

# Eurokod 9, aluminium

Torsten Höglund, Prof em Stålbyggnad, KTH



Fig. 1: Tottnäsbron med aluminiumdeck (Foto SAPA)

## Introduktion

Aluminium har liksom andra material egenskaper som kräver särskilda överväganden vid dimensionering. De viktigaste skillnaderna jämfört med stål är den låga elasticitetsmodulen, den krökta  $\sigma$ - $\epsilon$ -kurvan, små egenspanningar i strängpressade profiler och den reducerade hållfastheten i den värmepåverkade zonen vid svetsar. Alla dessa egenskaper påverkar bärförmågan med hänsyn till buckling, knäckning, vippning och plasticering. Av stor betydelse är även strängpressningsteknikens möjligheter som medför att standardbalkar inte är särskilt vanliga.

Här skall belysas hur effektiv tjocklek används för att beakta buckling och reducerad hållfasthet i värmepåverkad zon i Eurokod 9 [1] och [2].

Aluminium profiler får ofta osymmetriska och komplicerade tvärsnitt. Skjuvcentrum sammanfaller då inte med tyngdpunkten vilket kan resultera i vridande moment. Några sätt att undvika vridning eller att ta hänsyn till vridande moment skall belysas t e x ökningen av vridstyvheten vid tillägg av hälkäl och bulbar.

Eurocode 9 ger också andra beräkningsregler som är specifika för aluminium men som inte mera behandlas här. Detta gäller t e x hur den lokala försvagningen av tvärsvetsar påverkar bärförmågan för tryckta och böjda balkar. B1 a innebär det att interaktionsformlerna för böjd och tryckt stång är helt annorlunda än i Eurokod 3 för stål. De överensstämmelser däremot nästan helt med formelerna i BSK.

Andra delar av Eurokod 9 är mycket lika motsvarande delar i Eurokod 3. Detta gäller svetsade plåtbalkar med plant liv, liv med avstyvningar eller trapetsformat veckat liv.

## Eurokod 9 omfattar fem delar

- 1 allmänna regler
- 2 brand
- 3 utmattning
- 4 trapetsprofilerad plåt
- 5 skal.

Del 3 har varit mycket svår att komma överens om. Detta beror till stor del på den olyckliga uppdelningen i beräkningsregler (Eurokoder, som handläggs av CEN TC 250) och utföranderegler som handläggs av CEN TC 135. Del 3 har varit uppe på depar-

tementsnivå i England innan man till slut lyckades nå en kompromiss.

Del 4 behandlar kallformad trapetsformad plåt med liknande beräkningsmetoder som för stål men med den skillnaden att effektiv tjocklek används för att beakta buckling av plana tvärsnittsdelar. Del 5 behandlar grundläggande former av skal, även här med liknande metoder som för stål. Dock kräver den reducerade hållfastheten i värmepåverkade zonen kompletterande regler.

Som nämnts blir aluminium profiler ofta osymmetriska och komplicerade. Därför ges i en bilaga till del 1 formel för beräkning av tvärsnittstorheter för godtyckligt utformade tvärsnitt.

*Det bör påpekas att den låga elasticitetsmodulen medför att nedböjningar i bruksgränstillståndet ofta är dimensionerande för aluminiumkonstruktioner. Beräkningen i brottgränstillståndet kan därför ofta begränsas till en kontroll av spänningarna enligt elasticitetsteorin.*

## Material

Karakteristiskt värde för bearbetat aluminium ges i [1]. *Tabell 1* visar exempel på värden för några legeringar.

Tabell 1: Karakteristiskt värde för 0,2 % gränsen  $f_0$ , brottgränsen  $f_u$  (utan svets och för värmepåverkade zonen HAZ), förlängning  $A$ , reduktionsfaktorer  $\rho_{o,haz}$  och  $\rho_{u,haz}$  i HAZ, knäckningsklass och exponent  $n_p$  för aluminiumplåt (del av Tabell 3.2a i [1])

| EN-AW       | Tillstånd <sup>1)</sup> | Tjocklek mm <sup>1)</sup> | $f_0$ <sup>1)</sup> | $f_u$           | $A_{50}$ <sup>1)6)</sup> | $f_{0,haz}$ <sup>2)</sup> | $f_{u,haz}$ <sup>2)</sup> | HAZ-faktor <sup>2)</sup>     |                | BC <sup>4)</sup> | $n_p$ <sup>1), 5)</sup> |
|-------------|-------------------------|---------------------------|---------------------|-----------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------|------------------|-------------------------|
|             |                         |                           | N/mm <sup>2</sup>   |                 | %                        | N/mm <sup>2</sup>         |                           | $\rho_{o,haz}$ <sup>1)</sup> | $\rho_{u,haz}$ |                  |                         |
| 3004        | H14   H24/H34           | ≤ 6   3                   | 180   170           | 220             | 1   3                    | 75                        | 155                       | 0,42   0,44                  | 0,70           | B                | 23   18                 |
|             | H16   H26/H36           | ≤ 4   3                   | 200   190           | 240             | 1   3                    |                           |                           | 0,38   0,39                  | 0,65           | B                | 25   20                 |
| 5083        | O/H111                  | ≤ 50                      | 125                 | 275             | 11                       | 125                       | 275                       | 1                            | 1              | B                | 6                       |
|             |                         | 50 < t ≤ 80               | 115                 | 270             | 14 <sup>3)</sup>         | 115                       | 270                       |                              |                | B                |                         |
|             | H12 H22/H32             | ≤ 40                      | 250   215           | 305             | 3   5                    | 155                       | 275                       | 0,62   0,72                  | 0,90           | B                | 22   14                 |
| H14 H24/H34 | ≤ 25                    | 280   250                 | 340                 | 2   4           | 0,55   0,62              |                           |                           | 0,81                         | A              | 22   14          |                         |
| 6082        | T4 / T451               | ≤ 12,5                    | 110                 | 205             | 12                       | 125                       | 185                       | 0,91                         | 0,78           | B                | 8                       |
|             | T61/T6151               | ≤ 12,5                    | 205                 | 280             | 10                       |                           |                           | 0,61                         | 0,66           | A                | 15                      |
|             | T6151                   | 12,5 < t ≤ 100            | 200                 | 275             | 12 <sup>3)</sup>         |                           |                           | 0,63                         | 0,67           | A                | 14                      |
|             | T6/T651                 | ≤ 6                       | 260                 | 310             | 6                        |                           |                           | 0,48                         | 0,60           | A                | 25                      |
|             |                         | 6 < t ≤ 12,5              | 255                 | 300             | 9                        |                           |                           | 0,49                         | 0,62           | A                | 27                      |
| T651        | 12,5 < t ≤ 100          | 240                       | 295                 | 7 <sup>3)</sup> | 0,52                     | 0,63                      | A                         | 21                           |                |                  |                         |

1) Om två (tre) tillstånd anges på samma rad, har tillstånd delade med “|” olika värden men delade med “/” samma värden. (Skillnader föreligger endast för  $f_0$ ,  $A$  och  $n_p$ .)

2) Värdena för HAZ gäller för MIG svets och tjocklekar upp till 15 mm.

3) Värde baserat på  $A$  ( $= A_{5,65}\sqrt{A_0}$ ), inte  $A_{50}$ . 4) BC = knäckningsklass. 5)  $n$ -värde i Ramberg-Osgood uttryck för plastisk analys.

För samma legering kan värdena variera något beroende på:

- tillstånd: kallbearbetning H, värmebehandling T, t ex T4 upplösningsbehandling och naturlig åldring och T6 upplösningsbehandling och varmålning;

- produktionsmetod: t ex plåt eller strängpressad öppen profil, sluten profil eller massiv stång;

- tjocklek.

### Värmepåverkad zon

Av stor betydelse för svetsade konstruktioner är uppmjukningen av materialet i den värmepåverkade zonen vid svetsning. Som framgår av Tabell 1 är för material i 3000-serien hållfastheten  $f_{o,haz}$  i HAZ omkring 0,4 ggr värdet  $f_0$  för opåverkat material, för 6000-serien är  $f_{o,haz}$  ungefär 0,6  $f_0$  för legering i tillstånd T6 och 0,9  $f_0$  för tillstånd T4. För tillstånd O (glöd-gat) och H111 (svagt kallbearbetat) är det ingen reduktion i HAZ.

Brothållfastheten  $f_{u,haz}$  reduceras inte lika mycket, den är 0,6 till 1,0 ggr värdet för opåverkat material.

### Knäckningsklass

I Tabell 1 ges knäckningsklassen BC som definierar vilken kurva som skall användas för buckling, knäckning och vippning. Materialet tillhör klass A om det är en liten avrundning i spännings-töjningskurvan och stor proportionalitetsgräns. Av betydelse är formen på kurvan för spänningar mindre än 0,2-gränsen  $f_0$ .

### Plasticering

Kurvans form för spänningar  $> f_0$  är inte särskilt viktigt för bärförmågan med hänsyn till knäckning men har betydelse för den plastiska bärförmågan för böjande moment. Den sista kolumnen i Tabell 1 ger exponenten  $n_p$  i Ramberg-Osgoods uttryck för plastisk analys

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left( \frac{\sigma}{f_0} \right)^{n_p}$$

Värdena i materialtabellerna gäller för temperaturer upp till 80 °C. För temperaturer mellan 80 °C och 100 °C reduceras hållfastheten.

Värden och dimensioneringsregler ges också för gjutna konstruktioner och för ett antal fästelement.

### Analysmetoder

Regler för analys och värden för initialkrokighet och snedställning för ramar ges i [1]. Speciellt viktigt för aluminiumkonstruktioner är att gränslastmetoden inte kan användas för balkar och ramar med tvärsvetsar på dragna sidan av balken inom områden där plastiska leder förutsätts. Anledningen är att bärförmågan för moment är reducerad i HAZ och att rotationskapaciteten är begränsad i värmepåverkade områden som ju har liten utsträckning i balkens längdriktning. Detta illustreras i Fig. 2.

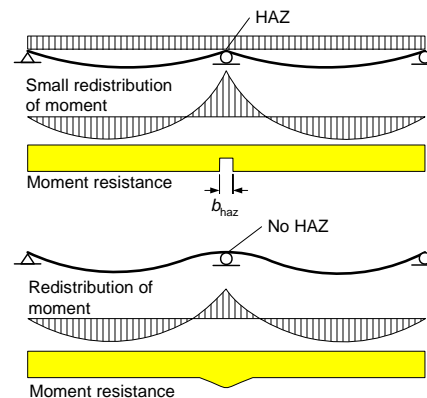


Fig. 2: Kontinuerlig bro med och utan svets över mittstöd

## Buckling

Verkningsättet och beräkningsmetoderna för balkar påverkade av normaltryckspänningar beror på slankheten för tryckta tvärsnittsdelar. Tvärsnitten indelas därför i fyra klasser kort karakteriserade enligt:

Klass 1 duktila tvärsnitt

Klass 2 kompakta tvärsnitt

Klass 3 halv-kompakta tvärsnitt

Klass 4 slanka tvärsnitt.

Olika typer av tunnväggiga tvärsnittsdelar kan identifieras enligt Fig. 3.

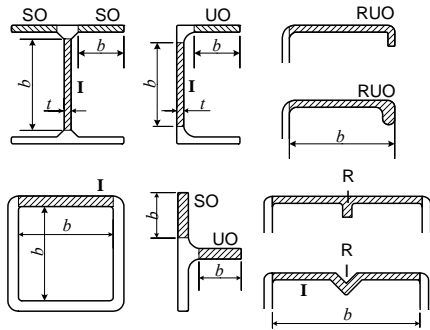


Fig. 3: Typer av tvärsnittsdelar:

I inre tvärsnittsdel

SO symmetrisk utstående del

UO osymmetrisk utstående del

RI avstyvad, inre del

RUO avstyvad, osymmetrisk utstående del

Slankheten för tvärsnittsdelen definieras som  $\beta = \eta b/t$  där  $b$  är bredden för tvärsnittsdelen,  $t$  är tjockleken och  $\eta$  är spänningsgradient faktorn enligt Fig. 4.

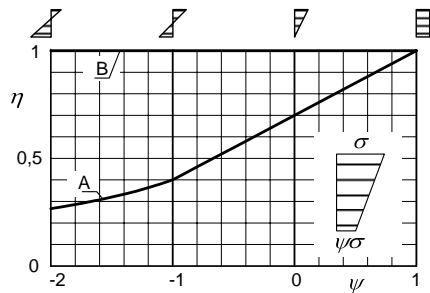


Fig. 4: Värden för  $\eta$  för A: inre delar och utstående delar med störst tryck vid roten, och B: utstående delar med störst tryckspänning vid tån

Klassificeringen av tvärsnittsdelar beror av slankhetsparameter  $\beta$  enligt följande:

$$\beta \leq \beta_1 : \text{klass 1}$$

$$\beta_1 < \beta \leq \beta_2 : \text{klass 2}$$

$$\beta_2 < \beta \leq \beta_3 : \text{klass 3}$$

$$\beta_3 < \beta : \text{klass 4}$$

Värden för  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  och  $\beta_3$  ges i Tabell 2 för utstående tvärsnittsdelar, där  $\varepsilon = \sqrt{250/f_0}$ .

Tabell 2: Slankhetsgräns för utstående tvärsnittsdelar. o = utan svets, w = med längssvets

| Knäckningsklass, BC | Utstående tvärsnittsdel |                       |                       |
|---------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
|                     | $\beta_1/\varepsilon$   | $\beta_2/\varepsilon$ | $\beta_3/\varepsilon$ |
| Klass A, o          | 3                       | 4,5                   | 6                     |
| Klass A, w          | 2,5                     | 4                     | 5                     |
| Klass B, o          | 3,5                     | 4,5                   | 5                     |
| Klass B, w          | 3                       | 3,5                   | 4                     |

För inre tvärsnittsdelar är gränserna ungefär tre gånger värdena i Tabell 2.

### Effektiv tjocklek

Buckling av tvärsnitt i klass 4 beaktas genom att ersätta det verkliga tvärsnittet med ett effektivt tvärsnitt där tjockleken reduceras med en faktor  $\rho_c$  för klass 4 delar som helt eller delvis är tryckta.

Reduktionsfaktorn  $\rho_c$  ges av

$$\rho_c = \frac{C_1}{(\beta/\varepsilon)} - \frac{C_2}{(\beta/\varepsilon)^2} \text{ dock } \rho_c \leq 1,0$$

där konstanterna ges i Tabell 3. Den effektiva tjockleken är  $t_{eff} = \rho_c t$ .

Tabell 3: Konstanterna  $C_1$  och  $C_2$  i uttrycket för reduktionsfaktorn  $\rho_c$  för buckling

| Knäckningsklass, BC | Inre del |       | Utstående del |       |
|---------------------|----------|-------|---------------|-------|
|                     | $C_1$    | $C_2$ | $C_1$         | $C_2$ |
| Klass A, o          | 32       | 220   | 10            | 24    |
| Klass A, w          | 29       | 198   | 9             | 20    |
| Klass B, o          | 29       | 198   | 9             | 20    |
| Klass B, w          | 25       | 150   | 8             | 16    |

### Inverkan av värmepåverkad zon

Vid dimensionering av svetsade konstruktioner i kallvalsat eller åldrat material måste hänsyn tas till reduktionen av hållfastheten i den värmepåverkade zonen, HAZ. Reduktionen antas vara densamma

inom hela den värmepåverkade zonen bredd  $b_{haz}$ .

Observera att även små svetsar avsedda att fästa något till konstruktionen kan medföra en avsevärd reduktion av hållfastheten. Det är lämpligt att om möjligt placera svetsar där spänningarna är små, t ex nära neutrala lagret i balkar.

Inverkan av värmepåverkade zoner kan antingen beaktas direkt genom de karakteristiska värdena  $f_{o,haz}$  och  $f_{u,haz}$  i HAZ (se exempel i Tabell 1) eller genom att reducera tvärsnittarean med faktorerna

$$\rho_{o,haz} = \frac{f_{o,haz}}{f_0} \text{ och } \rho_{u,haz} = \frac{f_{u,haz}}{f_u}$$

(se exempel i Tabell 1). Vanligtvis reduceras arean genom att reducera tjockleken till  $\rho_{o,haz} t$ .

### Bredd av värmepåverkad zon

Den värmepåverkade zonen antas ha en bredd  $b_{haz}$  mätt från mitten av en stumsvets eller fattningskanten för en kälsvets.

Vid MIG-svetsning i material som inte förvärmats och där temperaturen mellan läggning av flera strängar är mindre än  $60^\circ\text{C}$  får räknas med värden på  $b_{haz}$  enligt Fig. 5.

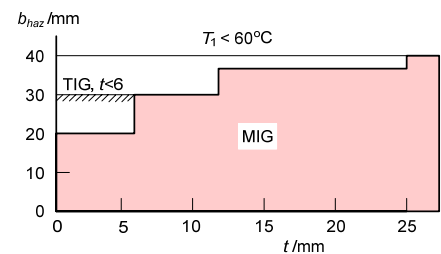


Fig. 5:  $b_{haz}$  beroende av tjocklek och svetsmetod

### Effektivt tvärsnitt

För ett tvärsnitt i klass 4 i en längdsvetsad balk är effektiv tjocklek den mindre av reducerad tjocklek  $t_{eff}$  m h t buckling och reducerad tjocklek  $\rho_{o,haz} t$  i den värmepåverkade zonen och  $t_{eff}$  i resten av den tryckta tvärsnittsdelen. Se Fig. 6.

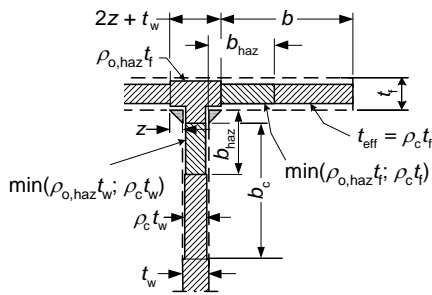


Fig. 6: Effektiva tjocklekar i ett klass 4 tvärsnitt med svets

## Vridning

Strängpressade aluminiumbalkar utformas för att uppfylla många olika krav och funktioner. De har därför ofta komplicerad form och är ofta osymmetriska. Skjuvcentrum SC sammanfaller då inte med tyngdpunkten GC. Om transversallasten angriper vid sidan av skjuvcentrum kommer balken att påverkas av vridande moment. Exempelvis ligger skjuvcentrum utanför livet i en U-balk, se Fig. 7. En last som verkar på överflänsen kommer att påverkas av ett vridande moment  $q e_s$  där  $e_s$  är avståndet från SC till mittlinjen av livet.

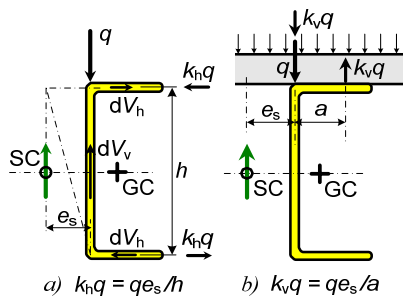


Fig. 7: Skjuvcentrum för U-tvärsnitt samt a) horisontalkrafter och b) vertikalkrafter som förhindrar vridning

För att undvika vridning eller reducera vridspänningarna kan man t ex:

- Sidostaga balken, varvid krafterna  $k_h q$  uppkommer i stagen, Fig. 7a)
- Fästa plattan till balken varvid krafterna  $k_v q$  uppkommer. Lagg märke till att kontaktrycket mellan plattan och balken ökar över livet, Fig. 7b)
- Applicera lasten ovanför SC genom en livavstyvning, Fig. 8a)
- Utforma balken så att lasten kan föras in under SC, Fig. 8b)

- Välja ett slutet tvärsnitt som har avsevärt större vridstyvhet än ett öppet, Fig. 8c) och 7d)
- Öka vridstyvheten genom hålkäl och bulbar, Fig. 10
- Öka vridstyvheten genom att öka godstjockleken.

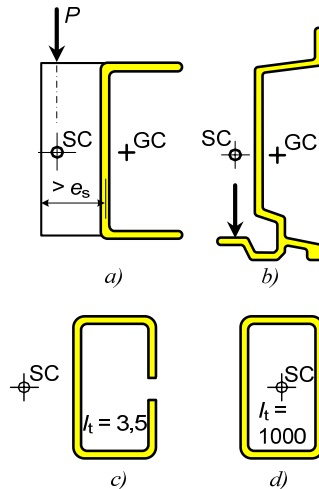


Fig. 8: a) och b) Utformning för att undvika vridning, c) öppet tvärsnitt med liten vridstyvhetsfaktor  $I_t$  och d) slutet tvärsnitt med stort värde på  $I_t$

Som nämnts lägger man in många andra funktioner vid tvärsnittsutformningen t ex skruvfickor och mutterspår. Fig. 9 visar ett exempel på vad man kan åstadkomma genom att kombinera flera metoder för att minska vridningen – livet är flyttat till höger vilket medför att även SC flyttar åt höger och att vridande momentet minskar, hålkäl och bulbar är adderade och tjockleken är ökad på några ställen. Nedböjningen under hjulen, i vilka glassdörren är upphängd, minskar då åtskilligt - från 7 mm till 1,2 mm i detta exempel.

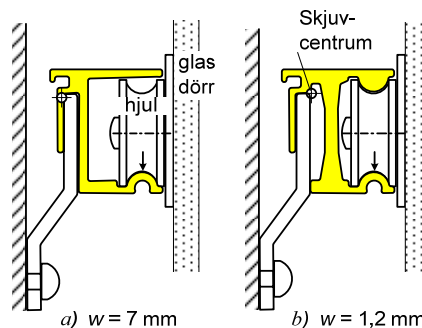


Fig. 9: Reduktion av nedböjningen av en balk som bär en skjutbar glassdörr

## Hålkäl och bulbar

Vridstyvheten kan ökas avsevärt, med en liten ökning av materialmängden, om inre hörnradier ökas eller flänskanter förses med förtjockningar, s k bulbar, Fig. 10. I exemplet i Fig. 11 ökar vridkonstanten med 75 % vid en ökning av arean med 4 %. Bulbar är inte lika effektiva.

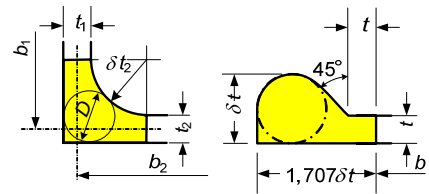


Fig. 10: Exempel på hålkäl och bulbar [1]

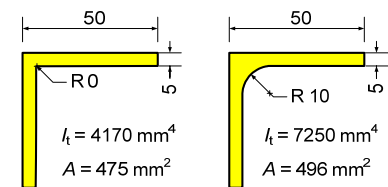


Fig. 11: Ökning av vridkonstanten  $I_t$  vid inläggning av inre hörnradie

## Avstyvade paneler och däck

Strängpressning i kombination med friction stir welding, FSW, gör aluminium mycket lämpligt för däckskonstruktioner. Det är då möjligt att med slutna profiler och utan att behöva svetsa särskilt mycket tillverka däck med stor vridstyvhet och med stor böjstyvhet i alla riktningar. Fig. 12 visar att en ortotrop platta kan fördela koncentrerade laster till anslutande profiler och på så sätt reducera nedböjningen i hög grad. Exempel på tvärsnitt som behandlas i [1] visas i Fig. 13.

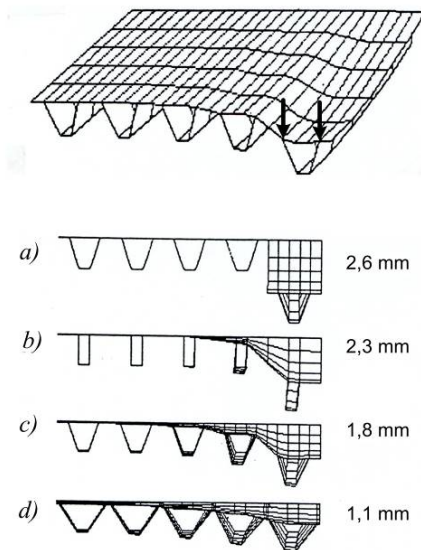


Fig. 12: Inverkan av bredden på trapetsformade avstyvningar på nedböjningen av en ortotrop platta

Fig. 14 visar den nyutvecklade krigsbro 71 som är ett exempel på konstruktion där ortotropa plattor används i alla sidorna på lådbalkarna [6].

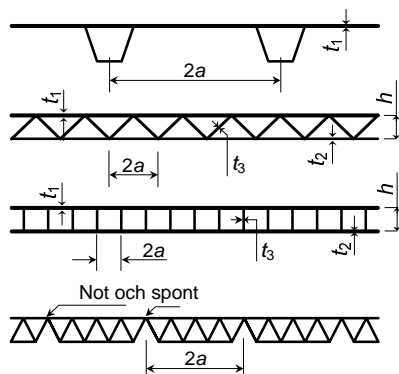


Fig. 13: Exempel på orthotropa plattor

## References

- [1] prEN 1999-1-1 – Eurocode 9: Design of aluminium structures Del 1-1: General structural rules
- [2] prEN 1999-1-2 – Eurocode 9: Design of aluminium structures Del 1-1: Structural fire design
- [3] prEN 1999-1-3 – Eurocode 9: Design of aluminium structures Del 1-1: Structures susceptible to fatigue
- [4] prEN 1999-1-4 – Eurocode 9: Design of aluminium structures Del 1-4: Cold-formed structural sheeting
- [5] prEN 1999-1-5 – Eurocode 9: Design of aluminium structures Del 1-5: Shell structures

[6] Höglund, T. & Nilsson, L. Aluminium in bridge decks and in a new military bridge in Sweden. Structural Engineering International 3/2006



Fig. 14: Krigsbro Kb 71 (Foto Örnalp/FMV)