

# HÅLLBAR PROJEKTERING

*Vägledning – Hållbar projektering av nya och återbrukade stålkonstruktioner*

Wylliam Husson och Ove Lagerqvist

2021-04-29

## Förord

Projektet "Hållbar Projektering" genomfördes under slutet av 2020 och våren 2021 tack vare finansiering av SBUF via Skanska Sverige AB.

Resultaten redovisas i denna rapport som vi hoppas kan bidra till att öka miljömedvetandet hos svenska konstruktörer och ligga till grund för spännande diskussioner och i förlängningen effektivare stålkonstruktioner.

Ett digitalt hjälpmedel i Excel har också utvecklats som gör det enkelt att utvärdera hur olika profilval inverkar på en stålstommes klimatpåverkan. Verktøget *KlimatDimensionering* tillhandahålls för nedladdning via [www.prodevelopment.se](http://www.prodevelopment.se).

Arbetsgruppen bestod av Wylliam Husson och Ove Lagerqvist, ProDevelopment AB.

För sitt deltagande i referensgruppen och värdefulla diskussioner vill vi tacka:

Björn Uppfeldt, MVR

Jan Adolfsson, PEAB

Roger Persson, NCC

Stefan Svensson, Skanska

Luleå och Söderhamn,

April 2021

# Innehållsförteckning

<b>Förord .....</b>	<b>1</b>
<b>Innehållsförteckning .....</b>	<b>2</b>
<b>1. Inledning.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Sammanfattning - Rekommendationer och tumregler.....</b>	<b>6</b>
<b>3. Klimatpåverkan av stålkonstruktioner .....</b>	<b>7</b>
3.1 <i>Livscykelanalys och miljövarudeklarationer .....</i>	7
3.2 <i>Allmänt om stålkonstruktioners klimatpåverkan .....</i>	8
3.3 <i>Val av tillverkare .....</i>	8
3.4 <i>Val av leverantör.....</i>	9
3.5 <i>Val av stålbyggnadsentreprenör.....</i>	10
3.6 <i>Transporter .....</i>	10
<b>4. Fallstudie .....</b>	<b>11</b>
4.1 <i>Optimering av enstaka komponenter .....</i>	11
4.1.1 <i>Takbalk .....</i>	12
4.1.2 <i>Pelare 1.....</i>	13
4.1.3 <i>Pelare 2.....</i>	14
4.1.4 <i>Pelare 3.....</i>	15
4.1.5 <i>HSQ balkar.....</i>	16
4.2 <i>Fast inspänd takbalk.....</i>	16
4.3 <i>Analys .....</i>	18
<b>5. Konstruktiva val.....</b>	<b>20</b>
5.1 <i>Allmänt .....</i>	20
5.2 <i>Konceptuell utformning .....</i>	20
5.2.1 <i>Inspänningsförhållanden.....</i>	20
5.2.2 <i>Delning .....</i>	21
5.2.3 <i>Lastförutsättningar .....</i>	24
5.3 <i>Val av profil.....</i>	24
5.3.1 <i>Balkar.....</i>	24
5.3.2 <i>Pelare .....</i>	26
5.4 <i>Dimensionering och materialutnyttjande.....</i>	30
<b>6. Höghållfast stål .....</b>	<b>32</b>
6.1 <i>Marknaden .....</i>	32
6.2 <i>Praktiska överväganden .....</i>	32
6.3 <i>Potential för viktbesparing .....</i>	32
6.3.1 <i>Pelare av konstruktionsrör .....</i>	34
6.3.2 <i>Pelare av HEA profiler .....</i>	37
6.3.3 <i>Balkar av HEA-profiler .....</i>	37

<b>7. Återbruk .....</b>	<b>40</b>
7.1 <i>Klimatprestanda .....</i>	<i>40</i>
7.2 <i>Anpassade föreskrifter.....</i>	<i>41</i>

# 1. Inledning

Historiskt har två kriterier dominerat vid projektering av stålkonstruktioner: bärighet och ekonomi. Dessa kriterier är väl etablerade i praxis och projektörernas medvetande.

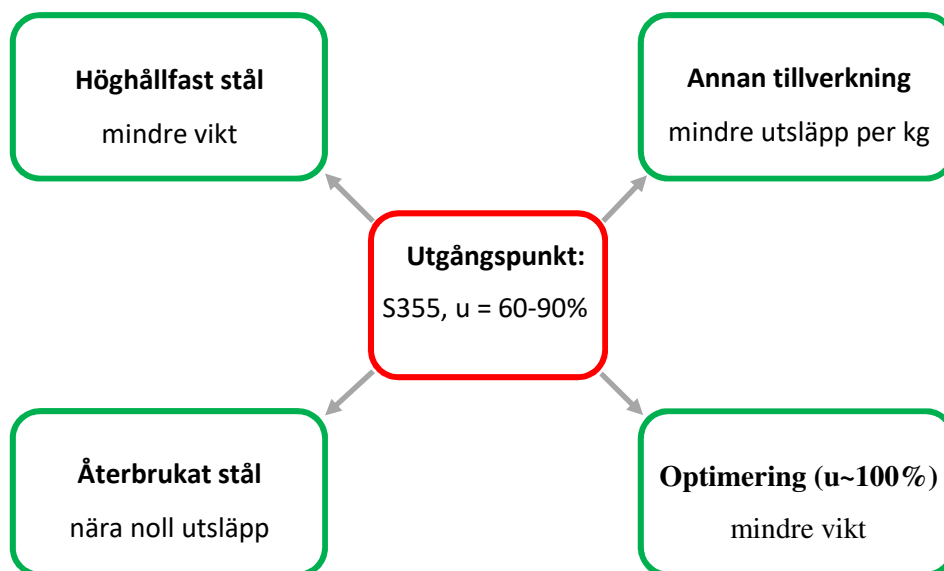
Idag ställs nya och allt högre krav gällande miljö- och, framför allt, klimatpåverkan. Stort fokus kring dessa krav har handlat om materialtillverkning och materialval men faktum är att konstruktörer också har en given möjlighet att påverka en byggnads klimatpåverkan om de integrerar detta nya kriterium i sitt arbetssätt.

T ex må det vara praktiskt och ekonomiskt motiverat att genomgående använda samma pelare i en konstruktion. Men har man tänkt på att varje millimeter godstjocklek i en vanlig våningshög pelare (4 m hög VKR 140x140x6,3) motsvarar mer än 200 km körning i en bensindriven SUV (200 g CO<sub>2</sub>/km)?

I genomsnitt ansvarar varje svensk för ca 4,5 t koldioxidutsläpp årligen. Detta motsvarar klimatpåverkan vid tillverkning av ca 1,7 t stål. Det vill säga att en svensk konstruktör kan kompensera sina personliga utsläpp genom att spara 8 kg stål per dag på jobbet.

Syftet med detta projekt var att belysa och exemplifiera hur olika val under projekterings- och inköpsprocessen påverkar klimatpåverkan hos en stålkonstruktion.

Det finns fyra sätt att minska klimatpåverkan av en stålkonstruktion och de illustreras i figuren nedan.



Figur 1.1 Fyra sätt att minska en stålkonstruktions klimatpåverkan.

I denna rapport presenteras dessa fyra metoders potential. Baserat på resultat av en fallstudie och diskussioner med referensgruppen ges råd om när och hur respektive metod kan tillämpas samt vilka effekter som kan förväntas.

I kapitel 2 ges en sammanfattning av de viktigaste resultaten och rekommendationer med hänvisningar till respektive del av rapporten för mer information.

Kapitel 3 behandlar stålets klimatpåverkan och baseras på en analys av tillgängliga miljövarudeklarationer från europeiska tillverkare och skandinaviska företag. Bland annat definieras riktvärden för klimatfaktorer, dvs hur många kilogram koldioxidekvivalent per kilogram stål (kg CO<sub>2</sub>-eq/kg), för produkter av sekundärt (skrotbaserat) respektive primärt (malmbaserat) material.

I kapitel 4 presenteras en fallstudie där en representativ konstruktion har optimerats på olika sätt. Resultaten ger en indikation på vilka strategier som ger mest effekt.

Inverkan av konstruktiva val tas upp i kapitel 5. Där resoneras om effekterna av konceptuell utformning (delning och inspänningsförhållanden) samt val av profiler för balkar (H- och I-profiler) och pelare (valsade profiler, VKR och KKR). Även konsekvenserna av låga utnyttjandegrader ingår i detta kapitel.

Störst potential för viktminskning genom användning av höghållfast stål finns hos pelare, men även vissa balkar kan dra nytta av stålsorter >S355. I kapitel 6 redovisas vilka produkter med högre hållfasthet som är tillgängliga. Hjälpmedel i form av olika diagram presenteras som kan hjälpa till att identifiera de fall då höghållfast stål är relevant.

Återbrukade produkter är överlägsna mht klimatprestanda. Mekaniska Verkstädernas Riksförbund har i samarbete med Nordcert och ProDevelopment AB tagit fram en handbok om återbruk med krav på sortering och klassificering. Om dessa regler tillämpas är begagnade och nya produkter utbytbara och dimensioneringsprocessen är oförändrad. Tillgängligheten på återbrukade produkter är dock fortfarande begränsad och det kan uppstå fall där en föreskriven profil ersätts av en begagnad produkt med större vikt. Då kan man undra om begagnade produkter alltid är tillgodo eftersom materialåtgången ökar. Vi försöker besvara denna fråga i kapitel 7. Dessutom föreslås allmänna föreskrifter som förenklar användning av återbrukat stål.

De analyser som redovisas i kapitel 3-7 och som sammanfattas i kapitel 2 har legat till grund för utveckling av ett digitalt hjälpmedel i Excel som gör det enkelt att utvärdera hur olika profilval inverkar på en stålstommes klimatpåverkan. Verktöget *KlimatDimensionering* tillhandahålls för nedladdning via [www.prodevelopment.se](http://www.prodevelopment.se).

## 2. Sammanfattning - Rekommendationer och tumregler

### Stålets klimatpåverkan

Följande riktvärden för klimatpåverkan från stålkomponenter kan användas (se kapitel 3):

- 1 kg valsad profil (H, I, U) motsvarar 1,1 kg CO<sub>2</sub>.
- 1 kg konstruktionsrör eller plåt motsvarar 2,6 kg CO<sub>2</sub>.
- För konstruktionsstål är klimatpåverkan oberoende av hållfastheten.

### Projektera för mindre klimatpåverkan

Vanliga stålkonstruktioner brukar vara lågt utnyttjade och kan optimeras mht sin klimatpåverkan relativt enkelt. Till en början kan ökade projekteringskostnader balanseras genom lägre materialkostnader. (se 4.3)

En lämplig strategi för att minska klimatpåverkan hos en ny konstruktion är följande:

- Anpassa profilen till funktionen (se kapitel 5.3).
- Sikta på en utnyttjandegrad >80% (se kapitel 5.4).
- Använd höghållfast stål om det är lämpligt (se kapitel 6).
- Om styvhet eller instabilitet är avgörande överväg extra stagning eller andra inspänningsförhållanden (se kapitel 5.2).

### Använd höghållfast stål där det gör nytta

Tryckta pelare har störst potential för viktbesparingar genom användning av höghållfast stål (se kapitel 6.3):

- våningshög VKR från S355 till S460: upp till 20%, minst 15% för laster över 2 MN (se figur 6.2).
- våningshög KKR från S355 till S420: upp till 20% beroende av lasten (se figur 6.3).
- våningshög KKR i S420 kan vara bättre än VKR i S355: upp till 20% vid stora laster (se figur 6.4).
- HEA med sidostagning, från S355 till S460: 10 till 30% vid laster över 500 kN (se figur 6.5).

Hög hållfasthet är ingen fördel för fritt upplagda balkar. Vid tvåstödsbalk krävs stora laster och vissa spännviddsintervall för att kunna dra nytta av S460 (se figur 6.6).

### Återbrukat stål är överlägset

Om konstruktionen inte är utmattningsbelastad, kan återbrukade komponenter användas. Deras klimatpåverkan kan betraktas som noll. Ersätt dock inte en ny komponent med en större begagnad om viktskillnaden överstiger 50 % (se kapitel 7.1).

Anpassa de allmänna föreskrifterna för att underlätta användning av återbrukat stål i icke utmattningsbelastade konstruktioner (se kapitel 7.2):

#### PROFILER

Återbrukade profiler kan användas. Deras väsentliga egenskaper styrks av specifika provningsresultat motsvarande kontrollintyg 3.1. Provningsmetod och omfattning enligt MVR BS04:2021.

HEA-profiler:	Dimensioner och toleranser enl. SS-EN 10034 Material motsvarande minst S275 enligt SS-EN 10025-2
CFRHS-profiler:	Dimensioner och toleranser enl. SS-EN 10219-2 Material motsvarande minst S355 enligt SS-EN 10219-1
HFRHS-profiler:	Dimensioner och toleranser enl. SS-EN 10210-2 Material motsvarande minst S355 enligt SS-EN 10210-1

### 3. Klimatpåverkan av stålkonstruktioner

#### 3.1 Livscykelanalys och miljövarudeklarationer

Klimatpåverkan av en produkt bör definieras ur ett livscykelperspektiv där samtliga skeden i en produkts livscykel från utvinning av det råa materialet till dess att produkten inte längre betraktas som avfall (End of Waste).

De allmänna principerna för en livscykelanalys (LCA) anges i ISO 14040. Först definieras ett syfte och omfattning. Sedan samlas information om materialflöden och processer under produktens livscykel (inventering, LCI) varpå miljöpåverkan bestäms med hjälp av påverkansfaktorer för ett antal relevanta påverkanskategorier (t ex klimatpåverkan, utarmning av fossila resurser, försurning, osv).

En livscykelanalys av en byggnad krävs data om de ingående produkterna. För att kommunicera relevant information har miljövarudeklarationer (EPD) utvecklats. Dessa följer ISO 14025. Dessutom anges allmänna produktkategoriregler (*Product Category Rules*) i SS-EN 15804 för byggprodukter.

Syftet med miljövarudeklarationer är att erbjuda tillförlitlig och jämförbar miljödata för en typ av produkt. Normalt förfinas därför reglerna i SS-EN 15804 för en specifik typ av produkt (t ex stålprodukter) genom s.k. *complementary Product Category Rules* (cPCR) som förvaltas av en programoperatör (t ex EPD International, EPD Norge, osv). CEN/TC135/WG17 har tagit fram ett utkast på cPCR för stålprodukter: prEN 17662.

Bland annat delas en byggprodukts olika livsskeden i moduler enligt tabell 3-1.

Tabell 3-1 Indelning av livscykeln i moduler enligt SS-EN 15804.

A	Byggskede	Produkt	A1	Råvaruförsörjning
			A2	Transport
			A3	Tillverkning
		Byggproduktion	A4	Transport
			A5	Bygg- och installationsprocess
B	Användning	B1	Användning	
		B2	Underhåll	
		B3	Reparation	
		B4	Utbyte	
		B5	Ombyggnad	
		B6	Driftsenergi	
		B7	Driftens vattenanvändning	
C	Slutskede	C1	Demontering, rivning	
		C2	Transport	
		C3	Restproduktsbehandling	
		C4	Bortskaffning	
D	Fördelar och belastningar utanför systemgränsen			

Stålkonstruktioners största miljöpåverkan härrör från byggskedet (modul A) och då framförallt från produktskedet (A1-A3).

Stål är ett cirkulärt material och när livscykeln tar slut efter modul C återinförs produkten i systemet i form av sorterat skrot eller återbrukad produkt. Då behöver inte samma mängd primärt material tillverkas på nytt och den relaterade påverkan undviks. Denna effekt behandlas i modul D där stålprodukter typiskt har en positiv (med negativt tecken) påverkan som delvis kompenserar för modul A.



### 3.2 Allmänt om stålkonstruktioners klimatpåverkan

Bärande stålkonstruktioner uppstår genom en produktionsprocess i två steg:

1. tillverkning av standardiserade ingående produkter (valsade profiler, konstruktionsrör, plåtar etc) och;
2. tillverkning enligt ritning i verkstad.

Störst klimatpåverkan uppstår vid tillverkning av materialet.

Det finns dessutom en stor skillnad mellan primärt och skrotbaserat material.

Tillverkning av primärt eller jungfruligt stål ger upphov till utsläpp från gruvdrift samt reduktion av järnmalm i masugn medan tillverkning från skrot innebär mindre utsläpp från energianvändning i ljusbågsugn.

Generiska värden på säker sida (överskattning) enligt Boverkets klimatdatabas är 3,150 respektive 1,125 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg obearbetat stål.

I Europa är valsade profiler (I-, H- och U-profiler) normalt av skrotbaserat stål medan varmvalsade plåtar och även konstruktionsrör görs av primärt material.

För vanliga konstruktionsstål upp till S460 är klimatpåverkan oberoende av hållfastheten.

### 3.3 Val av tillverkare

Nedan anges klimatpåverkan från tre sorters stålprodukter utifrån miljövarudeklarationer (EPD) från olika tillverkare.

Tabell 3-2 Klimatdata från tillverkare av valsade profiler

Tillverkare	Produkter	GWP [kg CO <sub>2</sub> -eq/kg]		EPD nr.
		A1-A3	D	
ArcelorMittal	H- och I- profiler i S355 eller S460 (HISTAR®)	0,52	+0,09	EPD-ARC-20190180-CBD1-EN
ArcelorMittal	Stålprofiler	0,84	-0,10	EPD-ARC-20190180-CBD1-EN
BauforumStahl (ArcelorMittal, Dillinger, Peiner Träger, Stahlwerk Thüringen)	Stålprofiler och plåtar	1,13	-0,41	EPD-BFS-20180116-IBG2-EN

Tabell 3-3 Klimatdata från tillverkare av valsade plåtar

Tillverkare	Produkter	GWP [kg CO <sub>2</sub> -eq/kg]		EPD nr.
		A1-A3	D	
ArcelorMittal	Varmvalsade plåtar (5 till 100 mm)	2,60	-1,80	EPD-ARC-20200038-CBA1-EN
NLMK DanSteel	Stålblåt	3,12	-1,93	MD-18014-EN
SSAB	Varmvalsade plåtar	2,71	-1,48	S-P-01918

Tabell 3-4 Klimatdata från tillverkare av konstruktionsrör

Tillverkare	Produkter	GWP [kg CO <sub>2</sub> -eq/kg]		EPD nr.
		A1-A3	D	
ArcelorMittal	KKR och VKR	2,27	-1,32	EPD-ARC-20190180-CBD1-EN
Tata Steel UK	KKR (Hybox <sup>®</sup> ) och VKR (Celsius <sup>®</sup> ) i S355	2,50	-1,53	EPD-TS-2017-003
SSAB Europe Oy	Bl a konstruktionsrör	2,49	-1,36	NEPD-475-331-EN
SSAB	KKR	2,40	-1,58	S-P-02241

Tabell 3-5 Klimatdata för olika sorters stålprodukter, medelvärde från europeiska tillverkare

Produkter	GWP (A1-A3) [kg CO <sub>2</sub> -eq/kg]
Valsade profiler	0,83 +/- 0,25
Varmvalsade plåtar	2,81 +/- 0,22
Konstruktionsrör	2,42 +/- 0,09

Variationen (+/- 0,25 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg eller 30% av medelvärdet) är särskild stor för valsade produkter där ArcelorMittals HISTAR<sup>®</sup> produkter har värden mindre än hälften av genomsnittet för de största tillverkarna på den tyska marknaden.

Den absoluta variationen mellan tillverkare av plåtar (+/- 0,22 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg) är av samma storleksordning men utgör en mindre andel av utsläppen (endast 8%) och eftersom plåtar till detaljer normalt utgör endast en liten andel av den totala vikten är skillnaden mellan olika tillverkare av mindre betydelse.

Tillverkarna skiljer inte mellan VKR och KKR. Variationen mellan tillverkarna är ca 9%.

### 3.4 Val av leverantör

Även om stål kan beställas direkt från verk är det vanligt att handla ingående produkter hos en leverantör som har ett brett sortiment från olika tillverkare och även utför vissa arbetsmoment som kapning, blästring eller målning.

Genom att klimatdata från leverantörer baseras på genomsnittsvärden är de ofta lämpligare att användas i ett tidigare skede.

Tabell 3-6 Klimatdata från leverantör av valsade profiler

Leverantör	Produkter	Tillverkare	GWP [kg CO <sub>2</sub> -eq/kg]		EPD nr.
			A1-A3	D	
Stene Stål Produkter AS	Valsade profiler S355J2/S460M/ML	ArcelorMittal	0,56	0,00	NEPD-2409-1210-NO
Norsk Stål AS	Valsade profiler	ArcelorMittal, tyskt stål	1,18	-0,33	NEPD-2526-1260-NO
Tibnor AB	Valsade profiler	x	1,15	-0,04	S-P-02043
Stena Stål AB	Valsade profiler S235JR/S355J2	x	1,02	x	S-P-02626

Tabell 3-7 Klimatdata från leverantör av konstruktionsrör

Leverantör	Produkter	Tillverkare	GWP [kg CO <sub>2</sub> -eq/kg]		EPD nr.
			A1-A3	D	
Stene Stål Produkter AS	KKR S355J2H/S420MH	Generisk (ecoinvent 3.5)	2,47	-1,25	NEPD-2395-1112-NO
Norsk Stål AS	KKR S355J2H/S420MH	SSAB, Tata Steel, ArcelorMittal	2,49	-1,42	NEPD-2525-1263-NO
Norsk Stål AS	VKR S355J2H/S420MH	Tata Steel	2,82	-1,45	NEPD-2522-1261-NO
Tibnor AB	KKR	x	2,58	-1,30	S-P-02044
Tibnor AB	VKR	x	2,60	-1,26	S-P-02045

För valsade produkter sticker Stene Stål Produkter AS ut tack vare att de endast tillhandahåller produkter från ArcelorMittal, se ovan. I övrigt är genomsnittet 1,12 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg.

För konstruktionsrör skiljer vissa leverantörer mellan VKR och KKR. Skillnaden kan antagligen härledas till olika tillverkare, se ovan. Genomsnittet är 2,59 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg.

Skillnaden mellan minsta och största värde är ca 14% av genomsnittet för båda produkttyper.

### 3.5 Val av stålbyggnadsentreprenör

Tillverkning i verkstad ger upphov till ytterligare utsläpp från uppvärmning av lokaler, spill, bearbetning, svetsning, blästring, målning, förpackning, mm.

Denna påverkan varierar från fall till fall och beror av såväl de specifika konstruktionslösningarna som den aktuella verkstadens förutsättningar. Normalt är dock klimatpåverkan från tillverkning i verkstad mycket mindre än den från tillverkning av de ingående produkterna.

Enligt en nu utgången miljövarudeklaration från Ruukki Construction för sina anläggningar i Finland, Litauen och Polen stod tillverkning i verkstad för ca 9% av den totala klimatpåverkan på 2,71 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg för (A1-A3).

Detta motsvarar siffror från USA där miljövarudeklarationer från AISC visar att tillverkning i verkstad bidrar med ca 0,12 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg, dvs 5 respektive 10% av klimatpåverkan hos konstruktioner av konstruktionsrör respektive valsade profiler.

Contiga i Norrtälje rapporterar (NEPD-1928-851) ca hälften (0,06 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg), dvs ca 2,5% av den totala klimatpåverkan på 2,49 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg för (A1-A3).

Mer data från svenska verkstäder saknas, men antagligen bidrar den låga klimatpåverkan från svensk Elmix till en relativt låg klimatpåverkan från verkstadsoperationer jämfört med andra länder. Vi kan utgå från en klimatpåverkan på ca 0,1 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg för tillverkning i verkstad.

Val av stålbyggnadsentreprenör kan givetvis påverka klimatprestandan hos ett givet projekt, men det är inte en av de mest avgörande faktorerna.

### 3.6 Transporter

Transporter med lastbil har en klimatpåverkan i storleksordning 0,01-0,02 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg per 100 km enkelväg.

Betydelsen av korta transporter på den inhemska marknaden är därmed liten. Vid internationella transporter på flera tusen kilometer kan den dock komma i paritet med tillverkning i verkstad.

## 4. Fallstudie

Objektet som valdes till fallstudien kan anses vara representativt för aktuell svensk stålbyggnadspraxis.

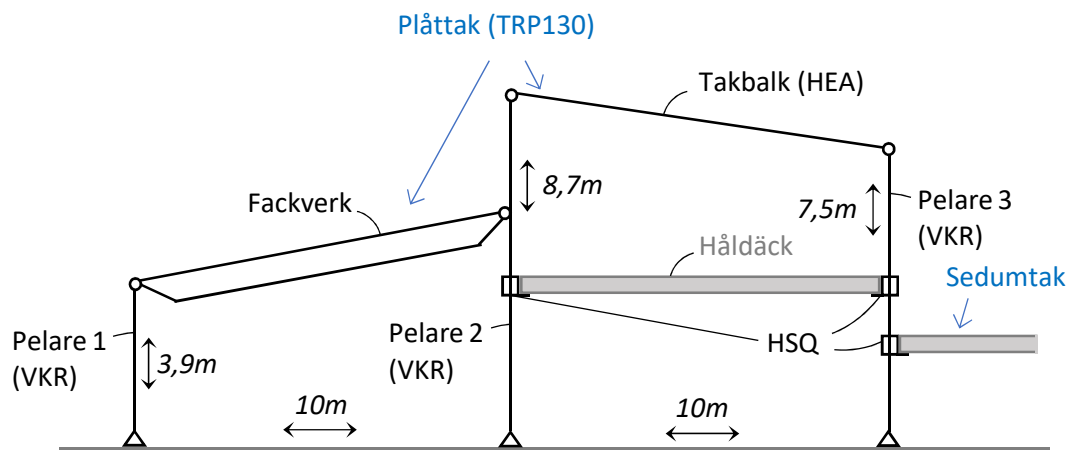
Stommen består av kontinuerliga pendelpelare och fritt upplagda balkar. Stabilisering sker genom skivverkan i tak och med hjälp av bockar i gavlar och långsidor.

De övre takdelarna utgörs av ett plåttak som bärs av fackverksbalkar (västra delen) respektive HEA-balkar (mittdelen). Den nedre delen är ett sedumtak av förspända håldäckselement på HSQ-balkar.

Mellanbjälklaget utgörs också av förspända håldäckselement på HSQ-balkar.

Pelarna är VKR.

En elevation av kortsidan visas i figur 4.1. Byggnaden är ca 40 m lång och består av 11 sådana ramar med ett konstant centrumavstånd på 4 m.



Figur 4.1 Skiss av den studerade stommen – elevation, kortsida

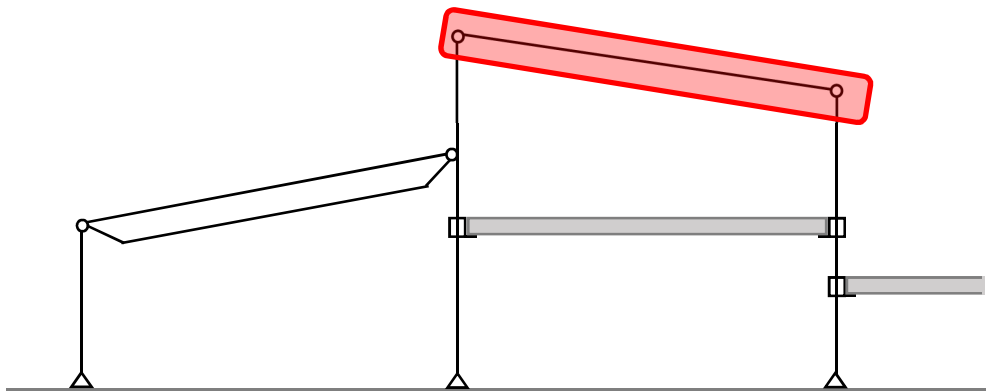
I fallstudien optimerades först enstaka komponenter med olika metoder och sedan undersöktes hur inspänning mellan pelare och takbalk kunde utnyttjas.

### 4.1 Optimering av enstaka komponenter

Syftet med optimeringen var att undersöka om klimatpåverkan kunde minskas genom att välja alternativa lösningar som uppfyller samma funktion mht till bärförmåga och styvhet. Det kan ha funnits andra anledningar till de faktiska val som gjordes.

I detta avsnitt anges uppgifter om vikt och klimatpåverkan för en enda ram, se figur 4.1.

#### 4.1.1 Takbalk



##### **Utgångsläge**

HEA340, S355, 10 m	Utnyttjandegrad: 89%
Vikt: 1 050 kg	Klimatpåverkan: <b>1 155 kg CO<sub>2</sub>-eq</b>

Nedböjning är avgörande och därmed är en ökning av hållfastheten onödig.

##### **Rättad lastberäkning, -7%**

HEA320, S355, 10 m	Utnyttjandegrad: 87%
Vikt: 976 kg	Klimatpåverkan: <b>1 074 kg CO<sub>2</sub>-eq</b>

Det visade sig att ett mindre fel hade gjorts vid lastberäkningen och en lägre HEA-profil kan användas.

##### **Större bygghöjd, IPE-profil, -37%**

IPE400, S355, 10 m	Utnyttjandegrad: 86%
Vikt: 663 kg	Klimatpåverkan: <b>729 kg CO<sub>2</sub>-eq</b>

Om en större bygghöjd kan accepteras är det möjligt att använda en IPE-profil med bättre förhållande mellan styvhet och vikt. Det krävs en IPE400 vilket betyder att bygghöjden ökar med 90 mm.

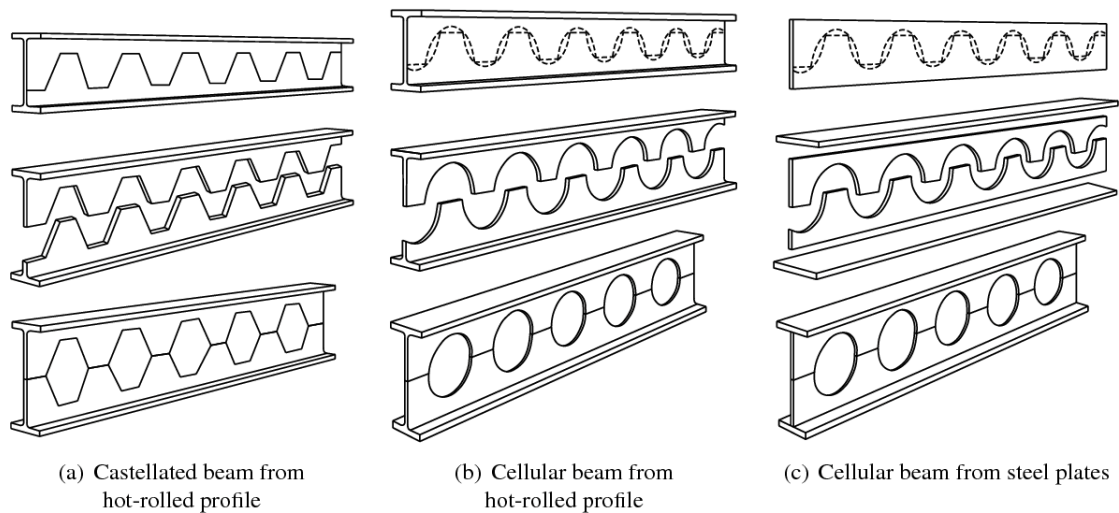
##### **Hål i liv**

För att spara vikt kan man göra hål i balkliven.

Enligt gällande regelverk baseras dock produktens klimatpåverkan på vikten av ingående produkter som ingår vid tillverkning. Denna vikt är den samma, oavsett om det görs hål i liv eller inte. Bearbetning innebär ytterligare påverkan som gör att balkar med hål i liv har en sämre klimatprestanda jämfört med samma balk utan hål.

Från ett globalt perspektiv kan besparat material återinföras i processen och ersätta primärt material vilket är positivt. Detta beaktas dock inte i en vanlig livscykelanalys som ligger till grund för en miljövarudeklaration. Där betraktas spill likadant oavsett om det uppstår pga ineffektiv tillverkningsprocess eller genom viktoptimering.

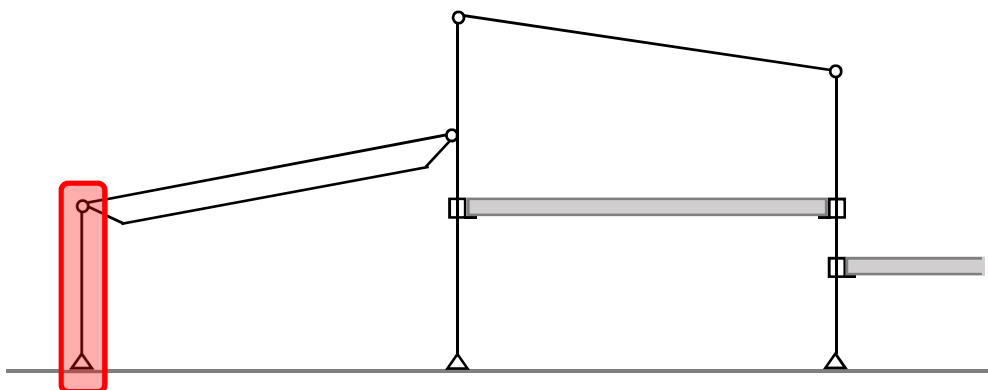
Om en låg balk används vid tillverkning av en högre profil med hål i liv kan materialspill begränsas till ett minimum, se figur 4.2, och den slutliga produkten kan få en bättre klimatprestanda. Sådana produkter är ovanliga i Sverige men marknadsförs i Europa under det engelska namnet *castellated beams* (kantiga hål) eller *cellular beams* (runda hål).



Figur 4.2 Princip för tillverkning av balkar med hål i liv med mindre spill (Bild: Nguyen Tran Hieu, 2018)

I det aktuella fallet där bygghöjden är begränsande och en viss flänsbredd krävs måste hål skäras bort vilket är ogynnsamt.

#### 4.1.2 Pelare 1



#### Utgångsläge

<b>VKR 120x120x6,3, S355, 3,9 m</b>	Utnyttjandegrad: 76%
Vikt: 87 kg	Klimatpåverkan: <b>225 kg CO<sub>2</sub>-eq</b>

Olycksfall (påkörningslast) är avgörande och utnyttjandegraden är låg.

#### Mindre godstjocklek, -20%

<b>VKR 120x120x5, S355, 3,9 m</b>	Utnyttjandegrad: 95%
Vikt: 69 kg	Klimatpåverkan: <b>180 kg CO<sub>2</sub>-eq</b>

En pelare med mindre godstjocklek och samma yttre mått samt stålsort kan väljas. Utnyttjandegraden är mycket större men dimensioneringsregler garanterar en tillräcklig säkerhet upp till och med 100% utnyttjandegrad.

### VKR i S420, -27%

VKR 120x120x4,5, S420, 3,9 m	Utnyttjandegrad: 91%
Vikt: 63 kg	Klimatpåverkan: <b>163 kg CO<sub>2</sub>-eq</b>

Genom ökad hållfasthet kan en mindre godstjocklek väljas.

### KKR S420 (s.k. Double Grade), -21%

KKR 120x120x5, S420, 3,9 m	Utnyttjandegrad: 88%
Vikt: 68 kg	Klimatpåverkan: <b>177 kg CO<sub>2</sub>-eq</b>

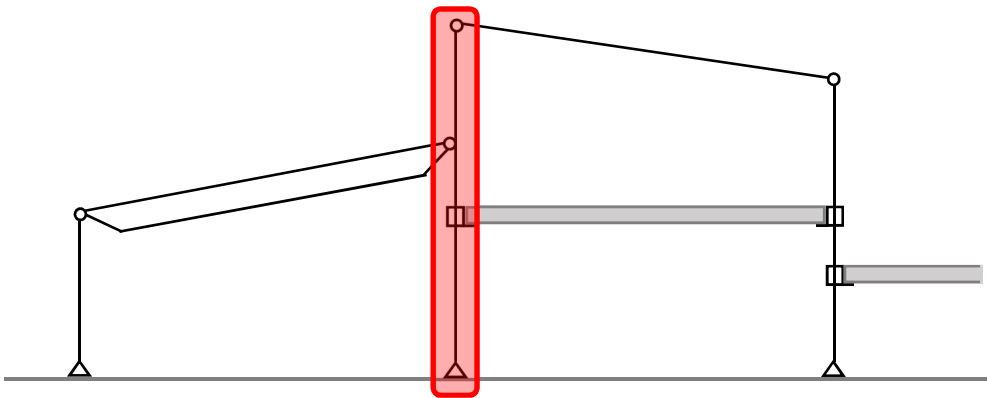
KKR i S420 lagerhålls.

### KKR S550, -36%

KKR 120x120x4, S550, 3,9 m	Utnyttjandegrad: 95%
Vikt: 55 kg	Klimatpåverkan: <b>144 kg CO<sub>2</sub>-eq</b>

Minsta godstjocklek på 4 mm kan väljas om hållfastheten ökar till S550. I detta fall måste profilerna beställas direkt från verk.

### 4.1.3 Pelare 2



### Utgångsläge

VKR 140x140x6,3, S355, 8,7 m	Utnyttjandegrad: 77%
Vikt: 227 kg	Klimatpåverkan: <b>590 kg CO<sub>2</sub>-eq</b>

Utnyttjandegraden är låg.

### Mindre godstjocklek, -20%

VKR 140x140x5, S355, 8,7 m	Utnyttjandegrad: 82%
Vikt: 183 kg	Klimatpåverkan: <b>475 kg CO<sub>2</sub>-eq</b>

Utnyttjandegraden är fortfarande låg om minsta godstjockleken väljs. Att minska bredden till 120 mm fungerar dock inte.

### VKR i S460, -32%

VKR 120x120x5, S460, 8,7 m	Utnyttjandegrad: 95%
Vikt: 155 kg	Klimatpåverkan: <b>403 kg CO<sub>2</sub>-eq</b>

Ökad hållfasthet gör det möjligt att välja en mindre bredd. I detta fall måste profilerna beställas direkt från verk.

### **KKR S355, -21%**

<b>KKR 140x140x5, S355, 8,7 m</b>	Utnyttjandegrad: 97%
Vikt: 180 kg	Klimatpåverkan: <b>468 kg CO<sub>2</sub>-eq</b>

KKR är något lättare än motsvarande VKR. I detta fall är KKR i S355 något mer effektivt.

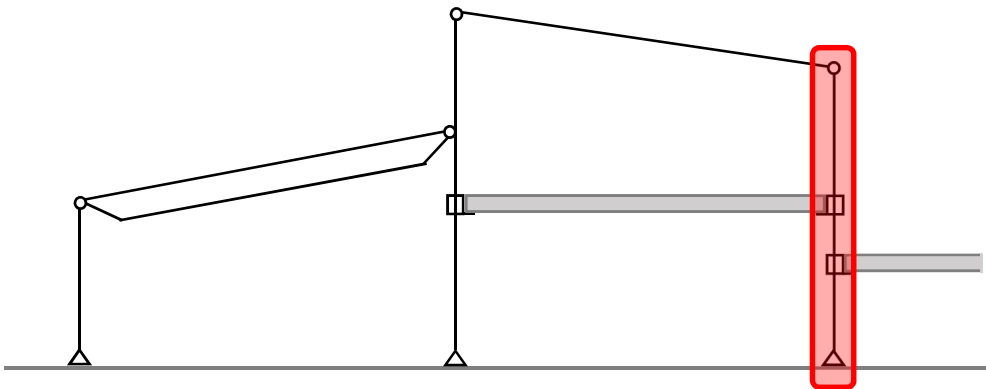
Det är inte möjligt att minska godstjockleken ännu mer.

### **Varierande tvärsnitt, -31%**

<b>VKR 140x140x5, S355, 4,1 m</b>	Utnyttjandegrad: 97%
<b>VKR 140x70x5, S355, 4,6 m</b>	
Vikt: 157 kg	Klimatpåverkan: <b>409 kg CO<sub>2</sub>-eq</b>

Ett mindre tvärsnitt kan användas till pelarens övre del eftersom belastningen avtar. Det är lämpligt att använda samma höjd, dvs 140 mm.

#### 4.1.4 Pelare 3



### **Utgångsläge**

<b>VKR 120x120x6,3, S355, 7,5 m</b>	Utnyttjandegrad: 65%
Vikt: 167 kg	Klimatpåverkan: <b>433 kg CO<sub>2</sub>-eq</b>

Utnyttjandegraden är mycket låg.

### **Mindre godstjocklek, -27%**

<b>VKR 120x120x4,5, S355, 7,5 m</b>	Utnyttjandegrad: 93%
Vikt: 121 kg	Klimatpåverkan: <b>314 kg CO<sub>2</sub>-eq</b>

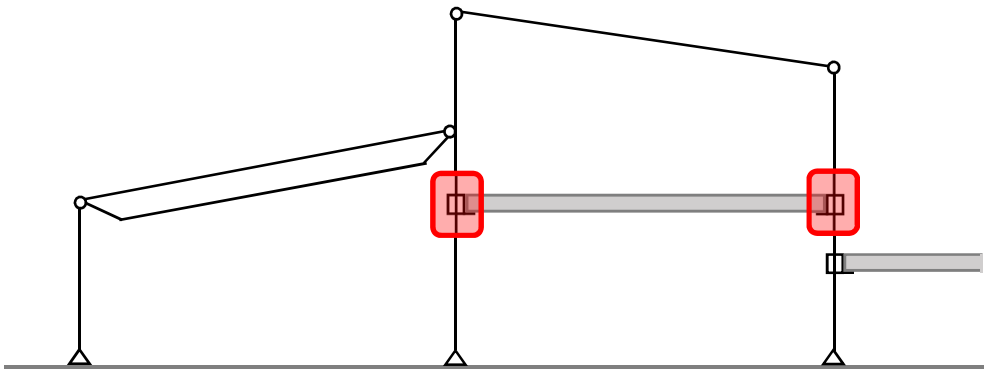
### **KKR double grade S420, -20%**

<b>KKR 120x120x5, S420, 7,5 m</b>	Utnyttjandegrad: 95%
Vikt: 134 kg	Klimatpåverkan: <b>347 kg CO<sub>2</sub>-eq</b>

I detta fall är KKR mindre effektiva, trots högre hållfasthet.



#### 4.1.5 HSQ balkar



##### **Utgångsläge**

<b>HSQ240:200x440-15/15-5,</b> <b>S355, 2x4 m</b>	Utnyttjandegrad: 60%
Vikt: 740 kg	Klimatpåverkan: <b>1 922 kg CO<sub>2</sub>-eq</b>

HSQ-balkar med samma tvärsnitt används i hela konstruktionen: HSQ240:200x440-15/15-5.

Några få balkar har en utnyttjandegrad på 100% men de flesta ligger runt 50-60% med några ner på 30%.

Nedböjning är avgörande så en ökning av hållfastheten är utan effekt.

##### **Mindre godstjocklek, -23%**

<b>HSQ240:200x440-12/10-5,</b> <b>S355, 2x4 m</b>	Utnyttjandegrad: 93%
Vikt: 566 kg	Klimatpåverkan: <b>1 473 kg CO<sub>2</sub>-eq</b>

Utän att förändra varken höjd eller bredd kan flänsarnas tjocklekar minska, en relativt vanlig utformning med tillräcklig styvhet är HSQ240:200x440-12/10-5.

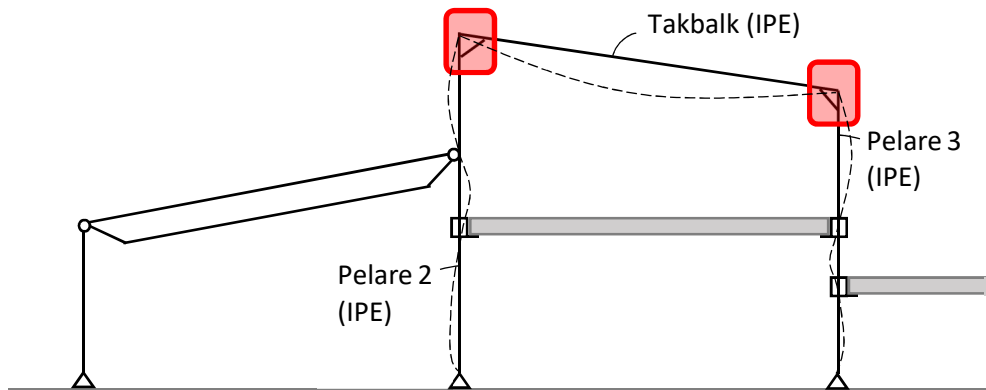
Vid lokal plasticering i underfläns kan plåtar med bättre hållfasthet användas.

Om brandlastfallet blir avgörande kan extra brandskydd användas.

#### 4.2 Fast inspänd takbalk

Takbalken utgör en stor del av den totala vikten. Den går dock inte att optimera eftersom nedböjning är avgörande och bygghöjden är begränsad.

Genom fast inspänning kan nedböjning begränsas och ett mindre tvärsnitt kan väljas. En I-profil blir bästa valet. För att kunna ta upp momentet i ramens plan måste pelarnas böjmotstånd ökas. De kvadratiska konstruktionsrören byts därför ut mot I-profiler.



Figur 4.3 Principlösning med fast inspänd takbalk.

Om man bortser från instabilitet kan pelarna göras av IPE270 och balken av IPE300.

Pelarna måste stegas i sidled för att undvika böjknäckning i vek led. Det antas att väggkonstruktionen kan uppfylla denna funktion utan större ändringar.

Ramens innerhörn är tryckt och bör stegas noggrant för att undvika böjvridknäckning av balk och pelare. Detta kräver förstärkta infästningar och ett antal avstyvningsplåtar samt stag (vinkelstång eller mindre konstruktionsrör). Dessa uppskattas till totalt 200 kg per ram och en genomsnittlig klimatfaktor på 1,85 kg CO<sub>2</sub>-eq/kg används i fortsättningen.

Materialåtgång och klimatpåverkan sammanfattas i tabellen nedan. Den totala vikten är marginellt mindre vid fast inspänning men klimatpåverkan är ca 20% mindre tack vare den mindre påverkan från I-profiler som tillverkas från skrot medan konstruktionsrör tillverkas från primärt stål.

Tabell 4-1 Jämförelse av lösningarna med fritt upplagd respektive fast inspänd takbalk

Komponenter	Vald profil	Vikt [kg]	Klimatpåverkan [kg CO <sub>2</sub> -eq]
<b>Fritt upplagd balk</b>			
Pelare 2	VKR 140x5	303	789
Pelare 3	VKR 120x4,5		
Balk	HEA320	976	1 074
<b>Totalt</b>		<b>1 279</b>	<b>1 863</b>
<b>Fast inspänd balk</b>			
Pelare 2	IPE270	314	345
Pelare 3		271	298
Balk	IPE300	422	464
Extra material	<i>uppskattning</i>	200	370
<b>Totalt</b>		<b>1 207</b> <b>(-6%)</b>	<b>1 478</b> <b>(-21%)</b>

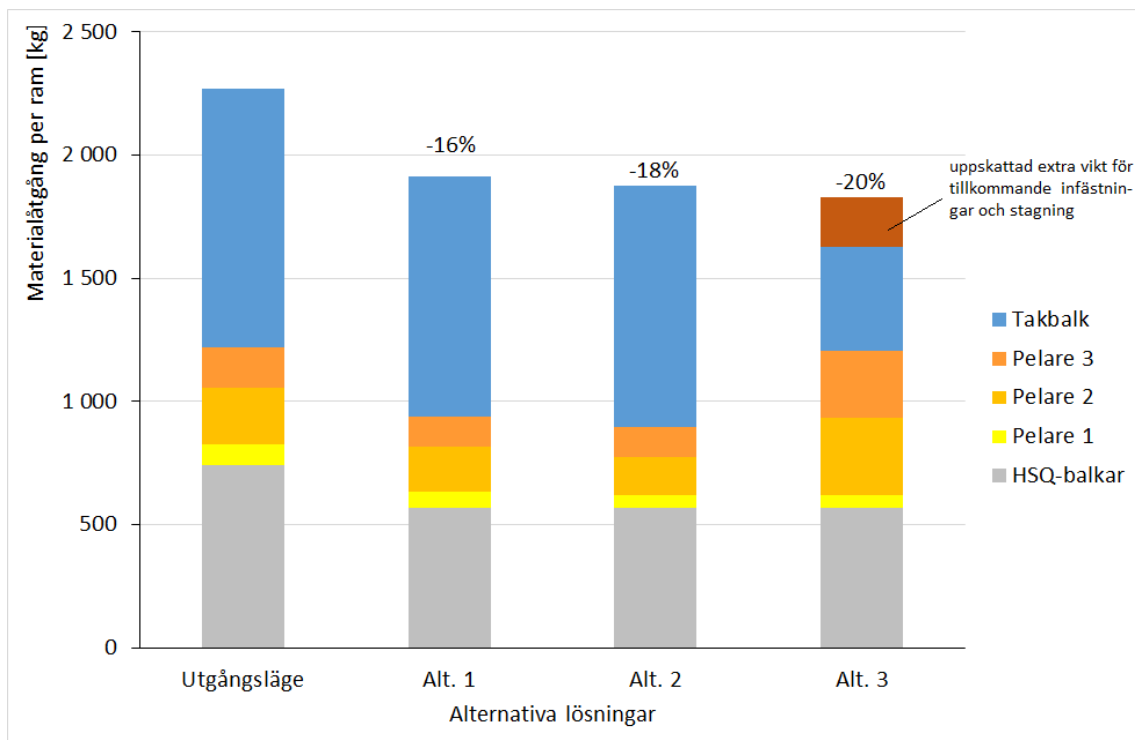
### 4.3 Analys

Samtliga delar i konstruktionen är relativt lågt utnyttjade vilket gör det enkelt att spara material och minska klimatpåverkan genom val av mindre tvärsnitt (Alt.1). Pelarna kunde optimeras ännu mer med hjälp av stål med högre hållfasthet (Alt.2).

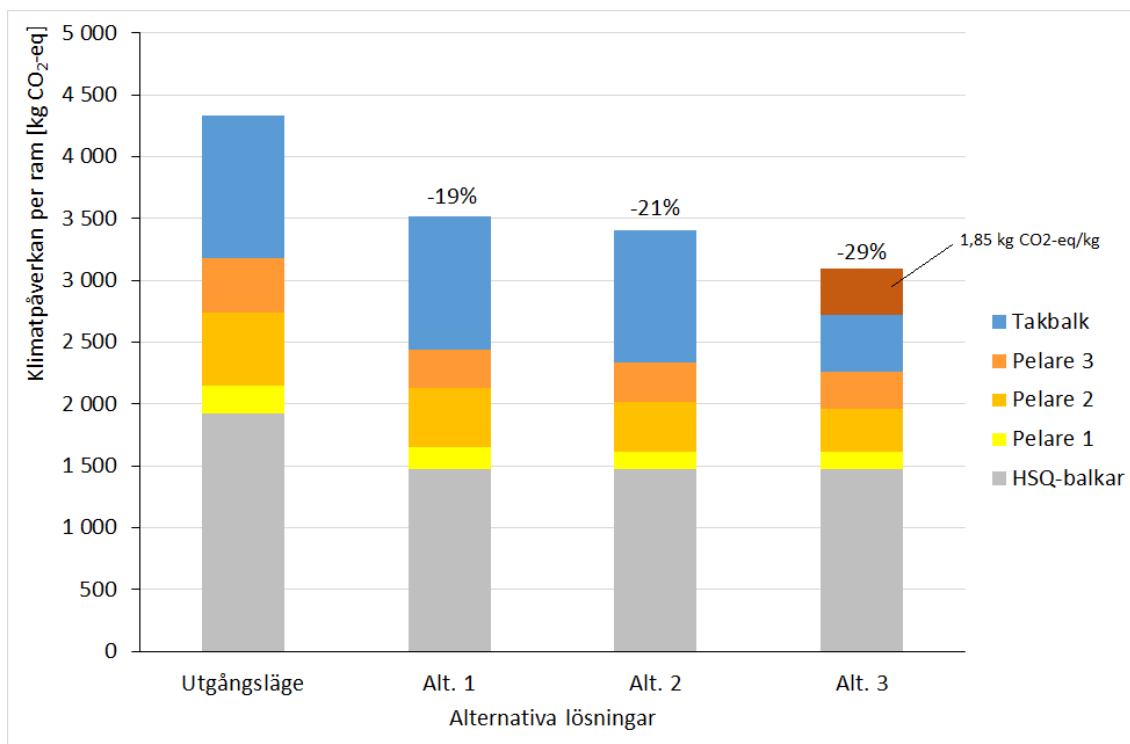
För pelare 1 minskade klimatpåverkan med 20% tack vare ett mindre tvärsnitt och uppgradering till S460 möjliggjorde en ytterligare besparing med 16%.

Pelarna utgör dock endast en liten del av konstruktionens påverkan och största minskning för hela konstruktionen fås tack vare optimering av tvärsnitten (Alt.1).

Genom att spänna fast takbalken i pelare 2 och 3 och använda I-profiler (Alt.3) kunde den totala påverkan minska med 28%.



Figur 4.4 Jämförelse av materialåtgång för alternativa lösningar.



Figur 4.5 Jämförelse av klimatpåverkan för alternativa lösningar.

Exemplet tyder på att många komponenter är lågt utnyttjade vilket även rapporterats i andra studier (t ex Moynihan MC, Allwood JM. 2014. Utilization of structural steel in buildings. *Proc. R. Soc. A* **470**: 20140170).

Detta gör det möjligt att optimera konstruktioner med enkla medel. Störst effekt fås genom att välja rätt tvärsnitt. Därefter kan pelare göras i höghållfast stål och slutligen kan andra statiska system undersökas.

En vanlig förklaring till det låga materialutnyttjandet är att materialkostnader är låga i förhållande till arbetskostnaderna. Överdimensionering motiveras ekonomiskt genom förenklingar och rationaliseringar som sparar arbetstid.

En delad åsikt i projektets referensgrupp var att projekteringskostnader och materialkostnader ofta betraktas var för sig istället för att vägas emot varandra. Det är fullt möjligt att lönsamma optimeringsåtgärder missas eftersom projekteringskostnader pressas utan hänsyn till ett projekts totala lönsamhet.

## 5. Konstruktiva val

### 5.1 Allmänt

Som konstruktör påverkar man en konstruktions klimatpåverkan genom ett antal val på olika nivåer:

1. Konceptuell utformning, där man bestämmer hur lasterna hanteras på ett principiellt sätt genom val av statiskt system;
2. Val av profiltyper, där olika tvärsnittsformer är anpassade till vissa funktioner, och;
3. Dimensionering, där en optimal kombination av tvärsnitt och material väljs.

Primärt och sekundärt material har olika klimatpåverkan per viktenhet, och detta bör självklart beaktas om syftet är att begränsa påverkan av en specifik konstruktion. I vissa fall kan en tyngre konstruktion ha en mindre klimatpåverkan.

Normalt är dock materialåtgången (vikten) en god indikation på klimatpåverkan.

Det kan också noteras att efterfrågan på stål i världen inte täcks av tillgången på sekundärt material enbart. I ett globalt perspektiv kan det därför vara på sin plats att också beakta resursanvändningsaspekten och försöka minska materialåtgången.

### 5.2 Konceptuell utformning

Konceptuell utformning handlar om att hitta en effektiv principiell lösning att hantera laster som underlättar andra val.

Det är ett komplext ämne och för att lyckas krävs iterationer och/eller erfarenhet. Antagligen ligger praktiska omständigheter till grund för många av de val som görs på denna nivå.

Begränsningar kan också vara många, t ex spännvidder, delning, bygghöjd, deformationskrav, egenfrekvenser, mm.

Många erfarna konstruktörer har med tiden utvecklat egna tumregler som minskar behovet av iterationer, t ex att det för fritt upplagda balkar kan vara bra att börja med att kontrollera vilket tvärsnitt som behövs för att klara nedböjningskraven, och sedan kontrollera bärförmågan i brottgränstillstånd.

Aspekter som tas upp i denna rapport är:

- hur påverkar olika inspänningsförhållanden dimensionering av balkar?
- kan olika delningar ha en effekt på materialåtgången och klimatpåverkan?
- Dimensionerar man för rätt laster?

#### 5.2.1 Inspänningsförhållanden

Svenska konstruktörer verkar som standard utforma balkinfästningar som ledade knutpunkter. Fördelarna är många:

- inget moment introduceras i pelarna;
- momentfördelningen i balken är enkel;
- den genomgående trycka överflänsen stagas normalt av ett bjälklag eller en takkonstruktion, och;
- infästningarna är enkla att dimensionera och producera.

Om balkens dimensioner avgörs av kravet på styvhet har man dock få möjligheter att optimera materialåtgången, särskilt om det finns begränsningar gällande bygghöjd. I så fall kan det vara ett alternativ att utnyttja inspänningar för att minska balkens nedböjning och moment.

I gränsfallet med oändlig styv anslutning minskar nedböjningen med en faktor 5 och momentet vid stöd är 50% mindre än fältmomentet i en fritt upplagd balk vid jämnt utbredd last.

Vid enkelsymmetriska infästningar eller där belastningar är olika på pelarens respektive sidor begränsas den gynnsamma effekten av deformationer i pelaren.

För en enkel ram där pelaren har minst samma tröghetsmoment som balken och en höjd upp till halva balkens spännvidd kan man ändå räkna med att nedböjningen minskar med en faktor 2,5 och momentet med 50%.

Exemplet från fallstudien i kapitel 4 visar att materialåtgången kan minskas lite om balkinfästningar görs momentstyva. Klimatpåverkan minskas ännu mer av att I-profiler i sekundärt material blir mest effektiva för att ta upp inspänningsmomenten.

Konstruktionen blir dock mycket mer komplicerad pga mer avancerade knutpunkter och behov av stagning för att stävja eventuella problem med instabilitet och kunna utnyttja slanka profiler optimalt.

### 5.2.2 Delning

För ett givet utrymme minskar antalet komponenter med ökande influensytor samtidigt som enstaka komponenters vikt ökar för att kunna hantera större laster. Vad den övergripande effekten blir på materialåtgången och klimatpåverkan är svårt att förutse.

Här använder vi en enkel hall 40x10 m som exempel.

Byggnaden delas i 5 till 10 fack, dvs delningen varierar mellan 4 och 8 m.

Dessutom beaktas tre pelarhöjder: 4, 6 och 8 m.

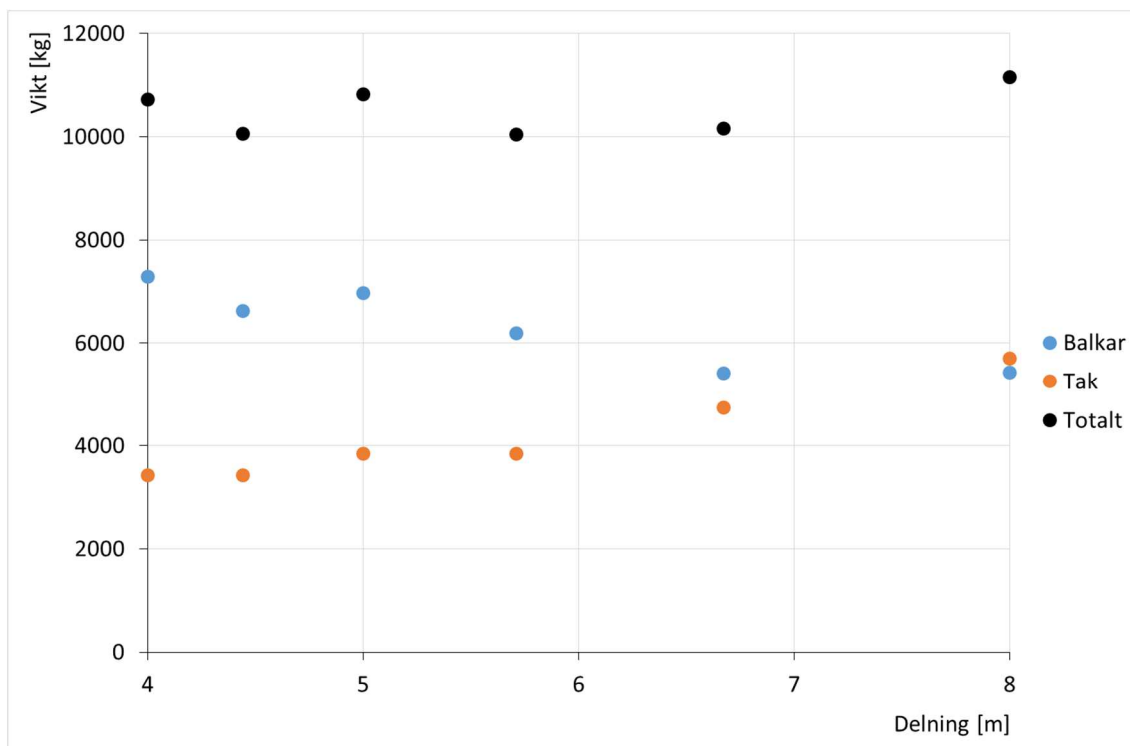
Pelarna görs av konstruktionsrör och takbalken görs av en I-profil fritt upplagd på pelarna. Ett plåttak läggs direkt på balkarna.

Vi antar snözon 2,0 och takets egenvikt tas som 1,3 kN/m<sup>2</sup>.

Takkonstruktionens egenskaper och vikt jämförs i tabell 5-1 och figur 5.1. Med ökande delning krävs större profiler men balkarnas totala vikt minskar. På grund av den större spännvidden krävs däremot tjockare takplåt och viktökningen motsvarar balkarnas viktminskning så att den totala vikten är i stort sett konstant.

Tabell 5-1 Takkonstruktionens egenskaper för olika delningar

Antal fack	Delning	Balkar		Takprofil		Total vikt [kg]
		profil	vikt [kg]	profil	vikt [kg]	
10	4,0	IPE400	7293	LHP130, t = 0,65	3429	10722
9	4,4	IPE400	6630	LHP130, t = 0,65	3429	10059
8	5,0	IPE450	6975	LHP130, t = 0,73	3852	10827
7	5,7	IPE450	6200	LHP130, t = 0,73	3852	10052
6	6,7	IPE450	5425	LHP130, t = 0,90	4741	10166
5	8,0	IPE500	5442	LHP130, t = 1,08	5714	11156

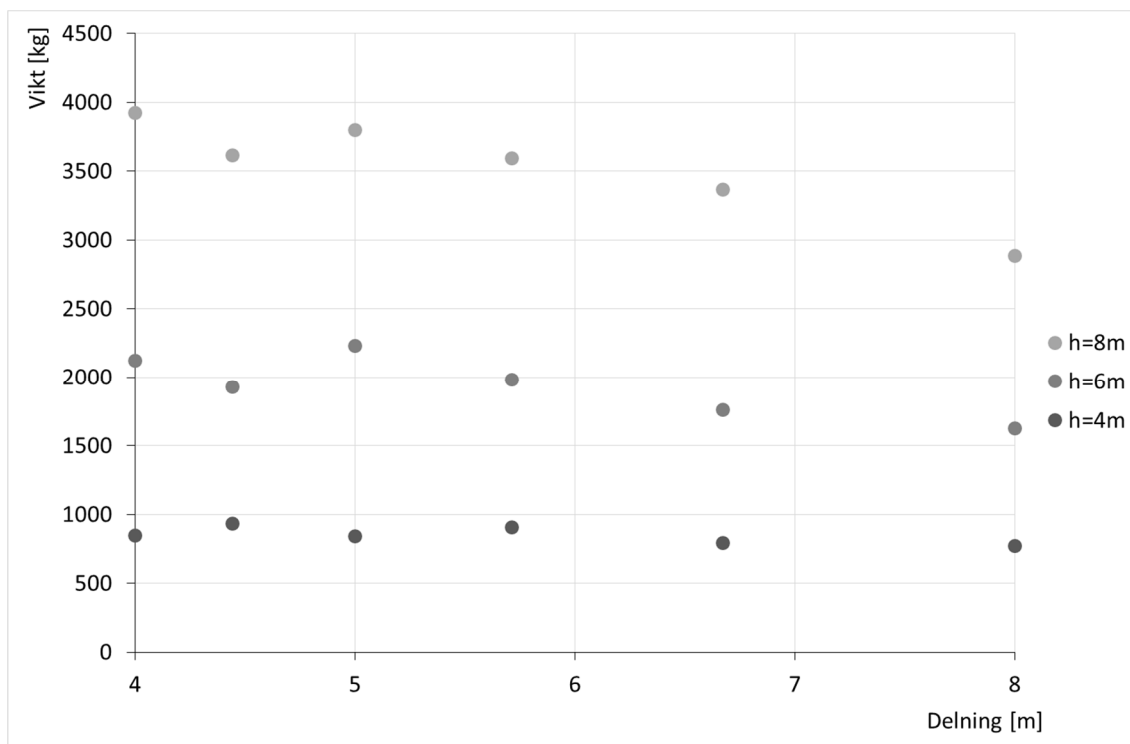


Figur 5.1 Takkonstruktionens vikt för olika delningar.

Pelarnas egenskaper och vikt jämförs i tabell 5-2 och figur 5.2. Med ökande delning krävs grövre pelare men den totala vikten tenderar att minska. Skillnaden är större för högre pelare.

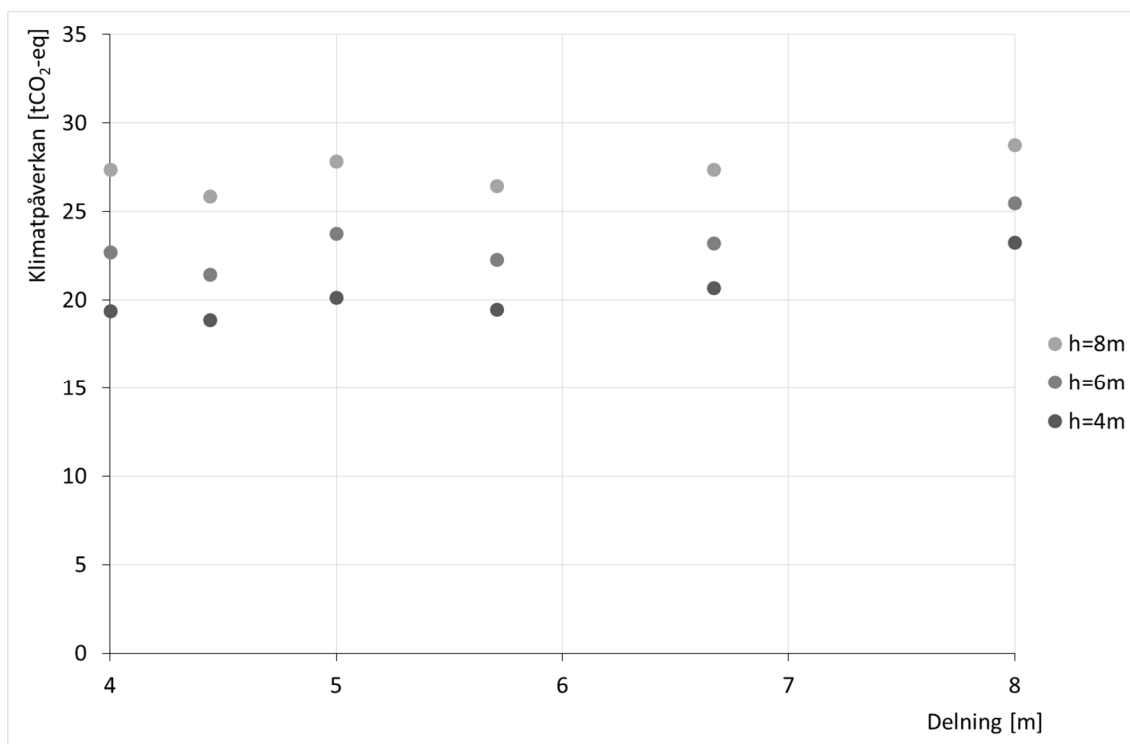
Tabell 5-2 Pelarnas egenskaper för olika delningar

Antal fack	Delning	h = 4 m		h = 6 m		h = 8 m	
		profil	vikt [kg]	profil	vikt [kg]	profil	vikt [kg]
10	4,0	VKR 90x3,6	850	VKR 120x4,5	2125	KKR 150x5	3925
9	4,4	KKR 100x4	936	VKR 120x4,5	1932	KKR 150x5	3616
8	5,0	KKR 100x4	842	KKR 120x6	2236	KKR 150x6	3802
7	5,7	KKR 120x4	909	KKR 140x5	1987	VKR 150x6,3	3597
6	6,7	KKR 120x4	795	VKR 140x5	1764	VKR 160x6,3	3371
5	8,0	VKR 120x4,5	773	VKR 150x5	1627	KKR 200x5	2890



Figur 5.2 Pelarnas vikt för olika delningar.

I figur 5.3 har klimatpåverkan från takkonstruktion och pelare summerats. Skillnaderna är små och verkar slumpmässiga pga stegvis variation av egenskaperna hos standardiserade produkter.



Figur 5.3 Total klimatpåverkan för olika delningar.

Exemplet ovan tyder på att klimatpåverkan kan variera beroende på stomdelningen. Fördelarna är dock små och svåra att förutse.



Denna strategi bedöms som svår att tillämpa i praktiken där stålstommens delning påverkar många aspekter av byggnadens design och begränsningar ofta förekommer. Möjligen kan optimering av stomdelningen vara intressant för serietillverkade byggnader men i övrigt är andra optimeringsstrategier att föredra.

### 5.2.3 Lastförutsättningar

Rätt antaganden gällande lasterna är grundläggande för att uppnå en optimal lösning.

För vanliga byggnader är nyttiga laster samt snö- och vindlaster väl definierade i Eurokoden.

Det kan påpekas att vindlaster modifieras i den Svenska nationella bilagan, EKS11. Vindtrycket får antas variera med höjd även vid relativt låga byggnader. Detta minskar belastningen jämfört med Eurokodens rekommendation där ett jämt tryck tillämpas.

Antaganden om egenvikter bör kontrolleras noga och inte överdrivas.

För ovanligare konstruktioner mot industrin där etablerade lastbilder saknas är det viktigt att inte överdriva belastningar och förstå konsekvenser av de lastantaganden som görs.

## 5.3 Val av profil

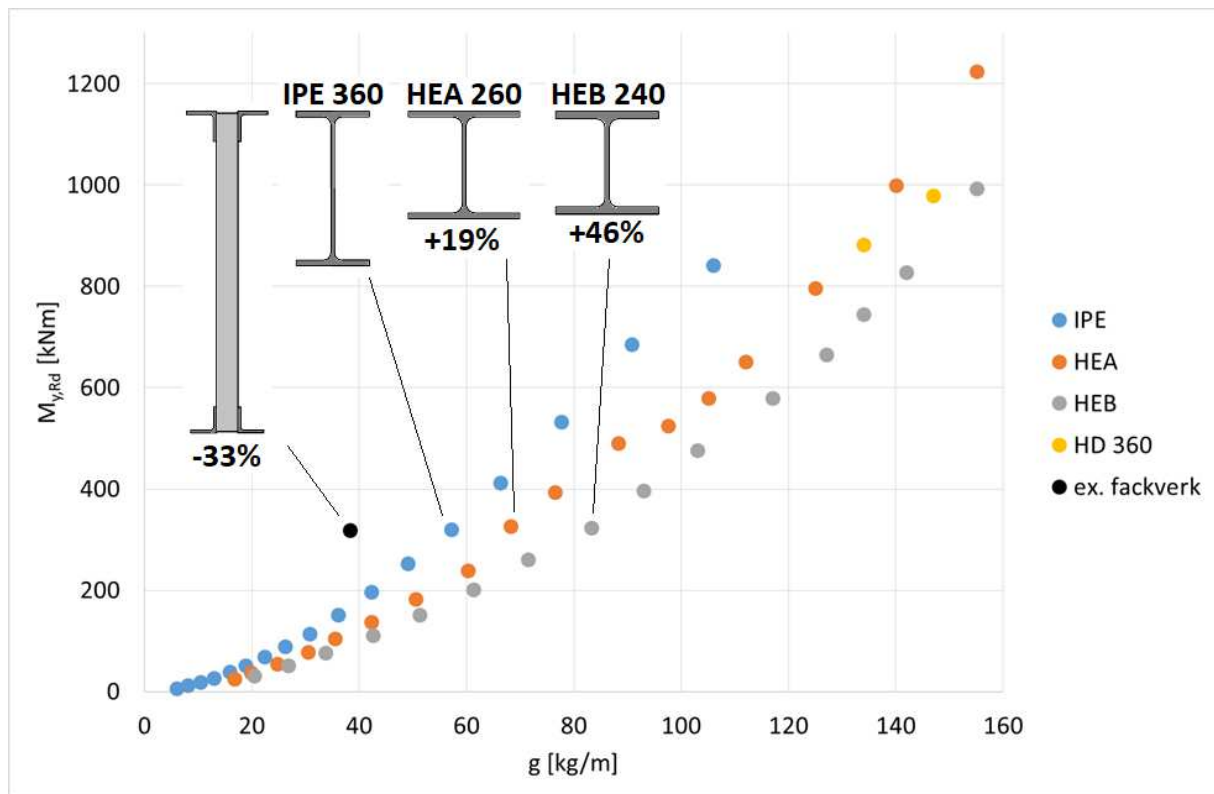
När det statiska systemet har bestämts ska profiler väljas. Olika tvärsnittsformer har utvecklats med egenskaper anpassade till olika syften. För att kunna optimera en konstruktion är det viktigt att välja rätt profiltyp. I detta kapitel presenteras de vanligaste profilerna och deras för- och nackdelar analyseras.

### 5.3.1 Balkar

Figur 5.4 visar att I-profiler (IPE) är mer effektiva än H-profiler (HEA och HEB) när det gäller bärförmåga för moment, förutsatt att vippning inte inträffar (stagnation). Nackdelen är dock den större profilhöjden som många gånger kan vara begränsande.

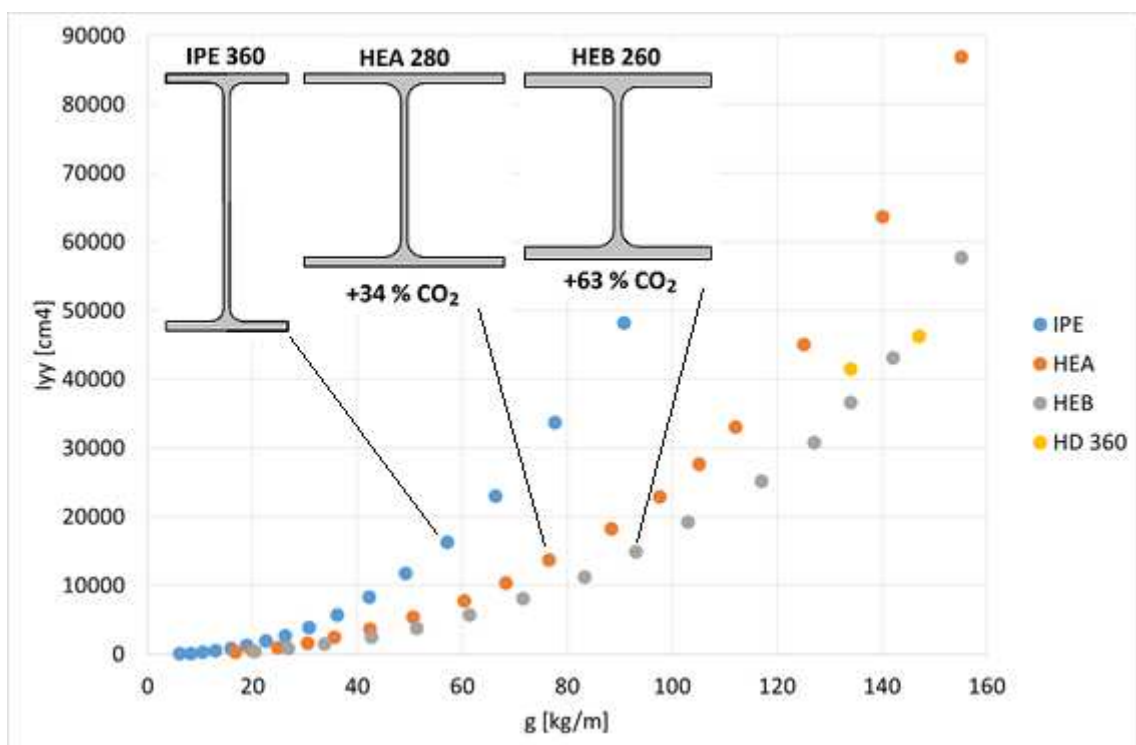
För fritt upplagda balkar med spännvidd större än ca 7 m där höjden inte är begränsande är fackverksbalkar ännu bättre än I-profiler.

IPEA eller -AA är ännu mer effektiva än de mer vanliga IPE. Samma sak gäller även HEAA jämfört med HEA. Skillnaden är dock inte lika stor som mellan I- och H-profiler, i storleksordning 5-10 %.



Figur 5.4 Bärformåga för moment hos de vanligaste H- och I- profilerna i S355 som funktion av vikten.

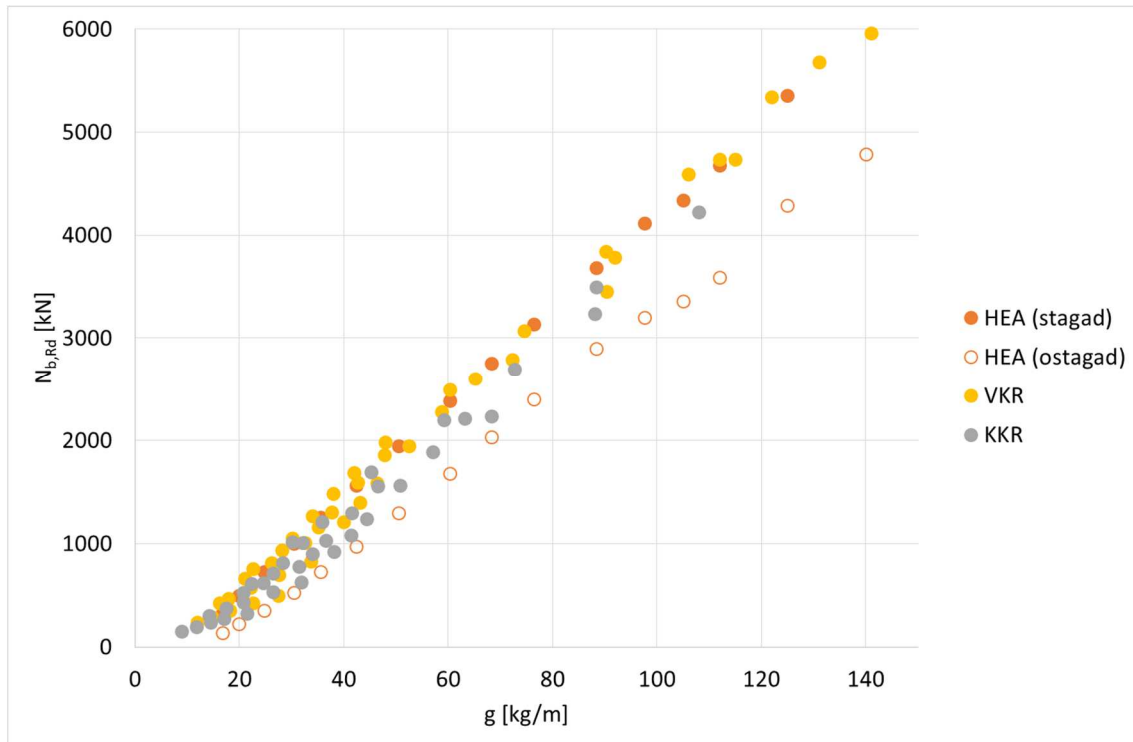
Skillnaden är ännu större gällande böjstyvheten vilken är avgörande när nedböjning styr dimensioneringen.



Figur 5.5 Böjstyvhet i styv riktning hos de vanligaste H- och I- profilerna som funktion av vikten.

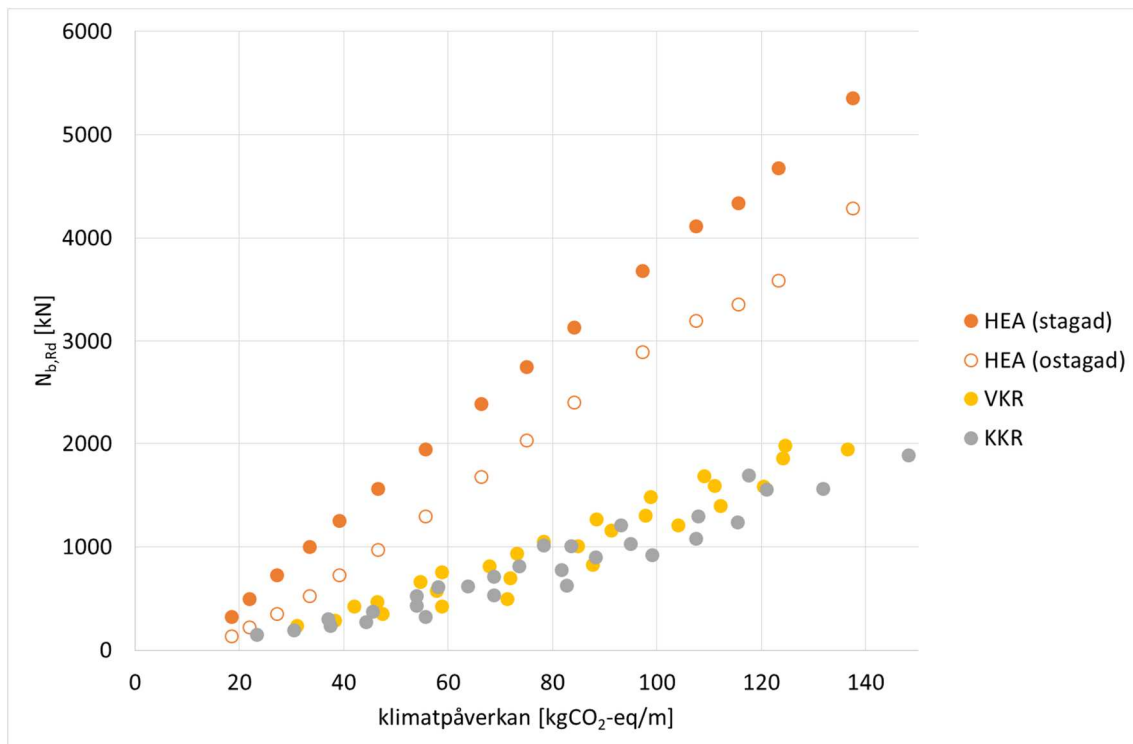
### 5.3.2 Pelare

Ofta används kvadratiske konstruktionsrör till pelare, fördelen är att deras bärförmåga för knäckning är den samma i båda riktningar. Om stagnering kan ordnas och böjknäckning i vek riktning samt böjvidknäckning försummas är H- och I profiler också effektiva mht materialåtgång.



Figur 5.6 Bärförmåga för rent tryck (böjknäckning) vid en knäcklängd på 4 m (S355) som funktion av vikten.

Klimatpåverkan per vikt är dock mycket mindre för valsade profiler som är tillverkade av skrot. Därför blir H- och I- profiler överlägsna mht till klimatpåverkan enbart.





Figur 5.7 Bärförmåga för rent tryck (böjknäckning) vid en knäcklängd på 4 m (S355) som funktion av klimatpåverkan.

Ett KKR är normalt billigare än motsvarande VKR. Men VKR är något mer effektiva än KKR. Skillnaden beror på annorlunda geometrier (större hörnradie hos KKR) och framförallt större egenspanningar hos KKR som reducerar kapaciteten. Detta beaktas i Eurokod genom användning av sämre knäckkurvor (c) för KKR. SSAB rekommenderar att använda en bättre knäckningkurva (b) för sina DOMEX® *Double Grade* rör vilket gör dem i princip likvärdiga VKR.

Bland alla dimensioner för KKR och VKR är vissa tvärsnitt mer effektiva än andra mht materialåtgång för en given bärförmåga för rent tryck. Med lika tvärsnittsarea är tvärsnittet med minst godstjocklek mer effektivt.

Vid dragbelastning är bärförmågan direkt proportionell mot tvärsnittsarean och profilens vikt. För en tryckt pelare däremot är bärförmågan för böjknäckning beroende av såväl tvärsnittsarea som böjstyvhet. I figur 5.6 och figur 5.7 syns att punkterna för KKR och VKR bildar ett moln många profiler har både en större vikt och en mindre bärförmåga. Dessa profiler kan direkt uteslutas om dimensioneringen görs mht till materialåtgång/klimatpåverkan enbart. Detta illustreras av exemplet i: KKR 120x120x6 och 140x140x5 har samma tvärsnittsarea men den breddare profilen har en större böjstyvhet och därmed även en större bärförmåga. Ett KKR 140x140x5 är därmed alltid ett minst lika bra val som ett KKR 120x120x6.

	
120x120x6	140x140x5
A = 26,4 cm <sup>2</sup>	= 26,4 cm <sup>2</sup>
g = 20,7 kg/m	= 20,7 kg/m
I = 562 cm <sup>4</sup>	< 791 cm <sup>4</sup>

Figur 5.8 Jämförelse av två KKR med samma tvärsnittsarea.

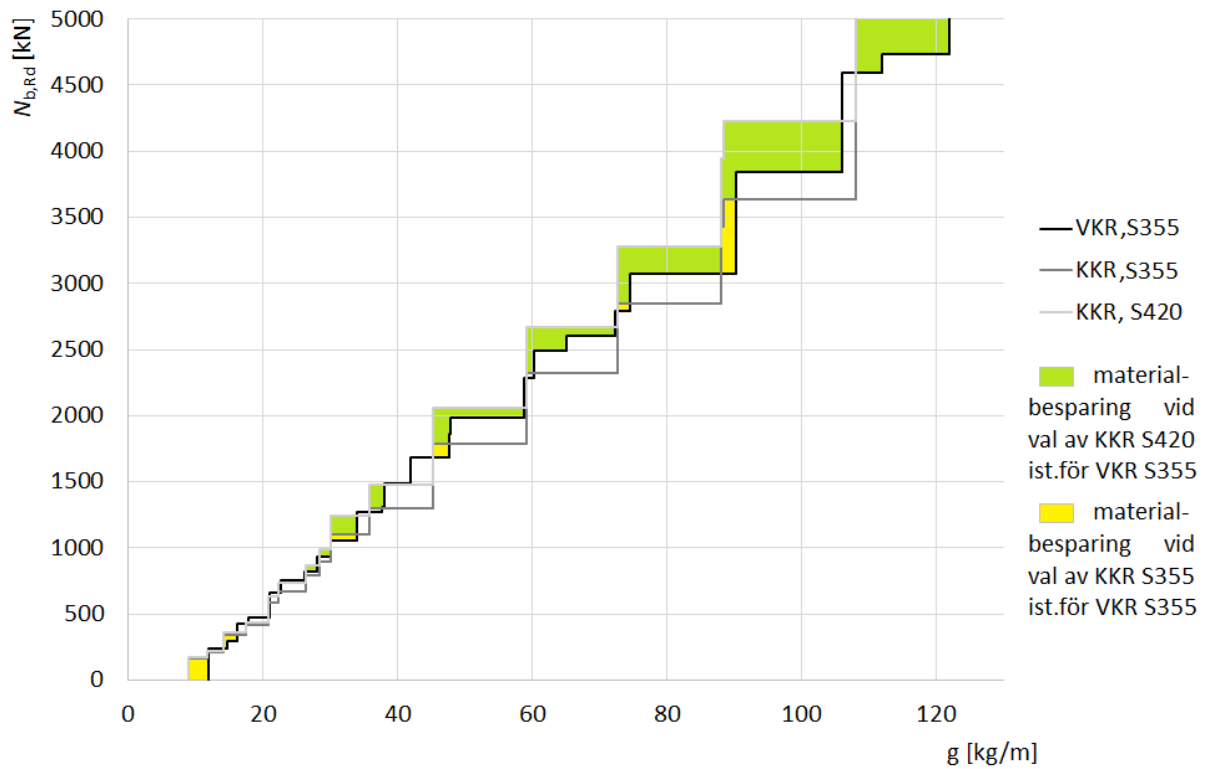
I tabellen nedan anges ett urval av tvärsnitt lämpliga för pelare med knäcklängd mellan 4 och 6 m. Andra tillgängliga tvärsnitt kan väljas av andra skäl men leder till en övervikt.

Tabell 5-3 Urval av VKR och KKR lämpliga till pelare med knäcklängd mellan 4 och 6 m (andra tvärsnitt innebär en övervikt), sorterade med ökande bärförmåga nedåt i respektive kolumn.

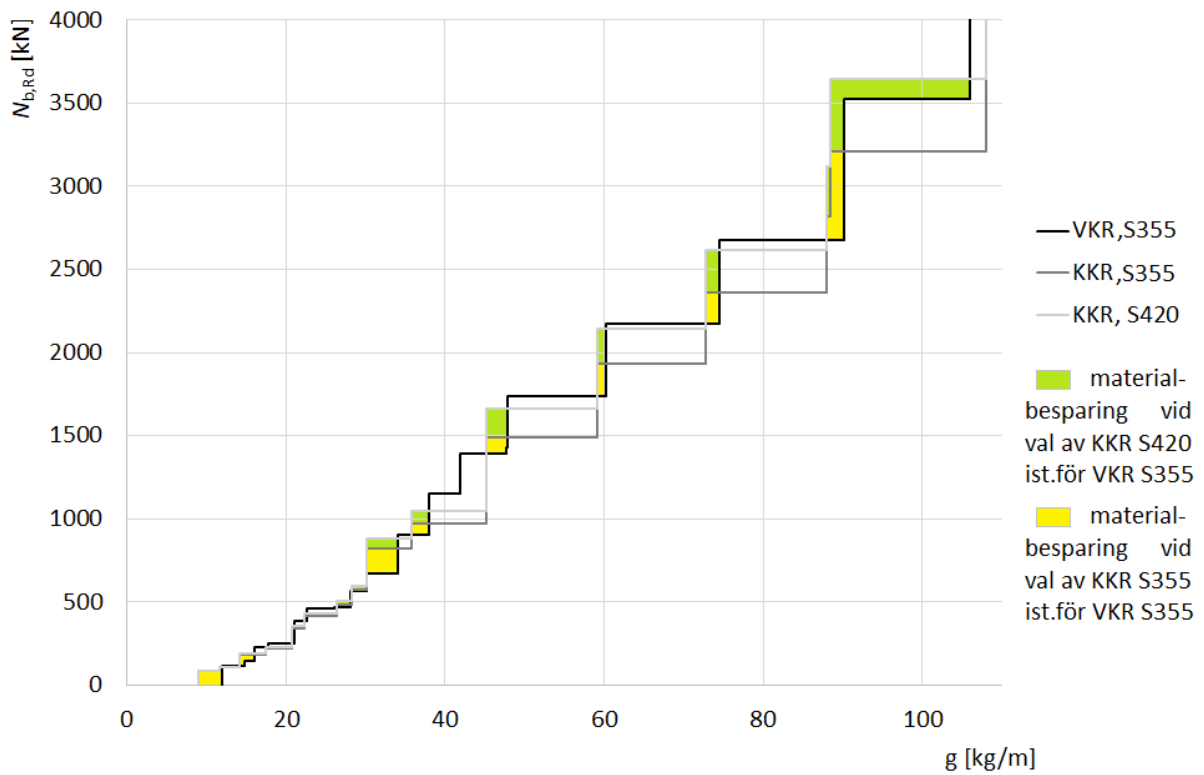
VKR		KKR	
100x100x4	200x200x8	100x100x3	180x180x8
100x100x5	250x250x6,3	100x100x4	250x250x6
120x120x4,5	200x200x10	120x120x4	200x200x10
120x120x5	250x250x8	120x120x5	250x250x8
120x120x6,3	220x220x10	140x140x5	220x220x10
140x140x5	200x200x12,5	150x150x5	200x200x12,5
150x150x5	250x250x10	140x140x6	250x250x10
140x140x6,3	300x300x10	150x150x6	250x250x12,5
150x150x6,3	350x350x10	160x160x6	300x300x10
160x160x6,3	300x300x12,5	200x200x5	300x300x12,5
180x180x6,3	400x400x10	200x200x6	
200x200x6,3	350x350x12,5		
220x220x6,3	300x300x16		

Diagrammen nedan visar bärförmågan för böjknäckning som en funktion av vikten för pelare med knäcklängd 4 m respektive 6 m hos de mest effektiva tvärsnitten för respektive profiltyp. För en given last ges viktskillnaden av det horisontella avståndet mellan två kurvor. Profilen med kurvan längst till vänster är den mest effektiva mht vikt.

Det syns tydligt att VKR generellt är mer effektiva. I få fall (gula områden) är ett KKR lite mer effektivt. Genom att utnyttja den högre hållfastheten (S420) hos s.k. double grade profiler, kan material sparas vid större belastningar (gröna områden). Besparingspotentialen är större för korta pelare.



Figur 5.9 Bärformåga för rent tryck (böjknäckning) vid en knäcklängd på 4 m som funktion av vikten.



Figur 5.10 Bärformåga för rent tryck (böjknäckning) vid en knäcklängd på 6 m som funktion av vikten.

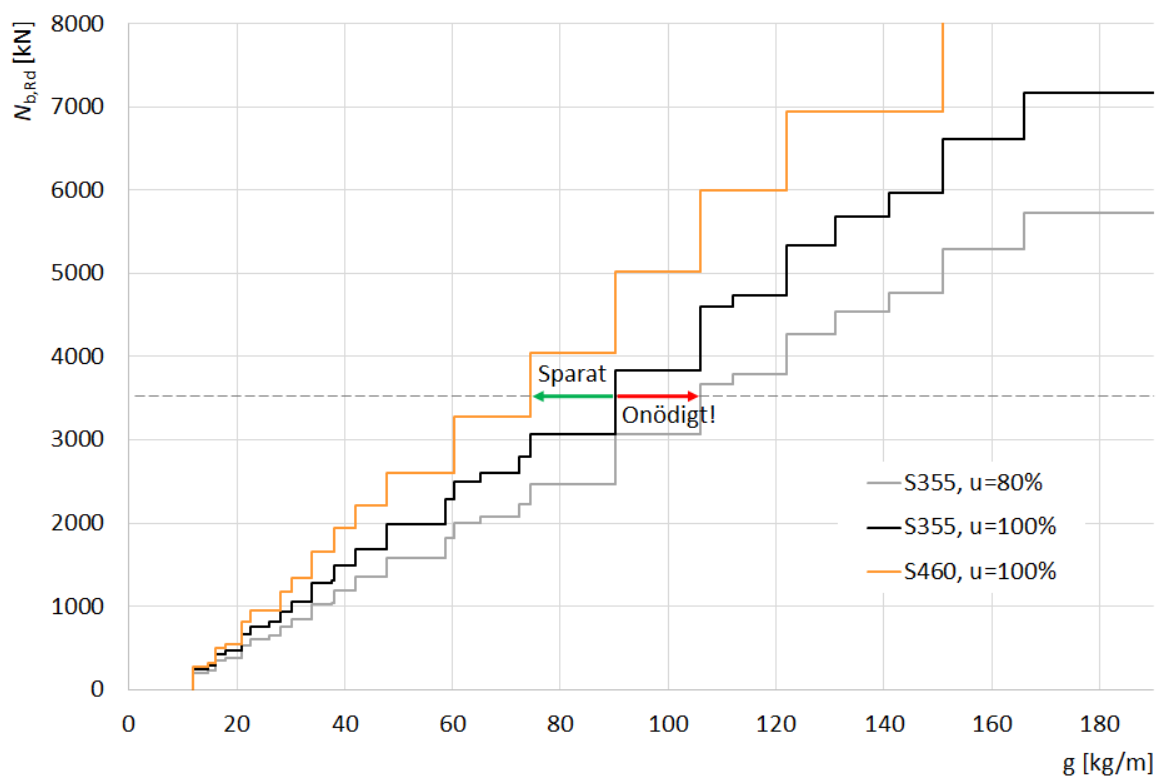
## 5.4 Dimensionering och materialutnyttjande

Under förutsättning att en effektiv utformning och profiltyp har valts är ett högt materialutnyttjande kritiskt för att minska materialåtgången och klimatpåverkan av en konstruktion.

Det finns begränsningar i hur stor utnyttjandegraden kan bli i praktiska fall eftersom standardiserade profiler har egenskaper som varierar stegvis. En låg utnyttjandegrad, typiskt mindre än 80%, är dock ett tecken på överdimensionering och bör undvikas.

Vid dimensionering enligt gällande regelverk är såväl laster som bärförmågor anpassade för att uppnå en tillräckligt hög säkerhetsnivå. En komponent med utnyttjandegrad på 100% uppfyller samhällets krav på säkerhet och borde vara målet.

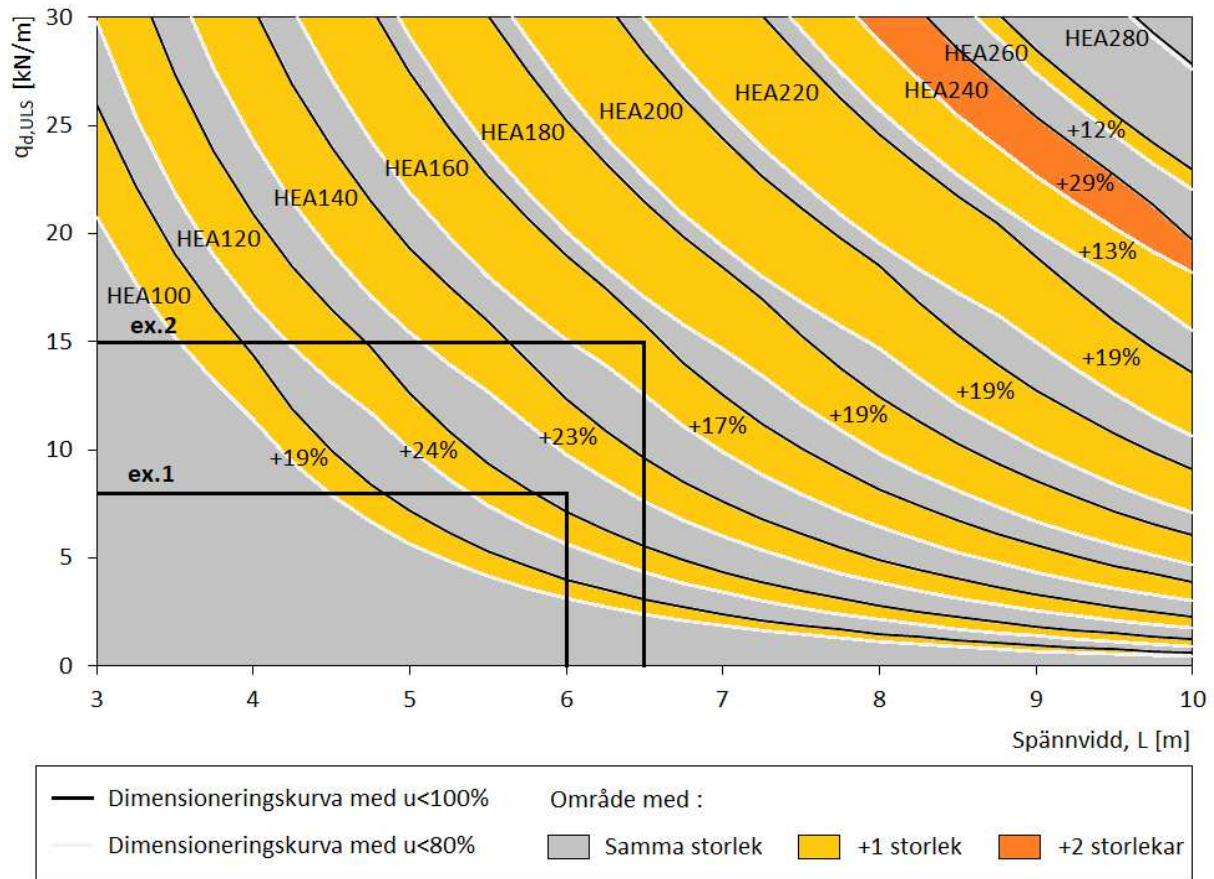
Figur 5.11 illustrerar effekten av ett lågt materialutnyttjande för en 4m hög tryckt pelare av VKR. Den svarta kurvan anger kapaciteten vid 100% utnyttjande som funktion av vikten. Den gråa kurvan visar den minskade kapaciteten för 80% utnyttjande. Vid en given dimensionerande normalkraft anges viktskillnaden av det horisontella avståndet mellan kurvorna. Överdimensioneringen ger en konsekvent extra vikt som kan jämföras med viktbesparingen som uppnås vid uppgradering från S355 till S460.



Figur 5.11 Bärkraft för rent tryck (böjknäckning) hos en 4m hög pelare av VKR som funktion av vikten.

För böjda balkar av en given sort, t ex HEA, kan det ibland vara svårt att uppnå en utnyttjandegrad över 80% eftersom relevanta egenskaper (styvhet och böjmotstånd) variation mellan närliggande storlekar kan vara stor. Figur 5.12 visar maximal dimensionerande last (ULS) för en tvåstödsbalk av HEA i S355. Förutom böjmotstånd inkluderas även en kontroll av nedböjningen varvid den dimensionerande lasten i brottgränstillstånd antas vara dubbel så stor som dimensionerande lasten i bruksgränstillstånd och nedböjningen begränsas till  $L/300$ . De svarta kurvorna avser balkar som utnyttjas upp till 100%. De ljusgråa kurvorna avser balkar som utnyttjas upp till 80%. För kombinationer av spännvidd och last i de gråa områdena är det inte möjligt att uppnå ett utnyttjande större än 80%. Balken kan anses vara

optimal ändå om inte en annan balktyp (t ex IPE) eller stålsort kan väljas. I de gula och orangea områdena däremot utgör en utnyttjandegrad under 80% en överdimensionering med övervikt mellan 12 och 29%.



**ex.1,**  $q_{d,ULS} = 8$  kN/m och  $L = 6$  m : HEA140 med  $u < 80\%$  (ändå ett optimalt val eftersom HEA120 inte räcker)

**ex.2,**  $q_{d,ULS} = 15$  kN/m och  $L = 6,5$  m : HEA160 ger  $u = 95\%$  och det krävs en storleksökning, dvs HEA180, för att få  $u = 71\% < 80\%$   
Från HEA160 till HEA180 ökar vikten med 17%

Figur 5.12 Maximal dimensionerande last för en tvåstödsbalk av HEA i S355 (jämt utbredd last,  $u_{max} = L/300, q_{d,ULS} = 2 \times q_{f,ekv,SLS}$ )



## 6. Höghållfast stål

### 6.1 Marknaden

I Sverige är den vanligaste stålsorten i stålkonstruktioner S355. Det finns dock andra alternativ med högre hållfasthet tillgängliga på marknaden. I tabell 6-1 anges vilka stålsorter som är tillgängliga för vanliga profiler samt exempel på europeiska tillverkare och produktnamn.

Tabell 6-1 Tillgängligt material på marknaden

Profiltyp	S355	S420	S460	S500	S550	>S550
H, I, U	✓		o <sup>1</sup>			
KKR	✓	✓ <sup>2</sup>	o <sup>3,4,5</sup>	o <sup>3,4</sup>	o <sup>3,4</sup>	o <sup>4</sup>
VKR	✓	o <sup>6,7</sup>	o <sup>6</sup>			

✓ : lagerhålls / o : beställs

<sup>1</sup> ArcelorMittal, Histar®

<sup>2</sup> SSAB, Domex® Double Grade (S355J2H/S420MH)

<sup>3</sup> SSAB, Domex® S460MH, S500MH, S550MH

<sup>4</sup> Tata Steel, Hybox® TT upp till S700 (MH och MLH) (även Hybox® S355J2H och S420MH/MLH)

<sup>5</sup> ArcelorMittal, S460MH (även S355J2H och S420MH)

<sup>6</sup> Tata Steel, Celsius® S420NH och S460NH

<sup>7</sup> ArcelorMittal, S420NH

Material med högre hållfasthet brukar vid samma vikt vara dyrare än den vanligaste S355. Den högre kostnaden kompenseras dock ofta av motsvarande viktbesparingar. Det kan också noteras att materialkostnader utgör endast en mindre del av den totala budgeten för ett byggprojekt. Något högre materialkostnader kan därför ändå vara ett kostnadseffektivt sätt att minska klimatpåverkan.

### 6.2 Praktiska överväganden

Ur ett hållbarhetsperspektiv kan det vara tilltalande att välja en högre hållfasthet än S355, men i vissa fall kan detta få konsekvenser för tillverkning och utförande som konstruktören kan behöva ta hänsyn till. I utförandestandarden SS-EN 1090-2 är vissa krav på utförande och kontroll kopplade till stålsorten, t ex krav kopplade till svetsning och regler för hårdstämpling och hårdhet hos fria kanters ytor. Eftersom S355 sedan många år är den dominerande stålsorten i bärande konstruktioner som tillverkas och uppförs i Sverige har de flesta stålbyggnadsentreprenörer anpassat sin verksamhet efter detta och det är inte ovanligt att deras certifikat mot SS-EN 1090-1 är begränsat till stålsorter upp till och med S355. Innan konstruktören väljer att föreskriva en högre hållfasthet än S355 bör denne därför kontrollera med stålbyggnadsentreprenören eller sin uppdragsgivare att detta val inte innebär några praktiska problem i den fortsatta byggprocessen.

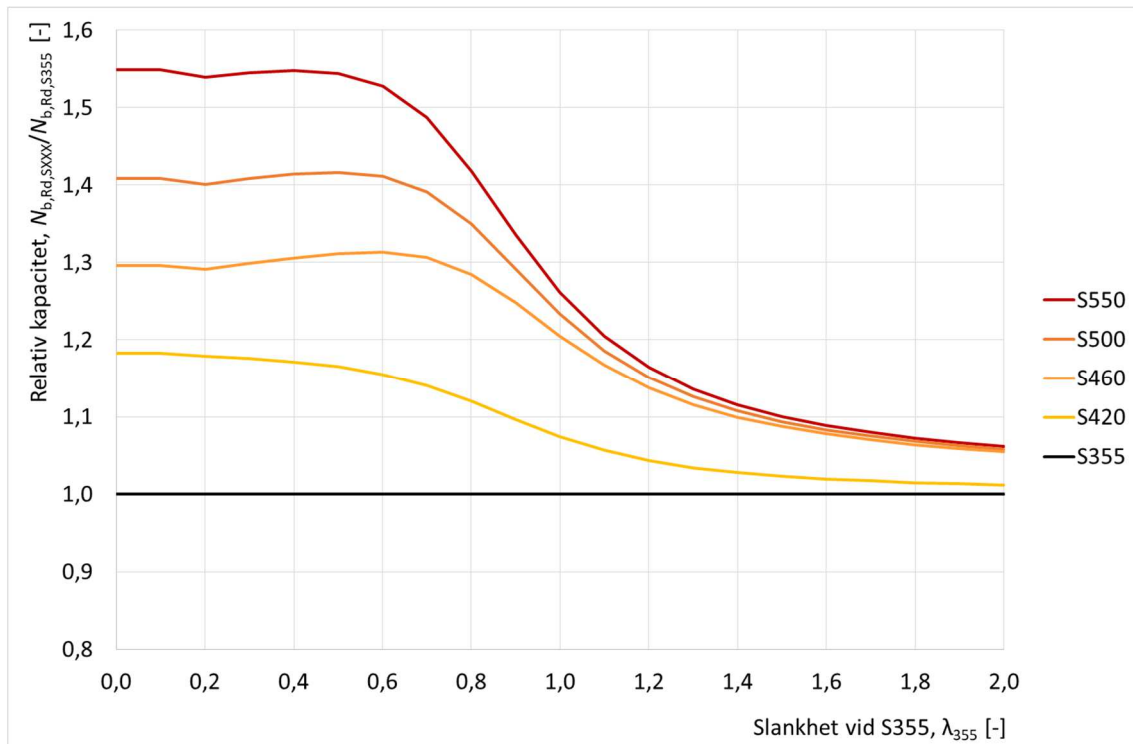
### 6.3 Potential för viktbesparing

För dragna och tryckta komponenter där stabilitet inte är avgörande innebär en ökning av hållfastheten att motsvarande mängd material kan sparas.

För böjda balkar är fördelarna inte lika självklara eftersom nedböjning, som kan vara avgörande i många fall, beror av styvheten enbart och inte påverkas positivt av ökad hållfasthet.

Vid tryckta pelare som kontrolleras för instabilitet samverkar styvhet och hållfasthet. En ökning av hållfastheten har en positiv effekt som dämpas, framförallt hos slanka pelare, av den konstanta styvheten.

Figur 6.1 visar effekterna på bärförmågan hos tryckta pelare av en hållfasthetsökning från S355. Värdena baseras på knäckningskurvor  $\alpha$  och  $\alpha 0$  enligt SS-EN 1993-1-1 för stål upp till S420 respektive från S460 och uppåt. Detta motsvarar I-profiler och VKR. Fallet  $\lambda=0$  gäller även för drag. För normala värden, runt  $\lambda=1$ , kan man räkna med en ökning av bärförmågan på ca 10% vid S420 och 20% vid S460. Ökningen vid S460 beror till stor del på den bättre knäckningskurvan jämfört med S355. Fördelen med höghållfast stål över S460 är mer begränsad.

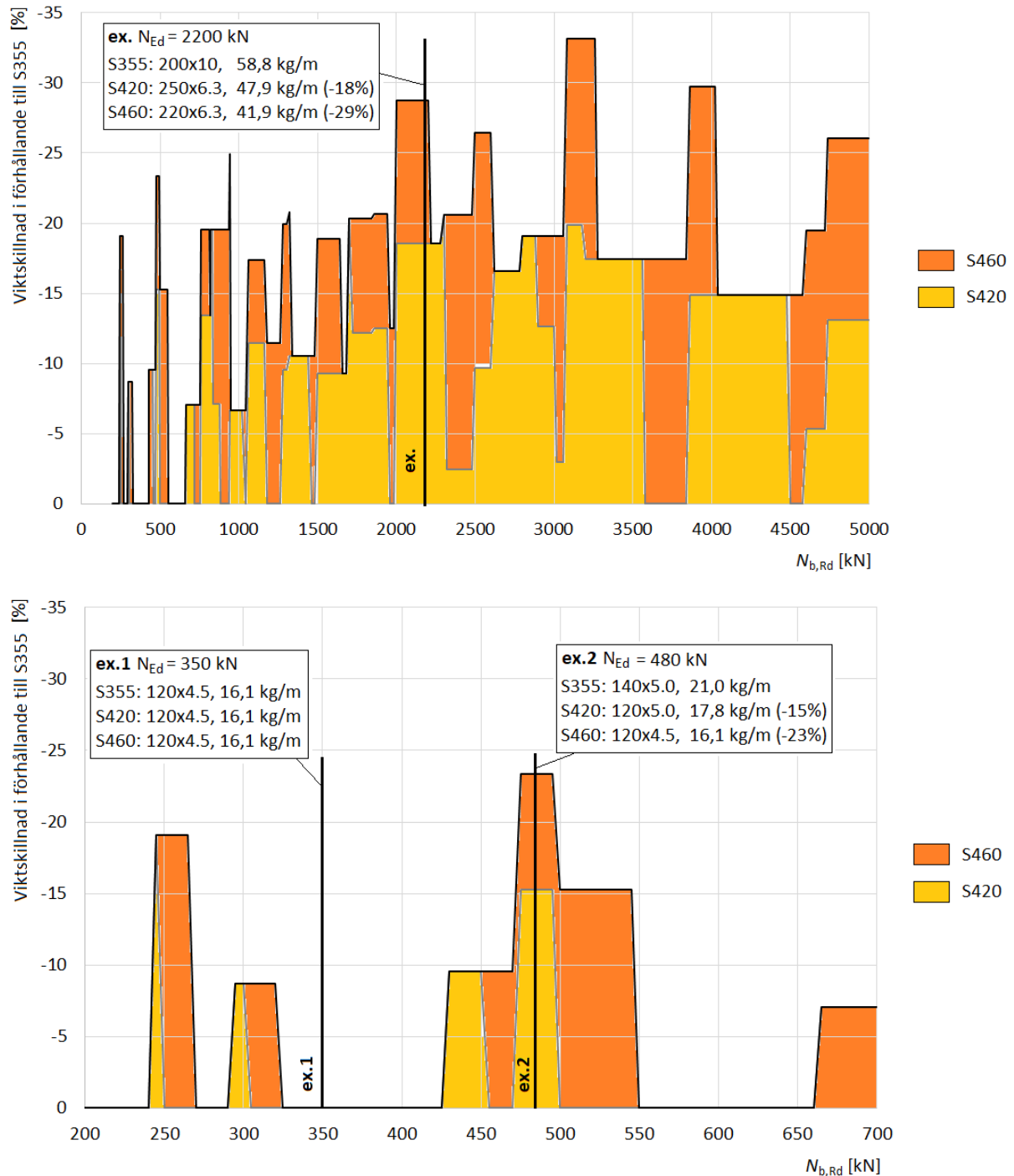


Figur 6.1 Relativ bärförmåga för böjknäckning hos tryckta pelare (valsade I-profiler och VKR) vid ökning av hållfastheten från S355.

### 6.3.1 Pelare av konstruktionsrör

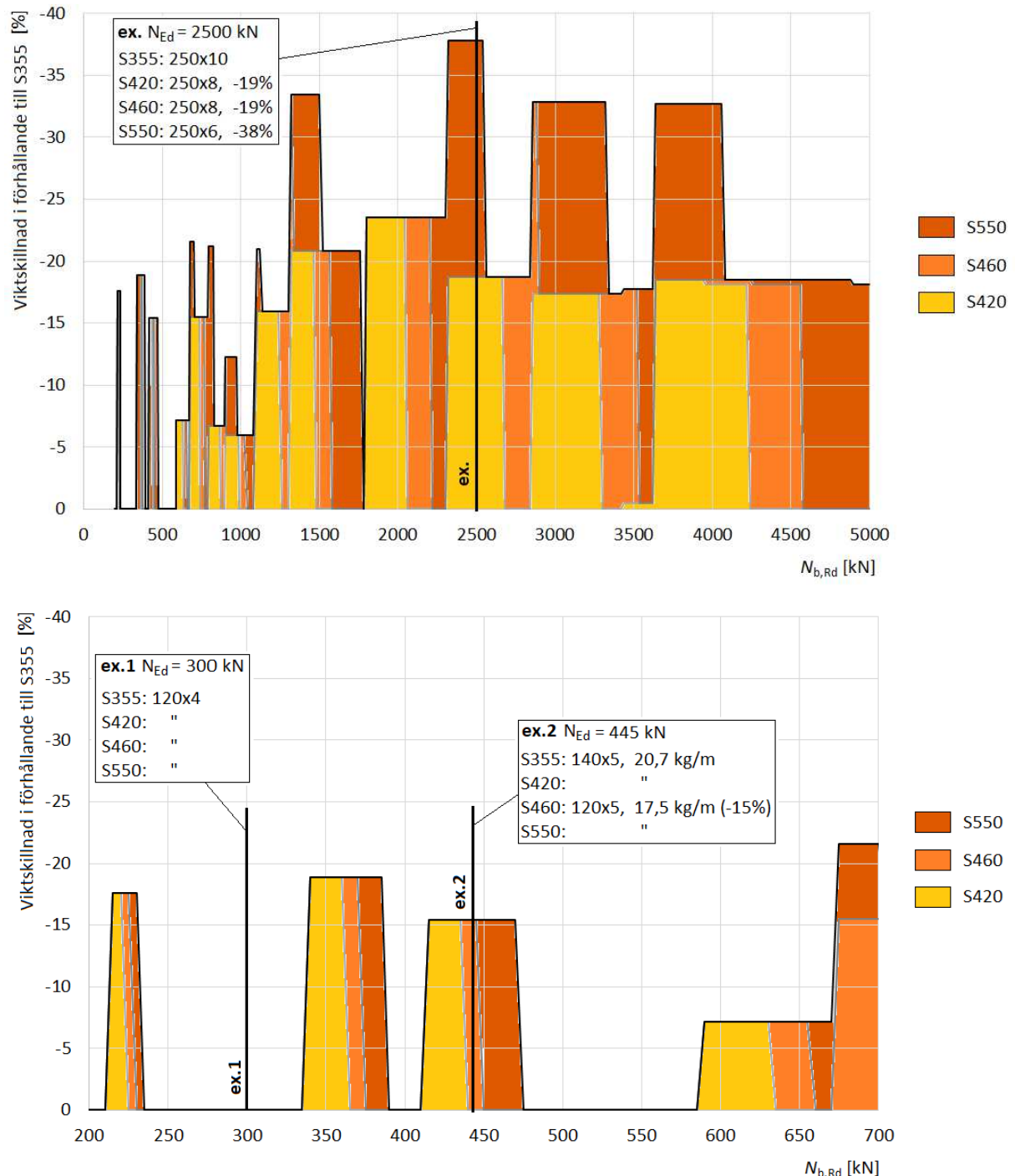
Pelare görs ofta våningshöga och av konstruktionsrör.

I figur 6.2 visas den potentiella viktskillnaden hos en 4m hög pelare av VKR när den vanliga stålsorten S355 ersätts av S420 och S460. Vid laster över 2000 kN kan man räkna med en materialbesparing på minst 15% vid val av S460. Vid mindre laster är det inte alltid möjligt att spara vikt genom ett annat materialval. Besparingsnivå som oftast baseras på val av nästa mindre profilstorlek skiljer sig inte nämnvärt mellan S420 och S460. Användningsområdet är dock större för S460 som också råkar vara en tillgänglig stålsort för VKR.



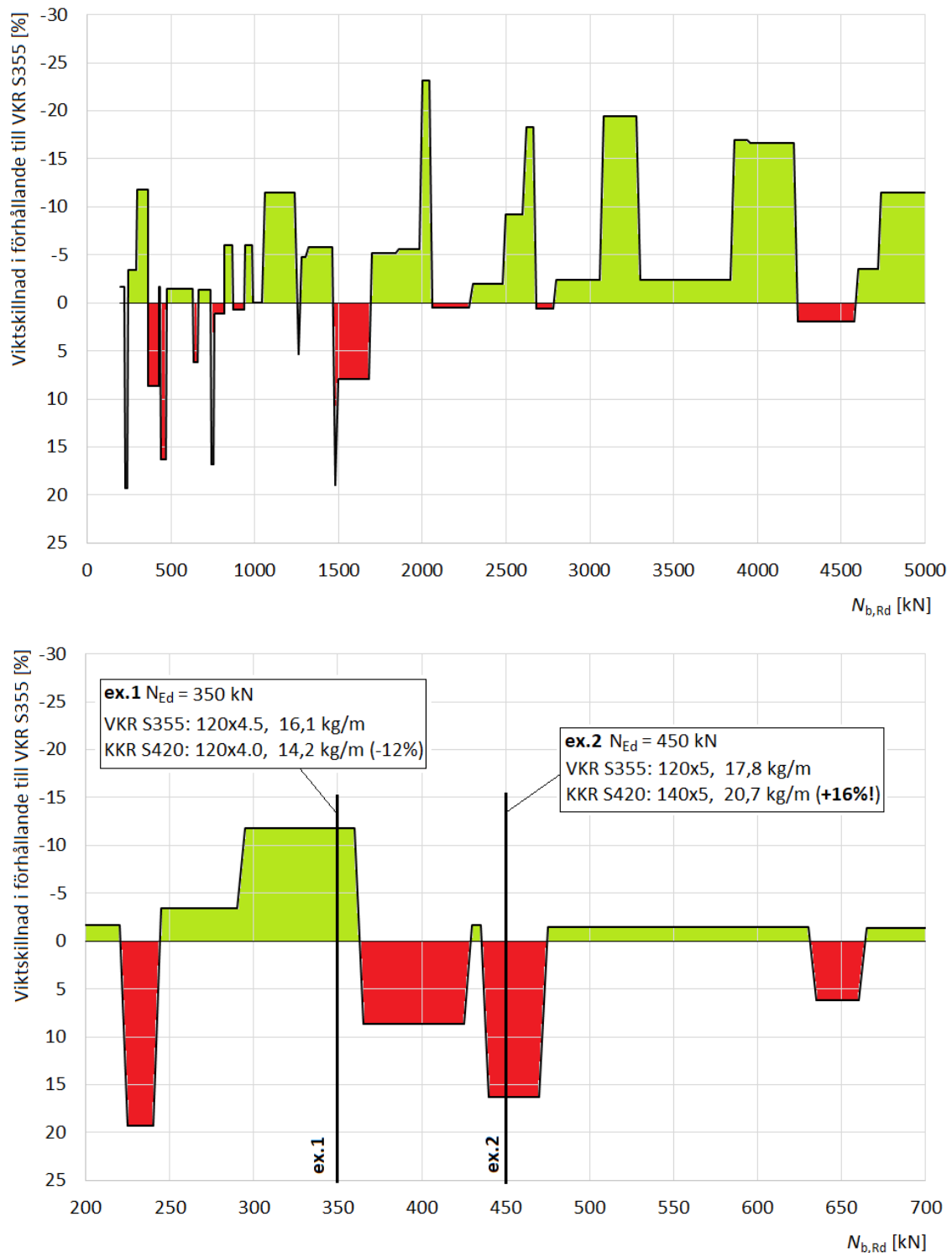
Figur 6.2 Potentiell viktskillnad för en 4m hög (knäcklängd) pelare av VKR vid val av högre hållfasthet än S355.

I figur 6.3 visas den potentiella viktskillnaden hos en 4m hög pelare av KKR när den vanliga stålsorten S355 ersätts av S420, S460 och S550. Vid höga laster runt och över 2000 kN kan man ofta räkna med en materialbesparing på ca 20 % vid val av S420. Ännu större besparingar över 30% kan åstadkommas vid val av S550. Vid mindre laster är det inte alltid möjligt att spara vikt genom ett annat materialval. Besparingen är mellan 15 och 20% och skiljer sig inte mellan stålsorterna. Användningsområdet ökar dock med ökande hållfasthet.



Figur 6.3 Potentiell viktskillnad för en 4m hög (knäcklängd) pelare av KKR vid val av högre hållfasthet än S355.

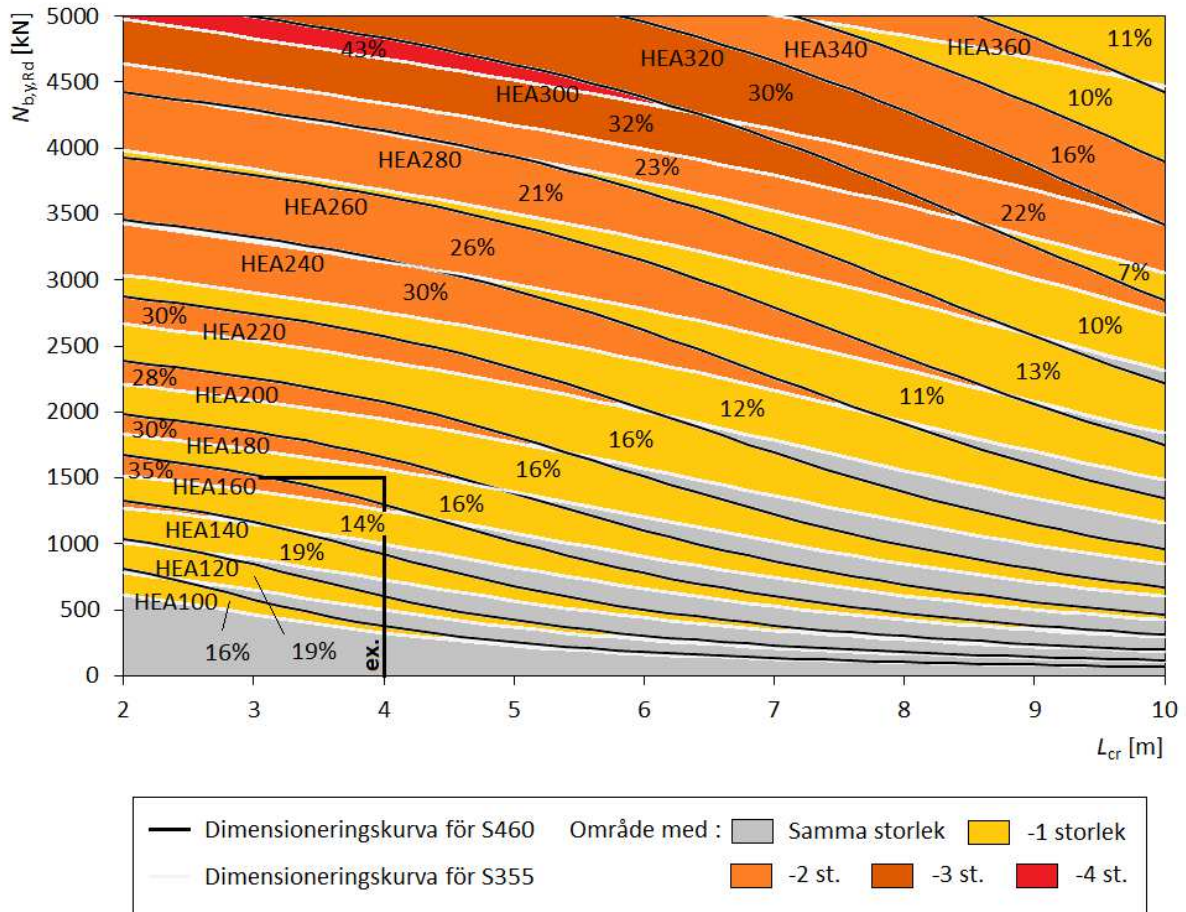
I figur 6.4 visas den potentiella viktskillnaden hos en 4m hög pelare av VKR i S355 som ersätts av ett KKR i S420. Vid höga laster runt och över 2000 kN kan man ofta räkna med en materialbesparing på mellan några upp till 20 %. Vid mindre laster mellan 250 och 350 kN kan upp till ca 10% vikt sparas. Det finns dock risk för ökad vikt vid andra laster.



Figur 6.4 Potentiell viktskillnad för en 4m hög (knäcklängd) pelare av VKR i S355 som ersätts av ett KKR i S420.

### 6.3.2 Pelare av HEA profiler

I figur 6.5 visas bärförmågan för böjknäckning i styv led (pelaren antas stagad i vek led) hos en pelare av HEA-profil som funktion av knäcklängden. De svarta kurvorna avser stål S460 och de ljusgråa kurvorna stål S355. I de gråa områdena krävs samma tvärsnitt oavsett stålsort. I de färgade områdena kan från ett (gult) och upp till fyra (rött) steg mindre tvärsnitt användas vid val av S460 jämfört med S355. Viktbesparingen i procent anges i diagrammen.



ex.  $N_{Ed} = 1500$  kN och  $L_{cr} = 4$  m : Vid S460 räcker **HEA180** (35,5 kg/m).  
 Det är en storlek mindre än vid S355 (HEA200, 42,3 kg/m).  
 Det ger en **viktbesparing på 16%**.

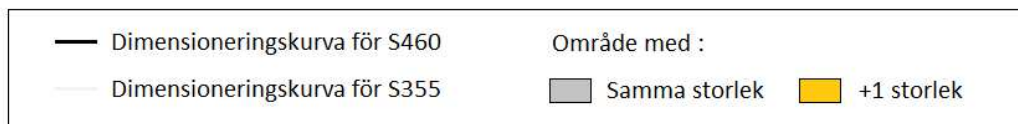
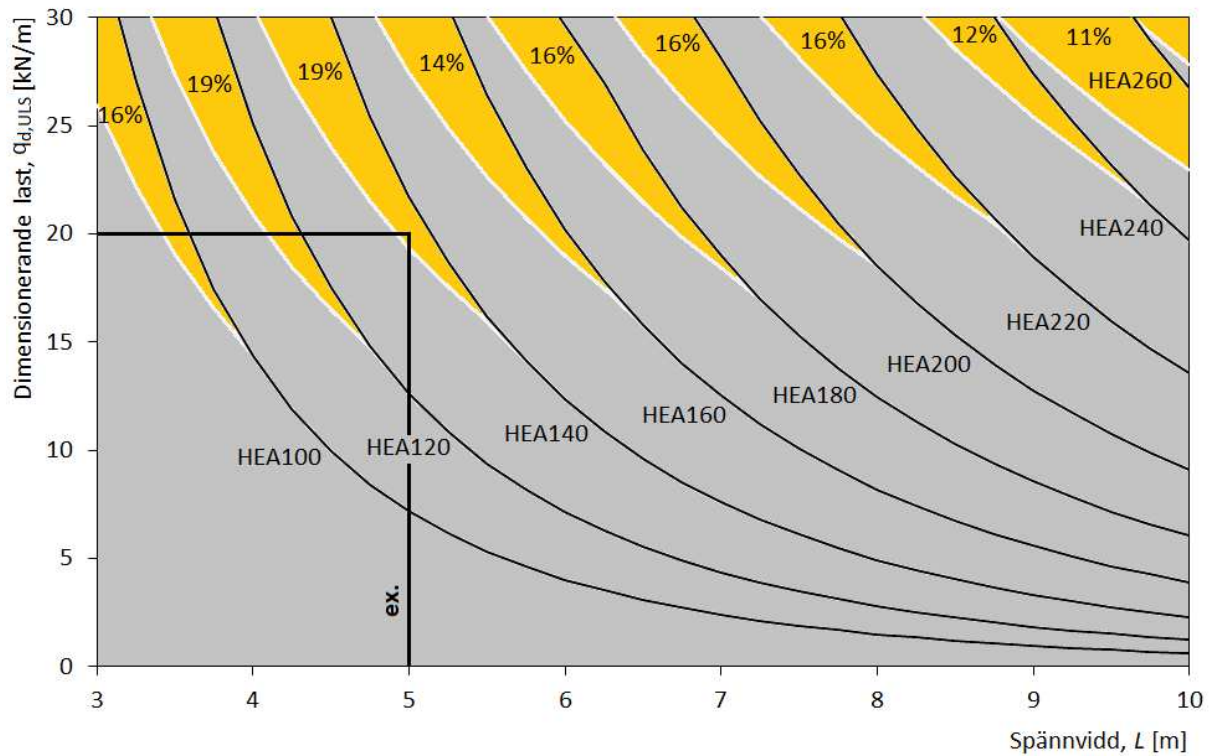
Figur 6.5 Bärförmågan för böjknäckning i styv led hos en pelare av HEA-profil i S460 respektive S355.

### 6.3.3 Balkar av HEA-profiler

Balkar dimensioneras för moment och tvärkraft som påverkas positivt av en ökad hållfasthet men även krav på nedböjning kan avgöra dimensioneringen. I så fall är styvheten avgörande och den är oberoende av stålsorten varpå en ökning av hållfastheten inte har någon effekt på materialåtgången.

I figur 6.6 visas maximal dimensionerande last för en tvärsnittsbalk av HEA-profil i S460 (svarta kurvor) respektive S355 (ljusgråa kurvor). Lasten är jämnt utbredd och det antas att dimensionerande last i brottgränstillstånd är dubbelt så stor som lasten i bruksgränstillstånd. Nedböjning begränsas till  $L/300$ .

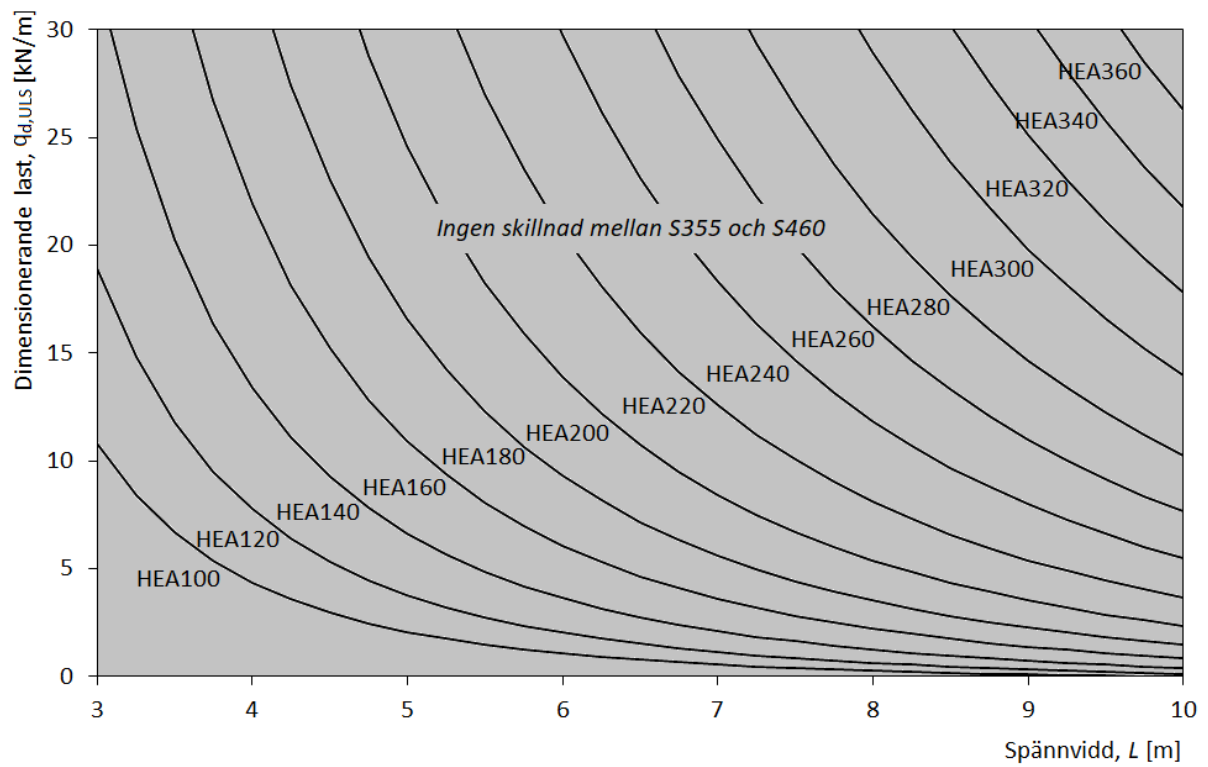
Vid stora laster är det möjligt att kunna dra nytta av en högre hållfasthet (se gula områden), beroende av spännvidden, och materialbesparingen är i storleksordning 15-20%. I de flesta fall har dock en högre hållfasthet ingen effekt på materialåtgången.



**ex.**  $q_{d,ULS} = 20 \text{ kN/m}$  och  $L = 5 \text{ m}$ : Vid S460 räcker **HEA140** (24,7 kg/m).  
 Det är en storlek mindre än vid S355 (HEA160, 30,4 kg/m).  
 Det ger en **viktbesparing på 19%**.

Figur 6.6 Maximal dimensionerande last för en tvåstödsbalk av HEA-profil i S460 respektive S355 (jämt utbredd last,  $u_{\max} = L/300$ ,  $q_{d,ULS} = 2 \times q_{\text{frekv,SLS}}$ ).

I figur 6.7 visas maximal dimensionerande last för en fritt upplagd balk. Samma antaganden som ovan görs. Vid vanliga kombinationer av spännvidd och last blir det aldrig en fördel att byta stålsort från S355 till S460.



Figur 6.7 Maximal dimensionerande last för en fritt upplagd balk av HEA-profil i S460 eller S355 (jämt utbredd last,  $u_{\max} = L/300$ ,  $q_{d,ULS} = 2 \times q_{\text{frekv,SLS}}$ ).



## 7. Återbruk

### 7.1 Klimatprestanda

Huvudanledningen till att återbruka konstruktionsstål är att man därmed undviker den miljöpåverkan som följer av återvinningsprocessen och får en produkt med överlägsen klimatprestanda.

Enligt Boverkets klimatdatabas får klimatpåverkan från återanvända byggprodukter sättas till noll och samma resonemang används i miljövarudeklarationer där påverkan från demontering och avfallshantering behandlas för nya produkter i livscykelanalysens modul C.

Paradoxalt kan man bli frestad att använda mer återbrukat material än nödvändigt eftersom det formellt inte får några konsekvenser för klimatpåverkan. Detta kan även förstärkas av att kostnaderna för återbrukat material troligen kopplas till provningsomfattning snarare än vikt.

Ur ett större perspektiv ökar stålanvändningen i världen och om man binder mer stål, även återbrukat, i en byggnad än vad som verkligen krävs leder det till ökande behov av primärt material med relaterad klimatpåverkan. Det finns därför en gräns för hur mycket "överdimensionering" som är miljömässigt försvarbart vid återbruk.

Denna gräns kan definieras genom att undersöka två scenarier – en för återbruk och en för återvinning – och jämföra respektive klimatpåverkan.

#### Scenario 1, återbruk:

En återbrukat profil med vikt  $m_A$  används i en konstruktion där en ny profil med vikt  $m_N$  hade räckt.

Klimatpåverkan, i kg CO<sub>2</sub>-eq, blir:

$$e_{1,\text{Åb}} = m_A E_{\text{Åb}}$$

där,

$E_{\text{Åb}}$  = klimatpåverkansfaktor från demonteringsprocessen till återanvändbar profil [kg CO<sub>2</sub>-eq/kg]

#### Scenario 2, återvinning:

Profilen i scenario 1 återvinns och en ny profil gjord av sekundärt material med vikt  $m_N$  används i konstruktionen. Materialåtgången är mindre ( $m_N < m_A$ ) och en mängd stål  $m_X = m_A - m_N$  kan därför användas till något annat och ersätta primärt material.

Klimatpåverkan blir:

$$e_{2,\text{Åv}} = m_A E_{\text{Åv}} + m_N E_{\text{profil}} + m_X E_{\text{skrot}} - m_X E_{\text{malm}}$$

där,

$E_{\text{Åv}}$  = klimatpåverkansfaktor från rivningsprocessen till sorterad skrot

$E_{\text{profil}}$  = klimatpåverkansfaktor vid tillverkning av en ny profil från sekundärt material

$E_{\text{skrot}}$  = klimatpåverkansfaktor vid tillverkning av sekundärt stål från 100% skrot (ljusbågsugn)

$E_{\text{malm}}$  = klimatpåverkansfaktor vid tillverkning av primärt stål från 100% malm (masugn)

Återbruk, dvs scenario 1, har lägre klimatpåverkan om:

$$m_A (E_{\text{Åv}} - E_{\text{Åb}}) + m_N E_{\text{profil}} + m_X E_{\text{skrot}} - m_X E_{\text{malm}} \geq 0$$

Enlig prEN 17662 Bilaga I är klimatpåverkan från demontering något större än från rivning men skillnaden är liten i förhållande till klimatpåverkan vid tillverkning så för enkelhetens skull kan den försummas.

Efter omformulering fås:

$$\frac{m_A}{m_N} \leq 1 + \frac{E_{\text{profil}}}{E_{\text{malm}} - E_{\text{skrot}}}$$

$E_{\text{malm}}$  är klimatpåverkansfaktorn vid tillverkning av stål från 100% malm. Det är ett teoretiskt värde eftersom en viss mängd stålskrot alltid ingår vid tillverkning av primärt stål i masugn. Beräkning av denna faktor beskrivs i *Life cycle inventory methodology report for steel products, World Steel Association, 2017*. I princip kan man interpolera värdena från tillverkning med olika stora andelar skrot i processen. Med data från 2010 ur *Steel's recyclability: demonstrating the benefits of recycling steel to achieve a circular economy, Clare Broadbent, International Journal of Life Cycle Assessment (2016)* fås:

$$E_{\text{malm}} = 1,92 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg}$$

$$E_{\text{skrot}} = 0,39 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg}$$

Klimatpåverkansfaktorn för tillverkning av en ny profil från sekundärt material kan tas som klimatpåverkan från valsade profiler, se kapitel 3, dvs  $E_{\text{profil}} = 1,1 \text{ kg CO}_2\text{eq/kg}$ .

Slutligen får man:

$$\frac{m_A}{m_N} \leq 1,7$$

Detta är ett riktvärde som kan behöva justeras uppåt eller neråt över tid och beroende av projektspecifika förutsättningar. Ju mindre värde desto större fördelar får man vid återbruk och en enkel tumregel på säker sida kan vara att begränsa "överdimensioneringen" till 50 % i vikt.

## 7.2 Anpassade föreskrifter

Vid återbruk i ett specifikt projekt där konstruktören har informerats om de återbrukade produkternas egenskaper är allmänna föreskrifter inte relevanta.

Om konstruktören däremot dimensionerar konstruktionen utan hänsyn till kända återbrukade produkter kan allmänna föreskrifter anpassas för att göra det enklare att tillämpa s.k. integrerat återbruk där återbrukade produkter i mån av tillgång kan ersätta motsvarande nya produkter.

Istället för att föreskriva en specifik stålsort kan vi säkerställa att konstruktörens antagande gällande produkternas egenskaper uppfylls. De egenskaper som är väsentliga anges i avsnitt 5.1 i SS-EN 1090-2:2018 och dessa skall dokumenteras och styrkas genom uppmätning eller provning.

I Mekaniska Verkstädernas Riksförbunds *Handbok – Återbruk av stål i bärande konstruktioner, Del 2 – Krav- & processbeskrivning* (MVR BS04:2021) ges instruktioner för sortering och klassificering av stålkomponenter. Procedurer beskrivs som baseras på standardiserade provningsmetoder och uppfyller regelverkets krav på tillförlitlighet. Handboken är tänkt att användas som en branschstandard och kan hänvisas till i föreskrifter.

Idag är S355 den vanligaste stålsorten och den föreskrivs även i fall där en lägre hållfasthet hade räckt. Äldre konstruktioner däremot innehåller troligen många komponenter i S275. Som konstruktör är det därför viktigt att inte utesluta komponenter i onödan. Om t ex en balks nedböjning är avgörande för dimensioneringen och S275 ger en tillräcklig kapacitet för moment kan man föreskriva "**minst** S275" istället för "S355". Detta öppnar för användning av både S275 och S355.

Nedan visas exempel på:

- Gängse föreskrifter avsedda för nytt stål:

PROFILER

HEA-profiler: S355J2 enligt SS-EN 10025-2

CFRHS-profiler: S355J2H enligt SS-EN 10219-1

HFRHS-profiler: S355J2H enligt SS-EN 10210-1

- Föreskrifter anpassade till integrerat återbruk (**inte för utmattningsbelastade konstruktioner!**):

PROFILER

Återbrukade profiler kan användas. Deras väsentliga egenskaper styrks av specifika provningsresultat motsvarande kontrollintyg 3.1. Provningsmetod och omfattning enligt MVR BS04:2021.

HEA-profiler: Dimensioner och toleranser enl. SS-EN 10034

Material motsvarande minst S275\* enligt SS-EN 10025-2

CFRHS-profiler: Dimensioner och toleranser enl. SS-EN 10219-2

Material motsvarande minst S355 enligt SS-EN 10219-1

HFRHS-profiler: Dimensioner och toleranser enl. SS-EN 10210-2

Material motsvarande minst S355 enligt SS-EN 10210-1

\*Om det är lämpligt i det aktuella fallet.