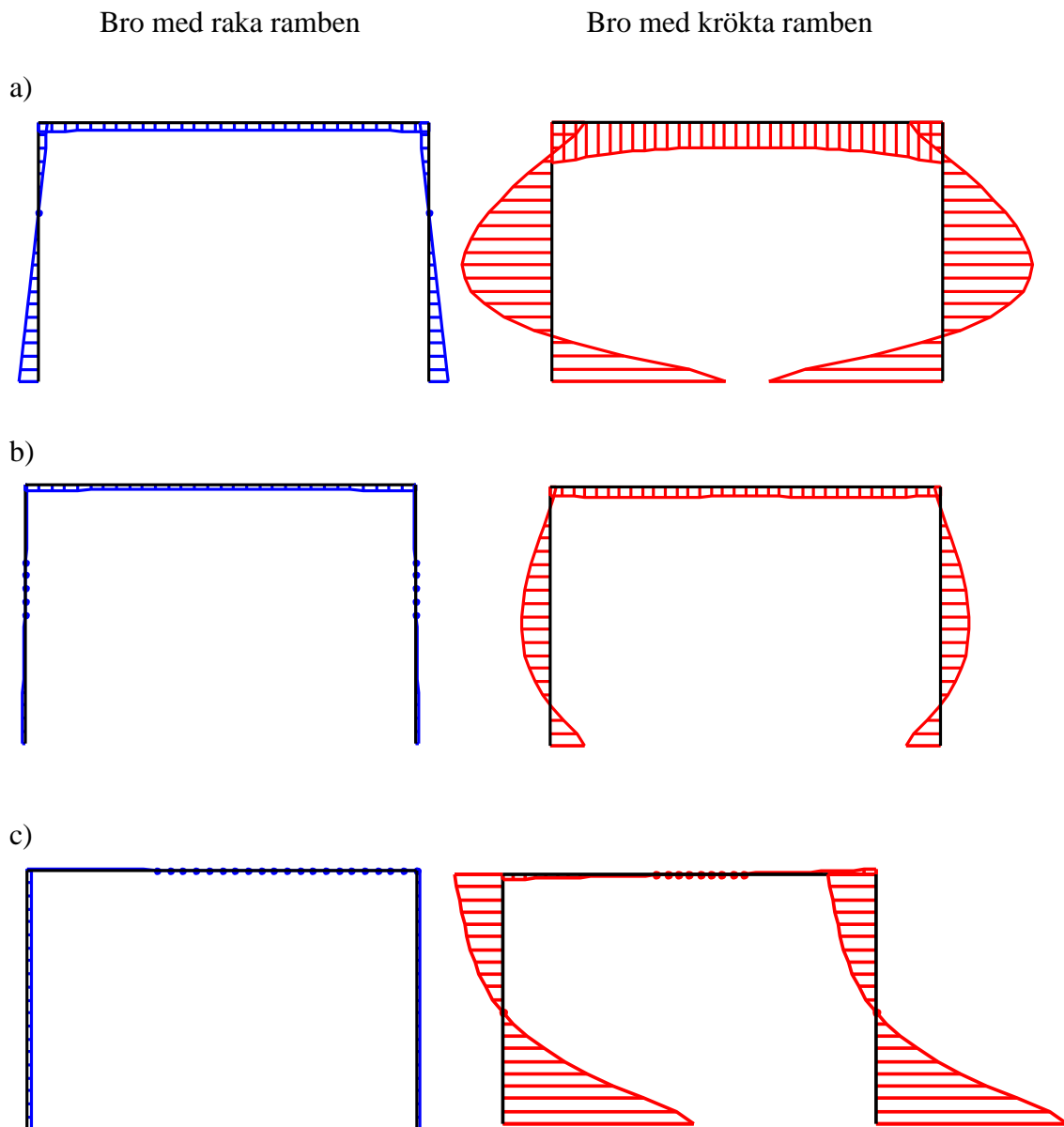
**Figur 4.5-5 Analyser för lastfallet vertikal stödförskjutning linje 3,
a) Moment M_y , b) Moment M_x , c) Tvärkraft V_x**



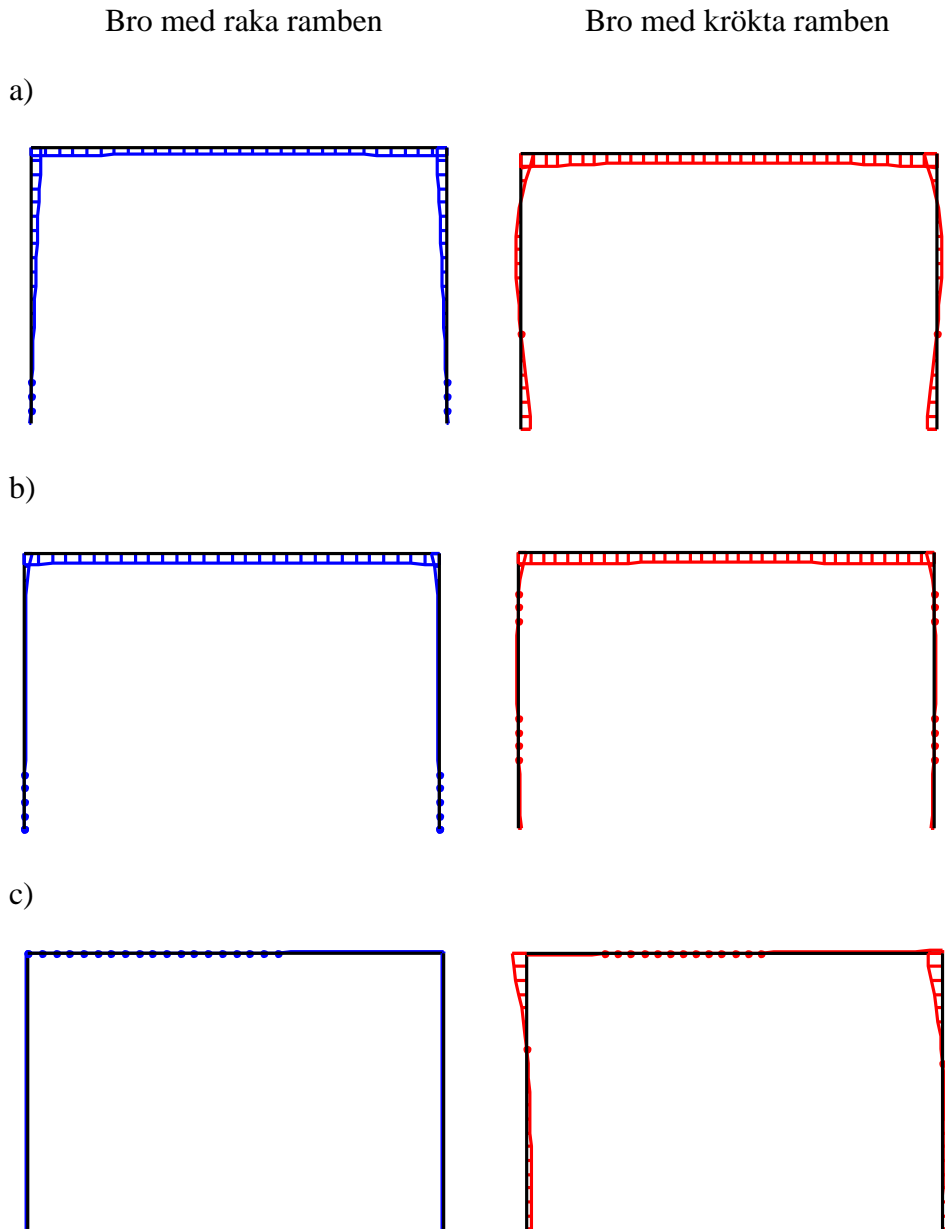
Figur 4.5-6 Analyser för lastfallet horisontell enkelsidig stödförskjutning linje 3, a) Moment M_y , b) Moment M_x , c) Tvärkraft V_x



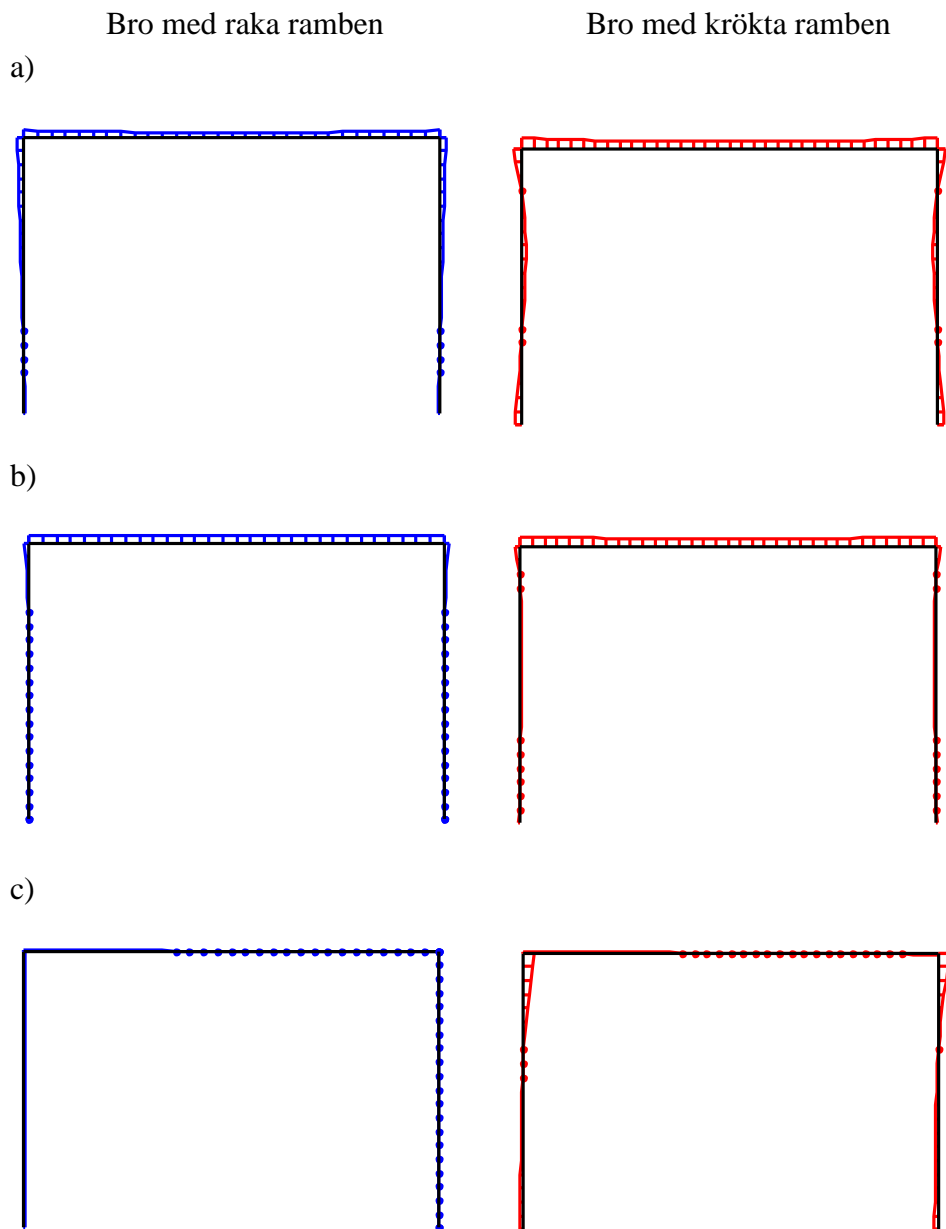
Figur 4.5-7 Analyser för lastfallet horisontell dubbelsidig stödförskjutning linje 3, a) Moment M_y , b) Moment M_x , c) Tvärkraft V_x



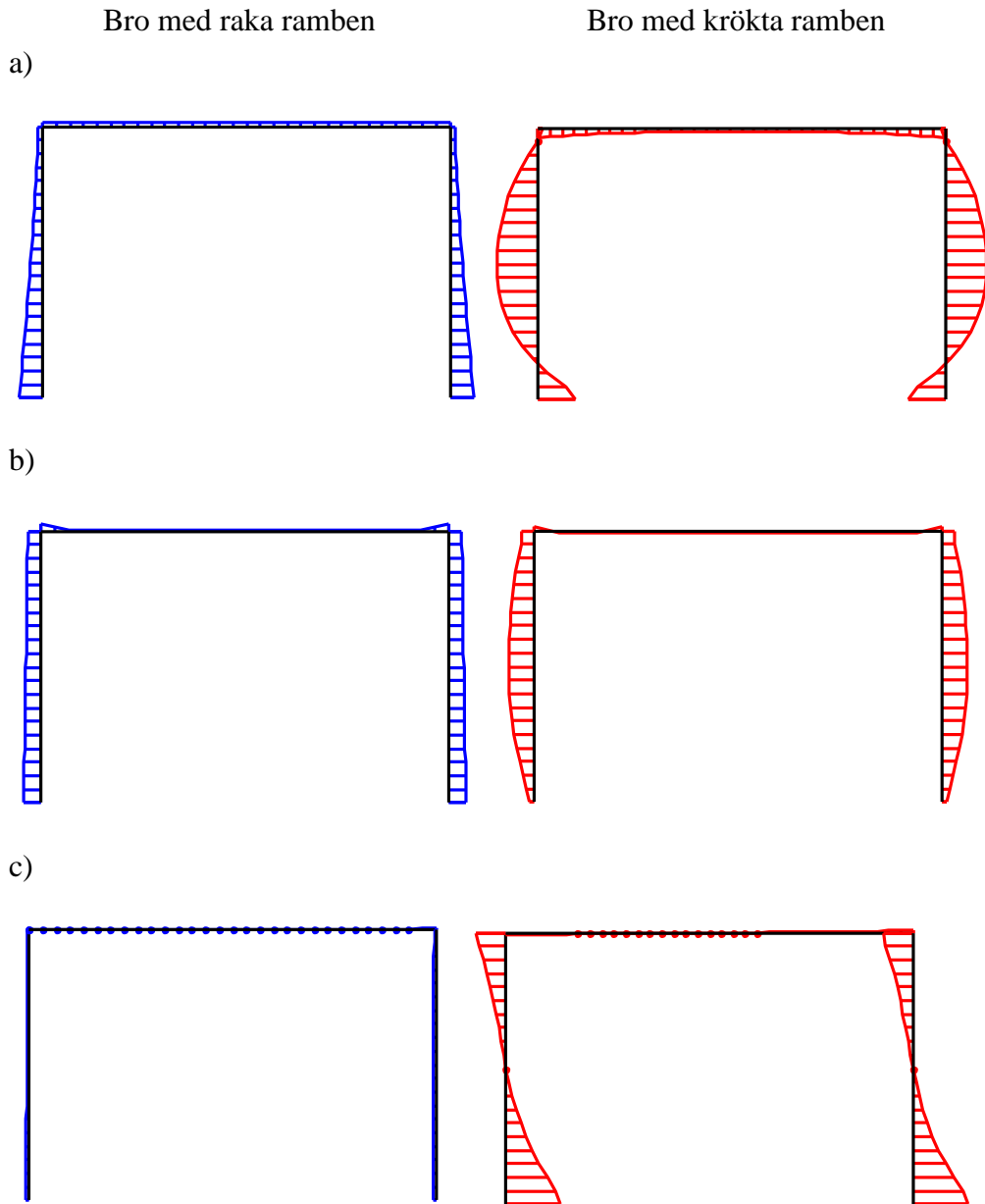
**Figur 4.5-8 Analyser för lastfallet krympning linje 3,
a) Moment M_y , b) Moment M_x , c) Tvärkraft V_x**



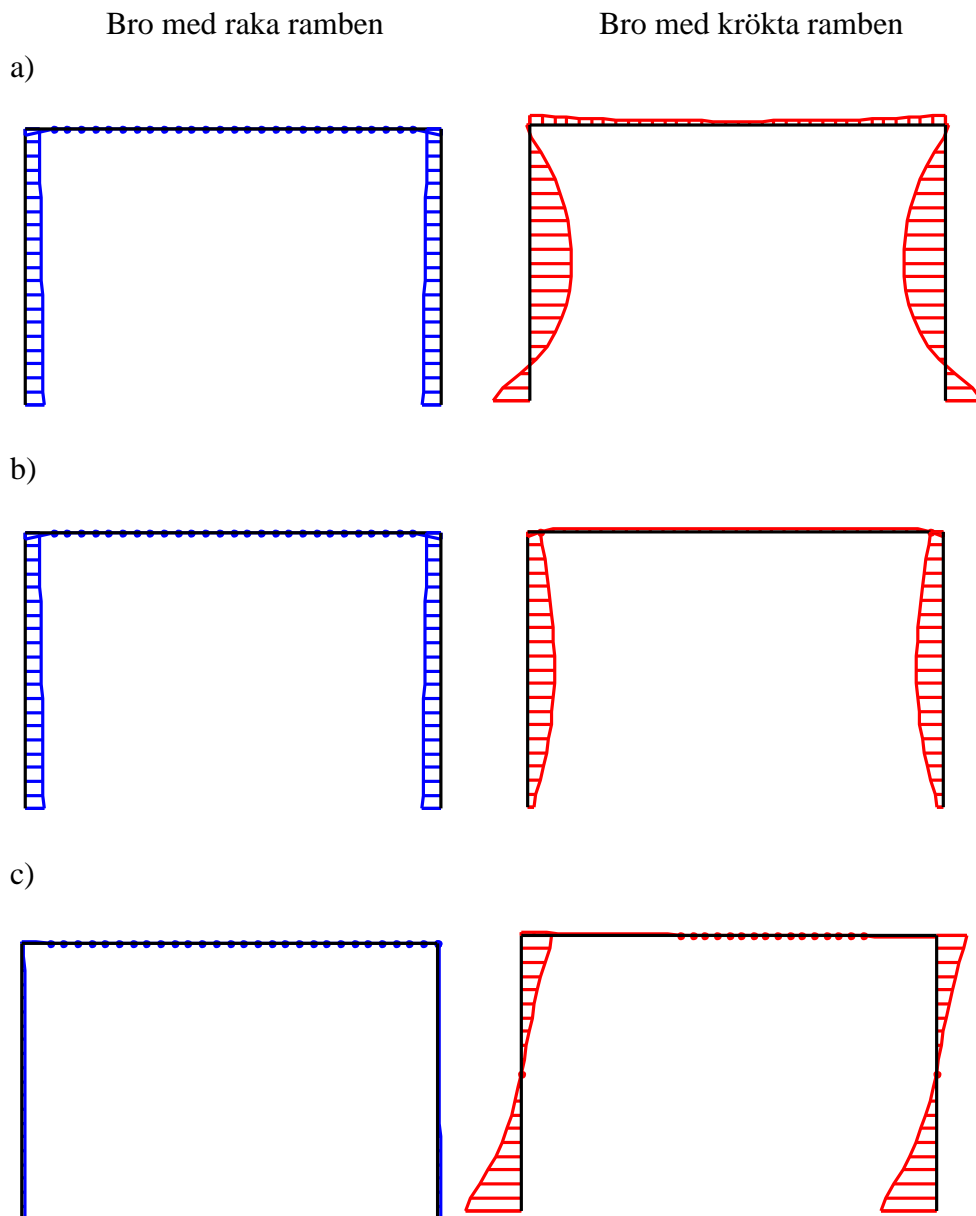
**Figur 4.5-9 Analyser för lastfallet uppvärmning av brobana linje 3,
a) Moment M_y , b) Moment M_x , c) Tvärkraft V_x**



**Figur 4.5-10 Analyser för lastfallet nedkylning av brobana linje 3,
a) Moment M_y , b) Moment M_x , c) Tvärkraft V_x**



**Figur 4.5-11 Analyser för lastfallet uppvärmning av ramben linje 3,
a) Moment M_y , b) Moment M_x , c) Tvärkraft V_x**



**Figur 4.5-12 Analyser för lastfallet nedkylning av ramben linje 3,
a) Moment M_y , b) Moment M_x , c) Tvärkraft V_x**

4.6 Fastställning av laster med ogynnsam effekt på snittkrafterns storlek

Laster som har konstaterats ha betydande negativ inverkan på snittkrafternas storlek är krymp- och temperaturlaster. Krympning och jämn temperatursänkning har mest ogynnsam effekt. Dessa samverkar dessutom.

Att temperaturgradienterna på rambenen får större inverkan på snittkrafternas storlek än gradienterna på brobanan är väntat då gradienterna där är större.

Lastfallet krympning har klart störst ogynnsam effekt på snittkrafternas storlek då rambenen utformas krökta. Därför användes detta lastfall i kommande delar av studien.

Kapitel 5

Brogeometrins inverkan på snittkrafter storlek

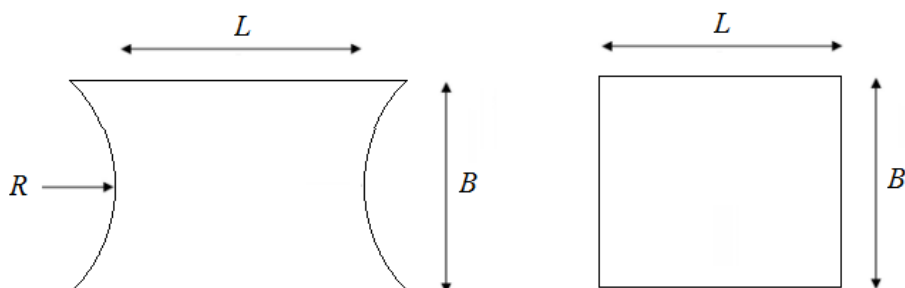
I detta kapitel studerades hur brons geometri påverkade snittkrafterna vid knutpunkten mellan ramben och brobaneplattan. Detta gjordes som en parameterstudie där inverkan av rambenens krökning först studerades. Därefter undersöktes hur förhållandet mellan brobaneplattans längd och bredd påverkade snittkrafterna. Geometrier för analyserade broar redovisades och sammanställda resultat presenterades.

5.1 Rambenens krökningsradie

För att utreda hur rambenens krökning påverkar snittkrafternas storlek analyseras ett antal broar med olika geometrier. Olika krökningsradier valdes för att kunna dra slutsatser om hur snittkrafter storlek beror av krökningsradien.

5.1.1 Studerade broars geometrier

Broar med varierande krökningsradier studerades. För att få jämförbara broar sattes den minsta spännvidden till ett fast värde. Detta illustreras i Figur 5.1-1 nedan. Bredden, B var 16 m och spännvidden, L var 12 m för alla broar som analyserades. Rambenshöjden var som tidigare 8 m. Den variabla radien betecknades R .



Figur 5.1-1 Brobaneplattan sedd ovanifrån med geometriska beteckningar

I Tabell 5-1 visas de olika radierna som studerades i analyserna. Först analyserades en rak bro, ($r=\infty$) och därefter studerades broarna med varierade radier.

Tabell 5-1 Valda krökningsradier samt minsta spännvidd

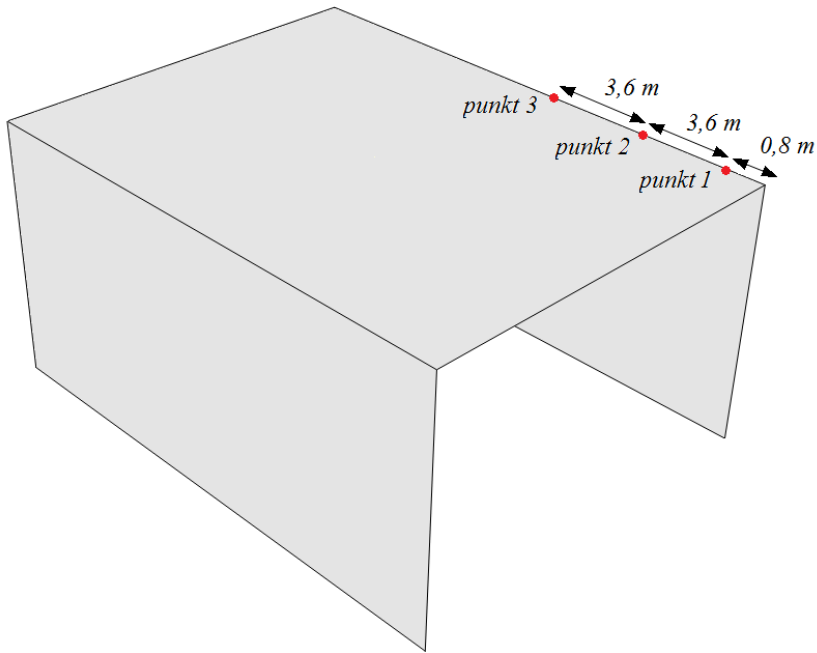
Modell nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Radie [m]	∞	100	80	60	40	30	20	15	10

5.1.2 Modellering

Broarna modellerades på samma sätt som visades i föregående kapitel. Materialegenskaperna för betong beskrevs i avsnitt 4.2 och infästningen vid grunden modellerades som fast inspänd. Lastfallen som studerades var krympning och egentyngd. Lastfallet krympning beräknades och applicerades på samma sätt som visades i avsnitt 4.3. Detta lastfall valdes då det i kapitel 4 visades ha ogynnsam effekt på snittkrafternas storlek då rambenen utformas krökta. Egentyngden analyserades också som en referenslast.

5.1.3 Resultat

För att undersöka sambandet mellan krökningsradien och snittkrafterna studerades inledningsvis endast momentfördelningen M_y , då dessa snittkrafter antogs påverkas mest av krökningsradien. För att resultaten ska bli överskådliga studerades snittkrafter vid infästningen mellan ramben och brobaneplatta vid tre punkter. Punkterna på infästningen valdes på det sätt som visades i avsnitt 4.5. Placeringen av punkterna illustreras i Figur 5.1-2.



Figur 5.1-2 De studerade punkternas placering

Resultat från analyserna då broarna belastats av egentyngd och krympning redovisas nedan i Tabell 5-2 respektive 5-3.

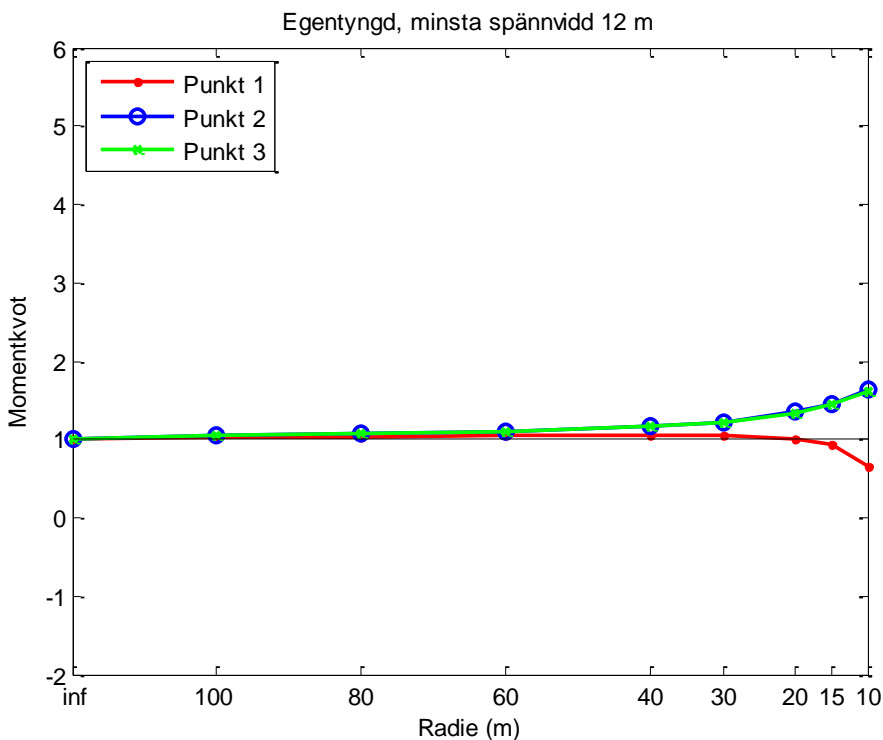
Tabell 5-2 Resultat lastfallet egentyngd, M_y [kNm/m]

Modell	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3
1 ($r = \infty$)	-102,9	-99,11	-98,26
2 ($r = 100$)	-105,9	-105,1	-103,5
3 ($r = 80$)	-106,4	-106,7	-105,0
4 ($r = 60$)	-107,2	-109,7	-107,9
5 ($r = 40$)	-107,7	-115,7	-113,8
6 ($r = 30$)	-107,2	-121,7	-119,9
7 ($r = 20$)	-103,5	-133,8	-132,0
8 ($r = 15$)	-95,41	-144,2	-142,1
9 ($r = 10$)	-68,52	-162,5	-159,6

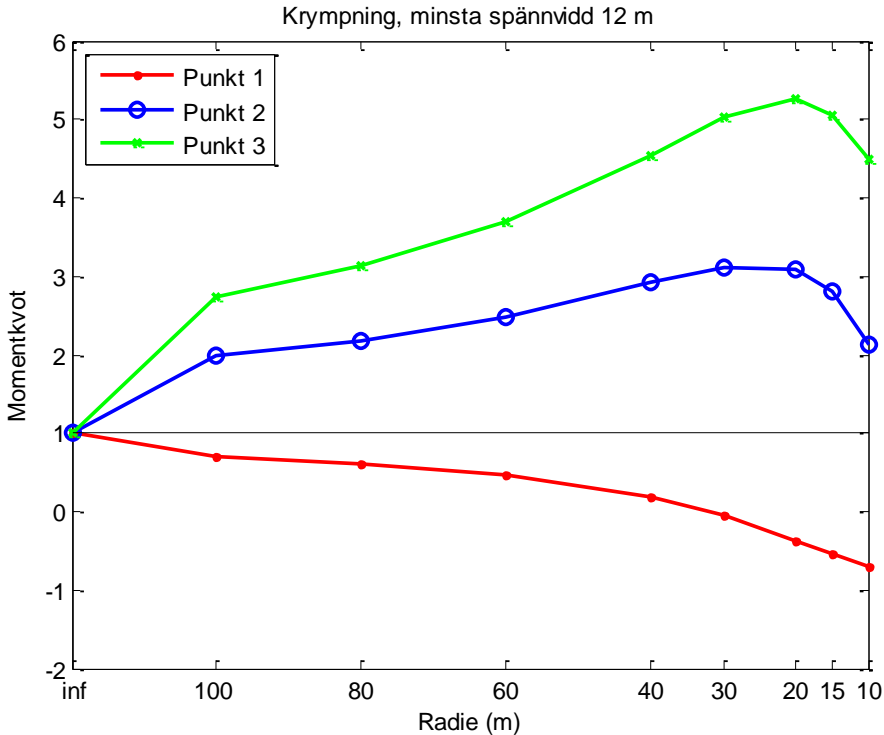
Tabell 5-3 Resultat lastfallet krympning, M_y [kNm/m]

Modell	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3
1 ($r = \infty$)	5,68	10,9	11,1
2 ($r = 100$)	3,97	21,5	30,4
3 ($r = 80$)	3,49	23,8	34,7
4 ($r = 60$)	2,62	27,1	41,0
5 ($r = 40$)	1,03	31,7	50,5
6 ($r = 30$)	-0,32	33,9	55,8
7 ($r = 20$)	-2,18	33,6	58,4
8 ($r = 15$)	-3,08	30,4	56,0
9 ($r = 10$)	-3,92	23,0	49,8

Det var förändringen i moment som var intressant och därför plottades resultaten som kvoten, moment för krökt bro genom moment för rak bro. Resultaten av analyserna visas i Figur 5.1-3 respektive 5.1-4. Båda diagrammen är plottade i samma skala för att tydligt illustrera skillnaderna mellan resultaten för de båda lastfallen.



Figur 5.1-3 Resultat från egentyngd, momentkvot M_y , $\left(\frac{M_{y,krökt}}{M_{y,rak}}\right)$ för varierad krökningsradie



Figur 5.1-4 Resultat från krympning, momentkvot M_y , $(\frac{M_{y,krökt}}{M_{y,rak}})$ för varierad krökningsradie

Figur 5.1-3 visar att momentfördelningen på grund av egentygnd nästan var oberoende av krökningsradien. Skillnaderna som fanns berodde på att arean på brobanepattan ökade då radien minskade.

Figur 5.1-4 visar att vid lastfallet krympning ökade momenten kring y-axeln med minskad krökningsradie. Dock avvek trenden då radien understeg 20 m. Detta tros bero på att snittkrafterna där omfördelade sig till ökade tvär- och normalkrafter. För att få en överblick över spänningsfördelningen studerades istället von Mises effektivspänning, som beskriver spänningen i alla riktningar (se avsnitt 3.2.1). Resultat från detta visas i Tabell 5-4 och 5-5.

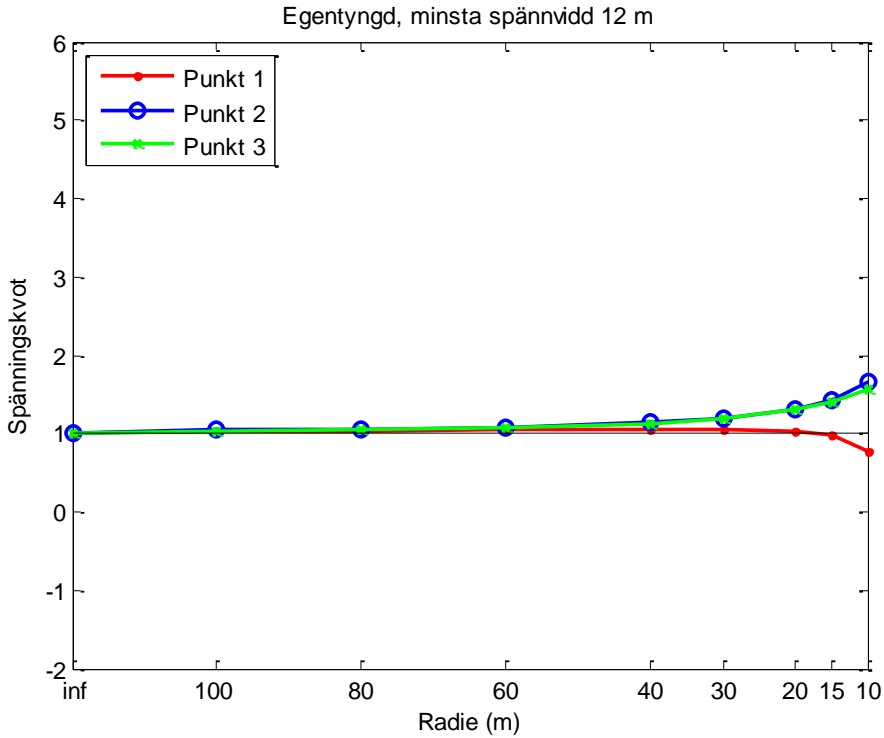
Tabell 5-4 Resultat lastfallet egentygnd, von Mises effektivspänning [kPa]

Modell	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3
1 $r = \infty$	3 454	3 290	3 260
2 $r = 100$	3 557	3 442	3 385
3 $r = 80$	3 576	3 485	3 424
4 $r = 60$	3 610	3 572	3 506
5 $r = 40$	3 644	3 748	3 675
6 $r = 30$	3 651	3 939	3 858
7 $r = 20$	3 589	4 344	4 236
8 $r = 15$	3 392	4 718	4 558
9 $r = 10$	2 650	5 427	5 116

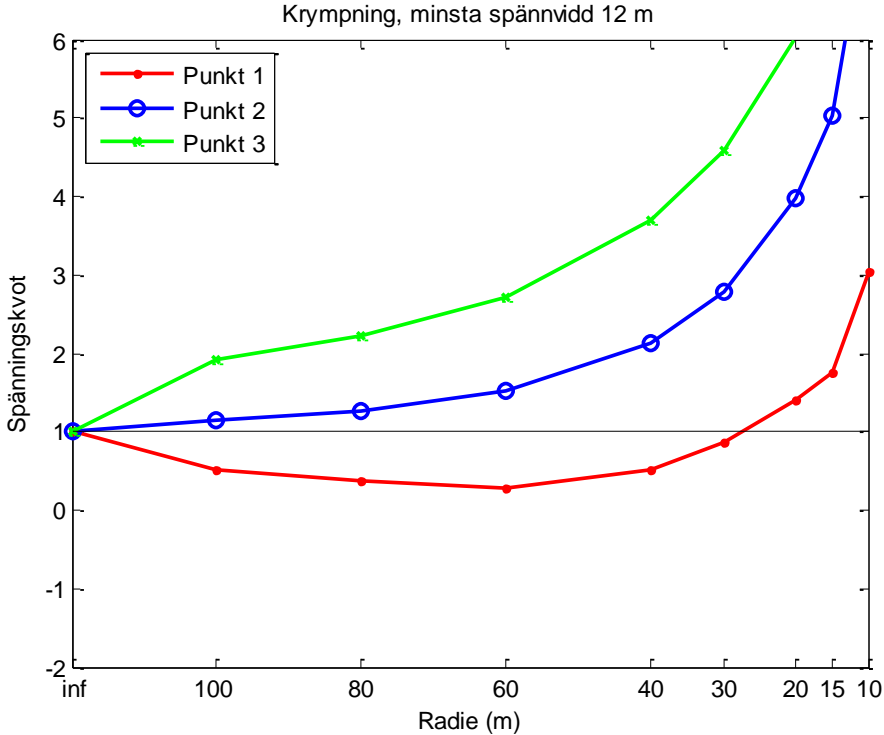
Tabell 5-5 Resultat lastfallet krympning, von Mises effektivspänning [kPa]

Modell	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3
1 $r = \infty$	433,1	613,4	466,4
2 $r = 100$	218,6	703,2	898,2
3 $r = 80$	166,4	776,3	1 035
4 $r = 60$	124,8	932,1	1 270
5 $r = 40$	222,1	1 312	1 729
6 $r = 30$	372,2	1 709	2 141
7 $r = 20$	606,6	2 434	2 808
8 $r = 15$	761,6	3 086	3 331
9 $r = 10$	1 315	4 676	4 367

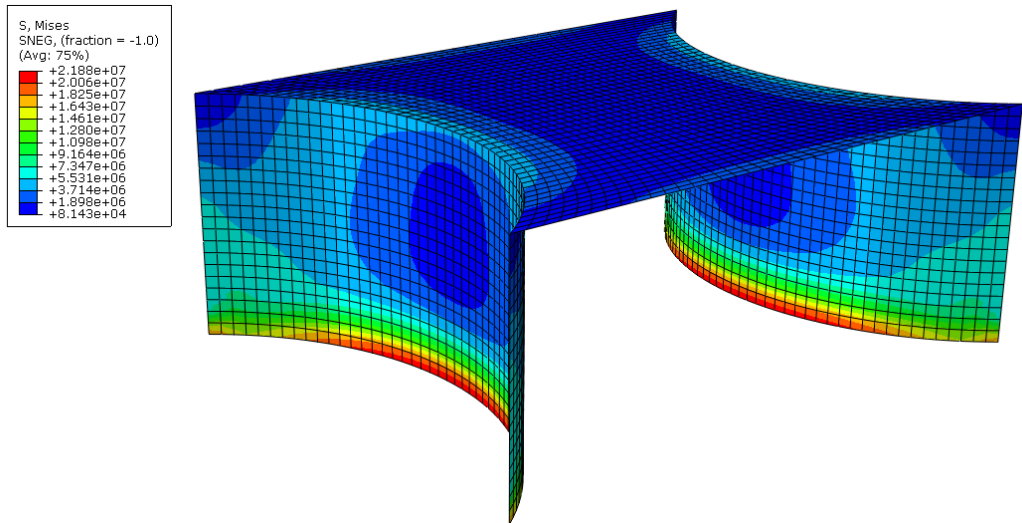
Även här studeras kvoten mellan spänningen för en krökt bro och spänningen för en rak bro. Resultaten av analysen redovisas i Figur 5.1-5 respektive 5.1-6. Dessa plottas i samma skala för att förändringar i spänningen ska kunna jämföras.



Figur 5.1-5 Resultat från egentyngd, von Miseskvot, $(\frac{\sigma_{krökt}}{\sigma_{rak}})$ med varierad krökningsradie



Figur 5.1-6 Resultat från krympning, von Miseskvot, $(\frac{\sigma_{krökt}}{\sigma_{rak}})$ med varierad krökningsradie



Figur 5.1-7 Spänningsfördelning för bro med radie 10 m

För att verifiera att punkt 3 var den punkt vid infästningen mellan platta och ramben som gav störst spänning studerades spänningsfördelningen i hela bron för lastfallet krympning. Detta gjordes för bron med minsta radie, ($R=10$ m). Resultatet visas i Figur 5.1-7.

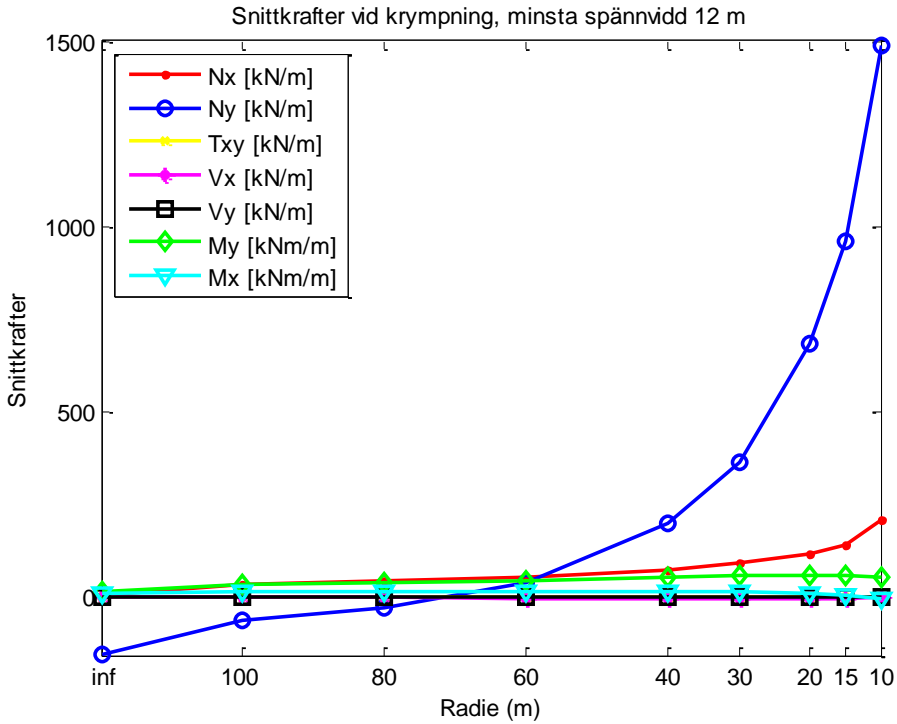
Figur 5.1-7 visar att von Mises effektivspänning i knutpunkten mellan brobana och ramben minskar vid bronns ytterkanter. I fortsatta analyser studerades endast punkt 3.

Eftersom von Misesspänningarna endast ger ett sammanvägt värde på spänningarna, beräknades de enskilda snittkrafterna. De enskilda snittkrafterna för broar med olika krökningsradie visas i Tabell 5-6.

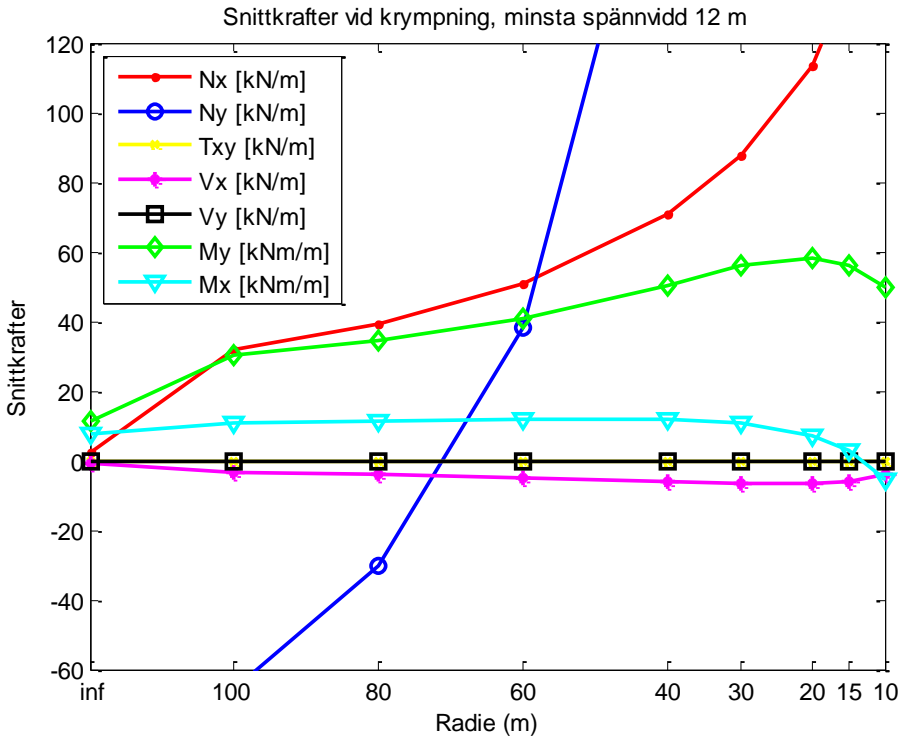
Tabell 5-6 Snittkrafter, i punkt 3 för broar med olika krökningsradie

Radie [m]	∞	100	80	60	40	30	20	15	10
N_x [kN/m]	2,4	32,0	39,2	50,7	70,9	87,6	113,6	139,9	206,0
N_y [kN/m]	-156,3	-65,4	-30,0	38,1	195,1	362,4	681,2	957,1	1 488,4
T_{xy} [kN/m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V_x [kN/m]	-0,6	-3,4	-4,0	-4,9	-6,1	-6,6	-6,6	-5,8	-3,9
V_y [kN/m]	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M_x [kNm/m]	7,4	10,6	11,1	11,6	11,6	10,6	7,0	3,0	-5,4
M_y [kNm/m]	11,1	30,4	34,7	41,0	50,5	55,8	58,4	56,0	49,8

En sammanställning av Tabell 5-6 visas i Figur 5.1-8 där absoluta värden visas med en mer detaljerad version visas i Figur 5.1-9. Figur 5.1-10 visar kvoten mellan magnituderna för de olika radierna och tillhörande värde för den raka bron. Detta gjordes för att studera hur snittkrafterna påverkas av minskad radie.

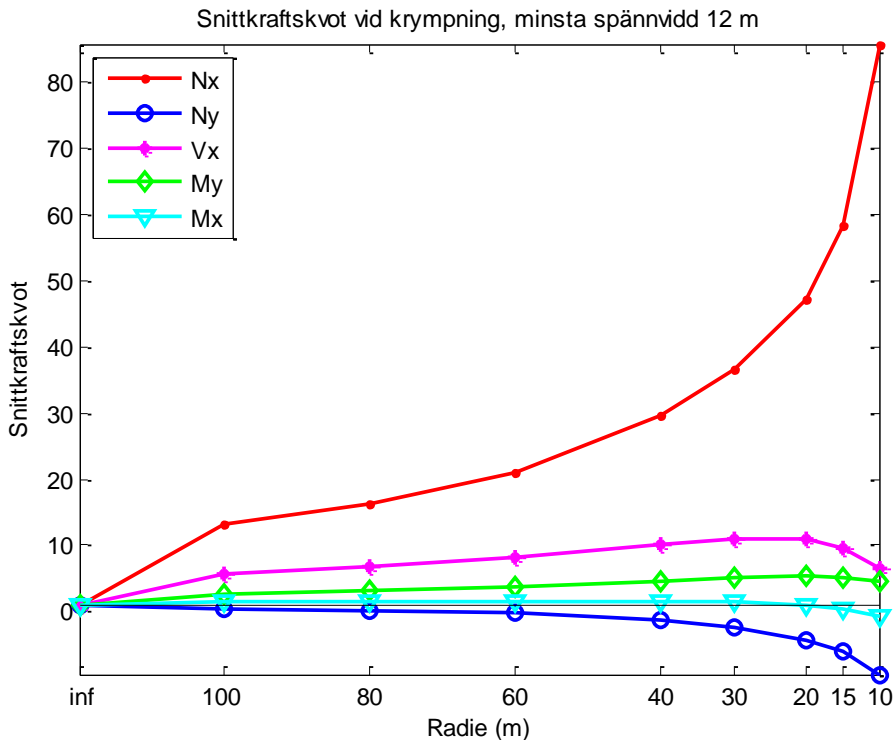


Figur 5.1-8 Översikt, snittkrafter från krympning vid varierande radier



Figur 5.1-9 Detaljerade snittkrafter från krympning vid varierande radier

I Figur 5.1-10 visas kvoterna mellan olika snittkrafter som funktion av krökningsradien. T_{xy} och V_y redovisas inte eftersom dessa i en eller flera punkter ger nollvärden.



Figur 5.1-10 Snittkraftskvoter från krympning vid varierande radier

5.1.4 Diskussion av resultat

Ett tydligt samband mellan von Mises effektivspänning och krökningsradien existerade i den studerade punkten. Spänningen ökade exponentiellt med minskad krökningsradie. Att von Mises effektivspänning hade ett starkare samband med krökningsradien än moment kring y-axeln innebär att snittkrafterna fördelade sig olika beroende på krökningsradien. Snittkrafterna som påverkades mest av minskad krökningsradie var normalkrafterna i båda riktningarna. Snittkrafter som inte påverkades alls eller försumbart lite var skjuvkraft, tvärkraft i y-axelns riktning samt moment kring x-axeln.

5.2 Förhållande mellan brobaneplattans längd och bredd

Det är intressant att studera hur brobaneplattans längd- och breddförhållande påverkar spänningsförhållandet i bron. Detta gjordes genom att studera ett antal olika broar med varierande krökningsradie och olika längd- och breddförhållande. För att dra slutsatser om resultaten studerades endast punkt 3, vars placering beskrivits i föregående stycke 5.1.

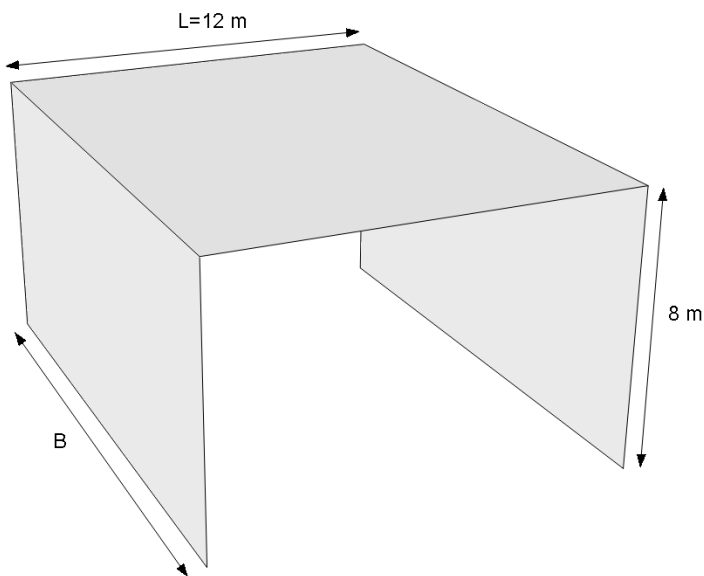
5.2.1 Metod

Förhållandet mellan längd och bredd på brobaneplattan som redovisades tidigare i detta kapitel var 0,75. De förhållanden mellan längd och bredd som analyserades i denna studie visas i Tabell 5-7.

Tabell 5-7 Förhållande mellan längd och bredd som ska studeras

Längd/Bredd	0,5	0,75	1,0	2,0
-------------	-----	------	-----	-----

Detta utfördes genom att behålla den minsta spännvidden på 12 m och sedan variera bredden B, enligt Figur 5.1-11.



Figur 5.1-11 Geometridefinition för analyserade broar

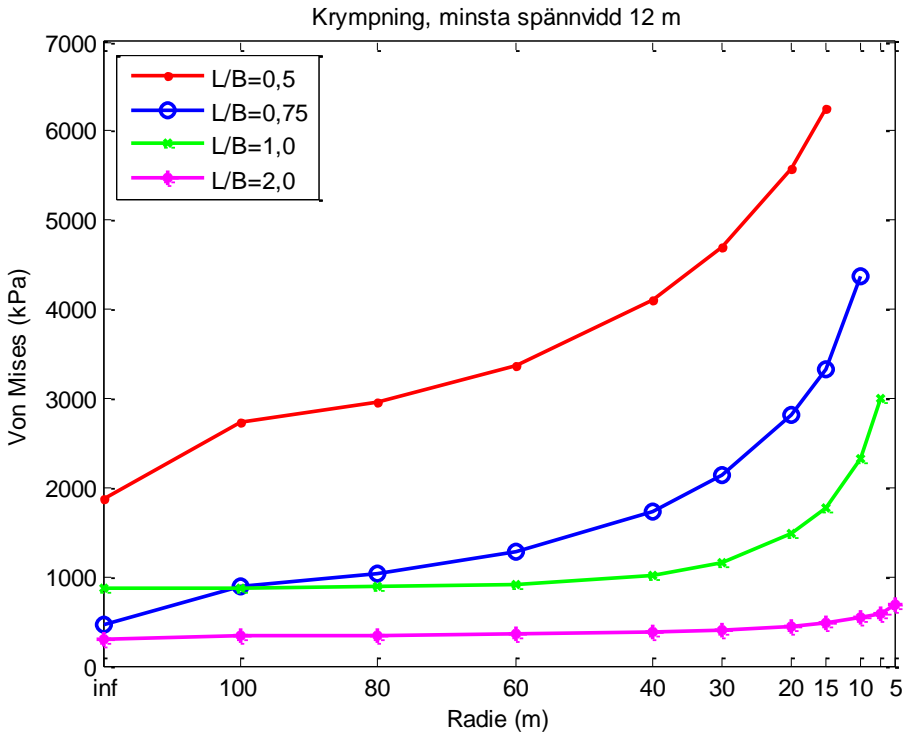
5.2.2 Resultat

Resultaten från de olika analyserna presenteras i Tabell 5-8 nedan. von Mises-spänning redovisas i enheten kPa.

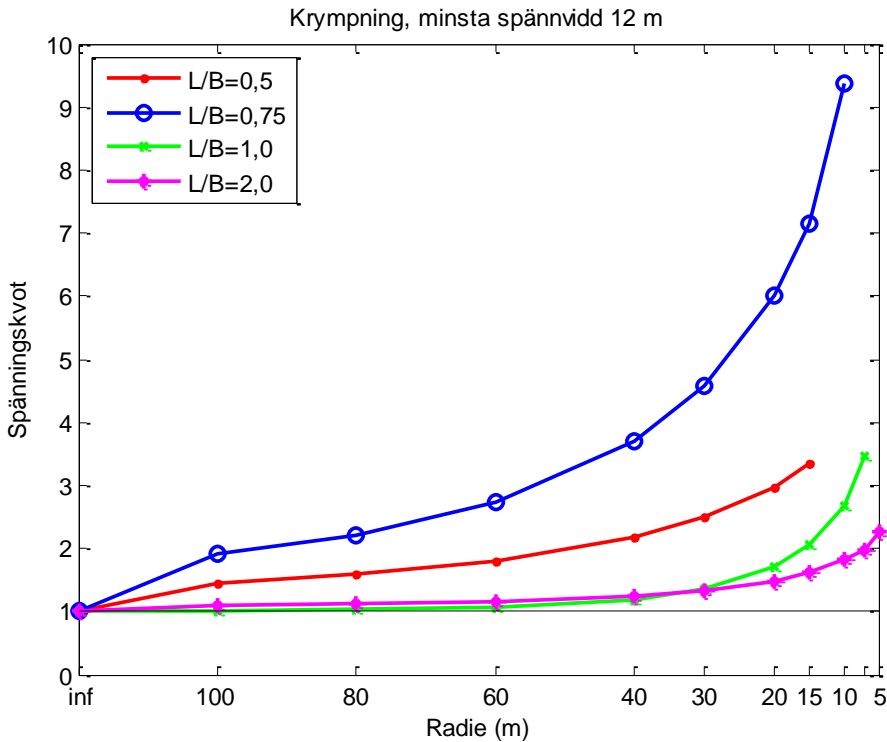
Tabell 5-8 von Mises effektivspänning [kPa], för broar med olika förhållanden mellan längd och bredd

Längd/Bredd	0,5	0,75	1,0	2,0
Radie [m]				
∞	1 873	466,4	863,2	300,9
100	2 724	898,2	871,4	330,6
80	2 966	1 035	883,5	338,1
60	3 370	1 270	915,3	350,6
40	4 101	1 729	1 020	375,3
30	4 700	2 141	1 163	399,5
20	5 584	2 808	1 479	444,7
15	6 251	3 331	1 770	484,5
10	-	4 367	2 314	546,7
7,5	-	-	3 003	591,8
5	-	-	-	677,9

En illustration av Tabell 5-8 visas i Figur 5.2-1 respektive 5.2-2. I Figur 5.2-1 visas resultaten i absoluta tal och spänningskvoten visas i Figur 5.2-2.



Figur 5.2-1 von Misesspänning för lastfallet krympning för broar med olika förhållanden mellan längd och bredd



Figur 5.2-2 von Miseskvot ($\frac{\sigma_{krökt}}{\sigma_{rak}}$) för lastfallet krympning för broar med olika förhållanden mellan längd och bredd

5.2.3 Diskussion av resultat

Från resultaten konstateras att effektivspänningen ökar om bredden på bron ökar. Detta är inte helt oväntat då rambenen då blir styvare med ökad bredd. Om längd-breddförhållandet på brobaneplattan överstiger 2,0 kan effekten av rambenens krökning i det närmaste försummas.

5.3 Slutsats

I detta kapitel har starka samband mellan snittkrafter och rambenens krökningsradie visats. Med minskad krökningsradie ökar spänningen vid infästningen mellan brobaneplattan och rambenen. Snittkrafterna som är mest beroende av radien är normalkraften i x- och y-riktning. Snittkrafter som inte påverkas av krökningsradien är skjuvning, tvärkraft i y-led samt moment i x-led.

Det har visats att sambandet mellan krökningsradie och effektivspänningar är beroende av bronns längd- och breddförhållande. För de brobredder som studeras ger en bredare brobane större spänning. Om längd- breddförhållandet är stort kan effekten rambenens krökning försummas.

Kapitel 6

Spänningsfördelning för dimensionerande laster

I detta kapitel undersöks hur lastkombinering påverkar spänningsfördelningen i broar med olika krökningsradie. Lastkombinering görs i brottngränstillståndet och lastkombinationen som används är STR-B.

6.1 Broars geometri

Tre broar analyserades. Geometri för två av dessa beskrivs i avsnitt 4.1, där den ena hade raka ramben och den andra hade krökta ramben med en krökningsradie på 40 m. Den tredje bron hade krökningsradien 20 m. I övrigt hade bron samma geometri som bron med krökningsradien 40 m.

6.2 Laster

Lasterna applicerades på samma sätt som beskrivits i avsnitt 4.3. Då broms- och accelerationskraften är beroende av arean beräknades den ytterligare en gång för bron med krökningsradien 20 m. Broms- och accelerationskraften som applicerades för denna bro var $1,61\text{kN/m}^2$ och beräknades enligt ekvation 6.1. Sidokraften var som tidigare 25 % av denna.

$$Q_{lk} = \frac{0,6 \cdot 0,9(2 \cdot 300) + 0,1 \cdot 0,7 \cdot 9 \cdot 3 \cdot 15,34}{16 \cdot 13,67} \quad (6.1)$$

6.3 Lastgrupper och lastkombinering

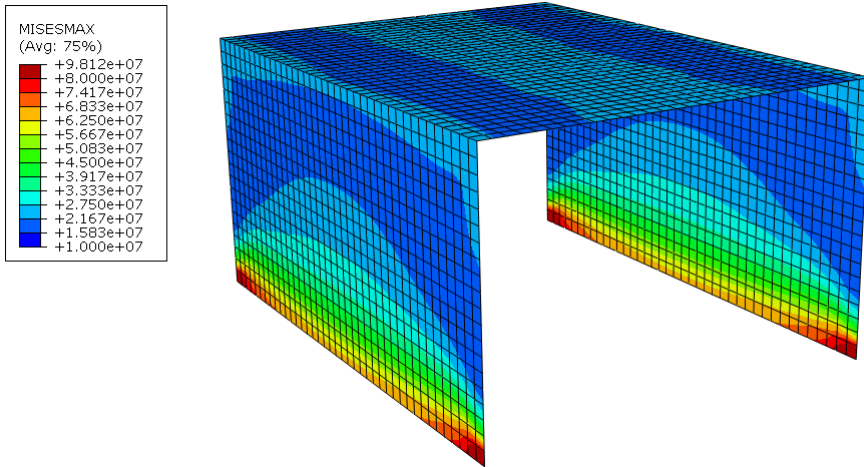
För att undersöka hur spänningsfördelningen påverkas användes karakteristiska laster som kombinerades. Först skapades lastgrupper för vissa laster och därefter genomfördes lastkombinering.

Lastgrupper utgörs av olika laster. Det finns olika alternativ för hur dessa ska summeras. I detta arbete används *Pick Most Adverse* och *Conditional Summation*. *Pick Most Adverse* används för laster som inte anses kunna ske samtidigt och de minst gynnsamma värdena för varje nod sparas. Exempelvis ska mest ogynnsammaste stödförskjutningen väljas som från början är okänd. *Conditional Summation* summera lasterna i de noderna där det ger ogynnsam verkan på de utparametrar som studeras. Lasterna som kombinerades i lastgrupper var förutom stödförskjutning: temperaturgradienterna för brobana respektive ramben, jämnt fördelad temperaturkomponent, bromskraft i olika riktningar, trafiklast och överlast.

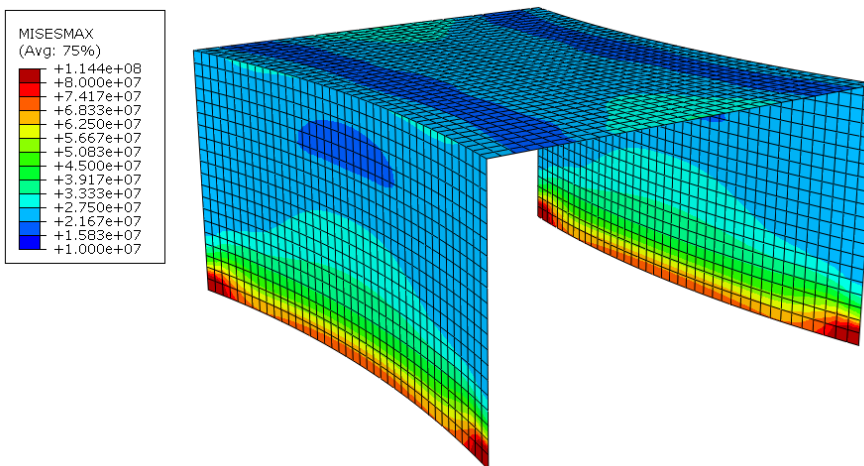
Variabla laster var dominerande och därför användes lastkombination STR-B som beskrivits i avsnitt 2.3.

6.4 Resultat

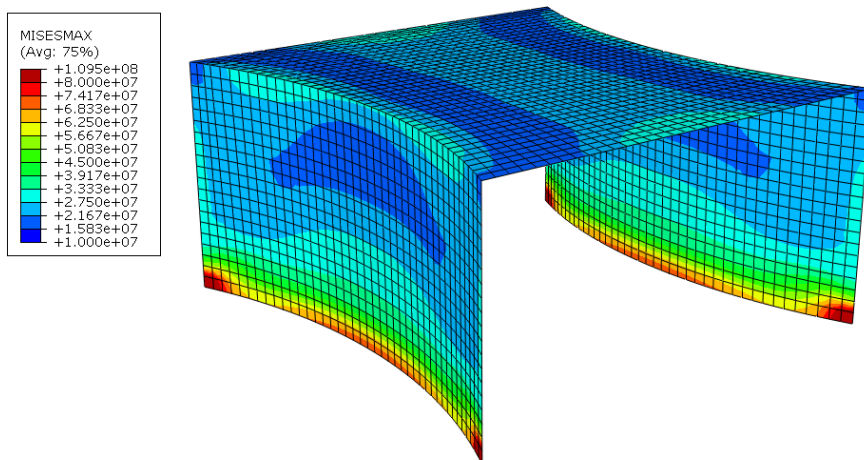
För att undersöka hur spänningsfördelningen påverkas av radien plottades 3D bilder av de tre broarna. von Mises effektivspänning visas för värsta kombinationen av laster. Detta visas i Figur 6.4-1, 6.4-2 respektive 6.4-3. Alla figuren är plottade i samma färgskala. Skalan är begränsad uppåt trots att viss spänning överstiger färgskalan. Detta gjordes för att tydligare visa hur spänningen varierade för respektive bro.



Figur 6.4-1 Spänningsfördelning för rak bro



Figur 6.4-2 Spänningsfördelning för bro med krökningsradie 40 m



Figur 6.4-3 Spänningsfördelning för bro med krökningsradie 20 m

6.5 Slutsats

Spänningsfördelningen är olika för de studerade broarna. Om rambenen utformades krökta erhålls en ökad spänning vid infästningen mellan rambenen och brobaneplattan. Spänningen ökade även i rambenen och vid grundinfästningen. Vilket lastfall som hade störst inverkan på den ökade spänningen då lasterna kombineras var svårt att dra slutsatser om. Det beror på komplexiteten, då geometrin förändras påverkas också vissa laster. Om rambenen utformades med radie ökade både rambenens area, (vilket påverkade applicerat jordtryck) och brobaneplattans yta. En större brobaneplatta gav bland annat större trafiklast och egentyngd.

Utifrån analyserna kan konstateras att spänningarna ökade i broarna med minskad krökningsradie. Spänningsökningarna var dock inte så stora att spänningarna inte verkade vara hanterbara.

Alla broar hade störst spänning vid grundinfästningen. Modelleringen av denna på annat sätt än enbart fast inspänning undersöks i nästa kapitel.

Kapitel 7

Modellering av grundinfästning

Syftet med kapitlet är att beskriva olika modelleringsstrategier som kan användas för att beskriva grundinfästningen. Meningen är att visa modelleringssätt som minskar de stora tvångskräfterna som uppkommer då grunden modelleras som fast inspänd. De olika strategierna jämförs och fördelar och nackdelar diskuteras.

Vid exempelvis krymplaster uppkommer stora tvångskräfter vid infästningen då denna modelleras som fast inspänd. Syftet i denna studie var att utreda hur grundinfästningen kan modelleras och på så sätt få en mer realistisk spänningsfördelning. I verkligheten kommer även grundplattorna att påverkas av temperaturförändringar och krympning och på så sätt verka som ett mer elastiskt upplag. I detta kapitel beaktades endast lastfallet krympning.

För att undersöka ett sätt att modellera infästningen vid grunden utvärderades fyra metoder som på olika sätt tillåter rörelser i krökningens riktning. De metoder som undersöktes var låsning i cylindriskt koordinatsystem, modellering med balk utan stångverkan, modellering av hela grundplattan och modellering då grundplattan ersattes av en balk. Dessa jämfördes med en plattrambro med krökta ramben där rotation och förskjutningar var låsta i alla riktningar vid grunden.

7.1 Cylindriskt koordinatsystem

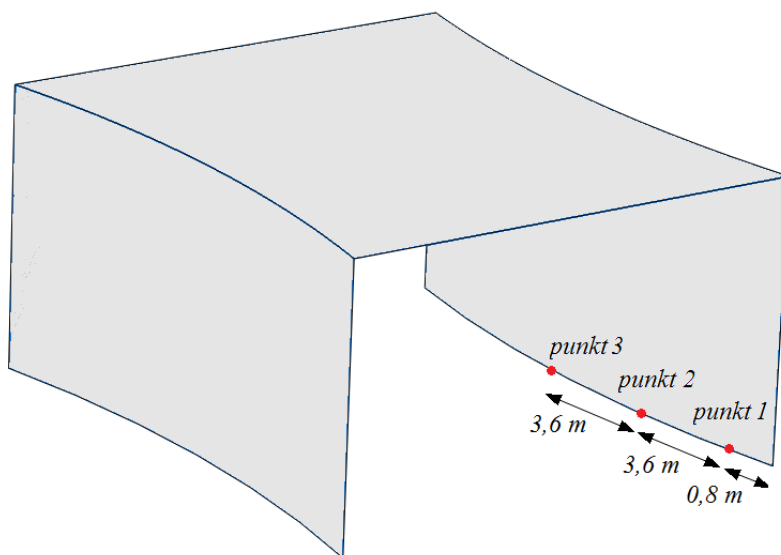
I BRIGADE/plus kan lokala koordinatsystem med annan form än vanliga rektangulära skapas. Cylinderformade koordinatsystem kan skapas och det är då möjligt att bestämma upplagsvillkor som är orienterade enligt dessa.

7.1.1 Metod

Hur tvångskrafterna påverkas då upplaget modellerades låst i ett cylindriskt koordinatsystem hur utretts. Detta gjordes genom att jämföra spänningar i punkter vid infästningen då upplaget modellerades som en fast inspänning och då grundinfästningen låstes i ett cylindriskt koordinatsystem. Rörelser låstes i radiell riktning medan modellen var fri att röra sig i tangentiell riktning. Lasten som användes vid jämförelsen var krympning. Bron som studerades är plattrambrom med krökta ramben som beskrivits i avsnitt 4.1. Samma materialegenskaper användes som beskrivits i avsnitt 4.2.

7.1.2 Resultat

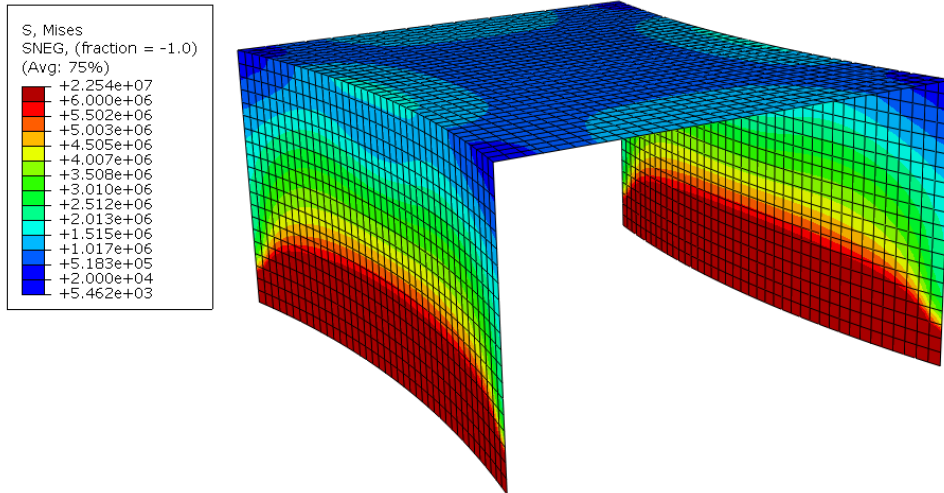
För att studera hur spänningen påverkades vid grundinfästningen undersöktes von Mises effektivspänning. Spänningen studerades i tre punkter längs grundinfästningen. Punkterna valdes enligt avsnitt 4.5 och visas i Figur 7.1-1. Resultaten från de båda infästningsmetoderna redovisas i Tabell 7-1. Spänningsfördelningen från modellen som var fast inspänd visas i Figur 7.1-2. Spänningsfördelningen för modellen som var låst i cylindriskt koordinatsystem visas i Figur 7.1-3.



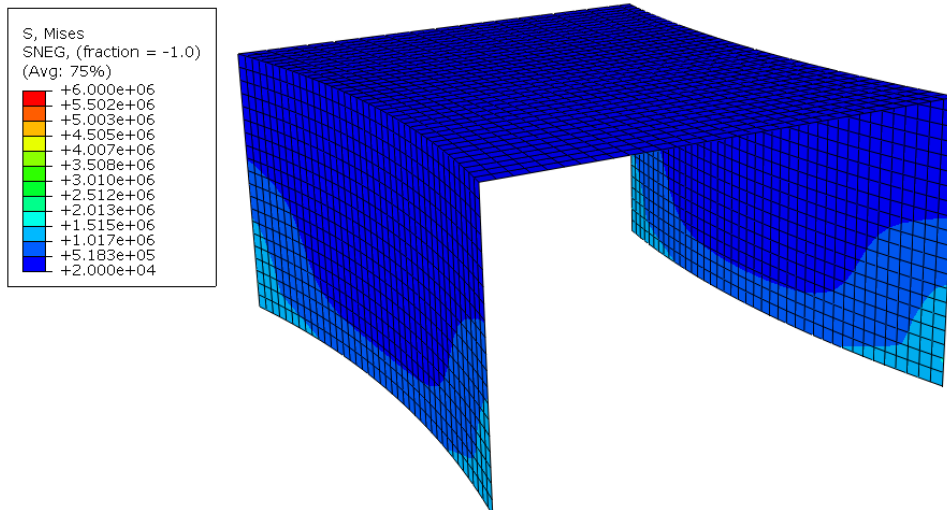
Figur 7.1-1 Studerade punkternas placering

Tabell 7-1 von Misesspänning [kPa], för olika infästningsalternativ

Grundinfästning	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3
Fast inspänning	18 270	17 040	18 100
Låst i cylindriskt koordinatsystem	1 428	956,1	841,8



Figur 7.1-2 Spänningsfördelningen då grundinfästningen är fast inspänd



Figur 7.1-3 Spänningsfördelningen då grundinfästningen är låst i ett cylindriskt koordinatsystem

7.1.3. Diskussion av resultat

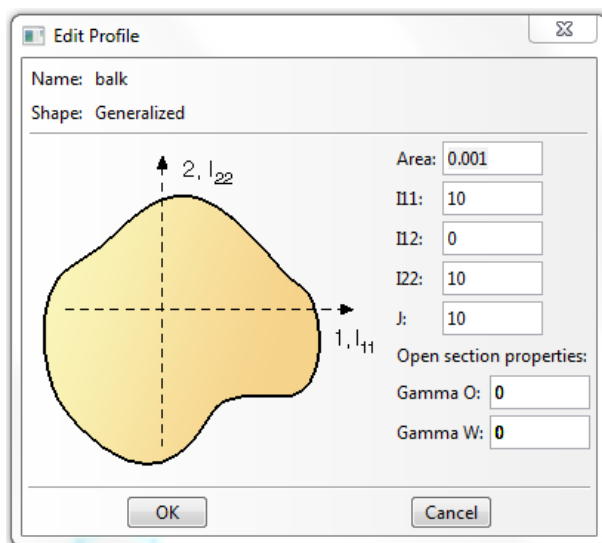
Då grundinfästningen modellerades så att rörelser tilläts i rambenens riktning men låstes radiellt andra minskade spänningen i grunden markant. Vid jämnt utbredda temperaturlaster är det troligt att grundinfästningen även den påverkas av viss temperaturförändring. Dock är det inte sannolikt att detta innebär att rörelsemotståndet i rambenets riktning försvinner helt.

7.2 Balk utan stångverkan

Ett annat sätt att minska spänningen vid grundinfästningen är att modellera vartdera rambenet som fast inspänd i en fiktiv balk utan stångverkan. Balken som skapades var mycket styv i alla riktningar utom i längdled. Detta kan åstadkommas genom att i BRIGADE/plus skapa en generaliserad balk där användaren själv kan definiera tröghetsmoment och area. Fördelen med denna metod är att det går att skapa mer generella geometrier som inte behöver följa en kontinuerlig radie.

7.2.1 Metod

En generaliserad balk skapades och gavs egenskaper som visas i Figur 7.2-1. Meningen var att arean skulle vara så pass liten att balkens stångverkan var försumbar men böj- och vridstyvheten vara stor.

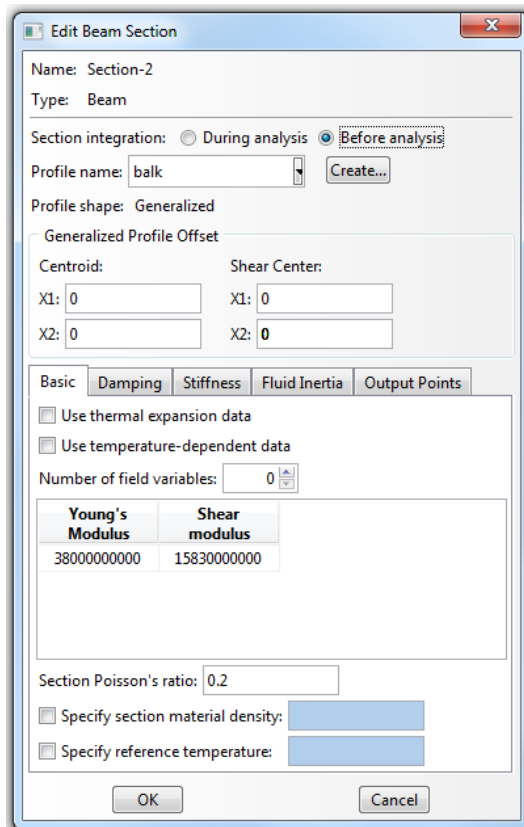


Figur 7.2-1 Egenskaper för använd balkprofil

För att analysen ska kunna genomföras ska integreringen för sektionen ske före analysen. Därför definieras materialegenskaperna i detta skede. Det som skall anges är elasticitets- och skjuvmodul. Dessa hänger samman enligt sambandet som beskrivs i ekvation 7.1.

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (7.1)$$

Där E är elasticitetsmodul, G är skjuvmodul och ν är Poissons tal. Skjuvmodulen beräknades fram med materialegenskaperna som definierades tidigare i avsnitt 4.2. Egenskaper som användes i analyserna visas i Figur 7.2-2. Balkarna sattes sedan fast i rambenen med kommandot *Tie* vilket motsvarar en fast inspänning. Rörelser i mittpunkten på balken låstes sedan för rörelser och rotationer i alla riktningar.



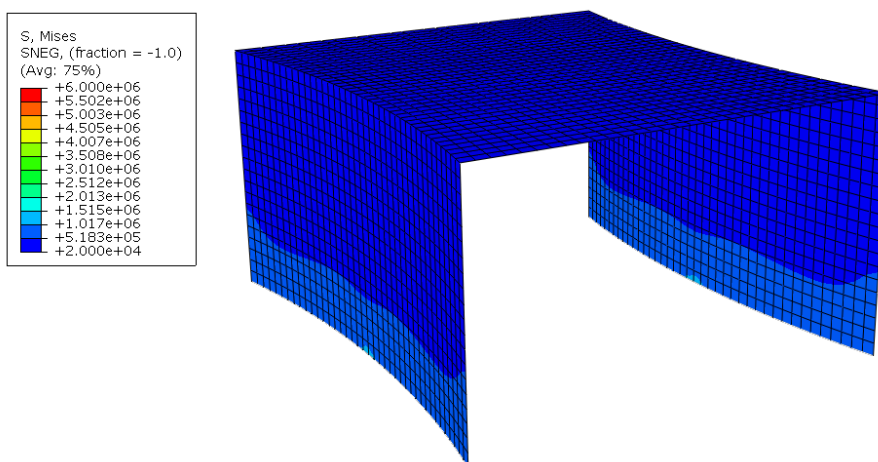
Figur 7.2-2 Materialegenskaper för balk utan stångverkan

7.2.2 Resultat

Resultat från modelleringen med balken utan stångverkan och modellen där rambenet var fast inspänt visas för de tre studerade punkterna i Tabell 7-2. En översikt över spänningsfördelningen visas i Figur 7.2-3.

Tabell 7-2 von Misesspänning [kPa], för olika infästningsalternativ

Grundinfästning	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3
Fast inspänning	18 270	17 040	18 100
Balk utan stångverkan	646,5	789,1	1 119



Figur 7.2-3 Spänningsfördelning för modell inspänd i en balk utan stångverkan

7.2.3. Diskussion av resultat

Spänningen vid grundinfästningen minskade markant. Det finns en viss spänningskoncentration i punkten som är låst. Även här är det tveksamt om grundplattans stångverkan helt kan negligeras. Fördelar med denna metod var att graden av stångverkan enkelt kan justeras och att rambenen kan ha godtycklig geometri.

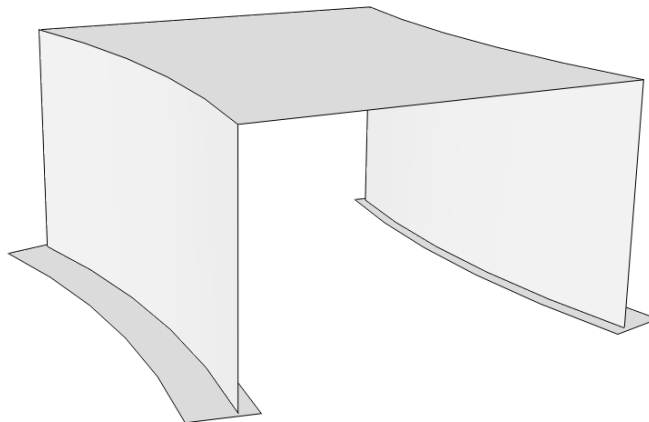
7.3 Grundplatta

Ytterligare ett sätt att modellera grundinfästningen är att modellera grundplattan som bron står på. På detta sätt inkluderas effekten av den stångverkan som grundplattan faktiskt har.

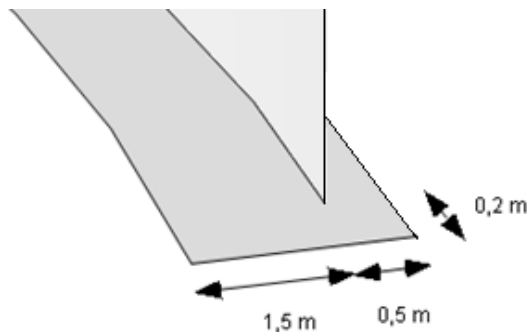
7.3.1 Metod

Grundplattan som modellerades följde rambensens krökning. Denna visas i Figur 7.3-1. Plattan var av betong med samma egenskaper som bronns övriga delar. Dimensionerna på grundplattan visas nedan i Figur 7.3-2. Tjockleken på grundplattan var 0,4 m.

Jordtrycket inkluderades genom ett nedåtriktat tryck på grundplattan. På utsidan av bron verkade jordtryck från 8 m ovanliggande jord med tungheten 19 kN/m^3 , vilket motsvarade ett tryck på 152 kN/m^2 . På insidan av grundplattan antogs en jordhöjd på 0,5 m. Det motsvarade ett jordtryck på 8 kN/m^2 . För att undvika stelkropps rörelser låstes grundplattan fast i en punkt mitt på grundplattan. I modelleringen applicerades krympning även på grundplattan.



Figur 7.3-1 Bro på grundplatta



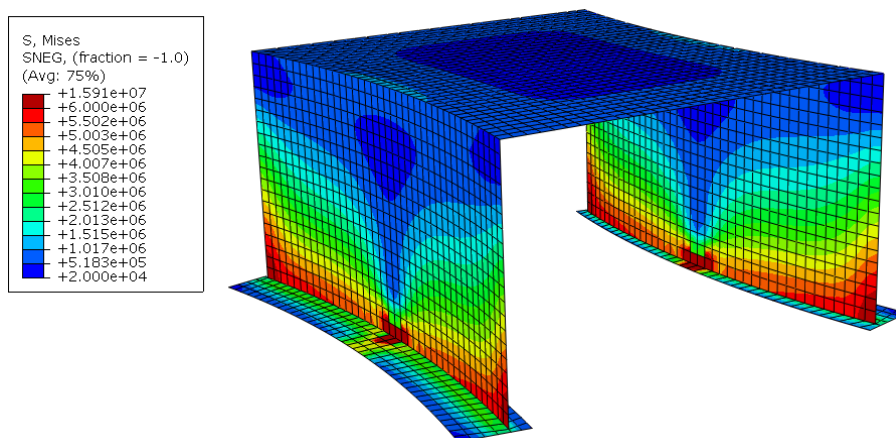
Figur 7.3-2 Grundplatta med måttsättning

7.3.2 Resultat

Resultat från modelleringen med grundplattan och resultat från modelleringen där grundinfästningen sattes som fast inspänd visas i Tabell 7-3. Spänningsfördelningen kan ses i Figur 7.3-4.

Tabell 7-3 von Misesspänning [kPa], för olika infästningsalternativ

Grundinfästning	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3
Fast inspänning	18 270	17 040	18 100
Med grundplatta	3 820	3 615	11 100



Figur 7.3-4 Spänningsfördelning för modell med grundplatta

7.3.3. Diskussion av resultat

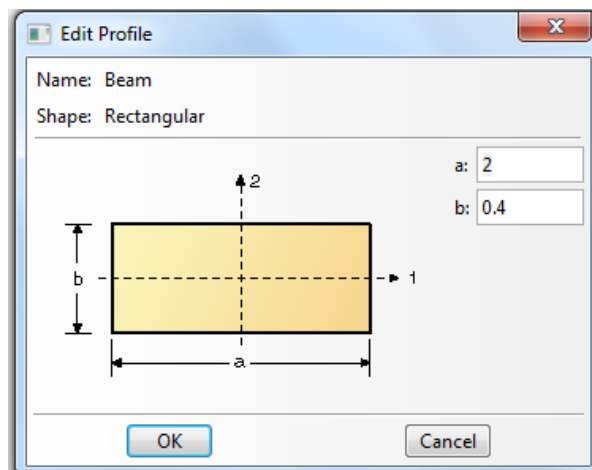
Om grundinfästningen modellerades med grundplatta som sedan låstes fast minskade tvånget markant utom i den låsta punkten. Det kunde dock konstateras att även där minskade spänningen, bara inte lika mycket. Spänningen i infästningspunkten var ca 60 % av det ursprungliga. Fördelen med denna metod var att var krymp- eller temperaturlasters ska verka kan varieras. Med andra ord kan den vara lämplig om gjutfogarna placeras mellan grundplattan och rambenet.

7.4 Grundplattan som balk

Om grundplattan går att modellera som en balk har undersökts. Detta har gjort för att kontrollera om det ger liknande spänningar som modelleringen med grundplattan. Förhoppningen var då att hitta ett enklare sätt att modellera grundinfästningen men som gav liknande resultat.

7.4.1 Metod

Grundplattan har ersatts med en balk med geometri enligt Figur 7.4-1. En förenkling av grundplattan har därmed gjorts. Modelleringen sker utan inverkan om omgivande jordtryck på grundplattan. Faktumet att grundplattan inte är centriskt fixerad i rambenen bortsågs från. Balken är som tidigare låst i mittpunkten.



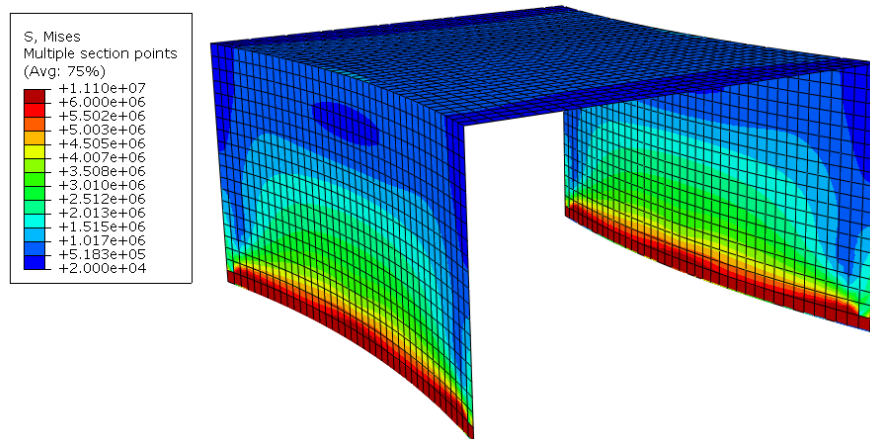
Figur 7.4-1 Geometri för grundplattan modellerad som balk

7.4.2 Resultat

Resultat från modelleringen med grundplattan ersatt av en balk visas för de tre studerade punkterna i Tabell 7-4. En översikt över spänningsfördelningen visas i Figur 7.4-2.

Tabell 7-4 von Misesspänning [kPa], för olika infästningsalternativ

Grundinfästning	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3
Fast inspänning	18 270	17 040	18 100
Grundplatta som balk	4 298	6 864	7 583



Figur 7.4-2 Spänningsfördelning för modell med grundplatta modellerad som en balk

7.4.3 Diskussion av resultat

Om grundplattan ersattes av en balk fås betydligt jämnare spänningsfördelning. Detta beror på att spänningen visas för hela balken och inte i enskilda noder som i fallet där grundplattan modellerades. Om man istället studerade medelvärdet för de tre studerade punkterna då grundplattan modellerades och då den ersattes med balk blev medelspänningen densamma. Trots att denna metod gav jämförelsevis stora spänningar är de bara 40 % av spänningarna vid fast inspänning.

7.5 Jämförelse mellan olika metoder

Fördelen med metoden att låsa grundinfästningen i ett cylindriskt koordinatsystem är att det var relativt enkelt att modellera. Det går på detta sätt att använda funktionen *Spring-to-Ground*. Funktionen möjliggör att fjädrar som är orienterade i rambensens krökningsriktning kan anslutas vid

grundinfästningen. Begränsningen med detta är dock att det endast kan användas om rambenen har kontinuerlig radie.

Fördelen med att modellera med en fiktiv balk är att rambenens form kan vara godtycklig och egenskaperna på balken lätt kan ändras. Nackdelen är att det kan upplevas som mer omständligt.

Fördelen med att även ha med grundplattan i modelleringen är att grundplattans faktiska elastiska egenskaper inkluderades. Resultaten från modellen med grundplattan visar att större spänningskoncentrationer finns. Det är dock tveksamt om dessa uppkommer i så stor grad. Att modellera grundplattan och ansluta den i marken med funktionen *Spring-to-Ground* skulle kunna göra att spänningen sprids jämnare över hela plattan.

Att ersätta grundplattan med en balk med liknande egenskaper som grundplattan gav en jämnare spänningsfördelning än då grundplattan modellerades. Fördelen med denna modelleringsstrategi är att det var enkelt att variera egenskaperna för balken. Denna strategi gav klart lägre spänningsnivåer än analysen med fast inspänning.

En sammanställning för de olika alternativen redovisas nedan i Tabell 7-5.

Tabell 7-5 von Misesspänning [kPa], för olika infästningsalternativ

Grundinfästning	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3
Fast inspänning	18 270	17 040	18 100
Låst i cylindriskt koordinatsystem	1 428	956,1	841,8
Balk utan stångverkan	646,5	789,1	1 119
Med grundplatta	3 820	3 615	11 100
Grundplatta som balk	4 298	6 864	7 583

7.6 Slutsats

Det finns flera sätt att modellera grundinfästningen. De sätt som beskrivits i detta kapitel minskade alla tvångskrafterna jämfört med modellen där grundinfästningen låstes fast. De olika modelleringssätten hade alla fördelar och nackdelar som diskuterats i föregående avsnitt. Utifrån detta arbete rekommenderades inget specifikt modelleringssätt utan syftet med detta kapitel har varit att visa några typer som finns att tillgå.

Kapitel 8

Slutsatser

I detta kapitel sammanfattas slutsatserna som dragits under studien. Förslag på fortsatt arbete ges.

Detta arbete har visat att plattrambron med krökta ramben har ett verknings sätt som skiljer sig på flera sätt från bron med raka ramben.

Laster som har ogynnsam effekt på snittkrafter då rambenen kröks är krympning samt temperaturlaster. Lastfall som har positiv effekt på snittkrafterna är vilojordtryck, broms- och accelerationslast och ökat jordtryck till följd av överlast. Krympning och jämnt utbredd temperatursänkning har visats vara de som mest ogynnsam inverkan på snittkrafterna, dessa samverkar dessutom.

I parameterstudien som har utförts har ett samband mellan minskad krökningsradie och ökad effektivspänning visats. Det gäller för knutpunkten mellan brobanan och ramben på mitten av bron. Spänningen gav upphov till förstörade snittkrafter. Snittkrafterna som är mest beroende av radien var normalkraften i x- och y-riktning. Snittkrafter som inte påverkades av krökningsradien är skjuvning, tvärkraft i y-led samt moment i x-led. Effektivspänningen i knutpunkten var även beroende av brobaneplattans längd- och breddförhållande. En bredare brobana gav större spänning. Om längd- breddförhållandet var stort (> 2) kunde effekten av rambenens krökning försummas.

Spänningsfördelningen i en bro när den belastades med lastkombinerade värden varierade om rambenen utformades krökta jämfört med om de utformades raka. Spänningen ökade främst vid infästningen mellan brobaneplatta och ramben, i rambenen och vid grundinfästningen. Vilka laster som påverkades mest och hur de samverkade eller motverkade var svårt att dra slutsatser om från studien som har utförts. Detta beror på problemets komplexitet.

I studien har flera sätt att modellera grundinfästningen beskrivits. Fördelar och nackdelar finns för alla metoder. Om grundinfästningen modellerades som fast inspänd gav det upphov till betydligt större tvångskrafter än om något av de andra modelleringsätten användes.

Denna studie har belyst några av problemen som kan uppkomma då rambenen på plattrambroar utformas krökta. Det har även visats att trots problem med ökade spänningar i bron är de till synes hanterbara.

Förslag på fortsatt arbete

Då arbetet har genomförts under en begränsad tid finns det fortfarande saker att utreda. Följande förslag på fortsatt arbete ges:

- Studera snittkrafter vid fler punkter
- Variera fler parametrar, exempelvis tjocklek, rambenshöjd etc.
- Verifiera eller på något sätt dra slutsatser om metoderna för grundinfästningens lämplighet
- Utreda hur armeringsbehovet påverkas av krökningsradien
- Kontrollera armeringsbehov och spänningsfördelning i bruksgränstillstånd

Referenser

Litteratur

Ottosen, Niels & Petersson, Hans (1992) *Introduction to the finite element method*, England: Pearson Education Limited

Sundquist, Håkan (2000) *Infrastrukturkonstruktioner*, Stockholm: Institutionen för byggkonstruktion KTH

Statens Geotekniska Institut, (SGI) (2008) *Jords egenskaper*, Linköping: Statens Geotekniska Institut

Dassault Systèmes Simulia Corp. (2010) *Abaqus Analysis User's Manual version 6.10*

Standarder och normer

SS-EN 1991-1-5 (2005) *Eurocode 1: Laster på bärverk, Del 1-5: Allmänna laster – Temperaturpåverkan*, Swedish Standard Institute

SS-EN 1991-2 (2005) *Eurocode 1: Laster på bärverk, Del 2: Trafiklaster på broar*, Swedish Standard Institute

SS-EN 1992-1-1 (2005) *Eurocode 2: Dimensionering av betongkonstruktioner, Del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader*, Swedish Standard Institute

SS-EN 1992-2 (2005) *Eurocode 2: Dimensionering av betongkonstruktioner, Del 2: Broar*, Swedish Standard Institute

Vägverket (2009) *TK Bro*, Borlänge: Vägverket

Vägverket (2009) *Vägverkets författningssamling VVFS 2009:19*, Vägverket

Bildkällor

BaTMan, Bridge and Tunnel Management <http://batman.vv.se> –Tillgängligt 22/8-2011

Appendix

A - Resultat plattrambro med raka ramben

Resultat från de olika karakteristiska lasterna redovisades separat för att identifiera vilka av dessa som gav upphov till de största snittkrafterna. Snittkrafterna från de karakteristiska lasterna redovisades vid punkter på specifika linjer. Dessa linjer visas i Figur A-1 och är placerade enligt följande:

Linje 1: 0,8 m från brons ytterkant

Linje 2: 4,4 m från brons ytterkant

Linje 3: 8,0 m från brons ytterkant, det vill säga på mitten av bron



Figur 4.5-1 Linjernas placering

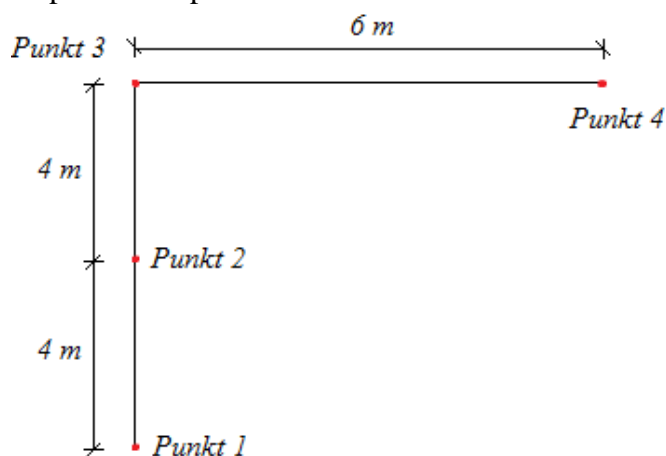
Punkterna på linjerna visas i Figur A-2 och är placerade enligt följande:

Punkt 1: vid grundinfästningen

Punkt 2: i mitten på rambenet

Punkt 3: i hörnet mellan ramben och brobana

Punkt 4: i mitten på brobaneplattan



Figur A-2 Punkternas placering på valda linjer

Resultat från de karakteristiska lasterna visas nedan i Tabell A-1.

Tabell A-1 Resultat från karakteristiska laster

Last	Punkt	My [kNm/m]	Mx [kNm/m]	Vx [kN/m]
Egentyngd				
Linje 1	1	53,0	9,9	-29,3
	2	-28,2	-1,1	-17,9
	3	-103,0	-16,5	22,0
	4	111,1	5,1	0
Linje 2	1	49,5	9,9	-19,7
	2	-27,0	-4,7	-20,2
	3	99,1	-19,9	24,0
	4	107,5	17,6	0
Linje 3	1	49,2	9,9	-19,9
	2	-26,9	-5,2	-20,1
	3	-98,3	-19,7	24,5
	4	107,1	20,2	0

Viljordtryck				
Linje 1	1	-214,3	-41,0	204,2
	2	106,4	7,3	5,1
	3	-27,3	-5,0	-24,0
	4	-33,3	-0,9	0
Linje 2	1	-205,6	-41,2	174,8
	2	103,7	19,6	-6,0
	3	-26,7	-5,4	-26,5
	4	-32,0	-4,4	0
Linje 3	1	-206,0	-41,2	175,9
	2	104,0	20,9	6,0
	3	-27,4	-5,5	-27,0
	4	-31,7	-5,5	0

Stödförskjutning Enkelsidig, Vertikal ⁽¹⁾				
Linje 1	1	-20,3	-3,5	2,3
	2	-23,1	-1,0	0
	3	-20,6	-2,9	1,7
	4	0	0	3,1
Linje 2	1	-23,5	-4,7	0,6
	2	-22,5	-4,2	0
	3	-22,9	-4,5	1,8
	4	0	0	3,7
Linje 3	1	-23,2	-4,6	0
	2	-22,7	-4,7	0
	3	-22,6	-4,5	1,9
	4	0	0	3,8

(1) Stödförskjutning har föreskrivits till motstående sida än den brohalva som studerades

Last	Punkt	My [kNm/m]	Mx [kNm/m]	Vx [kN/m]
Stödförskjutning Enkelsidig, Horisontell ⁽²⁾				
Linje 1	1	56,0	9,9	-17,9
	2	18,9	0,8	-9,0
	3	-21,6	-3,2	-4,6
	4	-25,2	-0,7	0
Linje 2	1	60,1	12,0	-11,4
	2	18,2	3,3	-10,8
	3	-24,0	-4,8	-5,1
	4	-24,2	-3,6	0
Linje 3	1	59,9	12,0	-11,0
	2	18,3	3,6	-11,0
	3	-24,0	-4,8	-5,3
	4	-24,0	-4,4	0

Dubbelsidig, Horisontell				
Linje 1	1	111,9	19,9	-35,9
	2	37,8	1,6	-18,1
	3	-43,2	-6,4	-9,2
	4	-50,3	-1,4	0
Linje 2	1	120,3	24,1	-22,8
	2	36,5	6,6	-21,6
	3	-47,8	-9,6	-10,2
	4	-48,4	-7,1	0
Linje 3	1	119,8	24,0	-22,0
	2	36,5	7,3	-21,8
	3	-48,2	-9,6	-10,4
	4	-48,1	-8,8	0

Krympning	Linje 1	1	-20,6	-3,6	6,3
		2	-7,2	-0,2	3,5
		3	5,7	0,6	4,4
		4	10,9	0,8	0
Linje 2	1	-23,5	-4,7	4,7	
	2	-6,8	-0,9	4,4	
	3	10,9	5,0	1,5	
	4	9,6	4,8	0	
Linje 3	1	-23,8	-4,8	4,6	
	2	-6,7	-1,1	4,5	
	3	10,8	4,8	1,9	
	4	9,2	6,3	0	

(2) Stödförskjutning har föreskrivits till samma sida som den brohalva som studerades

Last		Punkt	My [kNm/m]	Mx [kNm/m]	Vx [kN/m]
Trafiklast, Max	Linje 1	1	103,2	19,4	4,8
		2	1,4	0,8	1,7
		3	9,5	3,1	115,6
		4	299,5	32,5	93,6
	Linje 2	1	76,2	15,3	1,3
		2	0,6	1,9	1,0
		3	6,3	4,9	118,2
		4	240,3	101,5	111,7
	Linje 3	1	63,3	12,6	0,1
		2	0,2	2,5	0
		3	2,9	3,7	112,1
		4	220,3	111,6	103,8

Trafiklast, Min	Linje 1	1	-12,5	-2,3	-59,9
		2	-57,1	-3,7	-33,4
		3	-235,8	-39,1	-57,7
		4	0	-6,3	-92,8
	Linje 2	1	-6,7	-1,3	-30,7
		2	-46,2	-12,1	-31,7
		3	-172,2	-34,7	-29,9
		4	0	-26,7	-111,4
	Linje 3	1	-0,8	-0,1	-26,7
		2	-38,1	-13,7	-26,8
		3	-154,6	-30,4	-26,0
		4	0	35,8	-10,4

Broms, kraft i längdriktn. ⁽³⁾					
Linje 1		1	-48,2	-8,6	17,4
		2	-8,9	-0,4	9,2
		3	32,2	4,9	2,2
		4	0	0	-4,8
Linje 2		1	-50,6	-10,1	11,2
		2	-8,6	-1,6	10,9
		3	33,2	6,7	2,5
		4	0	0	-5,7
Linje 3		1	-50,4	-10,1	11,0
		2	-8,7	-1,8	10,9
		3	33,2	6,6	2,6
		4	0	0	-5,8

(3) Bromskraften verkade i riktning från den brohalva som studerades

Last	Punkt	My [kNm/m]	Mx [kNm/m]	Vx [kN/m]
Broms, sidokraft				
Linje 1	1	0	0	0
	2	0	0	0
	3	0	0	0
	4	0	0	0
Linje 2	1	0	0	0
	2	0	0	0
	3	0	0	0
	4	0	0	0
Linje 3	1	0	0	0
	2	0	0	0
	3	0	0	0
	4	0	0	0

Broms, längd- och sidokraft				
Linje 1	1	-48,2	-8,6	17,4
	2	-8,9	-0,4	9,2
	3	32,2	4,9	2,2
	4	0	0	-4,8
Linje 2	1	-50,6	-10,1	11,2
	2	-8,6	-1,6	10,9
	3	33,3	6,7	2,5
	4	0	0	-5,7
Linje 3	1	-50,4	-10,1	11,0
	2	-8,7	-1,8	10,9
	3	33,2	6,6	2,6
	4	0	0	-5,8

Temp, jämnt utbredd, uppv				
Linje 1	1	14,8	2,6	-4,5
	2	5,2	0,2	-2,5
	3	-4,1	-0,5	-3,2
	4	-7,8	-0,6	0
Linje 2	1	16,9	3,4	-3,3
	2	4,9	0,6	-3,1
	3	-7,8	-3,6	-1,1
	4	-6,9	-3,5	0
Linje 3	1	17,1	3,4	-3,3
	2	4,8	0,8	-3,2
	3	-7,8	-3,4	-1,3
	4	-6,6	-4,6	0

Last	Punkt	My [kNm/m]	Mx [kNm/m]	Vx [kN/m]
Temp, jämnt utbredd, nedk				
Linje 1	1	-16,7	-3,0	5,1
	2	-5,9	-0,2	2,8
	3	4,6	0,5	0,7
	4	8,8	0,7	0
Linje 2	1	-19,1	-3,8	3,8
	2	-5,5	-0,7	3,6
	3	8,9	4,1	1,2
	4	7,8	3,9	0
Linje 3	1	-19,3	-3,9	3,8
	2	-5,4	-0,9	3,7
	3	8,8	3,9	2,0
	4	7,5	5,2	0

Temp, grad, brobana, uppv				
Linje 1	1	1,4	0,3	-0,2
	2	3,6	0,4	0,9
	3	1,3	4,6	7,0
	4	10,1	1,5	0
Linje 2	1	-1,0	-0,2	1,5
	2	3,8	1,4	1,5
	3	10,4	10,3	-0,2
	4	7,8	8,6	0
Linje 3	1	-1,8	-0,4	1,8
	2	4,2	1,3	1,6
	3	10,7	10,4	1,5
	4	7,4	11,0	0

Temp, grad, brobana, nedk				
Linje 1	1	-1,0	-0,2	0,1
	2	-2,6	-0,3	-0,7
	3	-1,0	-3,3	-5,1
	4	-7,3	1,1	0
Linje 2	1	0,7	0,1	-1,1
	2	-2,8	-1,0	-1,1
	3	-7,6	-7,5	0,2
	4	-5,7	-6,2	0
Linje 3	1	1,3	0,3	-1,3
	2	-3,0	-1,0	-1,2
	3	-7,8	-7,6	0
	4	-5,4	-8,0	0

Last	Punkt	My [kNm/m]	Mx [kNm/m]	Vx [kN/m]
Temp, grad, ramben, uppv				
Linje 1	1	-12,0	-15,0	11,3
	2	-16,7	-3,3	2,4
	3	-1,2	-6,3	10,6
	4	-5,0	-0,3	0
Linje 2	1	-28,4	-20,9	5,4
	2	-14,2	-16,0	2,9
	3	-6,5	-12,1	0,4
	4	-4,9	1,4	0
Linje 3	1	-27,6	-20,7	3,4
	2	-14,7	-18,3	3,0
	3	-5,5	-12,1	0,8
	4	-5,2	-1,3	0

Temp, grad, ramben, nedk				
Linje 1	1	12,0	15,0	-11,3
	2	16,7	3,3	-2,4
	3	1,2	6,3	-10,6
	4	5,0	0,3	0
Linje 2	1	28,4	20,9	-5,4
	2	14,2	16,0	-2,9
	3	6,5	12,1	-0,4
	4	4,9	1,4	0
Linje 3	1	27,6	20,7	-3,5
	2	14,7	18,3	-3,0
	3	5,5	12,1	-0,8
	4	5,2	1,3	0

Överlast, enkelsidig ⁽⁴⁾				
Linje 1	1	-266,1	-49,0	153,0
	2	39,6	3,4	38,3
	3	36,2	9,3	-18,3
	4	-12,9	-0,3	-11,0
Linje 2	1	-268,4	-53,7	116,8
	2	38,8	7,4	44,8
	3	70,5	14,1	-20,0
	4	-12,4	-1,7	-13,2
Linje 3	1	-268,0	-53,6	116,7
	2	38,8	7,8	45,0
	3	79,8	14,0	-20,1
	4	-12,2	-2,1	-13,4

(4) Den enkelsidiga överlasten verkade på samma brohalva som studerades

Last	Punkt	My [kNm/m]	Mx [kNm/m]	Vx [kN/m]
Överlast, dubbelsidig				
Linje 1	1	-125,8	-23,9	103,4
	2	69,9	4,7	12,3
	3	-19,5	-3,7	-25,8
	4	-25,7	-0,7	0
Linje 2	1	-120,3	-24,1	84,9
	2	68,1	12,8	14,0
	3	-19,1	-3,9	-28,2
	4	-24,7	-3,4	0
Linje 3	1	-120,4	-24,1	85,6
	2	68,3	13,7	14,0
	3	-19,7	-3,0	-28,6
	4	-24,5	-4,3	0

B - Resultat plattrambro med krökta ramben

Resultat från de olika karakteristiska lasterna redovisades separat för att identifiera vilka av dessa som gav upphov till de största snittkrafterna. Snittkrafterna från de karakteristiska lasterna redovisades vid punkter på specifika linjer. Dessa linjer visas i Figur B-1 och är placerade enligt följande:

Linje 1: 0,8 m från brons ytterkant

Linje 2: 4,4 m från brons ytterkant

Linje 3: 8,0 m från brons ytterkant, det vill säga på mitten av bron



Figur B-1 Linjernas placering

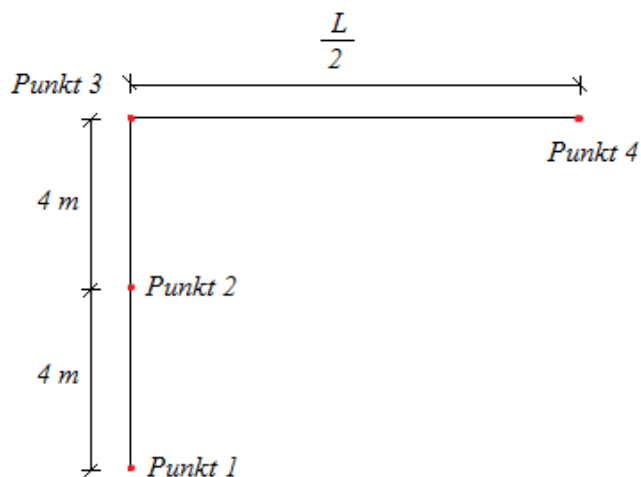
Punkterna på linjerna visas i Figur B-2 och är placerade enligt följande:

Punkt 1: vid grundinfästningen

Punkt 2: i mitten på rambenet

Punkt 3: i hörnet mellan ramben och brobana

Punkt 4: i mitten på brobaneplattan



Figur B-2 Punkternas placering på valda linjer

Där L betecknar brons spännvidd, som på grund av rambenens krökning är varierande.

Resultat från de karakteristiska lasterna visas nedan i Tabell B-1.

Tabell B-1 Resultat från karakteristiska laster

Last		Punkt	My [kNm/m]	Mx [kNm/m]	Vx [kN/m]
Egentyngd	Linje 1	1	48,1	9,0	-25,9
		2	-25,0	-1,5	-17,5
		3	-107,9	-18,2	11,1
		4	113,8	4,5	3,7
	Linje 2	1	39,4	7,9	-13,5
		2	-19,2	-28,0	-18,8
		3	-116,1	-27,0	-21,8
		4	110,1	10,8	4,3
	Linje 3	1	35,7	7,2	-11,2
		2	-16,7	-1,4	-17,9
		3	-114,3	-25,8	23,1
		4	109,2	9,4	4,4

Viljordtryck	Linje 1	1	-196,1	-37,7	192,8
		2	94,3	7,6	3,0
		3	-24,8	-4,0	-21,5
		4	-24,9	-0,2	0,1
	Linje 2	1	-171,6	-34,4	154,4
		2	81,3	13,4	2,4
		3	-18,9	-1,6	20,2
		4	-24,4	-0,2	0
	Linje 3	1	-163,8	-32,8	149,4
		2	76,2	11,7	1,5
		3	-17,4	-1,6	-19,7
		4	-24,3	0,2	0

Stödförskjutning, Enkelsidig, Vertikal ⁽¹⁾					
Linje 1	1	-3,9	-0,6	-2,7	
	2	-16,3	-0,8	-3,1	
	3	-25,4	-3,5	-3,0	
	4	-2,4	-0,1	5,3	
Linje 2	1	-6,3	-1,3	-1,0	
	2	-14,9	-3,1	-4,2	
	3	-39,0	-9,2	0,6	
	4	-2,2	-0,6	6,4	
Linje 3	1	-6,8	-1,4	0,1	
	2	-14,4	-3,1	-4,8	
	3	-41,7	-10,1	1,3	
	4	-2,2	-0,7	7,0	

(1) Stödförskjutning har föreskrivits till motstående sida än den brohalva som studerades

Last	Punkt	My [kNm/m]	Mx [kNm/m]	Vx [kN/m]
Stödförskjutning, Enkelsidig, Horisontell ⁽²⁾				
Linje 1	1	52,6	9,4	-14,9
	2	20,4	1,0	-7,7
	3	-17,3	-2,5	-5,5
	4	-25,2	-0,5	0
Linje 2	1	59,4	11,9	-13,5
	2	19,4	3,8	-8,4
	3	-24,2	-4,2	-7,8
	4	-24,6	-3,0	0
Linje 3	1	61,2	12,2	-16,2
	2	19,2	3,7	-7,7
	3	-25,5	-4,7	-9,5
	4	-24,7	-3,8	0

Dubbelsidig, Horisontell				
Linje 1	1	105,1	18,7	-29,7
	2	40,8	2,0	-15,5
	3	-34,7	-5,0	-11,0
	4	-50,4	-1,1	0
Linje 2	1	118,8	23,8	-27,1
	2	39,0	7,6	-16,7
	3	-48,5	-8,5	-15,6
	4	-49,3	-6,1	0,1
Linje 3	1	122,4	24,5	-32,4
	2	38,3	7,4	-15,4
	3	-51,0	-7,8	-18,9
	4	-49,4	-7,7	0,1

Krympning	Linje			
Linje 1	1	81,0	14,9	-111,2
	2	-52,2	0,4	2,0
	3	-0,9	0,3	10,5
	4	31,3	0,9	0,1
Linje 2	1	177,1	35,0	-217,8
	2	-87,2	-24,9	12,1
	3	31,6	7,8	19,2
	4	30,9	8,2	-0,1
Linje 3	1	213,1	42,2	-245,8
	2	-107,4	-35,4	12,3
	3	45,5	9,0	27,3
	4	31,2	12,4	-0,2

(2) Stödförskjutning har föreskrivits till samma sida som den brohalva som studerades

Last	Punkt	My [kNm/m]	Mx [kNm/m]	Vx [kN/m]
Trafiklast, Max				
Linje 1	1	99,1	18,7	57,2
	2	1,9	0,8	34,5
	3	6,3	2,8	57,6
	4	306,3	31,2	89,4
Linje 2	1	66,0	13,2	25,6
	2	1,2	3,7	31,4
	3	2,3	3,3	32,8
	4	244,5	95,8	102,2
Linje 3	1	45,4	9,1	17,6
	2	0,3	5,7	23,9
	3	0,8	2,8	29,7
	4	219,7	107,2	97,0

Trafiklast, Min				
Linje 1	1	-9,9	-1,8	-4,6
	2	-53,2	-4,4	-1,1
	3	-241,7	-43,2	-107,2
	4	-0,3	-6,2	-97,8
Linje 2	1	-6,2	-1,2	-3,2
	2	-36,3	-10,4	-0,4
	3	-201,6	-49,3	-112,7
	4	0	-36,5	-110,6
Linje 3	1	-0,8	-0,1	-2,1
	2	-24,3	-10,3	-0,1
	3	-175,2	-38,5	-118,5
	4	0	48,6	-103,8

Broms, kraft i längdriktn. ⁽³⁾				
Linje 1	1	-23,5	-4,2	7,6
	2	-5,7	-0,2	4,3
	3	14,8	2,3	5,6
	4	1,2	0	-2,6
Linje 2	1	-25,4	-5,1	6,2
	2	-5,8	-1,2	4,6
	3	19,3	3,9	2,8
	4	1,1	0,2	-3,2
Linje 3	1	-25,8	-5,2	7,0
	2	-5,9	-1,3	4,3
	3	20,0	3,7	3,5
	4	1,1	0,3	-3,3

(3) Bromskraften verkade i riktning från den brohalva som studerades

Last	Punkt	My [kNm/m]	Mx [kNm/m]	Vx [kN/m]
Broms, sidokraft				
Linje 1	1	0	0	0
	2	0	0	0
	3	0	0	0
	4	0	0	0
Linje 2	1	0	0	0
	2	0	0	0
	3	0	0	0
	4	0	0	0
Linje 3	1	0	0	0
	2	0	0	0
	3	0	0	0
	4	0	0	0

Broms, längd- och sidokraft				
Linje 1	1	-23,5	-4,2	7,6
	2	-5,7	-0,2	4,3
	3	14,8	2,3	2,6
	4	1,2	0	-2,6
Linje 2	1	-25,4	-5,1	6,2
	2	-5,8	-1,2	4,6
	3	19,3	3,9	2,8
	4	1,1	0,2	-3,2
Linje 3	1	-25,8	-5,2	7,0
	2	-5,9	-1,3	4,3
	3	20,0	3,7	3,5
	4	1,1	0,3	-3,3

Temp, jämnt utbredd, max				
Linje 1	1	65,8	-10,7	-90,3
	2	-42,4	-0,3	1,6
	3	0,8	-0,2	8,6
	4	25,4	-0,7	0,1
Linje 2	1	143,9	-25,2	-177,0
	2	-70,8	17,9	9,8
	3	25,7	-5,6	19,5
	4	25,1	-5,8	-0,1
Linje 3	1	173,2	-30,4	-199,7
	2	-87,2	25,5	10,0
	3	37,0	-6,5	22,1
	4	25,3	-8,9	-0,2

Last	Punkt	My [kNm/m]	Mx [kNm/m]	Vx [kN/m]
Temp, jämnt utbredd, min				
Linje 1	1	65,8	12,1	-90,3
	2	-42,4	0,3	1,6
	3	0,8	0,2	8,6
	4	25,4	0,8	0,1
Linje 2	1	143,9	28,5	-177,0
	2	-70,8	-20,2	9,8
	3	25,7	6,3	15,6
	4	25,1	6,6	-0,1
Linje 3	1	17,3	34,3	-199,7
	2	-87,2	-28,8	10,0
	3	37,0	7,3	22,1
	4	25,3	10,0	-0,2

Temp, grad, brobana, uppv				
Linje 1	1	7,3	1,3	-2,8
	2	-0,4	0,5	-1,0
	3	-1,5	4,6	11,5
	4	13,7	1,5	0
Linje 2	1	9,1	1,8	-3,5
	2	-2,8	-0,3	-2,2
	3	12,8	10,8	6,1
	4	11,5	8,9	-0,1
Linje 3	1	11,3	2,2	-5,8
	2	-4,3	-1,8	-2,6
	3	15,0	11,2	7,1
	4	11,0	11,9	-0,1

Temp, grad, brobana, nedk				
Linje 1	1	-5,3	-1,0	2,0
	2	0,3	-0,4	0,7
	3	1,1	-3,4	-8,3
	4	-10,0	-1,1	0
Linje 2	1	-6,6	-1,3	2,6
	2	2,0	0,2	1,6
	3	-9,4	-7,9	-4,4
	4	-8,4	-6,5	0,1
Linje 3	1	-8,2	-1,6	4,2
	2	3,1	1,3	1,9
	3	-10,9	-9,2	-5,2
	4	-8,0	-8,7	0,1

Last	Punkt	My [kNm/m]	Mx [kNm/m]	Vx [kN/m]
Temp, grad, ramben, uppv				
Linje 1	1	17,9	-9,6	-18,7
	2	-31,5	-2,9	0,2
	3	-3,0	-4,6	16,1
	4	3,7	-0,1	0,1
Linje 2	1	30,3	-9,2	-52,7
	2	-40,7	-23,7	0,8
	3	1,9	-10,3	12,5
	4	4,0	0,9	0
Linje 3	1	43,4	-6,7	-64,3
	2	-48,2	-30,2	-0,1
	3	8,0	-10,0	16,3
	4	4,0	2,2	-0,1

Temp, grad, ramben, nedk				
Linje 1	1	-17,9	9,6	18,7
	2	31,5	2,9	-0,2
	3	3,0	4,6	-16,1
	4	-3,7	0,1	-0,1
Linje 2	1	-30,3	9,2	52,7
	2	40,6	23,7	-0,8
	3	-1,9	10,3	-12,5
	4	-4,0	-0,9	0
Linje 3	1	-43,4	6,7	64,3
	2	48,2	30,2	0,1
	3	-8,0	10,0	-16,3
	4	-4,0	-2,2	0,1

Överlast, enkelsidig ⁽⁴⁾				
Linje 1	1	-177,6	-33,1	115,8
	2	42,9	4,0	21,5
	3	15,7	2,0	-17,1
	4	-7,5	0	-4,9
Linje 2	1	-168,1	-33,7	88,7
	2	34,3	4,9	22,7
	3	31,9	7,9	-16,1
	4	-7,5	0,4	-6,1
Linje 3	1	-164,3	-32,9	87,9
	2	30,9	3,6	21,2
	3	35,2	7,5	-13,0
	4	-7,4	0,6	-6,6

(4) Den enkelsidiga överlasten verkade på samma brohalva som studerades

Last	Punkt	My [kNm/m]	Mx [kNm/m]	Vx [kN/m]
Överlast, dubbelsidig				
Linje 1	1	-113,6	-21,7	96,0
	2	61,7	4,9	10,6
	3	-17,6	-3,0	-27,4
	4	-19,6	-0,1	0
Linje 2	1	-97,7	-19,6	72,0
	2	52,9	8,6	10,9
	3	-13,5	-1,0	-24,3
	4	-19,3	-0,2	0
Linje 3	1	-92,4	-18,5	68,6
	2	49,4	7,4	10,1
	3	-12,6	-1,1	-23,1
	4	-19,2	0	0