

Examensarbete 15 hp C-nivå

RÖRBROAR

Verifiering av nyutvecklat dimensioneringsprogram samt vidareutveckling för järnvägstrafik

Reg.kod: Oru-Te-BY3004-B104/08

Malin Wäster

Byggingenjörsprogrammet 180hp

Örebro vårterminen 2008

Examinator: Tord Larsson
Handledare: Göran Lindberg

Soil Steel Composite Bridges-
Verifying of newly developed dimension program
and a continued development for railway traffic

Örebro universitet
Institutionen för teknik
701 82 Örebro



Örebro University
Department of Technology
SE-701 82 Örebro, Sweden

Examensarbete 15 hp C-nivå

RÖRBROAR

Verifiering av nyutvecklat dimensioneringsprogram samt vidareutveckling för järnvägstrafik

Reg.kod: Oru-Te-BY3004-B104/08

Malin Wäster

Byggingenjörsprogrammet 180hp

Örebro vårterminen 2008

Examinator: Tord Larsson
Handledare: Göran Lindberg

Soil Steel Composite Bridges-
Verifying of newly developed dimension program
and a continued development for railway traffic

Godkänd Örebro den 2008

Tord Larsson

Örebro universitet
Institutionen för teknik
701 82 Örebro



Örebro University
Department of Technology
SE-701 82 Örebro, Sweden

Förord

Detta examensarbete har utförts under våren 2008 som avslutning på min utbildning, Byggingenjörsprogrammet vid Örebro Universitet. Denna rapport beskriver det arbete jag har utfört på uppdrag av WSP Samhällsbyggnad i Örebro som jag vill rikta ett stort tack till och då speciellt min handledare Martin Larsson.

Jag vill även passa på att tacka Per Maxstadh, WSP Samhällsbyggnad Karlstad som hjälp till att ta fram information samt min handledare på Örebro Universitetet, Göran Lindberg.

Tack till alla andra som inte är nämnda men som hjälpt till och på ett eller annat sätt bidragit till mitt examensarbete.

Örebro Augusti 2008

Malin Wäster

Sammanfattning

Rörbroar är ofta en kostnadseffektiv och miljömässig lösning för många situationer där en väg, järnväg eller faunapassage ska dras över en väg, järnväg eller mindre vattendrag. Då plåt och omkringliggande jord genom samverkan står för den bärande konstruktionen behövs alltså ingen betong. När man uttrycker kostnadseffektivitet är det naturligtvis beroende av hur den tekniska livslängden ser ut, enligt *Bro 2004*, som är den allmänna tekniska beskrivningen som beskriver kraven för broar vid nybyggnad och ombyggnad, anges att tekniska livslängden ska beräknas till 80 år. Byggtiden är en annan sak som rörbroar har till sin fördel, en rörbro kan bytas ut relativt snabbt, mellan 5-7 dagar räknar man på att det tar.

WSP Samhällsbyggnad konstruerar rörbroar med Vägverket, Banverket och kommuner som beställare, med tidigare beräkningsprogram som använts har beräkningarna fått anmärkningar på att de t.ex. inte redovisar vissa beräkningssteg. Under året har en ny beräkningsrutin tagits fram för dimensionering av rörbroar, enligt publikationen som gäller för dimensionering nämligen, *Dimensionering av rörbroar av Lars Pettersson och Håkan Sundquist*. Som förhoppningsvis ska visa på och redovisa beräkningsstegen som tidigare program saknade.

Syftet med examensarbetet har varit att verifiera det nyutvecklade programmet mot det äldre programmet som användes, för att sedan vidareutveckla detta för järnvägstrafik. Slutligen har även en mindre studie gjorts av de framtida *Eurokoderna*, som de benämns på svenska, huruvida de kommer att röra dimensioneringen av rörbroar.

Jämförelse av den nyutvecklade Mathcad rutinen och det tidigare programmet har gjorts och resultaten har försökt utvärderats, då man inte har avsikt att tro att det äldre programmet räknar fel utan bara brister i redovisningen så har detta fungerat bra och resultat har uppnåtts.

En vidareutveckling av rutinen för järnvägstrafik har även utvecklats och testats.

Sedan 1975 har man i Europa arbetat med att utveckla en gemensam europeisk standard för konstruktionsberäkningar. Tanken med detta är att man vill öppna handelshinder, främst i Europa men också i övriga världen. Nu 2008 är man så gott som klar och stora delar av den nya beräkningsstandarden är klar och publicerad, snart även på svenska. Inom ett par år kommer en övergång att ske från den standarden som idag används för brokonstruktion, *Bro 2004* till den europeiska standarden *Eurocode*. Denna övergång kommer att innebära vissa förändringar då *BKR* (Boverkets konstruktionsregler), *BSK* (Boverkets handbok om stålkonstruktioner) och *BBK* (Boverkets handbok om betongkonstruktioner) ska överges för användandet av *Eurokoderna*, som är den svenska benämningen.

Summary

Soil Steel composite bridges are often both a cost effective and an environmental solution to many situations where a road, railway or fauna passage will be drawn over a road, railway or a smaller watercourse. Only interaction between the sheet metal and the surrounding soil stands for the carrying structure. When expressing cost effectiveness there will be necessary to talk about technical length of life for the construction. According to *Bro 2004*, which is the general technical description who describes the requirements for building and rebuilding bridges, the technical length of life will be calculated to 80 years. Another point that flexible culverts has to their advantage is that the construction time only remains to between 5-7 days.

WSP Samhällsbyggnad designs flexible culverts with the National Road Administration, Swedish National Rail Administration and municipalities as clients, they needed a new calculation program for designing this type of constructions while the earlier program got remarks that the calculations does not present certain calculation stages etc. so during the year, 2007-2008 a new routine for designing flexible metal culverts has been developed in Mathcad. The routine according to the publication that applies for dimension and designing of soil steel composite bridges: *Design of long span flexible metal culverts by Lars Pettersson and Håkan Sundquist*.

The aim with this diploma work has been to verify the recently developed programme or calculation routine against the older design programme. After that a further developing for this routine is meant to be done for designing of flexible culverts using for railway traffic. Finally also a smaller study will be done of the future *Eurocodes*, whether they will concern the design of flexible culverts.

Comparison of the recently developed Mathcad routine and the previous used programme have been done and the results have been tried to be evaluated through comparison between the two. When there is no intention to believe that the older programme miscalculate without only falling short in the present of the calculation have this comparison been given good results.

A refinement of the calculation routine for bridges concern railway traffic has also been developed and tested.

Since 1975 has they in Europe been working with developing a common European standard for construction calculations. The thought with this common standard will open the trade obstacle and make a balance of trade both within Europe and the rest of the world. Now its 2008 and the bigger part of job is done and the new calculation standard are finished and published, soon also translated to Swedish. Within a few years a transition will happen from the standard that today is used for bridge structure, *Bro 2004* to the European standard *Eurocode*. This transition will mean certain changes when *BKR* (National Board of Housing, Building and Planning's structure rules), *BSK* (National Board of Housing, Building and Planning 's manual about steel constructions) and *BBK* (National Board of Housing, Building and Planning's manual about concrete constructions) will be abandoned for the use of the *Eurocodes*.

Innehållsförteckning

Förord	1
Sammanfattning	2
Summary	3
Innehållsförteckning	4
Beteckningar	6
1 Inledning	9
1.1 Bakgrund	9
1.2 Syfte	10
1.3 Avgränsning	10
1.4 Företagspresentation	10
1.5 Beskrivning av konstruktionstypen rörbro	10
2 Metod	13
2.1 Jämförelse mellan det framtagna programmet mot ett äldre program	13
2.2 Litteraturstudie kring gällande normer angående trafiklast för rörbro under järnväg 13	
2.3 Framtagande av laster och identifikation av tåglastens dynamiska inverkan enligt BV Bro	13
2.4 Litteraturstudie kring framtida Eurokoder	13
3 Rörbroar	14
3.1 Accepterade tvärsnittsformer	14
3.2 Definitioner och begrepp	15
3.3 Standarder och normer	16
4 Beskrivning av programmet	17
4.1 Uppbyggnad	17
4.2 Indata	17
4.3 Belastning	19
4.3.1 Ekvivalentlasterna	19
4.3.2 Reduktion med hänsyn till hjulens lastutbredning	21
4.3.3 Säkerhetsklass	22
4.4 Snittkrafter	23
4.5 Böjmoment	26
4.5.1 Böjmoment av jordlast	27
4.5.2 Böjmoment av trafiklast	27
4.5.3 Dimensionerande böjmoment	27
4.6 Dimensioneringskontroller	28
5 Resultat	30
5.1 Resultat av verifieringen av dimensioneringsprogrammet för	30
5.1.1 Indata	30
5.1.2 Tvärsnittdata	31
5.1.3 Jordlast	31
5.1.4 Trafiklast	31
5.1.5 Normalkraft och böjmoment	32
5.1.6 Dimensioneringskontrollerna	33
5.1.7 Sammanställning och slutsatser av verifieringen för det valda objektet	35
5.2 Resultat av vidareutvecklingen av programmet för järnvägslast	36
5.2.1 Laster	36
5.2.2 Reduktion med hänsyn till slipersens lastutbredning	39
5.2.3 Dynamiskt tillskott	40

5.2.4	Sammanställning av beräkningsrutin med resonemang	40
5.3	Resultat av litteraturstudien av Eurokoder	41
6	Diskussion och Slutsats	46
6.1	Diskussion	46
6.2	Slutsats	46
7	Referenser.....	47
8	Bilagor.....	48

Beteckningar

Latinska versaler

A	tvärsnittsarea
A_x	avstånd mellan laster i tvärled
B_x	axelavstånd
C_a	förbandsklass
C_{a2}	förbandsklass för kontroll av utmattning i plåt
C_x	axelavstånd
D	rörets diameter
D_x	axelavstånd
E_j	tangentmodul för jordmaterial i kringfyllnaden
E_{jd}	dimensionerande tangentmodul för jordmaterial i kringfyllnaden
E_k	elasticitetsmodul
F_{Rbd}	skruvens dimensionerande kapacitet vid skjuvning vid brott i plåt
F_{Rtd}	skruvens dimensionerande kapacitet vid dragning
F_{Rvd}	skruvens dimensionerande kapacitet vid skjuvning vid brott i skruv
F_{St}	beräknad dragkraft vid dimensionerande last i brottgränstillstånd
F_{Sv}	beräknad tvärkraft vid dimensionerande last i brottgränstillstånd
H	valvhöjd
H_g	skruvs gängas grundtriangelhöjd
I	tröghetsmoment för röret per längdenhet
L_{best}	bestämmande längd i m
M_d	dimensionerande böjmoment
M_j	böjmoment av jordlast
M_t	böjmoment av trafiklast
M_u	moment vid fullständigt plasticerat tvärsnitt
N_{cr}	knäckningslast för rörkonstruktioner i jord
$N_{c_r_el}$	knäckningslast för rörkonstruktioner i jord vid ideala elastiska förhållanden
N_d	dimensionerande normalkraft
N_j	normalkraft från jord
N_t	normalkraft från trafik
N_u	normalraft vid fullständigt plasticerat tvärsnitt
P	delning på skruvs gängor
P_x	punktlast
R	krökningsradie
R_b	bottenradie
R_c	hörnradie

R_f	reduktionsfaktor, används vid små överfyllnadshöjder
R_s	sidoradie
R_t	toppradie
S_{ar}	reduktionsfaktor för överlast beroende på valvverkan
S_v	beräkningsparameter
W	motståndsparemeter
Z	plastiskt motståndsmoment

Latinska gemener

a_{skarv}	skarvmått
c	halv våglängd
$d_{(1,2)}$	diameter på skruv
d_x, d_y	mått för kontaktyta från hjultryck
e_1	hålcentrum
f	beräkningsparameter
f_1, f_2, f_3, f_4	funktionsuttryck som förenklade syfte används i framställning
f_{index}	hållfasthetsvärden för stålmaterial och skruvar (MPa) enligt BSK 99
h	höjd på rörprofil, mått från botten till toppen på trumman
h_{corr}	korrugerings höjd för rörbro av korrugerad plåt
h_c	överfyllnadshöjd
h_{c_red}	effektiv överfyllnadshöjd
k	antal rader skruvar
m_t	tangentlängd
n	antal
n_t	antal spänningscykler under konstruktions antagna spänningstid
p_{trafik}	ekvivalent trafiklast, linjelast
q_x	fördelat tryck från trafik
$t_{plåt}$	plåttjocklek
x, y	koordinater

Grekiska gemener

α_c	beräkningsparameter enligt BSK 99
α	vinkel vid definition av tvärsnitt
β	exponent
δ_{hjassa}	höjning av rörets hjassa vid kringfyllnadsarbetet
φ (k,d,öf,kf)	friktionsvinkel (index k används för karakteristisk, d för dimensionerande, öf i förekommande fall för

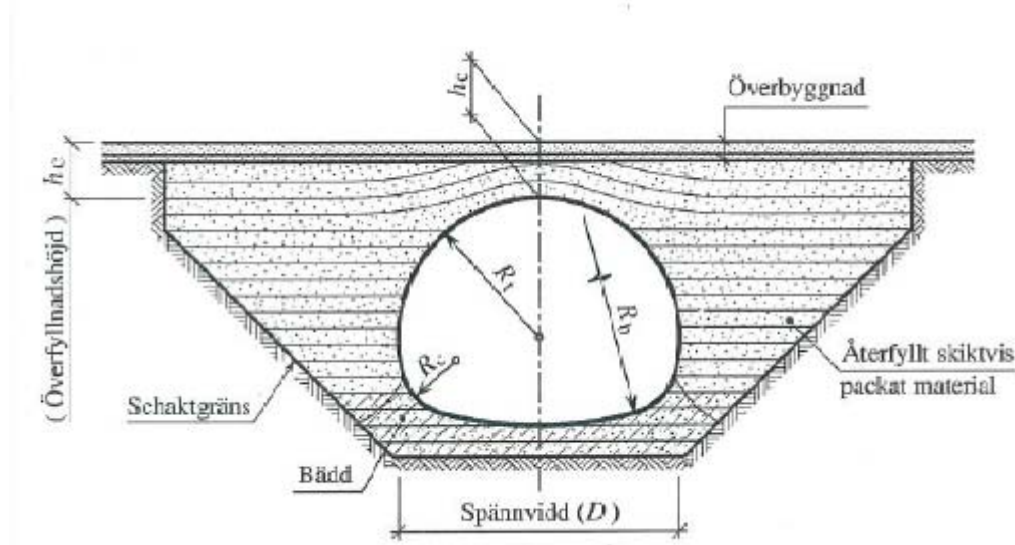
	egenskaper kopplade till överfyllningen samt k_f för egenskaper kopplade till kringfyllningen)
φ_t	normalt åtdragen skruv
ε	dynamikkoefficient
γ	partialkoefficient (återfinns med många index)
γ_n	partialkoefficient för säkerhetsklass
η_m	styvhetsparameter använd i samband med bedömning av monteringsstyvheter
η_j	beräkningsparameter
η	Z/W, formfaktor vid böjning
κ	beräkningsparameter
ρ_{kf}	tunghet för jordmaterial upp till hjässans nivå (kringfyllning) (kN/m^3) index w för jord under grundvattenytan
ρ_2	medelvärde för tunghet för jordmaterial inom området $h_{c+} H/2$ (kN/m^3)
$\rho_{öf}$	medelvärde för tunghet över hjässans nivå inom området h_c (kN/m^3) index w för jord under grundvattenytan
ρ_s	kompaktdensitet för jordmaterial i fyllningen, vanligtvis gäller för grovkornig jord 25 à 26 kN/m^3
λ_f	styvhetsparameter som anger förhållandet mellan rörets och omgivande jods respektive styvheter (dimensionslös)
ξ	beräkningsparameter
σ	spänning
σ_v	vertikalt tryck i jorden under punktlast
ω	knäckningskraft/kraft vid plasticering, se BSK 99
<i>Övriga index</i>	
f	utmattningsgränstillstånd
s	bruksgränstillstånd
u	brottgränstillstånd

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Rörbro - Bro, som genom samverkan mellan rör och jord, ges erforderlig bärförmåga och där rörets tvärsektion har en radie som är konstant eller föränderlig över tvärsnittet.¹

Så lyder definitionen av rörbro enligt *Bro 2004* som är Vägverkets tekniska beskrivning för nybyggande och förbättring av broar. Typ av rörbroar som detta examensarbete behandlar benämns *multiplkonstruktion av stål*, vilket innebär att broarna byggs upp av korrugerade krökta plåtar till ett rör eller valv genom att de sätts samman med skruvförband, som i samverkan med omkringliggande packad jord utgör den bärande konstruktionen, enligt figur 1:1. Denna typ av konstruktion är ofta en kostnadseffektiv och miljömässig lösning där tex. vattendrag, väg eller järnväg ska dras under en järnväg, väg eller så kallad faunapassage.



Figur 1:1 Typisk utformning av en s.k. lågbyggd rörbro, figur är tagen ur handboken, Dimensionering av rörbroar, Pettersson och Sundquist

Inom WSP Samhällsbyggnad har en beräkningsrutin för denna typ av konstruktioner tagits fram. Rutinen har utvecklats i Mathcad² efter *Dimensionering av rörbroar*, Lars Pettersson och Håkan Sundquist, som är den publikation som är gällande enligt *Bro 2004 92.1 Allmänt* för beräkning av rörbroar. Tidigare har man använt sig av ett beräkningsprogram som rörbroleverantören ViaCon tagit fram, *Rörbro 2.4*, som även detta bygger på handboken, *Dimensionering av rörbroar*, även den upplaga 2. Detta programs beräkningsgång har fått anmärkningar från Vägverket vid mottagningskontroll på grund av bristande redovisning. Utvecklingen av Mathcad rutinen innebär också att möjligheten att dimensionera rörbroar från fler leverantörer finns nu, detta var inte möjligt förut då *Rörbro 2.4* var utvecklat efter rörbroleverantörens egna produkter.

¹ Bro 2004, 90.32 Rörbrotyp

² Mathcad ® är ett varumärke som ägs av Parametric Technology Corporation, PTC

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet är att verifiera det nyutvecklade *Mathcad programmet*³ mot dimensioneringsprogrammet, *Rörbro 2.4*, för att kunna påvisa hur beräkningsgången skall redovisas och vad de eventuellt olika resultaten beror på. När denna verifiering är gjord så ska även denna beräkningsrutin utvecklas för järnvägstrafik, vilket kommer att innebära ändrade lastförutsättningar, konstruktionsförutsättningar etc. Slutligen kommer en litteraturstudie att ske kring de framtida Eurokoderna, avsikten ska vara att kunna påvisa *vilka delar* av dimensioneringen som kommer att påverkas.

1.3 Avgränsning

Examensarbetet kommer endast att innefatta litteraturstudie, verifiering av program för **dimensionering** av rörbroar avsedd för vägtrafik och vidare utveckling av program för **dimensionering** av rörbroar avsedd för järnvägstrafik. Vid en fullständig beräkning av en vägbro som ingår i det statliga stadsnätet ska konstruktionen även klassas, vilket innebär att uppgifter angående dess förmåga att bära trafiklast ska finnas beräknat. Denna bärighet beskrivs sedan i tillåtna axel- boggie eller sträcklast för konstruktionen utifrån en klassningsberäkning. Rapporten är skriven i Mathcad syntex och det förutsätts att läsaren förstår den.

1.4 Företagspresentation⁴

WSP är ett globalt företag som erbjuder kvalificerade konsulttjänster för samhälle och miljö. Med 250 kontor världen över i 35 länder och cirka 9500 medarbetare är WSP ett av de största konsultföretagen i Europa och bland de största i världen. Huvuddelen av verksamheten bedrivs i Storbritannien och i Skandinavien, olika delar av WSP tjänsteutbud finns även i Afrika, Asien och USA. I Mellanöstern expanderar WSP stark och då särskilt i Dubai. WSP är engagerad i flera projekt på Gulfkusten och då framförallt inom el och VVS, projektering och miljö. I Sverige har WSP kontor utspritt över hela landet med cirka 2000 medarbetare.

WSP Sverige består av olika affärsområden varav WSP Samhällsbyggnad är ett. Trafik, landskap, mätteknik, geoteknik VA och broteknik är bara några av delar av WSP Samhällsbyggnad.

WSP Samhällsbyggnad i Örebro består av drygt 40 medarbetare inom olika områden såsom, broteknik, geoteknik, mätningsteknik, VA, landskap och väg- och mark.

1.5 Beskrivning av konstruktionstypen rörbro

En rörbro är en brokonstruktion som består av korrugerade, rektangulära, krökta plåtar som monteras ihop till ett rör som sedan kringfylls med packad jord. Denna jord och röret står för den bärande konstruktionen. Nedan följer ett par bilder och ritningar för att illustrera hur en rörbro ser ut.

³ Med *Mathcad programmet* avses den applikation som är gjord med programmet Mathcad

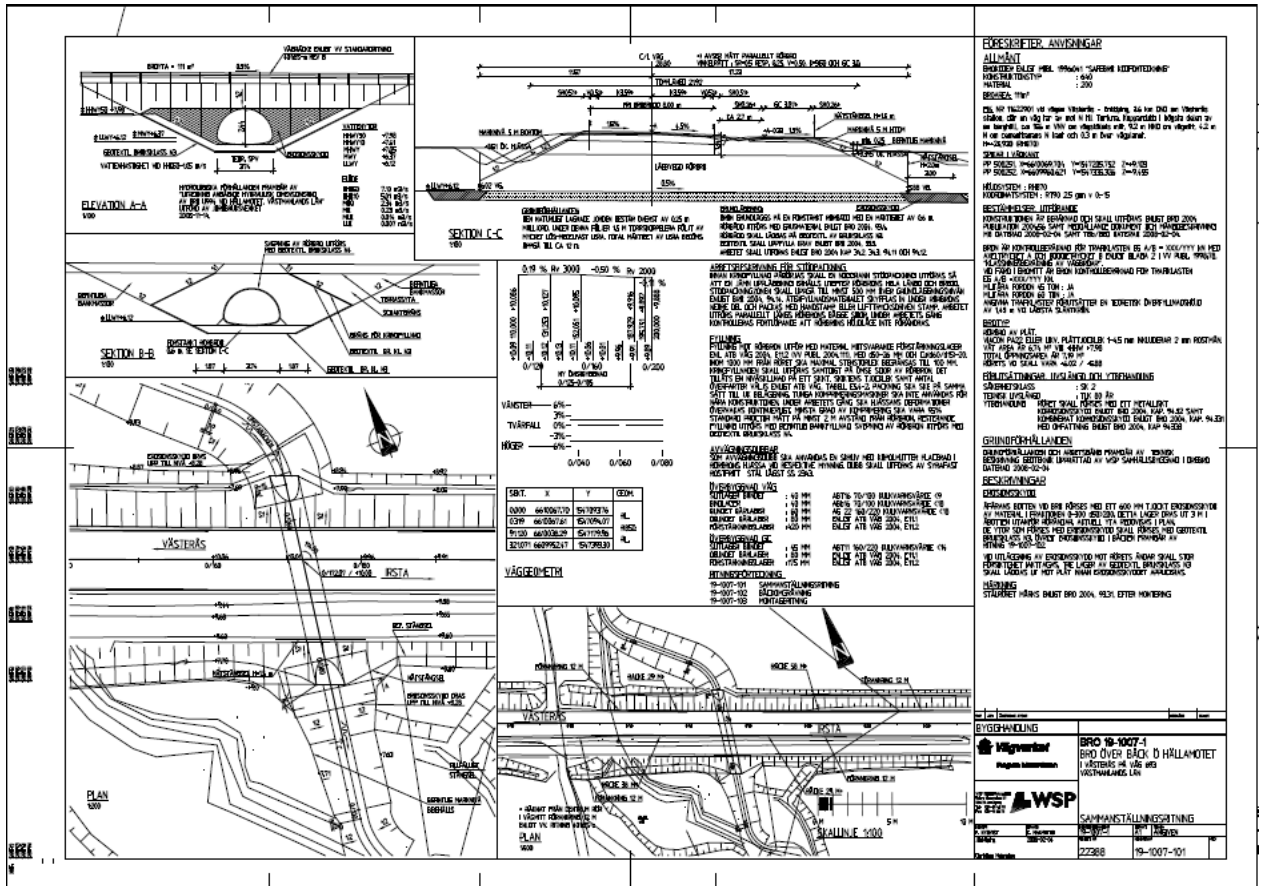
⁴ <http://www.wspgroup.se/sv/Lander/>



Figur 1:2 Till vänster ett fotografi på en lågbyggd rörbro över ett vattendrag, taget av WSP Samhällsbyggnad Till höger en animerad bild på en valvbåge som bildar en vilt passage över väg.

Sammanställningsritning och detalj- och monteringsritning

Nedan följer två ritningar för en lågbyggd rörbro. Den första som är en sammanställningsritning ska visa höjder, mått, brotyp etc. I texten anges information angående korrosionsskydd, vilka normer och föreskrifter som gäller, laster som bron är beräknad för, arbetsbeskrivning, fyllning, erosionsskydd etc.



Figur 1:3 Exempel på hur en sammanställningsritning för en lågbyggd rörbro ser ut.

2 Metod

Arbetet har uppdelats enligt följande:

- Jämförelse mellan det framtagna programmet mot ett äldre program
- Litteraturstudie kring gällande normer angående trafiklast för rörbro under järnväg
- Framtagande av laster och identifikation av tåglastens dynamiska inverkan enligt BV Bro
- Litteraturstudie kring framtida Eurokoder

Dessa delar behandlas nedan en och en.

2.1 Jämförelse mellan det framtagna programmet mot ett äldre program

Verifiering av den utvecklade Mathcad rutinen genomförs genom att ett specifikt objekt väljs ut och beräknas av båda programmen, dvs. det nyutvecklade Mathcad programmet och rörbroprogrammet, *Rörbro 2.4*. De olika programmen kommer dels att ge olika resultat på några moment resp. normalkrafter men också relativt lika resultat jämfört mot varandra, dessa resultat är de som konstruktionen sedan kontrolleras emot. Vad eventuella avvikelser beror på kommer att identifieras och kartläggas. Verifieringen ska fungera som en kontroll av att det nyutvecklade programmet räknar rätt. Vissa kontroller som konstruktionen slutligen kontrolleras emot finns inte ens med i det äldre programmet, vilka kontroller som saknas ska också verifieras. Detta ska slutligen leda till att man ska kunna påvisa vad som skiljer det nya Mathcad programmet mot *Rörbro 2.4* som tidigare har används.

2.2 Litteraturstudie kring gällande normer angående trafiklast för rörbro under järnväg

Hela arbetet startar med en litteraturstudie kring gällande normer för hur rörbroar dimensioneras korrekt för järnvägslast.

Studien inkluderar litteratur som:

Dimensionering av rörbroar, Lars Pettersson Håkan Sundquist, KTH, Rapport 58
BV Bro, utgåva 8, Banverkets ändringar och tillägg till Vägverkets Bro 2004 inklusive supplement 1

2.3 Framtagande av laster och identifikation av tåglastens dynamiska inverkan enligt BV Bro

Efter en noggrann litteraturstudie ska trafiklasterna enligt normerna översättas till lastfall som kan användas i beräkningsrutinen i Mathcad. En reduktionsfaktor ska tas fram för slipersernas lastutbredning, då dessa har måtten $0,2 \times 2,25\text{m}^2$, som alltså skiljer sig från ekvivalentlasternas lastutbredning på $0,2 \times 0,6\text{m}^2$. Dynamiskt tillskott är en annan del som ska studeras.

2.4 Litteraturstudie kring framtida Eurokoder

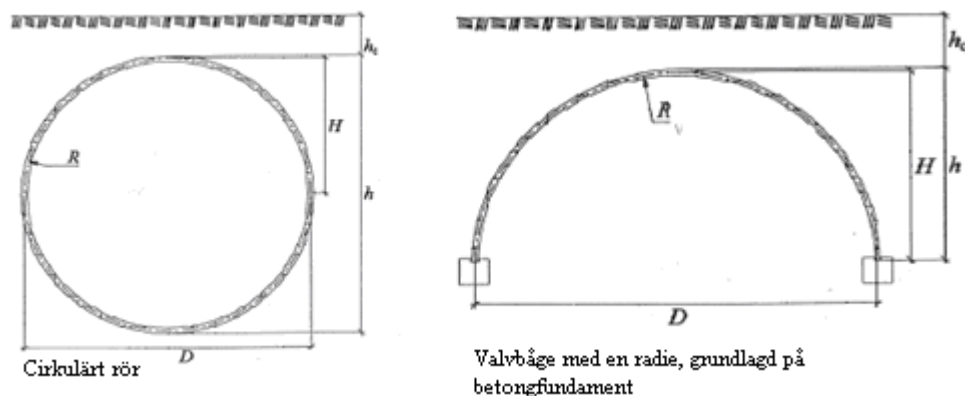
En litteraturstudie kommer att genomföras för att kunna påvisa **vilka delar** i beräkningen som kommer att påverkas av de nya standarderna Eurokoder.

3 Rörbroar

3.1 Accepterade tvärsnittsformer⁵

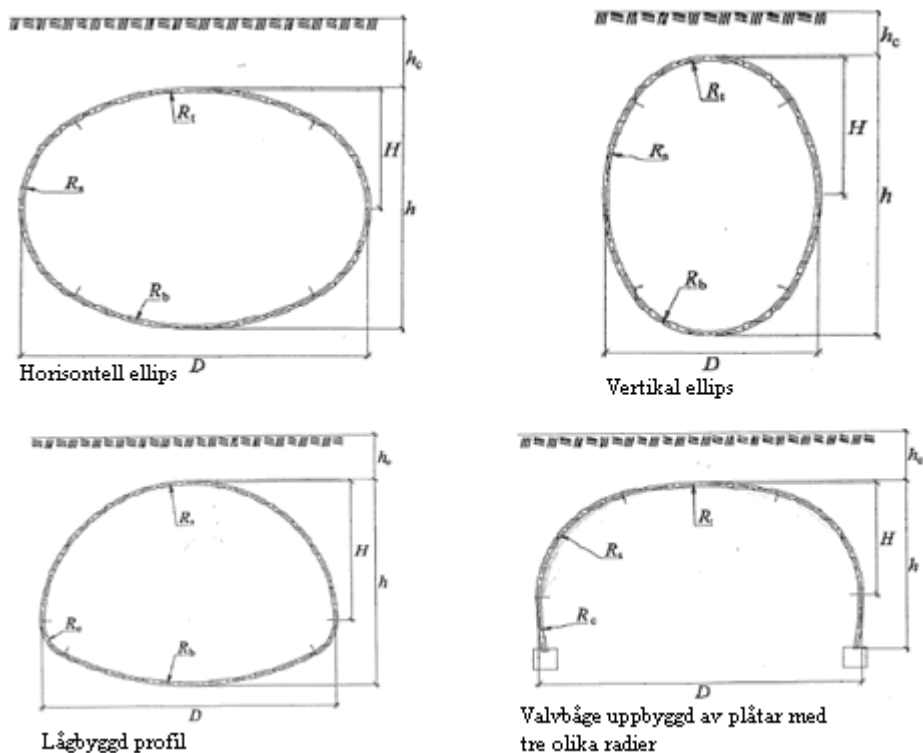
Beroende på hur tvärsnittformen ser ut så är bron lämpad för olika ändamål. För dimensionering enligt handboken, *Dimensionering av rörbroar*, accepteras 6 olika tvärsnittsformer, kort beskrivning med illustration följer nedan, den tvärsnittsformen som det valda objektet kommer att ha sedan för veriferingen är en så kallad *lågbyggd profil*

- Cirkulärt rör med konstant radie, R
- Valvbåge med en radie kallad toppradie. Denna typ grundläggs vanligen på längsgående betongfundament
- Horisontell ellips. För förhållandet mellan radierna gäller att $R_t/R_s \leq 4$ samt att $R_b/R_s \leq 4$
- Vertikal ellips, sidoförhållande $2H/D \leq 1,2$
- Lågbyggd profil, uppbyggd av tre radier: toppradie R_t , bottenradie R_b och hörnradier R_c . För förhållandet mellan R_t och R_c gäller $R_t/R_c \leq 5,5$ och för förhållandet mellan R_b och R_c gäller $R_b/R_c \leq 10$
- Valvbåge uppbyggd av plåtar krökta med två eller tre olika radier: toppradie R_t , sidoradie R_s och hörnradier R_c . Förhållandet här ska vara $R_t/R_s \leq 4$ och $1 \leq R_c/R_s \leq 4$



Figur 3:1 Accepterade tvärsnittsformer, enligt handboken, *Dimensionering av rörbroar*, Pettersson och Sundquist

⁵ Dimensionering av rörbroar, Pettersson och Sundquist, sid 3



Figur 3:2 Accepterade tvärsnittsformer, enligt handboken, Dimensionering av rörbroar, Pettersson och Sundquist

3.2 Definitioner och begrepp

Rörbro	Bro som genom samverkan mellan ett flexibelt rör och jord ges erforderlig bärförmåga.
Återfyllning	Den jord, som efter utschaktning av massor och placering av trumman, fylls omkring denna. Arbetet som utförs när massorna flyttas tillbaka kallas även detta för återfyllning eller återfyllningsarbete.
Kringfyllning	Den del av återfyllningen som det ställs speciella krav på för att den eftersträvande samverkan mellan trumma och jord ska erhållas. Ordet används även för arbetet att kringfylla.
Multipelkonstruktion	En rörbro som utförs av armerad betong eller stål och består av segment som sätts ihop till ett valv eller rörprofil.
Multipelkonstruktion av stål	En multipelkonstruktion som består av vanligtvis korrugerade plåtar som sätts samman med skruvförband.
Rör (trumma)	Den del av rörbron som består av plåtar eller betong.
Valvverkan	Den effekt på spänningsfördelningen i jorden ovanför trummans om uppstår beroende på trummans flexibilitet. ⁶

⁶ Dimensionering av rörbroar, Pettersson och Sundquist, sid xii

Överfyllnadshöjd	Minsta avståndet mellan rörets (korrugeringens) översida och överkant beläggning. ⁷
Ekvivalentlaster	Trafiklast som ger lasteffekter motsvarande de som fås av reella fordon (simuleringar på hur bron belastas). ⁸
Dynamikoefficient	En faktor som beräknas för den dynamiska förstoringen av krafterna. ⁹
Tåglast BV 2000	Lasttyp som bron dimensioneras för
Tåglast BV Malm	Lasttyp för bron som ska dimensioneras för trafik med tung massgodstrafik (Malmbanan) ¹⁰

3.3 Standarder och normer

Detta kapitel kommer att beskriva de olika standarder och normer som finns idag för dimensionering av rörbroar. Vilket är de föreskrifter som sätter upp de krav som måste beaktas nu innan *Eurokoderna* börjar gälla vid nyproduktion och reparation av vägbroar. Nedan beskrivna publikationer är de skrifter som både Mathcad rutinen och *Rörbro 2.4* är uppbyggda efter.

Dimensionering av rörbroar, Lars Pettersson och Håkan Sundquist, KTH, Rapport 58
Beräkning av rörbroar i stål ska göras med beräkningsmodellen enligt publikationen.

Bro 2004, Publ 2004:56, Samhälle och trafik, Teknik, sektion Bro- och tunnelteknik
Bro 2004 är en allmän teknisk beskrivning (ATB) som beskriver kraven vid nybyggnad och förbättringar av broar.

Bro 2004 – supplement nr 1, Publ 2006:25, Samhälle och trafik, Teknik, sektion Bro- och tunnelteknik
Denna skrift innehåller tillägg till och revideringar av *Bro 2004*.

BSK 99, Boverkets handbok om stålkonstruktioner, Boverket
Handboken ger exempel på dimensionering, utförande och kontroll av stålkonstruktioner. Som tillämpas t.ex. för skruvförbandens utformning och även kontroller av dessa.

För järnvägsbroar gäller även publikationen:

BV Bro, utgåva 8, Banverkets ändringar och tillägg till Vägverkets *Bro 2004* inklusive supplement nr 1
Denna publikation anger Banverkets krav på järnvägsbroar och andra byggnadsverk som påverkar eller påverkas av järnvägstrafik

⁷ Ibid, sid viii

⁸ Vägverket, *Bro 2004*, 21.22 Trafiklast

⁹ Banverket, *BV Bro utgåva 8*, BV 21.2216, Tåglastens dynamiska inverkan

¹⁰ Ibid, BV 21.22 Trafiklast

4 Beskrivning av programmet

Programmet är uppbyggt efter, som tidigare nämnts, publikationen *Dimensionering av rörbroar*, Lars Pettersson och Håkan Sundquist, KTH. Nedan följer en beskrivning på hur programmet är konstruerat och hur det fungerar. Beskrivning nedan gäller både för den redan utvecklade Mathcad rutinen som används för dimensionering av rörbroar för vägtrafik och beräkningsrutinen som utvecklas i examensarbetet för järnvägstrafik. I det sistnämnda skiljer sig rutinen i tre avseenden

- Lasfall för järnvägslast ser annorlunda ut.
- Reduktionsfaktorn för reduktion av antagen punktlast, då lastarean har andra mått.
- Dynamikoefficient, som tåglast ska förstöras med, tas fram.

Dessa behandlas senare i 5.2 *Resultat av vidareutvecklingen av programmet för järnvägslast*, förutom ovanstående punkter gäller följande beskrivning för båda beräkningsrutinerna.

4.1 Uppbyggnad

Mathcad är ett mycket effektivt program för att enkelt utföra och hålla ordning på handberäkningar, programmet innehåller inbyggda matematiska funktioner, enhetsmedvetenhet, funktioner för diagram och plottar samt en mängd andra hjälpmedel. Det bygger på att alla variabler definieras för att sedan kunna användas i algebraiska uttryck. Variabler som definierats gäller nedåt i beräkningen, så därför kan vissa beräkningar känna lite bakvända ibland eftersom vissa variabler beräknas av tidigare definierade.

4.2 Indata

Som nämns ovan bygger rutinen på att indata för alla delar av konstruktionen tilldelas, så som *geoteknik* för omkringliggande jord, *plåtkoefficienter*, *tvärsnittsmått* och *profilvariabler* för vald trumma och värden för *skruvförband*. Utifrån profilvariablerna beräknas trummans tvärsnittsdata (böjmotstånd, tröghetsmoment och area). Sedan följer en definition av de olika ekvivalenta trafiklasterna och tillsist under samma del så definieras säkerhetsklassen av rörbron och geotekniken.

Nedan följer nu beskrivning på vilka indata som ska definieras för att beräkning ska vara möjlig.

Geoteknik

Vid indata för geotekniken skiljer man på jordparametrar för överfyllnad och kringfyllning,

Överfyllning

Friktionsvinkel (grader)	$\varphi_{k_öf}$
Tunghet över grundvattenytan (kN/m^3)	$\rho_{öf}$
Tunghet under grundvattenytan (kN/m^3)	$\rho_{w_öf}$
Överfyllnadshöjd (m)	h_c

Kringfyllning

Friktionsvinkel (grader)	φ_{k_kf}
Tunghet över grundvattenytan (kN/m^3)	ρ_{kf}
Tunghet under grundvattenytan (kN/m^3)	ρ_{w_kf}
Tangentmodul (MPa) ¹¹	E_j

¹¹ Här används ett värde som inte stämmer överens med handboken, *Dimensionering av rörbroar*, Pettersson och Sundquist. För att de båda beräkningarna ska gå att jämföra så har värdet för tangentmodulen E_j satts till 60 MPa, vilket är det värde som tidigare har använts för beräkning.

Data för rörbro

Plåtkoefficienter

Plåtkvalitet, sträckgränsvärde (MPa)	f_{yk}
Brottgränsvärde (MPa)	f_{uk}
Elasticitetmodul	E_k

Tvårsnittsmått trumma

Höjd (m)	h
Diameter (m)	D
Valvhöjd (m)	H
Toppradie (m)	R_t
Sidoradie (m)	R_s
Bottenradie (m)	R_b
Hörnradie (m)	R_c

För lågbyggd profil gäller $R_t = R_s$

För cirkulärprofil gäller $R_t = R_s = R_c = R_b$

Sammanfogning (skruvförband)

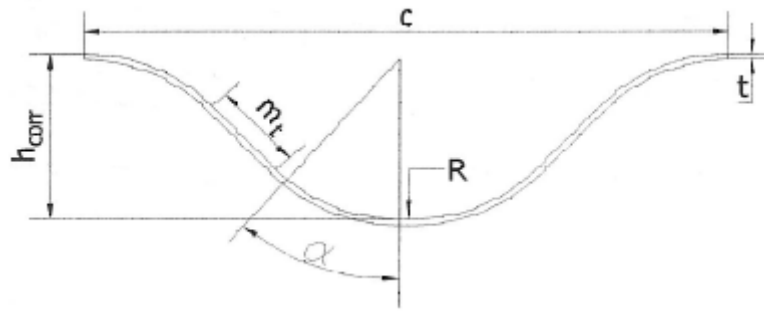
Antal skruvar per meter	n
Antal rader vilket skruvarna monteras i	k
Hållfasthetsvärde för skruv (MPa)	f_{buk}
Basmått för skruvs gängas innerdiameter (mm)	d_1
Basmått för skruvs gängas medeldiameter (mm)	d_2
Gängas grundtriangelhöjd (mm)	H_g
Delning	P
Skarvning (m)	a_{skarv}
Hålcentrum till fri kant	e_1
Reduktionsfaktor för normalt åtdragen skruv	φ_t

Profilvariabler

Plåttjocklek (mm)	$t_{plåt}$
Korrugering (mm)	$c \times h_{corr}$
Profilhöjd (mm)	h_{corr}
Hel våglängd (mm)	c
Krökningsradie (mm)	R
Antal spänningscykler under konstruktionens antagna användningstid	n_t
Förbandsklass (MPa)	C_a
Förbandsklass, för kontroll av utmattning i plåt (MPa)	C_{a2}

Övriga variabler som beräknas för profilen

Tangentlängd (mm)	m_t
Vinkel vid definition av tvärsnitt	α



Figur 4:1 Korrugeringsens tvärsnitt (bild från Long span Flexible culverts ultimate load calculations, Hirvi Johan, KTH)

Tvärsnittsarea, tröghetsmomentet, plastiskt motståndsmoment och motståndsmomentet beräknas sedan enligt följande.¹² Hänvisning nedan refererar till och följer handbokens numrering av funktioner och uttryck.

$$A := \frac{4 \cdot \alpha \cdot r \cdot t_{\text{plåt}} + 2 \cdot m_t \cdot t_{\text{plåt}}}{c} \quad (\text{b1.c})$$

$$r := R + \frac{t_{\text{plåt}}}{2} \quad (\text{b1.b})$$

$$I := \frac{r^3 \cdot t_{\text{plåt}} \left(\alpha + \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{2} - 2 \cdot \frac{\sin(\alpha)^2}{\alpha} \right) + 4 \cdot \alpha \cdot r \cdot t_{\text{plåt}} \left[\frac{h_{\text{corr}}}{2} - r \left(1 - \frac{\sin(\alpha)}{\alpha} \right) \right]^2 + \frac{2 \cdot t_{\text{plåt}}}{12 \cdot \sin(\alpha)} \cdot (m_t \cdot \sin(\alpha))^3}{c} \quad (\text{b1.e})$$

$$Z := \frac{4 \cdot \alpha \cdot r \cdot t_{\text{plåt}} \left[\frac{h_{\text{corr}}}{2} - r \left(1 - \frac{\sin(\alpha)}{\alpha} \right) \right] + \frac{1}{2} \cdot \frac{t_{\text{plåt}}}{\sin(\alpha)} \cdot (m_t \cdot \sin(\alpha))^2}{c} \quad (\text{b1.f})$$

$$W := 2 \cdot \frac{I}{h_{\text{corr}} + t_{\text{plåt}}} \quad (\text{b1.g})$$

4.3 Belastning

4.3.1 Ekvivalentlasterna¹³

I nästa steg definieras vilka ekvivalentlaster konstruktionen dimensioneras för.

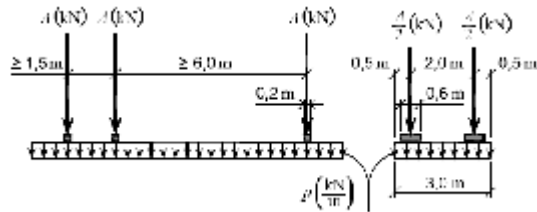
(Axellaster, punktlaster och utbredda laster har ej samma beteckning i Mathcad programmet, här definieras lasterna i enlighet med *Bro 2004*)

Ekvivalentlast 1 består av en jämnt fördelad last p kN/m² samt tre axellaster om A kN per lastfält, axellasterna fördelas senare upp på hjultryck, $A/2$, som har en yta på d_x , d_y på avståndet 2m. Denna last typ ska förutsättas placeras på två lastfält dvs. i två vägfiler, där A för de olika lastfälten varierar. Axelavstånden visas i figuren nedan.

¹² Dimensionering av rörbroar, Pettersson och Sundquist, upplaga 3, sid 40

¹³ Bro 2004, VV Publ 2004:56, 21.22 Trafiklast

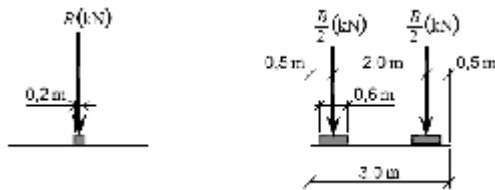
$A_1 = 250\text{kN}$
 $A_2 = 170\text{kN}$
 $p = 4\text{ kN/m}^2$
 $d_x = 0,2\text{m}$ (längriktning)
 $d_y = 0,6\text{m}$ (tvärriktning)



Figur 4:2 Ekvivalentlast 1 (VV Publ 2004:56, 21.2221)

Ekvivalentlast 2 består av en axellast om B kN som delas upp i två hjultryck om B/2 per ytan d_x , d_y på avståndet 2m. Lasten förutsätts vara placerad på två lastfält dvs i två vägfiler, där B för de olika lastfälten varierar.

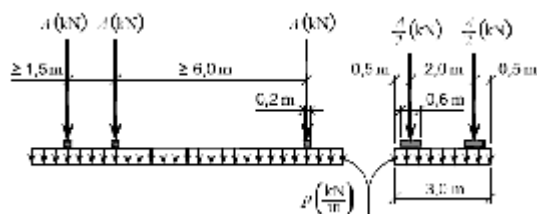
$B_1 = 310\text{kN/m}$
 $B_2 = 210\text{kN/m}$
 $d_x = 0,2\text{m}$ (längriktning)
 $d_y = 0,6\text{m}$ (tvärriktning)



Figur 4:3 Ekvivalentlast 2 (VV Publ 2004:56, 21.2222)

Ekvivalentlast 4 består av en enda lastgrupp enligt figur nedan, lastgruppen ska förutsättas placerad på körbanan med en sidoförskjutning av högst 1,0m från körbanans centrumlinje.

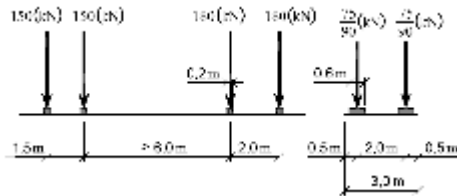
$A = 325\text{kN}$
 $p = 0\text{kN/m}^2$
 $d_x = 0,2\text{m}$ (längriktning)
 $d_y = 0,6\text{m}$ (tvärriktning)



Figur 4:4 Ekvivalentlast 4 (VV Publ 2004:56, 21.2224)

Ekvivalentlast utmattningslast består av en lastgrupp, liksom ekvivalentlast 4, dock med två axellaster om 150kN och 180 kN, axelavstånden visas i figuren nedan. Axellasterna fördelas på hjultryck A/2 med centrumavståndet 2 m och lastarean d_x , d_y . Lastgruppen ska förutsättas placerad på körbanan med en sidoförskjutning av högst 1,0m från körbanans centrumlinje.

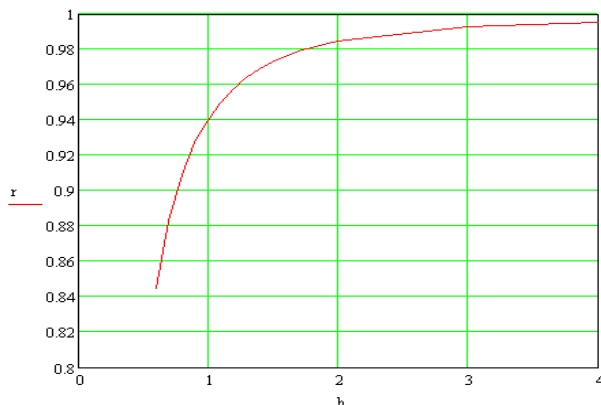
$A_1 = 150\text{kN}$
 $A_2 = 180\text{kN}$
 $d_x = 0,2\text{m}$ (längriktning)
 $d_y = 0,6\text{m}$ (tvärriktning)



Figur 4:5 Ekvivalentlast utmattningslast (VV Publ 2004:56, 21.2226)

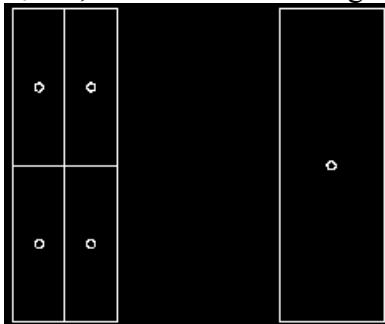
4.3.2 Reduktion med hänsyn till hjulens lastutbredning¹⁴

Ovan förklaras hur axellasterna delas upp i hjullaster, dessa hjullaster betraktas som punktlaster i beräkningen och kommer att ge ett för stort värde på det vertikala trycket då de i verkligheten har en lastarea på $0,2 \times 0,6\text{m}^2$. Avvikelsen reduceras med ett värde som beror på aktuell överfyllnad och blir större ju högre överfyllnad konstruktionen har, reduktionsfaktorn för hjultryck $0,2 \times 0,6\text{m}^2$ visas nedan.



Figur 4:6 Reduktion med hänsyn till hjulens lastutbredning av den ekvivalenta linjelasten vid små överfyllnadshöjder, Dimensionering av rörbroar, sid 45

Faktorn fås genom att jämföra trycket då lasten delas upp i fyra utbredda punktlaster och då kraften betraktas som en enda punktlast. Figuren nedan visar hur det ser ut i teorin och beräkningen under visar hur dessa tryck beräknas för att sedan kunna jämföras. Beräkningen av de olika trycken som fås beräknas för olika värden av överfyllnaden med början på $h_c = 0,6\text{m}$ då detta är det lägsta tillåtna värde enligt *Bro 2004*.



Figur 4:7 Illustration av hur lasten delas upp i punktlaster resp. betraktas som en punktlast.

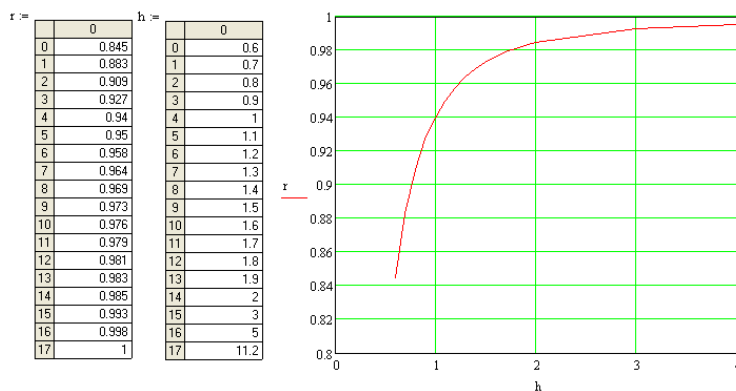
¹⁴ Dimensionering av rörbroar, Pettersson och Sundquist, sid 45

$$\begin{aligned}
 R_{red} := & \begin{array}{l} \text{maxtemp} \leftarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \text{for } x \in 0, t..0.2m \\ \quad a \leftarrow \begin{pmatrix} x - 0.05m \\ x - 0.15m \\ x - 0.05m \\ x - 0.15m \end{pmatrix} \\ \quad \text{for } y \in 0, t..0.6m \\ \quad \quad b \leftarrow \begin{pmatrix} y - 0.150m \\ y - 0.150m \\ y - 0.45m \\ y - 0.45m \end{pmatrix} \\ \quad \quad \sigma \leftarrow \left(\frac{P \cdot 1}{4} \cdot \frac{3}{2\pi} \right) \cdot h_{c_a}^3 \cdot \sum_{i=0}^3 \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_{c_a}^2} \right]^5} \\ \quad \quad \text{maxtemp} \leftarrow \begin{pmatrix} x \cdot \frac{N}{m} \\ y \cdot \frac{N}{m} \\ \sigma \end{pmatrix} \text{ if } \sigma > \text{maxtemp}_2 \\ \text{maxtemp} \end{array} \\
 R_{punkt} := & \begin{array}{l} \text{maxtemp} \leftarrow \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \text{for } x \in 0, t..0.2m \\ \quad a \leftarrow (x - 0.1m) \\ \quad \text{for } y \in 0, t..0.6m \\ \quad \quad b \leftarrow (y - 0.3m) \\ \quad \quad \sigma \leftarrow \left(\frac{P \cdot 1}{2\pi} \right) \cdot h_{c_a}^3 \cdot \sum_{i=0}^0 \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_{c_a}^2} \right]^5} \\ \quad \quad \text{maxtemp} \leftarrow \begin{pmatrix} x \cdot \frac{N}{m} \\ y \cdot \frac{N}{m} \\ \sigma \end{pmatrix} \text{ if } \sigma > \text{maxtemp}_2 \\ \text{maxtemp} \end{array}
 \end{aligned}$$

Figur 4:8 Beräkningar för att hitta värdet på det vertikala trycket under ett hjul, till vänster är hjultrycket uppdelat på fyra hjullaster till vänster betraktas hjullasten som en punktlast.

Värdet för reduktionsfaktorn, r fås alltså för varje värde av h_c .

$$r = \frac{R_{red}}{R_{punkt}}$$



Figur 4:9 Beräknade värden för reduktionen vid specifika överfyllnadshöjder, som bildar grafen.

4.3.3 Säkerhetsklass¹⁵

Hur lastkoefficienterna ska antas anges i *Bro 2004*, VV Publ. 2004:56, 2 Lastförutsättningar, Tabell 22-1. De lastkombinationer som ska användas är lastkombination V:A vilket är lastkombinationen som används i bruksgränstillståndet. Lastkombination IV:A vilket är lastkombinationen som används i brottgränstillståndet samt lastkombination VI som utgör grund för beräkningar i utmattning.

Partialkoefficienterna och tangentmodul väljs utifrån säkerhetsklass.

¹⁵ Bro 2004, VV Publ 2004:56, 2 Lastförutsättningar, Tabell 22-1

Data i Bruksgränstillstånd betecknas med index s , (Serviceability limit state)

Data i brottgränstillstånd betecknas med index u , (Ultimate limit state)

Data i utmattningsgränstillstånd betecknas med index f , (Fatigue limit state)

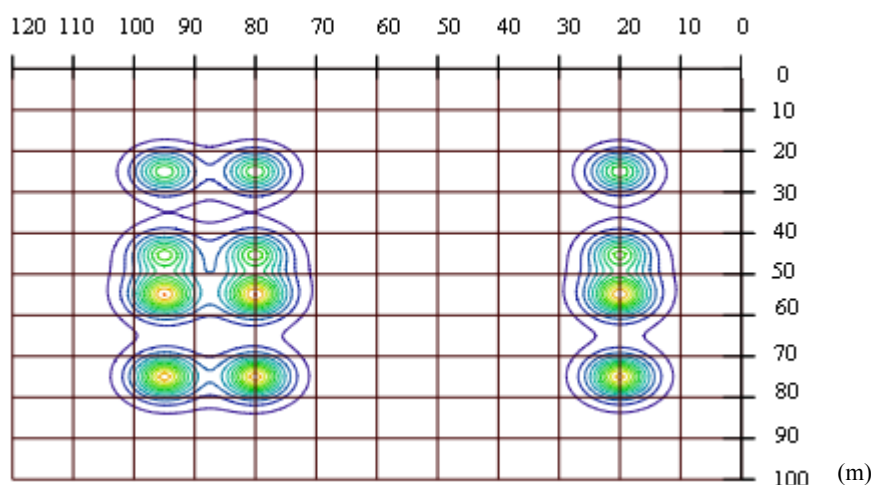
4.4 Snittkrafter

Här beräknas den maximala normalkraften från både trafiklast och jordlast som rörbron kommer att utsättas för, för vardera bruks, brott- och utmattningsgränstillstånd.

Först beräknas normalkraften av jordlaster där hänsyn tas till att rörets hjässa höjs under återfyllnadsarbetet som ett resultat av trycket som uppstår mot rörets sidor. Sedan beräknas normalkraften som uppkommer av trafiken, här beräknas alla ekvivalentlasterna enligt Bro 2004. Hur denna beräkning går till kommer att förklaras nedan men dock bara för ekvivalentlast 1 då beräkningen ser lika ut för övriga ekvivalentlaster med samma hjulutbredning och antal hjultryck som skillnad.

För att beräkna normalkraften som uppkommer av trafik krävs att det största vertikala trycket i jorden på höjden h_c , alltså i trumman överkant, under punktlast hittas. Detta görs genom att den tänkta vägbanan läggs ut i ett koordinatsystem med punktlasterna $P_1/2$ eller $P_2/2$ (halva axellasten som tidigare var $A/2$) som symboliserar hjultrycken, jämför figur 4:2 ovan med figur 4:7 nedan. Att båda fordonen som simuleras genom ekvivalentlasten inte har samma värde på axellasterna anges i Bro 2004, där anges det ena fordonet belastas med tre axellaster i ena filen på 250kN och det andra fordonet som simuleras i intilliggande fil har tre axelvärden på 170kN

(m)



Figur 4:10 Ekvivalentlast 1 utlagd i ett koordinatsystem. Färgskalan som utgör hjultrycken i koordinatsystemet beror på storleken på trycket i punkten på djupet h_c . Figuren ovan är en färgplott i 2D av det 3D diagram som visas i figur 4:11 nedan. Arealen som belastas är $0,2 \times 0,6\text{m}^2$ vilket inte är det som figuren visar utan endast skillnader i tryck. Röd symboliserar det största trycket medan mörkblå symboliserar det minsta trycket.

Genom att låta punktlasterna i figuren ovan variera längs med vägbanan med ett bestämt intervall på en antagen längd så hittas det största vertikala trycket för lastfallet i punkten (x, y) på djupet h_c genom att beräkna ekvationen nedan som bygger på ekvation (b4.c) i handboken.

$$\sigma_{.v} = \frac{P \cdot 3}{2 \cdot 2\pi} \cdot h_{.c}^3 \cdot \left(\sum_i \frac{1}{s_i^5} \right) \quad (b4.c)$$

Ekvationen för ekvivalentlasten kommer då att se ut som nedan.

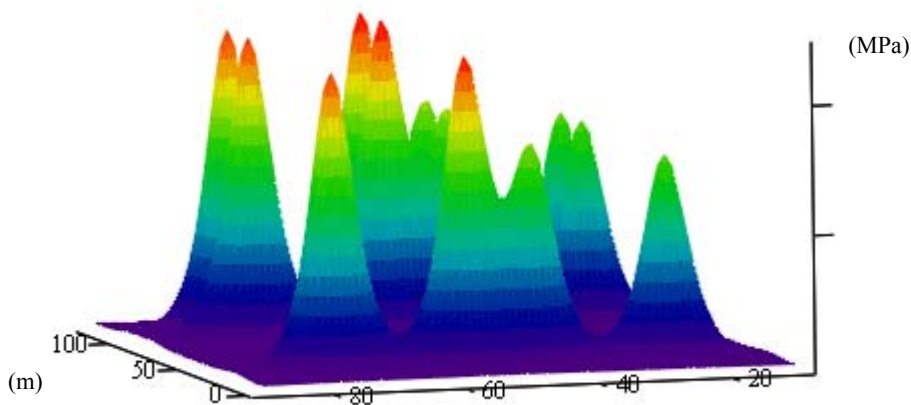
$$\sigma_{.v} = \left(\frac{P_{.1}}{2} \cdot \frac{3}{2\pi} \right) \cdot h_{.c}^3 \cdot \sum_{i=0}^5 \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_{.c}^2} \right]^5} + \left(\frac{P_{.2}}{2} \cdot \frac{3}{2\pi} \right) \cdot h_{.c}^3 \cdot \sum_{i=6}^{11} \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_{.c}^2} \right]^5}$$

Där a och b är punktlaster som har placerats ut i koordinatsystemet och som sedan kommer att variera längs bron i ett bestämt intervall, för den tänkta ekvivalentlasten är punktlaster utplacerade enligt följande (jämför med figur 4:7 ovan)

b ←	$y - 7.5m$ $y - 7.5m$ $y - 7.5m$ $y - 5.5m$ $y - 5.5m$ $y - 5.5m$ $y - 4.5m$ $y - 4.5m$ $y - 4.5m$ $y - 2.5m$ $y - 2.5m$ $y - 2.5m$	a ←	$x - 9.5m$ $x - 8m$ $x - 2m$ $x - 9.5m$ $x - 8m$ $x - 2m$ $x - 9.5m$ $x - 8m$ $x - 2m$ $x - 9.5m$ $x - 8m$ $x - 2m$
-----	--	-----	--

Nu ser man klart hur hjullasterna placeras ut i ett koordinatsystem och betraktas som punktlaster i beräkningen som beskrivs ovan. Beräkningen ska simulera att fordonen förflyttas över bron för att hitta de olika vertikala spänningarna i konstruktionen på djupet h_c , genom att definiera för Mathcad på vilket avstånd punkterna ska förflyttas, så räknar programmet ut det sökta σ_v för alla punkter på ett visst avstånd inom en viss sträcka. Resultaten ur beräkningarna sparas i en matris, för exemplet ovan där beräkningen har körts var 0,1m på en sträcka som motsvarar 15m i två filer innebär alltså att ur beräkningen fås en matris med över 1000 möjliga svar. Ur dessa värden väljer man sedan att plocka ut det största som då är det vertikala trycket som används för att räkna ut linjelast och normalkraft från trafik. Detta värde som fås ut är dock inte beräknat för att vara hjultryck på $0,2 \times 0,6m^2$ utan är beräknade som punkter vilket är beskrivet ovan hur reducering av lasten går till då en utbredd hjullast har ansats till en punklast.

För att illustrera värdena i matrisen läggs matrisen in 3D diagram så att alla de värdena som beräknades ovan blir punkter i diagrammet.



Figur 4:11 3D diagram från beräkning, ekvivalentlast 1 värden för σ_v . Röd färg symboliserar det störta trycket på djupet h_c och mörkblå det minsta trycket.

Figuren illustrerar alltså de olika tryckens storlek på ett angivet h_c , ej lastspridning eller olika djup.

För att sedan beräkna den ekvivalenta linjelasten p_{trafik} ,¹⁶ av den aktuella ekvivalentlasten följs anvisningar enligt handboken sid 19.

$$p_{\text{trafik}} := \frac{R_f \sigma_{v1} \cdot \pi \cdot h_c}{2} \quad (4.k)$$

Denna last används senare till att beräkna böjmomentet som uppkommer av trafiklast senare i beräkningen.

Utifrån den beräknade linjelasten beräknas sedan krafter i rörväggen enligt nedan.¹⁷

$$\text{För } h_{c,\text{red}} / D < 0,25 \quad ; \quad N_t = p_{\text{trafik}} + (D / 2)q$$

$$\text{För } 0,25 < h_{c,\text{red}} / D < 0,75 \quad ; \quad N_t = (1,25 - h_{c,\text{red}} / D)p_{\text{trafik}} + (D / 2)q$$

$$\text{För } 0,75 < h_{c,\text{red}} / D \quad ; \quad N_t = 0,5p_{\text{trafik}} + (D/2)q \quad (4.l', 4.l'', 4.l''')$$

Beräkningsgången som beskrivs ovan utförs för alla ekvivalentlast, dessa sammanställs och den största linjelast resp. normalkraft används sedan för fortsatt beräkning.

Den största normalkraften från trafiken ska nu kombineras med normalkraften från jordtrycket i bruks, brott- och utmattningsgränstillstånd, för alla tänkbara fall, för att hitta det maximala värdet för normalkraften som konstruktionen kan komma att belastas för. Nedan visas hur den dimensionerande normalkraften bestäms i:

¹⁶ Dimensionering av rörbroar, Pettersson och Sundquist sid 19

¹⁷ Ibid

Bruksgränstillstånd

$$\begin{aligned} N_{.d_s} &:= \max(\psi_{.\gamma_{jord_s}}) \cdot N_j + \max(\psi_{.\gamma_{trafik_s}}) \cdot (N_t) \\ N_{.d_s} &:= \max(\psi_{.\gamma_{jord_s}}) \cdot N_j + \min(\psi_{.\gamma_{trafik_s}}) \cdot (N_t) \\ N_{.d_s} &:= \min(\psi_{.\gamma_{jord_s}}) \cdot N_j + \max(\psi_{.\gamma_{trafik_s}}) \cdot (N_t) \\ N_{.d_s} &:= \min(\psi_{.\gamma_{jord_s}}) \cdot N_j + \min(\psi_{.\gamma_{trafik_s}}) \cdot (N_t) \end{aligned} \quad (4.m)$$

Brottgränstillstånd

$$\begin{aligned} N_{.d_u} &:= \max(\psi_{.\gamma_{jord_u}}) \cdot N_j + \max(\psi_{.\gamma_{trafik_u}}) \cdot (N_t) \\ N_{.d_u} &:= \max(\psi_{.\gamma_{jord_u}}) \cdot N_j + \min(\psi_{.\gamma_{trafik_u}}) \cdot (N_t) \\ N_{.d_u} &:= \min(\psi_{.\gamma_{jord_u}}) \cdot N_j + \max(\psi_{.\gamma_{trafik_u}}) \cdot (N_t) \\ N_{.d_u} &:= \min(\psi_{.\gamma_{jord_u}}) \cdot N_j + \min(\psi_{.\gamma_{trafik_u}}) \cdot (N_t) \end{aligned} \quad (4.n)$$

Utmattningsgränstillstånd

$$N_{.d_f} := \psi_{.\gamma_{trafik_f}} \cdot N_{t_f} \quad (4.o)$$

4.5 Böjmoment

Det dimensionerande böjmomentet beräknas, även här görs först uträkningar för jordlast och sedan för trafiklast. Då dimensionerande böjmoment för jordlast beräknas betraktas de olika jordmaterialen var för sig, kringfyllnadsmaterialet och överfyllnadsmaterialet, för att sedan läggas ihop för beräkning i både bruks- och brottgränstillstånd. Efter det beräknas böjmomentet för trafik och sedan kombineras dessa moment ihop, dock inte enligt alla tänkbara möjligheter utan på angivet vis enligt handboken. Vad som kan nämnas är att denna beräkning för böjmomentet av trafiklast dimensioneras lite olika för olika upplagor av handboken, *Dimensionering av rörbroar*. Senare upplaga ger avsevärt högre värde på momentet som leder till att svårigheter att klara kontrollen för rörbrons övre del.

Böjmomenten i rörväggen är beroende av förhållandet mellan rörets och omgivande jords styvheter. Förhållandet anges som en styvhetsparameter, λ_f .¹⁸

$$\lambda_f = \frac{E_{jd} \cdot D^3}{E_k \cdot I} \quad (4.p)$$

E_{jd} är jordmateriallets dimensionerande tangentmodul

$E_k I$ är rörväggens böjstyvhetsparameter.

D är brons spännvidd

¹⁸ Dimensionering av rörbroar, Pettersson och Sundquist sid 21

4.5.1 Böjmoment av jordlast¹⁹

Böjmoment för jordlast uttrycks i bruksgränstillstånd enligt ekvationen

$$\left[\frac{M_{j_s}}{\rho_{kf} \cdot D^3} = f_1 \left[f_3 \cdot f_{2_{kf}} - \left(\frac{\rho_{\text{öf}}}{\rho_{kf}} \right) \cdot \left(\frac{h_c}{D} \right) \cdot f_{2_{\text{öf}}} \right] \right] \geq 0.5 \cdot f_1 \cdot f_3 \cdot f_{2_{kf}} \quad (4.q')$$

och i brottgränstillstånd enligt ekvationen

$$\left[\frac{M_{j_u}}{\rho_{kf} \cdot D^3} = f_1 \left[f_3 \cdot f_{2_{kf}} - \left(\frac{\rho_{\text{öf}}}{\rho_{kf}} \right) \cdot \left(\frac{h_c}{D} \right) \cdot f_{2_{\text{öf}}} \right] \right] \quad (4.q'')$$

Vilket innebär att momenten, M_j , som beräknas kommer att bli lika, skillnaden är att ett krav ställs på momentet i bruksgränstillstånd, som innebär att momentet ska vara större än detta.

4.5.2 Böjmoment av trafiklast²⁰

Böjmoment av trafik beräknas enligt ekvationen

$$M_t = f_4 \cdot f''_4 \cdot f'''_4 \cdot D \cdot (p_{\text{trafik}}) \quad (4.t)$$

Hur dessa funktionsuttryck är framtagna skulle vara intressant att kunna ta del av, här skiljer sig nämligen uttrycken åt som tidigare noterat ifrån nästa upplaga av handboken, *Dimensionering av rörbroar, upplaga 3*. Vilket dock inte behandlas i detta examensarbete

4.5.3 Dimensionerande böjmoment²¹

De dimensionerande momenten av jord och trafik har i olika punkter olika riktning, därför kombineras momenten ihop enligt nedanstående formler.

I bruksgränstillstånd beräknas det dimensionerande momentet med hjälp av ekvationen

$$M_{d_s} := \max(\psi_{\gamma_{\text{jord}_s}}) \cdot M_{j_s} + \max(\psi_{\gamma_{\text{trafik}_s}}) \cdot \left(\frac{M_t}{2} \right) \quad (4.y)$$

i brottgränstillstånd beräknas det dimensionerande momentet med hjälp av ekvationen

$$M_{d_u} := \min(\psi_{\gamma_{\text{jord}_u}}) \cdot (-M_{j_u}) + \max(\psi_{\gamma_{\text{trafik}_u}}) \cdot M_t \quad (4.z)$$

och i utmattningsgränstillståndet enligt ekvationen

$$\Delta M_{d_f} := \psi_{\gamma_{\text{trafik}_f}} \cdot M_t \cdot 1.5 \quad (4.w)$$

¹⁹ Dimensionering av rörbroar, Pettersson och Sundquist sid 21

²⁰ Dimensionering av rörbroar, Pettersson och Sundquist sid 23

²¹ Dimensionering av rörbroar, Pettersson och Sundquist sid 25

4.6 Dimensioneringskontroller²²

Sista delen som programmet består av innehåller 17 stycken dimensioneringskontroller, vilka fungerar som en kontroll att konstruktionen håller för dimensionerande last utan att för den skull vara överdimensionerad, blir inte kontrollerna godkända så måste konstruktionens värden ändras, öka plåttjockleken, byta plåtkvalitet, ändra spännvidden etc.

Kontrollerna som bron ska kontrolleras mot enligt handboken är nödvändiga att genomföra vid en fullständig konstruktionsanalys. Kontrollerna kan delas in i fem huvudgrupper:

- *Allmänna kontroller*
- *Beräkningsmässiga analyser i bruksgränstillstånd*
- *Beräkningsmässig verifiering av rörväggens bärförmåga i brottgränstillstånd*
- *Beräkningsmässig verifiering av rörväggens bärförmåga i utmattningsgränstillstånd*
- *Övrig beräkningsmässig verifiering*

Allmänna kontroller: Dessa kontroller är inte definierade som kontroller i handboken men är däremot krav som ska uppfyllas,

- kontroll av att tillåten överfyllnad uppfyller kraven som ställs i Bro 2004, dvs. överfyllnad på minst 0,6m.
- kontroll av böjmoment av trafiklast är ett villkor som ställs i handboken under stycke 4.4.3 Trafiklast och har lagts in som en kontroll för att villkoret inte ska förbises.

Beräkningsmässiga analyser i bruksgränstillstånd:

- Här kontrolleras att spänningen i rörväggen inte överstiger den dimensionerande flytspänningen vid brukslast. Maximala spänningen beräknas med hjälp av Naviers ekvation.

Beräkningsmässig verifiering av rörväggens bärförmåga i brottgränstillstånd:

Här kontrolleras hela trumman i olika omgångar för olika avseenden.

- Först kontrolleras att flytled ej bildas i rörbrons övre del, detta sker med hjälp av en interaktionsformel. Den här kontrollen brukar vara den som är den svåraste att få igenom.
- Samma kontroll används sedan en gång till för att kontrollera att trummans kapacitet är tillräcklig för maximalt uppträdande normalkraft, här används samma interaktionsformel med undantag att moment inte kontrolleras utan endast normalkraften.
- Sedan kontrolleras att tillräcklig kapacitet finns i rörbrons nedre del resp. nedre hörndel (beroende på vilken tvärsnittsform som används, för en lågbyggd profil kontrolleras hörndelen också då denna är en egen plåt med en egen radie)
- Ett antal kontroller mot överskridande av skruvförbandens kapacitet följer sedan för brottgränstillstånd, här testas både bultars och plåts kapacitet

Beräkningsmässig verifiering av rörväggens bärförmåga i utmattningsgränstillstånd:

²² Dimensioneringskontroller anges i handboken Dimensionering av rörbroar, Pettersson och Sundquist. Kontrollerna i stycket är de kontroller som beräkningsrutinen använder för att kontrollera konstruktionen. Vilket inte stämmer överens med vad som anges i handboken utgåva 2. Då rutinen från början bygger på Dimensionering av rörbroar, Pettersson och Sundquist, utgåva 3, tillkommer kontroller som inte anges i upplaga 2 av skriften.

Kontroller under detta stycke är inget villkor i handboken, testas ändå då BSK 99 ställer krav på stålet för bl.a. överskridande av kapaciteten vid ren skjuvning, kombinerad dragning och skjuvning etc.

Övrig beräkningsmässig verifiering:

- Kontroll för att säkerställa trummans styvhet vid montering.

5 Resultat

Resultaten är uppdelade så som delarna i examensarbetet

5.1 Resultat av verifieringen av dimensioneringsprogrammet för

Följande stycke kommer att beskriva hur de olika programmen liknar eller skiljer sig i förhållande till varandra. Tillvägagångssättet för verifieringen har varit att jämföra programmen, avsnitt för avsnitt. Nedan följer en beskrivande presentation av resultatet av verifieringen och sist redovisas en tabell över de likheter och olikheter som har funnits.

5.1.1 Indata

Det första som skiljer de olika programmen åt väsentligt är hur indata tilldelas. I *Rörbro 2.4* ska följande indata definieras, jämför med beskrivningen av indata för Mathcad rutinen i stycket *4 Beskrivning av programmet* under *4.2 Indata*

Geoteknik

(Överfyllnaden)

Friktionsvinkel

Densitet

Densitet under grundvattenytan

Överfyllnaden

(Kringfyllnaden)

Friktionsvinkel

Densitet

Densitet under grundvattenytan

Tangentmodul

Jord på grundläggningsnivån

Profilvariabler

Diameter

Höjd

Toppradie

Valvhöjd

Plåtvariabler

Korrugering

Plåttjocklek

Plåtkvalité

Sammanfogning

Antal skruvar

Hållfasthet skruvar

Totalt är det alltså 18 indata som behöver anges i *Rörbro 2.4*. I Mathcad rutinen ska 36 indata definieras se *4.2 Beskrivning av programmet* eller bilaga I. Avvikelsen mellan programmens olika antal indata är stor med tanke på att programmen bygger på samma handling, *Dimensionering av rörbroar, Pettersson och Sundquist, KTH, utgåva 2*. Antagligen är det så att det ligger data och information bakom de parametrarna man anger i *Rörbro 2.4*, programmet är utvecklat av en leverantör av rörbroar och anpassat för deras produkter vilket

innebär att t.ex. radier, antal skruvar och rader mm redan finns definierat då en viss profil väljs.

5.1.2 Tvärsnittdata

Att båda programmen inte räknar fram samma tvärsnittdata torde bero på att programmen räknar med olika antal värdesiffror, vilket inte har så stor betydelse men bör nämnas då detta är den första beräkningsavvikelsen som programmen visar på. *Rörbro 2.4* verkar räkna med färre antal decimaler än vad Mathcad rutinen gör enligt kontroller med handberäkningar. Tvärsnittsdata som *Rörbro 2.4* är 2.24% större för både böjmotståndet och tröghetsmomentet.

5.1.3 Jordlast

Nästa del i beräkningsgången är att den maximala normalkraften som konstruktionen kan komma att utsättas för ska bestämmas, och då först normalkraften av jordlasten. Resultaten ur denna beräkning skiljer sig knappt 1%. Men då *Rörbro 2.4* använder sig av en formel för att beräkna S_v , en beräkningsparameter, (som används för att beräkna κ , ytterligare en beräkningsparameter som sedan används för att beräkna S_{ar} , reduktionsfaktor för överlast beroende på valvverkan) som **inte** återfinns i handboken, så är det ändå av vikt att nämna detta.

Här använder sig inte programmen av samma formel för att beräkna S_v , en beräkningsparameter, *Rörbro 2.4* använder sig här av formel:

$$S_v = \frac{0.8 \tan \varphi_{\text{sd}}}{\left(\sqrt{1 + \tan^2 \varphi_{\text{sd}} + 0.45 \tan \varphi_{\text{sd}}} \right)^2}$$

Enligt handboken *Dimensionering av rörbroar, KTH, utgåva 2*, ser formeln för beräkningsparametern ut så här:

$$S_v = \frac{0.8}{\left(\sqrt{1 + \tan^2 \varphi_{\text{sd}} + 0.45 \tan \varphi_{\text{sd}}} \right)^2}$$

Den första formeln är hämtad från en senare utgåva av handboken, vilket verkar konstigt då programmet hänvisar till den tidigare utgåvan dvs. utgåva 2. Skillnaden på resultaten är liten men då olika formler används för beräkning av parametern används så bör det dock noteras.

5.1.4 Trafiklast

Hur man sedan redovisar den tänkta belastningen som bron ska dimensioneras för så skiljer sig programmen emot varandra, dock skiljer resultaten som fås av båda programmen endast 1-2% jämfört med varandra, vilket inte är någon avvikelse att tala om. Hur beräkningarna redovisas skiljer sig enormt, *Rörbro 2.4* redovisar inte alls hur σ_v hittas, vilket är den avgörande parametern för att beräkna linjelast och normalkraft av trafik som konstruktionen kan komma att utsättas för.

En jämförelse har gjorts genom att förhållandet mellan det framtagna σ_v och det beräknade värdet för linjelast, p_{trafik} har jämförts mellan programmen för att kontrollera så att förhållanden stämmer, vilket innebär att de borde bli samma värde oavsett σ_v , vilket de inte blir.

Förhållandet $\sigma_v / p_{\text{trafik}}$
Rörbro 2.4 = 0,960
Mathcad rutin = 0,943

Skillnaden är väldigt liten och beror på att *Rörbro 2.4* använder det reducerade värdet för överfyllnaden, $h_{c,red}$, vilket inte verkar korrekt enligt handboken. Att π inte heller beräknas med mer än 2 decimaler bidrar också till att förhållandena inte stämmer med varandra. Enligt handberäkningar fås samma förhållande om värdet för h_c och π sätts till lika.

$$p_{trafik} := \frac{R_f \cdot \sigma_v \cdot \pi \cdot h_c}{2} \qquad p_{trafik} := \frac{R_f \cdot \sigma_v \cdot \pi \cdot h_{c,red}}{2} \qquad (4.k)$$

Ekvation enligt handboken

Ekvation som *Rörbro 2.4* använder

För alla ekvivalentlasterna beräknar Mathcad programmet ett lägre maximalt σ_v , vertikalt tryck i jord under punktlast, än vad *Rörbro 2.4* gör. Skillnaden är som redan nämnt endast 1-2% och ska därför inte ses som en avvikelse.

Om *Rörbro 2.4* betraktar hjultrycken som utbredda hjullaster eller punktlaster framgår egentligen inte heller. De reducerade värdena på σ_v som fås i Mathcad rutinen stämmer noggrannare överens med σ_v som fås i programmet *Rörbro 2.4*, än vad det oreducerade värdet i Mathcad rutinen gör. Antagande görs här att *Rörbro 2.4*, med eller utan reduktion, räknar med att hjullasterna är utbredda, vilket är det väsentliga. I handboken framgår det att hjullasterna ska betraktas som punktlaster i beräkningen för att sedan justeras med en reduktionsfaktor för att hänsyn ska tas till hjulens lastutbredning. Att *Rörbro 2.4* tar hänsyn till detta syns genom kontroller där olika lastutbredningar har jämförts med handberäkningar, men det framgår inte genom text eller beräkningar.

Slutligen kan alltså noteras att det som skiljer de två programmen ifrån varandra är att *Rörbro 2.4* **inte** redovisar hur resultatet av σ_v fås, vilket är det som Vägverket tidigare har anmärkt på.

5.1.5 Normalkraft och böjmoment

Att beräkna den dimensionerande normalkraften skall enligt handboken kap 4.3.6 *Dimensionerande normalkraft*, ske genom att alla tänkbara lastfall (normalkraft av jord och normalkraft av trafik) kombineras i bruks- och brottgränstillstånd samt utmattningsgränstillstånd. (Som visas ovan, 4.4 Snittkrafter) I *Rörbro 2.4* framgår det inte i redovisningen vilka fall som testas, resultaten mellan beräkningarna skiljer sig inte mycket men redovisningsmässigt så kan det inte avgöras om alla tänkbara fall testas.

Alltså är det även här inte fråga om några beräkningsmässiga avvikelser utan redovisningsmässiga.

Sista beräkningen som utförs innan kontrollerna är att maximalt böjmoment som konstruktionen kommer att utsättas för ska beräknas. Böjmomenten i röväggen är beroende av förhållandet mellan jordmaterialets och rörets styvheter, förhållandet benämns λ_f . Denna skillnad ger dock inget utslag (mindre än 1 %). Ingen avvikelse förekommer mellan programmen då beräkningarna för jorden böjmoment jämförs.

Jämförelse av beräkningarna av böjmomenten från trafik avviker inte heller från varandra . Mathcad rutinen får ett värde som är ca 2 % mindre än *Rörbro 2.7*. Skillnaden torde bero på den tidigare konstaterade avvikelsen vad gäller p_{trafik} .

För övrigt används ett annat värde för överfyllnaden i *Rörbro 2.4*, även här räknar programmet med det reducerade värdet, $h_{c,red}$.

Formel enligt handbok: Formel som *Rörbro 2.4* använder:

$$f_{.4}^m := \left(\frac{h.c}{D} \right)^{-0.75} \quad f_{.4}^m := \left(\frac{h.c_{red}}{D} \right)^{-0.75}$$

$$M_{.t} := f_{.4} \cdot f_{.4}^m \cdot f_{.4}^m \cdot D \cdot (p_{.trafik})$$

(4.x, 4.t)

När sedan dimensionerande böjmoment ska hittas så kombinerar båda programmen momenten för jord och trafik på angiven metod enligt handboken. Mathcad programmet får dock lägre värden för momenten både i bruks, brott- och utmattningsgränstillstånd. Vilket beror på att Mathcad programmets böjmoment för trafik ligger 2 % lägre.

5.1.6 Dimensioneringskontrollerna

Hur kontrollerna är uppställda i Mathcad programmet har redovisats tidigare under 3.6 *Dimensioneringskontroller*. Där framgår det att 17 stycken kontroller är uppdelade i fem grupper, vilka är:

- *Allmänna kontroller*
- *Beräkningsmässiga analyser i bruksgränstillstånd*
- *Beräkningsmässig verifiering av rörväggens bärförmåga i brottgränstillstånd*
- *Beräkningsmässig verifiering av rörväggens bärförmåga i utmattningsgränstillstånd*
- *Övrig beräkningsmässig verifiering*

Rörbro 2.4 består av tio kontroller, alltså sju kontroller färre. För att få koll på vilka kontroller som programmen båda tillämpar så har båda programmens kontroller radats upp nedan.

5.1.1 Kontroll av tillåten överfyllnad enligt Bro 2004	5.1 Kontroll av tillåten överfyllnad
5.1.2 Kontroll av böjmoment av trafiklast	5.2 Kontroll av böjmoment av trafiklast
5.2.1 Säkerhet mot begynnande flytning i bruksgränstillstånd	5.3 Kontroll av säkerhet mot begynnande flytning i rörvägg bruksgränstillstånd
5.3.1 Kontroll av att flytled ej bildas i rörbrons övre del	5.4 Kontroll att flytled ej bildas i rörbrons övre del
5.3.1 b Kontroll av kapacitet med avseende på uppträdande maximal normalkraft	5.5 Kontroll att tillräcklig kapacitet finns i rörbrons nedre del
5.3.2 Kontroll av att tillräcklig kapacitet finns i rörbrons nedre del	5.6A Kontroll att säkerhet mot överskridande av skruvförbandens kapacitet
5.3.2 b Kontroll av tillräcklig kapacitet finns i rörbrons nedre hörndel	5.6B Kontroll av att skruvarnas kapacitet är tillräcklig mot hålkantbrott i plåten
5.3.3.1 Kontroll av att skruvarnas kapacitet är tillräcklig mot skjuvbrott i skruven	5.6C Kontroll av momentkapacitet i plåtskarv
5.3.3.2 Kontroll av att skruvarnas kapacitet är tillräcklig mot hålkantbrott i plåten	5.7 Kontroll av styvhet vid montering
5.3.3.3 Kontroll av momentkapacitet i plåtskarv	5.8 Kontroll av utmattning
5.3.3.4 Kontroll mot överskridande av skruvförbandens kapacitet vid kombinerad dragning och skjuvning	
5.4.1 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid ren dragning i utmattningsgränstillstånd	
5.4.2 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid ren skjuvning i utmattningsgränstillstånd	
5.4.3 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid kombinerad dragning och skjuvning i utmattningsgränstillstånd	
5.4.4 Kontroll av utmattning i plåt	
5.5.1 Kontroll av styvhet vid montering + rund sektion	

Utav sammanställningarna ovan och genom jämförelse av kontrollerna kan det sammanfattas att *Rörbro 2.4* saknar fem kontroller som *Mathcad* programmet har. Det som *Mathcad* kontrollera och inte *Rörbro 2.4* är

- Kapacitet med avseende på uppträdande maximal normalkraft
- Att tillräcklig kapacitet finns i rörbrons nedre hörndel
- Att kapaciteten inte överskrids vid ren skjuvning i utmattningsgränstillstånd
- Att kapaciteten inte överskrids vid kombinerad dragning och skjuvning i utmattningsgränstillstånd
- Utmattning i plåt

Att kontroll för att bron klarar den maximala normalkraften ska utföras, anges inte i handboken *Dimensionering av rörbroar utgåva 2*, vilket då är en förklaring till varför kontrollen då saknas i beräkningen som görs med *Rörbro 2.4*. I nästa utgåva som finns av handboken, utgåva 3, anges det att en sådan kontroll ska utföras, Mathcad rutinen som från början är utvecklad efter just den upplagan innehåller då av naturliga skäl den kontrollen. Samma sak gäller för kontroll av trumman nedre hörndel.

Kontrollerna som utförs i utmattningsgränstillståndet vad gäller skjuvning och kombinerad drag och skjuvning anges i handboken, upplaga 2, där sägs att kapaciteten ska testas mot detta.

5.1.7 Sammanställning och slutsatser av verifieringen för det valda objektet

	Mathcad		<i>Rörbro 2.4</i>		
Avsnitt	Redovisning	Resultat	Redovisning	Resultat	Kommentar
Indata	36 st		18 st		Konstigt då samma beräkningar ska utföras. <i>Rörbro 2.4</i> innehåller antagligen mer information än vad som visas
Tvårsnittsdata	Redovisar beräkning om så väljs	W=43.41mm ³ /mm I=1150.25mm ⁴ /mm A=3.77mm ² /mm	Redovisar inte beräkning	W=44.4 mm ³ /mm I=1176.6mm ⁴ /mm A=3.77 mm ² /mm	<i>Rörbro 2.4</i> beräknar både böjmoment och tröghetsmoment till 2,4 % större värden. Skillnaden torde bero på att färre antal värde siffror används
Jordlast		68.81kN/m		69.38kN/m	<i>Rörbro 2.4</i> beräknar beräkningsparametern S _v enligt en annan upplaga av handboken. Ingen avvikelse av resultat att uppmärksamma.
Trafiklast	Redovisar beräkning av σ_v	σ_{v1} = 121.02kPa σ_{v2} = 147.67 kPa σ_{v4} = 151.16 kPa σ_{vu} = 82.99 kPa	Redovisar inte beräkning av σ_v	σ_{v1} = 123.90 kPa σ_{v2} = 150.98 kPa σ_{v4} = 152.32 kPa σ_{vu} = 83.83 kPa	Stora skillnader i redovisning, knappt ingen avvikelse i resultat. <i>Rörbro 2.4</i> använder fel värde för h _c
Normalkraft och böjmoment	Redovisar beräkningar och resultat	N _d = 316.12 M _d =8.30 (brott)	Redovisar beräkningar och resultat	N _d = 314.22 M _d =8.45 (brott)	Avvikelsen för M _d beror på att värdet h _{c,red} används vid ber av moment av trafik i <i>Rörbro 2.4</i> , vilket är en orsak till avvikelse
Dimensioneringskontroller	Redovisar 17 kontroller	Alla kontroller går igenom	Redovisar 10 kontroller	Alla kontroller går igenom	Mathcad programmet redovisar 7 kontroller fler är <i>Rörbro 2.4</i>

Vad man kan konstatera av denna sammanställning är att programmen räknar relativt lika och de små beräkningsmässiga skillnader som finns beror antingen på att programmen räknar med olika antal decimaler eller att olika värden för vissa parametrar har tilldelats. Programmen verkar räkna lika och det är det som är det väsentliga. Redovisningsmässigt är det mycket som skiljer de åt, i *Rörbro 2.4* saknas det både redovisning vad det gäller beräkningar i första hand men även hur indata tilldelas. Kontrollerna i Mathcad rutinen är fler vilket dels beror som redan nämnt att rutinen från början grundar sig på en nyare upplaga av handboken där det

anges att konstruktionen bör testas mot dess, men också att två kontroller i utmattningsgränstillstånd vad gäller skruvförbanden inte utförs i *Rörbro 2.4*.

5.2 Resultat av vidareutvecklingen av programmet för järnvägslast

För dimensionering av broar som är avsedda för järnvägstrafik gäller *BV Bro, utgåva 9*, som är banverkets ändringar och tillägg till vägverkets *Bro 2004* inklusive supplement 2. I detta examensarbete har *BV Bro, utgåva 8* använts vid framtagning av programmet då handboken som gäller som publikation *Dimensionering av rörbroar*, utgåva 2, anges i *Bro 2004* och *supplement 1*, vilket gör att *BV Bro, utgåva 8* blir den gällande publikationen för gällande krav på järnvägsbroar.

Utvecklingen av programmet är det slutliga resultatet av examensarbetet, nedan presenteras delar som är de avgörande för dimensionering av rörbro avsedd för järnvägstrafik och det som skiljer dimensioneringsprogrammet för järnvägstrafik från vägtrafik. Det utvecklade programmet har beräknas igenom se Bilaga III, där geoteknik, plåt- och profilvariabler mm är valt utifrån samma konstruktion som användes i jämförelsen mellan Mathcad rutinen och *Rörbro 2.4*.

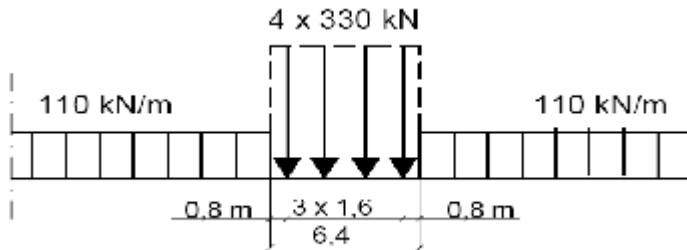
5.2.1 Laster

Lastförutsättningarna skiljer sig en del jämfört med lasterna från vägtrafik, lasterna som konstruktionen ska beräknas efter är två och benämns *tåglast BV 2000* och *tåglast Malm 2000* enligt *BV Bro, utgåva 8*. Vidare anges även att Banverket ska ange vilken last som en bro ska beräknas för i varje enskilt fall, för en bro med två spår ska den valda lasten beräknas för båda spåren. Spåravståndet ska vid fler än ett spår antas vara 4,5m.²³ Programmet som har tagits fram i examensarbetet är begränsat till att dimensionera rörbroar med 2 spår, här beräknas båda lasterna och den dimensionerande, alltså *BV Malm*, blir den last som används till dimensioneringen. Hur lasterna har identifierats, tolkats och översatts till Mathcad rutinen enligt *BV Bro, utgåva 8* och *Dimensionering av rörbroar, KTH*, beskrivs nedan:

²³ *BV Bro, utgåva 8, BV 21.22 Trafiklast*

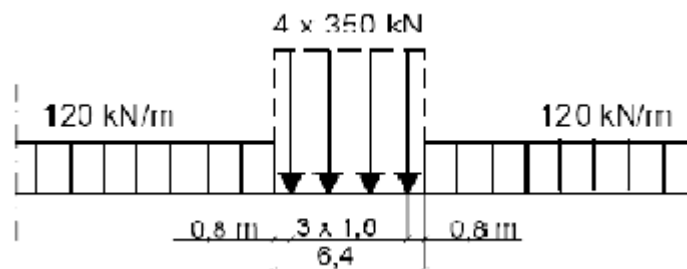
Tåglasternas inverkan i vertikalled

Tåglast BV 2000



Figur 5:1 Tåglast BV 2000, figur från BV Bro

Tåglast BV Malm



Figur 5:2 Tåglast Malm 2000, figur BV Bro

Ovan illustreras lasterna enligt *BV Bro*, utgåva 8. De består av axellaster och jämnt fördelad last. Dessa ska vid beräkning av en konstruktion vara uppställda på det mest ogynnsamma sätt. Att beräkna axellaster som antas ligga på avstånd 1,6m utspridda på slipers med avstånd 0,65m beskrivs i handboken *Dimensionering av rörbroar* i bilaga 6, trafiklast för rörbro under järnväg vilket inte är den metod som har använts i examensarbetet och lämnas härmed. I *BV Bro*, utgåva 8 beskrivs hur axellaster ersätts med en jämnt fördelad last av 206kN/m för *tåglast BV 2000* resp 219kN/m för *tåglast Malm 2000*. Ersättning av axellaster får ske för bärverk med direkt slipersuppläggning och spännvidd mer än 5m eller vid bro med minst 0,6m ballast.²⁴ Vilket det anats till för fallen som ska beräknas med programmet då rörbroar under spår ska ha en minsta fyllnadshöjd på 1,2m enligt *BV Bro* utgåva 8.

För att Mathcad programmet ska kunna beräkna den maximala vertikala trycket i jorden under punktlaster som är det som man söker, krävs att denna punktlaster beräknas eller uppskattas, som kan tänkas belasta varje sliper. Detta har gjorts genom att den utbredda lasten lagts in i ett balkanalys program och på så sätt har den maximala stödreaktionen hittats och använts som punktlaster. Varje stöd symboliserar en sliper och balken rälsen. Två beräkningar/analyser har gjorts för varje lastfall för att hitta den maximala stödreaktionen för respektive last dvs. 110 kN/m och 206 kN/m för *tåglast BV 2000* och 120kN/m och 219kN/m för *tåglast Malm 2000*. Resultatet blev att för lasten 110kN/m används en punktlaster på 88kN, för lasten 206kN/m används en punktlaster på 164kN och för lasterna 120kN/m och 219kN/m används punktlaster 96kN resp. 174kN. Dessa punktlaster antas nu angripa varje sliper i dess mittpunkt som punktlaster vilket är ett antagande på säkra sidan och nu ser denna beräkning ut i princip som simuleringen av hjullaster i dimensioneringsprogrammet för vägtrafik.

²⁴ BV Bro, utgåva 8, BV 21.22 Trafiklast

$$\sigma_v = \frac{P \cdot 3}{2 \cdot 2\pi} \cdot h_c^3 \cdot \left(\sum_i \frac{1}{s_i^5} \right) \quad (b4.c)$$

Ekvationen för BV 2000 kommer då att se ut som nedan

$$\sigma = \varepsilon \cdot \left(P1 \cdot \frac{3}{2 \cdot \pi} \right) \cdot h_c^3 \cdot \sum_{i=0}^{11} \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_c^2} \right]^5} + \varepsilon \cdot \left(P2 \cdot \frac{3}{2 \cdot \pi} \right) \cdot h_c^3 \cdot \sum_{i=12}^{27} \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_c^2} \right]^5} + \varepsilon \cdot \left(P1 \cdot \frac{3}{2 \cdot \pi} \right) \cdot h_c^3 \cdot \sum_{i=28}^{39} \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_c^2} \right]^5}$$

Där a och b är punktlaster som har placerats ut i koordinat systemet och som sedan kommer att variera längs bron.

P är punktlaster som tas fram enligt metoden som beskrivs ovan och får värdena:

Tåglast BV 2000

P1 = 88kN

P2 = 164kN

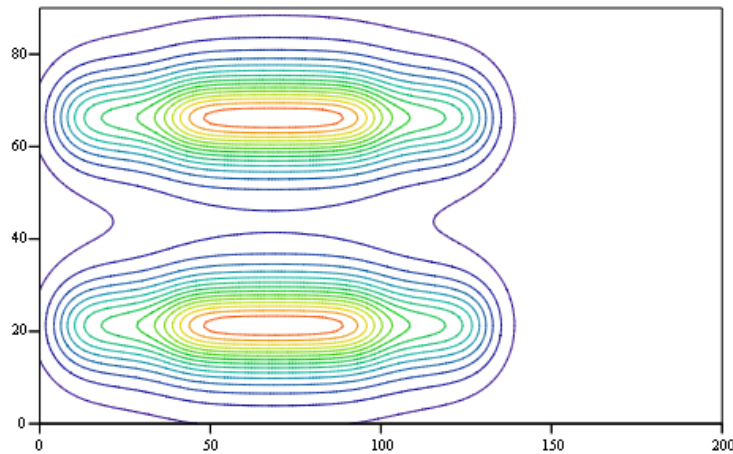
Tåglast BV Malm

P1 = 96kN

P2 = 174kN

a ←	(x - 12.70m)	(y - 6.625m)
		x - 12.70m			y - 2.125m	
		x - 12.05m			y - 6.625m	
		x - 12.05m			y - 2.125m	
		x - 11.40m			y - 6.625m	
		x - 11.40m			y - 2.125m	
		x - 10.75m			y - 6.625m	
		x - 10.75m			y - 2.125m	
		x - 10.10m			y - 6.625m	
		x - 10.10m			y - 2.125m	
		x - 9.45m			y - 6.625m	
		x - 9.45m			y - 2.125m	
		x - 8.80m			y - 6.625m	
		x - 8.80m			y - 2.125m	
		x - 8.15m			y - 6.625m	
		x - 8.15m			y - 2.125m	
		x - 7.50m			y - 6.625m	
		x - 7.50m			y - 2.125m	
		x - 6.85m			y - 6.625m	
		x - 6.85m			y - 2.125m	
	b ←	x - 6.20m			y - 6.625m	
		x - 6.20m			y - 2.125m	
		x - 5.55m			y - 6.625m	
		x - 5.55m			y - 2.125m	
		x - 4.90m			y - 6.625m	
		x - 4.90m			y - 2.125m	
		x - 4.25m			y - 6.625m	
		x - 4.25m			y - 2.125m	
		x - 3.60m			y - 6.625m	
		x - 3.60m			y - 2.125m	
		x - 2.95m			y - 6.625m	
		x - 2.95m			y - 2.125m	
		x - 2.30m			y - 6.625m	
		x - 2.30m			y - 2.125m	
		x - 1.65m			y - 6.625m	
		x - 1.65m			y - 2.125m	
		x - 1.0m			y - 6.625m	
		x - 1.0m			y - 2.125m	
		x - 0.35m			y - 6.625m	
		x - 0.35m			y - 2.125m	

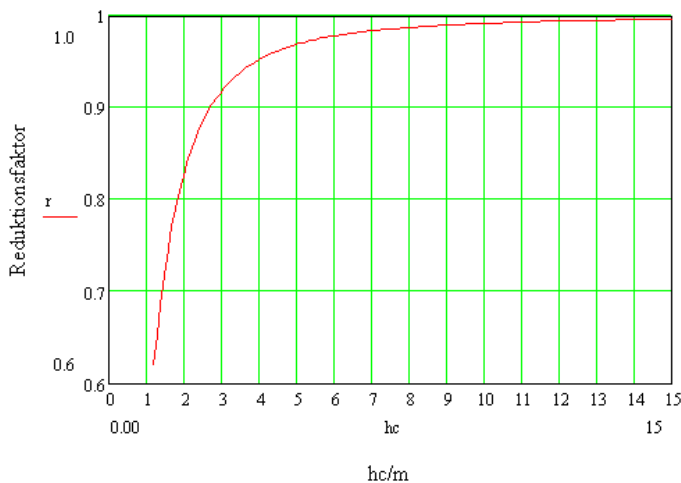
Punkterna placeras alltså ut i koordinatsystemet som last 0 till 39 i matriserna ovan, alltså 40 punkter (observera att matrisens första element har numrering 0). Bron beräknas för två spår vilket syns eftersom två olika y-värden finns definierat för samma x-värde, alltså utförs beräkningen för 20 sliprar på varje spår dvs. fordonet antas till en längd av 13m. Dessa punkter symboliserar alltså en punkt i varje sliper på anståndet 0,65m i två spår med centrum avstånd på slipers 4,5m. Dessa punkter ska nu variera längs bron för att hitta den punkt där det största värdet för σ_v på djupet h_c .



Figur 5:3 Tåglast BV 2000 utlagd i ett koordinatsystem, dubbelspår. Färgskalan som utgör hjultrycken i koordinatsystemet beror på storleken på trycket i punkten på djupet h_c . Figuren ovan är en färgplott i 2D av det 3D diagram som redovisas i beräkningen för maximala värdet på σ_v . Röd symboliserar det största trycket medan mörkblå symboliserar det minsta trycket.

5.2.2 Reduktion med hänsyn till slipersens lastutbredning

En reduktionsfaktor, R_f har tagits fram för lastutbredningen, som här ser annorlunda ut mot hjultrycken som det tidigare programmet räknar med, hjultrycken antas till $0,2 \times 0,6\text{m}^2$ enligt *Bro 2004*, slipersen har måtten $0,2 \times 2,25\text{m}^2$ enligt BV Bro.



Figur 5:4 Reduktionsfaktor med hänsyn till slipersens lastutbredning

Slipersens reduktion för lastutbredning är relativt stor i jämförelse med reduktionen för hjulens lastutbredning, vilket inte är konstigt då lastarean skiljer sig markant. (Lastarea för sliper $0,45\text{m}^2$ och för en hjullast $0,12\text{m}^2$).

Detta har gjorts genom att den tänkta punktlasten har delats upp i ett antal punktlaster inom lastarean som ska beräknas, här alltså slipersens lastarean, för att på så sätt simulera att lasten skulle vara en utbredd last och inte en punktlast. Ekvationerna nedan beräknas för olika h_c , från 1,2m som är minsta överfyllnaden som tillåts för rörbroar enligt BV Bro kap 9.

$$\sigma_{\text{punkt}} = \left(P \cdot \frac{3}{2\pi} \right) \cdot h_c^3 \cdot \sum_{i=0}^0 \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_c^2} \right]^5} \quad \sigma_{\text{utbredd}} = \left(\frac{P}{4} \cdot \frac{3}{2\pi} \right) \cdot h_c^3 \cdot \sum_{i=0}^3 \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_c^2} \right]^5}$$

Dessa två jämförs sedan genom $\sigma_{\text{utbredd}} / \sigma_{\text{punkt}}$, resultatet antas till avvikelser för varje specifikt h_c , som uppstår då den utbredda lasten på $0,2 \times 2,25\text{m}^2$ antas till en punktlast. Resultat syns i figur 5:4 ovan.

5.2.3 Dynamiskt tillskott²⁵

Tåglastens dynamiska inverkan beräknas enligt *BV Bro, upplaga 8*, BV 21.2216 punkt a) och c).

Enligt punkt a) i *BV Bro* ska den vertikala lasten multipliceras med en dynamikkoefficient som är en funktion av bestämmande längd enligt formeln

$$\varepsilon := 1.0 + \frac{4}{8 + L_{\text{best}}}$$

Där L_{best} är bestämmande längd i m och för rörbroar avses då dubbla spännvidden enligt tabell BV 21.2216a.

$$L_{\text{best}} := 2 \cdot D$$

Lasten multipliceras alltså med dynamikkoefficienten för att öka dess värde på grund av dynamisk inverkan.

Enligt samma avsnitt punkt c) *BV Bro* gäller att avståndet mellan det som kallas räls överkant, RÖK, och brobaneplattans överyta överstiger 1,2m får dynamikkoefficienten, ε , minskas enligt formeln nedan. Vilket detta avstånd alltid gör då minimikravet på överfyllnaden är 1,2m. Dock får den reducerade dynamikkoefficienten inte understiga värdet 1,0.

$$\Delta d = 0.1 \cdot (h_c - 1.2)$$

5.2.4 Sammansättning av beräkningsrutin med resonemang

Utifrån de delar som har behandlats ovan vad gäller lastförutsättningar, reduktionsfaktor och dynamiskt tillskott följer nu en kort beskrivning över hur rutinen är tänkt att fungera. Den fungerar i stort sätt på samma sätt som den tidigare rutinen, med några saker kan vara värda att belysa. För att se resultatet hänvisas till Bilaga III, en bro har beräknats i rutinen, samma typ av bro som i veriferingen.

Som tidigare tilldelas all indata programmet vad gäller geoteknik och data för rörbro vad gäller plåtkoefficienter, tvärsnittsmått etc. Belastningen räknas om från axellaster till utbredda laster dels för att det i *BV Bro, utgåva 8* ges anvisningar på att det får göras och dels för att förenkla lastfördelningen. Här kan programmet inte hänvisas till handboken utan endast till *BV Bro*. Att anta lasten på detta sätt innebär att de punktlaster som beräknas fram från den utbredda lasten som anges i *BV Bro*, som kommer att belasta slipersena, beräknas väl på säkra sidan då beräkningen utgår ifrån att varje sliper, alltså alla slipers, belastas med den maximala lasten samtidigt, vilket aldrig kommer att inträffa. I *BV Bro* anges även att för broar med två spår ska båda spåren belastas med samma lastfall, *tåglast BV 2000* eller *tåglast BV Malm*. Det görs i programmet, vad som dock bör observeras är att programmet sedan väljer det största

²⁵ *BV Bro, utgåva 8, BV 21.2216 Tåglastens dynamiska inverkan*

vertikala trycket för fortsatt beräkning, vilket betyder att bro som dimensioneras alltid dimensioneras för *tåglast BV Malm* eftersom den alltid kommer att ge det högsta värdet för σ_v . I *BV Bro* anges att Banverket i varje enskilt fall ska ange vilken last som bron ska dimensioneras för. Alltså måste det ändras i beräkningen så att programmet väljer σ_v för den lägre lasten om så anges.

De kontroller som är de svåra att få igenom är de kontroller som utförs i utmattningsgränstillståndet för skruvförbandet. För att få igenom kontrollen som kontrollerar att kapaciteten inte överskrids vid dragning skulle antingen a-måttet behöva ökas till 0,09m eller antal skruvar ökas. Nästa kontroll som inte går igenom är den där skjuvningen kontrolleras, den går igenom om antalet skruvar ökas till 12 i stället för 10. Sista kontrollen som inte går att få igenom med hjälp av att öka plåttjockleken, överfyllnaden eller spännvidden är kontrollen där skjuvningen och draget i skruvförbandet kontrolleras. Ökas f_{uk} till värde som överskrider 600 och antal skruvar ökas till 13 så går även denna kontroll igenom.

5.3 Resultat av litteraturstudien av Eurokoder

Denna övergång kommer att innebära vissa förändringar för bland annat laster och lastkombinationer (EN 1991-2 kap 4.3). Vilket innebär att bla *Bro 2004* och *BV Bro* kommer att ersättas med *Eurokoder*. Övergången kommer även att innebära att normer så som *BKR*, *BSK* och *BBK* etc. kommer att ersättas med *Eurokoderna*, nedan räknas *Eurokod 3* för stålkonstruktioner upp, den består av 20 delar. Alla delar rör dock inte projektering och konstruktion av rörbroar.

SS-EN 1993-1-1: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 1-1: Allmänna regler och regler för byggnader

SS-EN 1993-1-2: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 1-2: Allmänna regler. Brandteknisk dimensionering

SS-EN 1993-1-3: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 1-3: Kallformade profiler och profilerad plåt

SS-EN 1993-1-4: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 1-4: Rostfritt stål

SS-EN 1993-1-5: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 1-5: Plåtbalkar

SS-EN 1993-1-6: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 1-6: Skal

SS-EN 1993-1-7: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 1-7: Plana plåtkonstruktioner med transversallast

SS-EN 1993-1-8: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 1-8: Dimensionering av knutpunkter och förband,

SS-EN 1993-1-9: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 1-9: Utmattning,

SS-EN 1993-1-10: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 1-10: Seghet och egenskaper i tjockleksriktningen

SS-EN 1993-1-11: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 1-11: Dragbelastade komponenter

SS-EN 1993-1-12: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 1-12: Tillägsregler för stålsorter upp till S700

SS-EN 1993-2: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 2: Broar

SS-EN 1993-3-1: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 3-1: Torn och master

SS-EN 1993-3-2: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 3-2: Skorstenar

SS-EN 1993-4-1: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 4-1: Silor

SS-EN 1993-4-2 Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 4-2: Cisterner

SS-EN 1993-4-3: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 4-3: Rörledningar

SS-EN 1993-5: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 5: Pålar och spont

SS-EN 1993-6: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner, del 6: Kranbanor²⁶

Vilka delar i rörbroprogrammet (som är skrivet i Mathcad efter handboken *Dimensionering av rörbroar*) som kommer att påverkas av standarden ovan ska nu förklaras. Att *BSK 99* kommer att ersättas innebär att all dimensionering, utförande och kontroll av stålkonstruktioner alltså kommer att beröras.

För dimensioneringens del betyder det att en del förändringar är på ingång. För rutinen innebär det förändringar för följande delar i beräkningen:

- Kontrollen som utförs i brottgränstillstånd där det kontrolleras att flytled ej bildas i trummans övre del
- Dimensionering av skruvförband och kontroller för dessa
- Lastförutsättningar förutsättningar samt last- och partialkoefficienter

Enligt handboken, *Design of steel composite bridges*, engelsk översättning av *Dimensionering av rörbroar*, är det bara de två första punkterna som hänsyn ska tas till efter implementeringen av *Eurokoderna*²⁷. Men då lastfall, typfordon etc. finns definierat i *Eurokod 1*²⁸ kommer dessa gälla för dimensionering av broar, från och med 2010 måste *Eurokoderna* användas för dimensionering av broar.²⁹

²⁶ <http://www.sis.se/DesktopDefault.aspx?tabName=%40projekt&PROJID=8400&menuItemID=6860>

²⁷ *Design of steel composit, Pettersson and Sundquist, report 112, p 40*

²⁸ Examensarbete *Brolaster enligt Eurocode- En jämförelse av dimensionerande brolasters påverkan enligt Bro 2002 och Eurocode*

²⁹ <http://www.vv.se/filer/18936/referensgrupp20070504.pdf>

I kontrollen som utförs i brottgräns där det kontrolleras att flytled ej bildas i trummans övre del ersätts interaktionsformeln som tidigare har använts enligt handboken med formel enligt EN 1993-1-1,6.61 enligt nedan.

Tidigare formel enligt handboken *Dimensionering av rörbroar*

$$\left(\frac{N_{d,u}}{N_{cr}} \right)^{\alpha_c} + \frac{M_{d,u}}{M_{u}} \leq 1 \quad (5.b)$$

ersätts alltså med ekvationen EN 1993-1-1,6.61

$$\frac{N_{Ed}}{\left(\frac{\chi_y \cdot N_{Rk}}{\gamma_{M1}} \right)} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\gamma_{M1}} \leq 1.0 \quad (5.b')$$

Hur kontrollen beräknas förklaras i handboken *Dimensionering av rörbroar* som nu har översatts till *Design of steel composite bridges* av samma författare. Detta kommer inte att förklaras närmare i examensarbetet, då endast en liten utredning av **vad** som kommer att beröras av Eurokodernas införande skulle vara det som arbetet skulle beröra enligt frågeställningen.

Dimensionering av skruvförband och kontroller är också en del som kommer att genomgå en förändring vid övergången till Eurokoderna och som behandlas i handboken *Design of steel composite bridges*. Skruvförband behandlas i det som heter *del 1-8 Dimensionering av knutpunkter och förband* i ståldelen för Eurokoderna alltså *Eurokoder 3* ovan, med undantag för det den sista kontrollen som sker i utmattning och som då anges i *del 1-9 Utmattning*. Och då ska enligt handboken kontrolleras mot överskridande av dess kapacitet vid ren dragning, vid ren skjuvning och vid kombinerad dragning och skjuvning.³⁰

Typfordonen och hjulens lastmått ser annorlunda ut för dimensionering enligt Eurokoderna, vilket visas i figurerna på nästa sida. Figurerna är hämtade från ett examensarbete från Chalmers som heter *Brolaster enligt Eurocode- En jämförelse av dimensionerande brolasters påverkan enligt Bro 2002 och Eurocode*. Figurerna används endast som en illustration för att kunna visa hur lastfallen kommer ändras i förhållande till hur de ser ut idag.³¹

Eurokoder som rör eller som kommer att röra laster är *Eurokod 1: Laster på bärverk – Del 2: Trafiklast på broar, SS-EN 1991-2*. Standarden definierar nyttiga laster av vägtrafik, fotgängare och järnvägstrafik som inkluderar dynamiska effekter, centrifugalkrafter mm. De laster som definieras ska användas vid dimensionering av nya broar inkluderat mellanstöd, ramben vingmurar och dess grundläggning.³² Denna del består av 6 kap:

Kap 1 Allmänt

Kap 2 Klassificering av laster

Kap 3 Dimensioneringssituationer

³⁰ *Design of steel composite bridges*, Lars Pettersson and Håkan Sundquist

³¹ Examensarbete *Brolaster enligt Eurocode- En jämförelse av dimensionerande brolasters påverkan enligt Bro 2002 och Eurocode*

³² <http://www.iso.se/DesktopDefault.aspx?tabName=%40projekt&PROJID=8400&menuItemID=6451>

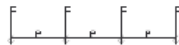
Kap 4 Laster från vägtrafik
 Kap 5 Laster på gångbanor samt GC-broar
 Kap 6 Laster från järnvägstrafik

Som synes behandlar standarden trafiklaster både på väg- och järnvägs broar och består av 6 kapitel samt 8 bilagor på 162 sidor, motsvarigheten i normerna som används idag, *Bro 2004* och *BV Bro* är på 25 sidor.

Typfordon Eurocode

F=150kN, e=1,50m

A



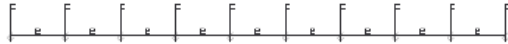
B



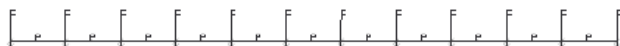
C



D



E

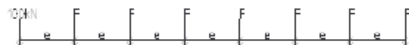


F=200kN, e=1,50m

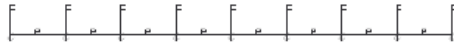
F



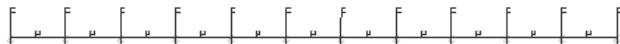
G



H

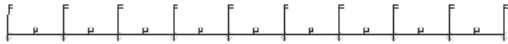


I

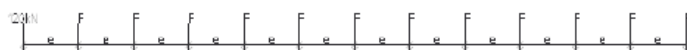


F=240kN, e=1,50m

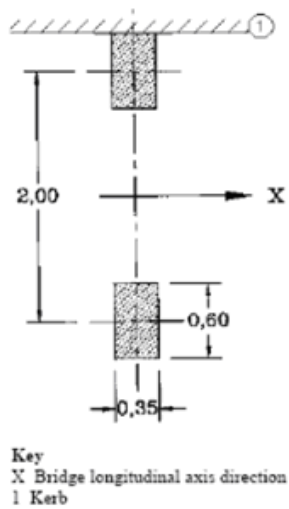
J



K



Figur 5:5 Illustration över de nya typfordonen enligt Eurocodes



Figur 5:6 Lastmodell 2, enligt EN 1991-2 kap 4.3

1 LORRY SILHOUETTE	2 Axle spacing (m)	3 Frequent axle loads (kN)	4 Wheel type (see Table 4.8)
	4,5	90 190	A B
	4,20 1,30	80 140 140	A B B
	3,20 5,20 1,30 1,30	90 180 120 120	A B C C
	3,40 6,00 1,50	90 190 140 140	A B B B
	4,80 3,60 4,40 1,30	90 180 120 110 110	A B C C C

Figur 5:7 Utmattningslastmodell 2, EN 1991-2 tabell 4.6.
 Modellen består av olika förekommande standardlastbilar. Dessa definieras enligt antal axlar, axlarnas avstånd, axellaster, lastarea och hjulparen avstånd.

6 Diskussion och Slutsats

6.1 Diskussion

Att programmen räknar relativt lika kan här konstateras trots att det skiljer en del redovisningsmässigt. Genom denna jämförelse mellan den nyutvecklade Mathcad rutinen och det äldre programmet *Rörbro 2.4* har felaktigheter upptäckts och kunnat korrigerats under arbetets gång samtidigt som ett konstaterande kan göras att det nu slutligen räknar korrekt, utifrån handbokens anvisningar. Det kvarstår begränsat med jobb då vissa ändringar måste göras för att kunna dimensionera broar enligt *Bro 2004* med ändringar i *supplement 2*. Där är nästa utgåva av handboken *Dimensionering av rörbroar, utgåva 3* den som blir den gällande publikationen och medför vissa förändringar. Ytterligare ett steg är att utveckla programmet så att dimensionering i enlighet med *Eurokoderna* bli möjlig.

Då laster, lastkombinationer, dimensionering etc. enligt ovan, kommer att se annorlunda ut, kommer nog en del förändringar att behöva göras i programmet. Vilket även gäller programmet som har dimensionerats för järnvägstrafik, antagligen kommer en nyutveckling att vänta tills ändringar ska göras enligt *Eurokoderna* då det inte alls dimensioners lika många rörbroar för detta ändamål.

Angående rutinen som har tagits fram för dimensionering för järnvägstrafik så har även denna jämförts enligt *Rörbro 2.4* för järnvägstrafik. För att en jämförelse skulle vara möjlig så var det nödvändigt att förändra Mathcad rutinen till att endast beräkna konstruktionen för ett spår, då detta var det enda möjliga sättet att beräkna bron i *Rörbro 2.4*. Avvikelserna som fick då mellan programmen var inte lika små som avvikelserna mellan dimensioneringsprogrammen för vägtrafik men då Mathcad rutinen för järnvägstrafik har tilldelats värden för punktlasterna långt på säkra så är inte avvikelsen särskilt överraskande. För mer exakta resultat ska nog en lastfördelning räknas enligt handboken, där axellasterna som ligger på ett avstånd på 1,6m fördelas på sliperserna som ligger på avstånd på 0,65m.

6.2 Slutsats

Detta examensarbete visar alltså att den nyutvecklade Mathcad rutinen kan sägas räkna korrekt efter vissa ändringar och korrigeringar som har gjorts under arbetets gång. Denna nyutvecklade rutin kan alltså sägas skilja sig mest från den äldre programvaran, *Rörbro 2.4*, redovisningsmässigt inte beräkningsmässigt.

Vad gäller den nyutvecklade rutinen för järnvägslaster så kan det konstateras att de båda programmen inte tillämpar samma lastfall. *Rörbro 2.4* använder sig av den metod som beskrivs i handboken, *Dimensionering av rörbroar*, där lasten beskrivs som 4 st axellaster på avstånd 1,6 m som fördelas på slipers, placerade på centrumavstånd 0,6 m. I Mathcad rutinen används ett villkor från BV Bro som gör det möjligt att ersätta axellasterna mot en utbredd last. Genom att lägga in lasten i ett balkanalys program har den största lasten hittats som varje sliper kan tänkas ta. Vilket är ett antagande på säkra sidan då programmet räknar med att alla slipers utsätts för denna last.

Den sista delen i detta examensarbete som har behandlat en litteraturstudie angående de framtida Eurocoderna, har visat att en hel del förändringar kommer att behövas då lastkombinationer, typfordon och utförande för dimensionering ser annorlunda ut.

7 Referenser

Dimensionering av rörbroar, Lars Pettersson och Håkan Sundquist, Rapport 58, KTH, Brobyggnad 2000, utgåva 2, ISSN 1103-4289

Dimensionering av rörbroar, Lars Pettersson och Håkan Sundquist, Rapport 58, KTH, Brobyggnad 2006, utgåva 3, ISSN 1103-4289

Design of soil steel composite bridges, Lars Pettersson and Håkan Sundquist, Report 112, KTH, Structural design and bridges, ISSN 1103-4289

Bro 2004, VV publikation 2004:56, Samhälle och trafik, Teknik, sektion Bro- och tunneltrafik, ISSN 1401-9612

Boverkets handbok om stålkonstruktioner, BSK 99, Boverket Byggavdelningen, ISSN 1400-1012, Upplaga 3:3

Supplement nr 1, VV Publ 2006:25

BV Bro, utgåva 8, Banverkets ändringar och tillägg till Vägverkets Bro 2004 inklusive supplement nr 1

Brolaster enligt eurocode- En jämförelse av dimensionerande brolasters påverkan enligt Bro 2002 och Eurocod, Mikael Andersson och Erik Karlsson, Examensarbete 2006:49, Institutionen för bygg- och miljöteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg 2006

Long span flexible metal culverts, Ultimate load calculations, Johan Hirvi, Master of science thesis, KTH, 2007, ISSN 1103-4297

<http://www.wspgroup.se/sv/Lander/> 2008-05-16

<http://www.sis.se/DesktopDefault.aspx?tabName=%40projekt&PROJID=8400&menuItemID=6860> 2008-04-24

<http://www.vv.se/filer/18936/referensgrupp20070504.pdf><http://www.vv.se/filer/18936/referensgrupp20070504.pdf> 2008-05-16

<http://www.iso.se/DesktopDefault.aspx?tabName=%40projekt&PROJID=8400&menuItemID=6451> 2008-06-26

<http://www.wspgroup.se/sv/WSP-Sverige/> 2008-06-02

Bultens teknikhandbok, www.bulten.com, 2008-05-21

8 Bilagor

- I Beräkning, med Mathcad programmet, av den valda bron för verifiering
Bro över bäck vid Öja k:a på väg 230
- II Beräkning av samma konstruktion som i bilaga I med *Rörbro 2.4*
- III Beräkning med det nyutvecklade dimensioneringsprogrammet för tåglaster

Anm. En liten stjärna bakom beräkningarna i Mathcad programmen dvs. Bilaga I och III är en markering som har uppkommit efterhand. Den saknar betydelse, har antagligen bara blivit något fel mellan uppdateringarna i programmet och saknar betydelse för beräkningarna.

Dimensionering enligt Bro 2004

Innehållsförteckning

1. Förutsättningar, handlingar

2. Förutsättningar, geoteknik

2.1 Överfyllning

2.2 Kringfyllning

2.3 Grundläggning

3. Dimensionering

3.1 Data rörebro

3.1.1 Plåtkoefficienter

3.1.2 Tvärsnittsmått

3.1.3 Sammanfogning

3.1.4 Profilvariabler

3.1.6 Tvärsnittsdata rörebro

3.2 Belastning

3.3 Säkerhetsklass

3.3.1 Säkerhetsklass rörebro

3.3.2 Säkerhetsklass geoteknik

4. Snittkrafter

4.1 Bestämning av effektiv överfyllnadstjocklek

4.2 Bestämning av normalkraft

4.2.1 Normalkraft av jordlast

4.2.2 Beräkning av ekvivalent linjelast och normalkraft av trafiklast

4.2.2.1 Reduktion med hänsyn till hjulens lastutbredning av den ekvivalenta linjelasten vid små överfyllnadshöjder

4.2.2.2 Ekvivalentlast 1

4.2.2.3 Ekvivalentlast 2

4.2.2.4 Ekvivalentlast 4

4.2.2.5 Ekvivalentlast utmattningslast

4.2.2.6 Sammanställning linjelast och normalkraft

4.2.3 Dimensionerande normalkraft

4.3 Bestämning av dimensionerande böjmoment

4.3.1 Böjmoment av jordlast

4.3.2 Böjmoment av trafiklast

4.3.3 Dimensionerande böjmoment

5. Dimensioneringskontroller

5.1 Allmänna kontroller

5.1.1 Kontroll av tillåten överfyllnad enligt Bro 2004

5.1.2 Kontroll av böjmoment av trafiklast

5.2 Beräkningsmässiga analyser i bruksgränstillstånd

5.2.1 Säkerhet mot begynnande flytning i bruksgränstillstånd

5.3 Beräkningsmässig verifiering av rörväggens bärförmåga i brottgränstillstånd

5.3.1 Kontroll att flytled ej bildas i rörbrons övre del

5.3.1b Kontroll av kapacitet med avseende på uppträdande maximal normalkraft

5.3.2 Kontroll av att tillräcklig kapacitet finns i rörbrons nedre del

5.3.2b Kontroll av att tillräcklig kapacitet finns i rörbrons nedre hörndel

5.3.3 Kontroll mot överskridande av skruvförbandens kapacitet

5.3.3.1 Kontroll av att skruvarnas kapacitet är tillräcklig mot skjuvbrott i skruven

5.3.3.2 Kontroll av att skruvarnas kapacitet är tillräcklig mot hålkantbrott i plåten

5.3.3.3 Kontroll av momentkapacitet i plåtskarv

5.3.3.4 Kontroll mot överskridande av skruvförbandens kapacitet vid kombinerad dragning och skjuvning

5.4 Beräkningsmässig verifiering av rörväggens bärförmåga i utmattningsgränstillstånd

5.4.1 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid ren dragning i utmattningsgränstillstånd

5.4.2 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid ren skjuvning i utmattningsgränstillstånd

5.4.3 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid kombinerad dragning och skjuvning i utmattningsgränstillstånd

5.4.4 Kontroll av utmattning i plåten

5.5 Övrig beräkningsmässig verifiering

5.5.1 Kontroll av styvhet vid montering

5.5.2 Kontroll av att flytled inte bildas i trumman under byggskedet då $hc=0$

6. Sammanställning kontroller

7. Beteckningar

1. Förutsättningar, handlingar

Övergripande handlingar:

Dimensionering av rörbroar, Lars Pettersson och Håkan Sundquist, Brobyggnad 2000, utgåva 2

Bro 2004, VV publikation 2004:56, Samhälle och trafik, Teknik, sektion Bro- och tunneltrafik, ISSN 1401-9612

Boverkets handbok om stålkonstruktioner, BSK 99, Boverket Byggavdelningen, ISSN 1400-1012, Upplaga 3:3
Supplement nr 1, VV Publ. 2006:25

2. Förutsättningar, geoteknik

2.1 Överfyllning

Jordtyp

Friktionsvinkel (grader)

Tunghet över grundvattenytan (kN/m³)

Tunghet under grundvattenytan (kN/m³)

Överfyllnadshöjd (m)

2.2 Kringfyllning

Jordtyp

Friktionsvinkel (grader)

Tunghet över grundvattenytan (kN/m³)

Tunghet under grundvattenytan (kN/m³)

Tangentmodul (MPa)

2.3 Grundläggning

Jord på grundläggningsnivån

3. Dimensionering

3.1 Data rörbro

3.1.1 Plåtkoefficienter

Plåtkvalitet, sträckgränsvärde (MPa):

Brottgränsvärde (MPa)

Elasticitetsmodul (GPa)

3.1.2 Tvärsnittsmått

Höjd (m)

Diameter (m)

Valvhöjd (m)

Toppradie (m)

Sidoradie (m)

Bottenradie (m)

Hörnradie (m)

Indata för beräkning

Förstärkningslager

$$\phi_{k_öf} := 38 \text{deg}^*$$

$$\rho_{öf} := 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}^*$$

$$\rho_{w_öf} := 13 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}^*$$

$$h_c := 0.675 \text{m}^*$$

Förstärkningslager

$$\phi_{k_kf} := 38 \text{deg}^*$$

$$\rho_{kf} := 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}^*$$

$$\rho_{w_kf} := 13 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}^*$$

$$E_j := 60.0 \text{MPa}^*$$

Rörbädd

$$f_{yk} := 275 \text{MPa}^*$$

$$f_{uk} := 410 \text{MPa}^*$$

$$E_k := 210 \text{GPa}^*$$

$$h := 2.678 \text{m}^*$$

$$D := 4.196 \text{m}^*$$

$$\overset{\text{ww}}{H} := 2.03 \text{m}^*$$

$$R_t := 2.099 \text{m}^*$$

$$R_s := 2.099 \text{m}^*$$

$$R_b := 7.73 \text{m}^*$$

$$R_c := 0.49 \text{m}^*$$

Tabell B2.2 handboken, utgåva 3,
sid 48

**Dock i denna beräkninga har ett
högre väde valts för att jämförelse
av beräkningarna skulle vara
möjlig.**

Vid lågbyggd profil gäller $R_t = R_s$
Vid cirkulär profil gäller $R_t = R_s = R_c = R_b$

$$\frac{R_t}{R_c} = 4.284$$

$$\frac{R_b}{R_c} = 15.776$$

3.1.3 Sammanfogning

Antal skruvar per meter

$$n := 13 \cdot \frac{1}{m} *$$

Antal rader vilket skruvarna monteras i

$$k := 2 *$$

Hållfasthet för skruv (MPa)

$$f_{\text{buk}} := 800 \text{ MPa} *$$

Bults spänningsarea A_s

Antaganden från skrift *Bultens teknikhandbok*.

d_1 basmått för utvändig gängas innerdiameter (mm) $d_1 := 17.294 \text{ mm}$

d_2 basmått för utvändig gängas medeldiameter (mm) $d_2 := 18.376 \text{ mm}$

d_3 utvändig gängas innerdiameter (mm)

$$d_3 = d_1 - \frac{H_g}{6}$$

H_g gängans grundtriangelhöjd (mm)

$$H_g := 0.86603 \text{ mm} \cdot P$$

P delning

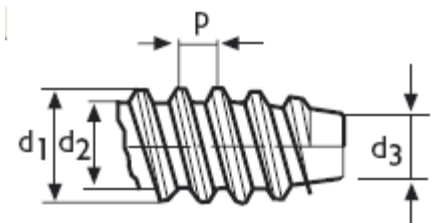
$$P = 2.5$$

$$d_3 := d_1 - \frac{H_g}{6}$$

$$d_3 = 16.933 \text{ mm}$$

$$A_s := \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2$$

$$A_s = 244.796 \text{ mm}^2$$



Beräknade värdet för skruvs diameter (används både för beräkning av nominellarean och spänningsarean då detta värde ger resultat på säkra sidan).

$$d_s := \frac{d_2 + d_3}{2}$$

Vid anliggning mot skruvstam $d_s = d_i$ (m)

$$d_s = 17.655 \text{ mm}$$

Vid anliggning mot gänga $d_s = \sqrt{4 \cdot \frac{A_s}{\pi}}$ *

(BSK 99 6:432)

Skarvning (m)

$$a_{\text{skarv}} := 0.085 \text{ m} *$$

Hålcentrum till fri kant (om $e_1 > 3d$ sätts

$$e_{1a} := 0.035 \text{ m} * \quad 3 \cdot d_s = 0.053 \text{ m}$$

(BSK 99 6:432)

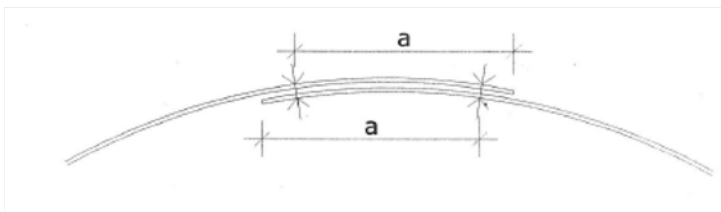
$e_1 = 3d$) (m)

$$e_1 := \left(\begin{array}{l} e_1 \leftarrow 3 \cdot d_s \text{ if } e_{1a} > 3 \cdot d_s \\ e_1 \leftarrow e_{1a} \text{ otherwise} \end{array} \right) * \quad e_1 = 0.035 \text{ m}$$

Reduktionsfaktor för normalt åtdragen skruv

$$\phi_t := 0.6 *$$

(BSK 99 6:431)



3.1.4 Profilvariabler

Plåttjocklek (mm) (2 mm rostmän borttaget)

$$t_{\text{plåt}} = 3 \text{ mm}$$

Korrugering (mm)

$$150 \times 50$$

Profilhöjd (mm)

$$h_{\text{corr}} := 50 \text{ mm}$$

Hel våglängd (mm)

$$c := 150 \text{ mm}$$

Krökningsradie (mm)

$$R := 35 \text{ mm}$$

Antal spänningscykler under konstruktionens antagna användningstid

$$n_t := 10^5 \quad \text{ådt} < 10000$$

(BSK 99 6:523a)

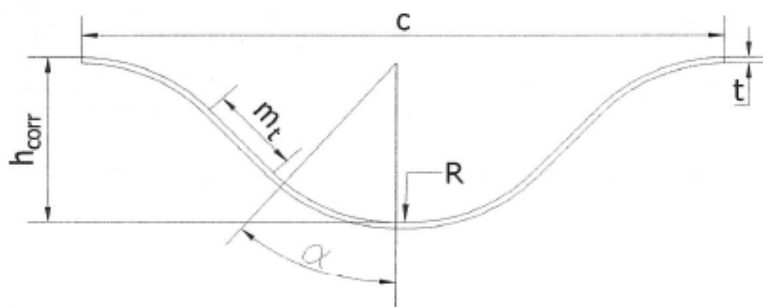
Förbandsklass (MPa)

$$C_a := 45 \text{ MPa}$$

(BSK 99 tabell B3:2, handboken sid 29)

Förbandsklass, för kontroll av utmattning i plåt (MPa)

$$C_{a2} := 100 \text{ MPa}$$



3.1.6 Tvärsnittsdata rörbro

Övre del

Plåttjocklek

$$t_{\text{plåt}} = 3 \text{ mm}$$

Böjmotstånd

$$W = 43.406 \frac{\text{mm}^3}{\text{mm}}$$

Tröghetsmoment

$$I = 1150.253 \frac{\text{mm}^4}{\text{mm}}$$

Area (tvärsnitt)

$$A = 3.772 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

Nedre del

Plåttjocklek

$$t_{\text{plåt}} = 3 \text{ mm}$$

Böjmotstånd

$$W = 43.406 \frac{\text{mm}^3}{\text{mm}}$$

Tröghetsmoment

$$I = 1150.253 \frac{\text{mm}^4}{\text{mm}}$$

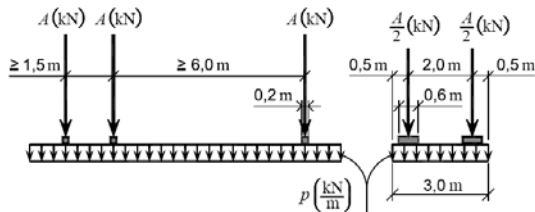
Area (tvärsnitt)

$$A = 3.772 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

3.2 Belastning

Enligt VV Publ 2004:56,21.22 Trafiklast

För ekvivalentlast 1 gäller följande förutsättningar enligt 21.2221:



$$dx_1 := 0.2m_* \quad A_1 := 2m_*$$

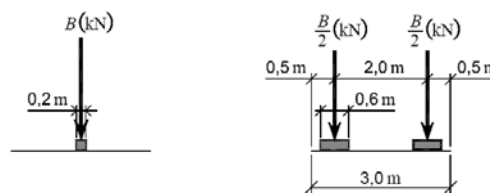
$$dy_1 := 0.6m_* \quad B_1 := 1.5m_*$$

$$P_1 := 250kN_* \quad C_1 := 6m_*$$

$$P1_1 := 170kN_*$$

$$q_1 := 4 \frac{kN}{m^2} *$$

För ekvivalentlast 2 gäller följande förutsättningar enligt 21.2222:



$$dx_2 := 0.2m_* \quad A_2 := 2m_*$$

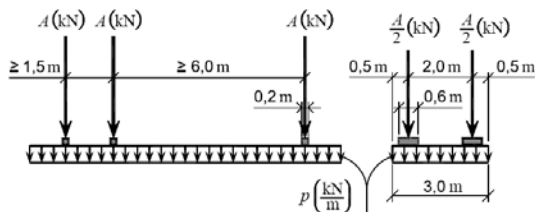
$$dy_2 := 0.6m_*$$

$$P_2 := 310kN_*$$

$$P2_2 := 210kN_*$$

$$q_2 := 0 \frac{kN}{m^2} *$$

För ekvivalentlast 4 gäller följande förutsättningar enligt 21.2225:



Lastgruppen ska förutsättas placeras på körbanan med en sidoförskjutning på högst en meter.

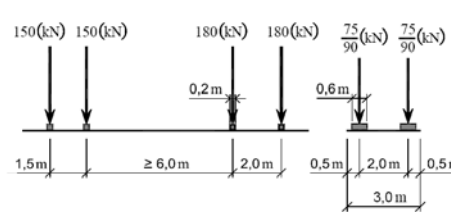
$$dx_4 := 0.2m_* \quad A_4 := 2m_*$$

$$dy_4 := 0.6m_* \quad B_4 := 1.5m_*$$

$$P_4 := 325kN_* \quad C_4 := 6m_*$$

$$q_4 := 0 \frac{kN}{m^2} *$$

För ekvivalentlast Utmattningslast gäller följande förutsättningar enligt 21.2226:



$$dx_u := 0.2m_* \quad A_u := 2m_*$$

$$dy_u := 0.6m_* \quad B_u := 1.5m_*$$

$$P_u := 150kN_* \quad C_u := 6m_*$$

$$P2_u := 180kN_* \quad D_u := 2m_*$$

$$q_{v_f} := 0 \frac{kN}{m^2} *$$

$A_{1,2,4,u}$ = centrumavstånd mellan punktlaster i tvärlid

$B_{1,4,u}$, $C_{1,4,u}$, D_u = axelavstånd mellan axlarna i längsled

P_x = axellast som består av punktlaster (A i figur)

q_x = utbredd last

dx , dy = punktlastens lastyta, (dx i körbanans längdriktning och dy i körbanans tvärriktning)

3.3 Säkerhetsklass

3.3.1 Säkerhetsklass rörbro

VV Publ. 2004:56 Bro 2004, 2. Lastförutsättningar, Tabell 22-1

Säkerhetsklass	SK2		
<u>Lastkoefficienter</u>	Lastkombination V:A Bruksgränstillstånd	Lastkombination IV:A Brottgränstillstånd	Lastkombination VI Utmattningsgränstillstånd
Trafik	$\Psi_{\gamma_{\text{trafik}_s}} := \begin{pmatrix} 1.0 \\ 1.0 \end{pmatrix} *$	$\Psi_{\gamma_{\text{trafik}_u}} := \begin{pmatrix} 1.5 \\ 0.7 \end{pmatrix} *$	$\Psi_{\gamma_{\text{trafik}_f}} := 1.0 *$
Jord Egentyngd	$\Psi_{\gamma_{\text{jord}_s}} := \begin{pmatrix} 1.1 \\ 0.9 \end{pmatrix} *$	$\Psi_{\gamma_{\text{jord}_u}} := \begin{pmatrix} 1.1 \\ 0.9 \end{pmatrix} *$	$\Psi_{\gamma_{\text{jord}_f_{\text{min}}}} := 1.0 *$
<u>Partialkoefficienter</u>			
Säkerhet	$\gamma_{n_{\text{stål}_s}} := 1.0 *$	$\gamma_{n_{\text{stål}_u}} := 1.1 *$	$\gamma_{n_f} := 1.1 *$
Stål	$\gamma_{m_{\text{stål}_s}} := 1.0 *$	$\gamma_{m_{\text{stål}_u}} := 1.0 *$	
Bult		$\gamma_{m_{\text{bult}_u}} := 1.2 *$	$\gamma_{m_{\text{bult}_f}} := 1.1 *$

3.3.2 Säkerhetsklass geoteknik

Enligt Bro 2004 vid spännvidd mindre än 15m, SK 2 ger $\gamma_{n_{\text{geo}}} = 1,1$

Övriga koefficienter är framtagna och har diskuterats med geotekniker Lars Johansson på WSP Samhällsbyggnad, Örebro.

Geoteknik

Säkerhet	$\gamma_{n_{\text{geo}}} := 1.1 *$
Kringfyllnad	$\gamma_{m_{\text{krf}}} := 1.15 *$
Överfyllnad	$\gamma_{m_{\text{öf}}} := 1.15 *$
Tangentmodul	$\gamma_{mE} := 1.6 *$

4. Snittkrafter

4.1 Bestämning av effektiv överfyllnadstjocklek, $h_{c\text{-red}}$

Handboken sid 15, 33

Beräkning av höjning av rörets hjässa under återfyllnadsarbetet, som vid återfyllning kan komma att höjas på grund av trycket som uppstår mot rörets sidor.

Effektiv överfyllnadstjocklek benämns $h_{c\text{-red}} = h_c - \delta_{hj}$

$$E_j = 60 \text{ MPa} * \quad D = 4.196 \text{ m} * \quad E_k = 210000 \text{ MPa} \quad I = 1.15 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^4}{\text{m}} \quad \rho_{kf} = 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} * \quad H = 2.03 \text{ m} *$$

$$E_{jd} := \frac{E_j}{\gamma_{n_{\text{geo}}} \gamma_{mE}} *$$

$$E_{jd} = 34.091 \text{ MPa} *$$

Flexibilitetstal λ_f

$$\lambda_f := \left(\frac{E_{jd} \cdot D^3}{E_k \cdot I} \right)^* \quad (4.p)$$

$$\lambda_f = 10426.347 \quad *$$

Ekvation (b1.b) nedan, gäller endast för slutna profiler, profiler där rörets sidoplåtar samtidigt kan tryckas samman när hjässan reser sig.

$$\delta_{hj\ddot{a}ssa} := D \cdot \left[0.013 \cdot \frac{\rho_{kf}}{E_j} \cdot D \cdot \left(\frac{H}{D} \right)^{2.8} \cdot \lambda_f^{0.56 - 0.2 \ln \left(\frac{H}{D} \right)} \right]^* \quad (b1.b)$$

$$\delta_{hj\ddot{a}ssa} = 0.007 \text{ m} \quad *$$

$$h_{c_red} := h_c - \delta_{hj\ddot{a}ssa} \quad (b1.a;4.a)$$

$$h_{c_red} = 0.668 \text{ m} \quad *$$

4.2 Bestämning av normalkraft**4.2.1 Normalkraft av jordlast, N_j**

Handboken sid 15 ff.

$$H = 2.03 \text{ m} \quad D = 4.196 \text{ m} \quad \rho_{kf} = 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad \rho_{\ddot{o}f} = 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$N_j = 0.2 \cdot \frac{H}{D} \cdot \rho_{kf} \cdot D^2 + S_{ar} \cdot \left(0.9 \cdot \frac{h_{c_red}}{D} - 0.5 \cdot \frac{h_{c_red}}{D} \cdot \frac{H}{D} \right) \cdot \rho_{\ddot{o}f} \cdot D^2 \quad (4.c)$$

$$\phi_{d_of} := \text{atan} \left(\frac{\tan(\phi_{k_of})}{\gamma_{n_geo} \cdot \gamma_{m_of}} \right)^* \quad (4.d)$$

$$\phi_{d_of} = 0.553 \quad *$$

$$S_v := \frac{0.8}{\left(\sqrt{1 + \tan(\phi_{d_of})^2} + 0.45 \cdot \tan(\phi_{d_of}) \right)^2} \quad (4.e)$$

$$S_v = 0.379 \quad *$$

S_{ar} tar hänsyn till valvverkan i jorden över rörbron vid stora överfyllnadshöjder. Nedanstående ekvation gäller då rörbron förläggs i schakt i naturlig jord eller berg.

$$\kappa := 2 \cdot S_v \cdot \frac{h_c}{D} \quad (4.f)$$

$$\kappa = 0.121868 \quad *$$

$$S_{ar} := \frac{1 - e^{-\kappa}}{\kappa} \quad (4.g)$$

$$S_{ar} = 0.941 \quad *$$

$$N_j := 0.2 \cdot \frac{H}{D} \cdot \rho_{kf} \cdot D^2 + S_{ar} \cdot \left(0.9 \cdot \frac{h_{c_red}}{D} - 0.5 \cdot \frac{h_{c_red}}{D} \cdot \frac{H}{D} \right) \cdot \rho_{\ddot{o}f} \cdot D^2 \quad (4.c)$$

$$N_j = 68.814 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad *$$

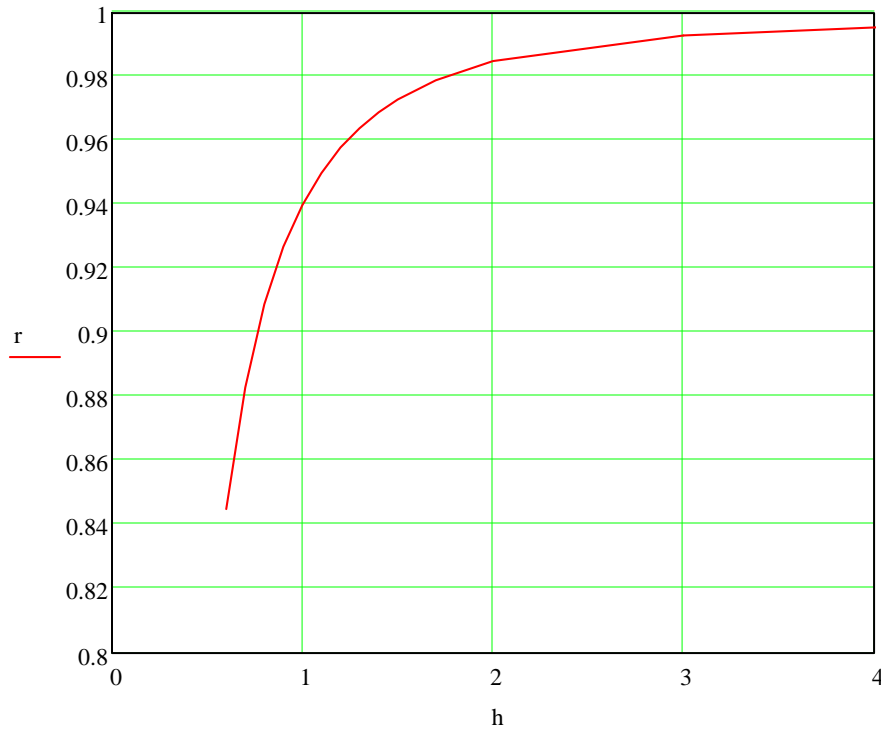
4.2.2 Beräkning av ekvivalent linjelast, p_{trafik} och normalkraft av trafiklast, N_t

Handboken sid 19 ff.

4.2.2.1 Reduktion med hänsyn till hjulens lastutbredning av den ekvivalenta linjelasten vid små överfyllnadshöjder, reduktionsfaktorn R_f

Handboken sid 45

$$h := \begin{array}{|c|c|} \hline & 0 \\ \hline 0 & 0.6 \\ \hline \end{array} \quad r := \begin{array}{|c|c|} \hline & 0 \\ \hline 0 & 0.845 \\ \hline \end{array}$$



Figur B4.6 sid 45 i handboken



$$R_f = 0.874 *$$

Ekvivalentlasterna

Beräkning av lastspridning enligt Boussinesq, sid 41 ff. i handboken, samt linjelast och normalkraft enligt modell sid 42 i handboken

För att hitta det största vertikala trycket (σ_v) i jorden under punktlasterna (hjulasterna) används ekvationen

$$\sigma_v = \frac{P \cdot 3}{2 \cdot 2\pi} \cdot h_c^3 \cdot \left(\sum_i \frac{1}{s_i^5} \right)^*$$

enligt handboken bilaga 4. Genom att kombinera hjultrycken och låta dessa variera över

vägbanan med ett betämt intervall hittas det största vertikala trycket för varje lastfall för sig.

Med reduktionsfaktorn, R_f , reducerar sedan resultatet för σ_v så att det simulerade värdet för hjultrycken minskas då dessa i verkligheten inte utgörs av punktlaster utan utbredda hjullaster.

4.2.2.2 Ekvivalentlast 1

$$P1_1 := 250\text{kN}_* \quad P1_2 := 170\text{kN}_* \quad h_c = 0.675 \text{ m} \quad h_{c_red} = 0.668 \text{ m} \quad D = 4.196 \text{ m} \quad q_1 = 4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Vägbanan läggs i ett koordinatsystem där punktlaster symboliserar hjultrycken (dx, dy) utifrån ekvationen:

$$\sigma_v = \left(\frac{P1_1}{2} \cdot \frac{3}{2\pi} \right) \cdot h_c^3 \cdot \sum_{i=0}^5 \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_c^2} \right]^5} + \left(\frac{P1_2}{2} \cdot \frac{3}{2\pi} \right) \cdot h_c^3 \cdot \sum_{i=6}^{11} \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_c^2} \right]^5}$$

genom a och b placeras hjultrycken symboliskt ut i koordinatsystemet och genom beräkning utefter ekvationen hittas de varierande vertikala trycken under punktlasterna, utifrån dessa hittas sedan det största vertikala trycket, σ_v

$$a \leftarrow \begin{pmatrix} x - 9.5\text{m} \\ x - 8\text{m} \\ x - 2\text{m} \\ x - 9.5\text{m} \\ x - 8\text{m} \\ x - 2\text{m} \\ x - 9.5\text{m} \\ x - 8\text{m} \\ x - 2\text{m} \\ x - 9.5\text{m} \\ x - 8\text{m} \\ x - 2\text{m} \end{pmatrix} \quad b \leftarrow \begin{pmatrix} y - 7.5\text{m} \\ y - 7.5\text{m} \\ y - 7.5\text{m} \\ y - 5.5\text{m} \\ y - 5.5\text{m} \\ y - 5.5\text{m} \\ y - 4.5\text{m} \\ y - 4.5\text{m} \\ y - 4.5\text{m} \\ y - 2.5\text{m} \\ y - 2.5\text{m} \\ y - 2.5\text{m} \end{pmatrix} *$$



$$\max_{\sigma_{v1}} = \begin{pmatrix} 8 \\ 5.5 \\ 1.385 \times 10^5 \end{pmatrix} \text{ Pa} *$$

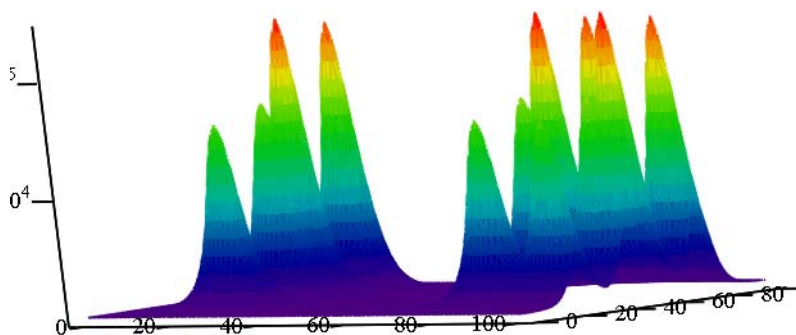


Vertikalt tryck i jorden under punktlast σ_{v1}

$$\sigma_{v1} = 138.545 \text{ kPa}$$

Vertikalt tryck i jorden under punktlast med reduktion $R_f \sigma_{v1}$

$$R_f \sigma_{v1} = 121.019 \text{ kPa} *$$



$$R_f(\max_{\sigma_{v1}} \text{Matrix})$$

Linjelast, p_{trafik}

$$p_{\text{trafik}_1} := \frac{R_f \sigma_{v1} \cdot \pi \cdot h_c}{2} *$$

4.k

$$p_{\text{trafik}_1} = 128.315 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

Normalkraft, N_t

$$N_{t_1} := \begin{cases} N_{t_1} \leftarrow p_{\text{trafik}_1} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_1 & \text{if } \left(\frac{h_{c_red}}{D}\right) \leq 0.25 \\ N_{t_1} \leftarrow \left(1.25 - \frac{h_{c_red}}{D}\right) \cdot p_{\text{trafik}_1} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_1 & \text{if } 0.25 < \left(\frac{h_{c_red}}{D}\right) \leq 0.75 \\ N_{t_1} \leftarrow 0.5 \cdot p_{\text{trafik}_1} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_1 & \text{if } 0.75 < \frac{h_{c_red}}{D} \end{cases} *$$

(4.l';4.l'';4.l''')

$$N_{t_1} = 136.707 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

4.2.2.3 Ekvivalentlast 2

$$P_{21} := 310\text{kN}_* \quad P_{22} := 210\text{kN}_* \quad h_c = 0.675 \text{ m} \quad h_{c_red} = 0.668 \text{ m} \quad D = 4.196 \text{ m} \quad q_2 = 0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Vägbana läggs i ett koordinatsystem där punktlasterna symboliserar hjultrycken (d_x, d_y) utifrån ekvationen:

$$\sigma_v = \left(\frac{P_{21}}{2} \cdot \frac{3}{2\pi} \right) \cdot h_c^3 \cdot \sum_{i=0}^1 \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_c^2} \right]^5} + \left(\frac{P_{22}}{2} \cdot \frac{3}{2\pi} \right) \cdot h_c^3 \cdot \sum_{i=2}^3 \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_c^2} \right]^5}$$

genom a och b placeras hjultrycken symboliskt ut i koordinatsystemet och genom beräkning utefter ekvationen hittas de varierande vertikala trycken under punktlasterna, utifrån dessa hittas sedan det största vertikala trycket, σ_v

$$a \leftarrow \begin{pmatrix} x - 2\text{m} \\ x - 2\text{m} \\ x - 2\text{m} \\ x - 2\text{m} \end{pmatrix} \quad b \leftarrow \begin{pmatrix} y - 7.5\text{m} \\ y - 5.5\text{m} \\ y - 4.5\text{m} \\ y - 2.5\text{m} \end{pmatrix}$$



$$\max_{\sigma_{v2}} = \begin{pmatrix} 2 \\ 5.5 \\ 1.691 \times 10^5 \end{pmatrix} \text{ Pa } *$$

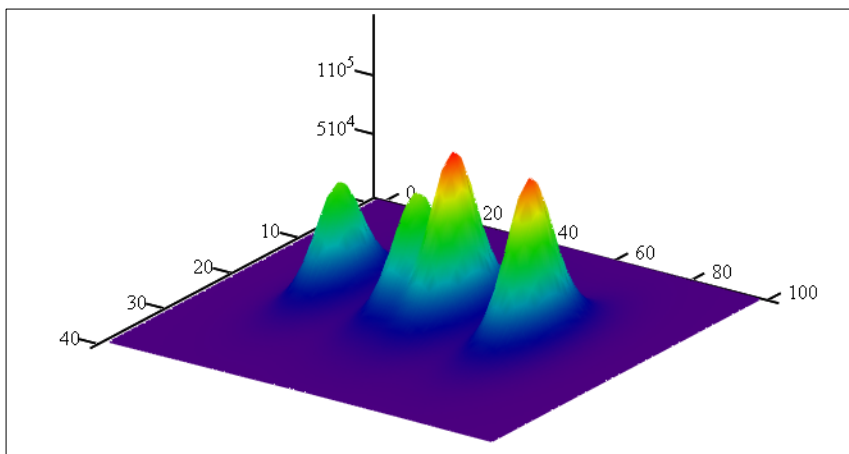


Vertikalt tryck i jorden under punktlast σ_{v2}

$$\sigma_{v2} = 169.06 \text{ kPa}$$

Vertikalt tryck i jorden under punktlast med reduktion $R_f \sigma_{v2}$

$$R_f \sigma_{v2} = 147.674 \text{ kPa}_*$$



$R_f \max_{\sigma_{v2}}$ Matrix

Linjelast, p_{trafik}

$$p_{\text{trafik}_2} := \frac{R_f \cdot \sigma_{v2} \cdot \pi \cdot h_c}{2} * \quad (4.k)$$

$$p_{\text{trafik}_2} = 156.577 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

Normalkraft, N_t

$$N_{t_2} := \begin{cases} N_{t_2} \leftarrow p_{\text{trafik}_2} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_2 & \text{if } \left(\frac{h_{c_red}}{D}\right) \leq 0.25 \\ N_{t_2} \leftarrow \left(1.25 - \frac{h_{c_red}}{D}\right) \cdot p_{\text{trafik}_2} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_2 & \text{if } 0.25 < \left(\frac{h_{c_red}}{D}\right) \leq 0.75 \\ N_{t_2} \leftarrow 0.5 \cdot p_{\text{trafik}_2} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_2 & \text{if } 0.75 < \frac{h_{c_red}}{D} \end{cases} * \quad (4.l';4.l'';4.l''')$$

$$N_{t_2} = 156.577 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

4.2.2.4 Ekvivalentlast 4

$$P_4 := 325 \text{ kN} \cdot h_c = 0.675 \text{ m} \quad h_{c_red} = 0.668 \text{ m} \quad D = 4.196 \text{ m} \quad q_4 = 0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Vägbana läggs i ett koordinatsystem där punktlasterna symboliserar hjultrycken (d_x , d_y) utifrån ekvationen:

$$\sigma = \left(\frac{P_4}{2} \cdot \frac{3}{2 \cdot \pi} \right) \cdot h_c^3 \cdot \sum_{i=0}^5 \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_c^2} \right]^5}$$

genom a och b placeras hjultrycken symboliskt ut i koordinatsystemet och genom beräkning utefter ekvationen hittas de varierande vertikala trycken under punktlasterna, utifrån dessa hittas sedan det största vertikala trycket, σ_v .

Lastgruppen är placerad på körbanan med en sidoförskjutning på en meter från körbanans centrumlinje

$$a \leftarrow \begin{pmatrix} x - 9.5\text{m} \\ x - 8\text{m} \\ x - 2\text{m} \\ x - 9.5\text{m} \\ x - 8\text{m} \\ x - 2\text{m} \end{pmatrix} \quad b \leftarrow \begin{pmatrix} y - 5\text{m} \\ y - 5\text{m} \\ y - 5\text{m} \\ y - 3\text{m} \\ y - 3\text{m} \\ y - 3\text{m} \end{pmatrix}$$



$$\max_{\sigma_{v4}} = \begin{pmatrix} 8 \\ 3 \\ 1.731 \times 10^5 \end{pmatrix} \text{ Pa} *$$

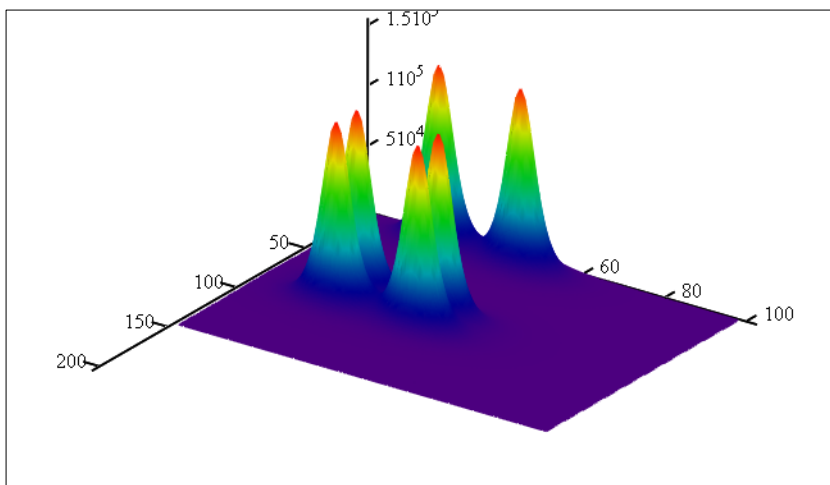


Vertikalt tryck i jorden under punktlast σ_{v4} .

$$\sigma_{v4} = 173.051 \text{ kPa}$$

Vertikalt tryck i jorden under punktlast med reduktion $R_f \sigma_{v4}$.

$$R_f \sigma_{v4} = 151.16 \text{ kPa} *$$



$$R_f(\max_{\sigma_{v4} \text{ Matrix}})$$

Linjelast, p_{trafik}

$$p_{\text{trafik}_4} := \frac{R_f(\sigma_{v4}) \cdot \pi \cdot h_c}{2} * \quad (4.k)$$

$$p_{\text{trafik}_4} = 160.273 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

Normalkraft, N_t

$$N_{t_4} := \begin{cases} N_{t_4} \leftarrow p_{\text{trafik}_4} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_4 & \text{if } \left(\frac{h_{c_red}}{D}\right) \leq 0.25 \\ N_{t_4} \leftarrow \left(1.25 - \frac{h_{c_red}}{D}\right) \cdot p_{\text{trafik}_4} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_4 & \text{if } 0.25 < \left(\frac{h_{c_red}}{D}\right) \leq 0.75 \\ N_{t_4} \leftarrow 0.5 \cdot p_{\text{trafik}_4} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_4 & \text{if } 0.75 < \frac{h_{c_red}}{D} \end{cases} * \quad (4.l'; 4.l''; 4.l''')$$

$$N_{t_4} = 160.273 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

4.2.2.5 Ekvivalent utmattningslast

$$P_{f1} := 150 \text{ kN} * \quad P_{f2} := 180 \text{ kN} * \quad h_c = 0.675 \text{ m} \quad h_{c_red} = 0.668 \text{ m} \quad D = 4.196 \text{ m} \quad q_{v_f} = 0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Vägbana läggs i ett koordinatsystem där punktlasterna symboliserar hjultrycken (d_x , d_y) utifrån ekvationen:

$$\sigma = \left(\frac{P_{f1}}{2} \cdot \frac{3}{2 \cdot \pi}\right) \cdot h_c^3 \cdot \sum_{i=0}^3 \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_c^2}\right]^5} + \left(\frac{P_{f2}}{2} \cdot \frac{3}{2 \cdot \pi}\right) \cdot h_c^3 \cdot \sum_{i=4}^7 \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_c^2}\right]^5}$$

genom a och b placeras hjultrycken symboliskt ut i koordinatsystemet och genom beräkning utefter ekvationen hittas de varierande vertikala trycken under punktlasterna, utifrån dessa hittas sedan det största vertikala trycket, σ_v

$$a \leftarrow \begin{pmatrix} x - 11.5\text{m} \\ x - 10\text{m} \\ x - 11.5\text{m} \\ x - 10\text{m} \\ x - 4\text{m} \\ x - 2\text{m} \\ x - 4\text{m} \\ x - 2\text{m} \end{pmatrix} \quad b \leftarrow \begin{pmatrix} y - 5\text{m} \\ y - 5\text{m} \\ y - 3\text{m} \\ y - 3\text{m} \\ y - 5\text{m} \\ y - 5\text{m} \\ y - 3\text{m} \\ y - 3\text{m} \end{pmatrix}$$



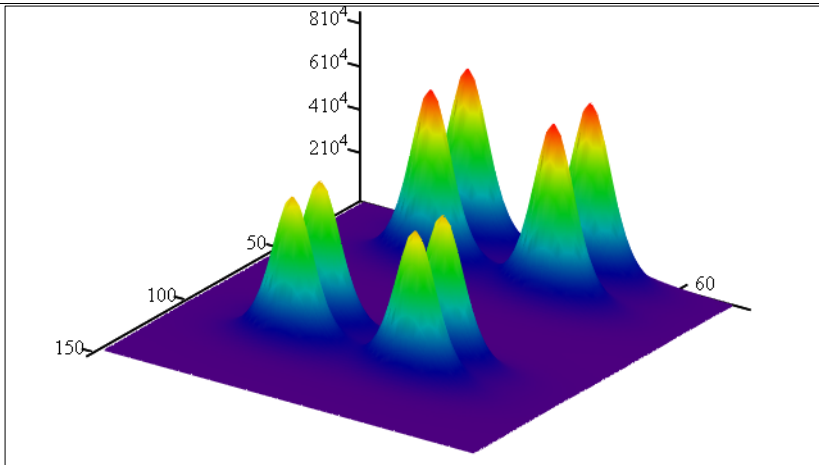
$$\max_{\sigma_{vf}} = \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \\ 95011.621 \end{pmatrix} \text{ Pa} *$$

Vertikalt tryck i jorden under punktlast σ_{vf}

$$\sigma_{vf} = 95.012 \text{ kPa}$$

Vertikalt tryck i jorden under punktlast med reduktion $R_f \sigma_{vf}$

$$R_f \sigma_{vf} = 82.993 \text{ kPa} *$$



$R_f \max \sigma_{vf} \text{Matrix}$

Linjelast, p_{trafik}

$$p_{\text{trafik}_f} := \frac{R_f \sigma_{vf} \cdot \pi \cdot h_c}{2} * \quad (4.k)$$

$$p_{\text{trafik}_f} = 87.996 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

Normalkraft, N_t

$$N_{t_f} := \begin{cases} N_{t_u} \leftarrow p_{\text{trafik}_f} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_{v_f} & \text{if } \left(\frac{h_{c_red}}{D}\right) \leq 0.25 \\ N_{t_u} \leftarrow \left(1.25 - \frac{h_{c_red}}{D}\right) \cdot p_{\text{trafik}_f} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_{v_f} & \text{if } 0.25 < \left(\frac{h_{c_red}}{D}\right) \leq 0.75 \\ N_{t_u} \leftarrow 0.5 \cdot p_{\text{trafik}_f} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q_{v_f} & \text{if } 0.75 < \frac{h_{c_red}}{D} \end{cases} * \quad (4.l'; 4.l''; 4.l''')$$

$$N_{t_f} = 87.996 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

4.2.2.6 Sammanställning linjelast, p_{trafik} och normalkraft, N_t

Högsta värdet på N_t kommer att användas för dimensionering.

$$p_{\text{trafik}_1} = 128.315 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

$$N_{t_1} = 136.707 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

$$p_{\text{trafik}_2} = 156.577 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

$$N_{t_2} = 156.577 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

$$p_{\text{trafik}_4} = 160.273 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

$$N_{t_4} = 160.273 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

$$p_{\text{trafik}_f} = 87.996 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

$$N_{t_f} = 87.996 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

$$p_{\text{trafik}_-} := \begin{pmatrix} p_{\text{trafik}_1} \\ p_{\text{trafik}_2} \\ p_{\text{trafik}_4} \\ p_{\text{trafik}_f} \end{pmatrix} *$$

$$N_{t_-} := \begin{pmatrix} N_{t_1} \\ N_{t_2} \\ N_{t_4} \\ N_{t_f} \end{pmatrix} *$$

$$\max(p_{\text{trafik}_-}) = 160.273 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

$$\max(N_{t_-}) = 160.273 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

$$p_{\text{trafik}} := \max(p_{\text{trafik}_-})$$

$$N_t := \max(N_{t_-})$$

$$p_{\text{trafik}} = 160.273 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_t = 160.273 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

4.2.3 Dimensionerande normalkraft, N_d

Handboken sid 20ff.

Bruksgränstillstånd:

$$\psi_{\gamma_{\text{jord}_s}} = \begin{pmatrix} 1.1 \\ 0.9 \end{pmatrix} \quad \psi_{\gamma_{\text{trafik}_s}} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad N_j = 68.814 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad N_t = 160.273 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{d_{s_1}} := \max(\psi_{\gamma_{\text{jord}_s}}) \cdot N_j + \max(\psi_{\gamma_{\text{trafik}_s}}) \cdot (N_t) *$$

(4.m)

$$N_{d_{s_2}} := \max(\psi_{\gamma_{\text{jord}_s}}) \cdot N_j + \min(\psi_{\gamma_{\text{trafik}_s}}) \cdot (N_t) *$$

$$N_{d_{s_3}} := \min(\psi_{\gamma_{\text{jord}_s}}) \cdot N_j + \max(\psi_{\gamma_{\text{trafik}_s}}) \cdot (N_t) *$$

$$N_{d_{s_4}} := \min(\psi_{\gamma_{\text{jord}_s}}) \cdot N_j + \min(\psi_{\gamma_{\text{trafik}_s}}) \cdot (N_t) *$$

$$(N_{d_{s_-}}) := \begin{pmatrix} N_{d_{s_1}} \\ N_{d_{s_2}} \\ N_{d_{s_3}} \\ N_{d_{s_4}} \end{pmatrix} * \quad N_{d_{s_-}} = \begin{pmatrix} 235.968 \\ 235.968 \\ 222.206 \\ 222.206 \end{pmatrix} \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{d_s} := \max(N_{d_{s_-}}) *$$

$$N_{d_s} = 235.968 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

Brottgränstillstånd:

$$\psi_{\gamma_{\text{jord_u}}} = \begin{pmatrix} 1.1 \\ 0.9 \end{pmatrix} \quad \psi_{\gamma_{\text{trafik_u}}} = \begin{pmatrix} 1.5 \\ 0.7 \end{pmatrix} \quad N_j = 68.814 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad N_t = 160.273 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{d_u_1} := \max(\psi_{\gamma_{\text{jord_u}}}) \cdot N_j + \max(\psi_{\gamma_{\text{trafik_u}}}) \cdot (N_t) *$$

$$N_{d_u_2} := \max(\psi_{\gamma_{\text{jord_u}}}) \cdot N_j + \min(\psi_{\gamma_{\text{trafik_u}}}) \cdot (N_t) *$$

(4.n)

$$N_{d_u_3} := \min(\psi_{\gamma_{\text{jord_u}}}) \cdot N_j + \max(\psi_{\gamma_{\text{trafik_u}}}) \cdot (N_t) *$$

$$N_{d_u_4} := \min(\psi_{\gamma_{\text{jord_u}}}) \cdot N_j + \min(\psi_{\gamma_{\text{trafik_u}}}) \cdot (N_t) *$$

$$(N_{d_u_}) := \begin{pmatrix} N_{d_u_1} \\ N_{d_u_2} \\ N_{d_u_3} \\ N_{d_u_4} \end{pmatrix} * \quad N_{d_u_} = \begin{pmatrix} 316.105 \\ 187.887 \\ 302.342 \\ 174.124 \end{pmatrix} \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{d_u} := \max(N_{d_u_}) *$$

$$N_{d_u} = 316.105 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

Utmattningsgränstillstånd:

$$\psi_{\gamma_{\text{trafik_f}}} = 1 \quad N_{t_f} = 87.996 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{d_f} := \psi_{\gamma_{\text{trafik_f}}} \cdot N_{t_f} *$$

(4.o)

$$N_{d_f} = 87.996 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

Sammanställning dimensionerande normalkraft

$$N_{d_} := \begin{pmatrix} \max(N_{d_s}) \\ \max(N_{d_u}) \\ N_{d_f} \end{pmatrix} * \quad N_{d_} = \begin{pmatrix} 235.968 \\ 316.105 \\ 87.996 \end{pmatrix} \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

$$N_d := \max(N_{d_}) *$$

$$N_d = 316.105 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

4.3 Bestämning av dimensionerande böjmoment

Böjmomenten i rörväggen är beroende av förhållandet mellan jordmaterialets och rörets styvheter. Detta förhållandet benämns λ_f , beräknas tidigare i dokumentet under 4.1 Bestämning av effektiv överfyllnadstjocklek,

$$hc_{red}: \lambda_f = \frac{E_{jd} \cdot D^3}{(E_k \cdot I)_k} \text{ där } E_{jd} \text{ är jordmaterialets dimensionerande tangentmodul och } (E \cdot I)_k \text{ är rörväggens}$$

böjstyvheter.

$$\text{Flexibilitetsstalet } \lambda_f = 10426.347$$

4.3.1 Böjmoment av jordlast, M_j

Handboken sid 21 ff.

De olika jordmaterialen (kringfyllnadsmaterialet och överfyllnadsmaterialet) betraktas var och en för sig vid bestämning av dimensionerande böjmoment av jordlast.

$$\left[\frac{M_j}{\rho_{kf} \cdot D^3} = f_1 \cdot \left[f_3 \cdot f_{2_kf} - \left(\frac{\rho_{öf}}{\rho_{kf}} \right) \cdot \left(\frac{h_c}{D} \right) \cdot f_{2_öf} \right] \right] \quad (4.q')$$

$$\rho_{öf} = 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad \rho_{kf} = 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad h_c = 0.675 \text{ m} \quad D = 4.196 \text{ m}$$

För funktionen f_1 gäller:

$$\frac{H}{D} = 0.484 \quad *$$

$$f_1 := \begin{cases} f_1 \leftarrow 0.67 + 0.87 \cdot \left(\frac{H}{D} - 0.2 \right) & \text{if } 0.2 < \frac{H}{D} \leq 0.35 \quad * \\ f_1 \leftarrow 0.8 + 1.33 \cdot \left(\frac{H}{D} - 0.35 \right) & \text{if } 0.35 < \frac{H}{D} \leq 0.5 \\ f_1 \leftarrow 2 \cdot \left(\frac{H}{D} \right) & \text{if } 0.5 < \left(\frac{H}{D} \right) \leq 0.6 \end{cases} \quad (4.r', 4.r'', 4.r''')$$

$$f_1 = 0.978 \quad *$$

För funktionen f_2 , kringfyllnadsfasen gäller:

$$f_{2_kf} := \begin{cases} f_{2_kf} \leftarrow 0.0046 - 0.0010 \log(\lambda_f) & \text{if } \lambda_f \leq 5000 \quad * \\ f_{2_kf} \leftarrow 0.0009 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.s', 4.s'')$$

$$f_{2_kf} = 9 \times 10^{-4} \quad *$$

För funktionen f_3 gäller

$$f_3 := 6.67 \cdot \frac{H}{D} - 1.33 \quad * \quad (4.s''')$$

$$f_3 = 1.897 \quad *$$

För funktion f_2 , överfyllnadsfasen gäller:

$$f_{2_öf} := \begin{cases} f_{2_öf} \leftarrow 0.018 - 0.004 \cdot \log(\lambda_f) & \text{if } \lambda_f \leq 5000 \quad * \\ f_{2_öf} \leftarrow 0.0032 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.s''''4.s''''')$$

$$f_{2_öf} = 3.2 \times 10^{-3} \quad *$$

Bruksgränstillstånd

$$\left[\frac{M_{j_s}}{\rho_{kf} \cdot D^3} = f_1 \cdot \left[f_3 \cdot f_{2_kf} - \left(\frac{\rho_{öf}}{\rho_{kf}} \right) \cdot \left(\frac{h_c}{D} \right) \cdot f_{2_öf} \right] \right] \geq 0.5 \cdot f_1 \cdot f_3 \cdot f_{2_kf} \quad (4.q')$$

Använd den största av dessa:

$$\left[f_1 \cdot \left[f_3 \cdot f_{2_kf} - \left(\frac{\rho_{öf}}{\rho_{kf}} \right) \cdot \left(\frac{h_c}{D} \right) \cdot f_{2_öf} \right] \right] = 0.00117 \quad 0.5 \cdot f_1 \cdot f_3 \cdot f_{2_kf} = 0.00083$$

$$\text{jordlast} := \left[\begin{array}{c} \left[f_1 \cdot \left[f_3 \cdot f_{2_kf} - \left(\frac{\rho_{öf}}{\rho_{kf}} \right) \cdot \left(\frac{h_c}{D} \right) \cdot f_{2_öf} \right] \right] \\ 0.5 \cdot f_1 \cdot f_3 \cdot f_{2_kf} \end{array} \right]$$

$$\text{jordlast} = \begin{pmatrix} 1.166 \times 10^{-3} \\ 8.348 \times 10^{-4} \end{pmatrix}$$

$$M_{j_s} := \max(\text{jordlast}) \cdot (\rho_{kf} \cdot D^3) \quad *$$

$$M_{j_s} = 1.723 \text{ kN} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}}$$

Brottgänstillstånd

$$\left[\frac{M_{j_u}}{\rho_{kf} \cdot D^3} = f_1 \cdot \left[f_3 \cdot f_{2_kf} - \left(\frac{\rho_{öf}}{\rho_{kf}} \right) \cdot \left(\frac{h_c}{D} \right) \cdot f_{2_öf} \right] \right] \quad (4.q'')$$

$$M_{j_u} := \left[f_1 \cdot \left[f_3 \cdot f_{2_kf} - \left(\frac{\rho_{öf}}{\rho_{kf}} \right) \cdot \left(\frac{h_c}{D} \right) \cdot f_{2_öf} \right] \right] \cdot (\rho_{kf} \cdot D^3) \quad *$$

$$M_{j_u} = 1.723 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

4.3.2 Böjmoment av trafiklast, M_t

Handboken sid 23 ff.

$$D = 4.196 \text{ m} \quad p_{\text{trafik}} = 160.273 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad h_c = 0.675 \text{ m}$$

$$M_t = f_4 \cdot f'_4 \cdot f''_4 \cdot f'''_4 \cdot D \cdot (p_{\text{trafik}}) * \quad (4.t)$$

$$f_4 := 0.265 \cdot (1 - 0.2 \cdot \log(\lambda_f)) * \quad (4.u)$$

$$f_4 = 0.052 * *$$

$$f'_4 := \begin{cases} f' \leftarrow 0.12 \cdot (1 - 0.15 \cdot \log(\lambda_f)) & \text{if } \lambda_f \leq 100000 * \\ f' \leftarrow 0.030 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.v)$$

$$f'_4 = 0.048 * *$$

$$f'''_4 := \left(\frac{h_c}{D} \right)^{-0.75} * \quad (4.x)$$

$$f'''_4 = 3.937 * *$$

$$f_4 \cdot f''_4 = 0.205 \quad (4.y)$$

$$M_t := f_4 \cdot f'_4 \cdot f''_4 \cdot f'''_4 \cdot D \cdot (p_{\text{trafik}}) * \quad (4.t)$$

$$M_t = 6.568 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}} *$$

Utmattningslast

$$P_{\text{trafik}_f} = 87.996 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$M_{t_f} := f_4 \cdot f''_4 \cdot f'''_4 \cdot D \cdot (P_{\text{trafik}_f})^*$$

$$M_{t_f} = 3.606 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}^*$$

4.3.3 Dimensionerande böjmoment

Handboken sid 25

De dimensionerande momenten av jord och trafik har olika riktning i olika punkter och kontroll utförs därför enligt nedanstående formler.

Bruksgränstillstånd

$$\max(\psi_{\gamma_{\text{jord}_s}}) = 1.1 \quad \max(\psi_{\gamma_{\text{trafik}_s}}) = 1 \quad M_{j_s} = 1.723 \text{ m} \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad M_t = 6.568 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$M_{d_s} := \max(\psi_{\gamma_{\text{jord}_s}}) \cdot M_{j_s} + \max(\psi_{\gamma_{\text{trafik}_s}}) \cdot \left(\frac{M_t}{2} \right)^* \quad (4.y)$$

$$M_{d_s} = 5.179 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}^*$$

Brottgränstillstånd

$$\min(\psi_{\gamma_{\text{jord}_u}}) = 0.9 \quad \max(\psi_{\gamma_{\text{trafik}_u}}) = 1.5 \quad M_{j_u} = 1.723 \text{ m} \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad M_t = 6.568 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$M_{d_u} := \min(\psi_{\gamma_{\text{jord}_u}}) \cdot (-M_{j_u}) + \max(\psi_{\gamma_{\text{trafik}_u}}) \cdot M_t^* \quad (4.z)$$

$$M_{d_u} = 8.302 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}^*$$

Utmattningstillstånd, spänningsvidd:

$$\psi_{\gamma_{\text{trafik}_f}} = 1 \quad M_t = 6.568 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$\Delta M_{d_f} := \psi_{\gamma_{\text{trafik}_f}} \cdot M_{t_f} \cdot 1.5^* \quad (4.w)$$

$$\Delta M_{d_f} = 5.409 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}^*$$

Sammanställning dimensionerande böjmoment:

$$M_{d_} := \begin{pmatrix} \max(M_{d_s}) \\ \max(M_{d_u}) \\ \Delta M_{d_f} \end{pmatrix}^* \quad M_{d_} = \begin{pmatrix} 5.179 \\ 8.302 \\ 5.409 \end{pmatrix} \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}^*$$

5. Dimensioneringskontroller

5.1 Allmänna kontroller

5.1.1 Kontroll av tillåten överfyllnad

$$0.6 < h_c^*$$

$$h_c = 0.675 \text{ m} \quad *$$

$$\text{tillräcklig_överfyllnad} := \text{if} \left(0.6 < \frac{h_c}{m}, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right) \quad *$$

$$\text{tillräcklig_överfyllnad} = \text{"OK!"} \quad *$$

5.1.2 Kontroll av böjmoment av trafiklast

Villkor enligt handboken sid 23

$$f_4 \cdot f_4''' = 0.205 \quad * \quad f_4 \cdot f_4''' < 1 \quad *$$

$$\text{kontroll_5_1_2} := \text{if} \left[\left(f_4 \cdot f_4''' < 1 \right), \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right] \quad *$$

$$\text{kontroll_5_1_2} = \text{"OK!"} \quad *$$

5.2 Beräkningsmässiga analyser i bruksgränstillstånd

5.2.1 Säkerhet mot begynnande flytning i bruksgränstillstånd

Handboken sid 27

$$\sigma = \left(\frac{N_{d_s}}{A} + \frac{M_{d_s}}{W} \right) < f_{yd_s} \quad * \quad (5.a)$$

$$(N_{d_s}) = 235.968 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad * \quad W = 4.341 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{m}} \quad *$$

$$(M_{d_s}) = 5.179 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}} \quad * \quad A = 3.772 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^2}{\text{m}} \quad *$$

$$\sigma := \left(\frac{N_{d_s}}{A} + \frac{M_{d_s}}{W} \right) \quad *$$

$$\sigma = 181.881 \text{ MPa} \quad *$$

$$\sigma < f_{yd_s} \quad *$$

$$f_{yd_s} := \frac{f_{yk}}{\gamma_{n_{\text{stål}_s}} \cdot \gamma_{m_{\text{stål}_s}}} \quad *$$

(BSK 99, 3:42)

$$f_{yd_s} = 275 \text{ MPa} \quad *$$

$$\sigma = 181.881 \text{ MPa} \quad *$$

$$\text{kontroll_5_2_1} := \text{if} \left(\sigma < f_{yd_s}, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right) \quad *$$

$$\text{kontroll_5_2_1} = \text{"OK!"} \quad *$$

5.3 Beräkningsmässig verifiering av rörväggs bärförmåga i brottgränstillstånd

5.3.1 Kontroll av att flytled ej bildas i rörbrons övre del

Handboken sid 27 ff. 47 ff.

$$\left[\left(\frac{N_{d_u}}{N_{cr}} \right)^{\alpha_c} + \frac{M_{d_u}}{M_u} \right] \leq 1_* \quad (5.b)$$

Vid beräkning av N_{cr} i denna kontroll beräknas denna enligt *Bilaga 5, andra ordningens teori*, (sid 47) i handboken och $\xi = \text{roten ur } \kappa$.

Villkor sid 28 i handboken: $(\alpha_c = \eta^2 \cdot \omega_2) \geq 0.8_*$

$$h_c = 0.675 \text{ m} \quad R_t = 2.099 \text{ m}$$

$$\kappa_2 := \frac{h_c}{R_t} \quad * \quad (b5.f)$$

$$\kappa_2 = 0.322 \quad *$$

$$\eta_j := 1 - \left(\frac{1}{1 + \kappa_2} \right)^2 \quad * \quad (b5.c)$$

$$\eta_j = 0.427 \quad *$$

$$\lambda_f = 10426.347$$

$$\mu := \left[1.22 + 1.95 \cdot \left(\frac{8}{\eta_j \cdot \lambda_f} \right)^{0.25} \right]^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{\eta_j}} \quad (b5.d)$$

$$\mu = 4.021 \quad *$$

$$\xi := \sqrt{\kappa_2} \quad * \quad \xi = 0.567 \quad (b5.e)$$

Beräkning av knäckningslasten för rörkonstruktionen i jord vid ideala elastiska förhållanden, N_{cr_el}

$$E_{jd} = 34.091 \text{ MPa} \quad E_k = 210000 \text{ MPa} \quad I = 1.15 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^4}{\text{m}} \quad R_t = 2.099 \text{ m} \quad R_c = 0.49 \text{ m}$$

$$N_{cr_el} := \left[\begin{array}{l} N_{cr_el} \leftarrow 1.2 \sqrt{\frac{E_{jd} \cdot (E_k \cdot I)}{R_t}} \quad \text{if } R_t = R_c \\ N_{cr_el} \leftarrow \frac{3\xi}{\mu} \cdot \sqrt{\frac{E_{jd} \cdot (E_k \cdot I)}{R_t}} \quad \text{otherwise} \end{array} \right]_* \quad (b5.a)$$

$$N_{cr_el} = 838.03 \frac{\text{kN}}{\text{m}}_* \quad (b5.b)$$

Beräkning av dimensionerande sträckgränsvärdet för stålet.

$$f_{yk} = 275 \text{ MPa} \quad \gamma_{n_stål_u} = 1.1 \quad \gamma_{m_stål_u} = 1 \quad A = 3.772 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$f_{yd_u} := \frac{f_{yk}}{\gamma_{n_stål_u} \cdot \gamma_{m_stål_u}} \quad * \quad (\text{BSK 99, 3:42})$$

$$f_{yd_u} = 250 \text{ MPa} *$$

Beräkning av gällande normalkraft vid fullständigt plasticerat tvärsnitt, N_u

$$N_u := f_{yd_u} \cdot A \quad * \quad (\text{handboken sid 48})$$

$$N_u = 943.043 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

$$\omega_2 := \begin{cases} \omega_2 \leftarrow \frac{N_{cr_el}}{N_u} & \text{if } \left(\frac{N_{cr_el}}{N_u} \right) \leq 0.5 \end{cases} \quad * \quad (\text{b5.g})$$

$$\begin{cases} \omega_2 \leftarrow 1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{N_u}{N_{cr_el}} & \text{if } \left(\frac{N_{cr_el}}{N_u} \right) > 0.5 \end{cases} \quad (\text{b5.h})$$

$$\omega_2 = 0.719 \quad *$$

Beräkning av den kritiska lasten (knäckningslasten) för rörkonstruktionen, N_{cr}

$$N_{cr} := \omega_2 \cdot N_u \quad * \quad (\text{b5.h})$$

$$N_{cr} = 677.741 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

För aktuella profiltyper gäller att $\eta \sim 1.35$ om inget annat värde påvisas vara riktigare, enligt handboken sid 28.

$$\eta := 1.35$$

$$\alpha_c := \begin{cases} \alpha_c \leftarrow \eta^2 \cdot \omega_2 & \text{if } \eta^2 \cdot \omega_2 \geq 0.8 \end{cases} \quad * \quad (\text{handboken sid 28})$$

$$\alpha_c \leftarrow 0.8 \quad \text{otherwise}$$

$$\alpha_c = 1.31 \quad *$$

Beräkning av gällande moment vid fullständigt plasticerat tvärsnitt, M_u

$$M_u := 1.35 \cdot W \cdot f_{yd_u} \quad * \quad (\text{5.c})$$

$$M_u = 14.649 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}} \quad * \quad N_{d_u} = 316.105 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad M_{d_u} = 8.302 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$\left(\frac{N_{d_u}}{N_{cr}} \right)^{\alpha_c} + \left(\frac{M_{d_u}}{M_u} \right) = 0.935 \quad * \quad (\text{5.b})$$

$$\text{kontroll_5_3_1} := \text{if} \left[\left[\left(\frac{N_{d_u}}{N_{cr}} \right)^{\alpha_c} + \left(\frac{M_{d_u}}{M_u} \right) \right] \leq 1.0 \right], \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \quad *$$

$$\text{kontroll_5_3_1} = \text{"OK!"} \quad *$$

5.3.1b Kontroll av kapacitet med avseende på uppträdande maximal normalkraft (enligt kontroll 5.3 men med $M_{d,u} = 0$ och ξ enligt handboken, Bilaga 5)

Handboken sid 47

$$\mu_2 := \left[1.22 + 1.95 \cdot \left(\frac{8}{\eta_j \cdot \lambda_f} \right)^{0.25} \right]^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{\eta_j}} \quad (b5.d)$$

$$\mu_2 = 4.021 *$$

$$\kappa_2 = 0.322$$

$$\xi_2 := \left(\begin{array}{l} \xi_2 \leftarrow \sqrt{\kappa_2} \text{ if } \sqrt{\kappa_2} \leq 1 \\ \xi_2 \leftarrow 1 \text{ otherwise} \end{array} \right) * \quad (b5.e)$$

$$\xi_2 = 0.567 *$$

Beräkning av knäckningslasten för rörkonstruktionen i jord vid ideala elastiska förhållanden, $N_{cr,el}$

$$E_{jd} = 34.091 \text{ MPa} \quad E_k = 210000 \text{ MPa} \quad I = 1.15 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^4}{\text{m}} \quad R_t = 2.099 \text{ m} \quad R_c = 0.49 \text{ m}$$

$$N_{cr,el,2} := \left[\begin{array}{l} N_{cr,el,2} \leftarrow 1.2 \sqrt{\frac{E_{jd} \cdot (E_k \cdot I)}{R_t}} \text{ if } R_t = R_c \\ N_{cr,el,2} \leftarrow \frac{3\xi_2}{\mu_2} \cdot \sqrt{\frac{E_{jd} \cdot (E_k \cdot I)}{R_t}} \text{ otherwise} \end{array} \right] * \quad (b5.a)$$

$$N_{cr,el,2} := \left[\begin{array}{l} N_{cr,el,2} \leftarrow 1.2 \sqrt{\frac{E_{jd} \cdot (E_k \cdot I)}{R_t}} \text{ if } R_t = R_c \\ N_{cr,el,2} \leftarrow \frac{3\xi_2}{\mu_2} \cdot \sqrt{\frac{E_{jd} \cdot (E_k \cdot I)}{R_t}} \text{ otherwise} \end{array} \right] * \quad (b5.b)$$

$$N_{cr,el,2} = 838.035 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

$$f_{yd,u} = 250 \text{ MPa} *$$

$$N_u = 943.043 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

$$\omega_{2,2} := \left[\begin{array}{l} \omega_{2,2} \leftarrow \frac{N_{cr,el,2}}{N_u} \text{ if } \left(\frac{N_{cr,el,2}}{N_u} \right) \leq 0.5 \\ \omega_{2,2} \leftarrow 1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{N_u}{N_{cr,el,2}} \text{ if } \left(\frac{N_{cr,el,2}}{N_u} \right) > 0.5 \end{array} \right] * \quad (b5.g, b5.h)$$

$$\omega_{2,2} = 0.719 *$$

Beräkning av den kritiska lasten (knäckningslasten) för rörkonstruktionen, N_{cr}

$$N_{cr,2} := \omega_{2,2} \cdot N_u *$$

$$N_{cr,2} = 677.741 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * \quad (b5.h)$$

$$\eta_2 := 1.35 *$$

$$\alpha_{c_2} := \begin{cases} \alpha_{c_2} \leftarrow \eta_{-2}^2 \cdot \omega_2 & \text{if } \eta^2 \cdot \omega_2 \geq 0.8 \quad * \\ \alpha_{c_2} \leftarrow 0.8 & \text{otherwise} \end{cases}$$

handboken sid 28

$$\alpha_{c_2} = 1.31 \quad *$$

$$N_{d_u} = 316.105 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\left(\frac{N_{d_u}}{N_{cr_2}} \right)^{\alpha_{c_2}} = 0.368 \quad * \quad (5.b)$$

$$\text{kontroll}_{5_3_1b} := \text{if} \left[\left[\left[\left(\frac{N_{d_u}}{N_{cr_2}} \right)^{\alpha_{c_2}} \right] \leq 1.0 \right], \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right] *$$

$$\text{kontroll}_{5_3_1b} = \text{"OK!"} \quad *$$

5.3.2 Kontroll av att tillräcklig kapacitet finns i rörbrons nedre del

$$N_d < f_{yd_u} \cdot A_{s2} \quad (5.d)$$

$$f_{yd_u} = 250 \text{ MPa} \quad A_{s2} := A \quad A_{s2} = 0.00377 \text{ m} \quad N_d = 316.105 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad f_{yd_u} \cdot A_{s2} = 943.043 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{kontroll}_{5_3_2} := \text{if} \left[\left[N_d < f_{yd_u} \cdot A_{s2} \right], \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right] *$$

$$\text{kontroll}_{5_3_2} = \text{"OK!"} \quad *$$

5.3.2b Kontroll av att tillräcklig kapacitet finns i rörbrons nedre hörndel

$$N_d < f_{yd_u} \cdot A_{s2} \quad (5.d)$$

$$f_{yd_u} = 250 \text{ MPa} \quad A_{s2} = 0.00377 \text{ m} \quad N_d = 316.105 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{kontroll}_{5_3_2b} := \text{if} \left[\left[N_d < f_{yd_u} \cdot A_{s2} \right], \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right] *$$

$$\text{kontroll}_{5_3_2b} = \text{"OK!"} \quad *$$

5.3.3 Kontroll mot överskridande av skruvförbandens kapacitet.

Handboken sid 28 ff.

Kontroll av att kapaciteten är tillräcklig (mot skjuvbrott i skruv resp plåt) görs enligt ekvation

$N_{d_u} < \min(n \times F_{Rvd}; n \times F_{Rbd})$ där dimensionerande normalkraft utgörs av summan av normalkraft för jordlast och trafiklast med partialkoefficienter i brottgränstillstånd. Nedanstående gäller under förutsättning att skruvförbanden försetts med minst två skruvar för varje vågtopp och vågdal och placerade så att böjande moment kan överföras. Skruvförbandens kapacitet beräknas enligt *BSK 99 6.4 Dimensionering av skruvförband*, med skruvarnas aktuella data för materialkvalitet och dimensioner. Kontroll av momentkapacitet i plåtskarv kontrolleras enligt ekvation $a \times n/2 \times F_{Rtd} > W \times f_{yd}$ även bärförmågan för fallet med kombinerad dragning och skjuvning kontrolleras, *BSK 99 6:433 Kombinerad dragning och skjuvning*
Kontrollerna utförs i brottgränstillstånd.

d = skruvs diameter

A_b = skruvs tvärsnittsarea, nominell area

A_s = skruvs spänningsarea

n = antal skruvar per meter

e_1 = från centrum till fri kant

d_s = anliggning mot skruvstam

ϕ = reduktionsfaktor för normalt åtdragen skruv = 0.6

$t_{plåt}$ = plåt tjocklek

a_{skarv} = skarvning av plåt (överlappet)

F_{st} = beräknad dragkraft vid dimensionerande last i brottgränstillstånd

F_{sv} = beräknad tvärkraft vid dimensionerande last i brottgränstillstånd

F_{Rtd} = skruvens dimensionerande kapacitet vid dragning

F_{Rvd} = skruvens dimensionerande kapacitet vid skjuvning vid brott i skruv

F_{Rbd} = skruvens dimensionerande kapacitet vid skjuvning vid brott i plåt

5.3.3.1 Kontroll av att skruvarnas kapacitet är tillräcklig mot skjuvbrott i skruven; F_{Rvd}

$n_{erfl} < n$

$$A_s = 244.796 \text{ mm}^2 * n = 13 \frac{1}{m} \quad f_{buk} = 800 \text{ MPa} \quad \gamma_{m_bult_u} = 1.2 \quad \gamma_{n_stål_u} = 1.1 \quad N_{d_u} = 316.105 \frac{\text{kN}}{m}$$

$$f_{bud} := \frac{f_{buk}}{\gamma_{m_bult_u} \cdot \gamma_{n_stål_u}} * \quad (\text{BSK 99, 3:48})$$

$$f_{bud} = 606.061 \text{ MPa} *$$

$$F_{Rvd} := 0.6 \cdot A_s \cdot f_{bud} * \quad (\text{BSK 99, 6:432a})$$

$$F_{Rvd} = 89.017 \text{ kN} *$$

$$n_{erfl} := \frac{N_{d_u}}{F_{Rvd}} * \quad (5.e)$$

$$n_{erfl} = 3.551 \frac{1}{m} *$$

$$\text{kontroll_5_3_3_1} := \text{if}(n_{erfl} < n, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"}) *$$

$$\text{kontroll_5_3_3_1} = \text{"OK!"} *$$

5.3.3.2 Kontroll av att skruvarnas kapacitet är tillräcklig mot hålkantbrott i plåten; F_{Rbd}

$$f_{uk} = 410 \text{ MPa} \quad \gamma_{n_stål_u} = 1.1 \quad \gamma_{m_stål_u} = 1$$

$$f_{ud} := \frac{f_{uk}}{1.2 \cdot \gamma_{n_stål_u} \cdot \gamma_{m_stål_u}} \quad * \quad (\text{BSK 99, 3:42})$$

$$f_{ud} = 310.606 \text{ MPa} *$$

$$e_1 = 0.035 \text{ m} *$$

Att nedan använda d_s , skruvens utvändiga gängas innerdiameter, innebär att beräkningen utförs på säkra sidan.

$$F_{Rbd} := 1.2 \cdot \left(\frac{e_1}{d_s} - 0.5 \right) \cdot d_s \cdot t_{plåt} \cdot f_{ud} * \quad (\text{BSK 99, 6:432b})$$

$$F_{Dk,d} = 29.266 \text{ kN} *$$

$$N_{d_u} = 316.105 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$n_{erf2} := \frac{N_{d_u}}{F_{Rbd}} * \quad (5.e)$$

$$n_{erf2} = 10.801 \frac{1}{\text{m}} *$$

$$\text{kontroll_5_3_3_2} := \text{if}(n_{erf2} < n, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"}) *$$

$$\text{kontroll_5_3_3_2} = \text{"OK!"} *$$

5.3.3.3 Kontroll av momentkapacitet i plåtskarv, F_{Rtd}

$$W = 43.406 \frac{\text{mm}^3}{\text{mm}} \quad a_{\text{skarv}} = 0.085 \text{ m} \quad f_{yk} = 275 \text{ MPa} \quad \gamma_{n_stål_u} = 1.1 \quad \gamma_{m_stål_u} = 1$$

$$n_{\text{erf3}} \geq \frac{W \cdot f_{yd}}{F_{Rtd} \cdot \frac{a_{\text{skarv}}}{2}} \quad * \quad (5.f)$$

Spänningsarean A_s används för beräkning, ger resultat på säkra sidan.

$$A_s = 244.796 \text{ mm}^2$$

$$a \cdot \frac{n}{2} \cdot F_{Rtd} \geq W \cdot f_{yd} \quad * \quad (5.f)$$

$$F_{Rtd} := \phi_t \cdot A_s \cdot f_{bud} \quad * \quad (\text{BSK 99, 6:431})$$

$$F_{Rtd} = 89.017 \text{ kN} \quad *$$

$$f_{yd} := \left(\frac{f_{yk}}{\gamma_{n_stål_u} \cdot \gamma_{m_stål_u}} \right) \quad * \quad (\text{BSK 99, 3:42})$$

$$f_{yd} = 250 \text{ MPa} \quad *$$

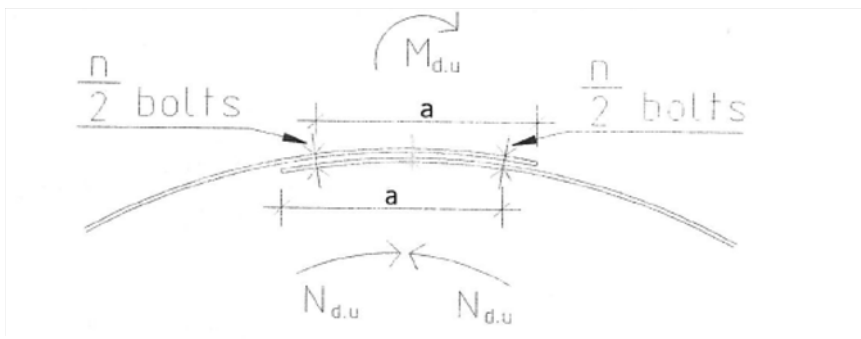
$$n_{\text{erf3}} := \frac{W \cdot f_{yd}}{F_{Rtd} \cdot \frac{a_{\text{skarv}}}{2}} \quad * \quad (5.f)$$

$$n_{\text{erf3}} = 2.868 \frac{1}{\text{m}} \quad *$$

$$\text{kontroll_5_3_3_3} := \text{if} \left[(n) \geq (n_{\text{erf3}}), \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right] \quad *$$

$$\text{kontroll_5_3_3_3} = \text{"OK!"} \quad *$$

5.3.3.4 Kontroll mot överskridande av skruvförbandens kapaciteten vid kombinerad dragning och skjuvning



$$\left(\frac{F_{St}}{F_{Rtd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{Sv}}{F_{Rvd}} \right)^2 \leq 1_* \quad (\text{BSK 6:433})$$

$$M_{d_u} = 8.302 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}} \quad N_{d_u} = 316.105 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad a_{\text{skarv}} = 0.085 \text{ m} \quad n = 13 \frac{1}{\text{m}} \quad k = 2$$

$$F_{St} := \frac{M_{d_u}}{a_{\text{skarv}} \cdot \frac{n}{k}}_* \quad (5.f)$$

$$F_{Sv} := \frac{N_{d_u}}{n}_*$$

$$F_{St} = 15.026 \text{ kN}_* \quad F_{Sv} = 24.316 \text{ kN}_*$$

$$F_{Rtd} = 89.017 \text{ kN} \quad F_{Rvd} = 89.017 \text{ kN}$$

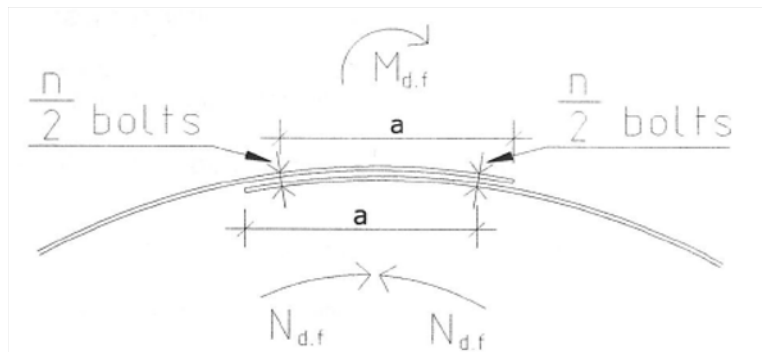
$$\left(\frac{F_{St}}{F_{Rtd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{Sv}}{F_{Rvd}} \right)^2 = 0.103_*$$

$$\text{kontroll_5_3_3_4} := \text{if} \left[\left(\frac{F_{St}}{F_{Rtd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{Sv}}{F_{Rvd}} \right)^2 \leq 1, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right]_*$$

$$\text{kontroll_5_3_3_4} = \text{"OK!"}_*$$

5.4 Beräkningsmässig verifiering av rörväggens bärförmåga i utmattningsgränstillstånd

Kontroll görs även av att kapaciteten är tillräcklig vid ren dragning, ren skjuvning och kombinerad dragning och skjuvning i utmattningsgränstillstånd enligt BSK 99 6:5 Dimensionering med hänsyn till utmattning



5.4.1 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid ren dragning σ_{rd} i utmattningsgränstillstånd

$$\sigma_{rd} \leq f_{rd}^*$$

$$\Delta M_{d_f} = 5.409 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}} \quad a_{\text{skarv}} = 0.085 \text{ m} \quad n = 13 \frac{1}{\text{m}} \quad k = 2 \quad A_s = 2.448 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{m}}$$

$$\sigma_{rd} := \frac{\Delta M_{d_f}}{a_{\text{skarv}} \cdot \frac{n}{k} \cdot A_s}^*$$

$$\sigma_{rd} = 39.995 \text{ MPa}^*$$

Utmattningshållfastheten för grundmaterial som inte påverkas av svets eller termiska skärning kan ökas genom att f_{rk} multipliceras med materiaalfaktorn ϕ_m . Materialet anses opåverkat enligt ovan om avståndet till skärkant är minst 3 plåttjocklekar; $a > 3 \times t_{\text{plåt}}$

(BSK 99 6:523)

Att skjuvningsvillkoret ovan är uppfyllt innebär att avståndet till kant är minst $3d$, vilket är större än 3 plåttjocklekar.

$$f_{uk} = 410 \text{ MPa} \quad t_{\text{plåt}} = 3 \text{ mm} \quad C_a = 45 \text{ MPa} \quad n_t = 1 \times 10^5 \quad \gamma_{n_f} = 1.1$$

$$\phi_{ma} := \begin{cases} \phi_{ma} \leftarrow 1.0 & \text{if } 340 \cdot \text{MPa} \leq f_{uk} < 410 \cdot \text{MPa} \quad * \\ \phi_{ma} \leftarrow 1.10 & \text{if } 410 \cdot \text{MPa} \leq f_{uk} < 450 \cdot \text{MPa} \\ \phi_{ma} \leftarrow 1.15 & \text{if } 450 \cdot \text{MPa} \leq f_{uk} < 490 \cdot \text{MPa} \\ \phi_{ma} \leftarrow 1.20 & \text{if } 490 \cdot \text{MPa} \leq f_{uk} < 600 \cdot \text{MPa} \\ \phi_{ma} \leftarrow 1.25 & \text{if } 600 \text{MPa} \leq f_{uk} \end{cases}$$

(BSK 99 tabell 6:523)

$$\phi_{ma} = 1.1 \quad *$$

$$\phi_{ma_dim} := \left(\frac{25 \text{ mm}}{t_{\text{plåt}}} \right)^{0.0763} \quad *$$

(BSK 99 6:523b)

$$\phi_{ma_dim} = 1.176 \quad *$$

$$f_{rk} := \begin{cases} f_{rk} \leftarrow \phi_{ma_dim} \cdot \phi_{ma} \cdot \left[C_a \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^6}{n_t} \right)^{\frac{1}{3}} \right] & \text{if } n_t < 10^6 \\ f_{rk} \leftarrow \phi_{ma_dim} \cdot \phi_{ma} \cdot \left[C_a \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^6}{n_t} \right)^{\frac{1}{5}} \right] & \text{if } 10^6 \leq n_t < 10^8 \\ f_{rk} \leftarrow \phi_{ma_dim} \cdot \phi_{ma} \cdot \left[C_a \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^6}{10^8} \right)^{\frac{1}{5}} \right] & \text{if } 10^8 \leq n_t \end{cases} *$$

(BSK 99 figur 6:523
utifrån ekvation 6:523a)

$$f_{rk} = 157.958 \text{ MPa} *$$

$$f_{rd} := \frac{f_{rk}}{1.1 \cdot \gamma_{n_f}} *$$

(BSK 99 6:512)

$$f_{rd} = 130.543 \text{ MPa} *$$

$$\sigma_{rd} = 39.995 \text{ MPa} *$$

$$\text{kontroll_5_4_1} := \text{if}(\sigma_{rd} \leq f_{rd}, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"}) *$$

$$\text{kontroll_5_4_1} = \text{"OK!"} *$$

5.4.2 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid ren skjuvning τ_{rd} i utmattningsgränstillstånd

$$\tau_{rd} \leq f_{rvd} *$$

$$N_{d_f} = 87.996 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad n = 13 \frac{1}{\text{m}} \quad A_s = 2.448 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

(BSK 6:512b)

$$\tau_{rd} := \frac{N_{d_f}}{n \cdot A_s} *$$

$$\tau_{rd} = 27.651 \text{ MPa} *$$

$$f_{rvd} := 0.6 \cdot f_{rd} *$$

(BSK 6:512b)

$$f_{rvd} = 78.326 \text{ MPa} *$$

$$\text{kontroll_5_4_2} := \text{if}(\tau_{rd} \leq f_{rvd}, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"}) *$$

$$\text{kontroll_5_4_2} = \text{"OK!"} *$$

5.4.3 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid kombinerad dragning σ_{rd} och skjuvning τ_{rd} i utmattningsgränstillstånd

$$\begin{aligned}\sigma_{rd} &= 39.995 \text{ MPa} & \tau_{rd} &= 27.651 \text{ MPa} \\ f_{rd} &= 130.543 \text{ MPa} & f_{rvd} &= 78.326 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\left(\frac{\sigma_{rd}}{f_{rd}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{rd}}{f_{rvd}}\right)^2 \leq 1.1 * \quad (\text{BSK 99 6:512c})$$

$$\left[\left(\frac{\sigma_{rd}}{f_{rd}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{rd}}{f_{rvd}}\right)^2\right] = 0.218 *$$

$$\text{kontroll_5_4_3} := \text{if}\left[\left(\frac{\sigma_{rd}}{f_{rd}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{rd}}{f_{rvd}}\right)^2 \leq 1.1, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"}\right] *$$

$$\text{kontroll_5_4_3} = \text{"OK!"} *$$

5.4.4 Kontroll av utmattning i plåt

Dimensioneringsvillkoret med hänsyn till utmattning är $\sigma_{rd} < f_{rd}$ där σ_{rd} är spännvidden och beräknas enligt elasticitetsteorin:

$$\sigma_{rd_plåt} = \frac{N_{d_f}}{A} + \frac{\Delta M_{d_f}}{W} * \quad (\text{BSK 99, 6:512a})$$

$$N_{d_f} = 87.996 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * \quad \Delta M_{d_f} = 5.409 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}} *$$

$$A = 0.003772 \frac{\text{m}^2}{\text{m}} \quad W = 0.000043 \frac{\text{m}^3}{\text{m}}$$

$$\sigma_{rd_plåt} := \left(\frac{N_{d_f}}{A} + \frac{\Delta M_{d_f}}{W}\right) *$$

$$\sigma_{rd_plåt} = 147.951 \text{ MPa} *$$

f_{rk} beräknas enligt BSK

$$C_{a2} = 100 \text{ MPa} * \quad n_t = 100000 \quad (\text{BSK 99, bilaga 3})$$

$$f_{rk_plåt} := \left(\frac{2 \cdot 10^6}{n_t}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot C_{a2} * \quad (\text{BSK 99, 6:523a})$$

$$f_{rk_plåt} = 271.442 \text{ MPa} *$$

Beräkning av dimensionerande värde för utmattningshållfasthet, f_{rd}

$$\phi_{ma} = 1.1 \quad \gamma_{n_f} = 1.1$$

$$f_{rd_plåt} := \frac{\phi_{ma} \cdot f_{rk_plåt}}{1.1 \cdot \gamma_{n_f}} *$$

$$f_{rd_plåt} = 246.765 \text{ MPa} *$$

$$\sigma_{rd_plåt} = 147.951 \text{ MPa} *$$

$$\text{kontroll_5_4_4} := \text{if}(\sigma_{rd_plåt} \leq f_{rd_plåt}, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"}) *$$

$$\text{kontroll_5_4_4} = \text{"OK!"} *$$

5.5 Övrig beräkningsmässig verifiering

5.5.1 Kontroll av styvhet vid montering etc.

Handboken sid 29

Enligt handboken ska rörprofilens styvhet definieras enligt nedan och ges ett värde så att $\eta_m < 0.13$ för cirkulära sektioner och $\eta_m < 0.2$ för valvformade eller lågbyggda sektioner.

$$\eta_m = \frac{D^2}{E_k \cdot I} = \frac{\lambda_f}{E_{jd} \cdot D}$$

(Handboken sid 29)

$$D = 4.196 \text{ m} \quad E_k = 210000 \text{ MPa} \quad I = 1.15 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^4}{\text{m}}$$

$$\lambda_f = 10426.34 \quad E_{jd} = 34.091 \text{ MPa}$$

$$\eta_m := \frac{D^2}{E_k \cdot I} *$$

$$\eta_m = 0.073 \frac{\text{m}}{\text{kN}} *$$

$$\frac{\lambda_f}{E_{jd} \cdot D} = 0.073 \frac{\text{m}}{\text{kN}} *$$

$$\text{kontroll_5_5_1} := \text{if} \left[\left[\eta_m < \left(0.2 \frac{\text{m}}{\text{kN}} \right) \right], \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right] *$$

$$\text{kontroll_5_5_1} = \text{"OK!"} *$$

$$\text{kontroll_5_5_1_rund} := \text{if} \left[\left[\eta_m < \left(0.13 \frac{\text{m}}{\text{kN}} \right) \right], \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right] * \text{gäller för cirkulära sektioner}$$

$$\text{kontroll_5_5_1_rund} = \text{"OK!"} *$$

5.5.2 Kontroll av att flytled inte bildas i trumman under byggskedet då $hc = 0$

$$M_{kf} := [-f_1 \cdot (f_3 \cdot f_{2_kf})] \cdot (\rho_{kf} \cdot D^3)$$

$$M_{kf} = -2.467 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$M_u = 14.649 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$\text{kontroll_5_5_2} := \text{if} \left[\left[M_{kf} < (M_u) \right], \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right] *$$

$$\text{kontroll_5_5_2} = \text{"OK!"}$$

6. Sammanställning kontroller

5.1.1 Kontroll av tillåten överfyllnad enligt Bro 2004

tillräcklig_överfyllnad = "OK!" * Villkor: $0.6 < h_c$

$$\begin{pmatrix} h_c \\ 0.6m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.675 \\ 0.6 \end{pmatrix} m$$

5.1.2 Kontroll av böjmoment av trafiklast

kontroll_5_1_2 = "OK!" * Villkor: $f_4 \cdot f'_4 < 1$

$$f_4 \cdot f'_4 = 0.002$$

5.2.1 Säkerhet mot begynnande flytning i bruksgränstillstånd

kontroll_5_2_1 = "OK!" * Villkor: $\sigma < f_{yd_s}$

$$\begin{pmatrix} f_{yd_s} \\ \sigma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 275 \\ 181.881 \end{pmatrix} MPa$$

5.3.1 Kontroll av att flytled ej bildas i rörbrons övre del

kontroll_5_3_1 = "OK!" *

$$\text{Villkor: } \left[\left(\frac{N_{d_u}}{N_{cr}} \right)^{\alpha_c} + \left(\frac{M_{d_u}}{M_u} \right) \right] \leq 1.0 \quad \left(\frac{N_{d_u}}{N_{cr}} \right)^{\alpha_c} + \left(\frac{M_{d_u}}{M_u} \right) = 0.93$$

5.3.1b Kontroll av kapacitet med avseende på uppträdande maximal normalkraft (enligt kontroll 5.4 men med $M_{d_u} = 0$ och ξ enligt handboken, bilaga 5)

kontroll_5_3_1b = "OK!" *

$$\text{Villkor: } \left[\left(\frac{N_{d_u}}{N_{cr_2}} \right)^{\alpha_{c_2}} \right] \leq 1.0 \quad \left(\frac{N_{d_u}}{N_{cr_2}} \right)^{\alpha_{c_2}} = 0.368$$

5.3.2 Kontroll av att tillräcklig kapacitet finns i rörbrons nedre del

kontroll_5_3_2 = "OK!" * Villkor: $(N_d) < f_{yd_u} \cdot A_{s2}$

$$\begin{pmatrix} f_{yd_u} \cdot A_{s2} \\ N_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 943.043 \\ 316.105 \end{pmatrix} \frac{kN}{m}$$

5.3.2b Kontroll av att tillräcklig kapacitet finns i rörbrons nedre hörndel

kontroll_5_3_2b = "OK!" Villkor: $(N_d) < f_{yd_u} \cdot A_{s2}$

$$\begin{pmatrix} f_{yd_u} \cdot A_{s2} \\ N_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 943.043 \\ 316.105 \end{pmatrix} \frac{kN}{m}$$

5.3.3.1 Kontroll av att skruvarnas kapacitet är tillräcklig mot skjuvbrott i skruven; F_{Rvd}

kontroll_5_3_3_1 = "OK!" * Villkor: $n_{erf1} < n$

$$\begin{pmatrix} n \\ n_{erf1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 13 \\ 3.551 \end{pmatrix} \frac{1}{m}$$

5.3.3.2 Kontroll av att skruvarnas kapacitet är tillräcklig mot hålkantbrott i plåten; F_{Rbd}

kontroll_5_3_3_2 = "OK!" * Villkor: $n_{erf2} < n$

$$\begin{pmatrix} n \\ n_{erf2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 13 \\ 10.801 \end{pmatrix} \frac{1}{m}$$

5.3.3.3 Kontroll av momentkapacitet i plåtskarv, F_{Rtd}

kontroll_5_3_3_3 = "OK!" * Villkor: $n_{erf3} \leq n$

$$\begin{pmatrix} n \\ n_{erf3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 13 \\ 2.868 \end{pmatrix} \frac{1}{m}$$

5.3.3.4 Kontroll mot överskridande av skruvförbandens kapaciteten vid kombinerad dragning och skjuvning

kontroll_5_3_3_4 = "OK!" *

$$\text{Villkor: } \left(\frac{F_{St}}{F_{Rtd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{Sv}}{F_{Rvd}} \right)^2 \leq 1 * \quad \left(\frac{F_{St}}{F_{Rtd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{Sv}}{F_{Rvd}} \right)^2 = 0.103 *$$

5.4.1 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid ren dragning σ_{rd} i utmattningsgränstillstånd

kontroll_5_4_1 = "OK!" *

Villkor: $\sigma_{rd} \leq f_{rd}$

$$\begin{pmatrix} f_{rd} \\ \sigma_{rd} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 130.543 \\ 39.995 \end{pmatrix} MPa$$

5.4.2 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid ren skjuvning τ_{rd} i utmattningsgränstillstånd

kontroll_5_4_2 = "OK!" * Villkor: $\tau_{rd} \leq f_{rvd}$ $\begin{pmatrix} f_{rvd} \\ \tau_{rd} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 78.326 \\ 27.651 \end{pmatrix} \text{MPa}$

5.4.3 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid kombinerad dragning σ_{rd} och skjuvning τ_{rd} i utmattningsgränstillstånd

kontroll_5_4_3 = "OK!" * Villkor: $\left(\frac{\sigma_{rd}}{f_{rd}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{rd}}{f_{rvd}}\right)^2 \leq 1.1$ $\begin{pmatrix} \frac{\sigma_{rd}}{f_{rd}} \\ \frac{\tau_{rd}}{f_{rvd}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.218 \\ 0.218 \end{pmatrix}$

5.4.4 Kontroll av utmattning i plåt

kontroll_5_4_4 = "OK!" * Villkor: $\sigma_{rd_plåt} \leq f_{rd_plåt}$ $\begin{pmatrix} f_{rd_plåt} \\ \sigma_{rd_plåt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 246.765 \\ 147.951 \end{pmatrix} \text{MPa}$

5.5.1 Kontroll av styvhet vid montering etc.

kontroll_5_5_1 = "OK!" * Villkor: $\eta_m < \left(0.2 \frac{\text{m}}{\text{kN}}\right)$ $\begin{pmatrix} 0.2 \frac{\text{m}}{\text{kN}} \\ \eta_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.073 \end{pmatrix} \frac{\text{m}}{\text{kN}}$

(specialfall, rund sektion)

kontroll_5_5_1_rund = "OK!" Villkor: $\eta_m < \left(0.13 \frac{\text{m}}{\text{kN}}\right)$ $\begin{pmatrix} 0.13 \frac{\text{m}}{\text{kN}} \\ \eta_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.13 \\ 0.073 \end{pmatrix} \frac{\text{m}}{\text{kN}}$

5.5.2 Kontroll av att flytled inte bildas i trumman under byggskedet då $hc = 0$

kontroll_5_5_2 = "OK!" Villkor: $M_{kf} < (M_u)$ $\begin{pmatrix} M_{kf} \\ M_u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2.467 \\ 14.649 \end{pmatrix} \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}}$

7. Beteckningar

Latinska gemener

a_{skarv}	skarvmått
c	halv våglängd
d	diameter på skruv
d_x, d_y	mått för kontaktyta från hjultryck
e_1	hålcentrum
f'	beräkningsparameter
f_1, f_2, f_3, f_4	funktionsuttryck som förenklade syfte används i framställning
f_{index}	hållfasthetsvärden för stålmaterial och skruvar (MPa) enligt BSK 99
h	höjd på rörprofil, mått från botten till toppen på trumman
h_{corr}	korrugeringens höjd för rörbro av korrugerad plåt
h_c	överfyllnadshöjd
h_{c_red}	effektiv överfyllnadshöjd
k	antal rader skruvar
m_t	tangentlängd
n	antal
P_{trafik}	ekvivalent trafiklast, linjelast
q_x	fördelat tryck från trafik
$t_{\text{plåt}}$	plåttjocklek
x, y	koordinater

Latinska versaler

A	tvärsnittsarea
A_x	avstånd mellan laster i tvärled
B_x	axelavstånd
C_a	förbandsklass
C_{a2}	förbandsklass för kontroll av utmattning i plåt
C_x	axelavstånd
D	rörets diameter
D_x	axelavstånd
E_j	tangentmodul för jordmaterial i kringfyllnaden
E_{jd}	dimensionerande tangentmodul för jordmaterial i kringfyllnaden
E_k	elasticitetsmodul
F_{Rbd}	skruvens dimensionerande kapacitet vid skjuvning vid brott i plåt
F_{Rtd}	skruvens dimensionerande kapacitet vid dragning
F_{Rvd}	skruvens dimensionerande kapacitet vid skjuvning vid brott i skruv
F_{St}	beräknad dragkraft vid dimensionerande last i brottgränstillstånd
F_{Sv}	beräknad tvärkraft vid dimensionerande last i brottgränstillstånd
H	valvhöjd
I	tröghetsmoment för röret per längdenhet
M_d	dimensionerande böjmoment
M_j	böjmoment av jordlast
M_t	böjmoment av trafiklast
M_u	moment vid fullständigt plastiserat tvärsnitt
N_{cr}	knäckningslast för rörkonstruktioner i jord
N_{cr_el}	knäckningslast för rörkonstruktioner i jord vid ideala elastiska förhållanden
N_d	dimensionerande normalkraft
N_j	normalkraft från jord
N_t	normalkraft från trafik
N_u	normalkraft vid fullständigt plasticerat tvärsnitt
P_x	punktlast
R_b	bottenradie
R_c	hörnradie
R_f	reduktionsfaktor som används vid små överfyllnadshöjder
R_s	sidoradie
R_t	toppradie
S_{ar}	reduktionsfaktor för överlast beroende på valvverkan
S_v	beräkningsparameter
W	motståndsparemeter
Z	plastiskt motståndsmoment

Grekiska gemener

α_c	beräkningsparameter enligt BSK 99
α	vinkel vid definition av tvärsnitt
β	exponent
$\delta_{\text{hjässsa}}$	höjning av rörets hjässsa vid kringfyllnadsarbetet
ϕ	friktionsvinkel (index k används för karakteristisk, d för dimensionerande samt ö i förekommande fall för egenskaper kopplade till överfyllningen)
ϕ_t	normalt åtdragen skruv
γ	partialkoefficient (återfinns med många index)
γ_n	partialkoefficient för säkerhetsklass
η_m	styvhetsparameter använd i samband med bedömning av monteringsstyvhets
η_j	beräkningsparameter
η	Z/W, formfaktor vid böjning
κ	beräkningsparameter
ρ_{kf}	tunghet för jordmaterial upp till hjässans nivå (kringfyllning) (kN/m^3) index w för jord under grundvattenytan
ρ_2	medelvärde för tunghet för jordmaterial inom området $h_c H/2$ (kN/m^3)
$\rho_{\text{öf}}$	medelvärde för tunghet över hjässans nivå inom området h_c (kN/m^3) index w för jord under grundvattenytan
ρ_{opt}	optimal densitet bestämd enligt Standard Proctor metod
ρ_s	kompaktdensitet för jordmaterial i fyllningen, vanligtvis gäller för grovkorning jord
.	25 à 26 kN/m^3
λ_f	styvhetsparameter som anger förhållandet mellan rörets och omgivande jords respektive styvheter (dimensionslös)
ξ	beräkningsparameter
σ	spänning
σ_v	vertikalt tryck i jorden under punktlast
ω	knäckningskraft/kraft vid plasticering, se BSK 99

Dimensionering enligt Bro 2004

Projekt namn: Bro 4-797-1 över bäck vid Öja k:a på väg 230

Datum: 2008-05

Innehållsförteckning

- 1. Förutsättningar - handlingar**
- 2. Förutsättningar - geoteknik**
 - 2.1 Jord på grundläggningsnivån
 - 2.2 Överfyllning
 - 2.3 Kringfyllning
- 3. Dimensionering**
 - 3.1 Data - Rörebro
 - 3.2 Belastning
 - 3.3 Säkerhetsklass
 - 3.3.1 Säkerhetsklass - Rörebro
 - 3.3.2 Säkerhetsklass - Geoteknik
- 4. Snittkrafter**
 - 4.1 Bestämning av effektiv överfyllnadstjocklek, $h_{c,red}$
 - 4.2 Bestämning av normalkraft
 - 4.2.1 Normalkraft av jordlast, N_j
 - 4.2.2 Normalkraft av trafiklast, N_t
 - 4.2.3 Dimensionerande normalkraft
 - 4.3 Bestämning av böjmoment
 - 4.3.1 Allmänt
 - 4.3.2 Böjmoment av jordlast, M_j
 - 4.3.3 Böjmoment av trafiklast, M_t
 - 4.3.4 Dimensionerande böjmoment
- 5. Dimensioneringskontroller**
 - 5.1 Kontroll av tillåten överfyllnad
 - 5.2 Kontroll av böjmoment av trafiklast
 - 5.3 Kontroll av säkerhet mot begynnande flytning i rörvägg i bruksgränstillstånd
 - 5.4 Kontroll att flytled ej bildas i rörbrons övre del i brottgränstillstånd
 - 5.5 Kontroll att tillräcklig kapacitet finns i rörbrons nedre del
 - 5.6 Kontroll av säkerhet mot överskridande av skruvförbandens kapacitet
 - 5.7 Kontroll av styvhet vid montering
 - 5.8 Kontroll av utmattning
- 6. Beteckningar**

1. Förutsättningar - handlingar

Övergripande handlingar:

'Dimensionering av rörbroar' Lars Pettersson och Håkan Sundquist, TRITA-BKN, RAPPORT 58, Brobyggnad 2000, utgåva2, 2002

Projekthandlingar:

2. Förutsättningar - geoteknik

2.1 Jord på grundläggningsnivån

Röribädd

2.2 Överfyllning

Förstärkningslager

φ_k : 38 °

ρ_0 : 20 kN/m³

ρ : 13 kN/m³

h_c , överfyllnad: 0.675 m

2.3 Kringfyllning

Förstärkningslager

φ_k : 38 °

E_k : 60 MPa

ρ_1 : 20 kN/m³

ρ : 13 kN/m³

3. Dimensionering

3.1 Data - rörebro

Typ: Gävle vägtrummor AB . Profil PA27

Lågbyggd trumma:

Bredd/Diameter (D): 4.196 m

Höjd (h): 2.678 m

Toppradien (R_t): 2.099 m

Valvhöjd (H): 2.03 m

Stålkvalitet: S 280 JR2

Korrosionsskydd: Varmförzinkad enligt SS-EN ISO 1461

Korrugering: 150*50

Övre del

Plåttjocklek: $t = 3$ mm

Böjmotstånd: $W = 44.4$ mm³/mm

Tröghetsmoment: $I = 1176.6$ mm⁴/mm

Area (tvärsnitt): $A = 3.77$ mm²/mm

Nedre del

Plåttjocklek: $t = 3$ mm

Böjmotstånd: $W = 44.4$ mm³/mm

Tröghetsmoment: $I = 1176.6$ mm⁴/mm

Area (tvärsnitt): $A = 3.77 \text{ mm}^2/\text{mm}$

3.2 Belastning

För ekvivalentlast 1 gäller följande förutsättningar:

dx: 0.2 m

dy: 0.6 m

P: 250 kN

P2(intilliggande körfält): 170 kN

A: 2 m

B: 1.5 m

C: 6 m

Störst belastning finns i punkten $x = 1.5$ och $y = 1.05$.

För ekvivalentlast 2 gäller följande förutsättningar:

dx: 0.2 m

dy: 0.6 m

P: 310 kN

P2(intilliggande körfält): 210 kN

A: 2 m

Störst belastning finns i punkten $x = 0$ och $y = 1.05$.

För ekvivalentlast 4 gäller följande förutsättningar:

dx: 0.2 m

dy: 0.6 m

P: 325 kN

A: 2 m

B: 1.5 m

C: 6 m

Störst belastning finns i punkten $x = 1.5$ och $y = 1$.

För ekvivalentlast Utmattningslast gäller följande förutsättningar:

dx: 0.2 m

dy: 0.6 m

P: 150 kN

P2: 180 kN

A: 2 m

B: 1.5 m

C: 6 m

D: 2 m

Störst belastning finns i punkten $x = 7.5$ och $y = 1$.

3.3 Säkerhetsklass

3.3.1 Säkerhetsklass rörbro

Säkerhetsklass: 2

Lastkoefficienter:

$$\Psi_{\gamma_{\text{trafik,s}}} = 1$$

$$\Psi_{\gamma_{\text{trafik,u}}} = 1.5$$

Bilaga II

Dimensionering enligt Bro 2004

$$\Psi\gamma_{\text{trafikl,f}} = 1$$

$$\Psi\gamma_{\text{jord,s}} = 1.1$$

$$\Psi\gamma_{\text{jord,u}} = 1.1$$

$$\Psi\gamma_{\text{jord,u,min}} = 0.9$$

Partialkoefficienter:

$$\gamma_{\text{n,s,stål}} = 1$$

$$\gamma_{\text{n,u,stål}} = 1.1$$

$$\gamma_{\text{n,f}} = 1.1$$

$$\gamma_{\text{m,s,stål}} = 1$$

$$\gamma_{\text{m,u,stål}} = 1$$

$$\varphi_{\text{m}} = 1$$

$$\gamma_{\text{m,u,bult}} = 1.2$$

3.3.2 Säkerhetsklass geoteknik

Geoteknikklass: 2

Partialkoefficienter:

$$\gamma_{\text{n,geo}} = 1.1$$

$$\gamma_{\text{m}\varphi, \text{kringf}} = 1.15$$

$$\gamma_{\text{m}\varphi, \text{överf}} = 1.15$$

$$\gamma_{\text{mE}} = 1.6$$

4. Snittkrafter**4.1 Bestämning av effektiv överfyllnadstjocklek, $h_{\text{c,red}}$**

Effektiv överfyllnadstjocklek benämns $h_{\text{c,red}} = h_{\text{c}} - \delta_{\text{hjässsa}}$

Hjässans höjning vid återfyllnadsarbetet benämns $\delta_{\text{hjässsa}}$

$$\frac{\delta_{\text{hjässsa}}}{D} = 0.013 \frac{\rho_1 D}{E_j} \left(\frac{H}{D} \right)^{2.8} \lambda_f \left[0.56 - 0.2 \ln \left(\frac{H}{D} \right) \right]$$

(b1.b)

$$\rho_1 = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$D = 4.196 \text{ m}$$

$$H = 2.03 \text{ m}$$

$$E_{jk} = 60 \text{ MPa} \quad (\text{TBb/geo})$$

$$E_j = 60 / (\gamma_{n,geo} * \gamma_{mE}) = 60 / (1.1 * 1.6) = 34.0909 \text{ MPa}$$

$$\lambda_f = 10192.9 \quad (\text{Se 4.3.1 Allmänt})$$

$$\delta_{nj\ddot{a}ssa} = 4.196 * (0.013 * ((20 * 4.196) / 34090.9) * (2.03 / 4.196)^{2.8}) * 10192.9^{(0.56 - 0.2 \ln(2.03 / 4.196))} = 0.0117973 \text{ m}$$

$$h_{c,red} = h_c - \delta_{nj\ddot{a}ssa} = 0.675 - 0.0117973 = 0.663203 \quad (\text{b1.a})$$

4.2 Bestämning av normalkraft

4.2.1 Normalkraft av jordlast, N_j

$$N_j = 0.2 \frac{H}{D} \rho_1 D^2 + S_{ar} \left(0.9 \frac{h_{c,red}}{D} - 0.5 \frac{h_{c,red}}{D} \frac{H}{D} \right) \rho_{\ddot{o}} D^2 \quad (\text{4.c})$$

$$\rho_{\ddot{o}} = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$\rho_1 = 20 \text{ kN/m}^3$$

$$S_{ar} = (\text{valvverkansfaktor}) = \frac{1 - e^{-\kappa}}{\kappa} \quad (\text{4.g})$$

$$\kappa = 2S_v \frac{h_c}{D} \quad (\text{4.f})$$

$$S_v = \frac{0.8 \tan \varphi_{\ddot{o}d}}{\left(\sqrt{1 + \tan^2 \varphi_{\ddot{o}d}} + 0.45 \tan \varphi_{\ddot{o}d} \right)^2} \quad (\text{4.e})$$

$$\varphi_{\ddot{o}k} = 38 \quad (\gamma_{n,geo} = 1.1, \gamma_{m\varphi, \ddot{o}verf} = 1.15)$$

$$\varphi_{\ddot{o}d} = \arctan(\tan \varphi_{\ddot{o}k} / (\gamma_{n,geo} * \gamma_{m\varphi, \ddot{o}verf})) = \arctan(\tan 38 / (1.1 * 1.15)) = 31.6985^\circ \quad (\text{4.d})$$

$$S_v = (0.8 * 31.6985) / (\sqrt{1 + \tan^2 31.6985} + (0.45 * \tan 31.6985))^2 = 0.233916$$

$$\kappa = 2 * 0.233916 * (0.663203 / 4.196) = 0.0739436$$

$$S_{ar} = (1 - e^{-0.0739436}) / 0.0739436 = 0.963923$$

$$N_j = 0.2 * (2.03 / 4.196) * 20 * 4.196^2 + 0.963923 (0.9 * (0.663203 / 4.196) - 0.5 * (0.663203 / 4.196) * (2.03 / 4.196)) * 20 * 4.196^2$$

$$N_j = 69.3775 \text{ kN/m}$$

4.2.2 Normalkraft av trafiklast, N_t

$$P_{trafik} = \frac{\sigma_v \pi h_c}{2} \quad (\text{b4.b})$$

Ekvivalent last 1

Bilaga II

Dimensionering enligt Bro 2004

$$\sigma_{v,1} = 123.903$$

$$p_{\text{trafik},1} = (123.903 \cdot 3.14 \cdot 0.663203) / 2$$

$$p_{\text{trafik},1} = 129.011 \text{ kN/m}$$

$$q = 4 \text{ kPa}$$

$$h_{c,\text{red}}/D = 0.663203 / 4.196 = 0.158056 \Rightarrow N_t = p_{\text{trafik}} + (D/2)q \quad \text{(4.1)}$$

$$N_{t,1} = 129.011 + (4.196/2) \cdot 4$$

$$\mathbf{N_{t,1} = 137.403 \text{ kN/m}}$$

Ekvivalent last 2

$$\sigma_{v,2} = 150.984$$

$$p_{\text{trafik},2} = (150.984 \cdot 3.14 \cdot 0.663203) / 2$$

$$p_{\text{trafik},2} = 157.209 \text{ kN/m}$$

$$q = 0 \text{ kPa}$$

$$h_{c,\text{red}}/D = 0.663203 / 4.196 = 0.158056 \Rightarrow N_t = p_{\text{trafik}} + (D/2)q \quad \text{(4.1)}$$

$$N_{t,2} = 157.209 + (4.196/2) \cdot 0$$

$$\mathbf{N_{t,2} = 157.209 \text{ kN/m}}$$

Ekvivalent last 4

$$\sigma_{v,4} = 152.32$$

$$p_{\text{trafik},4} = (152.32 \cdot 3.14 \cdot 0.663203) / 2$$

$$p_{\text{trafik},4} = 158.6 \text{ kN/m}$$

$$q = 0 \text{ kPa}$$

$$h_{c,\text{red}}/D = 0.663203 / 4.196 = 0.158056 \Rightarrow N_t = p_{\text{trafik}} + (D/2)q \quad \text{(4.1)}$$

$$N_{t,4} = 158.6 + (4.196/2) \cdot 0$$

$$\mathbf{N_{t,4} = 158.6 \text{ kN/m}}$$

Utmattningslast

$$\sigma_{v,u} = 83.8311$$

$$p_{\text{trafik},u} = (83.8311 \cdot 3.14 \cdot 0.663203) / 2$$

$$p_{\text{trafik},u} = 87.2873 \text{ kN/m}$$

$$q = 0 \text{ kPa}$$

$$h_{c,\text{red}}/D = 0.663203 / 4.196 = 0.158056 \Rightarrow N_t = p_{\text{trafik}} + (D/2)q \quad \text{(4.1)}$$

$$N_{t,u} = 87.2873 + (4.196/2) \cdot 0$$

$$N_{t,u} = 87.2873 \text{ kN/m}$$

Högsta värdet på $N_t = 158.6 \text{ kN/m}$. Detta värde kommer att användas för dimensioneringen.

4.2.3 Dimensionerande normalkraft

Brukgränstillstånd:

$$N_{d,s} = \Psi \gamma_{jord,s} * N_j + \Psi \gamma_{trafik,s} * N_t \quad (4.m)$$

$$\Psi \gamma_{jord,s} = 1.1$$

$$\Psi \gamma_{trafik,s} = 1$$

Lastkombination 5A tab 22-1 BRO2002

$$N_{d,s} = 1.1 * 69.3775 + 1 * 158.6 = 234.915 \text{ kN/m}$$

Brottgränstillstånd:

$$N_{d,u} = \Psi \gamma_{jord,u} * N_j + \Psi \gamma_{trafik,u} * N_t \quad (4.n)$$

$$\Psi \gamma_{jord,u} = 1.1$$

$$\Psi \gamma_{trafik,u} = 1.5$$

Lastkombination 4A tab 22-1 BRO2002

$$N_{d,u} = 1.1 * 69.3775 + 1.5 * 158.6 = 314.215 \text{ kN/m}$$

Utmattningstillstånd:

$$\Delta N_{d,f} = \Psi \gamma_{trafik,f} * N_t \quad (4.o)$$

$$\Psi \gamma_{trafik,u} = 1$$

Lastkombination 6A tab 22-1 BRO2002

$$\Delta N_{d,f} = 1 * 87.2873 = 87.2873 \text{ kNm/m}$$

4.3 Bestämning av böjmoment

4.3.1 Allmänt

$$\lambda_f = E_j * D^3 / (EI)_s \quad (4.p)$$

$$E_{jk} = 60 \text{ MPa} \quad (\text{TBb/geo})$$

$$E_j = 60 / (\gamma_{n,geo} * \gamma_{mE}) = 60 / (1.1 * 1.6) = 34.0909 \text{ MPa}$$

$$\lambda_f = (\text{flexibilitetstalet}) = (E_j * D^3) / (EI)_s$$

$$EI = 210000 * 1.1766e-006 = 0.247086 \text{ MNm}^2/\text{m}$$

$$\lambda_f = (34.0909 * 4.196^3) / 0.247086 = 10192.9$$

$$\lambda_f = 10192.9$$

4.3.2 Böjmoment av jordlast, M_j

Bruksgränstillstånd:

$$M_j / (\rho_1 * D^3) = f_1 (f_3 f_{2,kringf} - (\rho_0 / \rho_1) * (h_c / D) * f_{2,överf}) \geq 0.5 * f_1 * f_3 * f_{2,kringf} \quad (4.q')$$

$$H/D = 2.03 / 4.196 = 0.483794 \Rightarrow f_1 = (0.8 + 1.33 * (H/D - 0.35)) = (0.8 + 1.33 * (2.03/4.196 - 0.35)) = 0.977946$$

$$\lambda_f > 5000 \Rightarrow f_{2,kringf}$$

$$f_{2,kringf} = 0.0009$$

$$f_3 = 6.67 * H/D - 1.33 = 6.67 * 2.03 / 4.196 - 1.33 = 1.89691$$

för överfyllnadsfasen gäller

$$\lambda_f > 5000 \Rightarrow f_{2,överf} = 0.0032$$

$$f_{2,överf} = 0.0032$$

$$f_1 (f_3 f_{2,kringf} - (\rho_0 / \rho_1) * (h_c / D) * f_{2,överf}) = 0.977946 (1.89691 * 0.0009 - ((20 / 20) * (0.663203 / 4.196) * 0.0032))$$

$$= 0.00117494$$

$$0.5 * f_1 * f_3 * f_{2,kringf} = 0.5 * 0.977946 * 1.89691 * 0.0009 = 0.000834783$$

$$0.00117494 \geq 0.000834783 \Rightarrow$$

$$M_j / (\rho_1 * D^3) = 0.00117494$$

$$M_{j,s} = 0.00117494 * 20 * 4.196^3$$

$$M_{j,s} = 1.73601 \text{ kNm/m}$$

Brottgränstillstånd:

$$M_{j,u} / (\rho_1 * D^3) = f_1 (f_3 f_{2,kringf} - (\rho_0 / \rho_1) * (h_c / D) * f_{2,överf}) \quad (4.q'')$$

$$\begin{aligned} M_{j,u} / \rho_1 * D^3 &= 0.977946 (1.89691 * 0.0009 - ((20 / 20) * (0.663203 / 4.196) * 0.0032)) \\ &= 0.00117494 \end{aligned}$$

$$M_{j,u} = 0.00117494 * 20 * 4.196^3 = 1.73601 \text{ kNm/m}$$

$$M_{j,u} = 1.73601 \text{ kNm/m}$$

4.3.3 Böjmoment av trafiklast, M_t

$$M_t = f_4 * f''_4 * f'''_4 * D * p_{trafik} \quad (4.t)$$

$$f_4 = 0.265 * (1 - 0.2 * {}^{10}\log(\lambda_f)) = 0.265 * (1 - 0.2 * {}^{10}\log(10192.9)) = 0.0525603$$

$$\lambda_f \leq 100000 \Rightarrow f''_4 = 0.12 * (1 - 0.15 * \log(10192.9))$$

$$= 0.0478507$$

$$f''_4 = (h_c/D)^{-0.75} = (0.663203 / 4.196)^{-0.75} = 3.98926$$

$$M_t = 0.0525603 * 0.0478507 * 3.98926 * 4.196 * 158.6$$

$$M_t = 6.67692 \text{ kNm/m}$$

Utmattningslast

$$M_{t,u} = 0.0525603 * 0.0478507 * 3.98926 * 4.196 * 87.2873$$

$$M_{t,u} = 3.67472 \text{ kNm/m}$$

4.3.4 Dimensionerande böjmoment

Brukgränstillstånd:

$$M_{d,s} = \Psi\gamma_{jord,s} * M_{j,s} + \Psi\gamma_{trafik,s} * M_t / 2 \quad (4.y)$$

$$\Psi\gamma_{jord,s} = 1.1$$

$$\Psi\gamma_{trafik,s} = 1$$

Lastkombination 5A tab 22-1 BRO2002

$$M_{d,s} = 1.1 * 1.73601 + 1 * 6.67692 / 2 = 5.24807 \text{ kNm/m}$$

Brottgränstillstånd:

$$M_{d,u} = \Psi\gamma_{jord,u,min} * (-M_{j,u}) + \Psi\gamma_{trafik,u} * M_t \quad (4.z)$$

$$\Psi\gamma_{jord,u,min} = 0.9$$

$$\Psi\gamma_{trafik,u} = 1.5$$

Lastkombination 4A tab 22-1 BRO2002

$$M_{d,u} = 0.9 * (-1.73601) + 1.5 * 6.67692 = 8.45297 \text{ kNm/m}$$

Utmattningsgränstillstånd, spänningsvidd:

$$\Delta M_{d,f} = \Psi\gamma_{trafik,f} * M_{t,u} * 1.5 \quad (4.w)$$

$$\Psi\gamma_{trafik,f} = 1$$

Lastkombination 6A tab 22-1 BRO94

Utmattningslast:

$$\Delta M_{d,f} = 1 * 3.67472 * 1.5 = 5.51208 \text{ kNm/m}$$

5 Dimensioneringskontroller

5.1 Kontroll av tillåten överfyllnad

$$0.6 < h_c$$

$$0.6 < 0.675 \Rightarrow \underline{\text{OK}}$$

KONTROLL 1 A

$$0.125 \cdot D < h_c$$

$$0.125 \cdot 4.196 = 0.5245$$

$$0.5245 < 0.675 \Rightarrow \underline{\text{OK}}$$

KONTROLL 1 B**5.2 Kontroll av böjmoment av trafiklast**

$$f_4 \cdot f''_4 < 1.0$$

$$0.0525603 \cdot 3.98926 = 0.209677 < 1.0 \Rightarrow \underline{\text{OK}}$$

KONTROLL 2**5.3 Kontroll av säkerhet mot begynnande flytning i rörvägg i bruksgränstillstånd**

$$\sigma = \frac{N_{d,s}}{A_{s1}} + \frac{M_{d,s}}{W_1} < f_{yd} \quad (5.a)$$

$$f_{yd} = f_y / (\gamma_{n,s,stål} \cdot \gamma_{m,s,stål}) = 280 / (1 \cdot 1) = 280 \text{ MPa}$$

$$A_{s1} = 0.00377 \text{ m}^2/\text{m}$$

$$W_1 = 4.44 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{m}$$

$$N_{d,s} = 234.915 \text{ kN/m}$$

$$M_{d,s} = 5.24807 \text{ kN/m}$$

$$\sigma = (234.915 / 0.00377) + (5.24807 / 4.44 \cdot 10^{-5}) = 180512 \text{ kPa} = 180.512 \text{ MPa}$$

$$\sigma = 180.512 < 280 \Rightarrow \underline{\text{OK}}$$

KONTROLL 3**5.4 Kontroll att flytled ej bildas i rörbrons övre del**

(BSK99 ekv 6:252a)

$$\left(\frac{N_{d,u}}{\omega f_{yd} A_{s1}} \right)^{\alpha_c} + \left(\frac{M_{d,u}}{M_u} \right) \leq 1.0 \quad (5.b)$$

$$N_{d,u} = 314.215 \text{ kN/m}$$

$$\omega = N_{cr} / A_{s1} \cdot f_{yd}$$

$$N_{cr,el} = \frac{3\xi}{\mu} \sqrt{\frac{E_{jd} \cdot (EI)_s}{R_t}} \quad (b5.b)$$

$$E_{jd} = 34.0909 \text{ MPa}$$

$$(EI)_s = 0.247086 \text{ MNm}^2/\text{m}$$

$$\kappa = h_c / R_t \quad (b5.f)$$

$$R_t = \text{toppradien} = 2.099 \text{ m}$$

Bilaga II

Dimensionering enligt Bro 2004

$$\kappa = 0.663203 / 2.099 = 0.315961$$

$$\xi = \sqrt{\kappa} = 0.562104 \leq 1.0 \Rightarrow \xi = 0.562104 \quad \text{(b5.e)}$$

$$\frac{E_{j,red}}{E_j} = \eta_j = 1 - \left(\frac{1}{1 + \kappa} \right)^2 \quad \text{(b5.c)}$$

$$\eta_j = 1 - (1 / (1 + 0.315961))^2 = 0.422551$$

$$\mu = \left(1.22 + 1.95 \left(\frac{(EI)_s}{\eta_j * E_{jd} * R_t^3} \right)^{0.25} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{\eta_j}} \quad \text{(b5.d)}$$

$$\mu = (1.22 + 1.95 (0.247086 / 0.422551 * 34.0909 * 2.099^3)^{0.25})^2 * (1 / \sqrt{0.422551}) = 4.06064$$

$$N_{cr,el} = (3 * 0.562104 / 4.06064) * \sqrt{(34.0909 * 0.247086 / 2.099)} = 831.919 \text{ kN/m}$$

Villkor

$$\text{Om } N_{cr,el} / N_u \leq 0.5; \quad N_{cr} = N_{cr,el}$$

$$\omega = N_{cr} / N_u \quad \text{(b5.g)}$$

$$\text{Om } N_{cr,el} / N_u > 0.5; \quad N_{cr} = N_u * \omega$$

$$\omega = \left(1 - \frac{1}{4} \frac{N_u}{N_{cr,el}} \right) \quad \text{(b5.h)}$$

$$f_{yd} = f_{ud} / (\gamma_{n,u,stål} * \gamma_{m,u,stål}) = 280 / (1.1 * 1) = 254.545$$

$$N_u = f_{yd} * A = 254.545 * 0.00377 = 959.636 \text{ kN/m}$$

$$N_{cr,el} / N_u = 831.919 / 959.636 = 0.866911 > 0.5 \Rightarrow$$

$$\omega = (1 - ((1/4) * (N_u / N_{cr,el}))) = (1 - ((1/4) * (959.636 / 831.919))) = 0.71162$$

$$N_{cr} = 0.71162 * 959.636 = 682.896 \text{ kN/m}$$

$$\alpha_c = \eta^2 * \omega \geq 0.8$$

$$\eta = Z / W = 1.35 \quad Z = \text{plastiska böjmotståndet}$$

$$\alpha_c = 1.35^2 * 0.71162 = 1.29693 \geq 0.8$$

$$\alpha_c = 1.29693$$

$$M_u = 1.35 * W * f_{yd} = 1.35 * 4.44e-005 * 254.545 = 15.2575 \text{ kNm/m}$$

$$(N_{d,u} / (\omega * f_{yd} * A_{S1}))^{\alpha_c} + (M_{d,u} / M_u) =$$

Bilaga II

Dimensionering enligt Bro 2004

$$= (314.215 / (0.71162 * 959.636))^{1.29693} + (8.45297 / 15.2575)$$

$$= 0.919424 \leq 1.0 \quad \Rightarrow \text{OK} \quad \text{KONTROLL 4}$$

5.5 Kontroll att tillräcklig kapacitet finns i rörbrons nedre del

$$N_{d,u} < f_{yd} * A_{s2} \quad (5.d)$$

$$N_{d,u} = 314.215 \text{ kN/m}$$

$$f_{yd} = f_{ud} / (\gamma_{n,u, \text{stål}} * \gamma_{m,u, \text{stål}}) = 280 / (1.1 * 1) = 254.545$$

$$A_{s2} = 0.00377 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

$$f_{yd} * A_{s2} = 254.545 * 3.77 = 959.636$$

$$N_{d,u} < f_{yd} * A_{s2} = 314.215 < 959.636 \quad \Rightarrow \text{OK} \quad \text{KONTROLL 5}$$

5.6 Kontroll att säkerhet mot överskridande av skruvförbandens kapacitet (BSK99 6.4)

$$N_{d,u} < \min(n * F_{Rvd}; n * F_{Rbd}) \quad (5.e)$$

$$F_{Rvd} = 0.6 * A_1 * f_{bud} \quad (\text{BSK99 ekv. 6:432:a})$$

$$\Rightarrow \text{Skruv M20, hållfasthetsklass 8.8} \Rightarrow f_{buk} = 800 \text{ Mpa}$$

$$\Rightarrow A_1 = \pi d^2 / 4 = \pi * 0.0176^2 / 4 = 0.000243162 \text{ m}^2$$

$$f_{bud} = f_{buk} / (\gamma_{m,u, \text{bult}} * \gamma_{n,u, \text{stål}}) = 800 / (1.2 * 1.1) = 606.061 \text{ MPa}$$

$$F_{Rvd} = 0.6 * 0.000243162 * 606.061 = 88.4224 \text{ kN}$$

$$N_{d,u} = 314.215 \text{ kN/m} \quad \text{KONTROLL 6A}$$

$$n^{eff} = 314.215 / 88.4224 = 3.55357 \quad \Rightarrow \text{OK } n^{verklig} = 13 \text{ st utmed ena kortsidan}$$

$$F_{Rbd} = 1.2 * (e_1/d - 0.5) * d_s * t * f_{ud} \quad (\text{BSK99 ekv. 6:432:b})$$

$$f_{ud} = f_{uk} / (1.2 * \gamma_{n,u, \text{stål}} * \gamma_{m,u, \text{stål}}) = 350 / (1.2 * 1.1 * 1) = 265.152 \text{ MPa}$$

$$d = 0.0176 \text{ m}$$

$$d_s = d \Rightarrow \text{anliggning mot skruvstam}$$

$$t = 0.003 \text{ m}$$

$$e_1 = 0.04 \text{ m (hålcentrum till fri kant)}$$

$$F_{Rbd} = 1.2 * ((0.04 / 0.0176) - 0.5) * 0.0176 * 0.003 * 265.152 = 29.7818 \text{ kN}$$

$$n^{eff} = 314.215 / 29.7818 = 10.5506 \quad \Rightarrow \text{OK } n^{verklig} = 13 \text{ st utmed ena kortsidan}$$

KONTROLL 6B**Kontroll av momentkapacitet i plåtskarv**

$$a * n(1/2) * F_{Rtd} \geq W * f_{yd}$$

$$a = 0.1 \text{ mm}$$

Bilaga II

Dimensionering enligt Bro 2004

n = 13 st

$$F_{Rtd} = \varphi_t * A_s * f_{bud} \quad (\text{BSK99 ekv. 6:431})$$

 $\varphi_t = 0.6$ (normalt åtdragen skruv)

$$F_{Rtd} = 0.6 * 0.000243162 * 606.061 = 88.4224 \text{ kN}$$

$$W = 4.44e-005 \text{ m}^3/\text{m}$$

$$f_{yd} = f_{ud} / (\gamma_{n,u,stål} * \gamma_{m,u,stål}) = 280 / (1.1 * 1) = 254.545 \text{ MPa} = 254545 \text{ kPa}$$

$$n^{erf} \geq (4.44e-005 * 254545) / (88.4224 * 0.1 * (1/2)) = 2.55632 \Rightarrow \underline{\text{OK}} n^{\text{verklig}} = 13 \text{ st}$$

utmed ena kortsidan

KONTROLL**6C****5.7 Kontroll av styvhet vid montering etc.**

$$\eta_m / (m / kN) = \frac{D^2}{EI_s} = \frac{\lambda_f}{E_j D}$$

$$= 4.196^2 / 247.086 = 0.0712562 < 0.2 \Rightarrow \underline{\text{OK}}$$

KONTROLL 7**5.8 Kontroll av utmattning**

Dimensioneringsvillkoret med hänsyn till utmattning är

$$\sigma_{rd} \leq f_{rd}$$

där σ_{rd} är spänningsvidden är beräknad enligt elasticitetsteorin.

$$\sigma_{rd} = \frac{\Delta N_{d,f}}{A_{s1}} + \frac{\Delta M_{d,u}}{W_1} \leq f_{rd}$$

$$\Delta N_{d,f} = 87.2873 \text{ kN/m}$$

$$\Delta M_{d,f} = 5.51208 \text{ kNm/m}$$

$$\sigma_{rd} = (87.2873 / 0.00377) + (5.51208 / 0.0444) = 23277.3 \text{ kPa} = 23.2773 \text{ MPa}$$

 f_{rd} beräknas enligt BSK 99, 6:523

$$f_{rk} = C \left(\frac{2 * 10^6}{n_t} \right)^{1/3}$$

$$n_t = 4 * 10^5$$

$$C = 80 \text{ (Enligt BSK 99 bilaga 3)}$$

$$f_{rk} = 80 * ((2 * 10^6) / (4 * 10^5))^{1/3}$$

$$f_{rk} = 136.798 \text{ MPa}$$

$$f_{rd} = (\varphi_m * f_{rk}) / (1.1 * \gamma_{n,f}) = (1 * 136.798) / (1.1 * 1.1) = 113.056 \text{ MPa}$$

$23.2773 \leq 113.056 \Rightarrow \text{OK}$ **KONTROLL 8****6 Beteckningar***Latinska gemener*

d = diameter på skruv (m)

e = portal

f_1, f_2, f_3 = funktionsuttryck som i förenklande syfte används i framställningen

h = avstånd från toppen till botten av trumman (m)

h_c = överfyllnadshöjd (m)

$h_{c,red}$ = beräkningsmässigt reducerat värde på överfyllnadshöjden (m) med hänsyn till att rörets hjässa höjs i samband med återfyllning.

n = antal

p_{trafik} = ekvivalent trafiklast (linjelast) (kN/m)

q = fördelat tryck från trafik (kN/m²)

t = plåttjocklek (mm)

Latinska versaler

A = tvärsnittsarean (mm²/m)

D = diameter eller spännvid (m)

E_k = sekantmodul för jordmaterial i kringfyllnad (MPa)

$(EI)_s$ = rörväggens böjstyvhets (MNm²/m)

F_{Rvd} = dimensioneringsvärde för skruvarnas kapacitet vid skjuvning vid brott i skruv (kN)

F_{Rbd} = dimensioneringsvärde för skruvarnas kapacitet vid skjuvning vid brott i plåt (kN)

F_{Rtd} = dimensioneringsvärde för skruvarnas kapacitet vid dragning (kN)

H = vertikalt avstånd mellan rörets hjässa och den höjd på vilken rörbro har sin största bredd, spännvidd. (m)

I = tröghetsmoment för röret per längdenhet (mm⁴/mm)

M_d, M_j, M_t = dimensionerande moment, moment av jordlast respektive moment av trafiklast (kNm/m)

M_u = moment vid fullständigt plasticerat tvärsnitt (kNm/m)

N_j, N_d, N_t = dimensionerade normalkraft, normalkraft av jordlast respektive normalkraft av trafiklast (kN/m)

$N_{cr,el}$ = knäckningslast för rörkonstruktion i jord vid ideella förhållande (kN/m)

N_{cr} = knäckningslast för rörkonstruktion i jord (kN/m)

Bilaga II

Dimensionering enligt Bro 2004

R_t = toppradie (m)

S_{ar} = reduktionsfaktor för överlast

S_v = beräkningsparameter

W = Motståndsmoment (mm^3/mm)

Grekiska gemener

α_c = beräkningsparameter enligt BSK 99

$\delta_{hj\ddot{a}ssa}$ = höjning av rörets hjässa under kringfyllnadsarbete

φ = friktionsvinkel

φ_t = normalt åtdragen skruv

γ_n = partialkoefficient för säkerhetsklass

η_j = beräkningsparameter

η = beräkningsparameter

$\eta = Z / W$

η_m = styvhetsparameter används i samband med bedömningen av monteringsstyvhets

κ = beräkningsparameter

ρ_0 = medelvärde för tunghet för jordmaterial över hjässans nivå, överfyllning (kN/m^3)

ρ_1 = tunghet för jordmaterial upp till hjässans nivå, kringfyllning. (kN/m^3)

λ_r = styvhetsparameter som anger förhållandet mellan rörets och omgivande jords respektive styvheter, flexibilitetstal. (dimensionslös).

μ = beräkningsparameter

ξ = beräkningsparameter

σ = spänning

ψ = tidsreduktionsvärde, se BKR 94

ω = knäckningskraft/kraft vid plasticering, se BSK 99

Dimensionering enligt BV Bro, utgåva 8

Innehållsförteckning

1. Förutsättningar, handlingar

2. Förutsättningar, geoteknik

2.1 Överfyllning

2.2 Kringfyllning

2.3 Grundläggning

3. Dimensionering

3.1 Data röbro

3.1.1 Plåtkoefficienter

3.1.2 Tvärsnittsmått

3.1.3 Sammanfogning

3.1.4 Profilvariabler

3.1.5 Tvärsnittsdata röbro

3.2 Belastning

3.3 Säkerhetsklass

3.3.1 Säkerhetsklass röbro

3.3.2 Säkerhetsklass geoteknik

4. Snittkrafter

4.1 Bestämning av effektiv överfyllnadstjocklek

4.2 Bestämning av normalkraft

4.2.1 Normalkraft av jordlast

4.2.2 Beräkning av ekvivalent linjelast och normalkraft av trafiklast

4.2.2.1 Reduktion med hänsyn till slipernas lastutbredning av den ekvivalenta linjelasten vid små överfyllnadshöjder

4.2.2.2 Dynamiskt tillskott

4.2.2.3 Tåglasterna

4.2.2.3.1 Tåglast BV 2000

4.2.2.3.2 Tåglast Malm 2000

4.2.2.4 Sammanställning av σ_v och beräkning av linjelast och normalkraft

4.2.2.5 Sammanställning linjelast och normalkraft

4.2.3 Dimensionerande normalkraft

4.3 Bestämning av dimensionerande böjmoment

4.3.1 Böjmoment av jordlast

4.3.2 Böjmoment av trafiklast

4.3.3 Dimensionerande böjmoment

5. Dimensioneringskontroller

5.1 Allmänna kontroller

5.1.1 Kontroll av tillåten överfyllnad

5.1.2 Kontroll av böjmoment av trafiklast

5.2 Beräkningsmässiga analyser i bruksgränstillstånd

5.2.1 Säkerhet mot begynnande flytning i bruksgränstillstånd

5.3 Beräkningsmässig verifiering av rörväggens bärförmåga i brottgränstillstånd

5.3.1 Kontroll att flytled ej bildas i rörbrons övre del

5.3.1b Kontroll av kapacitet med avseende på uppträdande maximal normalkraft

5.3.2 Kontroll av att tillräcklig kapacitet finns i rörbrons nedre del

5.3.2b Kontroll av att tillräcklig kapacitet finns i rörbrons nedre hörndel

5.3.3 Kontroll mot överskridande av skruvförbandens kapacitet

5.3.3.1 Kontroll av att skruvarnas kapacitet är tillräcklig mot skjuvbrott i skruven

5.3.3.2 Kontroll av att skruvarnas kapacitet är tillräcklig mot hålkantbrott i plåten

5.3.3.3 Kontroll av momentkapacitet i plåtskarv

5.3.3.4 Kontroll mot överskridande av skruvförbandens kapacitet vid kombinerad dragning och skjuvning

5.4 Beräkningsmässig verifiering av rörväggens bärförmåga i utmattningsgränstillstånd

5.4.1 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid ren dragning i utmattningsgränstillstånd

5.4.2 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid ren skjuvning i utmattningsgränstillstånd

5.4.3 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid kombinerad dragning och skjuvning i utmattningsgränstillstånd

5.4.4 Kontroll av utmattning i plåten

5.5 Övrig beräkningsmässig verifiering

5.5.1 Kontroll av styvhet vid montering

6. Sammanställning kontroller

7. Beteckningar

1. Förutsättningar, handlingar

Övergripande handlingar:

Dimensionering av rörbroar, Lars Pettersson och Håkan Sundquist, Brobyggnad 2000, utgåva 2
Bro 2004, VV publikation 2004:56, Samhälle och trafik, Teknik, sektion Bro- och tunneltrafik, ISSN 1401-9612
Boverkets handbok om stålkonstruktioner, BSK 99, Boverket Byggavdelningen, ISSN 1400-1012, Upplaga 3:3
Supplement nr 1, VV Publ. 2006:25
BV Bro, utgåva 8, Banverkets ändringar och tillägg till Vägverkets Bro 2004 inklusive supplement 1

2. Förutsättningar, geoteknik

Indata för beräkning

2.1 Överfyllning

Jordtyp

Förstärkningslager

Friktionsvinkel (grader)

$$\phi_{k_öf} := 38\text{deg}_*$$

Tunghet över grundvattenytan (kN/m^3)

$$\rho_{öf} := 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}_*$$

Tunghet under grundvattenytan (kN/m^3)

$$\rho_{w_öf} := 13 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}_*$$

Överfyllnadshöjd (m)

$$h_c := 1.80\text{m}_*$$

2.2 Kringfyllning

Jordtyp

Förstärkningslager

Friktionsvinkel (grader)

$$\phi_{k_kf} := 38\text{deg}_*$$

Tunghet över grundvattenytan (kN/m^3)

$$\rho_{kf} := 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}_*$$

Tunghet under grundvattenytan (kN/m^3)

$$\rho_{w_kf} := 13 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}_*$$

Tangentmodul (MPa)

$$E_j := 38.6\text{MPa}_*$$

2.3 Grundläggning

Jord på grundläggningsnivån

Röribädd

3. Dimensionering

3.1 Data rörbro

3.1.1 Plåtkoefficienter

Plåtkvalitet, sträckgränsvärde (MPa):	$f_{yk} := 275 \text{MPa}_*$
Brottgränsvärde (MPa)	$f_{uk} := 410 \text{MPa}_*$
Elasticitetsmodul (GPa)	$E_k := 210 \text{GPa}_*$

3.1.2 Tvärsnittsmått

Höjd (m)	$h := 2.678 \text{m}_*$
Diameter (m)	$D := 4.196 \text{m}_*$
Valvhöjd (m)	$H_w := 2.03 \text{m}_*$
Toppradie (m)	$R_t := 2.099 \text{m}_*$
Sidoradie (m)	$R_s := 2.099 \text{m}_*$
Bottenradie (m)	$R_b := 7.73 \text{m}_*$
Hörnradie (m)	$R_c := 0.49 \text{m}_*$

Vid lågbyggd profil gäller $R_t = R_s$

Vid cirkulär profil gäller $R_t = R_s = R_c = R_b$

$$\frac{R_t}{R_c} = 4.284 \quad \frac{R_b}{R_c} = 15.776$$

3.1.3 Sammanfogning

Antal skruvar per meter	$n := 10 \cdot \frac{1}{\text{m}} *$
Antal rader vilket skruvarna monteras i	$k := 2 *$
Hållfasthet för skruv (MPa)	$f_{buk} := 800 \text{MPa}_*$

Bults spänningsarea A_s

Antaganden från skrift *Bultens teknikhandbok*.

d_1 basmått för utvändig gängas innerdiameter (mm)	$d_1 := 17.294 \text{mm}$
d_2 basmått för utvändig gängas medeldiameter (mm)	$d_2 := 18.376 \text{mm}$
d_3 utvändig gängas innerdiameter (mm)	

$$d_3 = d_1 - \frac{H_g}{6}$$

H_g gängans grundtriangelhöjd (mm)

$$H_g := 0.86603 \text{mm} \cdot P$$

P delning

$$P = 2.5$$

$$d_3 := d_1 - \frac{H_g}{6}$$

$$d_3 = 16.933 \text{mm}$$

$$A_s := \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2$$

$$A_s = 244.796 \text{mm}^2$$

Beräknade värdet för skruvs diameter (används både för beräkning av nominellarean och spänningsarean då detta värde ger resultat på säkra sidan).

$$d_s := \frac{d_2 + d_3}{2}$$

$$d_s = 17.655 \text{ mm}$$

$$\frac{d_2 + d_3}{2} = 17.655 \text{ mm}$$

Vid anliggning mot skruvstam $d_s = d_i$ (m)

$$d_s = 17.655 \text{ mm}$$

Vid anliggning mot gänga $d = \sqrt[4]{4 \cdot \frac{A_s}{\pi}}$ *

(BSK 99 6:432)

Skarvning (m)

$$a_{\text{skarv}} := 0.085 m_*$$

Hålcentrum till fri kant (om $e_1 > 3d$ sätts

$e_1 = 3d$) (m)

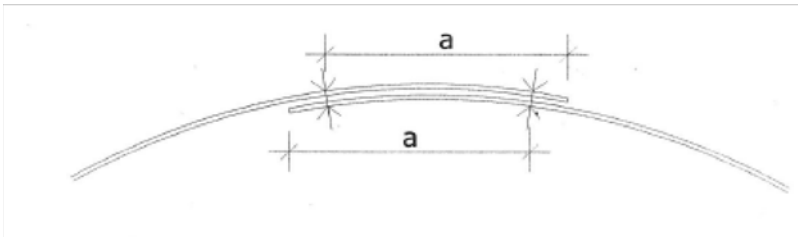
$$e_1 := 0.035 m_*$$

(BSK 99 6:432)

Reduktionsfaktor för normalt åtdragen skruv

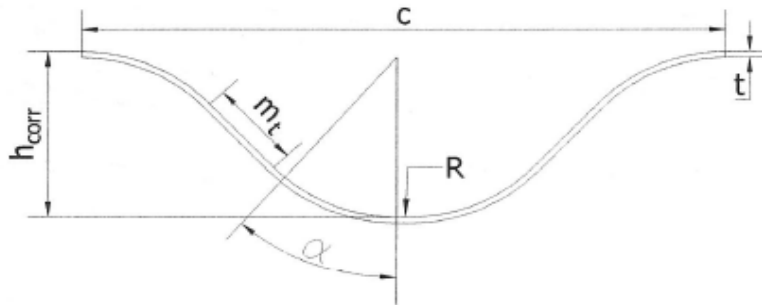
$$\phi_t := 0.6_*$$

(BSK 99 6:431)



3.1.4 Profilvariabler

Plåttjocklek (mm) (2 mm rostån borttaget)	$t_{\text{plåt}} \equiv 5\text{mm}_*$	
Korrugering (mm)	200 x 55	
Profilhöjd (mm)	$h_{\text{corr}} := 55\text{mm}_*$	
Hel våglängd (mm)	$c := 200\text{mm}_*$	
Krökningsradie (mm)	$R := 53\text{mm}_*$	
Antal spänningscykler under konstruktionens antagna användningstid	$n_t := 10^5$ *	ådt < 10000 (BSK 99 6:523a)
Förbandsklass (MPa)	$C_a := 45\text{MPa}_*$	(BSK 99 tabell B3:2, handboken sid 29)
Förbandsklass, för kontroll av utmattning i plåt (MPa)	$C_{a2} := 100\text{MPa}_*$	

*

3.1.6 Tvärsnittsdata rörbro



Övre del

Plåttjocklek

$$t_{\text{plåt}} = 5 \text{ mm}^*$$

Böjmotstånd

$$W = 73.779 \frac{\text{mm}^3}{\text{mm}}^*$$

Tröghetsmoment

$$I = 2213.359 \frac{\text{mm}^4}{\text{mm}}^*$$

Area (tvärsnitt)

$$A = 5.915 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}^*$$

Nedre del

Plåttjocklek

$$t_{\text{plåt}} = 5 \text{ mm}^*$$

Böjmotstånd

$$W = 73.779 \frac{\text{mm}^3}{\text{mm}}^*$$

Tröghetsmoment

$$I = 2213.359 \frac{\text{mm}^4}{\text{mm}}^*$$

Area (tvärsnitt)

$$A = 5.915 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}^*$$

3.2 Belastning

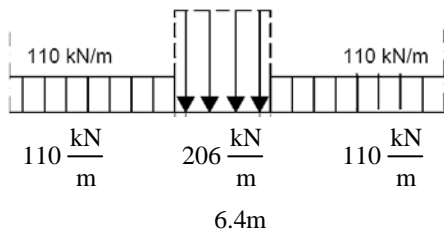
BV 21.22 Trafiklast

Inverkan av tåg ska beräknas utgående från tåglaster benämnda tåglast BV 2000 och tåglast Malm 2000, vilket bron ska beräknas för. Banverket anger i varje enskilt fall om bro ska beräknas för tåglast BV 2000 eller tåglast Malm 2000. Bro med två spår ska beräknas för tåglast BV 2000/Malm 2000 för båda spåren. För bro med fler än ett spår och ballast ska spåravståndet antas vara 4,50 m.

Tåglast BV 2000

Tåglastens inverkan i vertikal led:

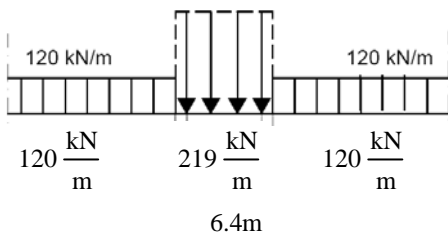
Tåglasten antas generellt enligt BV Bro till ett antal axellaster och en jämnt fördelad last. Denna beräkningsrutin ersätter dessa axellaster med en jämnt fördelad last av 206 kN/m enligt BV 21.2211 2:a stycket. För bärverk med direkt slipersuppläggning och spännvidd mer än 5 m eller vid bro med minst 0,6 m ballast får axellasterna ersättas med en jämnt fördelad last av 206 kN/m vid beräkning av brons huvudbärverk.



Tåglast BV Malm

Tåglastens inverkan i vertikal led:

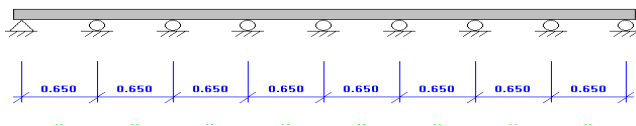
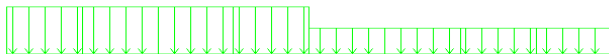
Tåglasten antas generellt enligt BV Bro till ett antal axellaster och en jämnt fördelad last. Denna beräkningsrutin ersätter dessa axellaster med en jämnt fördelad last av 219 kN/m enligt BV 21.2211 2:a stycket. För bärverk med direkt slipersuppläggning och spännvidd mer än 5 m eller vid bro med minst 0,6 m ballast får axellasterna ersättas med en jämnt fördelad last av 206 kN/m vid beräkning av brons huvudbärverk.



Dessa jämnt fördelade laster fördelar sig sedan på sliperserna, vilket symboliseras genom punktlaster i slipersens mittpunkt som vars storlekar har tagits fram genom balkanalys då en balk har symboliserat rälen och stöden slipersen. Punktlaster reduceras sedan med hjälp av reduktionsfaktorn R_f så att det simulerade värdet för varje punktlast minskas, då dessa i verkligheten inte utgörs av punktlaster utan utbredda laster. (Måttet för den utbredda lasten är då måttet för slipersen dvs 0,4 x 2,25m)

Resultatet av balkanalysen av ovanstående laster gav värden på stödreaktioner, de största för varje fall har används till beräkning. (q = 110kN/m gav P = 88kN; q = 206kN/m gav P = 164 kN; q = 120kN/m gav P = 96kN & q = 219kN gav P = 174kN)

Fria laster



Tåglast BV 2000:

$$P1 := 88\text{kN} \quad P2 := 164\text{kN} \quad P3 := 88\text{kN}$$

Tåglast Malm 2000:

$$P1_M := 96\text{kN} \quad P2_M := 174\text{kN} \quad P3_M := 96\text{kN}$$

3.3 Säkerhetsklass

3.3.1 Säkerhetsklass rörbro

BV Bro, utgåva 8, Tabell BV 22-1 Lastkoefficienter $\psi\gamma$ för respektive lastkombination

Säkerhetsklass	SK2		
<u>Lastkoefficienter</u>	Lastkombination V:A Bruksgränstillstånd	Lastkombination IV:A Brottgränstillstånd	Lastkombination VI Utmattningsgränstillstånd
Trafik	$\Psi_{\gamma_{\text{trafik}_s}} := \begin{pmatrix} 1.0 \\ 1.0 \end{pmatrix}^*$	$\Psi_{\gamma_{\text{trafik}_u}} := \begin{pmatrix} 0.7 \\ 1.4 \end{pmatrix}^*$	$\Psi_{\gamma_{\text{trafik}_f}} := 1.0^*$
Jord Egentyngd	$\Psi_{\gamma_{\text{jord}_s}} := \begin{pmatrix} 1.1 \\ 0.9 \end{pmatrix}^*$	$\Psi_{\gamma_{\text{jord}_u}} := \begin{pmatrix} 1.1 \\ 0.9 \end{pmatrix}^*$	$\Psi_{\gamma_{\text{jord}_f_{\text{min}}}} := 1.0^*$
<u>Partialkoefficienter</u>			
Säkerhet	$\gamma_{n_{\text{stål}_s}} := 1.0^*$	$\gamma_{n_{\text{stål}_u}} := 1.1^*$	$\gamma_{n_f} := 1.1^*$
Stål	$\gamma_{m_{\text{stål}_s}} := 1.0^*$	$\gamma_{m_{\text{stål}_u}} := 1.0^*$	
Bult		$\gamma_{m_{\text{bult}_u}} := 1.2^*$	$\gamma_{m_{\text{bult}_f}} := 1.1^*$

3.3.2 Säkerhetsklass geoteknik

Geoteknik

Säkerhet	$\gamma_{n_{\text{geo}}} := 1.1^*$
Kringfyllnad	$\gamma_{m_{\text{krf}}} := 1.15^*$
Överfyllnad	$\gamma_{m_{\text{öf}}} := 1.15^*$
Tangentmodul	$\gamma_{mE} := 1.6^*$

4. Snittkrafter

4.1 Bestämning av effektiv överfyllnadstjocklek, $h_{c\text{-red}}$

Handboken sid 15, 33

Beräkning av höjning av rörets hjässa under återfyllnadsarbetet, som vid återfyllning kan komma att höjas på grund av trycket som uppstår mot rörets sidor.

Effektiv överfyllnadstjocklek benämns $h_{c\text{-red}} = h_c \cdot \delta_{hj}$

$$E_j = 38.6 \text{ MPa}^* \quad D = 4.196 \text{ m} \quad * \quad E_k = 210000 \text{ MPa} \quad I = 2.213 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^4}{\text{m}} \quad \rho_{kf} = 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}^* \quad H = 2.03 \text{ m} \quad *$$

$$E_{jd} := \frac{E_j}{\gamma_{n_{\text{geo}}} \cdot \gamma_{mE}} \quad *$$

$$E_{jd} = 21.9 \text{ MPa}^*$$

Flexibilitetstal λ_f

$$\lambda_f := \left(\frac{E_{jd} \cdot D^3}{E_k \cdot I} \right)^* \quad (4.p)$$

$$\lambda_f = 3485.9 \quad *$$

Ekvation (b1.b) nedan, gäller endast för slutna profiler, profiler där rörets sidoplåtar samtidigt kan tryckas samman när hjässan reser sig.

$$\delta_{hj\ddot{a}ssa} := D \cdot \left[0.013 \cdot \frac{\rho_{kf}}{E_j} \cdot D \cdot \left(\frac{H}{D} \right)^{2.8} \cdot \lambda_f^{0.56-0.2 \ln \left(\frac{H}{D} \right)} \right]^* \quad (b1.b)$$

$$\delta_{hj\ddot{a}ssa} = 0.005 \text{ m} \quad *$$

$$h_{c_red} := h_c - \delta_{hj\ddot{a}ssa} \quad (b1.a;4.a)$$

$$h_{c_red} = 1.795 \text{ m} \quad *$$

4.2 Bestämning av normalkraft**4.2.1 Normalkraft av jordlast, N_j**

Handboken sid 15 ff.

$$H = 2.03 \text{ m} \quad D = 4.196 \text{ m} \quad \rho_{kf} = 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad \rho_{\ddot{o}f} = 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$N_j = 0.2 \cdot \frac{H}{D} \cdot \rho_{kf} \cdot D^2 + S_{ar} \cdot \left(0.9 \cdot \frac{h_{c_red}}{D} - 0.5 \cdot \frac{h_{c_red}}{D} \cdot \frac{H}{D} \right) \cdot \rho_{\ddot{o}f} \cdot D^2 \quad (4.c)$$

$$\phi_{d_\ddot{o}f} := \text{atan} \left(\frac{\tan(\phi_{k_d_o})}{\gamma_{n_geo} \cdot \gamma_{m_d_o}} \right)^* \quad (4.d)$$

$$\phi_{d_o} = 0.553 \quad *$$

$$S_v := \frac{0.8}{\left(\sqrt{1 + \tan(\phi_{d_o})^2} + 0.45 \cdot \tan(\phi_{d_o}) \right)^2} \quad (4.e)$$

$$S_v = 0.379 \quad *$$

S_{ar} tar hänsyn till valvverkan i jorden över rörbron vid stora överfyllnadshöjder. Nedanstående ekvation gäller då rörbron förläggs i schakt i naturlig jord eller berg.

$$\kappa := 2 \cdot S_v \cdot \frac{h_c}{D} \quad (4.f)$$

$$\kappa = 0.325 \quad *$$

$$S_{ar} := \frac{1 - e^{-\kappa}}{\kappa} \quad (4.g)$$

$$S_{ar} = 0.854 \quad *$$

$$N_j := 0.2 \cdot \frac{H}{D} \cdot \rho_{kf} \cdot D^2 + S_{ar} \cdot \left(0.9 \cdot \frac{h_{c_red}}{D} - 0.5 \cdot \frac{h_{c_red}}{D} \cdot \frac{H}{D} \right) \cdot \rho_{\ddot{o}f} \cdot D^2 \quad (4.c)$$

$$N_j = 118.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad *$$

4.2.2 Beräkning av ekvivalent linjelast, p_{trafik} och normalkraft av trafiklast, N_t

Handboken sid 19 ff.

4.2.2.1 Reduktion med hänsyn till slipernas lastutbredning av den ekvivalenta linjelasten vid små överfyllnadshöjder, reduktionsfaktorn R_r

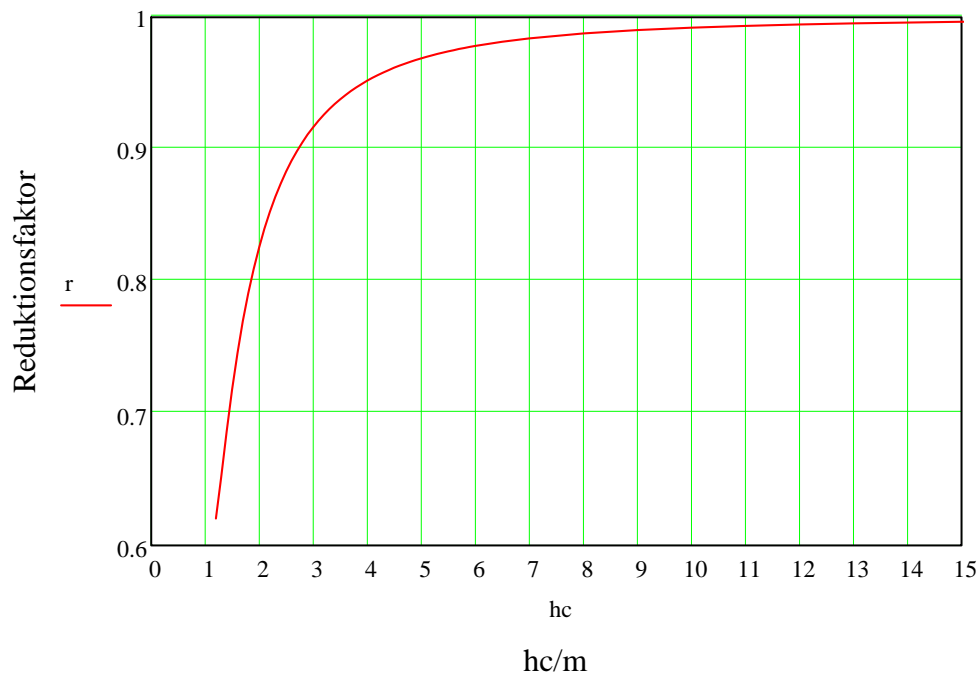
Handboken sid 45

hc :=

	0
0	1.2
1	1.3
2	1.4
3	1.5
4	1.6

r :=

	0
0	0.62
1	0.652
2	0.686
3	0.718
4	0.746



$$r(h_1) := \text{interp}(hc, r, h_1) *$$

$$\frac{h_{c_red}}{m} = 1.795 *$$

$$r\left(\frac{h_{c_red}}{m}\right) = 0.79 *$$

$$R_f := r\left(\frac{h_{c_red}}{m}\right) *$$

$$R_f = 0.79$$

4.2.2.2 Dynamiskt tillskott

BV 21.2216 a

$$L_{best} := 2 \cdot \frac{D}{m}$$

$$\varepsilon_1 := 1.0 + \frac{4}{8 + L_{best}}$$

$$\varepsilon_1 = 1.244$$

$$\Delta d := \begin{cases} \Delta d \leftarrow 0.1 \cdot \left(\frac{h_c}{m} - 1.2\right) & \text{if } \frac{h_c}{m} > 1.2 \\ \Delta d \leftarrow 0 & \text{otherwise} \end{cases} *$$

$$\varepsilon := \varepsilon_1 - \Delta d$$

$$\varepsilon = 1.184$$

4.2.2.3 Tåglasterna

Beräkning av lastspridning enligt Boussinesq, sid 41 ff. i handboken, samt linjelast och normalkraft enligt modell sid 42 i handboken

För att hitta det största vertikala trycket (σ_v) i jorden under punktlaster (hjullasterna) används ekvationen

$$\sigma_v = \frac{P \cdot 3}{2\pi} \cdot h_c^3 \cdot \left(\sum_i \frac{1}{s_i^5} \right) *$$
 enligt handboken bilaga 4. Genom att kombinera hjultrycken och låta dessa variera över

vägbanan med ett betämt intervall hittas det största vertikala trycket för varje lastfall för sig.

Med reduktionsfaktorn, R_f , reducerar sedan resultatet för σ_v så att det simulerade värdet för hjultrycken minskar då dessa i verkligheten inte utgörs av punktlaster utan utbredda hjullaster.

4.2.2.3.1 Tåglast BV 2000

$$P_1 = 88 \text{ kN} \quad P_2 = 164 \text{ kN} \quad P_3 = 88 \text{ kN} \quad h_c = 1.8 \text{ m} \quad D = 4.196 \text{ m} \quad t := 0.1 \text{ m}$$

$$\sigma = \varepsilon \cdot \left(P_1 \cdot \frac{3}{2\pi} \right) \cdot h_c^3 \cdot \sum_{i=0}^{11} \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_c^2} \right]^5} + \varepsilon \cdot \left(P_2 \cdot \frac{3}{2\pi} \right) \cdot h_c^3 \cdot \sum_{i=12}^{27} \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_c^2} \right]^5} + \varepsilon \cdot \left(P_3 \cdot \frac{3}{2\pi} \right) \cdot h_c^3 \cdot \sum_{i=28}^{31} \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_c^2} \right]^5}$$



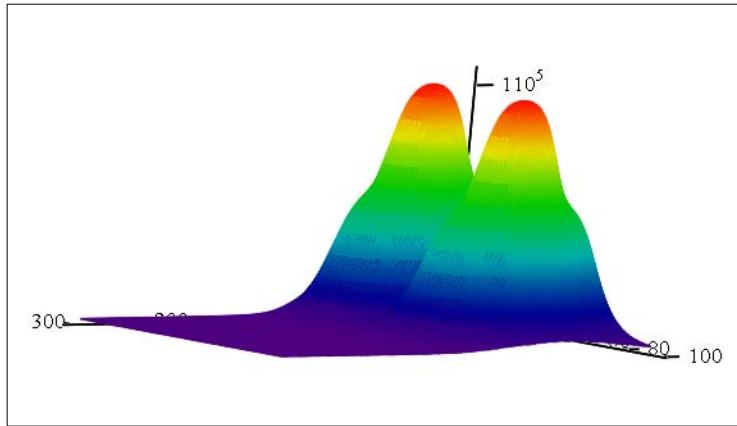
$$\max \sigma_v = \begin{pmatrix} 6.5 \\ 6.6 \\ 1.053 \times 10^5 \end{pmatrix} \text{ Pa}$$

Tabell BV 21.2216a Bestämmande längd L_{best}
Fall 11 gäller rörbroar, *dubbla spännvidden*



$$\max(\max\sigma_{\nu}\text{Matrix}) = 105.33 \text{ kPa}$$

$$R_f(\max(\max\sigma_{\nu}\text{Matrix})) = 83.187 \text{ kPa}$$



$\max\sigma_{\nu}\text{Matrix}$

4.2.2.3.2 Tåglast Malm 2000

$$P1_M = 96 \text{ kN} \quad P2_M = 174 \text{ kN} \quad P3_M = 96 \text{ kN} \quad h_c = 1.8 \text{ m} \quad D = 4.196 \text{ m} \quad t_c = 0.1 \text{ m}$$

$$\sigma = \varepsilon \cdot \left(P1_M \cdot \frac{3}{2 \cdot \pi} \right) \cdot h_c^3 \cdot \sum_{i=0}^{11} \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_c^2} \right]^5} + \varepsilon \cdot \left(P2_M \cdot \frac{3}{2 \cdot \pi} \right) \cdot h_c^3 \cdot \sum_{i=12}^{27} \frac{1}{\left[\sqrt{(a_i)^2 + (b_i)^2 + h_c^2} \right]^5} + \varepsilon \cdot \left(P3_M \cdot \frac{3}{2 \cdot \pi} \right)$$

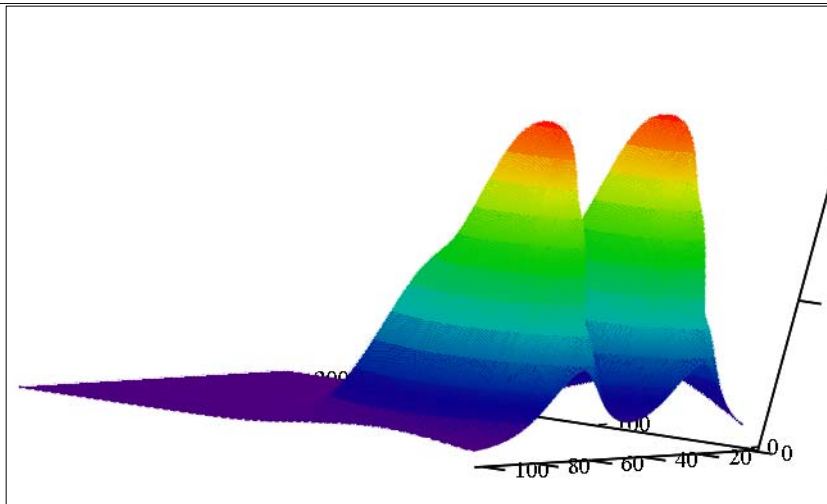


$$\max\sigma_{\nu M} = \begin{pmatrix} 6.500 \\ 6.600 \\ 111683.578 \end{pmatrix} \text{ Pa}$$



$$\max(\max\sigma_{\nu M}\text{Matrix}) = 111.684 \text{ kPa}$$

$$R_f(\max(\max\sigma_{\nu M}\text{Matrix})) = 88.205 \text{ kPa}$$



$\max\sigma_{vMMatrix}$

4.2.2.4 Sammanställning av σ_v och beräkning av linjelast $p_{\text{tågtrafik}}$ och normalkraft N_t

Tåglast BV 2000

$$R_f(\max(\max\sigma_{vMMatrix})) = 83.187 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{v_BV} := R_f(\max(\max\sigma_{vMMatrix}))$$

$$\sigma_{v_BV} = 83.187 \text{ kPa}$$

Tåglast Malm 2000

$$R_f(\max(\max\sigma_{vMMatrix})) = 88.205 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{v_M} := R_f(\max(\max\sigma_{vMMatrix}))$$

$$\sigma_{v_M} = 88.205 \text{ kPa}$$

$$\sigma_v := \begin{pmatrix} \sigma_{v_BV} \\ \sigma_{v_M} \end{pmatrix}$$

$$\max(\sigma_v) = 88.205 \text{ kPa}$$

$$\sigma_{v_tåg} := \max(\sigma_v)$$

$$\sigma_{v_tåg} = 88.205 \text{ kPa}$$

Linjelast, $p_{\text{tågtrafik}}$

$$p_{\text{tågtrafik}} := \frac{\sigma_{v_tåg} \cdot \pi \cdot h_c}{\gamma}$$

$$p_{\text{tågtrafik}} = 249.393 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Normalkraft, N_t

$$N_t := \begin{cases} N_t \leftarrow p_{\text{tågtrafik}} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q & \text{if } \left(\frac{h_{c_red}}{D}\right) \leq 0.25 & * \\ N_t \leftarrow \left(1.25 - \frac{h_{c_red}}{D}\right) \cdot p_{\text{tågtrafik}} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q & \text{if } 0.25 < \left(\frac{h_{c_red}}{D}\right) \leq 0.75 & \\ N_t \leftarrow 0.5 \cdot p_{\text{tågtrafik}} + \left(\frac{D}{2}\right) \cdot q & \text{if } 0.75 < \frac{h_{c_red}}{D} & \end{cases} \quad (4.1'; 4.1''; 4.1''')$$

$$N_t = 205 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

4.2.2.5 Sammanställning linjelast, p_{trafik} och normalkraft, N_t

Högsta värdet på N_t kommer att användas för dimensionering.

$$p_{\text{tågtrafik}} = 249.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad N_t = 205 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

4.2.3 Dimensionerande normalkraft, N_d

Handboken sid 20ff.

Bruksgränstillstånd:

$$\psi_{\gamma_{\text{jord}_s}} = \begin{pmatrix} 1.1 \\ 0.9 \end{pmatrix} \quad \psi_{\gamma_{\text{trafik}_s}} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad N_j = 118.715 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad N_t = 205.047 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{d_s_1} := \max(\psi_{\gamma_{\text{jord}_s}}) \cdot N_j + \max(\psi_{\gamma_{\text{trafik}_s}}) \cdot (N_t) * \quad (4.m)$$

$$N_{d_s_2} := \max(\psi_{\gamma_{\text{jord}_s}}) \cdot N_j + \min(\psi_{\gamma_{\text{trafik}_s}}) \cdot (N_t) *$$

$$N_{d_s_3} := \min(\psi_{\gamma_{\text{jord}_s}}) \cdot N_j + \max(\psi_{\gamma_{\text{trafik}_s}}) \cdot (N_t) *$$

$$N_{d_s_4} := \min(\psi_{\gamma_{\text{jord}_s}}) \cdot N_j + \min(\psi_{\gamma_{\text{trafik}_s}}) \cdot (N_t) *$$

$$(N_{d_s_}) := \begin{pmatrix} N_{d_s_1} \\ N_{d_s_2} \\ N_{d_s_3} \\ N_{d_s_4} \end{pmatrix} * \quad N_{d_s_} = \begin{pmatrix} 335.6 \\ 335.6 \\ 311.9 \\ 311.9 \end{pmatrix} \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{d_s} := \max(N_{d_s_}) *$$

$$N_{d_s} = 335.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

Brottngränstillstånd:

$$\psi_{\gamma_{\text{jord_u}}} = \begin{pmatrix} 1.1 \\ 0.9 \end{pmatrix} \quad \psi_{\gamma_{\text{trafik_u}}} = \begin{pmatrix} 0.7 \\ 1.4 \end{pmatrix} \quad N_j = 118.715 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad N_t = 205.047 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\begin{aligned} N_{d_u_1} &:= \max(\psi_{\gamma_{\text{jord_u}}}) \cdot N_j + \max(\psi_{\gamma_{\text{trafik_u}}}) \cdot (N_t) * \\ N_{d_u_2} &:= \max(\psi_{\gamma_{\text{jord_u}}}) \cdot N_j + \min(\psi_{\gamma_{\text{trafik_u}}}) \cdot (N_t) * \\ N_{d_u_3} &:= \min(\psi_{\gamma_{\text{jord_u}}}) \cdot N_j + \max(\psi_{\gamma_{\text{trafik_u}}}) \cdot (N_t) * \\ N_{d_u_4} &:= \min(\psi_{\gamma_{\text{jord_u}}}) \cdot N_j + \min(\psi_{\gamma_{\text{trafik_u}}}) \cdot (N_t) * \end{aligned} \quad (4.n)$$

$$(N_{d_u_}) := \begin{pmatrix} N_{d_u_1} \\ N_{d_u_2} \\ N_{d_u_3} \\ N_{d_u_4} \end{pmatrix} * \quad N_{d_u_} = \begin{pmatrix} 417.7 \\ 274.1 \\ 393.9 \\ 250.4 \end{pmatrix} \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{d_u} := \max(N_{d_u_}) *$$

$$N_{d_u} = 417.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

Utmattningsgränstillstånd:

$$\psi_{\gamma_{\text{trafik_f}}} = 1 \quad N_t = 205 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$N_{d_f} := \psi_{\gamma_{\text{trafik_f}}} \cdot N_t *$$

$$N_{d_f} = 205 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * \quad (4.o)$$

Sammanställning dimensionerande normalkraft

$$N_{d_} := \begin{pmatrix} \max(N_{d_s}) \\ \max(N_{d_u}) \\ N_{d_f} \end{pmatrix} * \quad N_{d_} = \begin{pmatrix} 335.6 \\ 417.7 \\ 205.0 \end{pmatrix} \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

$$N_d := \max(N_{d_}) *$$

$$N_d = 417.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

4.3 Bestämning av dimensionerande böjmoment

Böjmomenten i röväggen är beroende av förhållandet mellan jordmaterialets och rörets styvheter. Detta förhållandet benämns λ_f , beräknas tidigare i dokumentet under 4.1 Bestämning av effektiv överfyllnadstjocklek,

$$hc_{red}: \lambda_f = \frac{E_{jd} \cdot D^3}{(E_k \cdot I)_{jd}} \quad \text{där } E \text{ är jordmaterialets dimensionerande tangentmodul och } (E \cdot I) \text{ är röväggens } k$$

böjstyvheter.

$$\text{Flexibilitetsstalet } \lambda_f = 3485.9$$

4.3.1 Böjmoment av jordlast, M_j

Handboken sid 21 ff.

De olika jordmaterialen (kringfyllnadsmaterialet och överfyllnadsmaterialet) betraktas var och en för sig vid bestämning av dimensionerande böjmoment av jordlast.

$$\left[\frac{M_j}{\rho_{kf} \cdot D^3} = f_1 \cdot \left[f_3 \cdot f_{2_kf} - \left(\frac{\rho_{öf}}{\rho_{kf}} \right) \cdot \left(\frac{h_c}{D} \right) \cdot f_{2_öf} \right] \right] \quad (4.q)$$

$$\rho_{öf} = 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad \rho_{kf} = 20 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \quad h_c = 1.8 \text{ m} \quad D = 4.196 \text{ m}$$

För funktionen f_1 gäller:

$$\frac{H}{D} = 0.484 \quad *$$

$$f_1 := \begin{cases} f_1 \leftarrow 0.67 + 0.87 \cdot \left(\frac{H}{D} - 0.2 \right) & \text{if } 0.2 < \frac{H}{D} \leq 0.35 \quad * \\ f_1 \leftarrow 0.8 + 1.33 \cdot \left(\frac{H}{D} - 0.35 \right) & \text{if } 0.35 < \frac{H}{D} \leq 0.5 \\ f_1 \leftarrow 2 \cdot \left(\frac{H}{D} \right) & \text{if } 0.5 < \left(\frac{H}{D} \right) \leq 0.6 \end{cases} \quad (4.r', 4.r'', 4.r''')$$

$$f_1 = 0.978 \quad *$$

För funktionen f_2 , kringfyllnadsfasen gäller:

$$f_{2_kf} := \begin{cases} f_{2_kf} \leftarrow 0.0046 - 0.0010 \log(\lambda_f) & \text{if } \lambda_f \leq 5000 \quad * \\ f_{2_kf} \leftarrow 0.0009 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.s', 4.s'')$$

$$f_{2_kf} = 1.058 \times 10^{-3} \quad *$$

För funktionen f_3 gäller

$$f_3 := 6.67 \cdot \frac{H}{D} - 1.33 \quad * \quad (4.s''')$$

$$f_3 = 1.897 \quad *$$

För funktion f_2 , överfyllnadsfasen gäller:

$$f_{2_öf} := \begin{cases} f_{2_öf} \leftarrow 0.018 - 0.004 \cdot \log(\lambda_f) & \text{if } \lambda_f \leq 5000 \quad * \\ f_{2_öf} \leftarrow 0.0032 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.s''''4.s''''')$$

$$f_{2_öf} = 3.831 \times 10^{-3} \quad *$$

Bruksgränstillstånd

$$\left[\frac{M_{j_s}}{\rho_{kf} \cdot D^3} = f_1 \cdot \left[f_3 \cdot f_{2_kf} - \left(\frac{\rho_{öf}}{\rho_{kf}} \right) \cdot \left(\frac{h_c}{D} \right) \cdot f_{2_öf} \right] \right] \geq 0.5 \cdot f_1 \cdot f_3 \cdot f_{2_kf} \quad (4.q)$$

$$M_{j_s} := \left[f_1 \cdot \left[f_3 \cdot f_{2_kf} - \left(\frac{\rho_{öf}}{\rho_{kf}} \right) \cdot \left(\frac{h_c}{D} \right) \cdot f_{2_öf} \right] \right] \cdot (\rho_{kf} \cdot D^3) \quad *$$

$$\left[f_1 \cdot \left[f_3 \cdot f_{2_kf} - \left(\frac{\rho_{öf}}{\rho_{kf}} \right) \cdot \left(\frac{h_c}{D} \right) \cdot f_{2_öf} \right] \right] = 0.00036 \quad 0.5 \cdot f_1 \cdot f_3 \cdot f_{2_kf} = 0.00098$$

$$M_{j_s} = 0.525 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}} \quad *$$

$$\text{vilkor}_{Mj_s} := \text{if} \left[\left[f_1 \cdot \left[f_3 \cdot f_{2_kf} - \left(\frac{\rho_{öf}}{\rho_{kf}} \right) \cdot \left(\frac{h_c}{D} \right) \cdot f_{2_öf} \right] \right] \geq 0.5 \cdot f_1 \cdot f_3 \cdot f_{2_kf}, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right] \quad *$$

vilkor_{Mj_s} = "EJ OK!"

Brottgänstillstånd

$$\left[\frac{M_{j_u}}{\rho_{kf} \cdot D^3} = f_1 \cdot \left[f_3 \cdot f_{2_kf} - \left(\frac{\rho_{öf}}{\rho_{kf}} \right) \cdot \left(\frac{h_c}{D} \right) \cdot f_{2_öf} \right] \right] \quad (4.q'')$$

$$M_{j_u} := \left[f_1 \cdot \left[f_3 \cdot f_{2_kf} - \left(\frac{\rho_{öf}}{\rho_{kf}} \right) \cdot \left(\frac{h_c}{D} \right) \cdot f_{2_öf} \right] \right] \cdot (\rho_{kf} \cdot D^3) \quad *$$

$$M_{j_u} = 0.525 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

4.3.2 Böjmoment av trafiklast, M_t

Handboken sid 23 ff

$$D = 4.196 \text{ m} \quad p_{\text{tågtrafik}} = 249.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad h_c = 1.8 \text{ m}$$

$$M_t = f'_4 \cdot f''_4 \cdot f'''_4 \cdot D \cdot (p_{\text{trafik}})^* \quad (4.t)$$

$$f'_4 := 0.265 \cdot (1 - 0.2 \cdot \log(\lambda_f))^* \quad (4.u)$$

$$f'_4 = 0.077 \quad *$$

$$f''_4 := \begin{cases} f'' \leftarrow 0.12 \cdot (1 - 0.15 \cdot \log(\lambda_f)) & \text{if } \lambda_f \leq 100000 \quad * \\ f'' \leftarrow 0.030 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4.v)$$

$$f''_4 = 0.056 \quad *$$

$$f'''_4 := \left(\frac{h_c}{D} \right)^{-0.75} \quad * \quad (4.x)$$

$$f'''_4 = 1.887 \quad *$$

$$f'_4 \cdot f'''_4 = 0.146 \quad (4.y)$$

$$M_t := f'_4 \cdot f''_4 \cdot f'''_4 \cdot D \cdot (p_{\text{tågtrafik}})^* \quad (4.t)$$

$$M_t = 8.58 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}} \quad *$$

4.3.3 Dimensionerande böjmoment

Handboken sid 30

De dimensionerande momenten av jord och trafik har olika riktning i olika punkter och kontroll utförs därför enligt nedanstående formler.

Bruksgränstillstånd

$$\max(\psi_{\gamma_{\text{jord}_s}}) = 1.1 \quad \max(\psi_{\gamma_{\text{trafik}_s}}) = 1 \quad M_{j_s} = 0.525 \text{ m} \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad M_t = 8.578 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}}$$

$$M_{d_s} := \max(\psi_{\gamma_{\text{jord}_s}}) \cdot M_{j_s} + \max(\psi_{\gamma_{\text{trafik}_s}}) \cdot \left(\frac{M_t}{2}\right) * \quad (4.y)$$

$$M_{d_s} = 4.866 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}} *$$

Brottgränstillstånd

$$\min(\psi_{\gamma_{\text{jord}_u}}) = 0.9 \quad \max(\psi_{\gamma_{\text{trafik}_u}}) = 1.4 \quad M_{j_u} = 0.525 \text{ m} \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad M_t = 8.578 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}}$$

$$M_{d_u} := \min(\psi_{\gamma_{\text{jord}_u}}) \cdot (-M_{j_u}) + \max(\psi_{\gamma_{\text{trafik}_u}}) \cdot M_t * \quad (4.z)$$

$$M_{d_u} = 11.54 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}} *$$

Utmattningstillstånd, spänningsvidd:

$$\psi_{\gamma_{\text{trafik}_f}} = 1 \quad M_t = 8.578 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}}$$

$$\Delta M_{d_f} := \psi_{\gamma_{\text{trafik}_f}} \cdot M_t \cdot 1.5 * \quad (4.w)$$

$$\Delta M_{d_f} = 12.87 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}} *$$

Sammanställning dimensionerande böjmoment:

$$M_{d_} := \begin{pmatrix} \max(M_{d_s}) \\ \max(M_{d_u}) \\ \Delta M_{d_f} \end{pmatrix} * \quad M_{d_} = \begin{pmatrix} 4.87 \\ 11.54 \\ 12.87 \end{pmatrix} \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}} *$$

5. Dimensioneringskontroller

5.1 Allmänna kontroller

5.1.1 Kontroll av tillåten överfyllnad

$$1.2 < h_c^*$$

$$h_c = 1.8 \text{ m} *$$

$$\text{tillräcklig_överfyllnad} := \text{if} \left(1.2 < \frac{h_c}{\text{m}}, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right) *$$

$$\text{tillräcklig_överfyllnad} = \text{"OK!"} *$$

5.1.2 Kontroll av böjmoment av trafiklast

Villkor enligt handboken sid 23

$$f_4 \cdot f''_4 = 0.146 * \quad f_4 \cdot f'''_4 < 1 *$$

$$\text{kontroll_5_1_2} := \text{if} \left[\left(f_4 \cdot f''_4 < 1 \right), \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right] *$$

$$\text{kontroll_5_1_2} = \text{"OK!"} *$$

5.2 Beräkningsmässiga analyser i bruksgränstillstånd

5.2.1 Säkerhet mot begynnande flytning i bruksgränstillstånd

Handboken sid 27

$$\sigma = \left(\frac{N_{d_s}}{A} + \frac{M_{d_s}}{W} \right) < f_{yd_s} * \quad (5.a)$$

$$(N_{d_s}) = 335.6 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * \quad W = 7.378 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{m}} *$$

$$(M_{d_s}) = 4.866 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}} * \quad A = 5.915 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^2}{\text{m}} *$$

$$\sigma := \left(\frac{N_{d_s}}{A} + \frac{M_{d_s}}{W} \right) *$$

$$\sigma = 122.7 \text{ MPa} *$$

$$\sigma < f_{yd_s} *$$

$$f_{yd_s} := \frac{f_{yk}}{\gamma_{n_stål_s} \cdot \gamma_{m_stål_s}} *$$

(BSK 99, 3:42)

$$f_{yd_s} = 275 \text{ MPa} *$$

$$\sigma = 122.7 \text{ MPa} *$$

$$\text{kontroll_5_2_1} := \text{if} \left(\sigma < f_{yd_s}, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right) *$$

$$\text{kontroll_5_2_1} = \text{"OK!"} *$$

5.3 Beräkningsmässig verifiering av rörväggens bärförmåga i brottgränstillstånd

5.3.1 Kontroll av att flyttled ej bildas i rörbrons övre del

Handboken sid 27 ff. 47 ff.

$$\left[\left(\frac{N_{d_u}}{N_{cr}} \right)^{\alpha_c} + \frac{M_{d_u}}{M_u} \right] \leq 1_* \quad (5.b)$$

Vid beräkning av N_{cr} i denna kontroll beräknas denna enligt *Bilaga 5, andra ordningens teori*, (sid 47) i handboken och $\xi =$ roten ur κ .

Villkor sid 28 i handboken: $(\alpha_c = \eta^2 \cdot \omega_2) \geq 0.8_*$

$$h_c = 1.8 \text{ m} \quad R_t = 2.099 \text{ m}$$

$$\kappa_2 := \frac{h_c}{R_t} \quad * \quad (b5.f)$$

$$\kappa_2 = 0.858 \quad *$$

$$\eta_j := 1 - \left(\frac{1}{1 + \kappa_2} \right)^2 \quad * \quad (b5.c)$$

$$\eta_j = 0.71 \quad *$$

$$\lambda_f = 3485.9$$

$$\mu := \left[1.22 + 1.95 \cdot \left(\frac{8}{\eta_j \cdot \lambda_f} \right)^{0.25} \right]^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{\eta_j}} \quad (b5.d)$$

$$\mu = 3.369 \quad *$$

$$\xi := \sqrt{\kappa_2} \quad * \quad \xi = 0.926 \quad (b5.e)$$

Beräkning av knäckningslasten för rörkonstruktionen i jord vid ideala elastiska förhållanden, N_{cr_el}

$$E_{jd} = 21.932 \text{ MPa} \quad E_k = 210000 \text{ MPa} \quad I = 2.213 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^4}{\text{m}} \quad R_t = 2.099 \text{ m} \quad R_c = 0.49 \text{ m}$$

$$N_{cr_el} := \left[\begin{array}{l} N_{cr_el} \leftarrow 1.2 \sqrt{\frac{E_{jd} \cdot (E_k \cdot I)}{R_t}} \quad \text{if } R_t = R_c \\ N_{cr_el} \leftarrow \frac{3\xi}{\mu} \cdot \sqrt{\frac{E_{jd} \cdot (E_k \cdot I)}{R_t}} \quad \text{otherwise} \end{array} \right]_* \quad (b5.a)$$

$$N_{cr_el} := \left[\begin{array}{l} N_{cr_el} \leftarrow 1.2 \sqrt{\frac{E_{jd} \cdot (E_k \cdot I)}{R_t}} \quad \text{if } R_t = R_c \\ N_{cr_el} \leftarrow \frac{3\xi}{\mu} \cdot \sqrt{\frac{E_{jd} \cdot (E_k \cdot I)}{R_t}} \quad \text{otherwise} \end{array} \right]_* \quad (b5.b)$$

$$N_{cr_el} = 1817.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad *$$

Beräkning av dimensionerande sträckgränsvärdet för stålet.

$$f_{yk} = 275 \text{ MPa} \quad \gamma_{n_stål_u} = 1.1 \quad \gamma_{m_stål_u} = 1 \quad A = 5.915 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}}$$

$$f_{yd_u} := \frac{f_{yk}}{\gamma_{n_stål_u} \cdot \gamma_{m_stål_u}} \quad * \quad (\text{BSK 99, 3:42})$$

$$f_{yd_u} = 250 \text{ MPa} *$$

Beräkning av gällande normalkraft vid fullständigt plasticerat tvärsnitt, N_u

$$N_u := f_{yd_u} \cdot A \quad * \quad (\text{handboken sid 48})$$

$$N_u = 1478.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

$$\omega_2 := \begin{cases} \omega_2 \leftarrow \frac{N_{cr_el}}{N_u} & \text{if } \left(\frac{N_{cr_el}}{N_u} \right) \leq 0.5 \end{cases} \quad * \quad (\text{b5.g})$$

$$\left[\omega_2 \leftarrow 1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{N_u}{N_{cr_el}} \quad \text{if } \left(\frac{N_{cr_el}}{N_u} \right) > 0.5 \right] \quad (\text{b5.h})$$

$$\omega_2 = 0.797 \quad *$$

Beräkning av den kritiska lasten (knäckningslasten) för rörkonstruktionen, N_{cr}

$$N_{cr} := \omega_2 \cdot N_u \quad * \quad (\text{b5.h})$$

$$N_{cr} = 1.2 \times 10^3 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

För aktuella profiltyper gäller att $\eta \sim 1.35$ om inget annat värde påvisas vara riktigare, enligt handboken sid 28.

$$\eta := 1.35$$

$$\alpha_c := \begin{cases} \alpha_c \leftarrow \eta^2 \cdot \omega_2 & \text{if } \eta^2 \cdot \omega_2 \geq 0.8 \end{cases} \quad * \quad (\text{handboken sid 28})$$

$$\left[\alpha_c \leftarrow 0.8 \quad \text{otherwise} \right]$$

$$\alpha_c = 1.452 \quad *$$

Beräkning av gällande moment vid fullständigt plasticerat tvärsnitt, M_u

$$M_u := 1.35 \cdot W f_{yd_u} \quad * \quad (5.c)$$

$$M_u = 24.9 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}} \quad * \quad N_{d_u} = 417.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad M_{d_u} = 11.5 \frac{\text{kN} \cdot \text{m}}{\text{m}}$$

$$\left(\frac{N_{d_u}}{N_{cr}} \right)^{\alpha_c} + \left(\frac{M_{d_u}}{M_u} \right) = 0.685 \quad * \quad (5.b)$$

$$\text{kontroll_5_3_1} := \text{if} \left[\left[\left[\left(\frac{N_{d_u}}{N_{cr}} \right)^{\alpha_c} + \left(\frac{M_{d_u}}{M_u} \right) \right] \leq 1.0 \right], \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right] \quad *$$

$$\text{kontroll_5_3_1} = \text{"OK!"} \quad *$$

5.3.1b Kontroll av kapacitet med avseende på uppträdande maximal normalkraft (enligt kontroll 5.3 men med $M_{d,u} = 0$ och ξ enligt handboken, Bilaga 5)

Handboken sid 47

$$\mu_{2} := \left[1.22 + 1.95 \cdot \left(\frac{8}{\eta_j \cdot \lambda_f} \right)^{0.25} \right]^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{\eta_j}} \quad (b5.d)$$

$$\mu_{2} = 3.369 *$$

$$\kappa_{2} = 0.858$$

$$\xi_{2} := \left(\begin{array}{l} \xi_{2} \leftarrow \sqrt{\kappa_{2}} \text{ if } \sqrt{\kappa_{2}} \leq 1 \\ \xi_{2} \leftarrow 1 \text{ otherwise} \end{array} \right) * \quad (b5.e)$$

$$\xi_{2} = 0.926 *$$

Beräkning av knäckningslasten för rörkonstruktionen i jord vid ideala elastiska förhållanden, $N_{cr,el}$

$$E_{jd} = 21.9 \text{ MPa} \quad E_k = 210000 \text{ MPa} \quad I = 2.213 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^4}{\text{m}} \quad R_t = 2.099 \text{ m} \quad R_c = 0.49 \text{ m}$$

$$N_{cr,el,2} := \left[\begin{array}{l} N_{cr,el,2} \leftarrow 1.2 \sqrt{\frac{E_{jd} \cdot (E_k \cdot I)}{R_t}} \text{ if } R_t = R_c \\ N_{cr,el,2} \leftarrow \frac{3\xi_{2}}{\mu_{2}} \cdot \sqrt{\frac{E_{jd} \cdot (E_k \cdot I)}{R_t}} \text{ otherwise} \end{array} \right] * \quad (b5.a)$$

$$N_{cr,el,2} = 1817.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

$$f_{yd,u} = 250 \text{ MPa} *$$

$$N_u = 1478.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}} *$$

$$\omega_{2,2} := \left[\begin{array}{l} \omega_{2,2} \leftarrow \frac{N_{cr,el,2}}{N_u} \text{ if } \left(\frac{N_{cr,el,2}}{N_u} \right) \leq 0.5 \\ \omega_{2,2} \leftarrow 1 - \frac{1}{4} \cdot \frac{N_u}{N_{cr,el,2}} \text{ if } \left(\frac{N_{cr,el,2}}{N_u} \right) > 0.5 \end{array} \right] * \quad (b5.g, b5.h)$$

$$\omega_{2,2} = 0.797 *$$

Beräkning av den kritiska lasten (knäckningslasten) för rörkonstruktionen, N_{cr}

$$N_{cr,2} := \omega_{2,2} \cdot N_u *$$

$$N_{cr,2} = 1177.9 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * \quad (b5.h)$$

$$\eta_{2} := 1.35 *$$

$$\alpha_{c_2} := \begin{cases} \alpha_{c_2} \leftarrow \eta_{-2}^2 \cdot \omega_2 & \text{if } \eta^2 \cdot \omega_2 \geq 0.8 \quad * \\ \alpha_{c_2} \leftarrow 0.8 & \text{otherwise} \end{cases}$$

handboken sid 28

$$\alpha_{c_2} = 1.452 \quad *$$

$$N_{d_u} = 417.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\left(\frac{N_{d_u}}{N_{cr_2}} \right)^{\alpha_{c_2}} = 0.222 \quad *$$

(5.b)

$$\text{kontroll_5_3_1b} := \text{if} \left[\left[\left(\frac{N_{d_u}}{N_{cr_2}} \right)^{\alpha_{c_2}} \leq 1.0 \right], \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right] *$$

$$\text{kontroll_5_3_1b} = \text{"OK!"} \quad *$$

5.3.2 Kontroll av att tillräcklig kapacitet finns i rörbrons nedre del

$$N_d < f_{yd_u} \cdot A_{s2}$$

(5.d)

$$f_{yd_u} = 250 \text{ MPa} \quad A_{s2} := A \quad A_{s2} = 0.00591 \text{ m} \quad N_d = 417.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{kontroll_5_3_2} := \text{if} \left[\left[N_d < f_{yd_u} \cdot A_{s2}, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right] \right] *$$

$$\text{kontroll_5_3_2} = \text{"OK!"} \quad *$$

5.3.2b Kontroll av att tillräcklig kapacitet finns i rörbrons nedre hörndel

$$N_d < f_{yd_u} \cdot A_{s2}$$

(5.d)

$$f_{yd_u} = 250 \text{ MPa} \quad A_{s2} = 0.00591 \text{ m} \quad N_d = 417.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$\text{kontroll_5_3_2b} := \text{if} \left[\left[N_d < f_{yd_u} \cdot A_{s2}, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right] \right] *$$

$$\text{kontroll_5_3_2b} = \text{"OK!"} \quad *$$

5.3.3 Kontroll mot överskridande av skruvförbandens kapacitet.

Handboken sid 28 ff.

Kontroll av att kapaciteten är tillräcklig (mot skjubbrott i skruv resp plåt) görs enligt ekvation

$N_{d_u} < \min(n \times F_{Rvd}; n \times F_{Rbd})$ där dimensionerande normalkraft utgörs av summan av normalkraft för jordlast och trafiklast med partialkoefficienter i brottgränstillstånd. Nedanstående gäller under förutsättning att skruvförbanden försetts med minst två skruvar för varje vågtopp och vågdal och placerade så att böjande moment kan överföras. Skruvförbandens kapacitet beräknas enligt *BSK 99 6.4 Dimensionering av skruvförband*, med skruvarnas aktuella data för materialkvalitet och dimensioner. Kontroll av momentkapacitet i plåtskarv kontrolleras enligt ekvation $a \times n/2 \times F_{Rtd} > W \times f_{yd}$ även bärförmågan för fallet med kombinerad dragning och skjuvning kontrolleras, *BSK 99 6:433 Kombinerad dragning och skjuvning*
Kontrollerna utförs i brottgränstillstånd.

d = skruvs diameter

A_b = skruvs tvärsnittsarea, nominell area

A_s = skruvs spänningsarea

n = antal skruvar per meter

e_1 = från centrum till fri kant

d_s = anliggning mot skruvstam

ϕ = reduktionsfaktor för normalt åtdragen skruv = 0.6

$t_{plåt}$ = plåt tjocklek

a_{skarv} = skarvning av plåt (överlappet)

F_{st} = beräknad dragkraft vid dimensionerande last i brottgränstillstånd

F_{sv} = beräknad tvärkraft vid dimensionerande last i brottgränstillstånd

F_{Rtd} = skruvens dimensionerande kapacitet vid dragning

F_{Rvd} = skruvens dimensionerande kapacitet vid skjuvning vid brott i skruv

F_{Rbd} = skruvens dimensionerande kapacitet vid skjuvning vid brott i plåt

5.3.3.1 Kontroll av att skruvarnas kapacitet är tillräcklig mot skjubbrott i skruven; F_{Rvd}

$n_{erf1} < n$

$$A_s = 244.8 \text{ mm}^2 * \quad n = 10 \frac{1}{\text{m}} \quad f_{buk} = 800 \text{ MPa} \quad \gamma_{m_bult_u} = 1.2 \quad \gamma_{n_stål_u} = 1.1 \quad N_{d_u} = 417.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$f_{bud} := \frac{f_{buk}}{\gamma_{m_bult_u} \cdot \gamma_{n_stål_u}} * \quad \text{(BSK 99, 3:48)}$$

$$f_{bud} = 606.1 \text{ MPa} *$$

$$F_{Rvd} := 0.6 \cdot A_s \cdot f_{bud} * \quad \text{(BSK 99, 6:432a)}$$

$$F_{Rvd} = 89.0 \text{ kN} *$$

$$n_{erf1} := \frac{N_{d_u}}{F_{Rvd}} * \quad \text{(5.e)}$$

$$n_{erf1} = 4.7 \frac{1}{\text{m}} *$$

$$\text{kontroll_5_3_3_1} := \text{if}(n_{erf1} < n, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"}) *$$

$$\text{kontroll_5_3_3_1} = \text{"OK!"} *$$

5.3.3.2 Kontroll av att skruvarnas kapacitet är tillräcklig mot hålkantbrott i plåten; F_{Rbd}

$$f_{uk} = 410 \text{ MPa} \quad \gamma_{n_stål_u} = 1.1 \quad \gamma_{m_stål_u} = 1$$

$$f_{ud} := \frac{f_{uk}}{1.2 \cdot \gamma_{n_stål_u} \cdot \gamma_{m_stål_u}} \quad * \quad (\text{BSK 99, 3:42})$$

$$f_{ud} = 310.6 \text{ MPa} *$$

$$e_1 = 0.035 \text{ m} \quad *$$

Att nedan använda d_s , skruvens utvändiga gängas innerdiameter, innebär att beräkningen utförs på säkra sidan.

$$F_{Rbd} := 1.2 \cdot \left(\frac{e_1}{d_s} - 0.5 \right) \cdot d_s \cdot t_{plåt} \cdot f_{ud} \quad * \quad (\text{BSK 99, 6:432b})$$

$$F_{Rbd} = 48.8 \text{ kN} *$$

$$N_{d_u} = 417.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

$$n_{erf2} := \frac{N_{d_u}}{F_{Rbd}} \quad * \quad (5.e)$$

$$n_{erf2} = 8.6 \frac{1}{\text{m}} \quad *$$

$$\text{kontroll_5_3_3_2} := \text{if}(n_{erf2} < n, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"}) *$$

$$\text{kontroll_5_3_3_2} = \text{"OK!"} \quad *$$

5.3.3.3 Kontroll av momentkapacitet i plåtskarv, F_{Rtd}

$$W = 73.8 \frac{\text{mm}^3}{\text{mm}} \quad a_{\text{skarv}} = 0.085 \text{ m} \quad f_{yk} = 275 \text{ MPa} \quad \gamma_{n_stål_u} = 1.1 \quad \gamma_{m_stål_u} = 1$$

$$n_{\text{erf3}} \geq \frac{W \cdot f_{yd}}{F_{Rtd} \cdot \frac{a_{\text{skarv}}}{2}} \quad * \quad (5.f)$$

Spänningsarean A_s används för beräkning, ger resultat på säkra sidan.

$$A_s = 244.8 \text{ mm}^2$$

$$a \cdot \frac{n}{2} \cdot F_{Rtd} \geq W \cdot f_{yd} \quad * \quad (5.f)$$

$$F_{Rtd} := \phi_t \cdot A_s \cdot f_{bud} \quad * \quad (\text{BSK 99, 6:431})$$

$$F_{Rtd} = 89.0 \text{ kN} \quad *$$

$$f_{yd} := \left(\frac{f_{yk}}{\gamma_{n_stål_u} \cdot \gamma_{m_stål_u}} \right) \quad * \quad (\text{BSK 99, 3:42})$$

$$f_{yd} = 250 \text{ MPa} \quad *$$

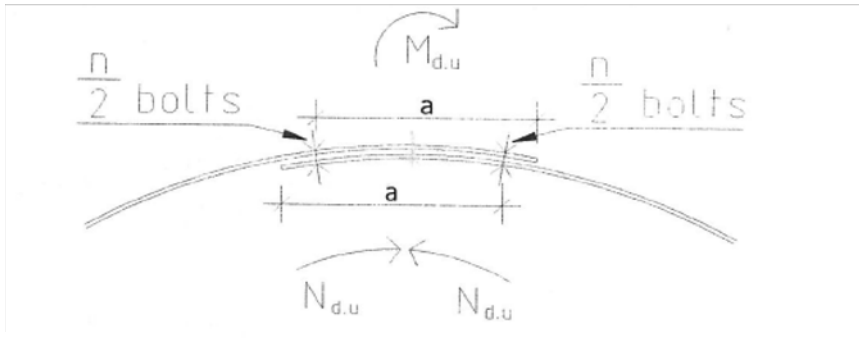
$$n_{\text{erf3}} := \frac{W \cdot f_{yd}}{F_{Rtd} \cdot \frac{a_{\text{skarv}}}{2}} \quad * \quad (5.f)$$

$$n_{\text{erf3}} = 4.9 \frac{1}{\text{m}} \quad *$$

$$\text{kontroll_5_3_3_3} := \text{if} \left[(n) \geq (n_{\text{erf3}}), \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right] \quad *$$

$$\text{kontroll_5_3_3_3} = \text{"OK!"} \quad *$$

5.3.3.4 Kontroll mot överskridande av skruvförbandens kapaciteten vid kombinerad dragning och skjuvning



$$\left(\frac{F_{St}}{F_{Rtd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{Sv}}{F_{Rvd}} \right)^2 \leq 1 \quad * \quad (\text{BSK 6:433})$$

$$M_{d,u} = 11.5 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}} \quad N_{d,u} = 417.7 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad a_{\text{skarv}} = 0.085 \text{ m} \quad n = 10 \frac{1}{\text{m}} \quad k = 2$$

$$F_{St} := \frac{M_{d,u}}{a_{\text{skarv}} \cdot \frac{n}{k}} \quad * \quad (5.f)$$

$$F_{Sv} := \frac{N_{d,u}}{n} \quad *$$

$$F_{St} = 27.1 \text{ kN} \quad * \quad F_{Sv} = 41.8 \text{ kN} \quad *$$

$$F_{Rtd} = 89.0 \text{ kN} \quad F_{Rvd} = 89.0 \text{ kN}$$

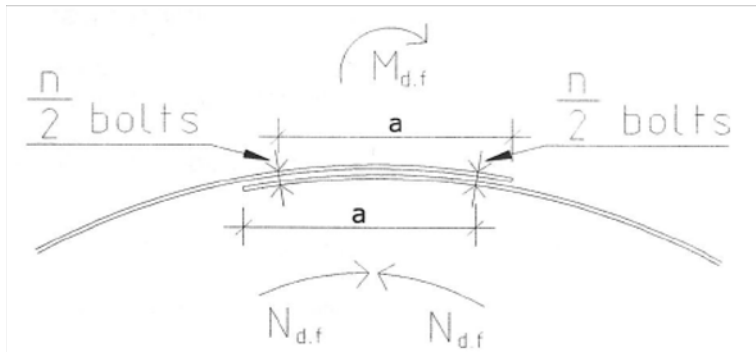
$$\left(\frac{F_{St}}{F_{Rtd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{Sv}}{F_{Rvd}} \right)^2 = 0.313 \quad *$$

$$\text{kontroll_5_3_3_4} := \text{if} \left[\left(\frac{F_{St}}{F_{Rtd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{Sv}}{F_{Rvd}} \right)^2 \leq 1, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right] \quad *$$

$$\text{kontroll_5_3_3_4} = \text{"OK!"} \quad *$$

5.4 Beräkningsmässig verifiering av röväggens bärförmåga i utmattningsgränstillstånd

Kontroll görs även av att kapaciteten är tillräcklig vid ren dragning, ren skjuvning och kombinerad dragning och skjuvning i utmattningsgränstillstånd enligt BSK 99 6:5 Dimensionering med hänsyn till utmattning



5.4.1 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid ren dragning σ_{rd} i utmattningsgränstillstånd

$$\sigma_{rd} \leq f_{rd}^*$$

$$\Delta M_{d,f} = 12.9 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}} \quad a_{\text{skarv}} = 0.085 \text{ m} \quad n = 10 \frac{1}{\text{m}} \quad k = 2 \quad A_s = 244.8 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{rd} := \frac{\Delta M_{d,f}}{a_{\text{skarv}} \cdot \frac{n}{k} \cdot A_s}^*$$

$$\sigma_{rd} = 123.7 \text{ MPa}^*$$

Utmattningshållfastheten för grundmaterial som inte påverkas av svets eller termiska skärning kan ökas genom att f_{rk} multipliceras med materialfaktorn ϕ_m . Materialet anses opåverkat enligt ovan om avståndet till skärkant är minst 3 plåttjocklekar; $a > 3 \times t_{\text{plåt}}$

(BSK 99 6:523)

Att skjuvningsvillkoret ovan är uppfyllt innebär att avståndet till kant är minst $3d$, vilket är större än 3 plåttjocklekar.

$$f_{uk} = 410 \text{ MPa} \quad t_{\text{plåt}} = 5 \text{ mm} \quad C_a = 45 \text{ MPa} \quad n_t = 1 \times 10^5 \quad \gamma_{n,f} = 1.1$$

$$\phi_{ma} := \begin{cases} \phi_{ma} \leftarrow 1.0 & \text{if } 340 \cdot \text{MPa} \leq f_{uk} < 410 \cdot \text{MPa} \\ \phi_{ma} \leftarrow 1.10 & \text{if } 410 \cdot \text{MPa} \leq f_{uk} < 450 \cdot \text{MPa} \\ \phi_{ma} \leftarrow 1.15 & \text{if } 450 \cdot \text{MPa} \leq f_{uk} < 490 \cdot \text{MPa} \\ \phi_{ma} \leftarrow 1.20 & \text{if } 490 \cdot \text{MPa} \leq f_{uk} < 600 \cdot \text{MPa} \\ \phi_{ma} \leftarrow 1.25 & \text{if } 600 \text{MPa} \leq f_{uk} \end{cases}^*$$

(BSK 99 tabell 6:523)

$$\phi_{ma} = 1.1^*$$

$$\phi_{ma_dim} := \left(\frac{25 \text{ mm}}{t_{\text{plåt}}} \right)^{0.0763}^*$$

(BSK 99 6:523b)

$$\phi_{ma_dim} = 1.131^*$$

$$f_{rk} := \begin{cases} f_{rk} \leftarrow \phi_{ma_dim} \cdot \phi_{ma} \cdot \left[C_a \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^6}{n_t} \right)^{\frac{1}{3}} \right] & \text{if } n_t < 10^6 \\ f_{rk} \leftarrow \phi_{ma_dim} \cdot \phi_{ma} \cdot \left[C_a \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^6}{n_t} \right)^{\frac{1}{5}} \right] & \text{if } 10^6 \leq n_t < 10^8 \\ f_{rk} \leftarrow \phi_{ma_dim} \cdot \phi_{ma} \cdot \left[C_a \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^6}{10^8} \right)^{\frac{1}{5}} \right] & \text{if } 10^8 \leq n_t \end{cases} *$$

(BSK 99 figur 6:523
utifrån ekvation 6:523a)

$$f_{rk} = 151.9 \text{ MPa}_*$$

$$f_{rd} := \frac{f_{rk}}{1.1 \cdot \gamma_{n_f}} *$$

(BSK 99 6:512)

$$f_{rd} = 125.6 \text{ MPa}_*$$

$$\sigma_{rd} = 123.7 \text{ MPa}_*$$

$$\text{kontroll_5_4_1} := \text{if}(\sigma_{rd} \leq f_{rd}, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"}) *$$

$$\text{kontroll_5_4_1} = \text{"OK!"} *$$

5.4.2 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid ren skjuvning τ_{rd} i utmattningsgränstillstånd

$$\tau_{rd} \leq f_{rvd} *$$

$$N_{d_f} = 205.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad n = 10 \frac{1}{\text{m}} \quad A_s = 244.8 \text{ mm}^2$$

(BSK 6:512b)

$$\tau_{rd} := \frac{N_{d_f}}{n \cdot A_s} *$$

$$\tau_{rd} = 83.8 \text{ MPa}_*$$

$$f_{rvd} := 0.6 \cdot f_{rd} *$$

(BSK 6:512b)

$$f_{rvd} = 75.3 \text{ MPa}_*$$

$$\text{kontroll_5_4_2} := \text{if}(\tau_{rd} \leq f_{rvd}, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"}) *$$

$$\text{kontroll_5_4_2} = \text{"EJ OK!"} *$$

5.4.3 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid kombinerad dragning σ_{rd} och skjuvning τ_{rd} i utmattningsgränstillstånd

$$\sigma_{rd} = 123.7 \text{ MPa} \quad \tau_{rd} = 83.8 \text{ MPa}$$

$$f_{rd} = 125.6 \text{ MPa} \quad f_{rvd} = 75.3 \text{ MPa}$$

$$\left(\frac{\sigma_{rd}}{f_{rd}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{rd}}{f_{rvd}}\right)^2 \leq 1.1 \quad * \quad (\text{BSK 99 6:512c})$$

$$\left[\left(\frac{\sigma_{rd}}{f_{rd}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{rd}}{f_{rvd}}\right)^2\right] = 2.207 \quad *$$

$$\text{kontroll_5_4_3} := \text{if} \left[\left(\frac{\sigma_{rd}}{f_{rd}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{rd}}{f_{rvd}}\right)^2 \leq 1.1, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"} \right] \quad *$$

$$\text{kontroll_5_4_3} = \text{"EJ OK!"} \quad *$$

5.4.4 Kontroll av utmattning i plåt

Dimensioneringsvillkoret med hänsyn till utmattning är $\sigma_{rd} < f_{rd}$ där σ_{rd} är spännvidden och beräknas enligt elasticitetsteorin:

$$\sigma_{rd_plåt} = \frac{N_{d_f}}{A} + \frac{\Delta M_{d_f}}{W} \quad * \quad (\text{BSK 99, 6:512a})$$

$$N_{d_f} = 205.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \quad * \quad \Delta M_{d_f} = 12.9 \frac{\text{kN}\cdot\text{m}}{\text{m}} \quad *$$

$$A = 5.9 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}} \quad W = 73.8 \frac{\text{mm}^3}{\text{mm}}$$

$$\sigma_{rd_plåt} := \left(\frac{N_{d_f}}{A} + \frac{\Delta M_{d_f}}{W} \right) \quad *$$

$$\sigma_{rd_plåt} = 209.1 \text{ MPa} \quad *$$

f_{rk} beräknas enligt BSK

$$C_{a2} = 100 \text{ MPa} \quad * \quad n_t = 100000 \quad (\text{BSK 99, bilaga 3})$$

$$f_{rk_plåt} := \left(\frac{2 \cdot 10^6}{n_t} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot C_{a2} \quad * \quad (\text{BSK 99, 6:523a})$$

$$f_{rk_plåt} = 271.4 \text{ MPa} \quad *$$

Beräkning av dimensionerande värde för utmattningshållfasthet, f_{rd}

$$\phi_{ma} = 1.1 \quad \gamma_{n_f} = 1.1$$

$$f_{rd_plåt} := \frac{\phi_{ma} \cdot f_{rk_plåt}}{1.1 \cdot \gamma_{n_f}} *$$

$$f_{rd_plåt} = 246.8 \text{ MPa} *$$

$$\sigma_{rd_plåt} = 209.1 \text{ MPa} *$$

$$\text{kontroll_5_4_4} := \text{if}(\sigma_{rd_plåt} \leq f_{rd_plåt}, \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"}) *$$

$$\text{kontroll_5_4_4} = \text{"OK!"} *$$

5.5 Övrig beräkningsmässig verifiering

5.5.1 Kontroll av styvhet vid montering etc.

Handboken sid 29

Enligt handboken ska rörprofilens styvhet definieras enligt nedan och ges ett värde så att $\eta_m < 0.13$ för cirkulära sektioner och $\eta_m < 0.2$ för valvformade eller lågbyggda sektioner.

$$\eta_m = \frac{D^2}{E_k \cdot I} = \frac{\lambda_f}{E_{jd} \cdot D}$$

(Handboken sid 29)

$$D = 4.196 \text{ m} \quad E_k = 210000 \text{ MPa} \quad I = 2213.4 \frac{\text{mm}^4}{\text{mm}}$$

$$\lambda_f = 3485.9 \quad E_{jd} = 21.9 \text{ MPa}$$

$$\eta_m := \frac{D^2}{E_k \cdot I} *$$

$$\eta_m = 0.038 \frac{\text{m}}{\text{kN}} *$$

$$\frac{\lambda_f}{E_{jd} \cdot D} = 0.038 \frac{\text{m}}{\text{kN}} *$$

$$\text{kontroll_5_5_1} := \text{if}\left[\left[\eta_m < \left(0.2 \frac{\text{m}}{\text{kN}}\right)\right], \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"}\right] *$$

$$\text{kontroll_5_5_1} = \text{"OK!"} *$$

$$\text{kontroll_5_5_1_rund} := \text{if}\left[\left[\eta_m < \left(0.13 \frac{\text{m}}{\text{kN}}\right)\right], \text{"OK!"}, \text{"EJ OK!"}\right] * \text{gäller för cirkulära sektioner}$$

$$\text{kontroll_5_5_1_rund} = \text{"OK!"} *$$

6. Sammanställning kontroller

5.1.1 Kontroll av tillåten överfyllnad enligt Bro 2004

tillräcklig_överfyllnad = "OK!" * Villkor: $0.6 < h_c$

$$\begin{pmatrix} h_c \\ 0.6m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.8 \\ 0.6 \end{pmatrix} m$$

5.1.2 Kontroll av böjmoment av trafiklast

kontroll_5_1_2 = "OK!" * Villkor: $f_4 \cdot f''_4 < 1$

$$f_4 \cdot f''_4 = 0.004$$

5.2.1 Säkerhet mot begynnande flytning i bruksgränstillstånd

kontroll_5_2_1 = "OK!" * Villkor: $\sigma < f_{yd_s}$

$$\begin{pmatrix} f_{yd_s} \\ \sigma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 275.0 \\ 122.7 \end{pmatrix} MPa$$

5.3.1 Kontroll av att flytled ej bildas i rörbrons övre del

kontroll_5_3_1 = "OK!" *

$$\text{Villkor: } \left[\left(\frac{N_{d_u}}{N_{cr}} \right)^{\alpha_c} + \left(\frac{M_{d_u}}{M_u} \right) \right] \leq 1.0$$

$$\left(\frac{N_{d_u}}{N_{cr}} \right)^{\alpha_c} + \left(\frac{M_{d_u}}{M_u} \right) = 0.685$$

5.3.1b Kontroll av kapacitet med avseende på uppträdande maximal normalkraft (enligt kontroll 5.4 men med $M_{d_u} = 0$ och ξ enligt handboken, bilaga 5)

kontroll_5_3_1b = "OK!" *

$$\text{Villkor: } \left[\left(\frac{N_{d_u}}{N_{cr_2}} \right)^{\alpha_{c_2}} \right] \leq 1.0$$

$$\left(\frac{N_{d_u}}{N_{cr_2}} \right)^{\alpha_{c_2}} = 0.222$$

5.3.2 Kontroll av att tillräcklig kapacitet finns i rörbrons nedre del

kontroll_5_3_2 = "OK!" * Villkor: $(N_d) < f_{yd_u} \cdot A_{s2}$

$$\begin{pmatrix} f_{yd_u} \cdot A_{s2} \\ N_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.5 \times 10^3 \\ 417.7 \end{pmatrix} \frac{kN}{m}$$

5.3.2b Kontroll av att tillräcklig kapacitet finns i rörbrons nedre hörndel

kontroll_5_3_2b = "OK!" * Villkor: $(N_d) < f_{yd_u} \cdot A_{s2}$

$$\begin{pmatrix} f_{yd_u} \cdot A_{s2} \\ N_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.5 \times 10^3 \\ 417.7 \end{pmatrix} \frac{kN}{m}$$

5.3.3.1 Kontroll av att skruvarnas kapacitet är tillräcklig mot skjuvbrott i skruven; F_{Rvd}

kontroll_5_3_3_1 = "OK!" *

Villkor: $n_{erf1} < n$

$$\begin{pmatrix} n \\ n_{erf1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10.0 \\ 4.7 \end{pmatrix} \frac{1}{m}$$

5.3.3.2 Kontroll av att skruvarnas kapacitet är tillräcklig mot hålkantbrott i plåten; F_{Rbd}

kontroll_5_3_3_2 = "OK!" *

Villkor: $n_{erf2} < n$

$$\begin{pmatrix} n \\ n_{erf2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10.0 \\ 8.6 \end{pmatrix} \frac{1}{m}$$

5.3.3.3 Kontroll av momentkapacitet i plåtskarv, F_{Rtd}

kontroll_5_3_3_3 = "OK!" *

Villkor: $n_{erf3} \leq n$

$$\begin{pmatrix} n \\ n_{erf3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10.0 \\ 4.9 \end{pmatrix} \frac{1}{m}$$

5.3.3.4 Kontroll mot överskridande av skruvförbandens kapaciteten vid kombinerad dragning och skjuvning

kontroll_5_3_3_4 = "OK!" *

$$\text{Villkor: } \left(\frac{F_{St}}{F_{Rtd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{Sv}}{F_{Rvd}} \right)^2 \leq 1*$$

$$\left(\frac{F_{St}}{F_{Rtd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{Sv}}{F_{Rvd}} \right)^2 = 0.313 *$$

5.4.1 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid ren dragning σ_{rd} i utmattningsgränstillstånd

kontroll_5_4_1 = "OK!" *

Villkor: $\sigma_{rd} \leq f_{rd}$

$$\begin{pmatrix} f_{rd} \\ \sigma_{rd} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 125.6 \\ 123.7 \end{pmatrix} MPa$$

5.4.2 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid ren skjuvning τ_{rd} i utmattningsgränstillstånd

kontroll_5_4_2 = "EJ OK!" *

Villkor: $\tau_{rd} \leq f_{rvd}$

$$\begin{pmatrix} f_{rvd} \\ \tau_{rd} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 75.3 \\ 83.8 \end{pmatrix} \text{MPa}$$

5.4.3 Kontroll mot överskridande av kapaciteten vid kombinerad dragning σ_{rd} och skjuvning τ_{rd} i utmattningsgränstillstånd

kontroll_5_4_3 = "EJ OK!" *

Villkor: $\left(\frac{\sigma_{rd}}{f_{rd}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{rd}}{f_{rvd}}\right)^2 \leq 1.1$

$$\left(\frac{\sigma_{rd}}{f_{rd}}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{rd}}{f_{rvd}}\right)^2 = 2.207$$

5.4.4 Kontroll av utmattning i plåt

kontroll_5_4_4 = "OK!" *

Villkor: $\sigma_{rd_plåt} \leq f_{rd_plåt}$

$$\begin{pmatrix} f_{rd_plåt} \\ \sigma_{rd_plåt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 246.8 \\ 209.1 \end{pmatrix} \text{MPa}$$

5.5.1 Kontroll av styvhet vid montering etc.

kontroll_5_5_1 = "OK!" *

Villkor: $\eta_m < \left(0.2 \frac{\text{m}}{\text{kN}}\right)$

$$\begin{pmatrix} 0.2 \frac{\text{m}}{\text{kN}} \\ \eta_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.200 \\ 0.038 \end{pmatrix} \frac{\text{m}}{\text{kN}}$$

(specialfall, rund sektion)

kontroll_5_5_1_rund = "OK!"

Villkor: $\eta_m < \left(0.13 \frac{\text{m}}{\text{kN}}\right)$

$$\begin{pmatrix} 0.13 \frac{\text{m}}{\text{kN}} \\ \eta_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.130 \\ 0.038 \end{pmatrix} \frac{\text{m}}{\text{kN}}$$

7. Beteckningar

Latinska gemener

a_{skarv}	skarvmått
c	halv våglängd
d	diameter på skruv
d_x, d_y	mått för kontaktyta från hjultryck
e_1	hålcentrum
f'	beräkningsparameter
f_1, f_2, f_3, f_4	funktionsuttryck som förenklade syfte används i framställning
f_{index}	hållfasthetsvärden för stålmaterial och skruvar (MPa) enligt BSK 99
h	höjd på rörprofil, mått från botten till toppen på trumman
h_{corr}	korrugeringens höjd för rörbro av korrugerad plåt
h_c	överfyllnadshöjd
h_{c_red}	effektiv överfyllnadshöjd
k	antal rader skruvar
m_t	tangentlängd
n	antal
p_{trafik}	ekvivalent trafiklast, linjelast
q_x	fördelat tryck från trafik
$t_{\text{plåt}}$	plåttjocklek
x, y	koordinater

Latinska versaler

A	tvärsnittsarea
A_x	avstånd mellan laster i tvärled
B_x	axelavstånd
C_a	förbandsklass
C_{a2}	förbandsklass för kontroll av utmattning i plåt
C_x	axelavstånd
D	rörets diameter
D_x	axelavstånd
E_j	tangentmodul för jordmaterial i kringfyllnaden
E_{jd}	dimensionerande tangentmodul för jordmaterial i kringfyllnaden
E_k	elasticitetsmodul
F_{Rbd}	skruvens dimensionerande kapacitet vid skjuvning vid brott i plåt
F_{Rtd}	skruvens dimensionerande kapacitet vid dragning
F_{Rvd}	skruvens dimensionerande kapacitet vid skjuvning vid brott i skruv
F_{St}	beräknad dragkraft vid dimensionerande last i brottgränstillstånd
F_{Sv}	beräknad tvärkraft vid dimensionerande last i brottgränstillstånd
H	valvhöjd
I	tröghetsmoment för röret per längdenhet
L_{best}	bestämmande längd i m
M_d	dimensionerande böjmoment
M_j	böjmoment av jordlast
M_t	böjmoment av trafiklast
M_u	moment vid fullständigt plasticiserat tvärsnitt
N_{cr}	knäckningslast för rörkonstruktioner i jord
$N_{c_{r_{el}}}$	knäckningslast för rörkonstruktioner i jord vid ideala elastiska förhållanden
N_d	dimensionerande normalkraft
N_j	normalkraft från jord
N_t	normalkraft från trafik
N_u	normalkraft vid fullständigt plasticerat tvärsnitt
P_x	punktlast
R_b	bottenradie
R_c	hörnradie
R_f	reduktionsfaktor som används vid små överyllnadshöjder
R_s	sidoradie
R_t	toppradie
S_{ar}	reduktionsfaktor för överlast beroende på valvverkan
S_v	beräkningsparameter
W	motstånsparameter
Z	plastiskt motståndsmoment

Grekiska gemener

α_c	beräkningsparameter enligt BSK 99
α	vinkel vid definition av tvärsnitt
β	exponent
$\delta_{hj\dd{a}ssa}$	höjning av rörets hjässa vid kringfyllnadsarbetet
ϕ	friktionsvinkel (index k används för karakteristisk, d för dimensionerande samt ö i förekommande fall för egenskaper kopplade till överfyllningen)
ϕ_t	normalt åtdragen skruv
ε	dynamikoefficient
γ	partialkoefficient (återfinns med många index)
γ_n	partialkoefficient för säkerhetsklass
η_m	styvhetsparameter använd i samband med bedömning av monteringsstyvhet
η_j	beräkningsparameter
η	Z/W, formfaktor vid böjning
κ	beräkningsparameter
ρ_{kf}	tunghet för jordmaterial upp till hjässans nivå (kringfyllning) (kN/m ³) index w för jord under grundvattenytan
ρ_2	medelvärde för tunghet för jordmaterial inom området h_c H/2 (kN/m ³)
$\rho_{\dd{o}f}$	medelvärde för tunghet över hjässans nivå inom området h_c (kN/m ³) index w för jord under grundvattenytan
ρ_{opt}	optimal densitet bestämd enligt Standard Proctor metod
ρ_s	kompaktdensitet för jordmaterial i fyllningen, vanligtvis gäller för grovkorning jord 25 à 26 kN/m ³
λ_f	styvhetsparameter som anger förhållandet mellan rörets och omgivande jods respektive styvheter (dimensionslös)
ξ	beräkningsparameter
σ	spänning
σ_v	vertikalt tryck i jorden under punktlast
ω	knäckningskraft/kraft vid plasticering, se BSK 99