

# Lätta konstruktioner

VT2 7,5 hp halvfart

Lars Bark och Janne Carlsson





# Planering material/komposit-delen

- Föreläsning 1
  - Introduktion till lätta konstruktioner
- Föreläsning 2
  - Materialval och materialindex, kap 5
  - Vad är kompositer?
  - Från fiber till komposit
- Föreläsning 3
  - Kompositer
  - Val av material och form, kap 9
  - Fallstudier – material och form, kap 10
- Föreläsning 4
  - Design av hybridmaterial, kap 11
  - Fallstudier – hybrider, kap 12
  - Kompositberäkning med SolidWorks



# Torsdag 5:e april 13:15 – 16:00

## Material/kompositer PPU408

- Eftermiddagens agenda
  - Kompositer
  - Paus
  - Val av material och form, kap 9
  - Paus
  - Fallstudier – material och form, kap 10



# Vad är kompositer?

- Ordet komposit kommer från latinets "compositum" som betyder sammansatt
- En definition av komposit
  - En struktur som består av fler än ett material, sammansatta på ett sådant sätt att karakteristiska egenskaper från dess enskilda material ger bidrag till komponenten (Från fiber till komposit).



# Kompositmaterial

- I kursen kommer vi att fokusera på materialstrukturer sammansatta av flera olika material där en eller flera förstärkningsfaser förstärker en vekare fas.
- Den vekare fasen kallas matris
  - Matrisens funktion är att hålla samman fibrerna, överföra laster mellan olika fibrer.
  - Matrisen förbättrar även seghet och ofta korrosionsegenskaper
- Vi får en förstärkt komposit
  - t.ex. fiberförstärkt komposit, fiberkomposit



# Förstärkningsmaterial

- Partiklar
  - Fler tillgängliga material än för fibrer då det är lätt att tillverka genom t.ex. malning
  - Ger materialet isotropa egenskaper
  - Keramer används ofta, t.ex aluminiumoxid och kiselkarbid
- Korta fibrer
  - Komposit klassas som kortfiberförstärkt då egenskaperna beror på fiberlängden
  - Diameter/längd ungefär 1:50
  - Lätt att sammanfoga med matris materialet
  - Ger materialet isotropa egenskaper



# Förstärkningsmaterial

- Kontinuerliga fibrer
  - Kan tillverkas i obegränsad längd genom t.ex. smält- eller trådragning
  - Kompositfibrer har en kärna av wolfram eller kol där en gasblandning kan kondensera
  - Whiskers (morrhår) är enkristaller med extremt hög hållfasthet
  - Ger kompositmaterial med anisotropa egenskaper



# Några vanliga fibrer

- Organiska fibrer
  - Polyamidfiber (PA, Nylon)
  - Polyesterfiber (PET, Polyetentereftalat)
  - Polyolefinfiber (PE, Polyeten, PP, polypropen)
  - Aramidfiber (Kevlar)
- Oorganiska fibrer
  - Glasfiber
  - Kolfiber
  - Borfiber
  - Aluminiumoxidfiber
  - Kiselkarbidfiber
  - Wolframfiber





# Organiska fibrer: PA, PET, PE och PP

- Kan smältdragas till multifilament vid 200 – 300 °C
- Kan användas upp till cirka 100 °C
- PA, Nylon eller polyamid. PA 6 och PA 6.6 är vanligast
  - PA 6.6 har högre smältpunkt på 250 °C (mot 215 °C)
  - Kemiskt stabil men bryts ned av UV-ljus
- PET, Polyester.
  - Lägre styvhet än PA men hög styrka
  - UV-känslig
- PE, PP
  - Ger fibrer med hög styrka och låg vikt
  - UV-känslig



# Organiska fibrer: Aramidfiber, Kevlar

- Kevlar och Twaron är aramidfibrer med hög axiell draghållfasthet
- Gul till färgen
- Anisotrop fiber
- Kan användas utan problem upp till 150 °C
- UV-känslig
- Mycket flexibel, lätt att väva
- Extremt seg



# Oorganiska fibrer:

- Glasfiber
  - Amorft (icke-kristallint) och vanligaste fibern.
  - E-fiber och S-fiber är de två vanligaste typerna
  - S-fiber har högre styrka och styvhet men också högre pris
  - Känsliga för hanteringskador
  - Isotrop
  - Beständig mot korrosion
- Kolfiber
  - Framställs genom oxidering och värmebehandling av organiska fibrer
  - Grafitstrukturen ger hög axiell hållfasthet men anisotrop struktur
  - Finns som HM och HS, E-modul 380 GPa eller sträckgräns 4500 MPa
  - Är elektriskt ledande



# Oorganiska fibrer:

- Borfiber
  - Attraktiv pga hög styrka och styvhet med låg densitet
  - Beläggs i gasform på wolframfiber eller kolfiber
  - Används inom flygindustri och sportprodukter
- Aluminiumoxidfiber
  - Tål högre temperaturer än glasfiber
  - Används ofta i metallmatriskompositer (MMC)
- Kiselkarbidfiber
  - Attraktivt för aluminium-, titan- och keramiska kompositer
  - Whiskers får hög E-modul, 700 GPa, och hög styrka, 10 GPa
- Wolframfiber
  - Fiber för högtemperaturanvändning i MMC



# Polymermatriskompositer, PMC

- Plast är en polymer med tillsatser
  - Ordet plast kommer från grekiska "plasticos" som betyder formbar
  - Fiberförstärkt plast introducerades under andra världskriget
- Polymerer delas upp i:
  - Härdplaster
  - Termoplaster
- Polymermatriskompositer, PMC (polymer matrix composites)
  - Fördelar: viktminskning, korrosionsbeständighet, buller- och vibrationsdämpning, lägre tillverkningskostnader
  - Nackdelar: låg maximal användningstemperatur, känsligt för fukt, UV-ljus och kemikalier



# Vanliga härdplaster

- Epoxiplast, EP
  - Goda mekaniska egenskaper
  - Kraftigt allergiframkallande
- Polyester, PE
  - Avger styren och kräver mycket god ventilation
- Tillverkas av formbar ännu ej förnätad polymer, harts (resin)
- Härdningsmedel startar en kemisk reaktion som bildar en nätstruktur som gör plasten styvare och temperaturtåligare



# Vanliga termoplaster

- Polyamid, PA Nylon
  - Acetalplast, POM
  - Polyeten, PE
  - Polypropen, PP
  - Polykarbonat, PC
- 
- Termoplast som matris har många fördelar: inga giftiga gaser, formsprutning med korta fibrer, hög fiberhalt, kan svetsas, hög slagseghet och lättare att reparera
  - Nackdelar: lägre tryckhållfasthet sämre utmattningsegenskaper och sämre värmetålighet



# Paus

- Vi tar en fikarast på cirka 20 minuter



# Val av material och form, kapitel 9



# Sektionsform - Formfaktor

- Sektionsform är viktigt vid vissa belastningstyper
- När formen är viktigt dyker en ny variabel upp
- Formfaktorn,  $\Phi$ , dyker upp i materialindex

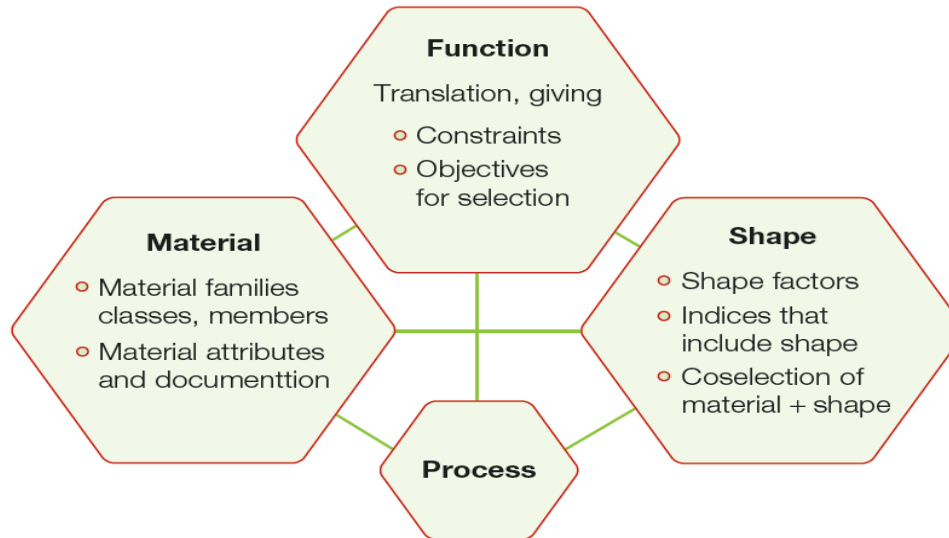


Figure 9.1

# Formfaktorn, $\Phi$

- Mekanisk effektivitet uppnås genom att kombinera material med form
- Formen karakteriseras av en dimensionslös formfaktor,  $\Phi$

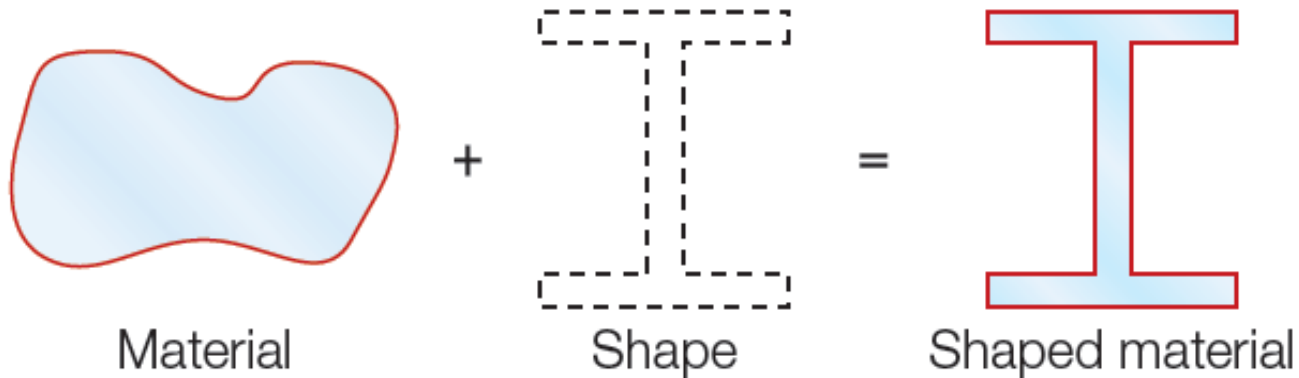


Figure 9.2

# Optimal form beror på belastningen

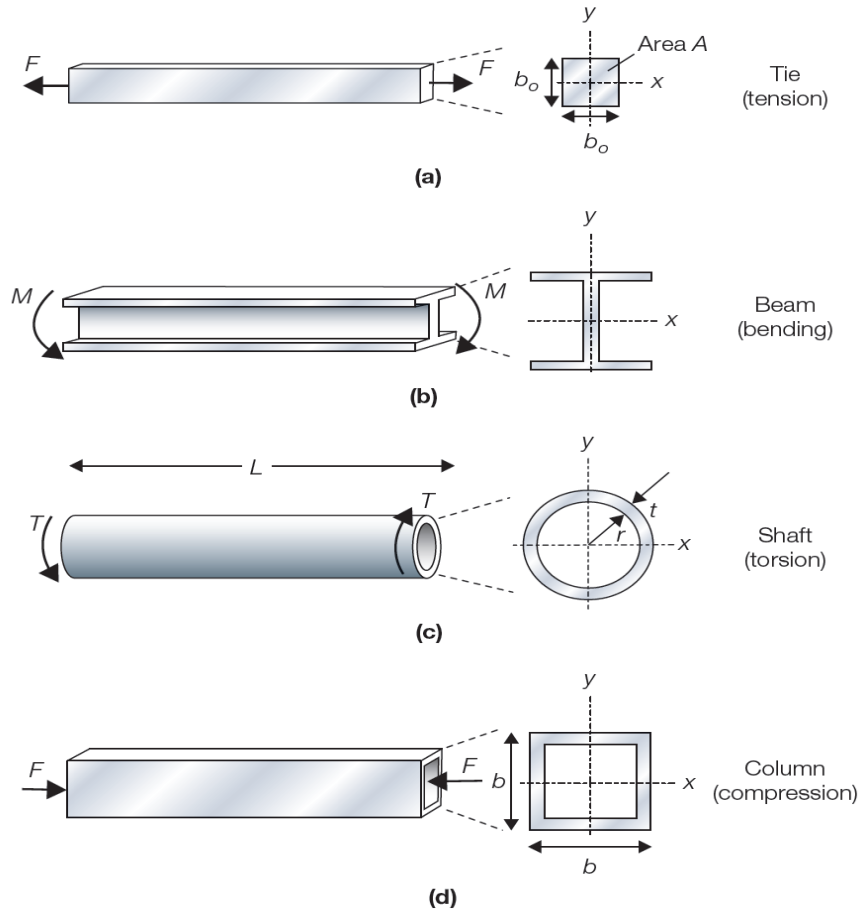


Figure 9.3

# Elastisk böjning av balkar

- Bøjstyvheten hos en balk är proportionell mot  $EI$
- Vi vill öka  $I$  utan att öka  $A$
- Formfaktorn,  $\Phi = \frac{I}{I_0}$
- En kvadrat är referensform

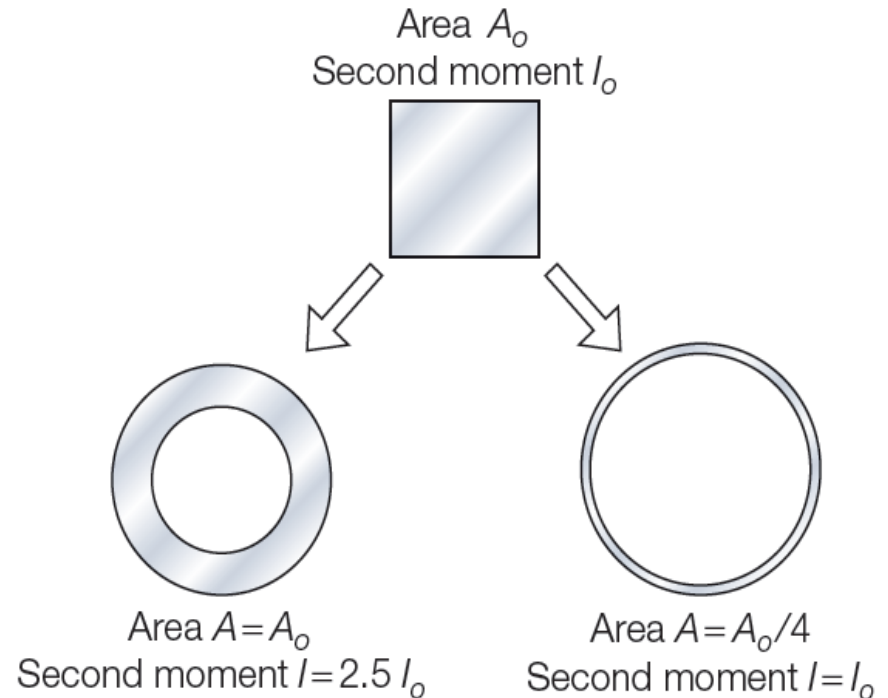
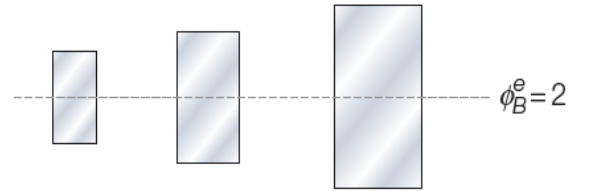
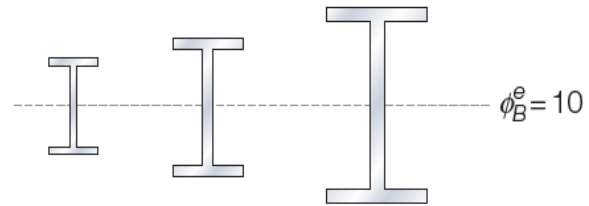


Figure 9.4

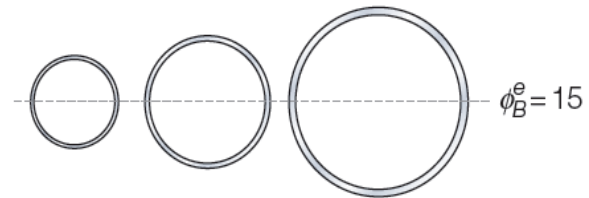
# Formfaktor för olika former



(a)



(b)



(c)

Figure 9.5

# Formfaktor för olika tvärsnitt

Table 9.3 Shape-efficiency Factors

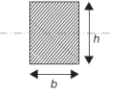
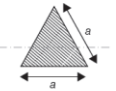
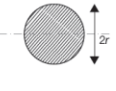
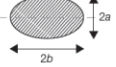
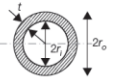
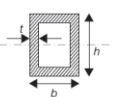
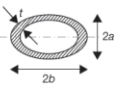
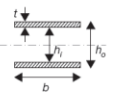
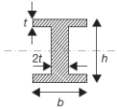
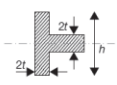
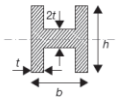
Section Shape	Bending Factor $\phi_B^e$	Torsional Factor $\phi_T^e$	Bending Factor $\phi_B^f$	Torsional Factor $\phi_T^f$
	$\frac{h}{b}$	$2.38 \frac{h}{b} (1 - 0.58 \frac{b}{h}) (h > b)$	$(\frac{h}{b})^{0.5}$	$1.6 \sqrt{\frac{b}{h}} \frac{1}{(1 + 0.6 \frac{b}{h})} (h > b)$
	$\frac{2}{\sqrt{3}} = 1.15$	0.832	$\frac{3^{1/4}}{2} = 0.658$	0.83
	$\frac{3}{\pi} = 0.955$	1.14	$\frac{3}{2\sqrt{\pi}} = 0.846$	1.35
	$\frac{3}{\pi} \frac{a}{b}$	$\frac{2.28 ab}{(a^2 + b^2)}$	$\frac{3}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{a}{b}}$	$1.35 \sqrt{\frac{a}{b}} (a < b)$
	$\frac{3}{\pi} (\frac{r}{t}) (r \gg t)$	$1.14 (\frac{r}{t})$	$\frac{3}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{r}{t}}$	$1.91 \sqrt{\frac{r}{t}}$
	$\frac{1}{2} \frac{h}{t} \frac{(1 + 3b/h)}{(1 + b/h)^2} (h, b \gg t)$	$\frac{3.57 b^2 (1 - \frac{t}{h})^4}{th (1 + \frac{b}{h})^3}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{h}{t}} \frac{(1 + \frac{3b}{h})}{(1 + \frac{b}{h})^{3/2}}$	$3.39 \sqrt{\frac{h^2}{bt}} \frac{1}{(1 + \frac{b}{h})^{3/2}}$
	$\frac{3}{\pi} \frac{a}{t} \frac{(1 + 3b/a)}{(1 + b/a)^2} (a, b \gg t)$	$\frac{9.12 (ab)^{5/2}}{t(a^2 + b^2)(a + b)^2}$	$\frac{3}{2\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{a}{t}} \frac{(1 + \frac{3b}{a})}{(1 + \frac{b}{a})^{3/2}}$	$5.41 \sqrt{\frac{a}{t}} \frac{1}{(1 + \frac{b}{a})^{3/2}}$
	$\frac{3}{2} \frac{h^2}{bt} (h, b \gg t)$	-	$\frac{3}{\sqrt{2}} \frac{h_0}{\sqrt{bt}}$	-

Table 9.3 continued

Section Shape	Bending Factor $\phi_B^e$	Torsional Factor $\phi_T^e$	Bending Factor $\phi_B^f$	Torsional Factor $\phi_T^f$
	$\frac{1}{2} \frac{h}{t} \frac{(1 + 3b/h)}{(1 + b/h)^2} (h, b \gg t)$	$1.19 (\frac{t}{b}) \frac{(1 + \frac{4h}{b})}{(1 + \frac{h}{b})^2}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{h}{t}} \frac{(1 + \frac{3b}{h})}{(1 + \frac{b}{h})^{3/2}}$	$1.13 \sqrt{\frac{t}{h}} \frac{(1 + \frac{4h}{b})}{(1 + \frac{h}{b})^{3/2}}$
	$\frac{1}{2} \frac{h}{t} \frac{(1 + 4bt^2/h^3)}{(1 + b/h)^2} (h, b, t)$	$0.595 (\frac{t}{h}) \frac{(1 + \frac{8b}{h})}{(1 + \frac{b}{h})^2}$	$\frac{3}{4} \sqrt{\frac{h}{t}} \frac{(1 + \frac{4bt^2}{h^3})}{(1 + \frac{b}{h})^{3/2}}$	$0.565 \sqrt{\frac{t}{h}} \frac{(1 + \frac{8b}{h})}{(1 + \frac{b}{h})^{3/2}}$
	$\frac{1}{2} \frac{h}{t} \frac{(1 + 4bt^2/h^3)}{(1 + b/h)^2} (h, b \gg t)$	$1.19 (\frac{t}{h}) \frac{(1 + \frac{4b}{h})}{(1 + \frac{b}{h})^2}$	$\frac{3}{4} \sqrt{\frac{h}{t}} \frac{(1 + \frac{4bt^2}{h^3})}{(1 + \frac{b}{h})^{3/2}}$	$1.13 \sqrt{\frac{t}{h}} \frac{(1 + \frac{4b}{h})}{(1 + \frac{b}{h})^{3/2}}$

# Formfaktorer för olika strukturer

## Styv design

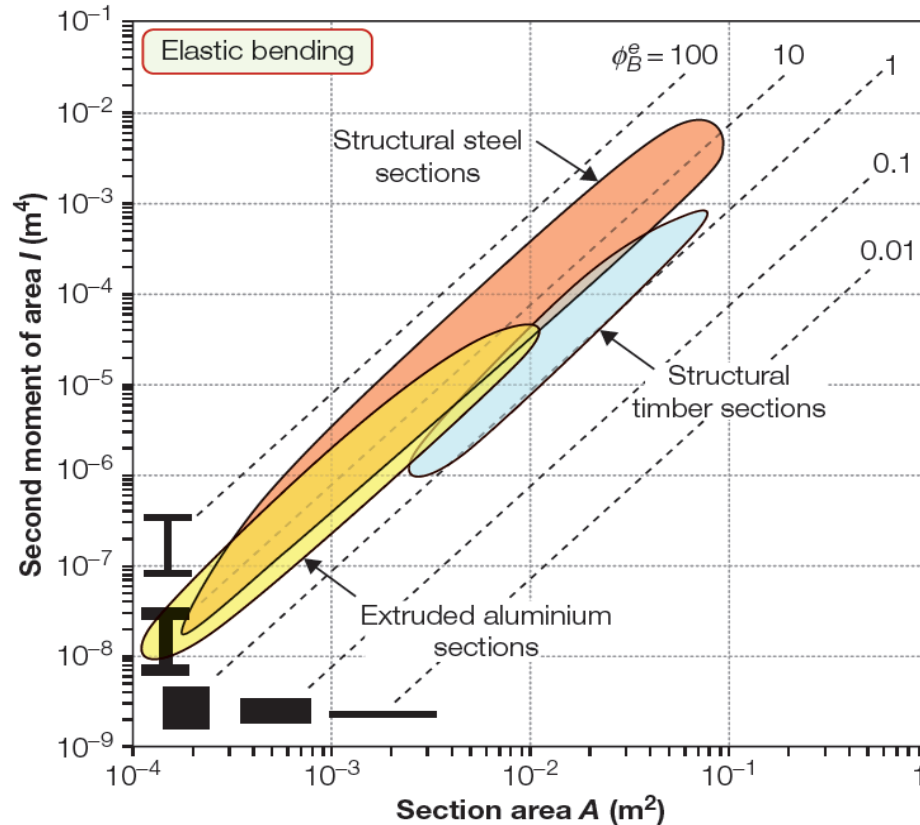


Figure 9.6



# Formfaktorer för olika strukturer

## Stark design

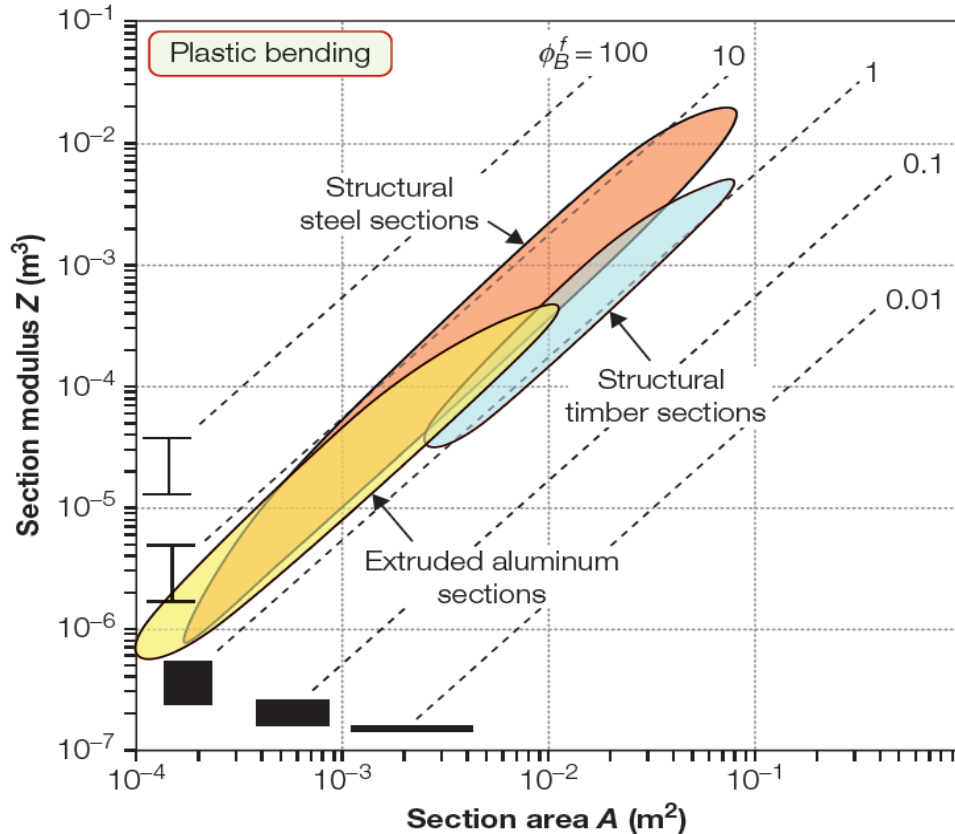


Figure 9.7

# Empiriska gränser för formfaktorn

**Table 9.4** Empirical Upper Limits for the Shape Factors

$\phi_B^e$ ,  $\phi_T^e$ ,  $\phi_B^f$ , and  $\phi_T^f$

Material	$(\phi_B^e)_{\max}$	$(\phi_T^e)_{\max}$	$(\phi_B^f)_{\max}$	$(\phi_T^f)_{\max}$
Structural steel	65	25	13	7
6061 aluminum alloy	44	31	10	8
GFRP and CFRP	39	26	9	7
Polymers (e.g., nylons)	12	8	5	4
Woods (solid sections)	5	1	3	1
Elastomers	< 6	3	–	–

# Jämförelse av sektioner i stål, aluminium och trä för en styv design

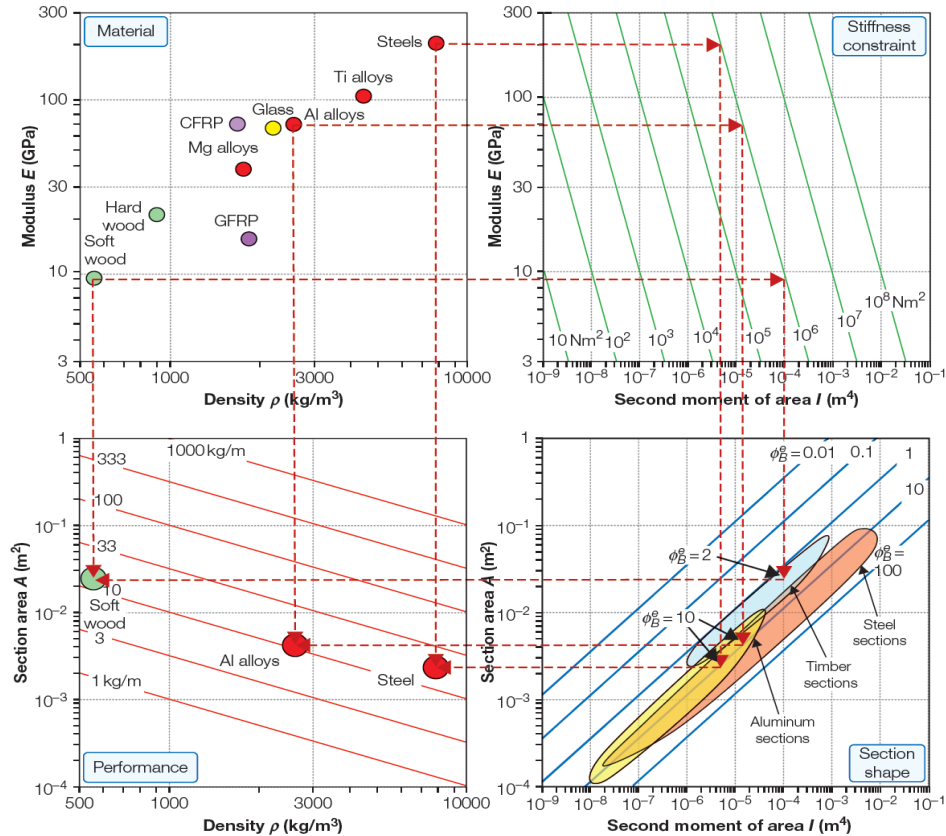


Figure 9.11

# 4-kvadrantgraf för stark design

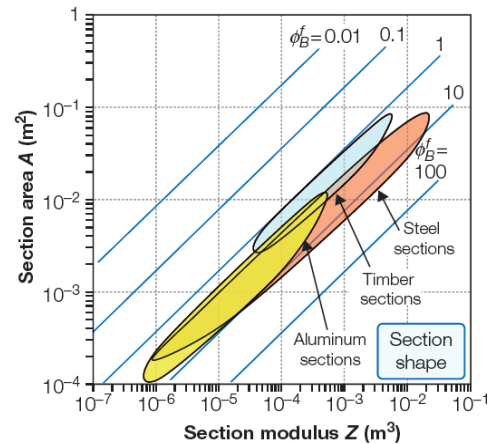
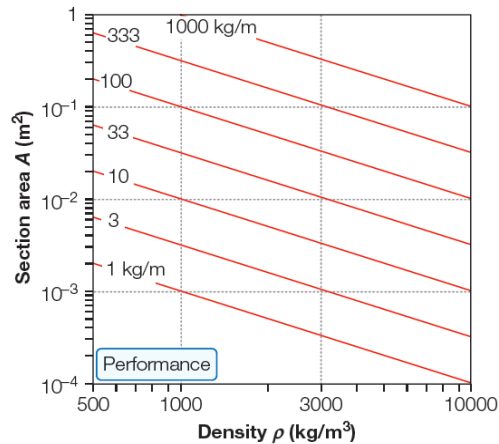
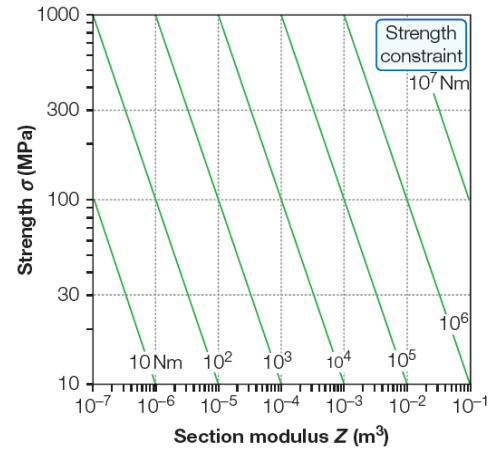
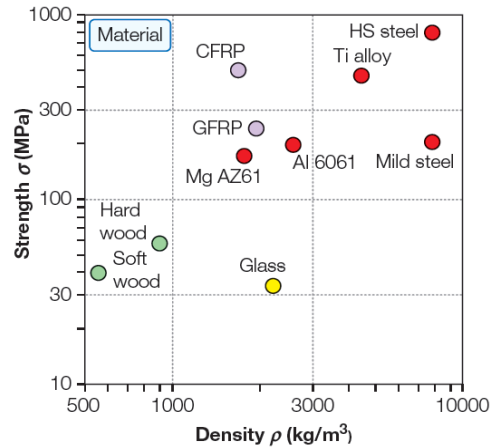


Figure 9.12



# Materialindex som inkluderar form

- Styv och lätt balk:

$$M_1 = \frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{\rho}$$

- Styv och lätt axel:

$$M_2 = \frac{(\phi_T^e E)^{1/2}}{\rho}$$

- Stark och lätt balk:

$$M_3 = \frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho}$$

- Stark och lätt axel:

$$M_4 = \frac{(\phi_T^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho}$$

# Val av material och form för en lätt och styv eller stark balk

**Table 9.5** Selection of Material and Shape for a Light, Stiff Beam

Material	$\rho$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$E$ (GPa)	$\phi_B^e$	$E^{1/2}/\rho$	$(\phi_B^e E)^{1/2}/\rho$
1020 steel	7.85	205	20	1.8	8.2
6061-T4 Al	2.7	70	15	3.1	<b>12.0</b>
GFRP (isotropic)	1.75	28	8	2.9	8.5
Wood (oak)	0.9	13.5	2	<b>4.1</b>	5.8

**Table 9.6** Selection of Material and Shape for a Light, Strong Beam

Material	$\rho$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_f$ (MPa)	$\phi_B^f$	$\sigma_f^{2/3}/\rho$	$(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}/\rho$
1020 steel, normalized	7.85	330	5	6.1	17.8
6061-T4 Al	2.7	110	4	8.5	<b>21.4</b>
GFRP SMC (isotropic)	2.0	80	3	9.3	19.3
Wood (oak), along grain	0.9	50	1.5	<b>15</b>	19.7



# Paus

- En liten bensträckare

# Fallstudier: Material och form





# Materialindex som inkluderar form

**Table 10.1** Indices with Shape: Stiffness- and Strength-limited Design at Minimum Weight

Component Shape, Loading, and Constraints	Stiffness-limited Design*	Strength-limited Design*
Tie (tensile member) Load, stiffness, and length specified, section-area free	$\frac{E}{\rho}$	$\frac{\sigma_f}{\rho}$
Beam (loaded in bending) Loaded externally or by self-weight, stiffness, strength and length specified, section area and shape free	$\frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{\rho}$	$\frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho}$
Torsion bar or tube Loaded externally, stiffness, strength, and length specified, section area and shape free	$\frac{(\phi_T^e E)^{1/2}}{\rho}$	$\frac{(\phi_T^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho}$
Column (compression strut) Collapse load by buckling or plastic crushing, strength and length specified, section area and shape free	$\frac{(\phi_B^e E)^{1/2}}{\rho}$	$\frac{\sigma_f}{\rho}$

\* The shape factors  $\phi_B^e$  and  $\phi_B^f$  are for bending;  $\phi_T^e$  and  $\phi_T^f$  are for torsion. For minimum cost design, replace  $\rho$  by  $C_m \rho$  in the indices.

# Framgaffel till en tävlingscykel

**Table 10.4** Design Requirements for Bicycle Forks

Function	Bicycle forks
Constraints	Must not fail under design loads—a strength constraint Length specified
Objective	Minimize mass
Free variables	Choice of material Section shape

$$M_2 = \frac{(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}}{\rho}$$

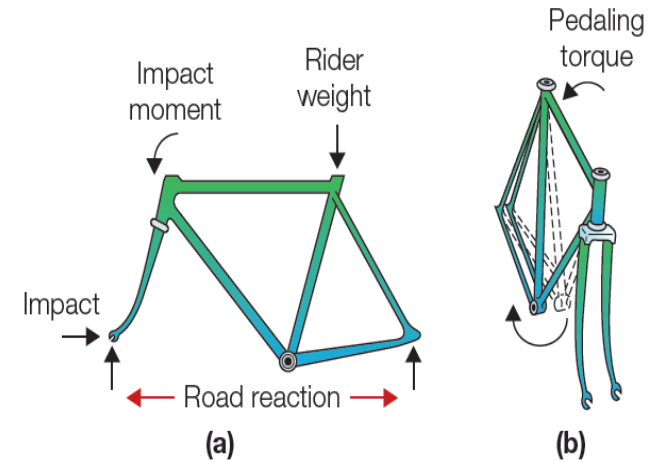
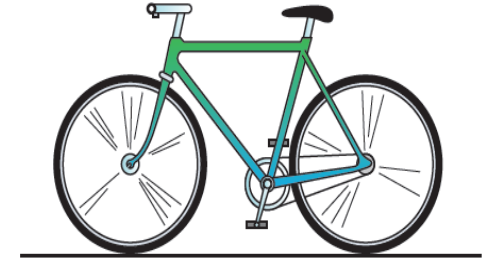


Figure 10.3



# Val av material till framgaffeln

**Table 10.5** Material for Bicycle Forks

Material	Strength $\sigma_f$ (MPa)	Density $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Shape Factor $\phi_B^f$	Index* $\sigma_f^{2/3}/\rho$ (MPa) <sup>2/3</sup> /(Mg/m <sup>3</sup> )	Index $M_2^*$ $(\phi_B^f \sigma_f)^{2/3}/\rho$ (MPa) <sup>2/3</sup> /(Mg/m <sup>3</sup> )
Spruce (Norwegian)	75	450	1.5	<u>39</u>	51
Bamboo	70	700	2.2	24	41
Steel (Reynolds 531)	880	7,850	7.5	12	46
Alu (6061-T6)	250	2,700	5.9	15	49
Titanium 6%Al-4%V	950	4,420	5.9	22	72
Magnesium AZ 61	165	1,810	4.25	17	45
CFRP	375	1,550	4.25	33	<u>87</u>

\* The values of the indices are based on mean values of the material properties.