

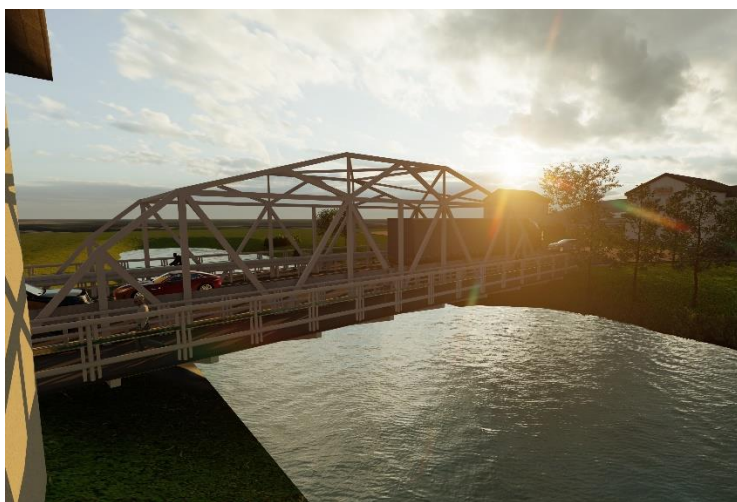
Innholdsfortegnelse vedlegg

1	Vedlegg A – Artikkel	2
2	Vedlegg B – Plakat A4-format.....	4
3	Vedlegg C – Laster	6
3.1	Egenlaster.....	7
3.2	Trafikklaster	7
3.2.1	Lastmodeller	7
3.3	Vindlaster	10
3.4	Lastkombinasjoner	12
3.4.1	Bruddgrense	12
3.4.2	Bruksgrense.....	14
4	Vedlegg D – Tabellsammenlikning av aluminium og stål	15
5	Vedlegg E - Oppbygging av modell	22
5.1	Knutepunkt.....	23
5.2	Fagverket.....	23
5.3	Dimensjonering av brukonstruksjon	24
5.3.1	Nedbøyning.....	24
5.3.2	Avstivere i toppen	24
5.3.3	Underbygning	25
5.4	Kontroller og dimensjonering med bruddlaster	26
5.4.2	De øvrige lastgruppene	40
5.5	Manuell kontroll for utsatte lastfordelinger	46
5.6	Sveiskapasitet.....	53
5.6.1	Konstruksjonsdeler og type sveis.....	53
5.7	Bruksgrensetilstand etter N400.....	60
5.8	Oppbygging av stålmodell	62
5.8.1	Kontroll av stålmodell i Robot.....	63
5.9	Bruksgrensekontroll for stålbru	68
6	Vedlegg G – Regneark for priser	70
6.1	Tilbud fra Hydal Aluminium Profiler	71
6.2	Beregning av meter sveis og pris	72
6.3	Material og total kostnader for aluminium	73
6.4	Stålpriser ferdig produsert (Kappet og sveiset).....	74
7	Vedlegg F – Python-script	75

1 Vedlegg A – Artikkel

Aluminiumsbru – Nysethvegen bru kan bli den første av sitt slag i Norge

Fra en ny bacheloroppgave ved NTNU fremkommer det at aluminium kan hevde seg, mot mer tradisjonelle byggematerialer som stål og betong, til bruk i bruonstruksjoner.



På Raufoss skal en 29 meter lang bru byttes ut. Som illustrasjonen viser kan et fagverksalternativ være en estetisk pen løsning.

Det finnes per i dag bare én kjørebru i kun aluminium i Norge. Det er en kassebru på Forsmo i Nordland. Nå sees det på andre brudesign med bruk av aluminium som materiale. I forbindelse med fergefri E39-prosjektet er det utforsket mulighetene for en hengebru (1700m) utført i aluminium på krysningen Stord – Os, over Langenuen. Studentene ved NTNU har i sin oppgave utforsket muligheten for ei fagverksbru i aluminium til Nysethvegen i Raufoss. Brua er 29 meter lang, og har to kjørefelt og et gangfelt på hver side av aluminiumsfagverket.

Bilde: Illustrasjonsbilde av ny bru i aluminium

På oppdrag for SINTEF

Tre studenter ved Institutt for konstruksjonsteknikk ved NTNU i Trondheim har skrevet oppgave for SINTEF, som er en viktig aktør i forskningsprosjektet AluBridge.

Det ble i starten av 2020 startet opp et forskningsprosjekt, AluBridge, som har til hensikt å prosjektere ei ny bru i aluminium i Norge. Det er planlagt at ei aluminiumsbru skal prosjekteres i 2021, og installeres i starten av 2022. Det ble bestemt i februar i år at den nye brua skal erstatte en eksisterende bru i Raufoss sentrum.

Mange fordeler med aluminium

Aluminium er et lettmetall med høyt styrke/vekt-forhold og god korrosjonsbestandighet. Bruken av aluminium vil gi bruer en lett bærekonstruksjon som vil kreve minimalt med vedlikeholdskostnader. Dette er et stort fortrinn i forhold til stål, hvor egenvekt er betydelig høyere og det er forbundet store vedlikeholdskostnader gjennom bruas levetid. Aluminium er også 100 % resirkulerbart, noe som er viktig å tenke på for å nå klimamålene som er satt for 2050.

Resultat av oppgaven

Resultater fra styrkeanalyser og kostnadsberegninger som er utført av studentene, viser at aluminium kan være et godt alternativ for bruk i Nysethvegen bru. Denne konklusjonen er basert på sammenligning mot en tilsvarende stålbru.



Bilde: Illustrasjonsbilde av ny bru i aluminium

Det vil derimot kreves flere beregninger av aluminiumsbrua før en eventuell bygging. Spesielt vil det kreves dypere analyser i utmattingsproblematikk og optimalisering rundt varmepåvirkede soner i konstruksjonen.

2 Vedlegg B – Plakat A4-format

Mulighetsstudie av aluminium i Nysethvegen bru – en materialteknisk og økonomisk sammenligning av aluminium og stål

Feasibility of Aluminium in Nysethvegen bridge – a Comparison of Mechanical and Economical Performances in Aluminium and Steel

Prosjektnr 2021-19

Av: Rune Nysted, Markus Myrvoll, Hans Fredrik Gran Urdahl

Intern veileder: Arne Mathias Selberg

Ekstern kontakt: SINTEF

Gamle Nysethvegen bru i Raufoss er utskiftingsklar, og i den sammenhengen skal det vurderes bruk av aluminium i den nye brukonstruksjonen.

Det er ved bruk av analyseverktøy, gjeldende håndbøker og standarder utviklet et forslag til en aluminiumsutførsel for brua. For sammenlikning er det også dimensjonert en liknende stålbru.

Høyt styrke/vekt-forhold i kombinasjon med minimalt vedlikehold, gjør at aluminium kan hevde seg godt mot mer tradisjonelle brumaterialer i fremtiden.



3 Vedlegg C – Laster

3.1 Egenlaster

Egenlaster hentet fra Statens Vegvesen sine håndbøker N400 og Eurokode-1-1.

Egenlast belegg vei: **3,5kN/m²** (N400)

Egenlast belegg GS: **2kN/m²** (N400)

Egenlast rekkverk: **0,5kN/m** for hvert rekkverk.

Egenlast aluminium: **27kN/m³** (EK-1-1)

Volum av aluminiumsdekke er beregnet etter top-dekkepanel fra *Langenuen rapport vedlegg K* til å være cirka **0,043m³/m²**

Samlet egenlast kjørebane (Aludekke+Belegg) = **4,67kN/m²**

Samlet egenlast gangfelt (Aludekke+Belegg) = **3,16kN/m²**

3.2 Trafikklaster

EK-1-2

Kjørelinjer:

Veibredde, $w = 7,5m$

Kjørefeltbredde, $w_l = 3m$

Antall kjørefelt, $n_1 = \text{Int} \left(\frac{w}{3} \right) = 2$

Resterende felt = 1,5m

3.2.1 Lastmodeller

Lastmodell 1 (LM1): Boggilast + Jevnt fordelt last der:

- Boggilast = $\alpha_Q Q_k$ per aksel
- Jevnt fordelt last = $\alpha_q q_k$

Utdrag fra nasjonalt tillegg i EK1-2 for korreksjonsfaktorer for laster i LM1:

NA.4.3.2 Lastmodell 1

NA.4.3.2(3) Følgende korreksjonsfaktorer skal benyttes:

$$\alpha_{Qi} = 1,0 \quad \text{for } i = 1, 2 \text{ og } 3$$

og

$$\alpha_{q1} = 0,6$$

$$\alpha_{qi} = 1,0 \quad \text{for } i > 1$$

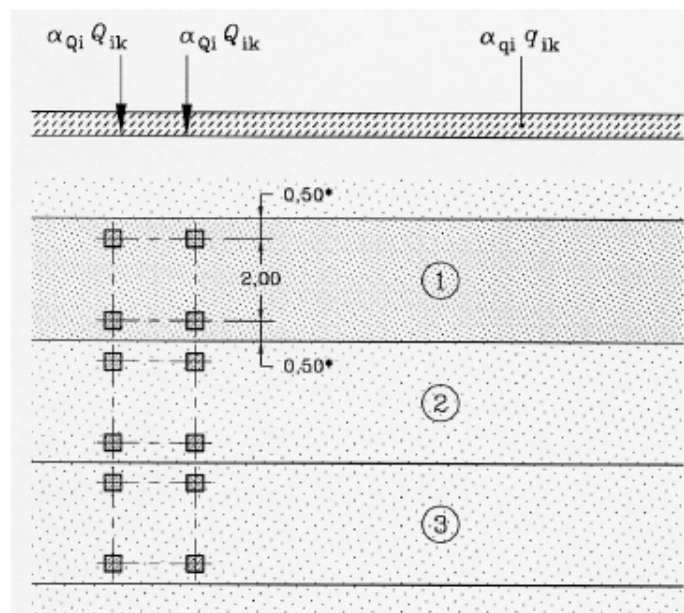
$$\alpha_{qr} = 1,0$$

Karakteristiske lastverdier og plassering av last etter tabell 4.2 og figur 4.2a i EK1-2:

Table 4.2 - Load model 1 : characteristic values

Location	Tandem system <i>TS</i>	<i>UDL</i> system
	Axle loads Q_{ik} (kN)	q_{ik} (or q_{ik}) (kN/m ²)
Lane Number 1	300	9
Lane Number 2	200	2,5
Lane Number 3	100	2,5
Other lanes	0	2,5
Remaining area (q_{ik})	0	2,5

The details of Load Model 1 are illustrated in Figure 4.2a.



Lastmodell 2 (LM2): Enkel aksellast

- Aksellasten = $\beta_q Q_{ak}$, der $\beta_q = 1$ og $Q_{ak} = 400kN$ i henhold til EK1-2 4.3.3 og NA4.3.3

Lastmodell 3 (LM3): Spesialtransport: Ikke med i beregningsgrunnlag.**Lastmodell 4 (LM4): Folkelast: $= 5kN/m^2$**

Lastmodell	Kjørefelt 1	Kjørefelt 2	Resterende felt
LM0	$3 * 360kN$	$3 * 360kN$	-
LM1	$2 * \alpha_{q1} Q_{1k} = 2 * 300kN$	$2 * \alpha_{q2} Q_{2k} = 2 * 200kN$	$2,5kN/m^2$
	$\alpha_{q1} q_{1k} = 5,4kN/m^2$	$\alpha_{q2} q_{2k} = 2,5kN/m^2$	
LM2	400kN.	400kN	-
LM3	-	-	-
LM4	$5kN/m^2$	$5kN/m^2$	$5kN/m^2$

Horisontallaster:

Bremselast definert etter EK1-2 (4.6):

$$Q_{Ik} = 0,6\alpha_{q1}(2Q_{1k}) + 0,10\alpha_{q1}q_{1k}w_lL$$

$$Q_{Ik} = [0,6 * 600 + 0,10 * 5,4 * 3 * 29]kN = 407kN$$

$$180\alpha_{q1} \leq Q_{Ik} \leq 900$$

Laster fra akselerasjon betraktes som likeverdig med bremselast etter EK1-2 4.4.1(5)

Tverrkrefter

Siden brua er rettstrukket med radius $r > 1500m$ vil det ikke opptre sentrifugalkrefter.

Tverrkrefter forårsaket av bremsing forårsaket av bremsing settes til $0,25 * Q_{Ik} = Q_{trk} = 102kN$ etter EK1-2 4.4.2(4)

3.3 Vindlaster

Vindlast

NS-EN 1991-1-4 Vindlaster

Vindklasse I

Terrengruhetskategori II

$$V_{bo} := 22 \frac{m}{s}$$

Referansevindhastighet
Vestre Toten

$$C_{dir} := 1.0$$

Retningsfaktor anbefalt verdi

$$C_{season} := 1.0$$

Årstidsfaktor anbefalt verdi

$$C_{alt} := 1.0$$

Nivåfaktor lik 1 fordi
 $H=317\text{moh} < H_0=900\text{moh}$

$$C_{prob} := 1.0$$

Sannsynlighetsfaktor for
overskridelse. Settes til 1.0
for returperiode på 50år.
5.4.3.3 HBN400

$$V_b := V_{bo} \cdot C_{dir} \cdot C_{season} \cdot C_{alt} \cdot C_{prob} = 22 \frac{m}{s}$$

Basisvindhastighet
(NA4.1)

Stedsvindhastighet

$$C_o(z) := 1.0$$

terrengformfaktor 4.3.1

Ruhetsfaktor $C_r(z)$ er angitt i 4.3.2 Vindlaster. Bruker også tabell 4.1.

$$z_0 := 0.05\text{m}$$

$$z_{min} := 2 \text{ m}$$

$$z_{maks} := 200 \text{ m}$$

$$z_{0II} := 0.05 \text{ m}$$

Høyde over terreng $z := 7 \text{ m}$

Terrengruhetsfaktor

$$k_r := 0.19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0II}} \right)^{0.07} = 0.19$$

$$z_{min} < z < z_{maks}$$

$$\text{Ruhetsfaktor } Cr(z) \quad C_r := k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0.939$$

$$\text{Stedsvindhastighet } V_m(z) \quad V_m := V_b \cdot C_r \cdot C_o(z) = 20.656 \frac{m}{s} \quad (4.3)$$

Vindkasthastighetstrykk 4.5

$$\text{Lufttetthet settes til} \quad \rho := 1.25 \frac{kg}{m^3}$$

$$(4.10) \quad q_b := \frac{1}{2} \rho \cdot V_b^2 = 302.5 \text{ Pa}$$

$C_e(z)$ bestemmes fra figur 4.2

$$C_e(z) := 2.1$$

$$(4.8) \text{ Vindkasthastighetstrykket} \quad q_p := C_e(z) \cdot q_b = 635.25 \text{ Pa} \quad Pa := \frac{N}{m^2}$$

Kan også regnes ut som:

$$k_1 := 1.0$$

$$C_o(z) := 1.0$$

$$(4.7) \quad I_v := \frac{k_1}{C_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} = 0.202 \quad \text{Turbulensintensitet} \quad z_{min} < z < z_{max}$$

$$(4.8) \text{ Vinkasthastighetstrykket} \quad q_p := (1 + 7 \cdot I_v) \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_m^2 = 644.418 \text{ Pa}$$

Ser ett lite avvik på de to bergningsmetodene. Det kommer nok av unøyaktig avlesning fra tabell for C_e . Går videre med 644Pa inn i Robot.

Ifølge 8.1(4) skal referansevindhastigheten reduseres til $V_b^* = 23m/s$ ved vindlast samtidig som trafikklast for å begrense lasten. Referansevindhastigheten på stedet er $V_b = 22m/s$, altså mindre enn hva som anbefales. Derfor brukes 22m/s både for samtidighet med trafikklast og uten.

For vegbruer i vindlastklasse I og II skal vindflaten av kjøretøy antas som en rektangulær flate med høyde 2,0 m regnet fra kjørebans overside. Det skal ikke regnes med samtidig tillegg fra rekkverk. Lengden på kjøretøyets vindflate (og trafikklasten) settes lik det som samlet sett gir ugunstigst lastvirkning.

Som en forenkling plasseres lasten fra kjøretøy inn som en linjelast. Og fordi det skal ses på ugunstigst lastvirkning plasseres denne over hele bruas spenn.

$$\text{linjelast} := q_p \cdot 2 \text{ m} = 1.289 \frac{kN}{m}$$

3.4 Lastkombinasjoner

3.4.1 Bruddgrense

Tabell NA.4.4a – Samtidige grupper av trafikklaster (karakteristiske verdier av påvirkninger fra sammensatte grupper av trafikklasterlast)

		KJØREBANE						GANGBANE OG FORTAU
Lastmodell		Vertikale krefter				Horisontale krefter		Bare vertikale krefter
Referanse		4.3.2	4.3.3	4.3.4	4.3.5	4.4.1	4.4.2	5.3.2-(1)
Lastsystem		LM1 (Boggilast og jevnt fordelt last)	LM2 (Enkel aksling)	LM3 (Spesialkjøretøyer)	LM4 (Belastning i form av menneskemengde)	Bremsekrefter og akselerasjonskrefter ^a	Sentrifugalkrefter og tverrkrefter ^a	Jevnt fordelt last
Lastgrupper	gr1a	Karakteristisk verdi						Kombinasjons-verdi ^b
	gr1b		Karakteristisk verdi					
	gr2	Ofte forekommende verdi				Karakteristisk verdi	Karakteristisk verdi	
	gr3 ^d							Karakteristisk verdi ^c
	gr4				Karakteristisk verdi			Karakteristisk verdi
	gr5	Se tillegg A		Karakteristisk verdi				
Påvirkning fra dominerende komponent (betegnet som komponent som tilhører gruppen)								
^a For gr1a brukes karakteristiske verdier for lastreferanse 4.4.1 (bremsekrefter og akselerasjonskrefter) og lastreferanse 4.4.2 (sentrifugalkrefter og tverrkrefter). Sentrifugalkrefter og bremsekrefter eller akselerasjonskrefter opptrer ikke samtidig i gr1a.								
^b For gr1a brukes kombinasjonsverdi for lastreferanse 5.3.2(1) (jevnt fordelt last på gangbane/fortau), dvs. 2,5 kN/m ² .								
^c Se 5.3.2.1(2) Ved tosidig gangbane/fortau regnes det ene belastet der det er ugunstigere enn at begge er belastet samtidig.								
^d Denne lastgruppen er ikke aktuell der gr4 benyttes.								

Tabell NA.A2.1 – Verdier av ψ -faktorer for vegbruer

Påvirkning	Symbol		ψ_0	ψ_1	$\psi_2^{(5)}$	$\psi_{1,infq}^{(1)}$
Trafikklaster (se NS-EN 1991-2, tabell 4.4)	gr1a (LM1 + horisontale laster + laster på gangbaner/fortau)	Boggilast (BL)	0,7 ³⁾	0,7	0,2/0,5	0,8
		Jevnt fordelt last (JFL)	0,7 ³⁾	0,7	0,2/0,5	0,8
		Horisontale laster	0,7 ³⁾	0,7	0,2/0,5	0,8
		Laster på gangbaner/fortau ²⁾	0,7 ³⁾	0,7	0,2/0,5	0,8
	gr1b (enkel aksling)		0,7 ³⁾	0,7	0,2/0,5	0,8
	gr2 (horisontale krefter)		0,7 ³⁾	0,7	0,2/0,5	0,8
	gr3 (laster på gangbaner/fortau)		0,7 ³⁾	0,7	0,2/0,5	0,8
	gr4 (LM4 – Laster fra ansamling av mennesker)		0,7 ³⁾	0,7	0,2/0,5	0,8
	gr5 (LM3 – Spesialkjøretøyer)		-	-	-	-
Vindkrefter	F_{wk} - Vedvarende dimensjonerende situasjoner		0,7	0,6	0/0,5	0,8
	F_{wk} - Under utførelse		0,8	-	-	-
	F_w^*		0,7	0,6	0/0,5	0,8
Temperatur ⁴⁾	T_k		0,7	0,6	0/0,5	0,8
Snølaster	$Q_{sn,k}$ - På tak o.l.		0,7	0,6	0,2/0,5	0,8
	$Q_{sn,k}$ - Under utførelse		0,8	-	-	-
Laster i byggetilstand	Q_c		1,0	-	1,0	-
Istrykk	-		0,7	0,6	0/0,5	0,8
Bølger og strøm	-		0,7	0,6	0/0,5	0,8
Vanntrykk, variabel del	-		0,7	0,6	0/0,5	0,8
Jordtrykk, variabel del	-		0,7	0,6	0/0,5	0,8
Last fra lagerfriksjon	-		0,7	0,6	0/0,5	0,8
Øvrige variable laster	-		0,7	0,6	0/0,5	0,8

¹⁾ $\psi_{1,infq}$ er en faktor beregnet på å definere sjeldent forekommende laster.

²⁾ Kombinasjonsverdien for laster på gangbaner/fortau angitt i tabell 4.4a i NS-EN 1991-2, er en redusert verdi, og ψ -faktorene gjelder for denne verdien.

³⁾ Der vindlasten behandles som den dominerende lasten, representert ved F_{wk} , bør ψ_0 for trafikklaster settes lik 0, jf. også A2.2.2(5).

⁴⁾ Påvirkning fra temperatur medtas i alle lastkombinasjoner, også i bruddgrensetilstand, dersom virkningen er ugunstig.

⁵⁾ Ved beregning av rissvidder i henhold til NS-EN 1992 for lastkombinasjonen "tilnærmet permanent" benyttes verdien 0,5. Verdiene 0,2 respektive 0 kan benyttes ved beregning av langtidseffekter for tidsavhengige egenskaper.

ψ_0	Faktor for kombinasjonsverdi for en variabel påvirkning
ψ_1	Faktor for ofte forekommende verdi for en variabel påvirkning
ψ_2	Faktor for en tilnærmet permanent verdi for en variabel påvirkning AC

Gruppe	Situasjon	Situasjon	Situasjon
Gr1a	LM1	Kombinasjonsverdi(2,5kN/m2)	-
Gr1b	LM2	-	-
Gr2	0,7*LM1	Q_{Ik}	Q_{rtk}
Gr3	Sløyfes fordi Gr4 er inkludert	-	-
Gr4	LM4	-	-

Tabell NA.A2.4(B) – Dimensjonerende verdier for laster (STR/GEO) (Sett B)

Vedvarende og forbigående dimensjonerende situasjoner	Permanente laster		Forspenning	Dominerende variabel last (*)	Øvrige variable laster (*)
	Ugunstig	Gunstig			
(Ligning 6.10 a)	$\gamma_{G,sup} G_{k,sup}$	$\gamma_{G,inf} G_{k,inf}$	$\gamma_p P$	$\gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
(Ligning 6.10 b)	$\xi \gamma_{G,sup} G_{k,sup}$	$\gamma_{G,inf} G_{k,inf}$	$\gamma_p P$	$\gamma_{Q,1} Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$
(*) Variable laster er de som er oppført i tabellene NA.A2.1 til NA.A2.3.					
<p>MERKNAD 1 Det skal i bruddgrenstilstanden påvises ved bruk av ligningene 6.10 a og 6.10 b at bruers konstruksjonsoppførsel er i overensstemmelse med antatt beregningsmodell, ut over mindre endringer (f.eks. oppløft fra lager, strekkpeler som det ses bort fra, flyteledd osv.) som kan aksepteres forutsatt at konstruksjonen dimensjoneres i overensstemmelse med de endrede forutsetningene.</p> <p>MERKNAD 2 Det benyttes følgende sett med γ- og ξ-verdier ved bruk av uttrykk 6.10a og 6.10b:</p> <p>$\gamma_{G,sup}$ = 1,35 for permanent last, untatt de som er listet under ^{1) 2)}</p> <p>1,00 for irreversible deformasjonslaster ³⁾</p> <p>1,20 for permanent del av vanntrykk</p> <p>$\gamma_{G,inf}$ = 1,0 for permanent last ^{1) 2)}</p> <p>0 for irreversible deformasjonslaster ³⁾</p> <p>1,0 for vanntrykk</p> <p>ξ = 0,89 for egenvekt ¹⁾</p> <p>γ_p = verdier gitt i de aktuelle Eurokodene ⁴⁾</p> <p>γ_Q = 1,35 for vegtrafikk fra kjøretøyer og fotgjengere, hvis ugunstig (0 hvis gunstig)</p> <p>γ_Q = 1,5 for jernbanetrafikk, hvis ugunstig (0 hvis gunstig). For lastmodell SW/2 benyttes $\gamma_Q = 1,2$</p> <p>γ_Q = 1,60 for laster fra vind, bølger og strøm, hvis ugunstig (0 hvis gunstig)</p> <p>γ_Q = 1,20 for temperaturlast, hvis ugunstig (0 hvis gunstig)</p> <p>γ_Q = 1,35 for last fra lagerfriksjon og variabel del av vanntrykk, hvis ugunstig (0 hvis gunstig)</p> <p>γ_Q = 1,50 for øvrige variable laster, hvis ugunstig (0 hvis gunstig)</p> <p>¹⁾ Disse verdiene gjelder for egenvekt av bærende og ikke-bærende konstruksjonsdeler, ballast, jord, flyttbare laster osv.</p> <p>²⁾ De karakteristiske verdiene for laster av samme opprinnelse, for eksempel egenvekt, multipliseres med $\gamma_{G,sup}$ hvis resultatet i form av den totale lastvirkningen er ugunstig, og med $\gamma_{G,inf}$ hvis resultatet i form av den totale lastvirkningen er gunstig. Dette gjelder også om forskjellige materialer er brukt.</p> <p>³⁾ Irreversible deformasjonslaster kan være bl.a. differansesetning, kryp og svinn. For γ-verdier for svinn vises til NS-EN 1992-1-1. Se også NS-EN 1991 til NS-EN 1999 for eventuelle øvrige γ-verdier som skal brukes for påførte deformasjoner. Irreversible deformasjonslaster skal alltid tas med dersom de har ugunstig virkning.</p> <p>⁴⁾ Der dette er aktuelt, gjelder verdiene også for indirekte virkninger av spennkrefter, dvs. som tvangskrefter i statisk ubestemte konstruksjoner.</p> <p>MERKNAD 3 Jf. fotnote 2 over. Se også A2.3.1 (2).</p> <p>MERKNAD 4 For spesielle påvisninger kan verdiene for γ_G og γ_Q igjen deles inn i verdiene γ_g og γ_q og modellens usikkerhetsfaktor γ_{sd}. En verdi for γ_{sd} som ligger mellom 1,05 til 1,15, kan normalt benyttes.</p> <p>Mer detaljerte regler for dette kan gis for det enkelte prosjekt.</p> <p>MERKNAD 5 For laster fra vann som ikke er dekket i denne tabellen eller av NS-EN 1997 (f.eks. rennende vann), kan lastkombinasjonene som skal brukes, angis for det enkelte prosjekt.</p>					

Bruddgrensetilstand -ULS

Laster

Egenvekt - G

Trafikklast – TL

Vindlast – VL

Vindlast samtidig med trafikk – VTL

Gangfeltlast samtidig med trafikk - GT

STR (Sett B)	Dominerende	G	TR	VTL
Gr1a(6.10a)	TR-	1,35	0,95	1,12
Gr1a(6.10b)	TR-	1,20	1,35	1,12
Gr1b(6.10a)	TR-	1,35	0,95	1,12
Gr1b(6.10b)	TR-	1,2	1,35	1,12
Gr2(6.10a)	TR-	1,35	0,95	1,12
Gr2(6.10b)	TR-	1,2	1,35	1,12
Gr4(6.10a)	TR-	1,35	0,95	-
Gr4(6.10b)	TR-	1,2	1,35	-

3.4.2 Bruksgrense

Funksjonskravet til bruer er gitt i HBN 400, kapittel 3.6.1 og sier at brukonstruksjonen ikke skal ha større nedbøyning enn $L/350$ for noen lastplassering (1). Her er L lik lengden av det betraktete spenn. Det er også angitt at denne kontrollen utføres med karakteristisk trafikklast alene. For denne brua vil maksimal nedbøyning være

$$\frac{29000 \text{ mm}}{350} = 82.9 \text{ mm}$$

Nedbøyningen i brukonstruksjonen som kommer av permanente laster, inkludert langtidseffekter, gjør at overhøyden må dimensjoneres i henhold til dette. HBN400 sier at for bruer med overliggende bæresystem skal krav til fri høyde kontrolleres etter kombinasjon ofte forekommende, bruksgrensetilstand. NS-EN 1990 gir ofte forekommende kombinasjon:

$$\sum G_{k,j} + P + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum \psi_{2,i} Q_{k,i} \quad (6.15b)$$

4 Vedlegg D – Tabellsammenlikning av aluminium og stål

Hva er viktigst for ei brukonstruksjon?

I sammenligningen under er det ulike kategorier som belyser egenskaper og aspekter rundt vurderingen av hva som kan regnes som mer viktig i ei bru. Tabellen har en vektet karakterskala i hver kategori, og høye karakter angir det beste utfallet for brua. Karakter 6 er maks uttelling i kategoriene.

Karakterer som kommer frem etter en kvantitativ forskningsbasert vurdering eller en matematisk formel er merket *. Karakterene er satt etter en kvalitativ vurdering basert på tilgjengelig litteratur og egne vurderinger er merket med **. Sammenligningen og karaktergivingen i de forskjellige kategoriene er forsøkt å være politisk nøytral.

	Aspekter og egenskaper	Vekting for viktigheten i brua	Sammenligning			
			Aluminium		Stål	
			Kommentar	Vurdering Karakter	Kommentar	Vurdering Karakter
Forskning, standarder og erfaring	Forskning på bruk i brukonstr.	6	Lite forskning gjort i Norge. Noe mer i utlandet.	3**	Veldig mye forskning. Velkjent.	6**
	Standarder,	6	Standardisert, men mindre kjent materiale for norske bruingeniører.	6**	Standardisert. Gode håndbøker på norsk. Kjent for ingeniører.	6**
	Retningslinjer og støtte-litteratur	6 –	Lite retningslinjer og støttelitteratur som er utarbeidet. Baserer seg på Eurokode.	2**	Gode retningslinjer og støttelitteratur. Eget kapittel for utforming i N400 – bruprosjektering.	6**
	Erfaring med bru-	6	Mindre kjent. Bare ei bru i Norge som er bygget (Forsmo	2**	Godt kjent og fortrukket byggemateriale	6**

	dimensjonering		bru). Mer i utlandet.		både i Norge og i utlandet.	
	SUM	24	13 24 <p>I Norge har stål vært det foretrukne byggematerialet i bruer på grunn av mye forskning, standarder, gode retningslinjer og erfaring. Aluminium kommer dårlig ut i denne kategorien siden det regnes som relativt nytt materiale for bruer, og det er lite retningslinjer og erfaring med brudimensjonering i aluminium.</p>			
Vurdering av materialegenskaper	Styrke/vekt-forhold	5	Lav egenvekt (lav tetthet), og høy styrke/vekt-forhold ved legering.	5*	Ok styrke/vekt-forhold. Her S355 stål (legering av jern).	3*
	Legeringer	4	Godt utvalg til alle formål. Gode egenskaper.	4**	Godt kjent, og god egenskaper.	4**
	Profil	4	Begrenset størrelse på presse av ekstruderte profiler. Produksjon kan gjøres raskere enn for stål.	2**	Får profiler i de dimensjonene man trenger.	4**
	Design	2	Stor frihet til arkitektonisk, design detaljering og utforming.	2**	Begrensinger. Standardiserte profiler. Må sveise.	1**
	Sveising	5	Usikkerhet rundt sveiste forbindelser.	2**	Gode sveise-egenskaper.	5**

			Svekkelse av materialet rundt sveis(HAZ)		Veldig mye brukt.	
Andre sammenføyningsmetoder	3	Korrosjonsproblem i kontakt med edlere metall. F.eks. stålbolter. Kan dog isoleres.	2**	Egner seg godt til bolting. Veldig mye brukt.	3**	
Korrosjonsbestandighet	5	Veldig god motstand. Vedlikeholdsfritt	5**	Store kostnader tilknyttet overflatebehandling for beskyttelse.	1**	
Utmatting	4	Utmattingsproblematikk. Må undersøkes nærmere. Når ikke en grenseverdi.	2**	Liten problemer med utmatting. Når en utmattingsgrense hvor materialer ikke svekkes mer.	4**	
SUM	32	<div><div>24</div><div>25</div></div> <p>Fra vurderingen av materialegenskaper i bruer er det stål som kommer best ut. Det er kjente konstruksjonsprinsipper og mye forskning på materialegenskaper som gir høy score i kategoriene for profiler, sveising og utmatting. Det er derimot mye vedlikeholdskostnader.</p> <p>For aluminium er styrke/vekt-forholdet og korrosjonsbestandighet to materialegenskaper som er gunstige for en brukonstruksjon. Det er likevel flere utføringer som det må gjøres mer forskning for å finne gode løsninger på. Spesielt med tanke på sveising (HAZ) og utmatting. Aluminium har fått lav score i de kategoriene hvor det er usikkerhet i materialegenskaper</p>				

Pris på materiale	Pris/vekt-forhold [dollar/tonn]	6	Høy pris per tonn, men høyt styrke/vekt-forhold. 2400dollar/tonn (29.04.21)	4**	Lavere pris per tonn, men lavere styrke/vekt-forhold. Ikke fastsatt, varierer med prisene på råjern	5**
	Pris-sensitivitet	4	Prissensitiv råvare. Råvareprisen har variert mye de siste 5 årene. Fra 1. jan 2020 til 1. jan 2021 har pris på aluminium steget 50% (48).	2**	Litt mindre prissensitiv råvare over tid. Har fått tilsvarende prisløft det siste året.	3**
	SUM	10	<div> <div>6</div> <div>8</div> </div> Prisen på aluminium og stål har spesielt det siste året variert mye. Aluminium har en høyere pris/vekt-forhold enn stål, men vekten til en bru i aluminium vil være 1/2 til 1/3 av vekten til en tilsvarende bru i stål. Begge metallene har fått en 50% råvare-prisøkning på ett år, 2020-2021. Det er ikke gitt at trendene i prisutvikling for metallene vil følge hverandre videre, så det må i hvert prosjekt kostnadsberegnes hva som er mest gunstig.			
Prosjektgjennomføring og kostnad	Førstegangs-investering. Materiale og prosjektering	6	Førstegangs-investeringen antas noe dyrere. Livløpskostandene vil dog utjevne total kostnad. Usikkert, vil variere fra konstruksjon til konstruksjon.	4**	Muligens noe rimligere førstegangs-investering, men påløper store livløps-kostnader.	4**

	Transport og Leveranse-sikkerhet	6	Mye lokal produksjon flere steder i Norge. God tilgang på kortreist leveranse. Lav vekt/transport-kostnad.	6**	God tilgang på kortreist leveranse. Høy vekt/transport-kostnad.	5**
	Montering	6	Montering blir på lik linje med stål.	4**	Middels investerings-kostnad	4**
	Drift og vedlikehold	6	Lite løpende kostnader. Nesten ingen vedlikehold. Trenger ikke overflatebehandling	6**	Betydelig løpende kostnader forbundet med vedlikehold og drift. Viktig aspekt for total vedlikehold - overflate-behandling av bruer i stål.	2**
	SUM	24	<div>20</div> <div>15</div> <p>De senere årene har aluminiumbruer kommet gunstigere ut i kostnadsberegninger. Aluminium kan være kostnadseffektivt i flere bruprosjekter hvor det ellers ville blitt brukt stål eller betong.</p> <p>For en bru i aluminium vil drift- og vedlikeholdskostnader være veldig liten, så fremt ikke utmattingsproblemer oppstår.</p>			

Miljø og bærekraft	Produksjon og profiler	4	Miljøvennlig produksjon med bruk av norsk vannkraft. Produksjonen av aluminiumprofiler kan produseres fortere enn for stål.	4*	Miljøvennlig produksjon med bruk av vannkraft.	3*
	Gjenvinning og resirkulering	6	Veldig gode resirkulering-egenskaper, 100% resirkulerbart. Lavere CO2-regnskap i slutten av livsløpet enn for stål. (45)	6*	Også 100% resirkulerbart	4*
	SUM	10	10			
I kategorien for miljø og bærekraft er det aluminium som kommer best ut. Produksjonen og resirkuleringen av aluminium gjøres med lavere CO ₂ -regnskapet til slutt, så fremt at resirkulering skjer i nærheten. Begge metallene er 100% resirkulerbare.						

5 Vedlegg E - Oppbygging av modell

5.1 Knutepunkt

Fordeling av knutepunkt:

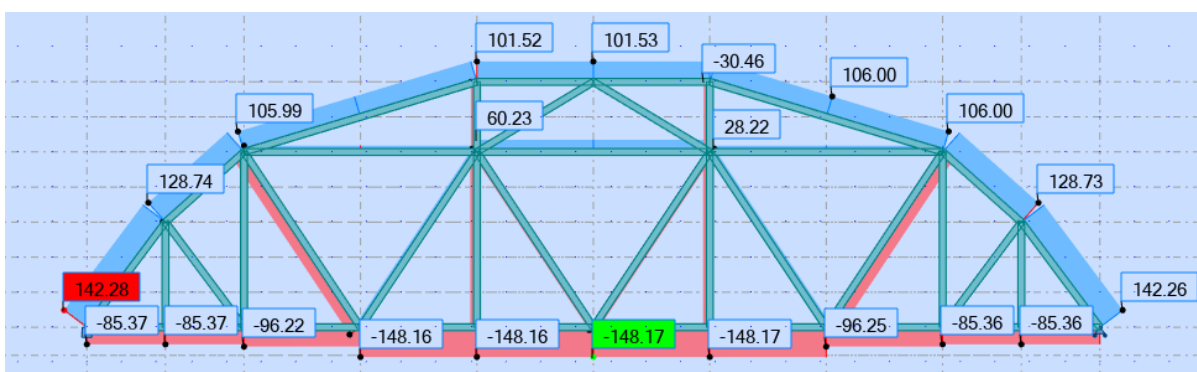


Krefter som må opptas i knutepunkt med laster fra R412

Punkt	Kraft Fz (kN)
1	105
2	115
3	235
4	255
5 (midt på)	310
6	255
7	235
8	115
9	105

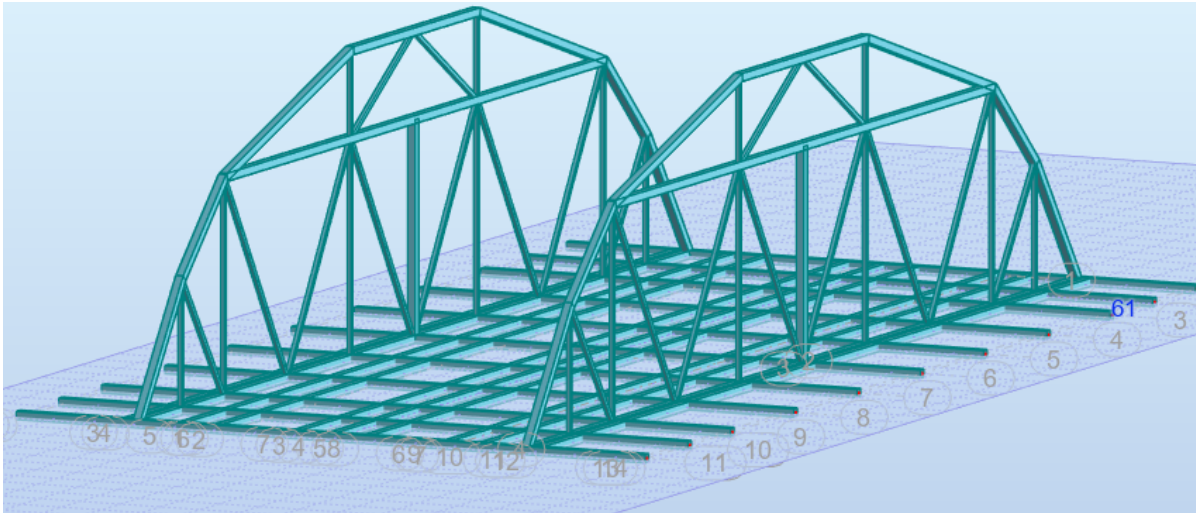
5.2 Fagverket

Spenningsfordeling i fagverket med påførte krefter fra tabellen ovenfor



5.3 Dimensjonering av brukonstruksjon

Skissering av 3-d modell med 200x200x10 for tværr- og langbærere



5.3.1 Nedbøyning

For videre konstruering av konstruksjon vil det fokuseres på statens vegvesens krav for nedbøyning. Kravet som stilles er spesifisert i vedlegg A og maks nedbøyning for denne brua vil være 82,9mm. Denne kontrollen skal gjøres med karakteristisk trafikklast alene.

Med tanke på stadiet konstruksjon befinner seg nå vil det settes inn aktuelle trafikklast for dimensjonering etter nedbøyning. Lastmodell LM1 med boggisystem på midten (uten gangfeltlast) vil være den modellen som forårsaker størst nedbøyning og vil være dimensjonerende for deformasjon i brukonstruksjonens brubane.

For å redusere nedbøyning må konstruksjonen gjøres stivere. Første steg blir avstivere i toppen av konstruksjon, denne vil også ha en rolle når vindlast og andre horisontallaster innføres. Det andre steget vil være underbygning på konstruksjonen.

5.3.2 Avstivere i toppen

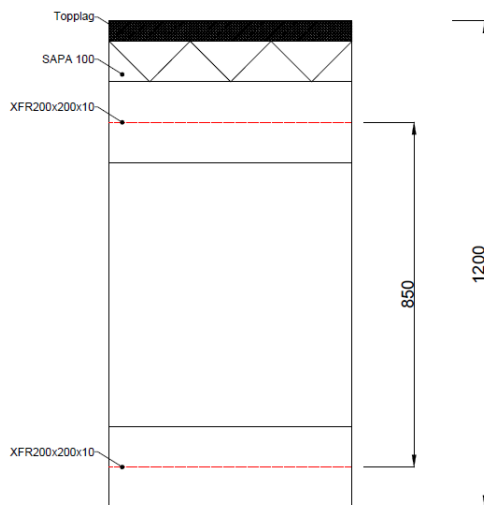
På grunn av nødvendig lengde av diagonale staver i toppen er over 9m (11,94m) kan det ikke brukes XFR200x200x10, det settes derfor inn XFR100x100x10-profiler.

5.3.3 Underbygning

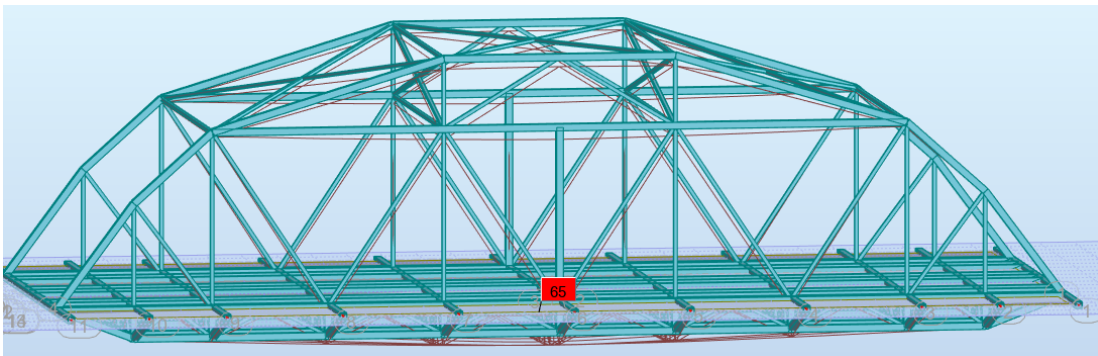
For underbygning vil det på grunn av dimensjonering etter 200års-flom være nokså strenge begrensninger med tanke på høyde. Siden det dimensjoneres med en underhøyde som er maks 1,2m under overflate vegbane vil følgende data være dimensjonerende for høyde mellom undergurt og underliggende bjelker:

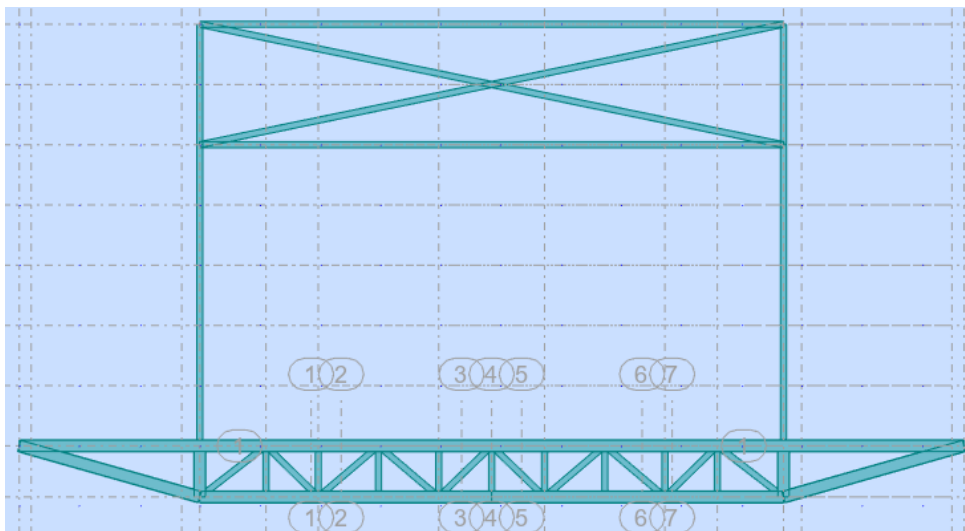
- Epoxy-asfaltlag: 50mm
- Sapa-100 profil: 100mm
- XFR200x200x10: 200mm

Følgende snitt med brukte data:



Underbygningen vil utføres med fagverk tilknyttet eksisterende knutepunkt i overkonstruksjon. Under vises det til modell med nedbøying tilført karakteristisk trafikklast alene.



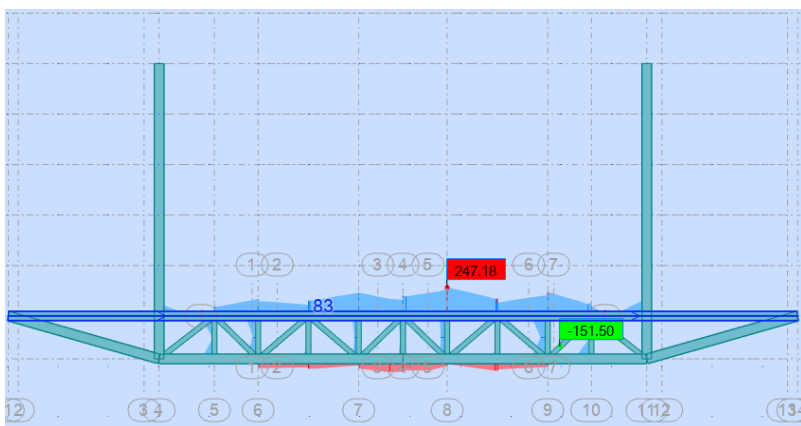


Med største nedbøyning på 65mm på midten, som er mindre enn krav i henhold til N400 fortsettes det med kontroll i bruddgrensetilstand.

5.4 Kontroller og dimensjonering med bruddlast

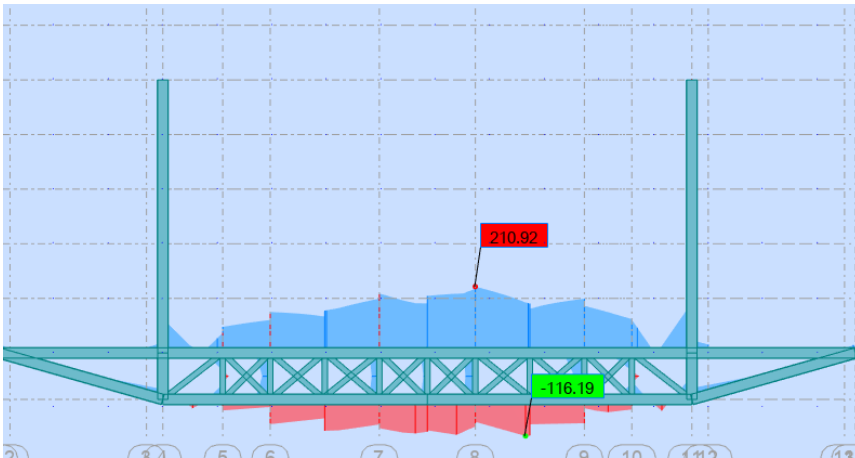
5.4.1.1 GrILMIMIDTEN:

Dimensjonerende situasjonen for denne lastmodell blir etter ligning 6.10b På figuren under vises det meste påkjente elementet i form av normalspenninger i MPa



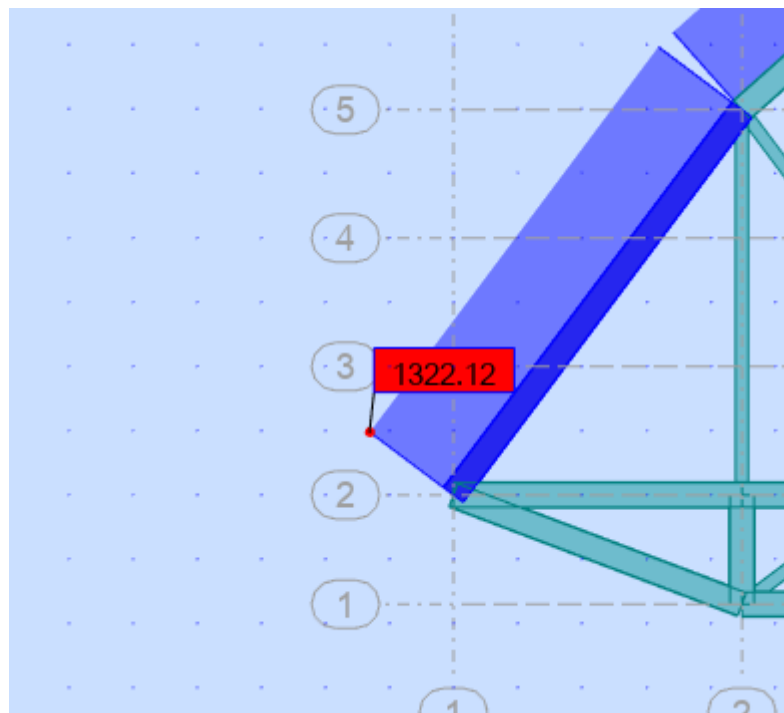
247MPa > Fod. Mye av spenningen forårsakes av store trykkrefter i bjelke 83. Legges krysslager mellom over og under bjelke.

Normalspenninger etter tiltak:



Normalspenninger redusert nok dersom man ser bort fra HAZ.

Neste kritiske punkt for konstruksjon befinner seg for denne kombinasjon i bjelkesøyle nr. 55 (først



trykkstav i overgurt på fagverket):

Bjelkesøylen opptar en normalspenning på 229MPa, dette mest på grunn av aksialtrykkraften på 1322,12kN som vist i figur. Her gjøres en lokal knekk-kontroll. Denne staven vil i lokal betraktning være fast innspent, med lende på 3,75m. Under ligger utregning for lokal knekking i bjelkesøyle 55:

Kontroll av knekking ved trykk og moment(uten HAZ)

NS-EN 1999 [6.3]

Bjelkesøyle nr. 55

$$\begin{aligned} E &:= 70000 \text{ N/mm}^2 \\ f_o &:= 260 \text{ N/mm}^2 \\ \gamma_{M1} &:= 1.10 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L &:= 3750 \text{ mm} \\ L_k &:= L \cdot 0.7 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &:= 7.45 \cdot 10^3 \text{ mm}^2 \\ I &:= 44.2 \cdot 10^6 \text{ N/mm}^2 \\ W_{y,el} &:= 442 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \\ W_{z,el} &:= W_{y,el} \\ W_{y,pl} &:= 526 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \\ W_{z,pl} &:= W_{y,pl} \end{aligned}$$

Table 6.8 - Buckling length factor k for struts

End conditions	k
1. Held in position and restrained in direction at both ends	0,7
2. Held in position at both ends and restrained in direction at one end	0,85
3. Held in position at both ends, but not restrained in direction	1,0
4. Held in position at one end, and restrained in direction at both ends	1,25
5. Held in position and restrained in direction at one end, and partially restrained in direction but not held in position at the other end	1,5
6. Held in position and restrained in direction at one end, but not held in position or restrained at the other end	2,0

$$A_{eff} := A = 7.45 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

$A_{eff} = A$ for class 1, 2 or 3 cross-section

$$\alpha_y := \frac{W_{y,pl}}{W_{y,el}} = 1.19$$

$$\alpha_z := \frac{W_{z,pl}}{W_{z,el}} = 1.19$$

Formfaktor < 1.25

Opptredende laster

$$N_{Ed} := 1.2858 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$M_{y,Ed} := 7.06 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$M_{z,Ed} := 2.5 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Kapasiteter

$$N_{Rd} := A \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 1.761 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$M_{y,Rd} := \alpha_y \cdot W_{y,el} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 124.327 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$M_{z,Rd} := \alpha_z \cdot W_{z,el} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 124.327 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Må oppfylles: $\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1.0$

$$N_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_k^2} = 4.432 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$\bar{\lambda} := \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_o}{N_{cr}}} = 0.661 \quad (6.51)$$

Bøyeknekking(flexural) bare trykk

Table 6.6, Class A: $\alpha_1 := 0.20$ $\bar{\lambda}_{01} := 0.10$

$$\phi_1 := 0.5 \left(1 + \alpha_1 \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{01}) + \bar{\lambda}^2 \right) = 0.775$$

$$\chi_1 := \frac{1}{\phi_1 + \sqrt{\phi_1^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.849 \quad (6.50)$$

$$\kappa_1 := 1 - \left(1 - \frac{A}{A} \right) \cdot 10^{-\bar{\lambda}} - \left(0.05 + 0.1 \cdot \frac{A}{A} \right) \bar{\lambda}^{1.3(1-\bar{\lambda})} = 0.875$$

$$N_{b,Rd1} := \kappa_1 \cdot \chi_1 \cdot A_{eff} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 1.308 \cdot 10^6 \text{ N} \quad \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd1}} = 0.983 \quad \textbf{Godkjent!}$$

Vridning ren trykkstav

Table 6.7: $\alpha_2 := 0.35$ $\bar{\lambda}_{02} := 0.40$

$$\phi_2 := 0.5 \left(1 + \alpha_2 \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{02}) + \bar{\lambda}^2 \right) = 0.764$$

$$\chi_2 := \frac{1}{\phi_2 + \sqrt{\phi_2^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.871$$

$$\kappa_2 := 1.0$$

$$N_{b,Rd2} := \kappa_2 \cdot \chi_2 \cdot A_{eff} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 1.534 \cdot 10^6 \text{ N} \quad \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd2}} = 0.838 \quad \textbf{Godkjent!}$$

Påkjent moment og trykk [6.3.3]

$$\psi_c := 0.8$$

$$\chi_{min} := \chi_1$$

$$\omega_x := 1.0 \quad \omega_0 := 1.0 \quad (\text{Faktorer for HAZ svekkelse})$$

$$(6.62) \quad \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_{min} \cdot \omega_x \cdot N_{Rd}} \right)^{\psi_c} + \frac{1}{\omega_0} \left(\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \right)^{1.7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \right)^{1.7} \right)^{0.6} = 0.946 < 1.0$$

Godkjent!

En annen belastet stav er nummer 54. Denne har noe mindre aksialkraft (920kN) men kan med bakgrunn til sin lengde på 6,97 meter være utsatt for knekking. Kontroll for denne staven finnes under:

Kontroll av knekking ved trykk og moment(uten HAZ)

NS-EN 1999 [6.3]

Bjelkesøyle nr. 54

$$\begin{aligned}E &:= 70000 \text{ N/mm}^2 \\f_o &:= 260 \text{ N/mm}^2 \\ \gamma_{M1} &:= 1.10\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}L &:= 6970 \text{ mm} \\L_k &:= L \cdot 0.7 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}A &:= 7.45 \cdot 10^3 \text{ mm}^2 \\I &:= 44.2 \cdot 10^6 \text{ N/mm}^2 \\W_{y,el} &:= 442 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \\W_{z,el} &:= W_{y,el} \\W_{y,pl} &:= 526 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \\W_{z,pl} &:= W_{y,pl}\end{aligned}$$

$$A_{eff} := A = 7.45 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

$A_{eff} = A$ for class 1, 2 or 3 cross-section

$$\alpha_y := \frac{W_{y,pl}}{W_{y,el}} = 1.19$$

$$\alpha_z := \frac{W_{z,pl}}{W_{z,el}} = 1.19$$

Formfaktor < 1.25

Opptredende laster

$$N_{Ed} := 0.921 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$M_{y,Ed} := 3.3 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$M_{z,Ed} := 0.26 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Kapasiteter

$$N_{Rd} := A \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 1.761 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$M_{y,Rd} := \alpha_y \cdot W_{y,el} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 124.327 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

$$M_{z,Rd} := \alpha_z \cdot W_{z,el} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 124.327 \cdot 10^6 \text{ Nmm}$$

Må oppfylles:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1.0$$

$$N_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_k^2} = 1.283 \cdot 10^6 \text{ N}$$

$$\bar{\lambda} := \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_o}{N_{cr}}} = 1.229 \quad (6.51)$$

Bøyekneking(flexural) ren trykkstav

Table 6.6, Class A:

$$\alpha_1 := 0.20$$

$$\bar{\lambda}_{01} := 0.10$$

$$\phi_1 := 0.5 \left(1 + \alpha_1 \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{01}) + \bar{\lambda}^2 \right) = 1.368$$

$$\chi_1 := \frac{1}{\phi_1 + \sqrt{\phi_1^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.508 \quad (6.50)$$

$$\kappa_1 := 1 - \left(1 - \frac{A}{A} \right) \cdot 10^{-\bar{\lambda}} - \left(0.05 + 0.1 \cdot \frac{A}{A} \right) \bar{\lambda}^{1.3(1-\bar{\lambda})} = 0.859$$

$$N_{b,Rd1} := \kappa_1 \cdot \chi_1 \cdot A_{eff} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 7.682 \cdot 10^5 \text{ N} \quad \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd1}} = 1.199 \quad \text{IKKE godkjent!}$$

Vridning ren trykkstav

Table 6.7: $\alpha_2 := 0.35 \quad \bar{\lambda}_{02} := 0.40$

$$\phi_2 := 0.5 \left(1 + \alpha_2 \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{02}) + \bar{\lambda}^2 \right) = 1.4$$

$$\chi_2 := \frac{1}{\phi_2 + \sqrt{\phi_2^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.483 \quad (6.50)$$

$$\kappa_2 := 1.0$$

$$N_{b,Rd2} := \kappa_2 \cdot \chi_2 \cdot A_{eff} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 8.503 \cdot 10^5 \text{ N} \quad \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd2}} = 1.083 \quad \text{IKKE godkjent!}$$

Påkjent moment og trykk [6.3.3]

$$\psi_c := 0.8$$

$$\chi_{min} := \chi_1$$

$$\omega_x := 1.0 \quad \omega_0 := 1.0 \quad (\text{Faktorer for HAZ svekkelse})$$

$$(6.62) \quad \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_{min} \cdot \omega_x \cdot N_{Rd}} \right)^{\psi_c} + \frac{1}{\omega_0} \left(\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \right)^{1.7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \right)^{1.7} \right)^{0.6} = 1.049 < 1.0$$

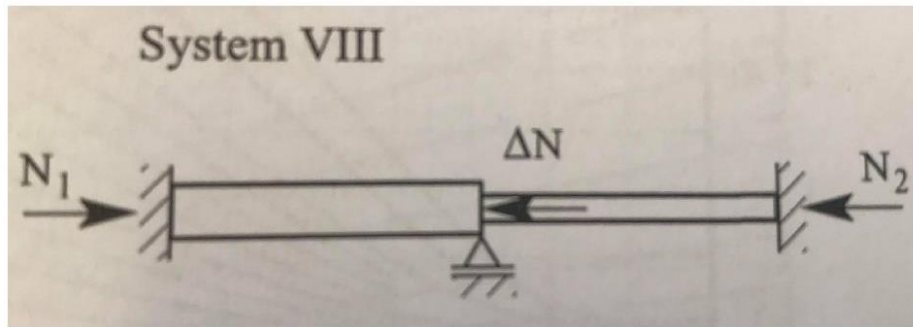
IKKE godkjent!

Som vist i beregninger vil denne staven være utsatt for knekking. For løse dette settes det en stav for avstivning midt på stav nummer 54, dette for reduksjon av knekkklengde.

Bjelkesøyle 54 med avstivning

Gir kortere knekkklengde, som gir stort utslag på knekkkapasiteten.

Ny knekkklengde:



$$L_1 := 3480$$

$$L_2 := L_1$$

$$EI_1 := 1$$

$$EI_2 := EI_1$$

$$N_1 := 1$$

$$N_2 := N_1$$

EI likt, N tilnærmet likt.

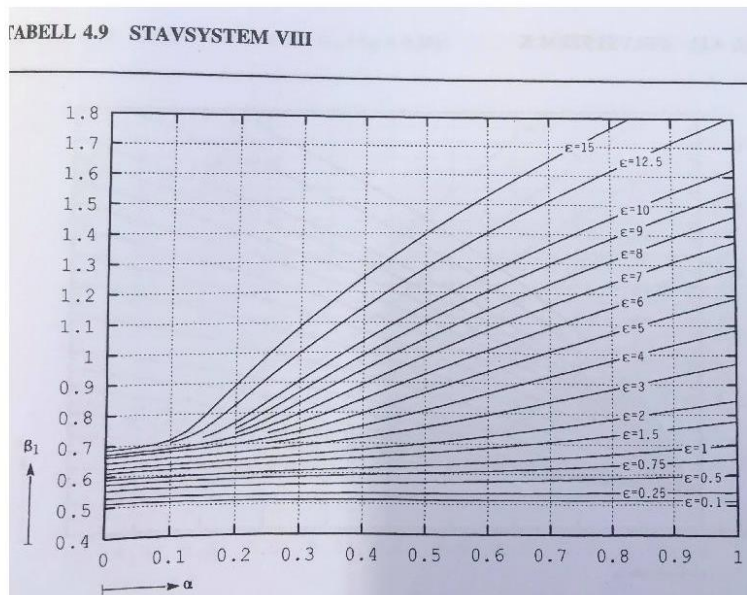
System VIII

Parametre:

$$\alpha := \frac{N_2 \cdot L_2}{N_1 \cdot L_1} = 1$$

$$\varepsilon := \frac{EI_1}{EI_2} \cdot \frac{L_2}{L_1} = 1$$

Leser fra Tabell 4.9:



$$\beta := 0.7 \quad \text{Som videre gir ny knekkklengde} \quad L_{k1} := \beta \cdot L_1 = 2436 \quad \text{mm}$$

$$L_{k2} := L_{k1} = 2436 \quad \text{mm}$$

Oppdaterte laster:

Opptredende laster

$$N_{Ed} := 0.925 \cdot 10^6 \quad \text{N}$$

$$M_{y,Ed} := 7.38 \cdot 10^6 \quad \text{Nmm}$$

$$M_{z,Ed} := 0.61 \cdot 10^6 \quad \text{Nmm}$$

Kapasiteter

$$N_{Rd} := A \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 1.761 \cdot 10^6 \quad \text{N}$$

$$M_{y,Rd} := \alpha_y \cdot W_{y,el} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 124.327 \cdot 10^6 \quad \text{Nmm}$$

$$M_{z,Rd} := \alpha_z \cdot W_{z,el} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 124.327 \cdot 10^6 \quad \text{Nmm}$$

$$N_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_{k1}^2} = 5.146 \cdot 10^6 \quad \text{N}$$

$$\bar{\lambda} := \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_o}{N_{cr}}} = 0.614 \quad (6.51)$$

Bøyeknekkning(flexural) bare trykk

$$\text{Table 6.6, Class A:} \quad \alpha_1 := 0.20 \quad \bar{\lambda}_{01} := 0.10$$

$$\phi_1 := 0.5 \left(1 + \alpha_1 \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{01}) + \bar{\lambda}^2 \right) = 0.74$$

$$\chi_1 := \frac{1}{\phi_1 + \sqrt{\phi_1^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.868 \quad (6.50)$$

$$\kappa_1 := 1 - \left(1 - \frac{A}{A} \right) \cdot 10^{-\bar{\lambda}} - \left(0.05 + 0.1 \cdot \frac{A}{A} \right) \bar{\lambda}^{1.3(1-\bar{\lambda})} = 0.883$$

$$N_{b,Rd1} := \kappa_1 \cdot \chi_1 \cdot A_{eff} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 1.349 \cdot 10^6 \quad \text{N} \quad \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd1}} = 0.686 \quad \text{Godkjent!}$$

Vridning bare trykk

$$\text{Table 6.7:} \quad \alpha_2 := 0.35 \quad \bar{\lambda}_{02} := 0.40$$

$$\phi_2 := 0.5 \left(1 + \alpha_2 \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{02}) + \bar{\lambda}^2 \right) = 0.726$$

$$\chi_2 := \frac{1}{\phi_2 + \sqrt{\phi_2^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.899 \quad (6.50)$$

$$\kappa_2 := 1.0$$

$$N_{b,Rd2} := \kappa_2 \cdot \chi_2 \cdot A_{eff} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 1.582 \cdot 10^6 \quad \text{N} \quad \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd2}} = 0.585 \quad \text{Godkjent!}$$

Påkjent moment og trykk [6.3.3]

$$\psi_c := 0.8$$

$$\chi_{min} := \chi_1$$

$$\omega_x := 1.0 \quad \omega_0 := 1.0 \quad (\text{Faktorer for HAZ svekkelse})$$

$$(6.62) \quad \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_{min} \cdot \omega_x \cdot N_{Rd}} \right)^{\psi_c} + \frac{1}{\omega_0} \left(\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \right)^{1.7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \right)^{1.7} \right)^{0.6} = 0.726 < 1.0$$

Godkjent!

Av rene aksialstaver er stav nummer 70 i mest trykk med 312kN. Siden den er leddet i topp og bunn vil den ha lengere knekk lengde og på grunn av mindre tverrsnitt(100x100x10), vil den kunne ha potensiale til å knekke ut. Utledninger ligger under:

Kontroll av knekking (Uten HAZ)

NS-EN 1999 [6.3]

Stavnr. 70, 100x100x10

$$\begin{aligned} E &:= 70000 \text{ N/mm}^2 & A &:= 3.55 \cdot 10^3 \text{ mm}^2 \\ f_o &:= 260 \text{ N/mm}^2 & I &:= 4.74 \cdot 10^6 \text{ N/mm}^2 \\ \gamma_{M1} &:= 1.10 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L &:= 6010 \text{ mm} \\ L_k &:= L \cdot 1 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$A_{eff} := A = 3.55 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

$A_{eff} = A$ for class 1, 2 or 3 cross-section

Opptredende laster

$$N_{Ed} := 312 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Kapasiteter

$$N_{Rd} := A \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 839.091 \cdot 10^3 \text{ N}$$

Må oppfylles: $\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1.0$

$$N_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_k^2} = 90.662 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$\bar{\lambda} := \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_o}{N_{cr}}} = 3.191 \quad (6.51)$$

Bøyeknekkning(flexural) ren trykkstav

Table 6.6, Class A: $\alpha_1 := 0.20$ $\bar{\lambda}_{01} := 0.10$

$$\phi_1 := 0.5 \left(1 + \alpha_1 \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{01}) + \bar{\lambda}^2 \right) = 5.899$$

$$\chi_1 := \frac{1}{\phi_1 + \sqrt{\phi_1^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.092 \quad (6.50)$$

$$\kappa_1 := 1 - \left(1 - \frac{A}{A} \right) \cdot 10^{-\bar{\lambda}} - \left(0.05 + 0.1 \cdot \frac{A}{A} \right) \bar{\lambda}^{1.3(1-\bar{\lambda})} = 0.994$$

$$N_{b,Rd1} := \kappa_1 \cdot \chi_1 \cdot A_{eff} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 76.828 \cdot 10^3 \text{ N} \quad \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd1}} = 4.061 \quad \textbf{IKKE godkjent!}$$

Som vist i beregningene ovenfor holder ikke denne staven mål, og må byttes ut med et større tverrsnitt. På grunn av symmetri byttes alle stavene ut med XFR200x200x10. Med tverrprofil 200x200x10 og lengde 6,01m kan staven ta opp et trykk på 570kN. Det er innfor etter ny analyse, da opptredende trykkrefter ligger på 389,8kN.

Kontroll av knekking(uten HAZ)

NS-EN 1999 [6.3]

Stavnr. 70, 200x200x10

$$\begin{aligned} E &:= 70000 \text{ N/mm}^2 & A &:= 7.45 \cdot 10^3 \text{ mm}^2 \\ f_o &:= 260 \text{ N/mm}^2 & I &:= 44.2 \cdot 10^6 \text{ N/mm}^2 \\ \gamma_{M1} &:= 1.10 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L &:= 6010 \text{ mm} \\ L_k &:= L \cdot 1 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$A_{eff} := A = 7.45 \cdot 10^3 \text{ mm}^2$$

$A_{eff} = A$ for class 1, 2 or 3 cross-section

Opptredende laster

$$N_{Ed} := 0.312 \cdot 10^6 \text{ N}$$

Kapasiteter

$$N_{Rd} := A \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 1.761 \cdot 10^6 \text{ N}$$

Må oppfylles: $\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1.0$

$$N_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_k^2} = 845.417 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$\bar{\lambda} := \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_o}{N_{cr}}} = 1.514 \quad (6.51)$$

Bøyekneking(flexural) ren trykkstav

Table 6.6, Class A: $\alpha_1 := 0.20$ $\bar{\lambda}_{01} := 0.10$

$$\phi_1 := 0.5 \left(1 + \alpha_1 \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{01}) + \bar{\lambda}^2 \right) = 1.787$$

$$\chi_1 := \frac{1}{\phi_1 + \sqrt{\phi_1^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.365 \quad (6.50)$$

$$\kappa_1 := 1 - \left(1 - \frac{A}{A} \right) \cdot 10^{-\bar{\lambda}} - \left(0.05 + 0.1 \cdot \frac{A}{A} \right) \bar{\lambda}^{1.3(1-\bar{\lambda})} = 0.886$$

$$N_{b,Rd1} := \kappa_1 \cdot \chi_1 \cdot A_{eff} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 570.262 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd1}} = 0.547$$

Godkjent!

Vridning ren trykkstav

Table 6.7: $\alpha_2 := 0.35$ $\bar{\lambda}_{02} := 0.40$

$$\phi_2 := 0.5 \left(1 + \alpha_2 \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{02}) + \bar{\lambda}^2 \right) = 1.84$$

$$\chi_2 := \frac{1}{\phi_2 + \sqrt{\phi_2^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.346$$

$$\kappa_2 := 1.0$$

$$N_{b,Rd2} := \kappa_2 \cdot \chi_2 \cdot A_{eff} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 609.845 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd2}} = 0.512$$

Godkjent!

Tverrstaver i topp:

Den mest utsatte staven har opptredende aksialkraft på 92kN med tverrsnitt: 100x100x10. Etter kontroll vises det at den staven vil være utsatt for knekking. Med 200x200x10-profil vil det ikke være fare for bøyeknekkning, men staven vil bare ha 27% utnyttelse etter våre beregninger. Det besluttes derfor å tilføre et nytt profil: XFR150x150x8. Med dette profilet vil opptredende aksialkraft øke til 113kN grunnet endret stivhet i konstruksjon. Staven vil ikke være utsatt for bøyeknekkning, med en utnyttelsesgrad på 93,2%. Utregninger for dette ligger under.

100x100x10 Bøyeknekkning

$$\text{Table 6.6, Class A:} \quad \alpha_1 := 0.20 \quad \bar{\lambda}_{01} := 0.10$$

$$\phi_1 := 0.5 \left(1 + \alpha_1 \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{01}) + \bar{\lambda}^2 \right) = 10.778$$

$$\chi_1 := \frac{1}{\phi_1 + \sqrt{\phi_1^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.049 \quad (6.50)$$

$$\kappa_1 := 1 - \left(1 - \frac{A}{A} \right) \cdot 10^{-\bar{\lambda}} - \left(0.05 + 0.1 \cdot \frac{A}{A} \right) \bar{\lambda}^{1.3(1-\bar{\lambda})} = 1$$

$$N_{b.Rd1} := \kappa_1 \cdot \chi_1 \cdot A_{eff} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 40.723 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b.Rd1}} = 2.259$$

IKKE OK!

200x200x10 Bøyeknekkning

$$\text{Table 6.6, Class A:} \quad \alpha_1 := 0.20 \quad \bar{\lambda}_{01} := 0.10$$

$$\phi_1 := 0.5 \left(1 + \alpha_1 \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{01}) + \bar{\lambda}^2 \right) = 2.916$$

$$\chi_1 := \frac{1}{\phi_1 + \sqrt{\phi_1^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.203 \quad (6.50)$$

$$\kappa_1 := 1 - \left(1 - \frac{A}{A} \right) \cdot 10^{-\bar{\lambda}} - \left(0.05 + 0.1 \cdot \frac{A}{A} \right) \bar{\lambda}^{1.3(1-\bar{\lambda})} = 0.949$$

$$N_{b.Rd1} := \kappa_1 \cdot \chi_1 \cdot A_{eff} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 338.512 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b.Rd1}} = 0.272$$

OK! men liten utnyttelsesgrad

150x150x8 bøyekneking:

$$N_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_k^2} = 145.382 \cdot 10^3 \text{ N}$$

$$\bar{\lambda} := \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot f_o}{N_{cr}}} = 2.821 \quad (6.51)$$

Bøyekneking(flexural) ren trykkstav

Table 6.6, Class A: $\alpha_1 := 0.20$ $\bar{\lambda}_{01} := 0.10$

$$\phi_1 := 0.5 \left(1 + \alpha_1 \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{01}) + \bar{\lambda}^2 \right) = 4.751$$

$$\chi_1 := \frac{1}{\phi_1 + \sqrt{\phi_1^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.117 \quad (6.50)$$

$$\kappa_1 := 1 - \left(1 - \frac{A}{A} \right) \cdot 10^{-\bar{\lambda}} - \left(0.05 + 0.1 \cdot \frac{A}{A} \right) \bar{\lambda}^{1.3(1-\bar{\lambda})} = 0.987$$

$$N_{b,Rd1} := \kappa_1 \cdot \chi_1 \cdot A_{eff} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 121.09 \cdot 10^3 \text{ N} \quad \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd1}} = 0.908 \quad \text{OK!}$$

Vridning ren trykkstav

Table 6.7: $\alpha_2 := 0.35$ $\bar{\lambda}_{02} := 0.40$

$$\phi_2 := 0.5 \left(1 + \alpha_2 \cdot (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_{02}) + \bar{\lambda}^2 \right) = 4.903$$

$$\chi_2 := \frac{1}{\phi_2 + \sqrt{\phi_2^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.112 \quad (6.50) \quad (\text{Dobbeltsjekk med figur 6.12})$$

$$\kappa_2 := 1.0$$

$$N_{b,Rd2} := \kappa_2 \cdot \chi_2 \cdot A_{eff} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 118.012 \cdot 10^3 \text{ N} \quad \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd2}} = 0.932 \quad \text{OK!}$$

Påkjent moment og trykk [6.3.3]

$$\psi_c := 0.8$$

$$\chi_{min} := \chi_1$$

$$\omega_x := 1.0 \quad \omega_0 := 1.0 \quad (\text{Faktorer for HAZ svekkelse})$$

$$(6.62) \quad \left(\frac{N_{Ed}}{\chi_{min} \cdot \omega_x \cdot N_{Rd}} \right)^{\psi_c} + \frac{1}{\omega_0} \left(\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \right)^{1.7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \right)^{1.7} \right)^{0.6} = 0.946 < 1.0 \quad \text{OK!}$$

Etter endringer

På grunn av endringer i konstruksjonens stivhet vil det også være endringer i normalspenninger i konstruksjon. Under foreligger det kontroll med Robot, hvor spenninger i hver stav/bjelke i konstruksjonen vises. Under ligger 2 utdrag av tabell for lasttilfelle: Gr1a(6.10b)LM1 med boggisystem plassert på midten.

Disse utdragene representerer normalspenninger som vil komme til å overstige f_{ohaz} :

Bar/Node/Case	S max (MPa)▼	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
55/ 31/ 801 (C)	190,81	148,35	15,72	5,51	-15,72	-5,51	169,58
56/ 46/ 801 (C)	187,50	155,95	4,34	11,43	-4,34	-11,43	171,72
56/ 44/ 801 (C)	186,99	156,32	6,60	8,73	-6,60	-8,73	171,66
57/ 41/ 801 (C)	186,00	144,55	14,98	5,75	-14,98	-5,75	165,28
58/ 47/ 801 (C)	180,20	159,75	5,23	4,99	-5,23	-4,99	169,98
55/ 46/ 801 (C)	177,57	161,40	4,34	3,74	-4,34	-3,74	169,49
58/ 45/ 801 (C)	176,67	163,15	6,15	0,61	-6,15	-0,61	169,91
25/ 1/ 801 (C)	174,76	129,09	14,30	8,53	-14,30	-8,53	151,93
57/ 47/ 801 (C)	174,07	156,28	5,23	3,67	-5,23	-3,67	165,18
27/ 11/ 801 (C)	172,36	129,07	13,94	7,71	-13,94	-7,71	150,71
26/ 21/ 801 (C)	164,47	143,25	5,13	5,48	-5,13	-5,48	153,86
28/ 27/ 801 (C)	164,21	145,25	4,89	4,59	-4,89	-4,59	154,73
28/ 23/ 801 (C)	160,92	148,41	5,49	0,77	-5,49	-0,77	154,66
27/ 27/ 801 (C)	159,13	142,10	4,89	3,62	-4,89	-3,62	150,62
26/ 26/ 801 (C)	158,53	149,32	3,99	0,61	-3,99	-0,61	153,92
147/ 199/ 801 (C)	156,51	-79,15	96,68	21,15	-96,68	-21,15	38,68
25/ 26/ 801 (C)	155,85	147,82	3,99	0,02	-3,99	-0,02	151,83
157/ 210/ 801 (C)	155,65	-36,42	85,92	10,12	-85,92	-10,12	59,62
156/ 210/ 801 (C)	154,55	-36,08	85,57	9,75	-85,57	-9,75	59,24
146/ 199/ 801 (C)	146,95	-72,24	96,58	13,01	-96,58	-13,01	37,35
1179/ 94/ 801 (C)	145,42	104,60	7,10	13,31	-7,10	-13,31	125,01
53/ 42/ 801 (C)	137,95	101,81	15,38	2,69	-15,38	-2,69	119,88
52/ 42/ 801 (C)	136,75	95,91	17,56	2,86	-17,56	-2,86	116,33
52/ 43/ 801 (C)	136,74	97,13	17,77	2,03	-17,77	-2,03	116,93
1179/ 909/ 801 (C)	136,34	113,73	9,19	2,12	-9,19	-2,12	125,04
54/ 43/ 801 (C)	135,69	103,82	15,31	0,62	-15,31	-0,62	119,75
54/ 45/ 801 (C)	127,28	114,52	3,28	3,10	-3,28	-3,10	120,90
53/ 44/ 801 (C)	124,84	117,25	3,18	0,62	-3,18	-0,62	121,04
1541/ 914/ 801 (C)	124,12	64,92	3,96	25,64	-3,96	-25,64	94,52
22/ 13/ 801 (C)	122,25	92,82	13,77	0,95	-13,77	-0,95	107,54
20/ 12/ 801 (C)	122,19	91,07	13,51	2,06	-13,51	-2,06	106,63
11/ 13/ 801 (C)	122,03	87,43	16,17	1,14	-16,17	-1,14	104,73
11/ 12/ 801 (C)	121,77	87,43	16,33	0,84	-16,33	-0,84	104,60
1542/ 83/ 801 (C)	117,99	84,90	4,61	11,94	-4,61	-11,94	101,44
20/ 21/ 801 (C)	116,06	99,25	2,60	5,80	-2,60	-5,80	107,65
22/ 23/ 801 (C)	113,46	103,69	2,25	2,63	-2,25	-2,63	108,58

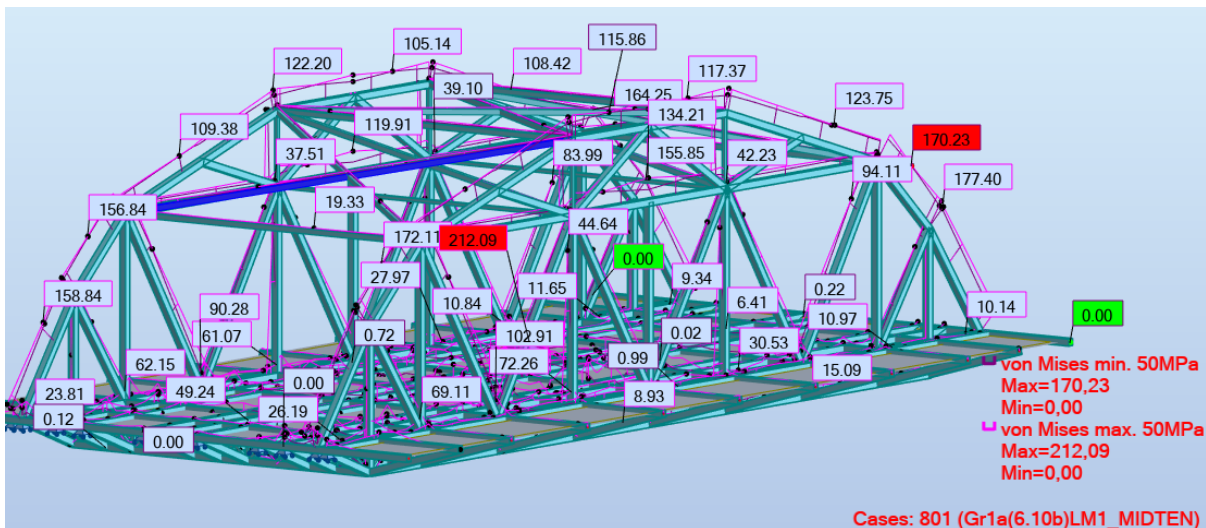
Bar/Node/Case	S max (MPa)	S min (MPa)▲	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
1176/ 908/ 801 (C)	-116,26	-187,05	26,64	8,76	-26,64	-8,76	-151,66
1184/ 908/ 801 (C)	-110,40	-174,09	30,96	0,89	-30,96	-0,89	-142,25
1201/ 919/ 801 (C)	-76,88	-162,90	28,41	14,60	-28,41	-14,60	-119,89
1209/ 919/ 801 (C)	-80,93	-151,93	29,59	5,91	-29,59	-5,91	-116,43
1151/ 886/ 801 (C)	-87,87	-149,94	28,19	2,85	-28,19	-2,85	-118,90
1159/ 886/ 801 (C)	-81,80	-149,19	29,35	4,34	-29,35	-4,34	-115,49
1176/ 909/ 801 (C)	68,89	-148,74	77,91	30,91	-77,91	-30,91	-39,92
1180/ 94/ 801 (C)	-47,84	-140,79	3,85	42,62	-3,85	-42,62	-94,32
1189/ 94/ 801 (C)	73,51	-133,29	102,84	0,56	-102,84	-0,56	-29,89
67/ 38/ 801 (C)	-63,78	-122,86	0,0	29,54	0,0	-29,54	-93,32
1151/ 887/ 801 (C)	62,21	-122,01	58,62	33,49	-58,62	-33,49	-29,90
71/ 34/ 801 (C)	-64,21	-121,49	0,0	28,64	0,0	-28,64	-92,85
1189/ 914/ 801 (C)	61,67	-121,40	91,00	0,54	-91,00	-0,54	-29,86
51/ 41/ 801 (C)	-78,67	-119,86	14,98	5,62	-14,98	-5,62	-99,27
1201/ 1054/ 801 (C)	58,65	-119,40	59,20	29,82	-59,20	-29,82	-30,38
1543/ 83/ 801 (C)	-40,43	-114,55	1,84	35,22	-1,84	-35,22	-77,49
21/ 8/ 801 (C)	-54,15	-114,00	0,0	29,93	0,0	-29,93	-84,08
1184/ 912/ 801 (C)	53,13	-112,03	63,25	19,33	-63,25	-19,33	-29,45

Videre kontrolleres konstruksjon for knekking med robots knekkanalysefunksjon

Case/Mode	Critical coef.	Precision
801/ 1	1,65308e+00	8,45967e-04
801/ 2	1,87686e+00	3,70508e-04
801/ 3	2,01221e+00	1,34907e-04
801/ 4	2,24199e+00	1,99005e-04
801/ 5	2,52491e+00	4,03534e-04
801/ 6	2,83752e+00	3,21632e-03
801/ 7	3,11089e+00	3,13080e-03
801/ 8	3,39794e+00	4,92688e-04
801/ 9	3,45153e+00	1,15561e-03
801/ 10	3,46157e+00	1,91107e-04

Von Mises

Kontroll av Mises-spenninger gjøres for hele konstruksjon i Robot. Dersom oppptredende Mises-spenninger er større en dimensjonerende flytespenning til materialet, vil bjelken/staven kontrolleres og korrigeres.



Konstruksjon består kontrollen med største Mises-spenning = 212,1Mpa < $F_{od} = 236\text{Mpa}$

5.4.2 De øvrige lastgruppene

Tabeller med de 20 meste utsatte stavene i form av normalspenninger og kritisk koeffisient for knekking.

Gr1a(6.10a)LM1 med boggisystem på midten

Normalspenninger:

Bar/Node/Case	S max (MPa)▼	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
55/ 31/ 800 (C)	169,03	128,70	13,98	6,18	-13,98	-6,18	148,87
56/ 44/ 800 (C)	164,30	135,72	5,83	8,45	-5,83	-8,45	150,01
56/ 46/ 800 (C)	163,36	136,81	3,84	9,44	-3,84	-9,44	150,08
57/ 41/ 800 (C)	162,13	127,70	13,41	3,80	-13,41	-3,80	144,91
58/ 47/ 800 (C)	155,75	141,07	4,57	2,77	-4,57	-2,77	148,41
25/ 1/ 800 (C)	155,68	115,71	12,93	7,06	-12,93	-7,06	135,69
55/ 46/ 800 (C)	155,27	142,24	3,84	2,68	-3,84	-2,68	148,76
58/ 45/ 800 (C)	153,89	142,78	5,38	0,17	-5,38	-0,17	148,34
27/ 11/ 800 (C)	152,60	117,07	12,73	5,04	-12,73	-5,04	134,83
57/ 47/ 800 (C)	151,16	138,44	4,57	1,79	-4,57	-1,79	144,80
26/ 21/ 800 (C)	146,51	127,23	4,56	5,08	-4,56	-5,08	136,87
28/ 27/ 800 (C)	145,03	130,65	4,38	2,81	-4,38	-2,81	137,84
28/ 23/ 800 (C)	143,81	131,73	4,92	1,12	-4,92	-1,12	137,77
26/ 26/ 800 (C)	141,55	132,34	3,62	0,99	-3,62	-0,99	136,94
27/ 27/ 800 (C)	141,05	128,40	4,38	1,94	-4,38	-1,94	134,72
25/ 26/ 800 (C)	140,19	130,98	3,62	0,99	-3,62	-0,99	135,59
53/ 42/ 800 (C)	117,67	88,92	13,14	1,23	-13,14	-1,23	103,30
147/ 199/ 800 (C)	117,39	-59,69	70,16	18,38	-70,16	-18,38	28,85
54/ 43/ 800 (C)	117,08	89,16	13,07	0,89	-13,07	-0,89	103,12
52/ 42/ 800 (C)	116,80	83,53	15,02	1,61	-15,02	-1,61	100,17
52/ 43/ 800 (C)	116,70	84,75	15,22	0,75	-15,22	-0,75	100,72
157/ 210/ 800 (C)	116,36	-26,02	61,89	9,29	-61,89	-9,29	45,17
156/ 210/ 800 (C)	115,77	-26,05	61,58	9,33	-61,58	-9,33	44,86
1179/ 94/ 800 (C)	114,21	80,13	6,32	10,72	-6,32	-10,72	97,17

Bar/Node/Case	S max (MPa)	S min (MPa)▲	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
1176/ 908/ 800 (C)	-86,77	-145,90	21,36	8,21	-21,36	-8,21	-116,33
1184/ 908/ 800 (C)	-85,21	-134,28	24,38	0,15	-24,38	-0,15	-109,75
1201/ 919/ 800 (C)	-59,06	-128,00	22,47	12,01	-22,47	-12,01	-93,53
1151/ 886/ 800 (C)	-66,05	-119,29	22,27	4,35	-22,27	-4,35	-92,67
1209/ 919/ 800 (C)	-63,78	-118,42	23,30	4,03	-23,30	-4,03	-91,10
1176/ 909/ 800 (C)	60,95	-117,43	61,62	27,57	-61,62	-27,57	-28,24
1159/ 886/ 800 (C)	-63,27	-117,30	23,09	3,93	-23,09	-3,93	-90,28

Kritisk knekk-koeffisient

Case/Mode	Critical coef.	Precision
800/ 1	1,90454e+00	7,98046e-04
800/ 2	2,13133e+00	2,76723e-03
800/ 3	2,31665e+00	1,33056e-04
800/ 4	2,53207e+00	2,08445e-04
800/ 5	2,90297e+00	3,58547e-04
800/ 6	3,21330e+00	3,13951e-03
800/ 7	3,57865e+00	3,14099e-03
800/ 8	3,86312e+00	5,06310e-04
800/ 9	3,89413e+00	1,04051e-03
800/ 10	3,95525e+00	2,07396e-04

Gr1a(6.10b)LM1 med boggisystem rett ved opplager av konstruksjon

Normalspenninger:

Bar/Node/Case	S max (MPa)▼	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
152/ 206/ 802 (C)	186,12	-109,06	143,17	4,43	-143,17	-4,43	38,53
142/ 195/ 802 (C)	173,95	-133,08	147,89	5,63	-147,89	-5,63	20,44
152/ 205/ 802 (C)	173,52	-96,47	130,42	4,58	-130,42	-4,58	38,53
142/ 194/ 802 (C)	156,24	-115,37	130,97	4,83	-130,97	-4,83	20,44
1750/ 195/ 802 (C)	154,70	-62,04	16,05	92,32	-16,05	-92,32	46,33
55/ 31/ 802 (C)	145,38	114,48	15,21	0,24	-15,21	-0,24	129,93
1748/ 206/ 802 (C)	145,27	-55,44	4,18	96,18	-4,18	-96,18	44,91
56/ 46/ 802 (C)	144,56	107,04	3,37	15,39	-3,37	-15,39	125,80
55/ 46/ 802 (C)	142,58	117,09	3,37	9,38	-3,37	-9,38	129,83
56/ 44/ 802 (C)	141,03	110,44	3,13	12,16	-3,13	-12,16	125,73
25/ 1/ 802 (C)	140,62	90,93	13,17	11,68	-13,17	-11,68	115,77
202/ 261/ 802 (C)	129,79	-67,39	89,45	9,14	-89,45	-9,14	31,20
202/ 260/ 802 (C)	127,47	-65,07	85,96	10,31	-85,96	-10,31	31,20
57/ 41/ 802 (C)	124,74	96,83	10,79	3,17	-10,79	-3,17	110,78
25/ 26/ 802 (C)	123,86	107,50	3,09	5,09	-3,09	-5,09	115,68
192/ 250/ 802 (C)	122,80	-87,94	96,79	8,58	-96,79	-8,58	17,43
26/ 26/ 802 (C)	121,26	105,55	3,09	4,77	-3,09	-4,77	113,41
153/ 206/ 802 (C)	119,25	-51,66	81,68	3,78	-81,68	-3,78	33,80
1750/ 855/ 802 (C)	118,38	-25,66	16,30	55,72	-16,30	-55,72	46,36
58/ 47/ 802 (C)	117,63	106,89	3,51	1,85	-3,51	-1,85	112,26
27/ 11/ 802 (C)	117,56	89,76	10,27	3,63	-10,27	-3,63	103,66
26/ 21/ 802 (C)	116,81	109,87	2,37	1,10	-2,37	-1,10	113,34
58/ 45/ 802 (C)	116,13	108,26	3,47	0,47	-3,47	-0,47	112,20
57/ 47/ 802 (C)	115,55	105,83	3,51	1,34	-3,51	-1,34	110,69
192/ 249/ 802 (C)	115,04	-80,18	87,64	9,97	-87,64	-9,97	17,43

Bar/Node/Case	S max (MPa)	S min (MPa)▲	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
1483/ 194/ 802 (C)	49,52	-152,36	94,66	6,28	-94,66	-6,28	-51,42
1457/ 205/ 802 (C)	57,06	-150,61	96,58	7,25	-96,58	-7,25	-46,77
142/ 195/ 802 (C)	173,95	-133,08	147,89	5,63	-147,89	-5,63	20,44
1379/ 249/ 802 (C)	35,25	-115,45	64,04	11,31	-64,04	-11,31	-40,10
142/ 194/ 802 (C)	156,24	-115,37	130,97	4,83	-130,97	-4,83	20,44
1405/ 260/ 802 (C)	24,19	-112,48	66,93	1,41	-66,93	-1,41	-44,15

Kritisk knekk-koeffisient

Case/Mode	Critical coef.	Precision
802/ 1	2,47936e+00	4,59479e-04
802/ 2	2,77862e+00	4,63213e-04
802/ 3	3,00916e+00	7,41115e-04
802/ 4	3,26658e+00	1,46238e-04
802/ 5	3,76663e+00	4,97031e-04
802/ 6	4,14636e+00	2,32548e-03
802/ 7	4,42017e+00	2,52630e-03
802/ 8	4,62494e+00	2,28051e-03
802/ 9	4,89230e+00	1,85865e-03
802/ 10	5,01271e+00	3,62374e-03

Gr1b(6.10a)LM2 aksel plassert på midten

Ingen normalspenninger innad intervallet [-112Mpa, 112Mpa]

Kritisk knekk-koeffisient

Case/Mode	Critical coef.	Precision
803/ 1	5,21983e+00	3,89606e-05
803/ 2	5,68782e+00	6,15900e-04
803/ 3	6,34074e+00	1,47310e-04
803/ 4	6,48876e+00	2,98200e-04
803/ 5	7,90773e+00	7,84647e-04
803/ 6	8,40018e+00	2,01062e-03
803/ 7	9,86476e+00	2,85298e-03
803/ 8	9,87708e+00	3,06597e-03
803/ 9	9,88394e+00	2,28945e-04
803/ 10	9,90099e+00	1,45817e-03

Gr1b(6.10b)LM2 aksel plassert på midten

Ingen normalspenninger innad intervallet [-112Mpa, 112Mpa]

Kritisk knekk-koeffisient

Case/Mode	Critical coef.	Precision
804/ 1	7,31486e+00	4,62127e-04
804/ 2	8,01140e+00	6,88169e-04
804/ 3	8,82473e+00	6,88860e-04
804/ 4	9,03289e+00	2,71421e-04
804/ 5	1,10831e+01	9,35351e-04
804/ 6	1,17394e+01	1,37236e-03
804/ 7	1,33481e+01	1,90450e-04
804/ 8	1,33606e+01	9,68843e-04
804/ 9	1,35927e+01	3,64076e-03
804/ 10	1,36010e+01	2,04106e-03

Gr2(6.10a)LM1 Med boggisystem plassert på midten

Normalspenninger

Bar/Node/Case	S max (MPa)▼	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
55/ 31/ 805 (C)	144,39	92,00	10,78	15,42	-10,78	-15,42	118,19
56/ 44/ 805 (C)	144,10	94,83	5,64	18,99	-5,64	-18,99	119,46
56/ 46/ 805 (C)	137,78	101,29	3,05	15,19	-3,05	-15,19	119,54
25/ 1/ 805 (C)	132,83	79,64	9,97	16,62	-9,97	-16,62	106,24
57/ 41/ 805 (C)	131,89	99,44	10,58	5,65	-10,58	-5,65	115,67
26/ 21/ 805 (C)	126,55	88,56	3,50	15,49	-3,50	-15,49	107,55
55/ 46/ 805 (C)	125,48	110,68	3,05	4,35	-3,05	-4,35	118,08
58/ 45/ 805 (C)	124,89	111,83	4,38	2,16	-4,38	-2,16	118,36
27/ 11/ 805 (C)	122,87	96,04	10,22	3,19	-10,22	-3,19	109,45
58/ 47/ 805 (C)	122,53	114,34	3,66	0,44	-3,66	-0,44	118,43
28/ 27/ 805 (C)	122,02	101,55	3,65	6,58	-3,65	-6,58	111,79
28/ 23/ 805 (C)	121,30	102,13	4,46	5,13	-4,46	-5,13	111,71
57/ 47/ 805 (C)	119,91	111,21	3,66	0,69	-3,66	-0,69	115,56
26/ 26/ 805 (C)	118,35	96,91	2,93	7,79	-2,93	-7,79	107,63
27/ 27/ 805 (C)	117,38	101,31	3,65	4,38	-3,65	-4,38	109,34

Bar/Node/Case	S max (MPa)	S min (MPa)▲	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
1176/ 908/ 805 (C)	-57,95	-130,51	17,12	19,16	-17,12	-19,16	-94,23
1151/ 886/ 805 (C)	-29,67	-120,19	18,42	26,84	-18,42	-26,84	-74,93
1184/ 908/ 805 (C)	-63,47	-114,53	19,88	5,65	-19,88	-5,65	-89,00

Kritisk knekk-koeffisient

Case/Mode	Critical coef.	Precision
805/ 1	2,38790e+00	1,26119e-04
805/ 2	2,66440e+00	3,22654e-04
805/ 3	2,90463e+00	1,50997e-04
805/ 4	3,17230e+00	2,41327e-04
805/ 5	3,64095e+00	3,69232e-04
805/ 6	4,02063e+00	2,85727e-03
805/ 7	4,48925e+00	2,84684e-03
805/ 8	4,86963e+00	1,01670e-05
805/ 9	4,87803e+00	2,81535e-05
805/ 10	4,98561e+00	1,80526e-05

Gr2(6.10b)LM1 Med boggisystem plassert på midten

Normalspenninger:

Bar/Node/Case	S max (MPa)	S min (MPa)▼	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
58/ 47/ 806 (C)	135,40	125,82	4,02	0,77	-4,02	-0,77	130,61
58/ 45/ 806 (C)	138,36	122,73	4,71	3,10	-4,71	-3,10	130,54
57/ 47/ 806 (C)	132,17	121,67	4,02	1,23	-4,02	-1,23	126,92
55/ 46/ 806 (C)	138,10	120,37	3,32	5,54	-3,32	-5,54	129,23
28/ 23/ 806 (C)	131,92	110,02	4,83	6,12	-4,83	-6,12	120,97
56/ 46/ 806 (C)	153,84	109,24	3,32	18,98	-3,32	-18,98	131,54
57/ 41/ 806 (C)	145,95	108,08	11,39	7,54	-11,39	-7,54	127,01
28/ 27/ 806 (C)	134,07	108,00	3,95	9,08	-3,95	-9,08	121,03
27/ 27/ 806 (C)	128,14	107,76	3,95	6,24	-3,95	-6,24	117,95
25/ 26/ 806 (C)	119,25	107,53	3,12	2,74	-3,12	-2,74	113,39
27/ 11/ 806 (C)	133,08	103,02	10,82	4,21	-10,82	-4,21	118,05
26/ 26/ 806 (C)	128,46	102,69	3,12	9,76	-3,12	-9,76	115,57
56/ 44/ 806 (C)	161,39	101,56	6,33	23,59	-6,33	-23,59	131,47
55/ 31/ 806 (C)	160,19	98,47	11,56	19,30	-11,56	-19,30	129,33
26/ 21/ 806 (C)	139,68	91,34	3,63	20,54	-3,63	-20,54	115,51
25/ 1/ 806 (C)	145,56	81,40	10,50	21,58	-10,50	-21,58	113,48
1179/ 94/ 806 (C)	114,87	80,49	8,02	9,17	-8,02	-9,17	97,68
156/ 210/ 806 (C)	125,60	-18,53	62,80	9,27	-62,80	-9,27	53,54
157/ 210/ 806 (C)	132,26	-29,15	60,36	20,35	-60,36	-20,35	51,56
147/ 199/ 806 (C)	120,43	-41,65	66,12	14,92	-66,12	-14,92	39,39
146/ 199/ 806 (C)	133,93	-49,58	69,04	22,71	-69,04	-22,71	42,18

Bar/Node/Case	S max (MPa)	S min (MPa)▲	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
1176/ 908/ 806 (C)	-73,35	-162,47	20,11	24,45	-20,11	-24,45	-117,91
1151/ 886/ 806 (C)	-34,31	-148,77	22,21	35,02	-22,21	-35,02	-91,54
1184/ 908/ 806 (C)	-79,09	-141,87	24,03	7,36	-24,03	-7,36	-110,48
1159/ 886/ 806 (C)	-41,95	-137,51	22,68	25,10	-22,68	-25,10	-89,73
1201/ 919/ 806 (C)	-53,81	-136,12	22,25	18,90	-22,25	-18,90	-94,97
1126/ 875/ 806 (C)	-0,33	-119,08	16,14	43,24	-16,14	-43,24	-59,70
1176/ 909/ 806 (C)	52,73	-117,71	60,91	24,31	-60,91	-24,31	-32,49
1209/ 919/ 806 (C)	-66,40	-117,47	23,39	2,14	-23,39	-2,14	-91,93
1151/ 887/ 806 (C)	70,13	-116,92	44,35	49,17	-44,35	-49,17	-23,39

Kritisk knekk-koeffisient

Case/Mode	Critical coef.	Precision
806/ 1	2,15313e+00	1,32997e-04
806/ 2	2,43998e+00	2,83547e-04
806/ 3	2,62025e+00	1,57068e-04
806/ 4	2,92546e+00	2,61495e-04
806/ 5	3,29050e+00	3,65530e-04
806/ 6	3,69442e+00	2,84072e-03
806/ 7	4,05360e+00	2,70631e-03
806/ 8	4,45964e+00	8,90913e-05
806/ 9	4,49506e+00	1,43628e-03
806/ 10	4,51660e+00	3,82129e-05

Gr4(6.10b)LM4

Normalspenninger:

Bar/Node/Case	S max (MPa)▼	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)	Fx/Ax (MPa)
55/ 31/ 807 (C)	159,84	126,75	14,41	2,14	-14,41	-2,14	143,30
25/ 1/ 807 (C)	159,84	126,75	14,41	2,14	-14,41	-2,14	143,30
57/ 41/ 807 (C)	155,64	126,04	14,43	0,37	-14,43	-0,37	140,84
27/ 11/ 807 (C)	155,64	126,04	14,43	0,37	-14,43	-0,37	140,84
55/ 46/ 807 (C)	148,44	137,97	3,79	1,44	-3,79	-1,44	143,20
25/ 26/ 807 (C)	148,44	137,97	3,79	1,44	-3,79	-1,44	143,20
58/ 47/ 807 (C)	147,98	135,98	4,39	1,60	-4,39	-1,60	141,98
28/ 27/ 807 (C)	147,98	135,98	4,39	1,60	-4,39	-1,60	141,98
57/ 47/ 807 (C)	147,61	133,87	4,39	2,47	-4,39	-2,47	140,74
27/ 27/ 807 (C)	147,61	133,87	4,39	2,47	-4,39	-2,47	140,74
56/ 44/ 807 (C)	147,43	137,31	3,70	1,36	-3,70	-1,36	142,37
26/ 21/ 807 (C)	147,43	137,31	3,70	1,36	-3,70	-1,36	142,37
56/ 46/ 807 (C)	147,33	137,53	3,79	1,11	-3,79	-1,11	142,43
26/ 26/ 807 (C)	147,33	137,53	3,79	1,11	-3,79	-1,11	142,43
58/ 45/ 807 (C)	146,57	137,27	3,57	1,08	-3,57	-1,08	141,92
28/ 23/ 807 (C)	146,57	137,27	3,57	1,08	-3,57	-1,08	141,92
1277/ 40/ 807 (C)	117,03	-73,98	11,66	83,84	-11,66	-83,84	21,52
1290/ 10/ 807 (C)	117,02	-73,98	11,66	83,84	-11,66	-83,84	21,52

Ingen normalspenninger mindre enn -112Mpa

Kritisk knekk-koeffisient

Case/Mode	Critical coef.	Precision
807/ 1	2,01469e+00	2,84155e-04
807/ 2	2,18199e+00	5,23594e-04
807/ 3	2,46133e+00	1,12252e-04
807/ 4	2,51814e+00	3,03455e-04
807/ 5	3,05751e+00	5,86546e-04
807/ 6	3,25226e+00	2,66222e-03
807/ 7	3,83008e+00	1,59555e-03
807/ 8	3,83293e+00	3,03139e-05
807/ 9	3,92516e+00	9,28503e-05
807/ 10	3,92997e+00	1,92566e-03

5.5 Manuell kontroll for utsatte lastfordelinger

Videre kjøres det en manuell kontroll mot EK9 for verifisering av den jobben Robot har gjort. Det er satt opp fem forskjellige «caser» korresponderende til de aktuelle kraft-typene konstruksjon blir utsatt for.

Case 1: Mest utsatte element med hensyn til skjær i lokal z-retning

Stavnr: 152, dimensjonerende lastgruppe802: Gr1a(6.10b)LM1 med boggisystem i starten

Stavlengthe: 2250mm, Lokal posisjon for påkjenning; $x=2250$

Fx	292,82	kN (trykk)
Fy	-1,84	kN
Fz	-241,5	kN
My	-65,56	kNm
Mz	2,03	kNm
Mx	0	kNm

Stav nr. 152, Case 802

$$f_o := 260 \quad \text{N/mm}^2$$

$$V_{Ed} := 241.5 \cdot 10^3 \quad \text{N}$$

$$\gamma_{M1} := 1.10$$

$$W_{el} := 457.95 \cdot 10^3 \quad \text{mm}^3$$

$$M_{y,Ed} := 65.56 \cdot 10^6 \quad \text{Nmm}$$

$$h_w := 200 - 20 = 180 \quad \text{mm}$$

$$t_w := 10 \quad \text{mm}$$

Skjærkontroll [6.2.6]

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{250}{f_o}} = 0.981$$

$$\frac{h_w}{t_w} = 18 < 39 \cdot 0.981 = 38.259$$

[6.2.6](2). Siden $h_w/t_w < 39\varepsilon$, er V_{rd} som følger:

$$(6.30) \quad A_v := (h_w) (t_w) + (h_w) (t_w) = 3600 \quad \text{mm}^2$$

$$(6.29) \quad V_{Rd} := A_v \cdot \frac{f_o}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} = 491.273 \cdot 10^3 \quad \text{N}$$

$$\rho_{0,HAZ} := 1.0$$

Ser vekk fra HAZ

$$d := 0$$

Ingen hull i skjærarealet

$$(6.28) \quad \frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = 0.492 < 1.0 \quad \text{Godkjent!}$$

Momentkontroll [6.2.5]

$$M_{Rd} := \frac{W_{el} \cdot f_o}{\gamma_{M1}} = 108.243 \cdot 10^6 \quad \text{Nmm}$$

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{Rd}} = 0.606 < 1.0 \quad \text{Godkjent!}$$

Kombinert Skjær og moment [6.2.8]

Hvis skjærkraften V er mindre enn halvparten av skjærkapasiteten, vil ikke skjærkraften ha noe innvirkning på momentkapasiteten [6.2.8] (2)

$$\frac{1}{2} \cdot V_{Rd} = 245.636 \cdot 10^3$$

V_{Ed} er altså mindre enn halve kapasiteten, og innvirkningen på momentkapasitet neglesjeres

Case 2: Mest utsatte element med hensyn til skjær i lokal z-retning.

Stavn: 50, dimensjonerende lastgruppe807: Gr4(6.10b)LM4 (folkelast)

Stavlengthe: 2252mm, Lokal posisjon for påkjenning; $x=2252$

Ikke dimensjonerende!!!! Ikke behov for manuell kontroll

F _x	-96,8	kN (strek)
F _y	-66,95	kN
F _z	-85,6	kN
M _y	1,83	kNm
M _z	-14,31	kNm
M _x	-48,59	kNm

Case 3: Mest utsatte element med hensyn til moment i lokal y-retning

Stavnr: 142, dimensjonerende lastgruppe802: Gr1a(6.10b) med boggisystem i starten

Stavlengthe: 2250mm, Lokal posisjon for påkjenning; x=1125

Fx	155,31	kN (trykk)
Fy	-2,13	kN
Fz	-3,44	kN
My	70,03	kNm
Mz	0,18	kNm
Mx	1,59	kNm

Stav nr. 142, Case 802

$$f_o := 260 \quad \text{N/mm}^2$$

$$\gamma_{M1} := 1.10$$

$$W_{el} := 457.95 \cdot 10^3 \quad \text{mm}^3$$

$$A := 7.6 \cdot 10^3 \quad \text{mm}^2$$

$$N_{Ed} := 155.31 \cdot 10^3 \quad \text{N}$$

$$M_{y.Ed} := 70.03 \cdot 10^6 \quad \text{Nmm}$$

$$M_{z.Ed} := 0.18 \cdot 10^6 \quad \text{Nmm}$$

Momentkontroll [6.2.5]

$$M_{Rd} := \frac{W_{el} \cdot f_o}{\gamma_{M1}} = 108.243 \cdot 10^6 \quad \text{Nmm}$$

$$\frac{M_{y.Ed}}{M_{Rd}} = 0.647 < 1.0 \text{ Godkjent!}$$

Moment og Trykk [6.2.9]

$$\omega_o := 1.0 \quad (\text{Ser vekk fra sveis og heller ingen hull})$$

$$N_{Rd} := A \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}} = 1.796 \cdot 10^6 \quad \text{N}$$

$$\psi := 1.3 \quad \text{Hult tverrsnitt}$$

$$(6.43) \quad \left(\frac{N_{Ed}}{\omega_o \cdot N_{Rd}} \right)^\psi + \left(\left(\frac{M_{y.Ed}}{\omega_o \cdot M_{Rd}} \right)^{1.7} + \left(\frac{M_{z.Ed}}{\omega_o \cdot M_{Rd}} \right)^{1.7} \right)^{0.6} = 0.683 < 1.0 \text{ Godkjent!}$$

Case 4: Mest utsatte element med hensyn til moment i lokal z-retning

Stavnr: 1290, dimensjonerende lastgruppe807: Gr4(6.10b)LM4 (folkelast)

Stavlengthe: 1290mm, Lokal posisjon for påkjenning; $x=0$

Ikke dimensjonerende!!! Ikke behov for manuell kontroll

F _x	163,57	kN (trykk)
F _y	58,68	kN
F _z	10,77	kN
M _y	-5,34	kNm
M_z	38,4	kNm
M _x	0,7	kNm

Case 5: Mest utsatte element med hensyn til torsjon

Stavn: 9, dimensjonerende lastgruppe: Gr4(6.10b)LM4 (folkelast)

Stavlengthe: 2252mm, Lokal posisjon for påkjenning; $x=2252$

Hulprofiler er veldig torsjonsstive sammenlignet med åpne profiler. Forventer derfor at dette ikke er noe problem. Men kontroll foreligger under.

F _x	-96,8	kN (trykk)
F _y	66,94	kN
F _z	-85,7	kN
M _y	1,83	kNm
M _z	14,31	kNm
M _x	48,59	kNm

Stav nr. 9, Case 807

$$f_o := 260 \quad \text{N/mm}^2$$

$$V_{Ed} := 85.7 \cdot 10^3 \quad \text{N}$$

$$\gamma_{M1} := 1.10$$

$$W_{el} := 457.95 \cdot 10^3 \quad \text{mm}^3$$

$$h_w := 200 - 20 = 180 \quad \text{mm}$$

$$M_x := 48.59 \cdot 10^6 \quad \text{Nmm}$$

$$t_w := 10 \quad \text{mm}$$

$$T_{Ed} := M_x$$

Skjærkontroll [6.2.6]

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{250}{f_o}} = 0.981$$

$$\frac{h_w}{t_w} = 18 < 39 \cdot 0.981 = 38.259$$

[6.2.6](2). Siden $h_w/t_w < 39\varepsilon$, er V_{rd} som følger:

$$(6.30) \quad A_v := (h_w) (t_w) + (h_w) (t_w) = 3600 \quad \text{mm}^2$$

$$(6.29) \quad V_{Rd} := A_v \cdot \frac{f_o}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M1}} = 491.273 \cdot 10^3 \quad \text{N}$$

$$\rho_{0,HAZ} := 1.0$$

Ser vekk fra HAZ

$$d := 0$$

Ingen hull i skjærarealet

$$(6.28) \quad \frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} = 0.174 < 1.0 \quad \text{Godkjent!}$$

Torsjon [6.2.7]

Torsjon uten hvelving da geometrien til hule firkantprofiler gjør at de ikke er utsatt for hvelving

Fra P. K. Larsen: Tverrsnittsdata for St. Venants torsjon

$$t := 10$$

Tykkelse

$$a := 200 - 2 \cdot t = 180$$

Høyde

$$b := 200 - 2 \cdot t = 180$$

Bredde

$$\tau_y := \frac{f_o}{\sqrt{3}} = 150.111$$

$$T_{Rd} := \tau_y \cdot 2 \cdot a \cdot b \cdot t = 97.272 \cdot 10^6$$

$$(6.32) \quad \frac{T_{Ed}}{T_{Rd}} = 0.4995 < 1.0 \quad \text{Godkjent!}$$

Kombinert skjær og torsjon [6.2.7.3]

Fører til redusert skjærkapasitet, men har høy skjærkapasitet i dette tilfellet. Forventer at dette skal gå fint.

$$A_m := 190 \cdot 190 = 36.1 \cdot 10^3 \quad \text{mm}^2$$

$$\tau_{t,Ed} := \frac{M_x}{2 \cdot A_m \cdot t} = 67.299 \quad \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$(6.37) \quad V_{T,Rd} := \left(1 - \frac{\tau_{t,Ed} \cdot \sqrt{3}}{\frac{f_o}{\gamma_{M1}}} \right) \cdot V_{Rd} = 248.996 \cdot 10^3$$

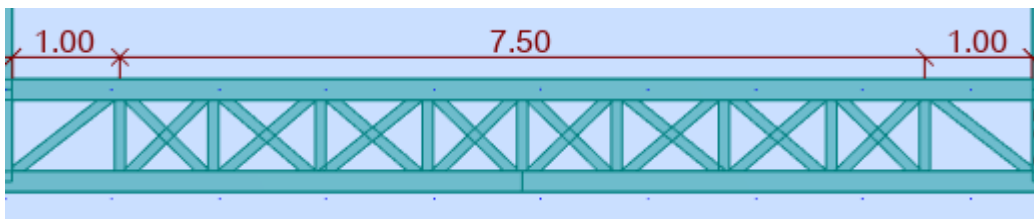
$$(6.34) \quad \frac{V_{Ed}}{V_{T,Rd}} = 0.344 < 1.0 \quad \text{Godkjent!}$$

5.6 Sveiskapasitet

For sveis er det tatt utgangspunkt i de mest belastede knutepunktene for hver del av konstruksjon. Siden de opptredende laster er både variable og bevegelige vil alle knutepunkt i de respektive konstruksjonsdelene sveises likt og med samme a-mål.

5.6.1 Konstruksjonsdeler og type sveis

1. Tverrbærere i kjørebanen (battsveis): Siden tverrsnittet 200x200x10 har lengdebegrensning på 10 meter må profilet skjøtes en plass i kjørebanen. Bildet under viser foreslått plassering av battsveisene for tverrbærere i kjørebanen.



Valg av knutepunkt her er et resultat av å oppnå lengst mulig avstand til det mest spenningsutsatte området (midten), samtidig som knutepunkt for battsveis skal havne i samme område som for kilsveisen til krysstavene. For beregning av a-mål følges EK9: 8.6.3.2.1 (2) "The effective thickness of a full penetration butt weld should be taken as the thickness of the connected members." A-målet blir da 10mm for alle battsveiser i 200x200 og 100x100 profilene konstruksjon innehar.

2. Langsgående bærere og fagverk (battsveis): Samme sak gjelder her som for tverrbærerne i kjørebanen (1.)
3. Tverrbærere i kjørebanen (kilsveis): Tverrbærere i kjørebanen koples sammen med undergurt i fagverk ved hjelp av kilsveis. Her er a-mål funnet ved hjelp av kapasitetsberegninger for sveisegrupper i henhold til EK9.
4. Langsgående bærere og fagverk(kilsveis): Samme beregningsgrunnlag som kilsveis for tverrbærere.

Under ligger beregninger for a-mål på de forskjellige konstruksjonsdeler og tverrsnitt.

Kontroll buttsveis [8.6.3.2.3]

konservativ beregning

Bar 83, spenninger hentet fra Robot

$$\sigma_{Ed} := 142.81 \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{Ed} := 5.83 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_w := 210 \frac{N}{mm^2}$$

$$\gamma_{Mw} := 1.25$$

$$\frac{f_w}{\gamma_{Mw}} = 168 \frac{N}{mm^2}$$

Normalspenning vinkelrett på sveisen

$$(8.29) \quad \sigma_{Ed} < \frac{f_w}{\gamma_{Mw}}$$

$$142.8 < 168 \quad \text{Godkjent!}$$

Skjærspenning

$$(8.30) \quad \tau_{Ed} < 0.6 \cdot \frac{f_w}{\gamma_{Mw}}$$

$$5.83 < 100.8 \quad \text{Godkjent!}$$

$$0.6 \cdot 168 = 100.8$$

Kombinert normal- og skjærspenning

$$(8.31) \quad \sqrt{\sigma_{Ed}^2 + 3 \cdot \tau_{Ed}^2} < \frac{f_w}{\gamma_{Mw}}$$

$$\sqrt{142.81^2 + 3 \cdot 5.83^2} = 143.167$$

$$143.17 < 168 \quad \text{Godkjent!}$$

Kontroll buttsveis [8.6.3.2.3]

konservativ beregning

Bar 25, spenninger hentet fra Robot

$$\sigma_{Ed} := 157.09 \quad \frac{N}{mm^2}$$

$$\tau_{Ed} := 0.69 \quad \frac{N}{mm^2}$$

$$f_w := 210 \quad \frac{N}{mm^2}$$

$$\gamma_{Mw} := 1.25$$

$$\frac{f_w}{\gamma_{Mw}} = 168 \quad \frac{N}{mm^2}$$

Normalspenning vinkelrett på sveisen

$$(8.29) \quad \sigma_{Ed} < \frac{f_w}{\gamma_{Mw}}$$

$$157.09 < 168 \quad \text{Godkjent!}$$

Skjærspenning

$$(8.30) \quad \tau_{Ed} < 0.6 \cdot \frac{f_w}{\gamma_{Mw}}$$

$$0.69 < 100.8 \quad \text{Godkjent!}$$

$$0.6 \cdot \frac{f_w}{\gamma_{Mw}} = 100.8$$

Kombinert normal- og skjærspenning

$$(8.31) \quad \sqrt{\sigma_{Ed}^2 + 3 \cdot \tau_{Ed}^2} < \frac{f_w}{\gamma_{Mw}}$$

$$\sqrt{\sigma_{Ed}^2 + 3 \cdot \tau_{Ed}^2} = 157.095$$

$$157.095 < 168 \quad \text{Godkjent!}$$

Non-Commercial Use Only

Sveisegruppe Kilsveis 200x200x10

Lastvirkninger på sveisetversnitti N og Nmm:

$$\begin{aligned}Fx &:= 43.8 \cdot 10^3 & (\text{N}) \\Fz &:= 33.1 \cdot 10^3 & (\text{Vz}) \\Fy &:= 38.6 \cdot 10^3 & (\text{Vy}) \\Mx &:= 2.24 \cdot 10^6 & (\text{T}) \\My &:= 33.33 \cdot 10^6 \\Mz &:= 19.23 \cdot 10^6\end{aligned}$$

Kvadratiske hulprofil, dimensjoner i mm:

$$\begin{aligned}L_w &:= 200 \\a &:= 8\end{aligned}$$

Materialelegenskaper:

$$\begin{aligned}\text{Table 8.8 ns-en 1991-1: Filler metal 5356: } f_w &:= 210 \text{ N/mm}^2 \\ \gamma_{Mw} &:= 1.25 \\ \beta_w &:= 0.7\end{aligned}$$

Krefter per lengdeenhet sveis:

$$q_N := \frac{Fx}{4 \cdot L_w} = 54.75$$

$$q_V := \frac{Fz}{2 \cdot L_w} + \frac{Fy}{2 \cdot L_w} = 179.25$$

$$q_T := \frac{Mx}{2 \cdot L_w^2} = 28$$

$$I_w := 2 \left(\frac{1}{12} \cdot a \cdot L_w^3 + \frac{1}{12} \cdot L_w \cdot a^3 + \left(\frac{L_w}{2} \right)^2 \cdot L_w \cdot a \right) = 4.268 \cdot 10^7$$

$$q_M := \frac{My}{I_w} \cdot \frac{L_w}{2} \cdot a + \frac{Mz}{I_w} \cdot \frac{L_w}{2} \cdot a = 985.106$$

Totalt per lengdeenhet sveis:

$$q_R := \sqrt{(q_N + q_M)^2 + (q_V + q_T)^2} = 1.06 \cdot 10^3$$

$$kapasitet := \frac{f_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{Mw} \cdot \beta_w} \cdot a = 1.109 \cdot 10^3$$

$q_R < kapasitet$
må være oppfylt

Sveisegruppe Kilsveis 100x100x10

Lastvirkninger på sveisetversnitti N og Nmm:

$$\begin{aligned} Fx &:= 339.5 \cdot 10^3 & (\text{N}) \\ Fz &:= 0.7 \cdot 10^3 & (\text{Vz}) \\ Fy &:= 4.2 \cdot 10^3 & (\text{Vy}) \\ Mx &:= 0 & (\text{T}) \\ My &:= 0.4 \cdot 10^6 \\ Mz &:= 4.2 \cdot 10^6 \end{aligned}$$

Kvadratiske hulprofil, dimensjoner i mm:

$$\begin{aligned} L_w &:= 100 \\ a &:= 9 \end{aligned}$$

Materialelegenskaper:

Table 8.8 ns-en 1991-1: Filler metal 5356:

$$\begin{aligned} f_w &:= 210 \quad \text{N/mm}^2 \\ \gamma_{Mw} &:= 1.25 \\ \beta_w &:= 0.7 \end{aligned}$$

Krefter per lengdeenhet sveis:

$$q_N := \frac{Fx}{4 \cdot L_w} = 848.75$$

$$q_V := \frac{Fz}{2 \cdot L_w} + \frac{Fy}{2 \cdot L_w} = 24.5$$

$$q_T := \frac{Mx}{2 \cdot L_w^2} = 0$$

$$I_w := 2 \left(\frac{1}{12} \cdot a \cdot L_w^3 + \frac{1}{12} \cdot L_w \cdot a^3 + \left(\frac{L_w}{2} \right)^2 \cdot L_w \cdot a \right) = 6.012 \cdot 10^6$$

$$q_M := \frac{My}{I_w} \cdot \frac{L_w}{2} \cdot a + \frac{Mz}{I_w} \cdot \frac{L_w}{2} \cdot a = 344.303$$

Totalt per lengdeenhet sveis:

$$q_R := \sqrt{(q_N + q_M)^2 + (q_V + q_T)^2} = 1.193 \cdot 10^3$$

$$kapasitet := \frac{f_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{Mw} \cdot \beta_w} \cdot a = 1.247 \cdot 10^3$$

$q_R < kapasitet$
må være oppfylt

Non-Commercial Use Only

Sveisegruppe Kilsveis 200x200x10 fagverk bar 67

Lastvirkninger på sveisetversnitti N og Nmm:

$$\begin{aligned}Fx &:= 709.9 \cdot 10^3 & (\text{N}) \\Fz &:= 0.5 \cdot 10^3 & (\text{Vz}) \\Fy &:= 3 \cdot 10^3 & (\text{Vy}) \\Mx &:= 1.2 \cdot 10^6 & (\text{T}) \\My &:= 0 \\Mz &:= 13.5 \cdot 10^6\end{aligned}$$

Kvadratiske hulprofil, dimensjoner i mm:

$$\begin{aligned}L_w &:= 200 \\a &:= 10\end{aligned}$$

a-mål kilsveis:

Materialelegenskaper:

Table 8.8 ns-en 1991-1: Filler metal 5356: $f_w := 210 \text{ N/mm}^2$
 $\gamma_{Mw} := 1.25$
 $\beta_w := 0.7$

Krefter per lengdeenhet sveis:

$$q_N := \frac{Fx}{4 \cdot L_w} = 887.375$$

$$q_V := \frac{Fz}{2 \cdot L_w} + \frac{Fy}{2 \cdot L_w} = 8.75$$

$$q_T := \frac{Mx}{2 \cdot L_w^2} = 15$$

$$I_w := 2 \left(\frac{1}{12} \cdot a \cdot L_w^3 + \frac{1}{12} \cdot L_w \cdot a^3 + \left(\frac{L_w}{2} \right)^2 \cdot L_w \cdot a \right) = 5.337 \cdot 10^7$$

$$q_M := \frac{My}{I_w} \cdot \frac{L_w}{2} \cdot a + \frac{Mz}{I_w} \cdot \frac{L_w}{2} \cdot a = 252.967$$

Totalt per lengdeenhet sveis:

$$q_R := \sqrt{(q_N + q_M)^2 + (q_V + q_T)^2} = 1.141 \cdot 10^3$$

$$kapasitet := \frac{f_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{Mw} \cdot \beta_w} \cdot a = 1.386 \cdot 10^3$$

$$q_R < kapasitet$$

må være oppfylt

Non-Commercial Use Only

Sveisegruppe Kilsveis bar nr. 1461 200x200x10

Lastvirkninger på sveisetversnitti N og Nmm:

$$\begin{aligned}Fx &:= 470 \cdot 10^3 & (\text{N}) \\Fz &:= 4.3 \cdot 10^3 & (\text{Vz}) \\Fy &:= 2.7 \cdot 10^3 & (\text{Vy}) \\Mx &:= 0 & (\text{T}) \\My &:= 14 \cdot 10^6 \\Mz &:= 4.8 \cdot 10^6\end{aligned}$$

Kvadratiske hulprofil, dimensjoner i mm:

$$\begin{aligned}L_w &:= 200 \\a &:= 8\end{aligned}$$

a-mål kilsveis:

Materialeegenskaper:

Table 8.8 ns-en 1991-1: Filler metal 5356: $f_w := 210 \text{ N/mm}^2$
 $\gamma_{Mw} := 1.25$
 $\beta_w := 0.7$

Krefter per lengdeenhet sveis:

$$\begin{aligned}q_N &:= \frac{Fx}{4 \cdot L_w} = 587.5 \\q_V &:= \frac{Fz}{2 \cdot L_w} + \frac{Fy}{2 \cdot L_w} = 17.5 \\q_T &:= \frac{Mx}{2 \cdot L_w^2} = 0\end{aligned}$$

$$I_w := 2 \left(\frac{1}{12} \cdot a \cdot L_w^3 + \frac{1}{12} \cdot L_w \cdot a^3 + \left(\frac{L_w}{2} \right)^2 \cdot L_w \cdot a \right) = 4.268 \cdot 10^7$$

$$q_M := \frac{My}{I_w} \cdot \frac{L_w}{2} \cdot a + \frac{Mz}{I_w} \cdot \frac{L_w}{2} \cdot a = 352.359$$

Totalt per lengdeenhet sveis:

$$q_R := \sqrt{(q_N + q_M)^2 + (q_V + q_T)^2} = 940.022 \quad \text{kapasitet} := \frac{f_w}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{Mw} \cdot \beta_w} \cdot a = 1.109 \cdot 10^3$$

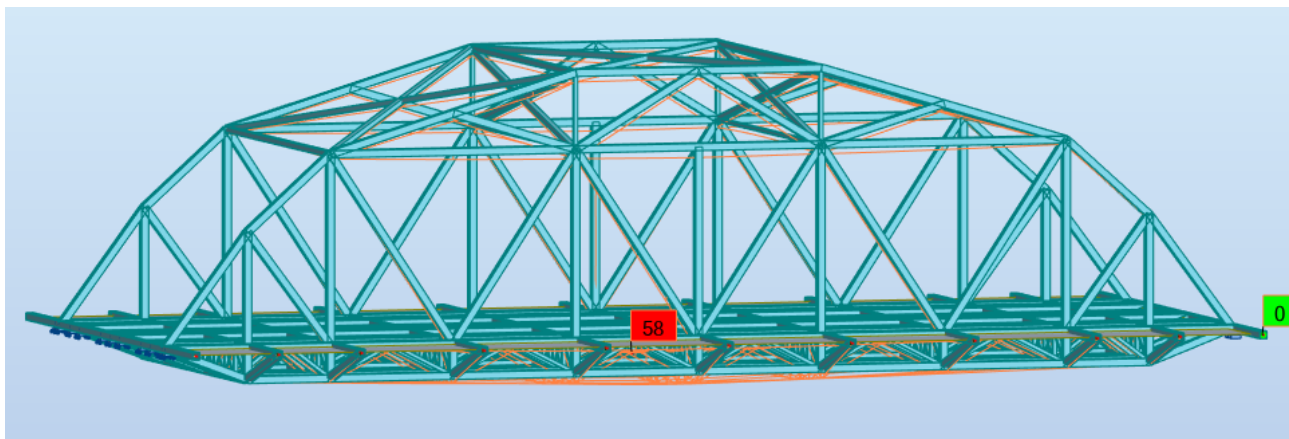
$q_R < \text{kapasitet}$
 må være oppfylt

Non-Commercial Use Only

Dataene angående a-mål på sveis vil bli brukt til kostnadsestimeringen for brua.

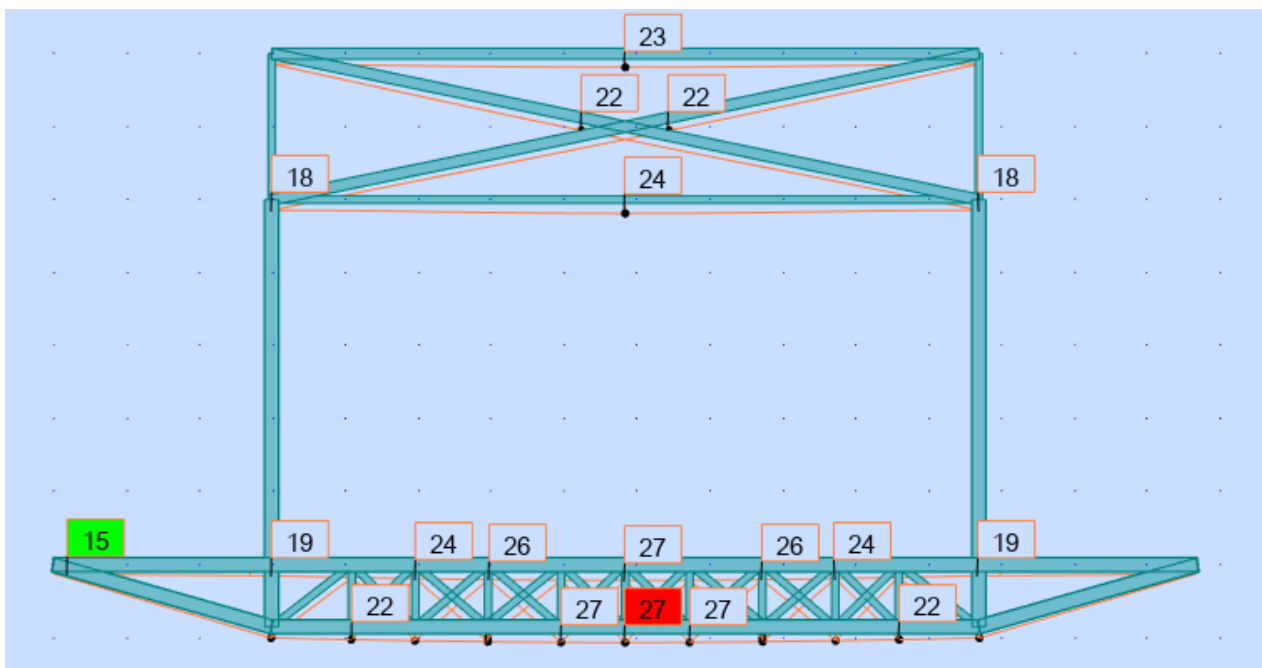
5.7 Bruksgrensetilstand etter N400

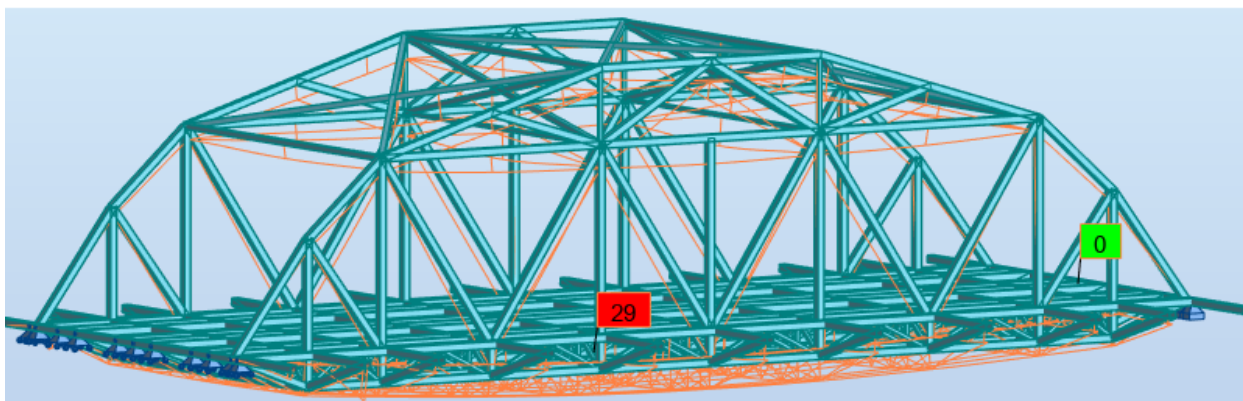
Ny kontroll av nedbøyning med karakteristisk trafikklast alene



I henhold til N400 skal det utføres en nedbøyingskontroll grunnet permanente laster. De variable lastene skal ha kombinasjonsfaktor = 0. Siden brua kun består av egenlaster og variable laster vil kontrollen kun gjelde egenlaster. Kontrollen for de permanente laster er ment for korrigering av overhøyde, som følge av endring grunnet egenlastene.

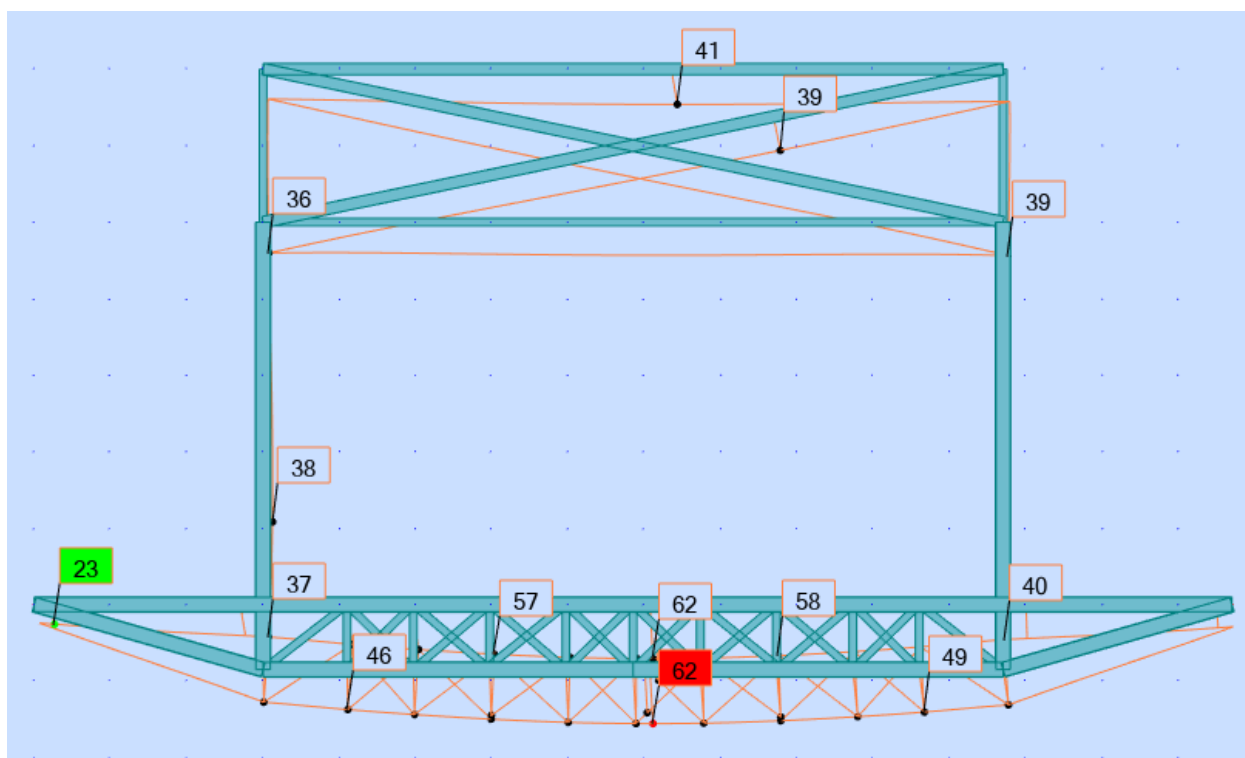
Bilde av deformasjoner grunnet egenlastene:





Som figuren viser vil det være noe større nedbøyning på midten enn på toppen av konstruksjon. For å få ei rett bru kan man bygge den med en liten vinkel slik at deformasjonene fra egenlastene vil danne en rett vinkel.

Neste bruksgrensekontroll etter ofte forekommende kombinasjon.



5.8 Oppbygging av stålmødel

For oppbygging av stålmødel er det tatt utgangspunkt i aluminiumsmødel for best mulig prissammenlikning. Videre vil stålkonseptet også dimensjoneres etter elastisk teori. På stålbua vil det i hovedsak brukes Robot for kontroll av spenninger da våre manuelle kontroller i stor grad er i samsvar med Robot sine beregninger. Nedenfor ligger det stegvis punktliste for endringer.

1. Underdel av bua byttes ut med høye HE-B bjelker i stedet for kryssformet underbygging.
2. Alt av material i overbygging endres til stål. Foreløpig med samme tverrsnitt.
3. Økt egenlast på gangfelt og veibane.
4. Fagverket løftes 0,3m pga økt høyde tverrgående bjelker

Ved analyse observeres det for høy normalspenninger på fagverket. Dette på grunn av annerledes underbygning som gjør at fagverk må ta større strekk- og trykkrefter. På bakgrunn av dette endres tverrsnittet fra HFRHS200x200x10 til HFRHS200x200x12,5.

Prosjekterte elementer:

Fagverk: HFRHS200x200x12,5

Tverrbærere: HE 500B, foruten om tverrbærer på midten; Her brukes HE 550B da normalspenningene blir for høy med 500 bjelke. Dette er kun gjeldende for lastkombinasjon med boggisystem på midten og er derfor bare behov for den type dimensjon der.

Langsgående avstivere: HE 260B

Vindavstivere på toppen av konstruksjon: HFRHS150x150x8

Undergurt: HE450B

5.8.1 Kontroll av stålmodell i Robot

Normalspenninger:

Utdrag av største normalspenninger (S max) i stålkonstruksjon. Det finnes en høyere normalkraft som ikke vises i tabell da den opptrer mellom noder. Påvisning på den finnes lengere ned

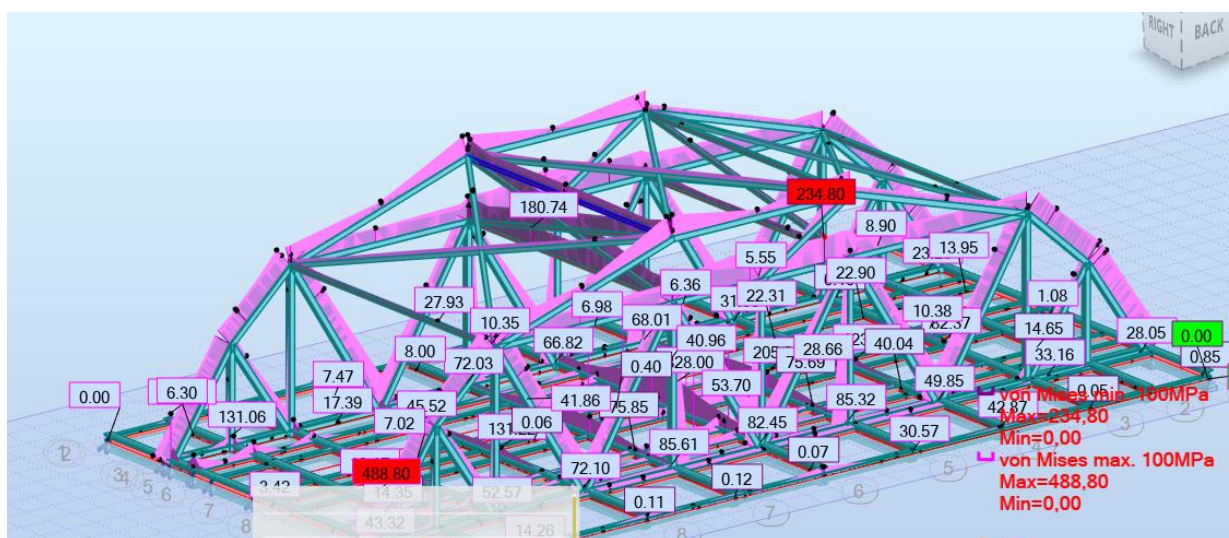
Bar/Node/Case	S max (MPa)▼	S min (MPa)	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)
1844/ 31/ 802 (C)	242,40	122,02	25,72	34,47	-25,72	-34,47
1849/ 45/ 801 (C)	240,24	146,77	38,83	7,91	-38,83	-7,91
1848/ 151/ 801 (C)	237,12	160,82	25,19	12,96	-25,19	-12,96
1819/ 154/ 801 (C)	232,80	141,08	23,69	22,18	-23,69	-22,18
1844/ 31/ 801 (C)	231,54	168,73	22,71	8,70	-22,71	-8,70
1811/ 1/ 802 (C)	230,80	109,67	23,18	37,39	-23,18	-37,39
1849/ 1158/ 801 (C)	225,89	161,49	15,58	16,62	-15,58	-16,62
1819/ 154/ 807 (C)	225,83	138,17	23,71	20,12	-23,71	-20,12
1811/ 1/ 801 (C)	225,77	148,58	21,52	17,08	-21,52	-17,08
1844/ 1157/ 802 (C)	223,55	140,26	2,06	39,58	-2,06	-39,58
1820/ 23/ 801 (C)	222,55	139,90	33,08	8,25	-33,08	-8,25
1849/ 45/ 800 (C)	221,55	138,87	32,48	8,86	-32,48	-8,86
1848/ 151/ 800 (C)	221,48	151,24	23,47	11,65	-23,47	-11,65
1819/ 154/ 800 (C)	221,04	135,66	22,51	20,18	-22,51	-20,18
1848/ 151/ 807 (C)	218,37	144,17	23,47	13,63	-23,47	-13,63
1811/ 1/ 807 (C)	218,28	146,54	21,87	14,00	-21,87	-14,00
1845/ 1157/ 802 (C)	217,49	108,55	10,68	43,78	-10,68	-43,78
1844/ 31/ 800 (C)	216,63	158,15	21,26	7,98	-21,26	-7,98
795/ 18/ 801 (C)	216,20	137,37	37,25	2,17	-37,25	-2,17

Utdrag minste normalspenninger (S min):

Bar/Node/Case	S max (MPa)	S min (MPa)▲	S max(My) (MPa)	S max(Mz) (MPa)	S min(My) (MPa)	S min(Mz) (MPa)
1857/ 34/ 801 (C)	-79,77	-228,98	14,95	59,66	-14,95	-59,66
1865/ 38/ 801 (C)	-89,72	-213,84	3,59	58,47	-3,59	-58,47
1832/ 4/ 801 (C)	-70,64	-213,53	13,83	57,62	-13,83	-57,62
1840/ 8/ 801 (C)	-70,18	-209,33	3,92	65,65	-3,92	-65,65
1857/ 34/ 800 (C)	-74,40	-204,35	13,64	51,34	-13,64	-51,34
1860/ 35/ 801 (C)	96,12	-201,90	17,12	131,88	-17,12	-131,88
1835/ 5/ 801 (C)	100,42	-201,00	14,90	135,81	-14,90	-135,81
1843/ 7/ 801 (C)	97,31	-198,88	20,51	127,58	-20,51	-127,58
1868/ 37/ 801 (C)	91,49	-198,13	23,30	121,51	-23,30	-121,51
1859/ 36/ 801 (C)	85,08	-195,23	7,92	132,23	-7,92	-132,23
1832/ 4/ 800 (C)	-68,67	-193,09	12,81	49,40	-12,81	-49,40
1867/ 36/ 801 (C)	64,63	-191,53	1,81	126,26	-1,81	-126,26
1861/ 36/ 801 (C)	160,86	-191,13	12,34	163,65	-12,34	-163,65
1865/ 38/ 800 (C)	-82,95	-191,10	3,52	50,56	-3,52	-50,56
1840/ 8/ 800 (C)	-68,42	-189,17	3,74	56,63	-3,74	-56,63
1857/ 34/ 806 (C)	-60,25	-188,95	12,53	51,82	-12,53	-51,82
1836/ 6/ 801 (C)	160,09	-188,28	10,86	163,32	-10,86	-163,32
1865/ 45/ 801 (C)	-116,28	-188,25	19,07	16,91	-19,07	-16,91
1852/ 42/ 801 (C)	141,57	-185,87	137,10	26,62	-137,10	-26,62
1834/ 6/ 801 (C)	90,85	-184,16	7,12	130,39	-7,12	-130,39
1842/ 6/ 801 (C)	72,95	-183,64	1,56	126,74	-1,56	-126,74
1832/ 4/ 806 (C)	-53,71	-179,49	11,71	51,18	-11,71	-51,18

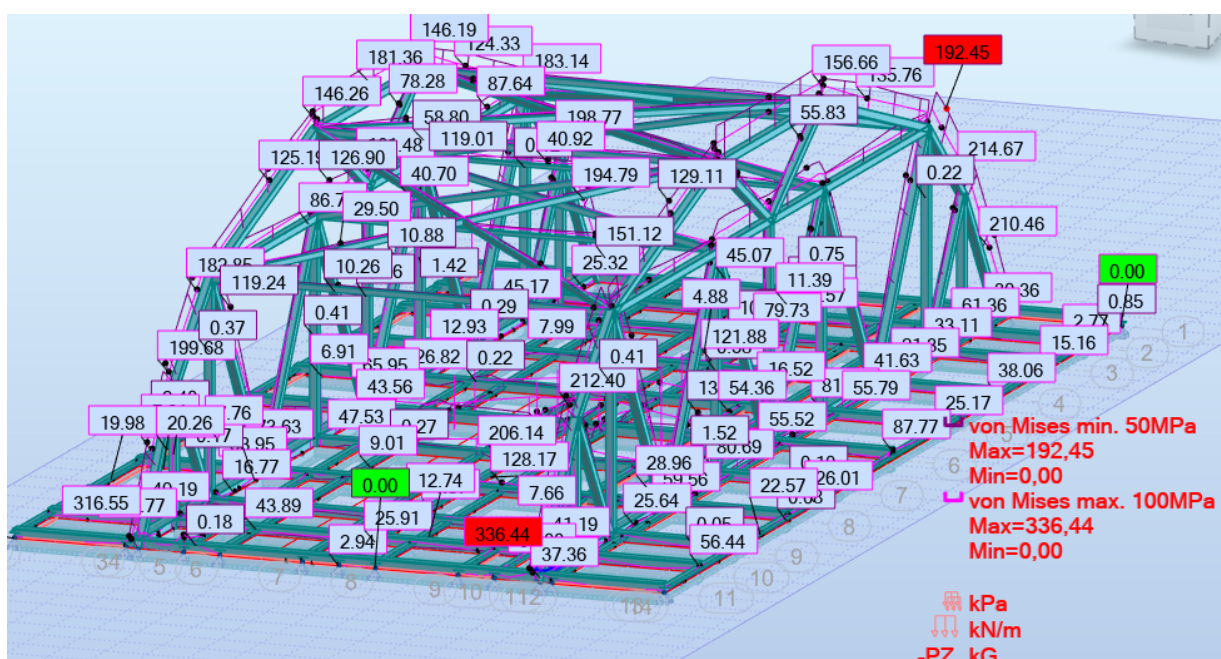
Von Mises:

Først analyse av Mises for lastgruppe 1a(6.10b) med boggisystem på midten:



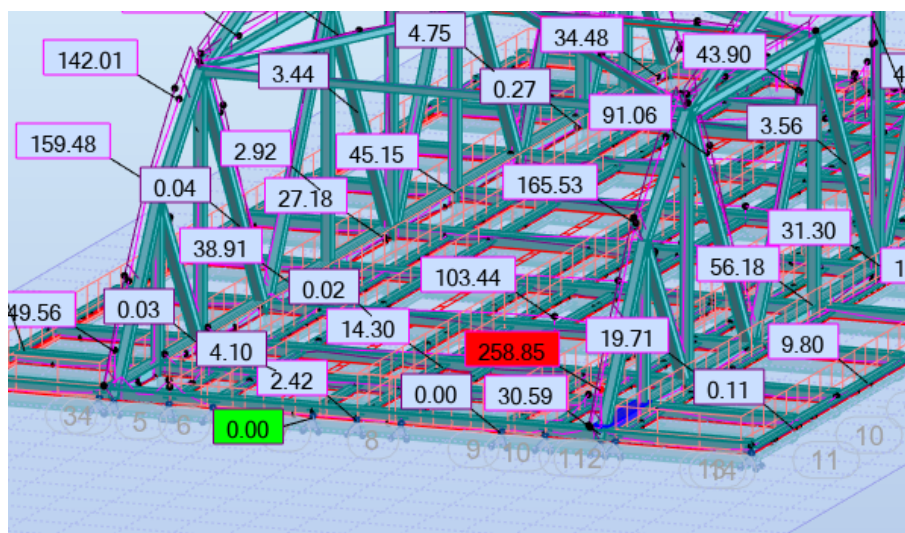
Som bildet over viser er det for høye Mises-spenninger; $488\text{MPa} > F_{yd}$

Spenningen opptrer i undergurt. For nok kapasitet i undergurt må det settes inn HE 600B. Under vises ny Mises-analyse

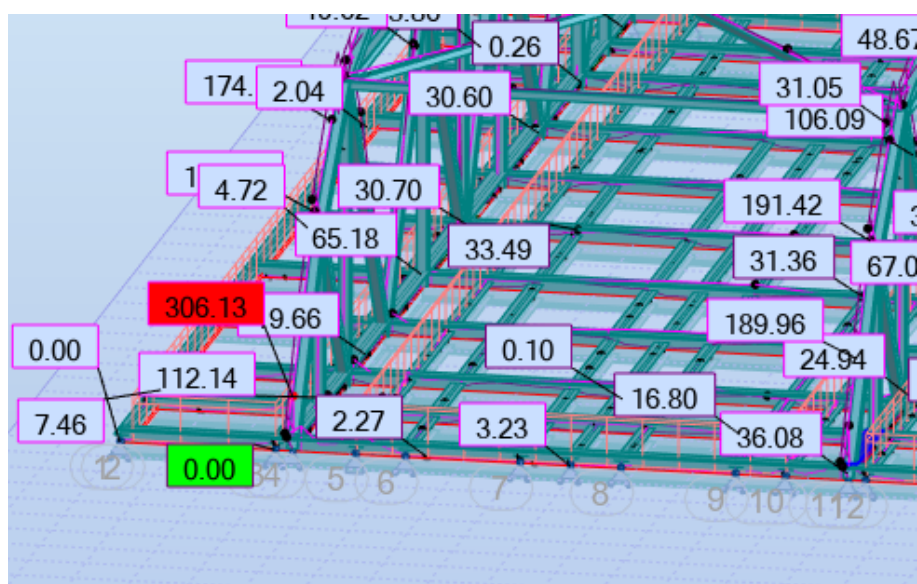


Største Mises spenning = $336,44\text{MPa} < F_{yd} = 338\text{MPa}$

Mises analyse for lastgruppe 1a(6.10b) med boggisystem på starten av konstruksjon:



Mises analyse for lastgruppe 4(6.10b) folkelast:



Knekking:

Knekkanalyse kjøres for de tre verste lastgruppene, henholdsvis gr1a(6.10b) med boggisystem på midten/start og gr4(6.10b) folkelast.

Gr.1a(6.10b)LM1-MIDTEN

Case/Mode	Critical coef.	Precision
801/ 1	4,14790e+00	3,39586e-05
801/ 2	4,96960e+00	7,14507e-05
801/ 3	5,17977e+00	2,59321e-04
801/ 4	5,54654e+00	1,74947e-04
801/ 5	6,51742e+00	3,90538e-04
801/ 6	7,08084e+00	4,81076e-04
801/ 7	7,82074e+00	9,90343e-04
801/ 8	8,63604e+00	1,08711e-03
801/ 9	9,91604e+00	1,34337e-03
801/ 10	1,06460e+01	1,97808e-03
801/ 11	1,11792e+01	7,31103e-05
801/ 12	1,12725e+01	1,73513e-04
801/ 13	1,22732e+01	1,90764e-04
801/ 14	1,25780e+01	2,01321e-04
801/ 15	1,31010e+01	4,19915e-04
801/ 16	1,34602e+01	4,55333e-04
801/ 17	1,37449e+01	6,67617e-04
801/ 18	1,47148e+01	3,28232e-04
801/ 19	1,52888e+01	2,11103e-04
801/ 20	1,67105e+01	2,95226e-03

Alle knekk-koeffisienter > 1 , ok

Gr.1a(6.10b)LM1-STARTEN

Case/Mode	Critical coef.	Precision
802/ 1	5,38975e+00	2,96269e-05
802/ 2	6,28254e+00	6,60761e-05
802/ 3	6,72665e+00	1,02468e-04
802/ 4	7,02228e+00	1,69212e-04
802/ 5	8,99374e+00	3,74369e-04
802/ 6	9,55840e+00	6,19683e-04
802/ 7	1,12725e+01	1,10285e-03
802/ 8	1,21405e+01	1,02480e-03
802/ 9	1,30431e+01	1,47491e-03
802/ 10	1,36825e+01	1,61810e-03
802/ 11	1,46786e+01	6,37689e-05
802/ 12	1,52785e+01	1,62132e-04
802/ 13	1,65196e+01	8,19766e-05
802/ 14	1,76973e+01	3,24924e-04
802/ 15	1,80150e+01	4,62860e-04
802/ 16	1,83384e+01	4,32354e-04
802/ 17	1,89427e+01	5,60648e-04
802/ 18	2,04180e+01	5,33866e-04
802/ 19	2,10419e+01	6,60907e-04
802/ 20	2,22512e+01	2,42173e-03

Alle knekk-koeffisienter > 1, ok

Gr.4(6.10.b)LM4

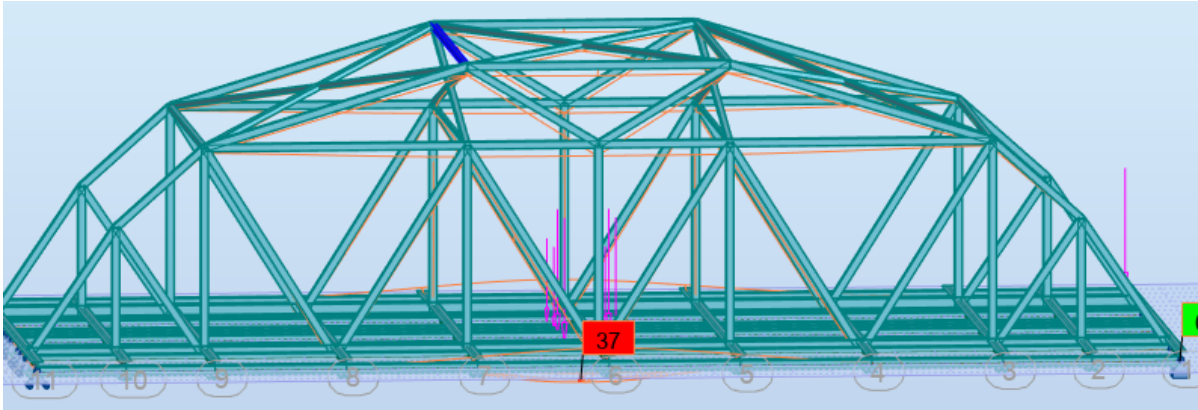
Case/Mode	Critical coef.	Precision
807/ 1	4,69457e+00	2,94284e-05
807/ 2	5,52749e+00	5,02479e-05
807/ 3	5,86658e+00	1,54981e-04
807/ 4	5,88603e+00	1,22191e-04
807/ 5	7,73259e+00	4,10428e-04
807/ 6	8,05267e+00	6,36624e-04
807/ 7	9,56394e+00	9,93955e-04
807/ 8	1,01410e+01	6,60577e-04
807/ 9	1,15541e+01	1,75682e-03
807/ 10	1,16375e+01	1,76668e-03
807/ 11	1,26843e+01	4,14655e-05
807/ 12	1,30400e+01	2,76997e-04
807/ 13	1,40617e+01	5,98891e-05
807/ 14	1,51327e+01	4,11377e-03
807/ 15	1,55353e+01	5,64502e-04
807/ 16	1,55436e+01	2,90933e-04
807/ 17	1,59004e+01	6,10966e-04
807/ 18	1,72208e+01	4,99399e-04
807/ 19	1,81263e+01	9,79525e-04
807/ 20	1,89836e+01	1,68428e-03

Alle knekk-koeffisienter > 1, ok

5.9 Bruksgrensek kontroll for stålbru

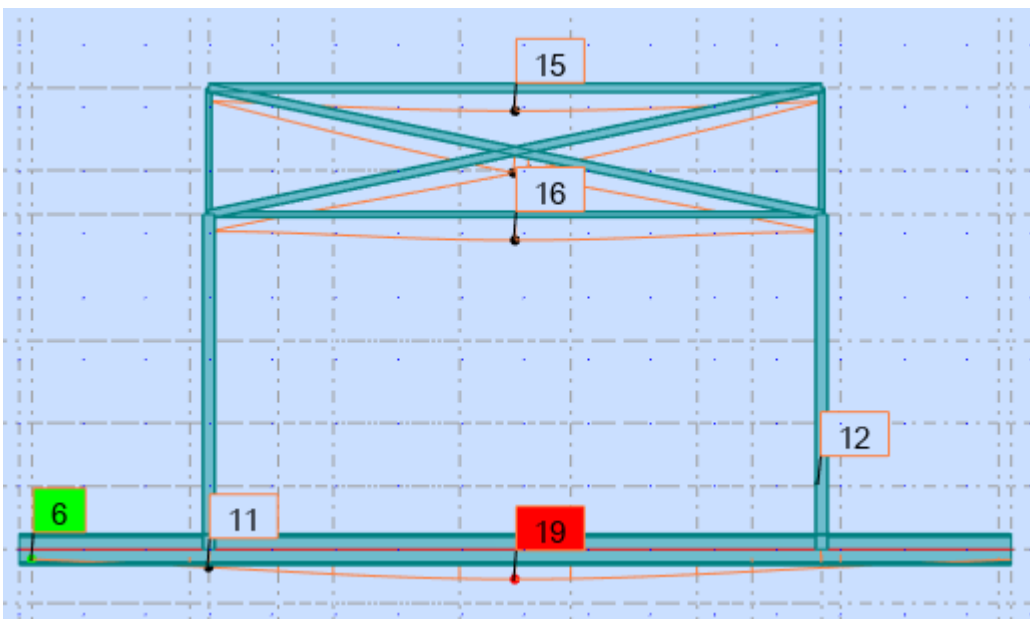
Samme krav gjelder her som for aluminiumsbrua.

Kontroll av nedbøyning med karakteristisk trafikklast alene.



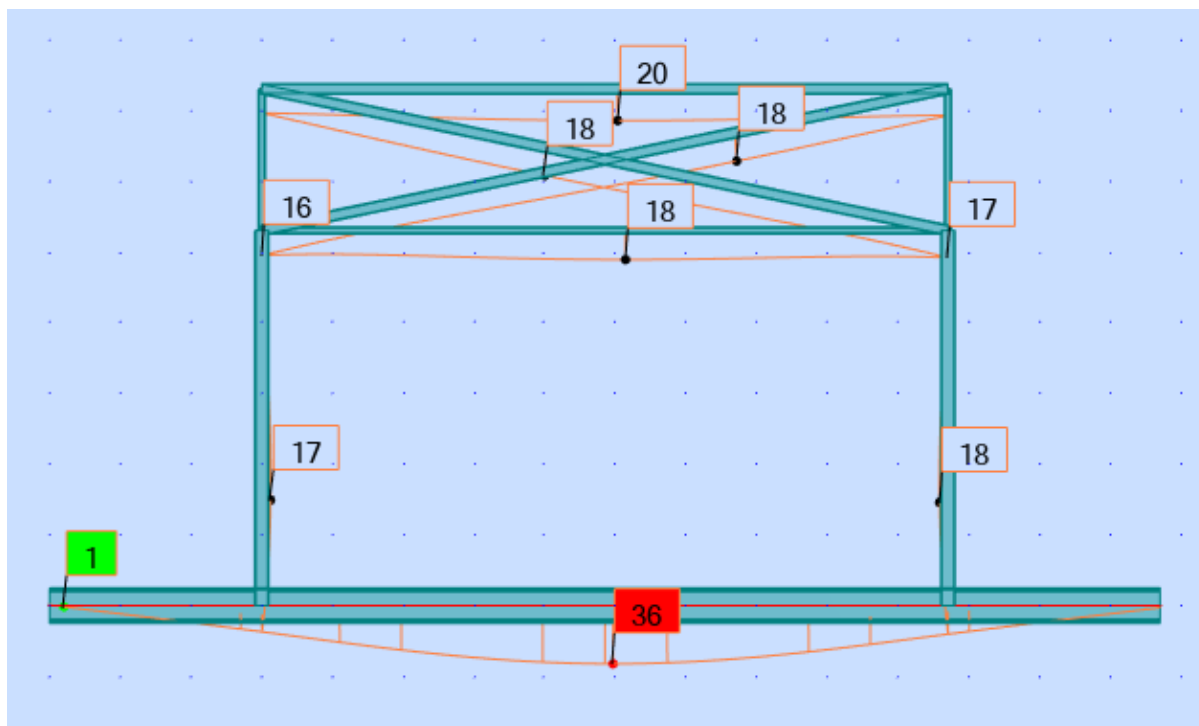
Nedbøyning $< 82,9\text{mm}$, ok.

Kontroll av nedbøyning forårsaket av permanente laster.



Samme metode som for aluminiumsbru

Ofte forekommende kombinasjon:



Ikke behov for korrigering av overhøyde.

6 Vedlegg G – Regneark for priser

6.1 Tilbud fra Hydal Aluminium Profiler



Valuta: NOK

Kunde: NTNU

Dato: 2021-04-15

Kunde art.nr	Hydal nr	Kundens bearb.tegning	Rev.	Hydal bearb.tegning	Rev.	Vekt/m	Lengde	Profil	Verktøykost Bearbeiding	Pris / stk	Pris / m	Innst.kost	Avrop/stk	Overflatebeh
80x80x8	XFR 0808					6,081	13600	39 500		3 491,66	256,74		30	
80x80x8	XFR 0808					6,081	6000	39 500		1 426,42	237,74	10 000	30	
80x80x8	XFR 0808					6,081	6000	39 500		1 426,42	237,74		45	
100x100x10	XFR 1012					9,720	13600	39 500		5 581,15	410,38		20	
100x100x10	XFR 1012					9,720	6000	39 500		2 280,02	380,00	10 000	20	
100x100x10	XFR 1012					9,720	6000	39 500		2 280,02	380,00		30	
200x200x10						20,500	13600	61 500		12 115,95	890,88		15	
200x200x10						20,500	6000	61 500		4 960,90	826,82	10 000	10	
200x200x10						20,500	6000	61 500		4 960,90	826,82		15	

Tilleggs kommentarer:

Produkt Karakteristikk

Standard Ekstrudering EN-755-9
Bearbeiding ISO EN 2768-1-M

Lengde tolereranse +/- 5mm - NS ISO 2768-1-m

Avrop / STK Angir minimumsmengde for bestilling per profil / artikkel

Legering 6082.50 T6

Material pris 26,97 NOK pr kg

6.2 Beregning av meter sveis og pris

Aluminiumsutførelsen						
Regneark for antall knutepunkt i forbindelse med sveis						
Type sveiser og priser hentet fra Langenuen rapport						
SveisID	Type sveis	A-mål	Pris/m L	Pris/m M	Pris/m H	
W1	Kilsveis	5mm	72,8	118,8	155,8	
W3	Kilsveis	8mm	218,5	356,5	467,5	
W4	Kilsveis	10mm	291,3	475,4	623,3	
W9	Buttsveis ensidig	10mm	291,3	475,4	623,3	

BUTTSVEIS			
Tverrgående bærer		Sveistype	W9
Antall elementer overside	11	Meter sveis OS	17,6
Antall elementer underside	9	Meter sveis US	14,4
Antall punkt for buttsveis overside	2	Pris buttsveis OS	10970,08
Antall punkt for buttsveis underside	2	Pris buttsveis US	8975,52
		Totalpris buttsveis	
Lengde per buttsveispunkt [m]	0,8	tverrgående	kr 19 946

Langsgående bærer og fagverk			
Antall elementer overside	9	Meter Sveis OS	0
Antall elementer underside	9	Meter sveis US	0
Antall fagverk	2	Meter sveis fagverk	19,2
Antall punkt for buttsveis overside	0	Pris buttsveis OS	0
Antall punkt for buttsveis underside	0	Pris buttsveis US	0
Antall punkt for buttsveis fagverk	12	Pris Buttsveis Fagverk	11967,36
		Totalpris buttsveis	
Lengde per buttsveis	0,8	langsgående	11967,36

Kilsveis				
Tverrgående bærer		Sveistype	W3	W4
Antall elementer overside	11	Meter sveis OS	59,4	148,5
Antall elementer underside	9	Meter sveis US	28,8	121,5
200x200 mot 200x200 Overisde	6	Pris kilsveis OS	27769,5	70596,9
200x200 mot 200x200 Underside	4	Pris kilsveis US	13464	57761,1
100x100 mot 200x200 OS	27	Samlet	41233,5	128358
100x100 mot 200x200 US	27	Totalpris kilsveis	169591,5	
Snittlengde per kilsveis 200x200OS	0,9			
Snittlengde per kilsveis 200x200US	0,8			
Snittlengde per kilsveis 100x100	0,5			

Langsgående bærer og fagverk				
		Sveistype	W3	W4
Antall elementer overside	9	Meter sveis OS	263,7	
Antall elementer underside	9	Meter sveis US	263,7	
Antall fagverk	2	Meter sveis fagverk		68,88
200x200 mot 200x200 Overisde	21	Pris kilsveis OS	123279,75	
200x200 mot 200x200 Underside	21	Pris kilsveis US	123279,75	
200x200 mot 200x200 Fagverk	42	Pris kilsveis fagverk		42932,904
100x100 mot 200x200 OS	25	Samlet	246559,5	42932,904
100x100 mot 200x200 US	25	Totalpris kilsveis	289492,404	
100x100 mot 200x200 Fagverk				
Snittlengde per kilsveis 200x200OS	0,8			
Snittlengde per kilsveis 200x200US	0,8			
Snittlengde per kilsveis 200x200 Fagverk	0,82			
Snittlengde per kilsveis 100x100	0,5			

Oppsummert			
	Buttsveis	Kilsveis	Total
Tverrgående [m]	32	358,2	390,2
[Langsgående [m]	19,2	596,28	615,48
Tot[m]	51,2	954,48	1005,68
Pris tverrgående	19945,60	169591,5	189537,10
Pris langsgående	11967,36	289492,404	301459,764
Tot	kr 31 913	kr 459 084	kr 490 997

6.3 Material og totalkostnader for aluminium

Aluminiumspriser - Material og totalkostnader med sveis				
Profilert lengder og vekt				
Profil	Total lengde	Vekt/m		
200X200X10	1200,76	20,5		
150X150x8	149,7	12,51		
100X100X10	555,61	9,72		
Materialpriser etter tilbud fra Hydal aluminiumsprofiler				
Pris/m	Verktøykostn.	Innstillkostn	Totpris	totkg
890,88	61500		1069733,069	24615,58
535,93	39500	10000	80228,721	1872,747
410,38	39500		228011,2318	5400,5292
			kr 1 528 473	31888,86
			Pris/kg materiale	kr 47,93
20% økning kapp og lagring				
totalpris:	kr 1 834 167,63			
per kg	kr 57,52			
Priser med materiale og sveis				
Kostnader		med 20% tillegg		
Materiale	kr 1 528 473	kr 1 834 168		
Sveis	kr 490 997			
Montering				
Tot	kr 2 019 470	kr 2 325 164		
Pris/kg	63,33	kr 72,91		

6.4 Stålpriser ferdig produsert (Kappet og sveiset)

Priser forespurt fra Pro Con AS					
Snittpris inn s355	13,75				
Antar 20% økning i kutt og lageravgift	16,5				
Antagelse over pris ferdig produsert kappet og sveiset	Stål	Med galvanisering			
	18	26			
OBS montering ikke inngått					
Profil	Totallengde	kg/m	Total vekt [kg]	Pris	Pris med galvanisering
HE260B	319,55	92,98	29711	534798	772486
HEB 500	157	187,37	29417	529506	764842
HEB 550	15,7	199,54	3133	56394	81458
HEB 600	58,1	212,03	12319	221742	320294
RHSS100x100x10	19,4	27,41	532	9576	13832
RHSS150x150x8	149,74	35,18	5268	94824	136968
RHSS200x200x10	214,06	58,82	12591	226638	327366
RHSS 200x200x12.5	68,04	72,32	4921	88578	127946
Total	1001,59		97891	1762056	kr 2 545 192
				Per kg	26,00

7 Vedlegg F – Python-script

```

In [36]: #Importerer bibliotekene numpy, math og colorama
import numpy as np
import math
import colorama
from colorama import Fore, Style

#Elastisitetmodul, materialfaktor, flytegrense, dim.flytegrense
E = 70000          #For aluminium
M_0 = 1.10         #Fra Alu-standarden
fy = 260           #For 6082 T-6
fd = fy / M_0

#Tverrsnittsarealene til profilene 100*100*10 og 200*200*10
A_100 = 3550
A_200 = 7450

#Arealtreghetsmoment om sterk akse y til profilene 100*100*10 og 200*200*10
Iy_100 = 4.74*10**6
Iy_200 = 44.2*10**6

#Data som hentes fra Robot. Her det vist 9 staver.
#Kopierer inn opptredende krefter, lengder og tv.snittareal til alle stavene

kraft = [300000,900000,0,-580000,230000,-755000,-730000,156000,430000]    #[N]
lengde = [3300,4000,11000,95000,3900,73000,11000,12000,10000]           #[mm]
tsnitt = [100,200,100,100,200,200,100,100,200]                          #Tilhørende profil

tsnittareal = [1,1,1,1,1,1,1,1,1]
I_y = [1,1,1,1,1,1,1,1,1]

#Løkken under oppdaterer verdiene til tsnittareal og I_y over
for x in range(9):
    if tsnitt[x] == 100:
        tsnittareal[x] = A_100
        I_y[x] = Iy_100
    else:
        tsnittareal[x] = A_200
        I_y[x] = Iy_200

#Aksialkapasitet, kritisk last N_CR til forenkelt knekking og utnyttelsesgrad

for x in range(9):

    Iy = I_y[x]
    length = lengde[x]

    aksialkapasitet = tsnittareal[x] * fd

    #For stav som er leddet i bunn og topp, er knekk lengden lik lengden.
    N_CR = ((math.pi**2) * E * Iy) / (length**2)

    utnyttelsesgrad = kraft[x] / aksialkapasitet

#Kontroll av trykkstaver i fagverket

```



```

if kraft[x] > 0:

    if kraft[x] < aksialkapasitet:

        if kraft[x] < N_CR:

            if utnyttelsesgrad >= 0.50:
                print(Fore.GREEN + "Stav: ", x+1, " ok, utnyttelsesgrad: ",
                    np.round(utnyttelsesgrad*100, 2), "%")

            else:
                print(Fore.YELLOW + "Stav: ", x+1, " ok, men lav utnyttelsesgrad: "
                    np.round(utnyttelsesgrad*100, 2), "%"
                    + " Tverrsnittet kan potensielt reduseres.")

        else:
            print(Fore.RED + "Stav: ", x+1, " ikke ok, knekking oppstår.")

    else:
        print(Fore.RED + "Stav: ", x+1, " ikke ok," +
            " opptredende kraft større enn kapasitet.")

#Nullstaver i fagverket

elif kraft[x] == 0:
    continue

    #Dersom nullstaver skal printes i scriptet blir det:
    #print(Fore.BLACK + "Stav: ", x+1, " er en nullstav." +
        #"Trengs ingen endringer.")

#Kontroll av strekkstaver i fagverket.
#Ganges med (-1) for å få positive verdier.

else:
    if ((-1) * kraft[x]) < aksialkapasitet:
        if ((-1) * utnyttelsesgrad) > 0.50:
            print(Fore.GREEN + "Stav: ", x+1, " ok, utnyttelsesgrad: ",
                np.round(utnyttelsesgrad*(-1)*100, 2), "%")

        else:
            print(Fore.YELLOW + "Stav: ", x+1, " ok, men lav utnyttelsesgrad: ",
                np.round(utnyttelsesgrad*(-1)*100, 2), "%"
                + " Tverrsnittet kan potensielt reduseres.")

    else:
        print(Fore.RED + "Stav: ", x+1, " ikke ok, opptredende kraft større enn kap

```

```

Stav: 1 ok, men lav utnyttelsesgrad: 35.75 % Tverrsnittet kan potensielt reduseres.
Stav: 2 ok, utnyttelsesgrad: 51.11 %
Stav: 4 ok, utnyttelsesgrad: 69.12 %
Stav: 5 ok, men lav utnyttelsesgrad: 13.06 % Tverrsnittet kan potensielt reduseres.
Stav: 6 ok, men lav utnyttelsesgrad: 42.88 % Tverrsnittet kan potensielt reduseres.

```

Stav: 7 ok, utnyttelsesgrad: 87.0 %

Stav: 8 ikke ok, knekking oppstår.

Stav: 9 ikke ok, knekking oppstår.

In []:

In []:

In []: