Vedlegg G
Kapasitetskontroll av aluminium:
Eurokode 9: Prosjektering av aluminiumskonstruksjoner, Del 1-1: Allmenne regler [1]

For å sjekke stadiet mot knekking har det blitt valgt å kontrollere kapasiteten til de to mest kritiske stavene, nummerert 99 og 100 i SAP2000 modellen.

Kontroll av stav nr.99:
Det har blitt valgt å gå for Alloy EN-AW 6082.

Tykkelse: $5 < t \le 15$

$fo := 260 \ \frac{N}{mm^2}$ $\qquad fu := 310 \ \frac{N}{mm^2}$ $\qquad$ [1: Tabell 3.2b]

$fo.haz := 125 \ \frac{N}{mm^2}$ $\qquad fu.haz := 185 \ \frac{N}{mm^2}$

HAZ-faktor:

$\rho o.haz := 0.48$ $\qquad \rho u.haz := 0.60$

Knekklasse: A

Design verdier for materialkonstanter: [1: (3.2.5(1))]

$E := 70000 \ \frac{N}{mm^2}$ $\qquad G := 27000 \ \frac{N}{mm^2}$

$\nu := 0.3$

$\alpha := 23 \cdot 10^{-6}$

$\rho := 2700 \ \frac{kg}{m^3}$

Opptredende laster for stav nr.99:
Opptredende laster har blitt hentet fra analyse i SAP2000.

$NEd := |-3316.3 \ kN|$

$My.Ed := |-101.007 \ kN \cdot m|$
$Mz.Ed := 11.66 \ kN \cdot m$

$Vy.Ed := 13.636 \ kN$
$Vz.Ed := |-27.855 \ kN|$

Sikkerhetsfaktorer:

$\gamma M1 := 1.10$ [1: Tabell 6.1]

$\gamma M2 := 1.25$

Etter 6.1.4.2 Klassifisering vil tverrsnittet være av klasse 3.

Parametre for HEA600 fra SAP2000:

$Wel.y := 5.350 \cdot 10^6 \ mm^3$

$Wel.z := 7.513 \cdot 10^5 \ mm^3$

$Wpl.y := 4.786 \cdot 10^6 \ mm^3$

$Wpl.z := 1.156 \cdot 10^6 \ mm^3$

$Iy := 1.412 \cdot 10^9 \ mm^4$

$Iz := 1.127 \cdot 10^8 \ mm^4$

$It := 4.070 \cdot 10^6 \ mm^4$

$Iw := 8.994 \cdot 10^6 \ mm^4$

$A := 22600 \ mm^2$

A = Ag = Anet. Det samme gjelder A = Aeff siden tverrsnittet er av klasse 3.

Tension:

Design verdien for tension bør tilfredsstille: $\frac{NEd}{Nt.Rd} \le 1$ [1: (6.17)]

Fra 6.2.3(2) vil spenningsmotstanden av tverrsnittet Nt,Rd være den minste verdien.

$No.Rd := A \cdot \frac{fo}{\gamma M1} = 5341.818 \ kN$ [1: (6.18)]

$Nu.RdT\_1 := 0.9 \cdot A \cdot \frac{fu}{\gamma M2} = 5044.32 \ kN$ [1: (6.19a)]

$Nu.RdT\_2 := A \cdot \frac{fu}{\gamma M2} = 5604.8 \ kN$ [1: (6.19b)]

$Nt.Rd := Nu.RdT\_1 = 5044.32 \ kN$

$\frac{NEd}{Nt.Rd} = 0.657$ *Ok*

Compression:

Design verdien for compression bør tilfredsstille: $\frac{NEd}{Nc.Rd} \le 1$ [1: (6.20)]

$Nu.RdC := A \cdot \frac{fu}{\gamma M2} = 5604.8 \ kN$ [1: (6.21)]

$$Nc.RdC := A \cdot \frac{fo}{\gamma M1} = 5341.818\ kN$$ [1: (6.22)]

Fra 6.2.4(2) vil spenningsmotstanden av tverrsnittet Nc,Rd være tilsvarende den minste verdien.

$$Nc.Rd := Nc.RdC = 5341.818\ kN$$

$$\frac{NEd}{Nc.Rd} = 0.621$$ *Ok*

Buckling Resistance:

Knekkmotstanden bør oppfylle kravet: $\frac{NEd}{Nb.Rd} \le 1$ [1: (6.48)]

$k := 1$ $Lt := 7433\ mm$ [SAP2000]

$$NCr.y := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot Iy}{k^2 \cdot Lt^2} = 17656.484\ kN$$ [1: (I.14)]

$$NCr.z := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot Iz}{k^2 \cdot Lt^2} = 1409.267\ kN$$ [1: (I.15)]

$is := 0.26\ mm$ [SAP2000]

$$NCr.T := \frac{1}{is^2}\left(G \cdot It + \boxed{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot Iw}{k^2 \cdot Lt^2}}\right)$$ [1: (I.16)]

$NCr.T := 3291.271\ kN$ $NCr := NCr.T$ [SAP2000]

$$\lambda := \sqrt{\frac{A \cdot fo}{NCr}} = 1.336$$ [1: (6.51)]

Flexural buckling:

Klasse A: $\alpha := 0.20$ $\lambda 0 := 0.10$ [1: Tabell 6.6]

$$\phi := 0.5 \cdot \left(1 + \alpha \cdot (\lambda - \lambda 0) + \lambda^2\right) = 1.516$$ [1: (6.50)]

$$\chi := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda}} = 0.4$$ [1: (6.50)]

$bhaz := 35\ mm$ $h := 25\ mm$ [1: (6.1.6.3(3))]

$Ahaz := bhaz \cdot h = 875\ mm^2$ [1: Tabell 6.5]

$A1 := A - Ahaz \cdot (1 - \rho o.haz) = (2.215 \cdot 10^4)\ mm^2$

$\kappa := 1 - \left(1 - \frac{A1}{A}\right) \cdot 10^{-\lambda} - \left(0.05 + 0.1 \cdot \frac{A1}{A}\right) \cdot \lambda^{1.3(1-\lambda)} = 0.869$

$Nb.Rd := \kappa \cdot \chi \cdot A \cdot \frac{fo}{\gamma M1} = 1857.951\ kN$ [1: (6.49)]

$\frac{NEd}{Nb.Rd} = 1.785$ *Ikke ok*

Torsional buckling:

Generelt: $\alpha := 0.35$ $\lambda 0 := 0.4$ [1: Tabell 6.7]

$\kappa := 1.0$

$\phi := 0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot (\lambda - \lambda 0) + \lambda^2) = 1.556$ [1: (6.50)]

$\chi := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda}} = 0.385$ [1: (6.50)]

$Nb.Rd := \kappa \cdot \chi \cdot A \cdot \frac{fo}{\gamma M1} = 2055.455\ kN$ [1: (6.49)]

$\frac{NEd}{Nb.Rd} = 1.613$ *Ikke ok*

Torsjonsknekking bør oppfylle: $\frac{MEd}{Mb.Rd} \le 1$ [1: (6.54)]

$\alpha LT := 0.20$ $\lambda 0.LT := 0.4$ [1: (6.3.2.2(2))]

$\alpha := 1$ for tverrsnitt klasse 3 [1: Tabell 6.4]

$Mcr := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot Iz}{Lt^2} \cdot \sqrt{\frac{Lt^2 \cdot G \cdot It}{\pi^2 \cdot E \cdot Iz} + \boxed{\frac{Iw}{Iz}}}$ [1: (I.1)]

$Mcr := 3.935 \cdot 10^8\ N \cdot mm$

$\lambda LT := \sqrt{\frac{\alpha \cdot Wel.y \cdot fo}{Mcr}} = 1.88$ [1: (6.58)]

$\phi LT := 0.5 \cdot \left(1 + \alpha LT \cdot (\lambda LT - \lambda 0.LT) + \lambda LT^2\right) = 2.415$ [1: (6.57)]

$\chi LT := \dfrac{1}{\phi LT + \sqrt{\phi LT^2 - \lambda LT^2}} = 0.254$ [1: (6.56)]

$Mb.Rd := \chi LT \cdot \alpha \cdot Wel.y \cdot \dfrac{fo}{\gamma M1} = 321.609\ kN \cdot m$ [1: (6.55)]

$\dfrac{My.Ed}{Mb.Rd} = 0.314$ *Ok*

Shear:

Skjærkontroll: $\dfrac{VEd}{VRd} \le 1$ [1: (6.28)]

Vi tar kun utgangspunkt i sveis, dermed vil $d := 0$

$hw := 540\ mm$ $tw := 13\ mm$

$Av := (hw - d) \cdot (tw) - (\rho o.haz) \cdot bhaz \cdot tw = \left(6.802 \cdot 10^3\right)\ mm^2$ [1: (6.30)]

$VRd := Av \cdot \dfrac{fo}{\sqrt{3} \cdot \gamma M1} = 928.178\ kN$ [1: (6.29)]

$\dfrac{Vy.Ed}{VRd} = 0.015$ *Ok* Tar utgangspunkt i høyeste opptredende verdi.

Bending and shear:

$h := 590\ mm$ $tf := 25\ mm$ $bf := 300\ mm$ [SAP2000]

$fo.V := fo \cdot \left(1 - \left(\dfrac{2 \cdot Vy.Ed}{VRd} - 1\right)^2\right) = 15.054\ \dfrac{N}{mm^2}$ [1: (6.38)]

$Mv.Rd := tf \cdot bf \cdot (h - tf) \cdot \dfrac{fo}{\gamma M1} + \dfrac{tw \cdot hw^2}{4} \cdot \dfrac{fo.V}{\gamma M1}$ [1: (6.39)]

$Mv.Rd = 1014.561\ kN \cdot m$

Kontroll av stav nr.100:
Det blir gjort tilsvarende beregninger for stav nr.100 som for stav nr.99.

Tykkelse: $5 < t \leq 15$

$fo := 260 \frac{N}{mm^2}$ $fu := 310 \frac{N}{mm^2}$ [1: Tabell 3.2b]

$fo.haz := 125 \frac{N}{mm^2}$ $fu.haz := 185 \frac{N}{mm^2}$

HAZ-faktor:

$\rho o.haz := 0.48$ $\rho u.haz := 0.60$

Knekklasse: A

Design verdier for materialkonstanter: [1: (3.2.5(1))]

$E := 70000 \frac{N}{mm^2}$ $G := 27000 \frac{N}{mm^2}$

$\nu := 0.3$

$\alpha := 23 \cdot 10^{-6}$

$\rho := 2700 \frac{kg}{m^3}$

Opptredende laster for stav nr.100:
Opptredende laster har blitt hentet fra analyse i SAP2000.

$NEd := 705.61\ kN$

$My.Ed := \left|-515.81\ kN \cdot m\right|$
$Mz.Ed := 244.478\ kN \cdot m$

$Vy.Ed := 125.64\ kN$
$Vz.Ed := \left|-43.315\ kN\right|$

Sikkerhetsfaktorer:
$\gamma M1 := 1.10$ [1: Tabell 6.1]
$\gamma M2 := 1.25$

Etter 6.1.4.2 Klassifisering vil tverrsnittet være av klasse 3.

Parametre for HEA600 fra SAP2000:

$Wel.y := 5.350 \cdot 10^6\ mm^3$

$Wel.z := 7.513 \cdot 10^5\ mm^3$

$Wpl.y := 4.786 \cdot 10^6\ mm^3$

$Wpl.z := 1.156 \cdot 10^6\ mm^3$

$Iy := 1.412 \cdot 10^9\ mm^4$

$Iz := 1.127 \cdot 10^8\ mm^4$

$It := 4.070 \cdot 10^6\ mm^4$

$Iw := 8.994 \cdot 10^6\ mm^4$

$A := 22600\ mm^2$

A = Ag = Anet. Det samme gjelder A = Aeff siden tverrsnittet er av klasse 3.

Tension:

Design verdien for tension bør tilfredsstille: $\frac{NEd}{Nt.Rd} \le 1$ [1: (6.17)]

Fra 6.2.3(2) vil spenningsmotstanden av tverrsnittet Nt,Rd være tilsvarende den minste verdien.

$No.Rd := A \cdot \frac{fo}{\gamma M1} = 5341.818\ kN$ [1: (6.18)]

$Nu.RdT\_1 := 0.9 \cdot A \cdot \frac{fu}{\gamma M2} = 5044.32\ kN$ [1: (6.19a)]

$Nu.RdT\_2 := A \cdot \frac{fu}{\gamma M2} = 5604.8\ kN$ [1: (6.19b)]

$Nt.Rd := Nu.RdT\_1 = 5044.32\ kN$

$\frac{NEd}{Nt.Rd} = 0.14$ *Ok*

Compression:

Design verdien for compression bør tilfredsstille: $\frac{NEd}{Nc.Rd} \le 1$ [1: (6.20)]

$Nu.RdC := A \cdot \frac{fu}{\gamma M2} = 5604.8\ kN$ [1: (6.21)]

$Nc.RdC := A \cdot \frac{fo}{\gamma M1} = 5341.818\ kN$ [1: (6.22)]

Fra 6.2.4(2) vil spenningsmotstanden av tverrsnittet Nc,Rd være tilsvarende den minste verdien.

$Nc.Rd := Nc.RdC = 5341.818\ kN$

$\frac{NEd}{Nc.Rd} = 0.132$ *Ok*

Buckling Resistance:

Knekkmotstanden bør oppfylle kravet: $\frac{NEd}{Nb.Rd} \le 1$ [1: (6.48)]

$k := 2$ $Lt := 5500\ mm$ [SAP2000]

$NCr.y := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot Iy}{k^2 \cdot Lt^2} = 8062.08\ kN$ [1: (I.14)]

$NCr.z := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot Iz}{k^2 \cdot Lt^2} = 643.482\ kN$ [1: (I.15)]

$is := 0.26\ mm$ [SAP2000]

$NCr.T := \frac{1}{is^2} \left(G \cdot It + \boxed{\frac{\pi^2 \cdot E \cdot Iw}{k^2 \cdot Lt^2}} \right)$ [1: (I.16)]

$NCr.T := 4669.005\ kN$ $NCr := NCr.T$ [SAP2000]

$\lambda := \sqrt{\frac{A \cdot fo}{NCr}} = 1.122$

Flexural buckling:

Klasse A: $\alpha := 0.20$ $\lambda 0 := 0.10$ [1: Tabell 6.6]

$\phi := 0.5 \cdot \left(1 + \alpha \cdot (\lambda - \lambda 0) + \lambda^2\right) = 1.231$ [1: (6.51)]

$\chi := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda}} = 0.538$ [1: (6.50)]

$bhaz := 35\ mm$ $h := 25\ mm$ [1: (6.1.6.3(3))]

$Ahaz := bhaz \cdot h = 875\ mm^2$ [1: Tabell 6.5]

$A1 := A - Ahaz \cdot (1 - \rho o.haz) = \left(2.215 \cdot 10^4\right)\ mm^2$

$\kappa := 1 - \left(1 - \frac{A1}{A}\right) \cdot 10^{-\lambda} - \left(0.05 + 0.1 \cdot \frac{A1}{A}\right) \cdot \lambda^{1.3\,(1-\lambda)} = 0.853$

$Nb.Rd := \kappa \cdot \chi \cdot A \cdot \frac{fo}{\gamma M1} = 2450.739\ kN$ [1: (6.49)]

$\frac{NEd}{Nb.Rd} = 0.288$ *Ok*

Torsional buckling:

Generelt: $\alpha := 0.35$ $\lambda 0 := 0.4$ [1: Tabell 6.7]

$\kappa := 1.0$

$\phi := 0.5 \cdot \left(1 + \alpha \cdot (\lambda - \lambda 0) + \lambda^2\right) = 1.256$ [1: (6.51)]

$\chi := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda}} = 0.518$ [1: (6.50)]

$Nb.Rd := \kappa \cdot \chi \cdot A \cdot \frac{fo}{\gamma M1} = 2768.001\ kN$ [1: (6.49)]

$\frac{NEd}{Nb.Rd} = 0.255$ *Ok*

Etter SAP2000 innebygde kontrollsjekk brukes ligning (6.63). Denne blir også brukt i sjekk opp mot håndberegninger for stav nr.100.

Følgende kriteriet bør oppfylles:

$\left(\frac{NEd}{\chi z \cdot \omega x \cdot NRd}\right)^{\eta c} + \left(\frac{My.Ed}{\chi LT \cdot \omega xLT \cdot My.Rd}\right)^{\gamma c} + \left(\frac{Mz.Ed}{\omega 0 \cdot Mz.Rd}\right)^{\xi zc} \le 1.0$ [1: (6.63)]

$NRd := A \cdot \frac{fo}{\gamma M1} = 5341.818\ kN$

$\eta c := 0.8$ [1: (6.42a)]

$\xi zc := 0.8$ [1: (6.42b)]

$\gamma c := 1$ [1: (6.42c)]

$\omega 0 := 1$ $\omega x := \omega 0$ og $\omega xLT := \omega 0$ [1: (6.64)]

$\alpha LT := 0.20$ $\lambda 0.LT := 0.4$ [1: (6.3.2.2(2))]

$\alpha := 1$ for tverrsnitt klasse 3 [1: Tabell 6.4]

$$Mcr := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot Iz}{Lt^2} \cdot \sqrt{\frac{Lt^2 \cdot G \cdot It}{\pi^2 \cdot E \cdot Iz} + \frac{Iw}{Iz}}$$ [1: (I.1)]

$$Mcr := 2.112 \cdot 10^9\ N \cdot mm$$ [SAP2000]

$$\lambda LT := \sqrt{\frac{\alpha \cdot Wel.y \cdot fo}{Mcr}} = 0.812$$ [1: (6.58)]

$$\phi LT := 0.5 \cdot \left(1 + \alpha LT \cdot (\lambda LT - \lambda 0.LT) + \lambda LT^2\right) = 0.87$$ [1: (6.57)]

$$\chi LT := \frac{1}{\phi LT + \sqrt{\phi LT^2 - \lambda LT^2}} = 0.844$$ [1: (6.56)]

$$\lambda haz := \lambda \cdot \sqrt{\omega 0} = 1.122$$ [1: (6.68a)]

$\alpha := 0.35$ $\lambda 0 := 0.4$ $\kappa := 1.0$

$$\phi := 0.5 \cdot \left(1 + \alpha \cdot (\lambda haz - \lambda 0) + \lambda haz^2\right) = 1.256$$

$$\chi z := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda haz}} = 0.518$$

$$z1 := \frac{590\ mm}{2} = 295\ mm$$ $z2 := z1$

$$\alpha y1 := \frac{Wpl.y \cdot z1}{Iy} = 1$$ $\alpha y2 := \alpha y1$ [1: (6.2.9.1(1))]

Faktorene $\alpha y = \alpha z = \alpha y1$

$$My.Rd := \alpha y1 \cdot Wel.y \cdot \frac{fo}{\gamma M1} = \left(1.264 \cdot 10^3\right)\ kN \cdot m$$ [1: (6.63)]

$$Mz.Rd := \alpha y1 \cdot Wel.z \cdot \frac{fo}{\gamma M1} = 177.564\ kN \cdot m$$ [1: (6.63)]

$$\left(\frac{NEd}{\chi z \cdot \omega x \cdot NRd}\right)^{\eta c} + \left(\frac{My.Ed}{\chi LT \cdot \omega x LT \cdot My.Rd}\right)^{\gamma c} + \left(\frac{Mz.Ed}{\omega 0 \cdot Mz.Rd}\right)^{\xi zc} = 2.11$$ *Ikke ok*

Torsjonsknekking bør oppfylle: $\frac{MEd}{Mb.Rd} \le 1$ [1: (6.54)]

$\alpha LT := 0.20$ $\lambda 0.LT := 0.4$ [1: (6.3.2.2(2))]

$\alpha := 1$ for tverrsnitt klasse 3 [1: Tabell 6.4]

$$Mcr := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot Iz}{Lt^2} \cdot \sqrt{\frac{Lt^2 \cdot G \cdot It}{\pi^2 \cdot E \cdot Iz} + \boxed{\frac{Iw}{Iz}}}$$ [1: (I.1)]

$Mcr := 2.112 \cdot 10^9\ N \cdot mm$

$$\lambda LT := \sqrt{\frac{\alpha \cdot Wel.y \cdot fo}{Mcr}} = 0.812$$ [1: (6.58)]

$$\phi LT := 0.5 \cdot \left(1 + \alpha LT \cdot (\lambda LT - \lambda 0.LT) + \lambda LT^2\right) = 0.87$$ [1: (6.57)]

$$\chi LT := \frac{1}{\phi LT + \sqrt{\phi LT^2 - \lambda LT^2}} = 0.844$$ [1: (6.56)]

$$Mb.Rd := \chi LT \cdot \alpha \cdot Wel.y \cdot \frac{fo}{\gamma M1} = 1066.902\ kN \cdot m$$ [1: (6.55)]

$\frac{My.Ed}{Mb.Rd} = 0.483$ *Ok*

Shear:

Skjærkontroll: $\frac{VEd}{VRd} \le 1$ [1: (6.28)]

Vi tar utgangspunkt i kun sveis, dermed vil det ikke være noen hull langs skjærplanet.

$hw := 540\ mm$ $tw := 13\ mm$ $d := 0$

$$Av := (hw - d) \cdot (tw) - (\rho o.haz) \cdot bhaz \cdot tw = \left(6.802 \cdot 10^3\right)\ mm^2$$ [1: (6.30)]

$$VRd := Av \cdot \frac{fo}{\sqrt{3} \cdot \gamma M1} = 928.178\ kN$$ [1: (6.29)]

$\frac{Vy.Ed}{VRd} = 0.135$ *Ok*

Tar utgangspunkt i høyeste opptredende verdi.

Bending and shear:

$h := 590\ mm$ $tf := 25\ mm$ $bf := 300\ mm$ [SAP2000]

$$fo.V := fo \cdot \left(1 - \left(\frac{2 \cdot Vy.Ed}{VRd} - 1\right)^2\right) = 121.721\ \frac{N}{mm^2}$$ [1: (6.38)]

$$Mv.Rd := tf \cdot bf \cdot (h - tf) \cdot \frac{fo}{\gamma M1} + \frac{tw \cdot hw^2}{4} \cdot \frac{fo.V}{\gamma M1}$$ [1: (6.39)]

$Mv.Rd = 1106.459\ kN \cdot m$