

# PLATEBÆRERE OG BJELKER MED STORE STEGÅPNINGER

Dr. Ing Nils Chr Hagen •  
www.sbi.se • Skapad 2016-05-19

Platebærere eller bjelker med åpninger i steget er vanlige innenfor offshore- og bygningsindustrien. Det finnes også på markedet såkalte «cellular beams», hvor det er laget åpninger i hele stegets lengde, primært for å spare vekt, men også for å ha muligheter for å føre rør og kabler gjennom steget.

Et problem kan da være å vite hvordan skal man dimensjonere slike konstruksjoner. Internasjonalt jobbes det med å lage beregningsregler, men arbeidet er ikke kommet langt.

Det er heller ikke enighet om det skal være en standard i Eurocode, et tillegg eller en teknisk rapport. Har man store ressurser, kan det selvfølgelig kjøres en full ikke-lineær FE-analyse med platebæreren modellert i 3-D av skall-elementer. Men med mindre tid tilgjengelig, kan det bli til at ingeniører, for å være på den sikre siden, foreslår kostbare avstivninger rundt åpningen, eller sier nei til i det hele tatt å ha noen åpning. Da er det bedre å ha noen enkle retningslinjer som kan brukes i praktisk dimensjonering.

## Typiske konfigurasjoner

Undertegnede tok i 2005 dr. ing-grad i stålkonstruksjoner ved NTNU med avhandlingen "On the Shear Capacity of Steel Plate Girders with Large Web Openings". Over 260 platebærere og åpningskonfigurasjoner ble studert ved hjelp av ikke-lineære analyser og FE-programmet ABAQUS. Fig. 1 viser mangfoldet av åpninger.

Simuleringene omfattet platebærere med steghøyde/tykkelses-forhold fra 63 til 333.

Åpningene var sirkulære, forlenget-sirkulære, kvadratiske og rektangulære, med eller uten "sleeves", doblingsplater, vertikale stivere og horisontale forsterkninger.

Åpningenes størrelse varierte fra 25 prosent til 50 prosent av steghøyden, og både enkeltåpninger og to åpninger tett sammen ble undersøkt. FE-modellene ble først kalibrert mot eksperimenter av full-skala platebærere. Deretter ble simuleringene verifisert ved sammenligning med EC3-kurven for

steg uten åpninger, og med rotert spenningsfelt-teori for platebærere med sirkulære åpninger og med kvadratiske åpninger. Fig. 2 og 3 viser noen typiske platebærere.

Analysene ble gjennomført på en systematisk måte, slik at det lot seg gjøre å trekke praktiske konklusjoner underveis. Resultatet ble et sett av retningslinjer for design, som senere også ble publisert i to artikler i Journal of Constructional Steel Research. [1] [2].

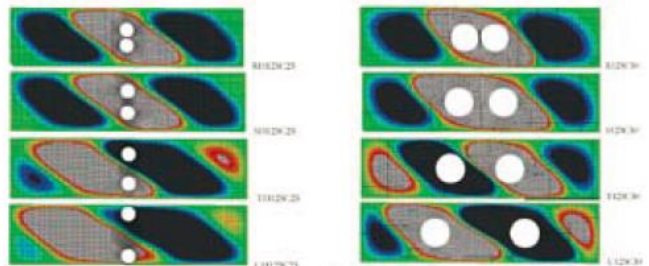


Fig. 2: To sirkulære åpninger over hverandre.

Fig. 3: To sirkulære åpninger etter hverandre.

## Foreslåtte retningslinjer for design - Skjærkapasitet

Utgangspunktet for beregningene er skjærkapasiteten for steg uten åpninger som er gitt i Eurocode. Effekten av åpningene representeres deretter av et sett av primære og sekundære parametere som modifierer skjærkapasiteten relativt til kapasiteten uten åpninger: Når bidraget fra flensene neglisjeres, gir EN 1993-1-5 [3] dimensjonerende skjærkapasitet for platebærere uten åpninger som

$$(1) V_{bw,Rd} = \chi_w \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}\gamma_{M1}} ht$$

hvor  $h$  og  $t$  er henholdsvis steghøyden og stegtykkelsen og  $f_{dw} = f_{yw}/\gamma_{M1}$  er den dimensjonerende spenning for steget. Reduksjonsfaktoren for knekning  $\chi_w$  er en funksjon av den reduserte slankheten og  $\gamma_{M1}$  er materialfaktoren.



Den dimensjonerende skjærkapasiteten for platebærere med åpninger er

$$(2) V_{bw,mod,Rd} = \left(1 - \frac{D_h}{h}\right) c_2 \cdot \chi_w \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}\gamma_{M1}} ht$$

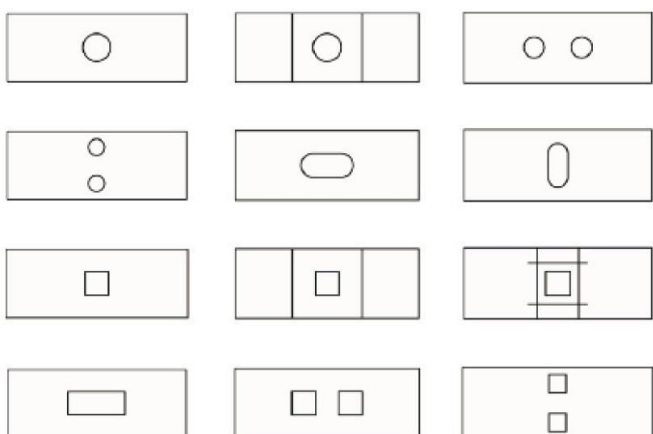


Fig. 1: Typiske konfigurasjoner av platebærere med sirkulære og rektangulære åpninger.

Her er  $c_1 = (1 - D_h/h)$  den primære parameteren som er knyttet til at skjærarealet gjennom åpningen er blitt mindre:  $D_h$  er nemlig høyden av åpningen.  $c_1$  er alltid en reduksjonsfaktor.

Den sekundære parameteren  $c_2$  inkluderer virkningen av åpningens form og eventuelle forsterkninger rundt eller over og under åpningen. Parameteren tar også med åpningens plassering i høyden av steget, om det er en enkelt åpning eller flere åpninger tett sammen, samt avstanden mellom disse.  $c_2$  er ikke nødvendigvis en reduksjonsfaktor, den kan bli både mindre og større enn 1,0, avhengig av hva som legges inn av forsterkninger. En god betegnelse er derfor å kalle  $c_2$  for tilpassingsfaktoren.

For en enkelt åpning uten stivere eller forsterkning, hvor senter av åpningen sammenfaller med den horisontale senterlinjen i et steg, er

$$(3) c_2 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{4\left(\frac{0,5D_a - r_{red}}{s_t}\right)^2 + 3}}$$

$$(4) r_{red} = r\left(\frac{D_a}{r}\right)^2$$

Her er  $r$  hjørneradius i åpningen,  $D_a$  åpningens lengde i horisontalretningen og  $s_t$  den vertikale avstanden fra åpningens øvre kant til øvre kant av steget. Det forutsettes at åpningen er symmetrisk både om en horisontal og vertikal akse. Formel (3) er lett å slå på en kalkulator og dekker svært mange former og størrelser på åpninger. Den får greit med Vierendel-effekten, altså virkningen av sekundærmomentene i åpningen. For sirkulære åpninger uten forsterkninger konvergerer (3) slik at  $c_2 = 1,0$ . Det er altså ingen sekundære virkninger for sirkulære hull. En detaljert oppstilling av tilpassingsfaktorer for andre konfigurasjoner finnes i [2].

En viktig konklusjon fra simuleringene var at reduksjonsfaktoren for knekning,  $\chi_w$ , er den samme både med og uten åpninger. Med visse unntak skjer det altså ingen ytterligere reduksjon av skjærkapasiteten på grunn av lokal knekning, selv om det lages en åpning. Eventuelle reduksjoner er så små at de kan betraktes som inkludert i tilpassingsfaktoren. Derimot kan skjærkapasiteten økes ved å plassere vertikale stivere på begge sider av åpningen, slik at det dannes et lokalt platefelt med et annet lengde/bredde-forhold enn resten av platebæreren. Da kan man ta hensyn til det ved å øke  $\chi_w$ .

### Foreslåtte retningslinjer for design – Momentkapasitet

Selv om en platebærer egentlig er to flenser og steg sveist sammen av plater, gjelder retningslinjene like godt for bjelker, det vil si valsede profiler, hvis man betrakter platebærer som en konstruksjon i Klasse 3 eller 4, og bjelke som en konstruksjon i klasse 1 eller 2. Klassifiseringen gjelder uten hensyn til åpninger.



For bjelker med åpninger er momentkapasiteten

$$(5) \quad M_{\text{mod},Rd} = M_{\text{plastic,mod},Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \left[ W_p - D_h t \left( \frac{D_h}{4} + e \right) \right]$$

hvor  $W_p$  er det plastiske motstandsmomentet uten åpning eller forsterkning.  $e$  er den absolutte verdien av den vertikale eksentrisiteten av åpningen relativ til den plastiske nøytralaksen. For platebærere med åpninger er momentkapasiteten

$$(6) \quad M_{\text{mod},Rd} = M_{\text{buckl,mod},Rd} = \frac{f_y}{\gamma_{M0}} W_{\text{eff,mod}}$$

Det effektive motstandsmomentet  $W_{\text{eff}}$  bestemmes ifølge EN 1993-1-5 og uten åpning eller forsterkning.  $W_{\text{eff,mod}}$  beregnes deretter ved å utelate alle deler av det effektive stegarealet som faller innenfor åpningen. Eventuelle horisontale avstivninger neglisjeres.

Hvis dette virker noe vidløftig, kan man alltid konservativt regne momentkapasiteten bare som bidraget fra flensene alene både for bjelker og platebærere.

### Foreslåtte retningslinjer for design – Samvirke mellom moment og skjær

For alle bjelker og platebærere kan verifikasjonen baseres på

$$(7) \quad \left( \frac{M_{Ed}}{M_{\text{mod},Rd}} \right)^3 + \left( \frac{V_{Ed}}{V_{bw,\text{mod},Rd}} \right)^3 \leq 1$$

hvor  $M_{Ed}$  og  $V_{Ed}$  er primær-momentet og skjærkraften som virker i et vertikalsnitt gjennom senter av åpningen. Primær betyr her at kreftene regnes ut som om det ikke er noen åpning. Ligning (5) er basert på en modifisert AISC formel.

### Konklusjon

Enkle formler vil alltid være nyttige, fordi verdien av enhver beregning synker raskt, hvis den ikke er utført før dimensjonene er frosset. Jeg håper at denne artikkelen kan være til hjelp, og anbefaler at særlig [2] studeres nøye. Det har vært litt aktivitet rundt disse resultatene, men det kan gjerne bli mer. Det er faktisk et komplett regelsett i [2]! Spørsmål og kommentarer kan sendes til [nils-christian.hagen@stal-consult.no](mailto:nils-christian.hagen@stal-consult.no), som er uten ansvar for eventuelle feil.

