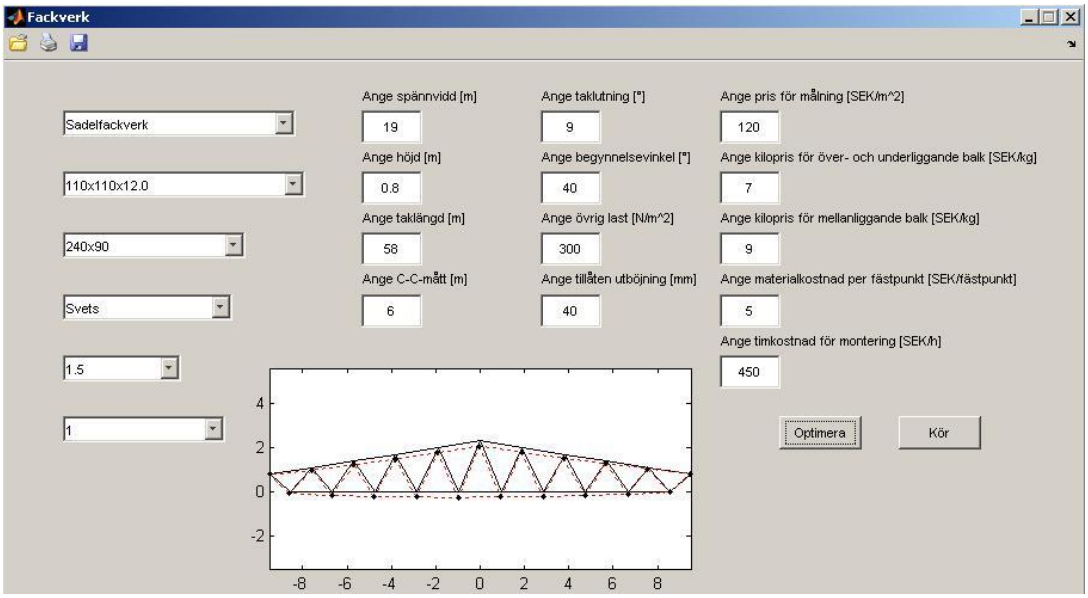
CHALMERS



Kostnadsberäkning av Takfackverk i Stål

Cost Calculation of Roof Trusses in Steel

Examensarbete för högskoleingenjörsexamen inom Maskiningenjörsprogrammet

Johannes Andersen

Daniel Kristensson

Pär Larsson

Institutionen för Material- och tillverkningsteknik
Avdelningen för Avancerad oförstörande provning
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sweden, 2011
Examinator: Gert Persson

Examensarbete No. 56/2011

FÖRORD

Denna rapport redogör för vårt examensarbete vid Chalmers Tekniska Högskola, institutionen för Material- och tillverkningsteknik. Det avslutar våra studier på Maskiningejörsprogrammet, med inriktning konstruktion. Arbetet motsvarar 15 högskolepoäng per person. Handledare på Chalmers är Gert Persson, som även är examinator. Uppdragsgivare är Lecor Stålteknik AB i Kungälv. Handledare på Lecor är Mattias Hansson, projektledare och konstruktör.

Det är vår förhoppning att examensarbete ska underlätta framtida produktion för Lecor, samt att de överväger att fortsätta utveckla programmet *OptiPrize*.

Vi vill rikta ett stort tack till alla som direkt och indirekt bidragit till examensarbetets genomförande. Vår handledare på Chalmers, Gert Persson har bidragit med övergripande tips och idéer om hur examensarbetet ska genomföras och varit en god vägledare. Mattias Hansson, vår handledare på Lecor har varit behjälplig vid praktiska frågor angående uppdragets genomförande. Lecor's kontakt på COWI, Andreas Almgren har hjälpt oss att komma i kontakt med Andreas Lidö på COWI Byggteknik. Andreas Lidö har varit till stor hjälp när det gäller beräkningar av fackverk. Mohammad Al-Emrani, docent och Steve Svensson, tekniklektor, konstruktionsteknik, Chalmers har varit till mycket stor hjälp vid tolkningar av Eurokod. Stig Larsson, professor, Matematiska vetenskaper, Chalmers och Erik Larsson, programmerare, Lavasoft har varit till stor hjälp med programmering i *MATLAB*.Vi vill även tacka Lecor's VD Tennce Carlsson som uppdragsgivare.

SAMMANFATTNING

Rapporten behandlar hur programmet *OptiPrize* har utvecklats. Programmet beräknar och kostnadsoptimerar stålfackverkskonstruktioner till takstolar. *OptiPrize* är skrivet i *MATLAB* och består av ett grafiskt användargränssnitt och åtta funktionsfiler som beräknar och optimerar efter användarens önskan. Rapporten beskriver vilka dimensionerings- och kostnadsoptimeringsmetoder som används för att uppnå tillräcklig bärförmåga till lägsta möjliga kostnad samt vilka begränsningar programmet har.

Programmets syfte är att användaren, med enkla kommandon, snabbt ska erhålla geometribeskrivning och kostnadsspecifikation för ett fackverk. Resultatet är ett program där användaren, genom att ange ett antal indata, sekunder senare erhåller nämnda utdata. *OptiPrize* presenterar efter exekvering en konstruktionsbild med deformationsbild, en detaljerad kostnadsspecifikation och resultat för maximal utböjning samt antal fackverk och knutpunkter.

Då större delen av ett fackverks totalkostnad utgörs av stål- och målningskostnader är valet av balkprofil viktigt för en kostnadseffektiv konstruktion. Optimeringsfunktionen i *OptiPrize* styrs därför av stålpriser samt balkprofilernas dimensioner och materialegenskaper. Programmet föreslår en konstruktion med minsta möjliga balkdimensioner som svarar mot gällande byggnormer och ställda deformationstoleranser.

För att ge användaren större konstruktionsfrihet är optimeringsfunktionen valbar. Väljs optimeringsfunktionen bort utför *OptiPrize* beräkningar med angivna indata och svarar med tidigare nämnda utdata samt varningstext om konstruktionen inte uppfyller byggnormer och ställda deformationstoleranser.

Deformationer och krafter i fackverkens balkar beräknas huvudsakligen med finita elementmetoden genom funktionsfiler i *CALFEM*. Deformationerna och balkkrafterna har validerats mot beräkningar utförda i programmet *STAAD Pro V8i* av beräkningsingenjörer på ingenjörskonsultföretaget COWI i Göteborg. Resultaten visar att beräkningar utförda i *OptiPrize* ger god noggrannhet för både deformationer och balkkrafter.

SUMMARY

The report describes the development of the program *OptiPrize*. The program calculates and optimizes the cost of steel trusses for roofs. *OptiPrize* is written in *MATLAB* and consists of a graphical user interface and eight function files that compute and optimize according to the specification of the user. The report describes the design and cost optimization methods used to achieve sufficient bearing capacity at the lowest possible cost, as well as the limitations of the program.

The purpose of the program is that the user, with simple commands, quickly obtains the cost specification and geometry description of a truss construction. The result is a program where the user, by entering a number of input data, seconds later receives output data. After execution *OptiPrize* presents a design image with deformation indication, a detailed cost specification and results for maximum deflection and number of trusses and nodes.

Since the cost of steel and painting is the major part of the total cost, the choice of the beam profile is important for cost-efficient design. The optimization function in *OptiPrize* is therefore based on steel prices, beam profile dimensions and material properties. The program suggests a design with minimum beam dimensions that fulfills current building codes and specified deformation tolerances.

The optimization function is optional in order to give the user greater design flexibility. When executed without the optimization function, *OptiPrize* performs calculations with the specified input and responds with the previously mentioned output data. A warning message informs the user if the design does not satisfy building codes and specified deformation tolerances.

Deformations and forces in the truss beams are calculated with the finite element method through function files in *CALFEM*. The deformations and beam forces have been validated against calculations done in the program *STAAD Pro V8i* by construction engineers in the engineering consultancy company COWI in Gothenburg. The results show that calculations done in *OptiPrize* give high accuracy for both deformations and beam forces.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

BETECKNINGAR 1
1. INLEDNING 3
1.1 Bakgrund 3
1.2 Syfte 3
1.3 Avgränsningar 3
1.4 Precisering av frågeställningen 3
2. METOD 4
2.1 Eurokod 4
2.2 *MATLAB* 4
2.3 *CALFEM* 4
2.4 Användargränssnitt 4
3. EUROKOD 5
3.1 Dimensionering 5
3.2 Laster enligt Eurokod 6
3.2.1 Permanenta laster (G) 6
3.2.2 Variabla laster (Q) 7
3.3 Tvärsnittsklass 8
3.4 Laster i balkelement 9
3.5 Sammanfogning 10
4. BERÄKNINGAR ENLIGT EUROKOD 12
4.1 Totala Last Effekten ($\boldsymbol{Ed}$) 12
4.2 Kontroll av balkar 14
4.3 Beräkningar sammanfogningsmetoder 15
5. FACKVERK 17
5.1 Fackverkstyper 17
5.2 Balkar 18
6. PROGRAMMET 20
6.1 Programstruktur 20
6.2 Användargränssnitt 24
6.4 Test mot annan programvara 26
7. SLUTSATS 29
REFERENSER 31
APPENDIX 1 ..... A1
MATLAB
APPENDIX 2 ..... A3
CALFEM
APPENDIX 3 ..... A4
Krafter i balkar
Förband i knutpunkter

APPENDIX 4 ..... A8
Användarhandbok

APPENDIX 5 ..... A11
Resultat av beräkning i *STAAD*

BETECKNINGAR

α = Imperfektionsfaktor
α_b = Faktor
α_d = Faktor
α_v =Faktor på skruv beroende på vilken hållfasthetsklass den ligger i
β_w = korrelationsfaktor med avseende på grundmaterialets hållfastighet
δ = Förlängningen
γ_d= Partialkoefficient på säkerhetsklasser
γ_f = Partialkoefficient på lastparameter
$\gamma_{G,sup}$ = Partialkoefficient för den ogynnsamma permanenta lasten
$\gamma_{G,int}$ = Partialkoefficient för den ogynnsamma permanenta lasten
γ_{Gj}= Partialkoefficient för den permanenta lasten j
γ_m = Partialkoefficient på materialparameter
γ_{M1} = Partialkoefficient för instabillitet
γ_{M2} = Partialkoefficient för brottspänning i tvärsnittet
$\gamma_{Q,i}$= Partialkoefficient för den variabla lasten i
Ψ_0= Faktorer för kombinationsvärde för variabel last
μ_i = Snölastens formfaktor
μ_y = Faktor
$\sigma_\perp$ = Spänning vinkelrätt
$\tau_\perp$ = Skjuvspänning vinkelrätt
$\tau_{/\!/}$ = Skjuvspänning parallell
χ_y = Reduktionsfaktor för knäckning
Φ = Värde för att räkna ut reductions faktorn χ
λ =Slankhetstalet
$\bar{\lambda}$ =Den relativa slankheten
a = Svetstjockleken
A = Tvärsnittsarea
A_{net} = Netto tvärsnittsarean
A_s = Skruvens spännings area
C_0 = Svetsens längd vinkelrätt mot kraftens riktning
C_e = Exponerings faktorn
C_{mLT} = Ekvivalent likformig moment faktor
C_{my} = Ekvivalent likformig moment faktor
C_t = Den termiska koefficienten
d = Skruvens diameter
d_0 = Hålets diameter
e_1 = Kantavståndet från hålets centrum i kraftriktningen
e_2 = Kantavståndet från hålets centrum vinkelrätt mot kraftriktningen
E =Elasticitesmodulen

E_d = Dimensionerande värdet för lasteffekten
f_u = Grundmaterialets hållfasthet
f_{ub} = Nominella brottgränsen
f_y = Sträckgränsen
$F_{b,Ed}$ = Den dimensionerande kraften för hålkantsbrott
$F_{b,Rd}$ = Den maximala motståndskraften per hål vid hålbrott
F_k = Lasten på konstruktionen.
F_M = Kraft uppkommande i svets pga moment
$F_{t,Ed}$ =Den dimensionerande dragkraften per skruv för brottgränstillstånd
$F_{t,Rd}$ =Utformning av dragkraftskapaciteten per skruv
$F_{v,Ed}$ = Den dimensionerande tvärkraften per skruv för brottgränstillstånd
$F_{v,Rd}$ =Utformning av tvärkraftskapaciteten per skruv
G = Permanent last
i = Tröghetsradien
I = Yttröghetsmomentet
k_{yy} = Interaktions faktor
k_1 = Reduktionsfaktor som tar hänsyn till dragbrott i plåten
k_2 = Reduktionsfaktor som beaktar bland annat effekterna av bändning
L_c = Kritiska längden vid knäckning
l_1 = Svetsens längd i kraftens riktning
$M_{Ed,y}$ = Det dimensionerande värdet för moment
M_k =Materialets bärförmåga.
$M_{Rd,y}$ = Materialets motstånd till moment i y-led
M_y = Moment i y-led
$N_{cr,y}$ = Den elastiska knäckningskraften
N_{Ed} = Det dimensionerande värdet för normalkraft
$N_{pl,Rd}$ = Det plastiska motståndet till normal krafter i tvärsnittet
N_{Rd} = Materialets motstånd till normal krafter i tvärsnittet
P_s = Kraften per svets i förbandet
p_1 = Centrumavstånd mellan hålen i kraftens riktning
p_2 = Centrumavstånd mellan hålen vinkelrätt kraftens riktning
$Q_{,1}$= Karaketeristiskt värde för en variabel huvudlast 1
$Q_{k,i}$= Karaketeristiskt värde för den samverkande variabla lasten i
R_d = Dimensionerande värdet för bärförmågan
S = Den totala snöeffekten
S_k = Det karakteristiska värdet för snölast på mark $[kN/m^2]$
t = Plåtens tjocklek
W = Böjmotstånd
W_{el} = Det elastiska böjmotståndet

1. INLEDNING

Problemdefinitionen är ställd av stålkonstruktionsföretaget Lecor Stålteknik AB i Kungälv. Lecor önskar utveckla ett snabbt och enkelt verktyg att ta fram kostnads- och konstruktionsunderlag för tillverkning av fackverk till takstolar.

1.1 Bakgrund

Lecor tillverkar stålkonstruktioner för industri och kontorsbyggnader. I vissa projekt ingår tillverkning och leverans av takstolar konstruerade som fackverk. Fackverken är som regel inte dimensionerade eller uppritade, detta innebär att dessa måste konstrueras och dimensioneras unikt för varje nytt projekt.

1.2 Syfte

Syftet är att upprätta ett verktyg för att enkelt dimensionera och få ut uppgifter som behövs för att kalkylera produktionskostnader samt att upprätta ett underlag för produktionen.

1.3 Avgränsningar

Endast fackverk i form av sekundärbalkar till tak med jämt utbredd last kommer att behandlas. De laster som tagits hänsyn till är snölast, fackverkets egentyngd samt en användarspecificerad utbredd last. Egentyngden beräknas enligt den förenklade modellen– fackverkets totalvikt dividerat med fackverkets längd. Balktyperna som används är vinkelstång (L-profil) för över- och underliggande balk samt UPE (U-profil) och VKR (fyrkantsprofil) för mellanliggande balk.

1.4 Precisering av frågeställningen

Frågeställningen som besvaras i rapporten har definierats i samråd med Lecor. Frågeställningen är:

- Vilket program skall användas?
- Vilken/vilka typer av fackverk skall behandlas?
- Vilka in- och utdata skall verktyget behandla?
- Vilka kostnader skall tas med?
- Hur skall optimeringen göras?

2. METOD

Information om hur beräkningar av fackverk genomförs idag fås med hjälp av COWI. Vilka typer av fackverk samt vilka data som skall behandlas tas fram i samförstånd med Lecor. Hur byggnormer i Eurokod används tolkas med hjälp av institutionen för konstruktionsteknik på Chalmers. Valet av programvara att utveckla verktyget i stod i första hand mellan *MATLAB* och *Excel.* Slutligen valdes *MATLAB* då det möjliggör användandet av toolboxen *CALFEM* för beräkningar av stålkonstruktioner. Valet skedde i samförstånd med COWI och Lecor.

2.1 Eurokod

Tidigare har Boverkets handbok om stålkonstruktioner (BSK) och Boverkets handbok om snö- och vindlast (BSV) använts vid beräkningar av fackverk. Sverige har under våren 2011 gått över från Boverkets handböcker till Eurokod. Eurokod är den europeiska standarden för byggnormer.

2.2 *MATLAB*

MATLAB är ett högnivåspråk för tekniska beräkningar. Förutom element som finns i traditionella programmeringsspråk som C++, Java och Fortran, har *MATLAB* också inbyggda funktioner, så kallade ”toolboxes”, för att lösa numeriska problem inom linjär algebra och matematisk analys. Detta gör *MATLAB* till ett snabbare verktyg för tekniskproblemlösning än övriga nämnda programmeringsspråk. Till *MATLAB* hör också kommandon för 2D- och 3D-grafik med vars hjälp man kan visualisera och presentera sina data [1]. Utöver *MATLAB´*s inbyggda ”toolboxes” finns fler att ladda ner på utvecklaren Mathworks hemsida. Mer om *MATLAB* finns beskrivet i appendix 1.

2.3 *CALFEM*

I *MATLAB* har *CALFEM* använts. *CALFEM* är en "toolbox" som använder finita elementmetoden för att lösa strukturella mekaniska problem. *CALFEM* innehåller ett antal funktioner varav följande funktioner har använts: *beam2e, assem, solveq, extract, beam2s* samt *eldisp2 [2]*. Hur funktionerna fungerar finns beskrivet i appendix 2.

2.4 Användargränssnitt

För att skapa dialog med användaren har *MATLAB´s* grafiska användargränssnitt, GUI, nyttjats. Användargränssnittet gör programmet *OptiPrize* lättanvänt och tydligt. Användargränssnittet är en funktionsfil i *MATLAB* som skapar dialogrutor där användaren ges möjlighet att ange indata och få resultat och plottar till svar.

3. EUROKOD

Eurokod är den europeiska standarden för byggnormer. Detta kapitel behandlar dimensionering, laster och hållfasthetskapacitet enligt Eurokod.

3.1 Dimensionering

Dimensionering och design av bärande konstruktioner skall utföras på ett tillförlitligt sätt, så att den tilltänkta livslängden och ekonomin uppfylls. Därmed skall den bärande konstruktionen vara anpassad efter följande delar [3]:

- Bärförmåga
- Stadga
- Beständighet

En viktig del i dimensioneringsprocessen är att ta fram ett lämpligt konstruktionsmaterial. Det valda materialet skall klara av de krav som ställs på konstruktionen.

Beräkningsmodell

För att med beräkningar kunna dimensionera en verklig bärande konstruktion krävs att en förenklad beräkningsmodell görs. För att erhålla en god beräkningsmodell är följande lista önskvärd enligt [3] sid. K13.

- Modellen skall spegla konstruktionens verkningssätt.
- Modellen skall vara ”begriplig” och utgå från fysikaliska – mekaniska fenomen.
- Modellen skall fånga väsentligheter men gärna försumma oväsentligheter.
- Modellen ska hjälpa konstruktören att förstå konstruktionens verkningsätt och underlätta för konstruktören att fatta beslut i nya delvis annorlunda situationer.
- Modellen skall vara generell så att den kan appliceras på delvis nya problem.

Det är viktigt att de förenklingar som görs är relevanta och åskådliggör den verkliga konstruktionen. Det skall icke förglömmas att en del av dagens beräkningsmetoder är empiriska, det vill säga att de är framtagna med hjälp av olika typer av statiska belastningsförsök. Då empiriska uttryck (formler) skall användas vid beräkningsmodeller krävs det att förenklingarna liknar de försök som gjorts då de empiriska uttrycken tagits fram.

Säkerhetsbestämmelser

I bärande konstruktioner kommer det alltid att finnas osäkerheter kring följande faktorer:

- Lastens storlek
- Materialdefekter
- Dimensioner och toleranser
- Beräkningsmodeller

Vid dimensionering skall tidigare nämnda osäkerheter tas med i beräkningarna. Det vill säga för att få en fullständig säkerhet på konstruktionen krävs att de osäkerheter som kan uppstå på konstruktionen motverkas med hjälp av partialkoefficienter och säkerhetsfaktorer. Partialkoefficienterna (γ) används för att minska brottgränsen och få en högre säkerhet på konstruktionen. Dessa koefficienter och faktorer multipliceras in med de olika lasterna i den totala lasteffekten. Alltså den dimensionerande lasteffekten (E_d) skall vara mindre än den dimensionerande bärförmågan (R_d). Följande dimensioneringsvillkor ligger till grunden för de krav som skall vara uppfyllda enligt Eurokod [3][5].

$$E_d \leq R_d \tag{3.1}$$

$$R_d = \frac{M_k}{\gamma_m} \tag{3.2}$$

$$E_d = \gamma_f \times F_k \tag{3.3}$$

$$\gamma_m \geq 1 \tag{3.4}$$

$$\gamma_f \geq 1 \tag{3.5}$$

3.2 Laster enligt Eurokod

Vid beräkningar av laster och dess kombinationer som erhålls på takfackverk används Eurokoderna SS-EN 1990 och SS-EN 1991. SS-EN 1990 är grundläggande för laster och SS-EN 1991 innehåller lite mer specifikt för nyttig-, snö-, vindlast och egentyngd. Laster kan delas upp i de två grupperna permanenta och variabla laster enligt [5][6][7].

3.2.1 Permanenta laster (G)

Permanenta laster är de laster som är konstanta med tiden till exempel egentyngden. Den sammanlagda egentyngden av bärverksdelar (fackverket) och icke bärande konstruktionsdelar bör i lastkombinationer betraktas som en enda last. För permanenta laster gäller följande enligt SS-EN 1990 ANM. 3 i tabell A 1.2 (B): i karakteristiska värden för alla permanenta laster från en och samma källa multipliceras med $\gamma_{G,sup}$ om den totala lasteffekten är ogynnsam och med $\gamma_{G,int}$ om den totala lasteffekten är gynnsam.

$$\gamma_{G,sup} = 1{,}35 \tag{3.6}$$

$$\gamma_{G,int} = 1 \tag{3.7}$$

Egentyngden (Q)

Egentyngden är allt från tyngden av takfackverkets konstruktion till takplåtens och isoleringens tyngd. Materialdata på olika stålprofiler till fackverkskonstruktionen finns till exempel att hämta från BE group’s katalog (Lilla Röda) [10] och ges i [kg/m], andra materialdata för till exempel takplåt och isolering fås från olika materialtabeller.

Punktlast (F)

Punktlasten bestäms från fall till fall, där konstruktören bestämmer de punktlaster som är specifikt för det enskilda fallet. Exempel på punktlaster kan vara lysrörsarmaturer.

3.2.2 Variabla laster (Q)

Variabla laster är laster som varierar med tiden som till exempel nyttig- och snölast. Flera variabla laster kan verka samtidigt i form av olika lastkombinationer.

Nyttiglast (Q)

Nyttiglast är en variabel last som ändras med tiden. Den nyttiga lasten kan vara skiljeväggar som hänger i undertaket eller snöskottare som står på ett tak. Nyttiglast på takytor skall dimensioneras efter det farligaste lastfallet.

Snölast (Q)

Snölast ses ofta som den dominerande nyttiglasten på tak. Vid dimensionering skall hänsyn till att snö kan fördela sig på flera olika sätt på taket tas. Några faktorer som kan påverka snöns fördelning är:

- Takets form
- Takets termiska egenskaper
- Den värmemängd som alstras under taket
- Vindförhållanden (snödrift)
- Den omgivande terrängen
- Lokala Klimatet

Det karakteristiska värdet för snölast på mark (s_k) i Sverige är en snölast med återkomsttid på 50 år. För snölaster ska generellt två primära lastbilder beaktas:

- Snölast på tak opåverkad av snödrift.
- Snölast på tak påverkad av snödrift.

Vindlast(Q)

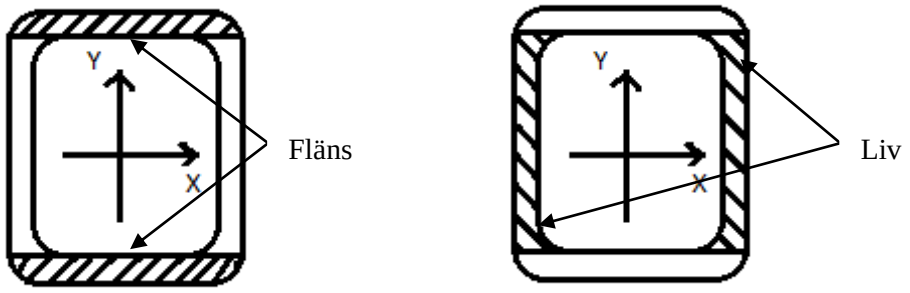
Vindlast är en variabel last som ger upphov till en lyftkraft på takkonstruktionen. Denna last påverkar inte takfackverket negativt och kan därför försummas. Vindlastens storlek på byggnaders tak påverkas av byggnadens utformning och dess öppningar.

3.3 Tvärsnittsklass

Tvärsnittsklasser används för att fastställa hur mycket den aktuella belastningsmodellen kan belastas. De olika tvärsnittskrafterna beskrivs i tabell 3.1. För att räkna konservativt används tvärsnittsklass 3 vid beräkningar i *OptiPrize* även om flera av de profiler som behandlas i programmet tillhör tvärsnittsklass 1 och 2. Profiler i tvärsnittsklass 1 eller 2 är hållfastare än klass 3 men som tidigare nämnts dimensioneras balkarna enligt klass 3 för konservativ beräkning då denna förutsätter att fackverket ej belastas plastiskt. Profiler i tvärsnittsklass 4 är inte lämpliga att använda enligt förklaring i tabell 3.1. För att fastställa tvärsnittets klass måste både flänsar och liv kontrolleras. Flänsarnas uppgift är att ta upp momentet och livets uppgift är att ta upp normalkraften, då böjning sker kring x-axeln, se figur 3.1.

Tabell 3.1 Förklaring av tvärsnittsklasser.

Tvärsnittsklass	**Förklaring**
1	Tvärsnittet kan belastas upp till full plasticering utan att konstruktionen kollapsar.
2	Fullt plastiskt moment kan uppstå i tvärsnittet men tvärsnittsklass 2 har ej lika stor rotationskapacitet som tvärsnittsklass 1.
3	Tvärsnittet kan belastas helt elastiskt men bör ej belastas plastiskt.
4	Tvärsnitt som hamnar i denna klass börjar buckla innan dess fulla elastiska belastning och bör därför ej användas.



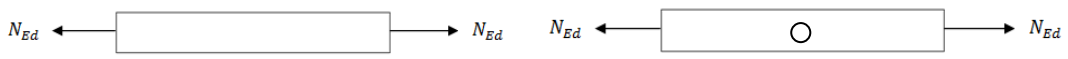
Figur 3.1 liv och flänsar i en VKR-profil vid böjning kring x-axeln.

3.4 Laster i balkelement

De huvudsakliga krafter som uppstår i en fackverkskonstruktion och i dess enskilda balkelement beskrivs i detta kapitel. En kort beskrivning enligt [3][4] kommer att göras.

Dragande kraft

Dragning sker då krafterna i stångens båda ändar är utåtriktade enligt figur 3.2 Dragning uppkommer i fackverkets underliggande balkar samt i vissa mellanliggande balkar. I en konstruktion där vissa balkar återkommer med samma tvärsnitt behövs inte dragning testas om den maximala tryckande kraften är större än den maximala dragande kraften, förklaring ges i avsnittet ”tryckande kraft”.



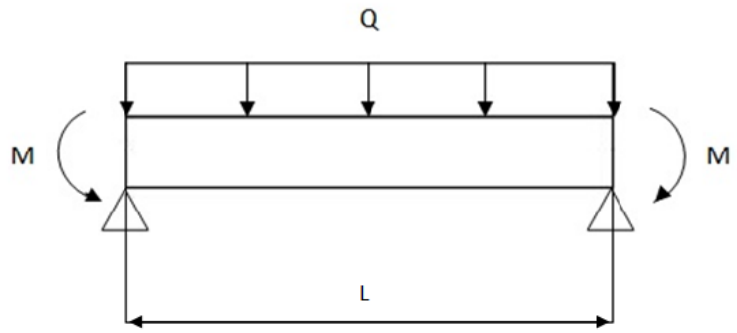
Figur 3.2 Balk belastad av en dragande kraft (utan och med hål).

Tryckande kraft

En tryckande kraft är till exempel en balk som utsätts för två tryckande krafter i var sin ända enligt figur 3.3, med andra ord motsatsen till dragning. Vid en tryckande kraft kan det vara så att en lägre kraft än vid dragning krävs innan kritisk belastning uppstår eftersom knäckning kan inträffa. Då en tryckande kraft är mer kritisk än en dragande, måste konstruktionen kontrolleras mot knäckning även om det finns likartade balkar med högre dragkraft. I ett fackverk uppkommer tryckande kraft i överliggande balkar och i vissa mellanliggande balkar.

Figur 3.3 Normalkrafter som verkar på balkelement.

Moment
Moment motverkar en rotationsrörelse som uppstår då en kraft ansätts med ett avstånd L från en rotationsaxel enligt figur 3.4. Vid beräkning av moment tar man hänsyn till vilken tvärsnittsklass balken tillhör.



Figur 3.4 Utbredd last och moment som verkar på en fritt upplagt balk.

3.5 Sammanfogning
För sammanfogning i knutpunkterna används svets- eller skruvförband. Dessa metoder förklaras i detta avsnitt.

Svetsförband
Svetsning är en sammanfogningsmetod av två eller flera material. Sammanfogningen sker på så sätt att grundmaterialen smälts ihop genom hög värmetillförsel eller fogas samman med hjälp av tillsatsmaterial. De vanligaste svetsmetoderna som används är:

- MMA (manuell metallbågsvetsning)
- MAG/MIG (rörelektrod gasmetallbågsvetsning, med aktiv- och med inert gas)
- Tig (tungsten inert gas)
- Gassvetsning (svetsning med acetylen och syre)

Svetsning av knutpunkter i fackverk sker framförallt med MAG/MIG-svetsning. Dessa möjliggör betydligt längre svetsoperationer än andra svetsmetoder eftersom elektroden sällan behöver bytas. Om knutpunkterna skall svetsas utomhus krävs MMA-svetsning. MAG/MIG-svetsning lämpar sig inte för utomhusbruk då skyddsgasen inte skyddar tillräckligt vid blåst.

Skruvförband
I ett skruvförband ingår, förutom skruven, en mutter och brickor vid skruvens och mutterns anläggningsyta. Fördelen med ett skruvförband till skillnad från svetsförband är att montagetiden är betydligt kortare vilket medför att produktionskostnaderna minskar. Fackverk monterade med skruvförband skall monteras med minst två skruvar i varje knutpunkt för att undvika momentfria leder.

Hålkantsbrott

Vid användning av skruvförband måste hänsyn till hålkantsbrott tas. Hålkantsbrott uppstår då skruven håller för påfrestningarna men plåten ger efter. Det finns tre typer av hålkantsbrott:

- Dragbrott i plåten
- Skjuvbrott i plåten
- Förlängning av hålet

Figur 3.5 visar hur ett hålkantsbrott kan se ut.

Figur 3.5 Dragbrott i plåten.

4. BERÄKNINGAR ENLIGT EUROKOD

I detta kapitel kommer de beräkningar som krävs för en godkänd fackverkskonstruktion enligt svensk standard att tas upp. Programmet OptiPrize räknar enligt Eurokod då detta numera är svensk standard. Följande laster och kontroller av krafter i detta kapitel står till grund för att fackverkskonstruktionen i programmet *OptiPrize* uppfyller normerna enligt Eurokod.

4.1 Totala Last Effekten (E_d)

Den totala lasteffekten ges framförallt av en egentyngd (G), en huvudlast ($Q_{,1}$) och en variabel last ($Q_{k,2}$). Dessa laster multipliceras med en rad olika koefficienter och faktorer för att få den tillförlitligheten och säkerheten på konstruktionen som krävs enlig Eurokod [5]. I en takfackverkskonstruktion kan den totala lasteffekten uttryckas enligt ekvation 4.1.

$$E_d = \gamma_{Gj} \times \gamma_d \times G + \gamma_{Q,1} \times \gamma_d \times Q_{k,1} + \gamma_{Q,2} \times \Psi_0 \times \gamma_d \times Q_{k,2} \qquad (4.1)$$

För att få en optimering av fackverket i takkonstruktionen tas endast hänsyn till den totala egentynden och den varierande lasten för snö. Förklaringen till att vissa laster inte tas med i den optimerade beräkningen som skall användas i programmet är:

- **Punktlast:** är en avgränsning som inte tas med i programmet på grund av tidsbrist.
- **Nyttiglast:** skulle kunna vara en snöskottare på tak och eftersom optimering skall ske så förutsätts att snöskottaren skottar bort den massa snö som han själv belastar.
- **Vindlast:** tas inte med i beräkningarna på grund av att det endast ger upphov till en lyftkraft.

Detta ger en förenklad formel som kan uttryckas:

$$E_d = \gamma_{Gj} \times \gamma_d \times G + \gamma_{Q,1} \times \gamma_d \times Q_{k,1} \qquad (4.2a)$$

Säkerhetsklasser

Det finns tre olika säkerhetsklasser (1-3) och varje säkerhetsklass tilldelas en partialkoefficient $\boldsymbol{\gamma_d}$. Koefficienten används för att säkerställa risker mot personskada och därför multipliceras denna partialkoefficient med alla ogynnsamma laster. Partialkoefficienten tas fram med hjälp av tabell 4.1 enligt [*7*].

Tabell 4.1 säkerhetsklasser

Säkerhetsklass	$\boldsymbol{\gamma_d}$	Beskrivning
1 (Låg)	0.83	Gäller då risken för personskada är relativt låg vid brott.
2 (Normal)	0.91	Gäller då risken är normal stor för personskada vid brott.
3(Hög)	1.0	Gäller då risken är hög för personskada vid brott.

Partialkoefficienter som används i lasteffekten vid ogynnsamma laster fås från Eurokod [5] och dessa koefficienter beaktar modellosäkerheter.

γ_{Gj}=$\gamma_{Gj,sup}$=1,35 (4.2b)

$\gamma_{,1}$=1,5 (4.2c)

Egentyngd (G)

Räknas ut i *OptiPrize* genom att totala vikten av ett fackverk divideras med fackverkets totala längd, då fås en linjelast med enheten [N/m]

Snöberäkningar ($Q_{k,1}$)

Snölasten vid takkonstruktioner utgör den största belastningen vilket medför att snölasten sätts till den varierande huvudlasten i lasteffekten ($Q_{,1}$) [7]. Dimensionering av snölast på tak skall uttryckas enligt ekvation 4.3.

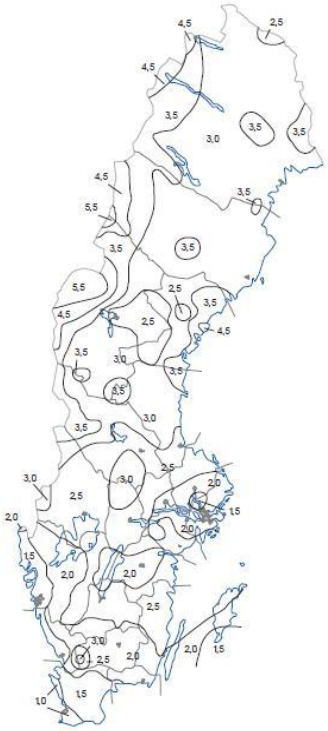
$$S = \mu_i * C_e * C_t * S_k \qquad (4.3)$$

μ_i = bestäms av formfaktorn och tas ur tabell 4.2 enligt [7]. Normalt används μ_1 och i de fall snöfickor kan förekomma används μ_2. Vanligen väljs inte μ_i mindre än 0,8.

C_e = bör tilldelas värdet 1,0 om inte annat anges, annars se tabell för värden angående byggnadens omgivning [7].

C_t = används där termisk energi minskar snölasten, alltså tak med hög värmegenomgångskoefficient (>1 W/$m^2 * K$) såsom endast glastak utan isolering. Vanligen sätts C_t = 1,0 [7].

S_k = beror storleken av nederbörden i form av snö på olika platser och tas från figur 4.1 enligt [7].



Snözon	Snölastens grundvärde s_k, (kN/m^2)
1	1,0
1,5	1,5
2	2,0
2,5	2,5
3	3,0
3,5	3,5
4,5	4,5
5,5	5,5

Figur 4.1 Storlek av nederbörd i form av snö

Tabell 4.2 $\boldsymbol{\mu_i}$ beroende av taklutningen

$\alpha(vinkeln)$	$0^\circ \leq \alpha < 30^\circ$	$30^\circ \leq \alpha < 60^\circ$	$\alpha \geq 60^\circ$
μ_1	0.8	$\frac{0.8 \times (60 - \alpha)}{30}$	0.0

4.2 Kontroll av balkar

Kontroll av balkarnas hållfasthet beskrivs i detta kapitel. Kontroll sker enligt olika ekvationer beroende på om balkarna är tryckta eller dragna.

Kontroll av knäckning vid tryckta balkar

I en fackverkskonstruktion med stela leder, alltså knutpunkter som är svetsade eller har ett skruvförband med minst två skruvar, uppstår det moment i alla balkelement. Det största momentet som uppkommer i fackverket sker i överliggande balkar på grund av den utbredda lasten [4][8]. Då balkar är belastade med både tryckande krafter och böjande moment brukar det sammansatta belastningsfallet benämnas med andra ordningens moment och kontrolleras enligt ekvation 4.4.

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \times N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \times \frac{M_{Ed,y}}{M_{Rd,y}} \leq 1 \qquad (4.4)$$

De krafter och moment som de enskilda balkarna i fackverket klarar av att ta upp fås med hjälp av materialparametrar och balkens utformning (tvärsnitt) [4][8]. Dessa krafter och moment kan uttryckas enligt ekvation 4.5 och 4.6.

$$N_{Rd} = f_y \times A_{net} \qquad (4.5)$$

$$M_{Rd,y} = f_y \times W_{el} \qquad (4.6)$$

N_{Ed} och $M_{Ed,y}$ uppkommer i balkarna på grund av den pålagda lasteffekten. Resterande faktorer i ekvation 4.4 tas upp i appendix 3.

Kontroll av dragna balkar

En kontroll av dragna balkar är betydligt enklare än en kontroll av tryckta balkar [4][8]. Även i detta fall krävs att både moment och normalkraften kontrolleras enligt ekvation 4.7.

$$\frac{M_{Ed}}{W} + \frac{N_{Ed}}{A} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \qquad (4.7)$$

Beskrivning av ekvation 4.7 i appendix 3.

4.3 Beräkningar sammanfogningsmetoder

För att få ett förband i knutpunkterna mellan överliggande, underliggande och mellanliggande balkar i fackverket krävs att dessa element sammanfogas. De metoder som främst används för detta är svetsning och skruvning. För att säkerställa att dessa förband håller har beräkningsmodeller gjorts enligt Eurokod.

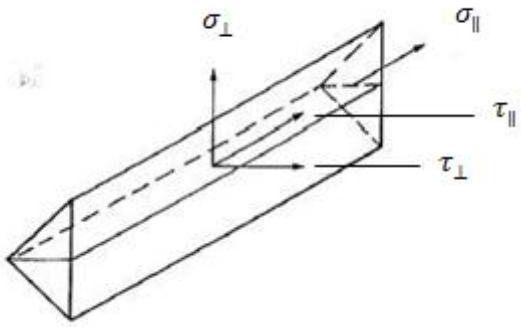
Svets

Svetsning är den vanligaste typen av sammanfogningsmetod vid fackverkskonstruktioner och för att få en godtycklig hållfastighet som krävs enligt svensk standard har ekvation 4.8 tagits fram [9], se appendix 3 för vidare förklaring av ekvation 4.8.

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \times \left(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2\right)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \times \gamma_{M2}} \tag{4.8}$$

$\sigma_{\perp}\ och\ \tau_{\perp}$ enligt figur 4.2 kan försummas då endast skjuvning och spänning tas upp i den parallella leden. Detta ger den förenklade ekvationen:

$$\tau_{\parallel} \times \sqrt{3} \leq \frac{f_u}{\beta_w \times \gamma_{M2}} \tag{4.9}$$



Figur 4.2 Spänningar och töjningar i en svetsfog.

Skruv

Såsom i svetsning krävs även att skruvförband kontrolleras mot brott, det görs med ekvation 4.10 [9].

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4 \times F_{t,Rd}} \leq 1 \tag{4.10}$$

$F_{v,Ed}$ och $F_{t,Ed}$ fås ur programmet *OptiPrize* och uppstår på grund av den pålagda lasteffekten [9]. Skruvens tillåtna belastning innan brott bestäms av ekvation 4.11 och 4.12, detta beskrivs ytterligare i appendix 3.

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \times f_{ub} \times A}{\gamma_{M2}} \tag{4.11}$$

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \times f_{ub} \times A_s}{\gamma_{M2}} \tag{4.12}$$

Hålkantsbrott vid skruvar

Hålkantsbrott sker oftast då skruvförbandet är placerat allt för nära kanten [9], för att kontrollera detta används ekvation 4.13.

$$\frac{F_{b,Ed}}{F_{b,Rd}} \leq 1 \tag{4.13}$$

$F_{b,Ed}$ är den kraft det enskilda skruvförbandet är belastad med [9]. Den totala kraften varje hål kan belastas med beskrivs i ekvation 4.14, detta beskrivs ytterligare i Appendix 3.

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \times \alpha_b \times f_u \times d \times t}{\gamma_{M2}} \tag{4.14}$$

5. FACKVERK

De olika typer av fackverk och balkar som behandlas är valda efter vad som är vanligast för takstolar av stål och beskrivs här.

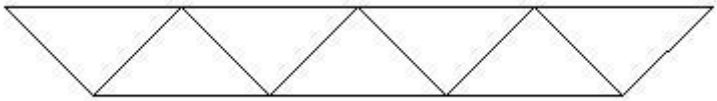
5.1 Fackverkstyper

Tak kan byggas upp med primär- och sekundärbalkar enligt figur 5.1, där primärbalkarna håller upp sekundärbalkarna. Balkarna kan vara antingen vanliga balkar eller fackverk. I bilden är primärbalken en vanlig balk och sekundärbalken är ett parallellfackverk. Det som behandlas här är sekundärbalkar i form av parallellfackverk och sadelfackverk, båda typerna med och utan vertikaler. Fackverkstyperna är beskrivna nedan.

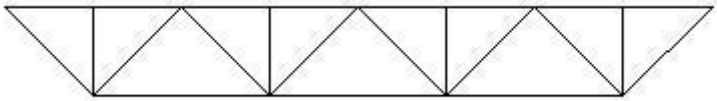
Figur 5.1 Primär- och sekundärbalkar

Parallellfackverk

Typiskt för fackverkstypen är att över och underliggare är parallella, fackverket finns med och utan vertikaler, se figur 5.2 och 5.3. Allt från plana tak till pulpettak med nästan valfri taklutning kan göras med denna fackverkstyp. Vertikalerna minskar risken för knäckning i den övre balken som utsätts för både tryckkrafter och moment. Risken för knäckning minskar eftersom den kritiska längden, alltså den fria längden mellan två knutpunkter, där tryckkrafter uppstår minskas. Primärbalk är den balken som bär upp sekundärbalkarna. Parallellfackverk kan även användas som primärbalkar.

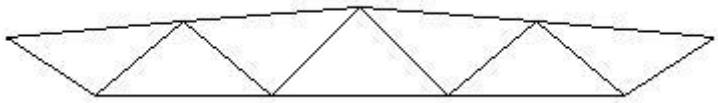


Figur 5.2 Parallellfackverk

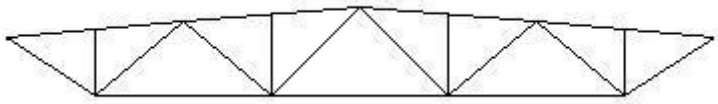


Figur 5.3 Parallellfackverk med vertikaler

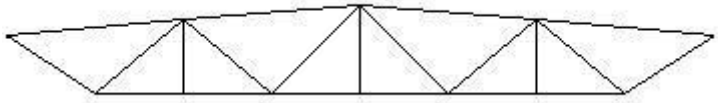
Sadelfackverk
Sadelfackverk används till byggnader med brutet tak, fackverket finns med och utan vertikaler se figur 5.4–5.6. Fackverk med vertikaler används för att minska risken för knäckning, enligt samma princip som i parallellfackverket. Dessutom finns ett fackverk med vertikalerna placerade upp från mitten av de underliggande fria balksektionerna. Detta fackverk är inte optimalt ur nedböjningssynpunkt men kan vara bra då man vill hänga saker i fackverkets underliggande balk.



Figur 5.4 Sadelfackverk

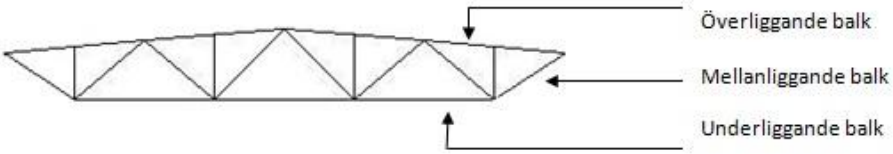


Figur 5.5 Sadelfackverk med vertikaler



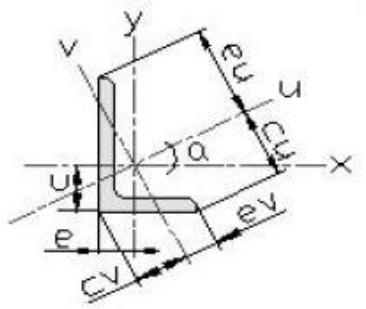
Figur 5.6 Specialsadelfackverk

5.2 Balkar
De olika balkarna som används i fackverket, på platser enligt figur 5.7. Vinkelstång för över- och underliggande balkar samt UPE-balk och VKR-hålprofiler för mellanliggande balkar, alltså diagonaler och vertikaler.



Figur 5.7 De olika balkarna i ett sadelfackverk

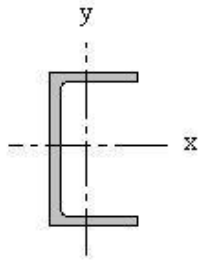
Vinkelstång
Vinkelstång liknar en rät vinkel och är en varmvalsad, homogen stålstång, se figur 5.8. Vinkelstång används här i dimensionerna liksidig 70x70x7 - 200x200x18 mm samt oliksidig 80x40x6 - 200x100x16 mm och finns i längder 6000 alt 12000 mm [10]. De oliksidiga stängerna står upp i fackverket, alltså sker böjningen runt x-axeln, så de yttröghetsmoment och böjmotstånd som används är I_x och W_x. Vinkelstång har imperfektionsklass b, som används enligt Eurokod [8].



Figur 5.8 Vinkelstång

UPE-Balk

UPE står för Europa-Profil U och är den vanligaste U-balkprofilen, se figur 5.9. Flänsarna är parallella även invändigt till skillnad från t.ex. UNP-balken. UPE-balk används här i dimensionerna 80x50 - 400x115 mm och längd 10100 - 15100 mm [10]. Balken ligger ner i fackverket antingen med öppningen uppåt eller nedåt, vilket ger att böjning sker runt x-axeln, så de yttröghetsmoment och böjmotstånd som används är I_y och W_y. UPE-balk har imperfektionsklass c, som används enligt Eurokod [8].

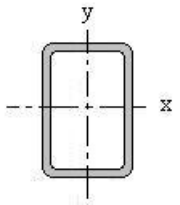


Figur 5.9 UPE-Balk

VKR-Hålprofil

VKR står för Varmformade KonstruktionsRör och är den vanligaste rörprofilen i byggsammanhang, se figur 5.10. Profilen formas vid stålets normaliseringstemperatur, alltså runt 830-950°C vilket gör att profilen kan ha snäva hörnradier utan att spricka. Stålet i profilen får även en homogen materialstruktur med likformiga egenskaper i hela tvärsnittet samt att materialet saknar inbyggda restspänningar [10].

VKR-hålprofil används här i dimensionerna kvadratiska 40x40x2,5 - 160x160x12,5 mm samt rektangulära 50x30x2,5 - 200x100x16,0 mm och finns i längd 6000 - 12000 mm. De rektangulära VKR-hålprofilerna ”står upp” i fackverket, alltså sker böjningen runt x-axeln, så de yttröghetsmoment och böjmotstånd som används är I_x och W_x. VKR-Hålprofil har imperfektionsklass a, som används enligt Eurokod [8].



Figur 5.10 VKR-Hålprofil

6. PROGRAMMET

Ett program *OptiPrize* har skapats som räknar ut kostnaden för Lecor att producera fackverk enligt angivna specifikationer och gällande regler.

6.1 Programstruktur

Data tas emot i användargränssnittet och skickas till huvudprogrammet, enligt tabell 6.1. Från huvudprogrammet skickas data ut till sex funktionsfiler som returnerar sina delsvar tillbaka till huvudprogrammet en i taget. Från huvudprogrammet skickas alltså data ut till första funktionsfilen, den returnerar sina delsvar sen skickas data ut till den andra, tredje och så vidare. När den sista funktionsfilen returnerat sina svar till huvudprogrammet, så skickas de tillbaka till användargränssnittet som redovisar dem tydligt för användaren. De sex funktionsfilerna är Geometri, Profil, Laster, Lösare, Krafter och Kostnad och behandlar data enligt tabell 6.2 och beskrivs nedan.

Tabell 6.1 Dataflöde mellan användargränssnittet och huvudprogrammet

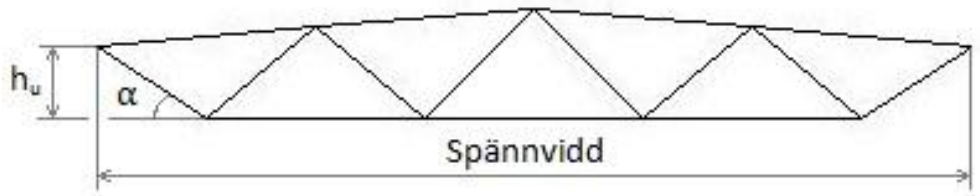
Skickas från användargränssnittet till huvudprogrammet	**Tas emot av användargränssnittet från huvudprogrammet**
Fackverkstyp	Maximala utböjningen
Över- och underliggande balk	Antal knutpunkter
Mellanliggande balk	Totala kostnaden
Monteringsmetod	Målningskostnad
Snözon	Kostnad för svetsning/bultning
Säkerhetsfaktor	Materialkostnad balkar
Spännvidd	Över- och underliggande balk
Höjd	Mellanliggande balk
C/C-mått	Tid för montering
Taklutning	Vikt på fackverk
Begynnelsevinkel	Målningsyta
Övrig last	
Målningspris	
Stålpris över- och underliggande balk	
Stålpris mellanliggande balk	
Materialkostnad montering	
Timkostnad montering	

Tabell 6.2 In- och utdata i funktionsfiler i huvudprogrammet

Funktionsfiler	**Indata**	**Utdata**
Geometri	Typ av fackverk Spännvidd Höjd h_u Begynnelsevinkel Taklutning	Antal Knutpunkter Frihetsgrader Koordinater Längd på balkar Antal balkar av varje typ Graf över fackverket
Profil	Valda profiler	Materialdata
Laster	Typ av fackverk C-C-mått Antal knutpunkter Takvinkel Snölast Övrig last Längd på balkar Antal balkar av varje typ Säkerhetsfaktor	Totala lasten som verkar på fackverket
Lösare	Typ av fackverk Koordinater Antal knutpunkter Frihetsgrader Materialdata Totala lasten som verkar på fackverket	Utböjning, krafter och moment i stängerna Graf över det deformerade fackverket
Krafter	Typ av fackverk Utböjning, krafter och moment i stängerna Valda profiler Längd på balkar Antal knutpunkter	Hållfasthetsresultat
Kostnad	Typ av fackverk Antal knutpunkter Höjd h_u Aktuella prisuppgifter Längd på balkar Antal balkar av varje typ Typ av infästning	Kostnader/fackverk

Geometri

Antalet knutpunkter i fackverket avgörs av spännvidden, taklutningen, höjden (h_u) och begynnelsevinkeln (α). Spännvidden, höjden (h_u) samt begynnelsevinkeln (α) visas i figur 6.1.



Figur 6.1 Spännvidd, höjd och begynnelsevinkel i ett sadelfackverk

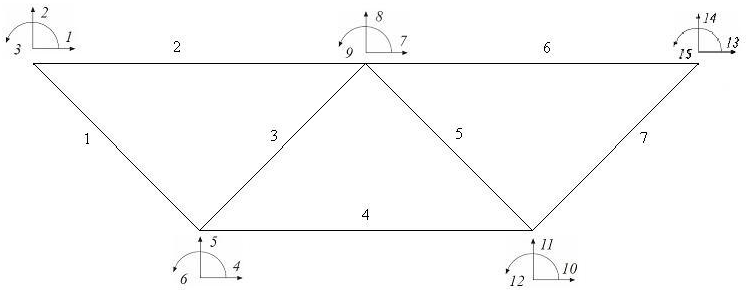
Modulusfunktionen används i *MATLAB* för att få rätt antal knutpunkter i varje fackverkstyp. Sambanden som måste gälla för varje typ av fackverk redovisas i tabell 6.3 där k är antalet knutpunkter. Med hjälp av antalet knutpunkter kan antalet stänger räknas ut. Programmet räknar varje fri del mellan två knutpunkter som en stång.

Tabell 6.3 Samband för knutpunkter i olika typer av fackverk

Typ av fackverk	**Samband för knutpunkter**
Parallellfackverk	mod(k-1,2)=0
Sadelfackverk	mod(k-1,4)=0
Parallellfackverk med vertikaler	mod(k-1,3)=0
Sadelfackverk med vertikaler	mod(k-1,6)=0
Specialsadelfackverk	mod(k,6)=0

När programmet vet hur många stänger fackverket består av så byggs fackverket upp stång för stång. Är det ett parallellfackverk bygger programmet upp fackverket från vänster till höger. Sadelfackverk byggs upp från mitten och ut åt höger och vänster, eftersom sadelfackverk är symmetriska kring sin lodräta centrumaxel.

Varje stång får ett nummer efter ordningen som den placeras ut. Varje knutpunkt får tre frihetsgrader, förskjutning i x- och y-led samt vridning, enligt figur 6.2.



Figur 6.2 Frihetsgraderna på ett parallellfackverk

Profil
Profilfunktionen läser in vilka profiler som används och skickar ut materialdata till programmet. Materialdata som hämtas är elasticitetmodul, yttröghetsmoment, böjmotstånd, tvärsnittsarea, vikt och mantelyta per meter. Materialdata är hämtade från BE-groups "lilla röda" [10].

Laster
Linjelasten lasten över varje fackverk räknas ut genom att lägga ihop det bärande fackverkets egenvikt med linjelasten. Linjelasten fås då c-c-måttet multipliceras med den totala utbredda lasten. Den totala utbredda lasten fås genom att lägga ihop snölasten med den övriga utbredda lasten enligt Eurokod. Den totala linjelasten läggs sedan över alla övre stänger i fackverket. Lastfunktionen är även förberedd för att räkna med punktlaster.

Lösare
Utböjningen och krafterna i stängerna räknas ut med hjälp av funktionerna från *CALFEM*. Funktionen *beam2e* skapar en styvhetsmatris och en lastvektor för varje balkelement i strukturen med hjälp av fackverkets koordinater, balkarnas materialdata samt den totala linjelasten. Styvhetsmatrisen och lastvektorn läses in med funktionen *assem* tillsammans med en matris där frihetsgraderna för varje stång definerats för att skapa en global styvhetsmatris och en global lastvektor för hela stukturen.

Vilka frihetsgrader som skall vara låsta defineras i en randvillkorsmatris. I randvillkorsmatrisen har förskjutningarna i x- och y-led sats till 0 i fackverkets ändpunkter samt rotationen sats till 0 i samtliga inre knutpunkter. Förskjutningarna har sats till 0 för att simulera att fackverket sitter fast och rotationen har sats till 0 för att simulera stela leder. Funktionen *solveq* skapar en global lösningsvektor med den globala styvhetsmatrisen, den globala lastvektorn samt randvillkorsmatrisen som indata.

Den globala lösningsvektorn läses in i funktionen *extract* tillsammans med matrisen där frihetsgraderna för varje stång definerats för att räkna ut förskjutningarna. Krafter och moment räknas ut med funktionen *beam2s* som har fackverkets koordinater, balkarnas materialdata, balkarnas förskjutningar samt den totala linjelasten som indata. Det deformerade fackverket ritas upp med funktionen *eldisp2* med hjälp av fackverkets koordinater och balkarnas förskjutningar.

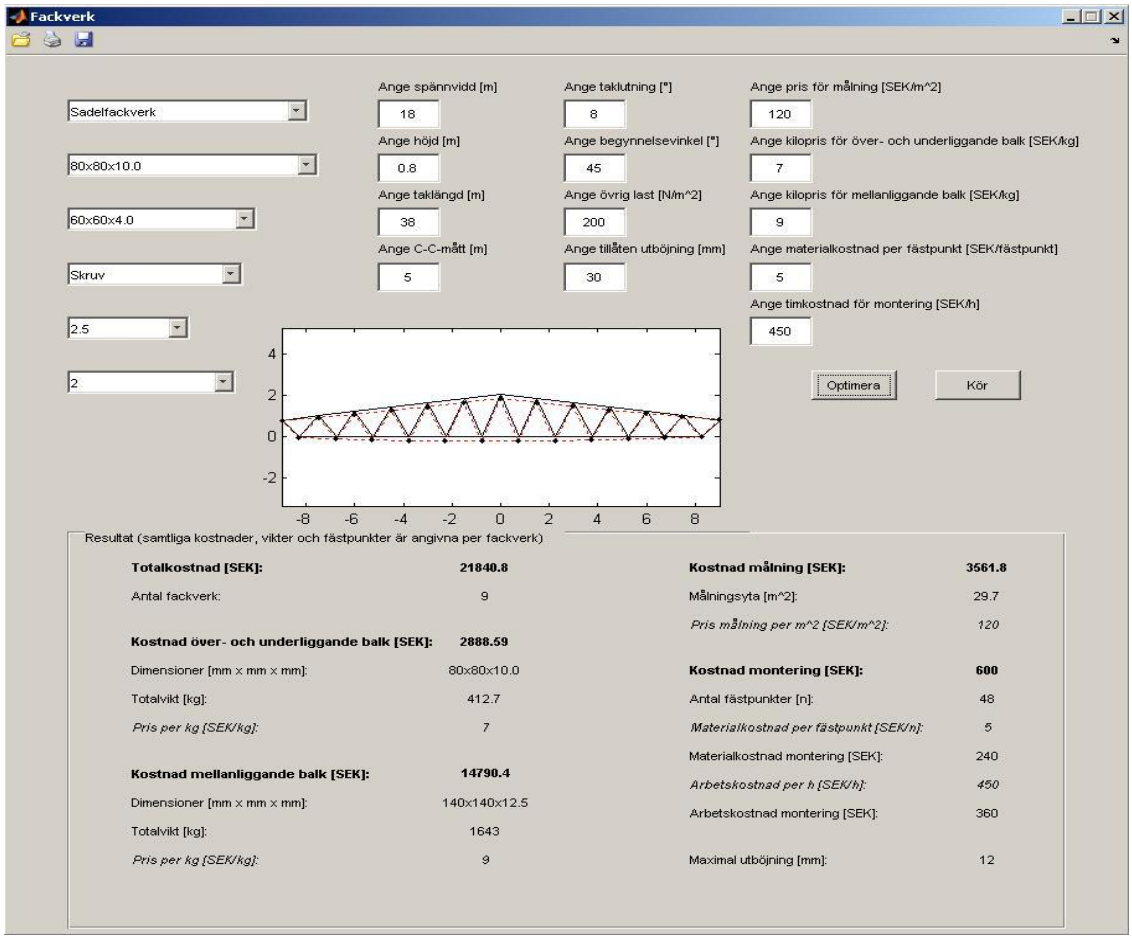
Krafter
I kraftfunktionen kontrolleras att balkarna i fackverket uppfyller kraven för drag och tryck enligt eurokod.

Kostnad
Den totala kostnaden per fackverk fås genom att lägga ihop materialkostnaden med kostnaderna för målning och montering. Kilopris på balkar, målning per kvadratmeter, materialkostnad per fästpunkt samt timkostnad för montering läses in ifrån användargränssnittet. Tid per svets och skruv har uppmätts på Lecor till 2 respektive 1 min.

6.2 Användargränssnitt

Användargränssnittet är en funktionsfil i *MATLAB* som skapar dialogrutor där användaren ges möjlighet att ange indata och få resultat och plottar till svar. *MATLAB* genererar programkod, så kallade ”callbacks”, efter önskad design och funktionalitet. Varje svarsruta, tryckknapp och scrollmeny i dialogrutan har en ”callback” som registrerar indata och använder denna på önskat sätt. På samma sätt fungerar rutorna för utdata. Beräkningsfunktionerna skickar information till utdatans ”callbacks” som behandlar informationen och presenterar den för användaren genom utskrift i dialogrutan.

Under Kör- och Optimeraknappens callbacks har all indata lagts. Programmet behandlar inga indata förrän någon av dessa knappar aktiverats. När alla indata angivits får användaren välja mellan att exekvera programmet med eller utan optimeringsfunktionen, se figur 6.3. Väljer användaren att exekvera programmet utan optimeringsfunktionen, ”Kör-knappen”, utför programmet beräkningar med angivna indata och resultat returneras. Om gällande byggnormer och eller ställda deformationskrav ej uppnås skickar programmet ett meddelande för att göra användaren uppmärksam på detta. Om användaren istället väljer att exekvera programmet med optimeringsfunktionen, ”Optimera-knappen”, utför programmet beräkningar med angivna värden men returnerar en kostnads- och hållfasthetsoptimerad konstruktion. Valda profiler till över- och underliggande balk och mellanliggande balk kan ha ändrats på grund av profilpriser och eller materialdata.



Figur 6.3 Användargränssnittet

Inparametrarna i *OptiPrize* är:

- Fackverkstyp
- Över- och underliggande balk
- Mellanliggande balk
- Monteringsmetod
- Snözon
- Säkerhetsfaktor
- Spännvidd
- Höjd
- Taklängd
- C/C-mått
- Taklutning
- Begynnelsevinkel
- Övrig last
- Tillåten nedböjning
- Målningspris
- Stålpris över- och underliggande balk
- Stålpris mellanliggande balk

- Materialkostnad montering
- Timkostnad montering

För att användaren snabbt ska kunna få en uppskattning av fackverkets kostnad, konstruktion och hållfasthet har fasta värden för begynnelsevinkel, övrig last, stålpris, målningskostnad samt material- och timkostnad för montering förprogrammerats. Då kostnadsparametrarna varierar med tiden och laster och vinklar är konstruktionsvariabler ges användaren möjlighet att ändra dessa. Alla inparametrar behandlas i användargränssnittsprogrammet och skickas därefter till funktionsfilen Optimering. Funktionsfilen Optimering skickar parametrarna vidare till andra funktionsfiler där de används för beräkningar och utdata returneras till användargränssnittsprogrammet. Här skrivs resultaten ut och en deformationsbild visas.

Utparametrarna i *OptiPrize* är:

- Totalkostnad
- Antal fackverk
- Kostnad över- och underliggande balk
- Dimensioner över- och underliggande balk
- Totalvikt över-och underliggande balk
- Kilopris över- och underliggande balk
- Kostnad mellanliggande balk
- Dimensioner mellanliggande balk
- Totalvikt över-och underliggande balk
- Kilopris mellanliggande balk
- Målningskostnad
- Målningsyta
- Pris målning per kvadratmeter
- Kostnad montering
- Antal fästpunkter
- Materialkostnad per fästpunkt
- Materialkostnad montering
- Arbetskostnad per timma
- Arbetskostnad montering
- Maximal deformation

Där samtliga värden för kostnader, vikter och antal fästpunkter är angivna per fackverk.

6.4 Test mot annan programvara

För att verifiera *OptiPrize* har en körning gjorts i *STAAD Pro V8i* av beräkningsingenjörer på ingenjörskonsultföretaget COWI i Göteborg. Körningen har gjorts med ett sex meter långt parallellfackverk med vinkelstål som över- och underliggande balkar och UPE-balkar som

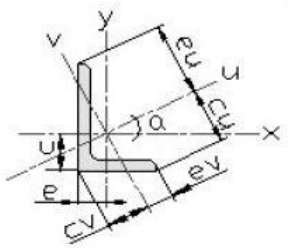
mellanliggande balkar, enligt figur 6.4. En jämt utbredd last på 10 kN/ m^2 har lagts på fackverket. Eftersom *OptiPrize* räknar med snölast samt egentyngden av fackverket så har en lägre övrig last lagts på i *OptiPrize* för att den totala lasten skall bli samma som den som lagts på i *STAAD*. Hela resultatet från *STAAD* finns i appendix 5.

Figur 6.4 Fackverket som räknats på uppritat i 3D

Snözonen har satts till 1 då fås snölasten enligt Eurokod till $1000 \times 0{,}8 \times 1{,}5 = 1\,200\ N/m^2$ då taklutningen satts till 0 grader. Säkerhetsfaktorn har satts till 3 vilket gör att lasten multipliceras med 1, enligt Eurokod. *OptiPrize* har räknat ut att fackverket väger 234,33 kg vilket ger en linjelast på $234{,}33 \times 9{,}81/6 = 383{,}135\ \ N/m$. Övrig last multipliceras även med 1,35 i *OptiPrize* enligt Eurokod. Den övriga lasten som skall läggas på i *OptiPrize* fås då till $(10\,000 - 1\,200 - 383{,}135)/1{,}35 = 6\,234{,}71\ N/m^2$.

STAAD vinklar automatiskt vinkelstängerna så att maximalt yttröghetsmoment erhålls, det innebär att vridning sker kring v-axeln enligt figur 6.5. *OptiPrize* däremot vinklar vinkelstängerna på av Lecor angivet sätt se figur 6.4. Det innebär en vridning kring x-axeln enligt figur 6.5. Vid jämförelsen mellan OptiPrize och *STAAD* har samma yttröghetsmoment använts. Yttröghetsmomentet i *OptiPrize* ändrades tillfälligt för att erhålla en rättvis jämförelse. Om värdet på yttröghetsmomentet i *OptiPrize* inte hade ändrats hade en utböjning på 1,68 mm erhållits.

Resultatet av körningarna i *OptiPrize* och *STAAD* redovisas i tabell 6.2.



Figur 6.5 Vinkelstång

Tabell 6.2 Resultat från OptiPrize och STAAD

	OptiPrize	***STAAD***
Maximal utböjning [mm]	0,881	0,918
Över-/Underliggande balkar		
Maximal normalkraft [kN]	43,611	43,612
Maximal tvärkraft [kN]	11,881	11,663
Maximalt moment [kNm]	4,2404	3,844
Mellanliggande balkar		
Maximal normalkraft [kN]	31,411	31,171
Maximal tvärkraft [kN]	0,467	0,535
Maximalt moment [kNm]	0,478	0,519

Jämförelsen visar att resultaten av beräkningar utförda i OptiPrize stämmer väl överens med resultaten beräkningar utförda i STAAD.

7. SLUTSATS

Enligt problemdefinitionen skall ett verktyg som beräknar produktionskostnader och ger underlag till produktionen av fackverkskonstruktioner i stål skapas. Resultatet är programmet *OptiPrize*.

OptiPrize beräknar kostnaderna för material, montering och målning och presenterar dessa tillsammans som en total produktionskostnad. Underlag till produktion presenteras med en konstruktionsbild av ett fackverk och antal fästpunkter samt balkdimensioner som visas i text.

Valet av program för att lösa problemdefinitionen stod i första hand mellan beräkningsprogrammen *MATLAB* och *Excel*. Då *MATLAB* ger möjlighet att använda "toolboxes" valdes *MATLAB* att programmera *OptiPrize* i. Av särskilt stor vikt till programvalet är "toolboxen" *CALFEM* vars funktionsfiler används i *OptiPrize* till att räkna ut krafter, moment och utböjning i balkar.

För att göra programmet användarvänligt skapades ett grafiskt användargränssnitt. Den största fördelen med att använda det grafiska gränssnittet är att alla indata och utdata väljs och visas i en och samma dialogruta. Detta gör programmet enkelt att hantera och resultaten efter exekvering enkla att avläsa. Dessutom kan indata enkelt ändras och nya exekveringar genomföras i samma dialogruta. Möjlighet att spara och skriva ut resultat av senaste exekvering finns.

Optimeringsfunktionen i *OptiPrize* är valbar för att ge användaren större frihet att välja konstruktionsparametrar. Optimeringsfunktionen föreslår en fackverkskonstruktion med minsta möjliga profildimensioner som uppfyller gällande byggnormer och ställda deformationstoleranser. Det innebär att stålvikten och mantelarean minimeras. Dessa två parametrar har stor påverkan på fackverkets totalkostnad. Även om stål- och målningskostnader utgör större delen av fackverkets totalkostnad finns dock fler faktorer som påverkar totalkostnaden. Till exempel är antalet knutpunkter och monteringsmetoden önskvärda och möjliga parametrar att tillägga och behandla i optimeringsfunktionen.

Fackverkstyperna som behandlas är parallellfackverk och sadelfackverk, båda med och utan vertikala balkar. Totalt fyra fackverkstyper. Dessa typer har valts i samråd med Lecor och är de vanligaste fackverkstyperna för takstolar. Fler typer kan tänkas läggas till vid vidare utveckling av programmet.

Möjlighet att välja mellan svets- och skruvförband som monteringsmetod finns. Dessa parametrar påverkar fackverkets hållfasthet och monteringskostnad dock hållfasthetsberäknas båda som svetsförband. Hållfasthetsberäkningar för skruvförband är komplicerade att koda i programmet och har därför valts bort. En exekvering av *OptiPrize* med skruvförband som indata innebär alltså en kostnadskalkyl för fackverk med skruvförband men hållfasthetsberäkningarna är ej korrekta. Beräkningar för skruvförband presenteras i appendix 3. Att integrera dessa beräkningar i *OptiPrize* är önskvärt vid vidare utveckling av programmet.

De in- och utdata som behandlas framgår i tabell 7.1, dessa har valts i samråd med Lecor. Möjlighet att ange punktlast som indata vore önskvärt men på grund av tidsbrist fick denna funktion uteslutas. *OptiPrize* är dock anpassat för punktlastsfunktionen och kan läggas till vid vidare utveckling av programmet.

Tabell 7.1 In- och utdata i OptiPrize

Indata	**Utdata**
Fackverkstyp	Uppritat fackverk med deformationsplot
Balktyp och dimension	Antal fackverk
Monteringsmetod	Kostander
Snözon	Uträknade dimensioner på balkar
Säkerhetsfaktor	Vikt
Spännvidd	Målningsyta
Höjd	Antal fästpunkter
Taklängd	Maximal nedböjning
C-C-mått	
Taklutning	
Begynnelsevinkel	
Övrig last	
Tillåten utböjning	
Prisuppgifter	

De största kostnaderna vid produktion av fackverk som *OptiPrize* behandlar är stål- och målningskostnader. Optimeringsfunktionen i *OptiPrize* styrs därför av stålpriser samt balkprofilernas dimensioner och materialegenskaper. Programmet föreslår en konstruktion med minsta möjliga balkdimensioner som svarar mot gällande byggnormer och ställda deformationstoleranser. Minimering av balkdimensioner ger minimerad vikt, och därmed lägre stålkostnader, samt minimerad mantelarea vilket minskar målningskostnader. Då stål-, målnings- och monteringskostnader kan tänkas variera med tiden ges användaren möjlighet att, i programmet, enkelt ändra dem.

Deformationerna och balkkrafterna som *OptiPrize* generar har validerats mot beräkningar utförda i programmet *STAAD Pro V8i* av beräkningsingenjörer på ingenjörskonsultföretaget COWI i Göteborg. Maximal normalkraft, tvärkraft och moment i fackverkets samtliga balkar samt den maximala utböjningen har jämförts. Jämförelsen visar att resultaten stämmer väl överrens.

REFERENSER

Böcker:
1. Jönsson,P.(2008) *MATLAB*: beräkningar inom teknik och naturvetenskap. Andra upplagan. Malmö: Studentlitteratur.
2. Department of Mechanics and Materials (1999) *CALFEM*, A finite element toolbox to *MATLAB* Version 3.3. Lund.
3. Al-Emrani,M.(2008) Bärande konstruktioner Del 1. Göteborg: Chalmers tekniska högskola
4. Al-Emrani,M.(2011) Bärande konstruktioner Del 2. Göteborg: Chalmers tekniska högskola

Eurokoder:
5. Swedish standard instiut(2002) Eurokod: Grundläggande dimensioneringsregler för bärverk. SS-EN 1990
6. Swedish standard instiut(2002) Eurokod 1: Laster på bärverk. SS-EN 1991-1-1
7. Boverket(2010) Eurokodhandboken– allmänna grunder och laster. EKS6
8. European committee for standardization(2005) Eurokod 3:Dimensionering för stålkonstruktioner. EN 1993-1-1
9. European committee for standardization(2005) Eurokod 3:Dimensionering för stålkonstruktioner. EN 1993-1-8

Internetkälla:
10. Stål- och rörprofiler, BE Group
http://www.begroup.com/sv/BE-Group-sverige/Produkter/Stal_ror/

APPENDIX 1

Här beskrivs grunderna i MATLAB kort med förklaring av några vanliga funktioner.

MATLAB

Namnet *MATLAB* står för matrix laboratory och syftar till att alla variabler i språket är matriser med reella eller komplexa element. Storleken på en matris anges enligt m × n, där m är antal rader och n är antal kolonner. En matris definieras genom att man tilldelar den ett värde på följande sätt:
variabelnamn = uttryck

Några logiska operatorer som använts i programmet
For-loopar

I en for-loop repeteras en satsgrupp så länge en styrvariabel löper i en styrmängd. Den generella formen av en for-sats är:
for *styrvariabel = styrmängd*
satsgrupp
end
Styrvariabeln sätts till det första värdet i styrmängden och satserna i satsgruppen utförs. Styrvariabeln stegas upp och sätts till det andra värdet i styrmängden varefter satserna i satsgruppen utförs och så vidare till det att styrvariabeln löpt igenom hela styrmängden. *MATLAB* hoppar då ur for-loopen och fortsätter exekvera kommande delar av programmet.
Ofta används kolonnotation för att definiera styrmängden, varvid for-loopen får formen:
for *styrvariabel = a:h:b*
satsgrupp
end
Här är a startvärdet för styrvariabeln, h steglängden och b slutvärdet.
If-satser
En if-sats utförs en eller flera satser eller kommandon i en satsgrupp om det logiska uttrycket är sant. En allmän form av en if-sats är
if *logiskt uttryck*
satsgrupp 1
else
satsgrupp 2
end
Här utförs satserna i satsgrupp 1 om det logiska uttrycket är sant, annars utförs satserna i satsgrupp 2. Därefter hoppar *MATLAB* ur if-satsen och fortsätter exekvera övriga delar av programmet.
Mera omfattande villkorskonstruktioner kan ofta skrivas som elseif-satser. En elseif-sats på allmän form är
if *logiskt uttryck 1*
satsgrupp 1

elseif *logiskt uttryck 2*
satsgrupp 2
...
elseif *logiskt uttryck n*
satsgrupp n
else
satsgrupp
end

I denna konstruktion kommer satserna i satsgrupp 1 att utföras om det logiska uttrycket 1 är sant med an satserna i satsgrupp 2 utförs om det logiska uttrycket 1 är falskt och uttrycket två är sant osv. Om alla de logiska uttrycken är falska utförs satserna i satsgrupp.

while-loopar

I en while-loop repeteras en satsgrupp så länge ett logiskt villkor är sant. En while-loop har formen

while *logiskt uttryck*
satsgrupp
end

Först beräknas värdet av det logiska uttrycket. Om det är sant utförs satserna satsgrupp varefter det logiska uttrycket beräknas igen och så vidare tills det att det logiska uttrycket bli falskt. *MATLAB* hoppar då ur while-loopen och fortsätter exekvera satserna som följer efter loopen.

Några matematiska funktioner som använts i programmet

mod(x,y) beräknar resten med tecken vid heltalsdivisionen x/y.
floor(x) ger avrundning nedåt till heltal.
ceil(x) ger avrundning uppåt till heltal.

APPENDIX 2

Här beskrivs de funktioner från *CALFEM* som används i programmet.

CALFEM

Funktionerna från *CALFEM* som används är *beam2e, assem, solveq, extract, beam2s, eldisp2*.

beam2e skapar en styvhetsmatris (Ke) och en lastvektor (fe) för varje balkelement i strukturen. Indata till funktionen är balkelementens koordinater (ex, ey), balkens materialdata (ep) och den utbredda lasten (eq) som belastar elementet. Materialdatan består av elasticitetsmodulen (E), Tvärarean (A) och Yttröghetsmomentet (I). Den utbredda lasten anges i en matris med lasten i x-led och y-led var för sig.

assem skapar en global styvhetsmatris (K) och en global lastvektor (f) för hela stukturen. Indata till funktionen är en matris som anger vilka frihetsgrader ändpunkterna varje balkelement har (edof), den globala styvhetsmatrisen (K), styvhetsmatrisen (Ke), den globala lastvektorn (f) samt lastvektorn (fe). Varje knutpunkt har tre frihetsgrader, förskjutning i x- och y-led samt rotation.

solveq skapar en global lösningsvektor (a) som senare används för att räkna ut förskjutningar. Indata till funktionen är den globala styvhetsmatrisen (K), den globala lastvektorn (f) samt en randvillkorsmatris.

extract skapar förskjutningsmatris (ed) med förskjutningar för varje balkelement. Indata till funktionen är elementfrihetsgraderna (edof) och den globala lösningsvektorn (a).

beam2s skapar tre matriser med data i ett valt antal snitt i varje balkelement. Den första matrisen innehåller krafterna (es), de andra förskjutningarna i x- och y-led (edi) och de tredje koordinaterna i x-led för varje valt snitt (eci). Indata till funktionen är balkelementens koordinater (ex, ey), balkens materialdata (ep), förskjutningsmatrisen (ed), utbredda lasten (eq) och antal snitt i varje balkelement (n). Kraftmatrisen (es) innehåller normalkrafter, tvärkrafter och moment.

eldisp2 ritar den deformerade strukturen. Indata till funktionen är balkelementens koordinater (ex, ey) samt förskjutningsmatrisen (ed).

APPENDIX 3

Här redovisas hållfasthetsberäkningarna för krafter i balkar samt förband i knutpunkter ingående.

Krafter i balkar

För att kontrollera att alla balkar uppfyller hållfasthetskrav med god säkerhet skall balkkrafter beräknas med hjälp av Eurokod. De faktorer och variabler som används finns beskrivna i Beteckningar sida 1 och 2 i rapporten.

Kontroll av knäckning vid trycklast:

Då balkar belastas med tryckande krafter och moment krävs att en kontroll görs enligt ekvation A1, denna ekvation tas även upp i kapitel 4.

$$\frac{N_{Ed}}{\frac{\chi_y \times N_{Rd}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \times \frac{M_{Ed,y}}{M_{Rd,y}} \leq 1 \qquad \text{(A1)}$$

De krafter och moment som de enskilda balkarna i fackverket klarar av att ta upp fås med hjälp av materialparametrar och balkens utformning. Dessa krafter och moment kan uttryckas enligt ekvation A2 och A3.

$$N_{Rd} = f_y \times A_{net} \qquad \text{(A2)}$$

$$M_{Rd,y} = f_y \times W_{el} \qquad \text{(A3)}$$

N_{Ed} och $M_{Ed,y}$ uppkommer i balkarna på grund av den pålagda lasteffekten.

Vid axiell tryckkraft används reduktionsfaktorn χ_y. Denna fås genom en lämplig slankhetsparameter λ och bör bestämmas utifrån relevant knäckningskurva enligt:

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \chi_y \leq 1 \qquad \text{(A4)}$$

Där:

$$\Phi = 0.5 \times [1 + \alpha \times (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2] \qquad \text{(A5)}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\pi} \times \sqrt{\frac{f_y}{E}} \qquad \text{(A6)}$$

$$\lambda = \frac{L_c}{i} \qquad \text{(A7)}$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \qquad \text{(A8)}$$

Imperfektionsfaktorn α motsvarar den knäckningskurva som erhålls i tabell A1.

Tabell A1 imperfektionsfaktor

Imperfektionsklass	a	b	C
Imperfektionsfaktor	0.21	0.34	0.49

Partialkoefficienten γ_{M1} används då instabilitet i elementen kan uppstå. För byggnader rekommenderas γ_{M1} =1,0.

Interaktionsfaktorn k_{yy} beror på vilken metod som väljs. Den metod som används för fackverkskonstruktioner behandlar moment och tryckkrafter. Interaktionsfaktorn uttrycks enligt ekvation A8.

$$k_{yy} = C_{my} \times C_{mLT} \times \frac{\mu_y}{1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \qquad \text{(A9)}$$

C_{my} och C_{mLT} erhålls enligt böjmomentdiagrammet mellan stagade relevanta punkter enligt följande:

$$C_{my} = 1 + \left(\frac{\pi^2 \times E \times I \times |\delta|}{L^2 |M_{Ed,y}|}\right) \times \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} \qquad \text{(A10)}$$

C_{mLT} =1,0

$N_{cr,y}$ är den kritiska elastiska lasten för det relevanta bucklingsfallet baserat på tvärsnittets egenskaper.

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \times E \times I}{L_{cr}^2} \qquad \text{(A11)}$$

Hjälpfaktorn μ_y används i interaktionsfaktorn och uttrycks enligt ekvation A12.

$$\mu_y = \frac{1-\frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1-\chi_y \times \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \qquad \text{(A12)}$$

Kontroll av dragna stänger:

En kontroll av dragna balkar är betydligt enklare än en kontroll av tryckta balkar. Även i detta fall krävs att både moment och normalkraften kontrolleras enligt ekvation A13.

$$\frac{M_{Ed}}{W} + \frac{N_{Ed}}{A} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \qquad \text{(A13)}$$

Förband i knutpunkter

Förband i knutpunkterna mellan överliggande, underliggande och mellanliggande balkar i ett fackverk skapas genom att dessa element sammanfogas. De vanligaste sammanfogningsmetoderna är svets- och skruvförband. De faktorer och variabler som används finns beskrivna i Beteckningar sida 1 och 2 i rapporten.

Svetsförband:

För att fastställa en godkänd hållfasthet i ett svetsförband har ekvation 14 tagits fram enligt Eurokod.

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3 \times \left(\tau_{\perp}^2 + \tau_{/\!/}^2\right)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \times \gamma_{M2}} \qquad \text{(A14)}$$

$\sigma_{\perp}\ och\ \tau_{\perp}$ kan försummas då endast skjuvning och spänning tas upp i parallell led. Detta ger den förenklade ekvationen:

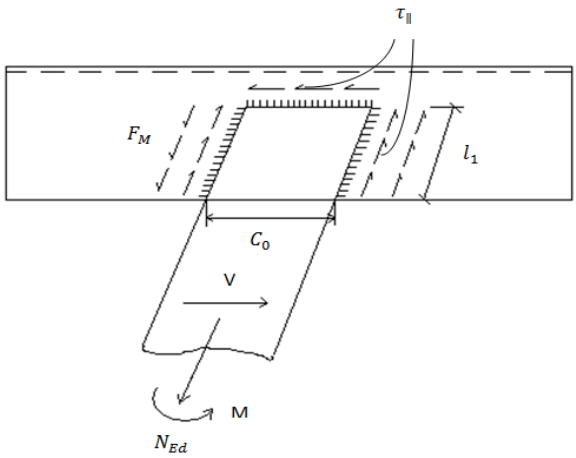
$$\tau_{/\!/} \times \sqrt{3} \leq \frac{f_u}{\beta_w \times \gamma_{M2}} \qquad \text{(A15)}$$

$\tau_{/\!/}$ bestäms med hjälp av figur A2 där kraftjämvikt tillämpas, se ekvation A16.

$$\tau_{/\!/} = \frac{N_{Ed}}{2 \times a \times l_1} + \frac{F_M}{a \times l_1} \qquad \text{(A16)}$$

Där:

$$F_M = \frac{M_{Ed}}{C_0} \qquad \text{(A17)}$$



Figur A1 Svetsförband

Skruvförband:

Liksom för svetsförband krävs även att skruvförband kontrolleras mot brott, det görs med ekvation A18.

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4 \times F_{t,Rd}} \leq 1 \qquad \text{(A18)}$$

Där

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \times f_{ub} \times A}{\gamma_{M2}} \qquad \text{(A19)}$$

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \times f_{ub} \times A_s}{\gamma_{M2}} \qquad \text{(A20)}$$

Partialkoefficienten γ_{M2} används då spänningsbrott kan uppstå i tvärsnittet. För byggnader rekommenderas $\gamma_{M2} = 1{,}25$.

$\alpha_v = 0{,}6$ då hållfasthetsklasserna i skruven är 4,6, 5,6, eller 8,8 om skjuvsnittet går genom gängan. För övriga hållfasthetsklasser är $\alpha_v = 0{,}5$.

Reduktionsfaktorn k_2 beaktar bland annat effekterna av bändning. $k_2 = 0{,}9$

$F_{v,Ed}$ och $F_{t,Ed}$ fås från programmet och uppstår på grund av den pålagda lasteffekten.

Hålkantsbrott vid skruvar:
Säkerheten mot hålkantsbrott kontrolleras enligt ekvation A21.

$$\frac{F_{b,Ed}}{F_{b,Rd}} \leq 1 \qquad \text{(A21)}$$

$F_{b,Ed}$ är den kraft det enskilda skruvförbandet belastas med. Den totala kraften varje hål kan belastas med beskrivs i ekvation A22.

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \times \alpha_b \times f_u \times d \times t}{\gamma_{M2}} \qquad \text{(A22)}$$

Variablerna α_b, α_d, k_1 och k_1 som används i ekvation A22 bestäms med hjälp av mått ur figur A3.

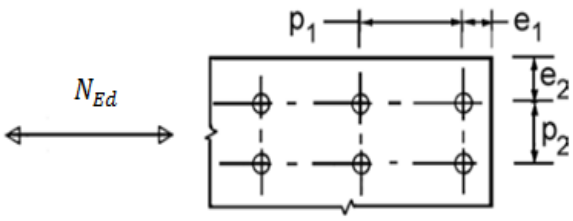
$$\alpha_b = min\left(\alpha_d\,, \frac{f_{ub}}{f_u}\,, 1\right) \qquad \text{(A23)}$$

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3 \times d_0} \text{ (för brott mellan hål och kant)} \qquad \text{(A24)}$$

$$\alpha_d = \frac{p_1}{3 \times d_0} - \frac{1}{4} \text{ (för brott mellan två hål)} \qquad \text{(A25)}$$

$$k_1 = min\left(2.8 \times \frac{e_2}{d_0} - 1.7\,, 2.2\right) \text{ (för brott mellan hål och kant)} \qquad \text{(A26)}$$

$$k_1 = min\left(1.4 \times \frac{p_2}{d_0} - 1.7\,, 2.2\right) \text{ (för brott mellan två hål)} \qquad \text{(A27)}$$



Figur A2 Skruvförband

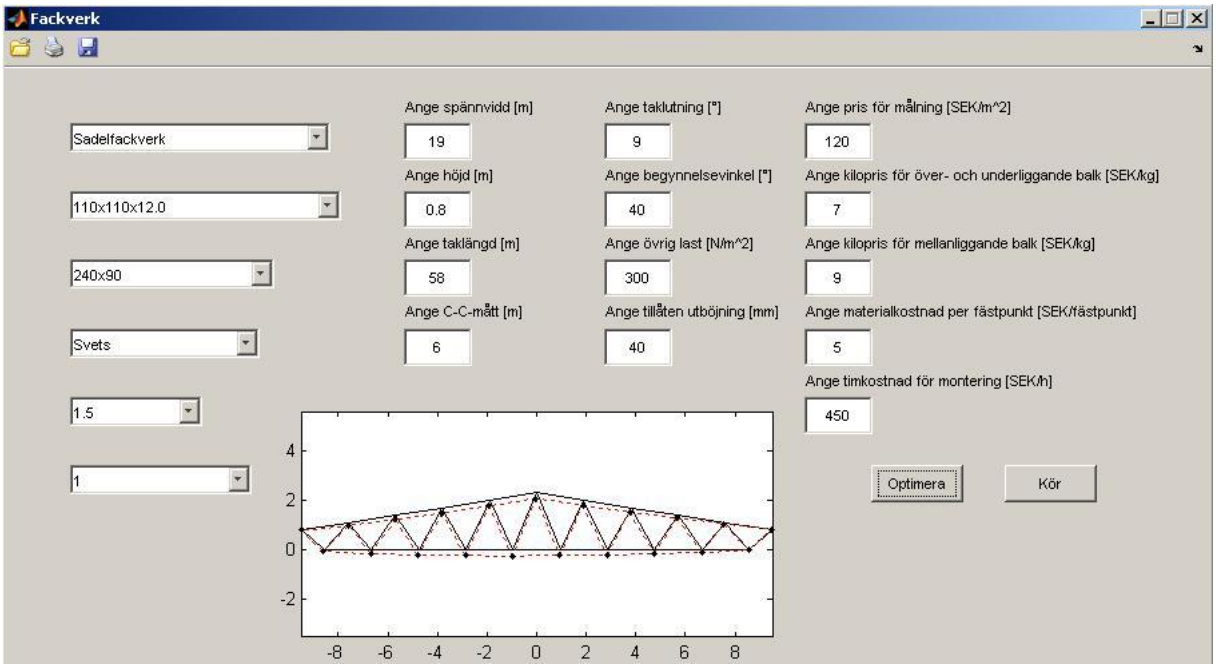
APPENDIX 4

Här redogörs för hur programmet *OptiPrize* används.

Användarhandbok

Då *OptiPrize* startas visas en dialogruta där användaren ges möjlighet att ange ett antal indata, se figur A4. Samtliga indata måste anges för att exekvering av programmet skall vara möjlig. Om någon indata ej anges eller anges med otillåtna värden skickar programmet ett felmeddelande för att uppmärksamma användaren.

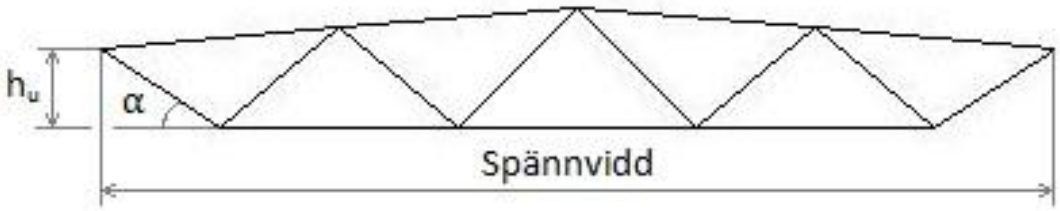
OBSERVERA att kommatecken ej kan användas i indatan, använd punkt för att ange decimaltal!



Figur A3 indata användargränssnitt

- Välj fackverk. Ange fackverkstyp. Fem typer av fackverk kan väljas.
- Välj över- och underliggande balk. Ange profil för över- och underliggande balk. Ett antal balkprofiler för över- och underliggande balkar kan väljas.
- Välj mellanliggande balk. Ange profil för mellanliggande balk. Ett antal balkprofiler för mellanliggande balkar kan väljas.
- Välj monteringsmetod. Ange fackverkets monteringsmetod. Svets- eller skruvförband kan väljas. Observera att programmet hållfasthetsberäknar både svets- och skruvförband som svetsförband. Väljs skruvförband erhålls en korrekt kostnadskalkyl för fackverk med skruvförband men hållfastheten bör tas med försiktighet.
- Välj snözon. Ange snözon enligt Eurokod standard.
- Välj säkerhetsfaktor. Ange säkerhetsfaktor enligt Eurokod standard.
- Ange spännvidd. Ange fackverkets spännvidd i meter, se figur A5. Parametern ”spännvidd” är den samma som aktuell byggnadsbredd.

- Ange höjd. Ange fackverkets höjd (hu) i meter, se figur A5. Parametern höjd är fackverkets utgångshöjd.
- Ange taklängd. Ange aktuell byggnads taklängd i meter. Denna parameter påverkar tillsammans med ”C-C-mått” antalet fackverk.
- Ange C-C-mått. Ange centrum-centrum-mått mellan fackverken i meter. Denna parameter påverkar tillsammans med ”taklängd” antalet fackverk.
- Ange taklutning. Ange aktuell byggnads taklutning i grader.
- Ange begynnelsevinkel. Ange vinkel mellan under- och mellanliggande balk (α) i grader, se figur A5. Denna vinkel påverkar antalet knutpunkter. En begynnelsevinkel på 40° är förprogrammerad och vinklar mellan 30° och 60° rekommenderas.
- Ange övrig last. Ange utbredd last utöver snölast och fackverkets egentyngd i Newton, till exempel last från isolering och takplåt.
- Ange tillåten utböjning. Ange maximala tillåtna deformation av fackverket i millimeter.
- Ange pris för målning. Ange aktuellt pris för målning per kvadratmeter i SEK. Ett pris på 120 SEK per kvadratmeter är förprogrammerat.
- Ange kilopris för över- och underliggande balk. Ange aktuellt stålpris per kilogram för över- och underliggande balkar i SEK. Ett pris på 7 SEK per kilogram är förprogrammerat.
- Ange kilopris för mellanliggande balk. Ange aktuellt stålpris per kilogram för mellanliggande balkar i SEK. Ett pris på 9 SEK per kilogram är förprogrammerat.
- Ange materialkostnad per fästpunkt. Ange aktuell kostnad per fästpunkt för skruv eller svets i SEK. En kostnad på 5 SEK per fästpunkt är förprogrammerat.
- Ange timkostnad för montering. Ange aktuell kostnad per timma för montering i SEK. En kostnad på 450 SEK per timma är förprogrammerat.

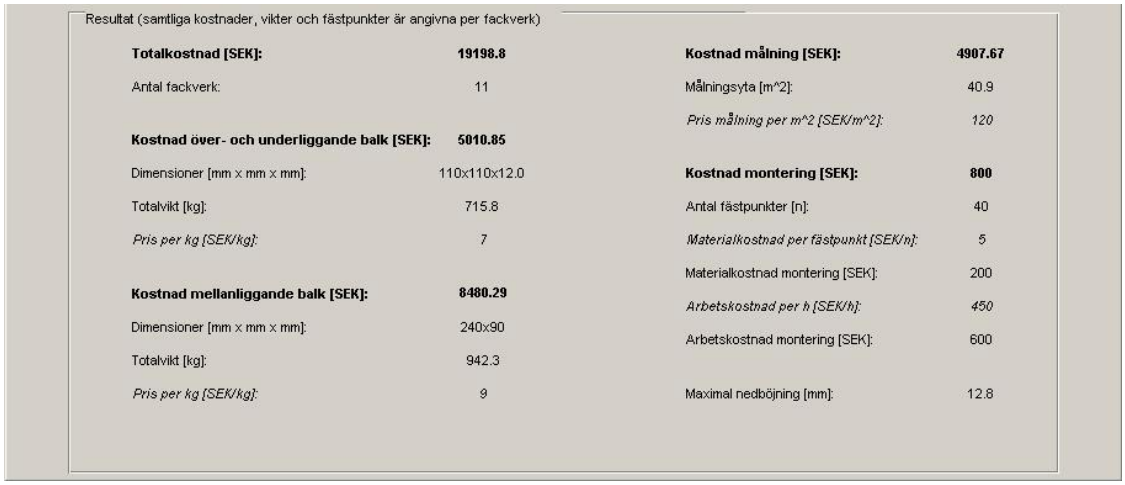


Figur A4 betteckningar i ett sadelfackverk

Då samtliga indata är angivna med tillåtna värden väljer användaren exekveringsmetod. Tryckknappen ”Optimera” aktiverar programmets optimeringsfunktion. Denna väljer minsta möjliga balkdimensioner som uppfyller gällande byggnormer och ställda deformationstoleranser. Om någon eller några av dessa ej uppfylls skickar programmet ett felmeddelande som beskriver felets karaktär och föreslår eventuella ändringar i indatan. Tryckknappen ”Kör” exekverar programmet med angivna indata.

Efter exekvering returnerar *OptiPrize* en konstruktionsbild med deformationsbild samt ett antal utdata, se figur A6. Deformationsbilden anges som de streckade linjerna i konstruktionsbilden, se figur A5. Följande utdata presenteras:

- Totalkostnad. Totala produktionskostnaden per fackverk i SEK.
- Antal fackverk. Totala antalet fackverk till aktuell byggnation.
- Kostnad över- och underliggande balk. Kostnaden för över- och underliggande balkar per fackverk i SEK.
- Dimensioner över- och underliggande balk. Om optimeringsfunktionen har använts visas föreslagen balkdimension i millimeter.
- Pris per kg över- och underliggande balk. Aktuellt stålpris för över- och underliggande balkar per kilogram i SEK.
- Kostnad mellanliggande balk. Kostnaden för mellanliggande balkar per fackverk i SEK.
- Dimensioner mellanliggande balk. Om optimeringsfunktionen har använts visas föreslagen balkdimension i millimeter.
- Pris per kg mellanliggande balk. Aktuellt stålpris för mellanliggande balkar per kilogram i SEK.
- Kostnad målning. Totala kostnaden för målning per kvadratmeter per fackverk i SEK.
- Målningsyta. Totala mantelarean per fackverk i kvadratmeter.
- Pris målning per m^2. Aktuellt målningspris per kvadratmeter i SEK.
- Kostnad montering. Totala kostnaden för montering per fackverk i SEK.
- Antal fästpunkter. Totala antalet fästpunkter per fackverk.
- Materialkostnad per fästpunkt. Kostnaden för svets eller skruvförband per fästpunkt i SEK.
- Materialkostnad montering. Totala materialkostnaden per fackverk i SEK.
- Arbetskostnad per h. Personalkostnad per timma i SEK.
- Arbetskostnad montering. Totala arbetskostnaden för montering i SEK.
- Maximal utböjning. Maximala utböjningen av fackverket i millimeter.


Resultat (samtliga kostnader, vikter och fästpunkter är angivna per fackverk)

Totalkostnad [SEK]:	**19198.8**	**Kostnad målning [SEK]:**	**4907.67**
Antal fackverk:	11	Målningsyta [m^2]:	40.9
		Pris målning per m^2 [SEK/m^2]:	*120*
Kostnad över- och underliggande balk [SEK]:	**5010.85**		
Dimensioner [mm x mm x mm]:	110x110x12.0	**Kostnad montering [SEK]:**	**800**
Totalvikt [kg]:	715.8	Antal fästpunkter [n]:	40
Pris per kg [SEK/kg]:	*7*	*Materialkostnad per fästpunkt [SEK/n]:*	*5*
		Materialkostnad montering [SEK]:	200
Kostnad mellanliggande balk [SEK]:	**8480.29**	*Arbetskostnad per h [SEK/h]:*	*450*
Dimensioner [mm x mm x mm]:	240x90	Arbetskostnad montering [SEK]:	600
Totalvikt [kg]:	942.3		
Pris per kg [SEK/kg]:	*9*	Maximal nedböjning [mm]:	12.8

Figur A5 utdata användargränssnitt

APPENDIX 5

Resultat av beräkning i *STAAD*

Software licensed to Cowi AB	Job No	Sheet No 1	Rev
	Part		
Job Title	Ref		
	By	Date 14-Apr-11	Chd
Client	File Fackverk Nr2.std	Date/Time 15-Apr-2011 14:33	

Job Information

	Engineer	Checked	Approved
Name:			
Date:	14-Apr-11		

Structure Type	SPACE FRAME

Number of Nodes	7	Highest Node	8
Number of Elements	11	Highest Beam	13

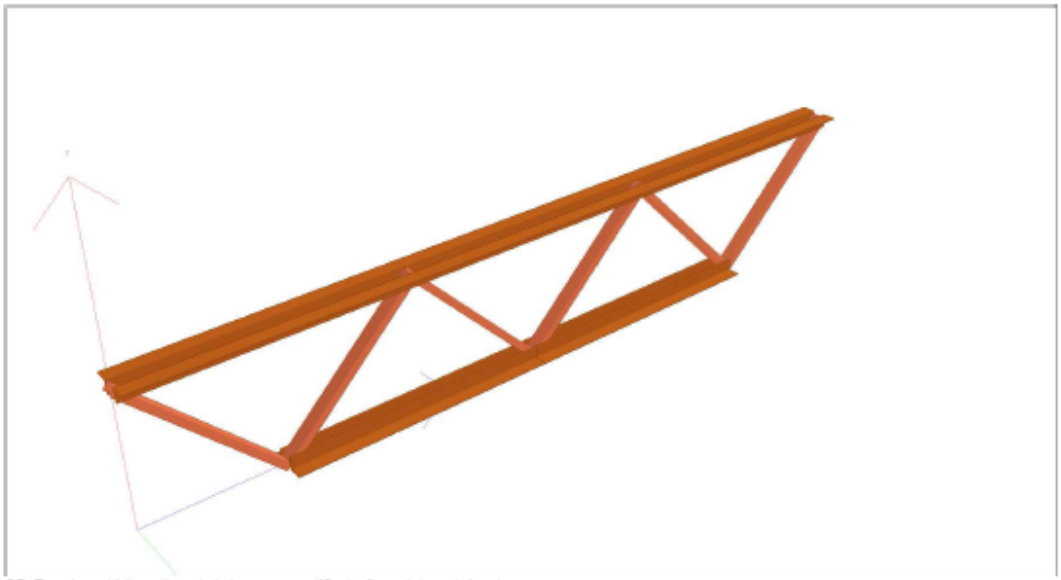
Number of Basic Load Cases	1
Number of Combination Load Cases	0

Included in this printout are data for:

All	The Whole Structure

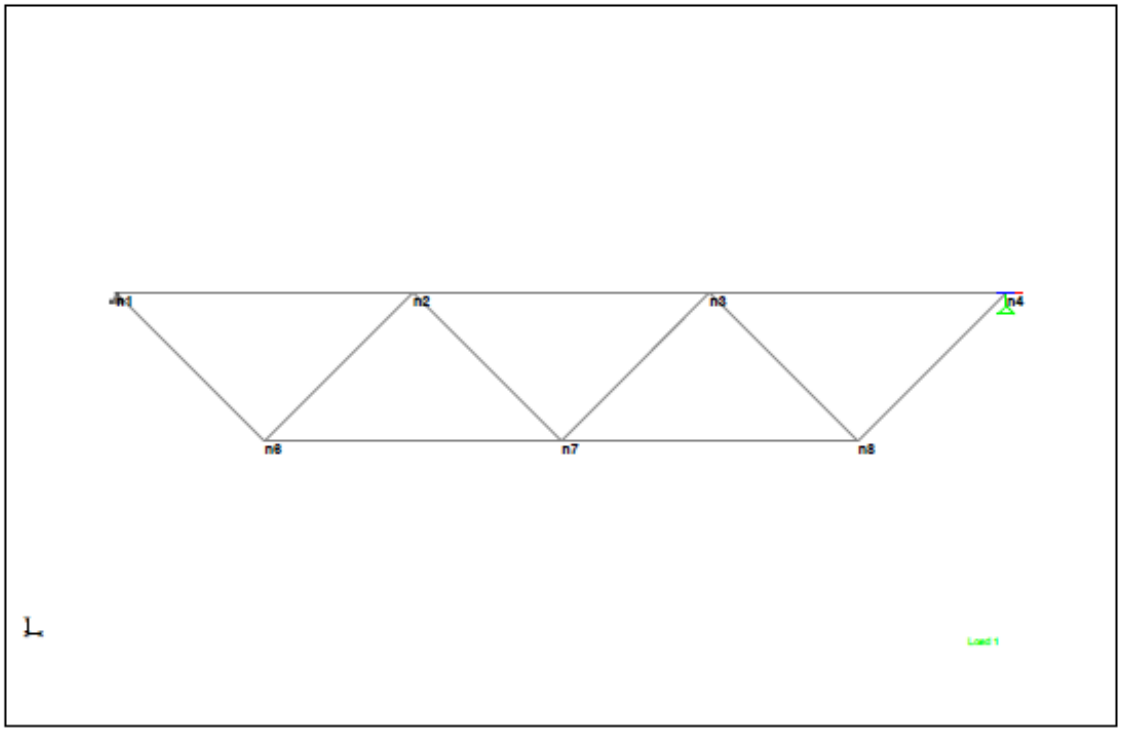
Included in this printout are results for load cases:

Type	L/C	Name
Primary	1	PERMANENT LAST



3D Rendered View (Input data was modified after picture taken)

Print Time/Date: 15/04/2011 14:40 STAAD.Pro V8i 20.07.05.15 Print Run 1 of 6



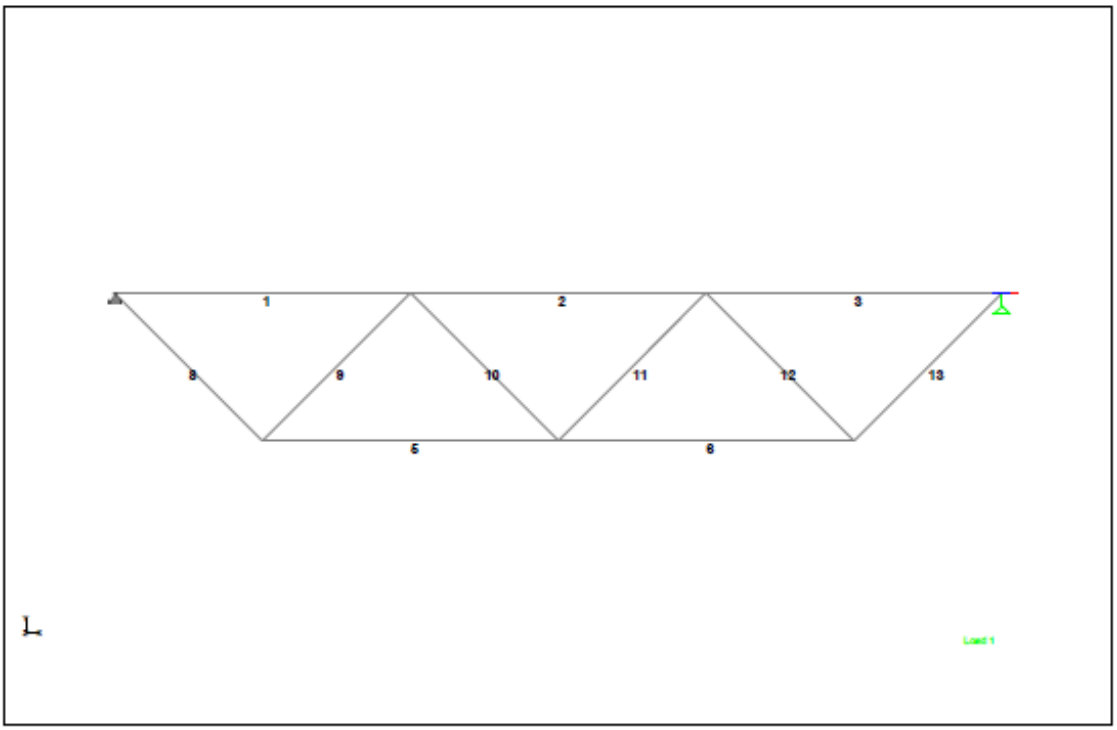
Whole Structure (Input data was modified after picture taken)

Nodes

Node	X (m)	Y (m)	Z (m)
1	0.000	1.000	0.000
2	2.000	1.000	0.000
3	4.000	1.000	0.000
4	6.000	1.000	0.000
6	1.000	0.000	0.000
7	3.000	0.000	0.000
8	5.000	0.000	0.000

Supports

Node	X (kN/mm)	Y (kN/mm)	Z (kN/mm)	rX (kN·m/deg)	rY (kN·m/deg)	rZ (kN·m/deg)
1	-	-	-	-	-	-
4	-	Fixed	Fixed	Fixed	-	-



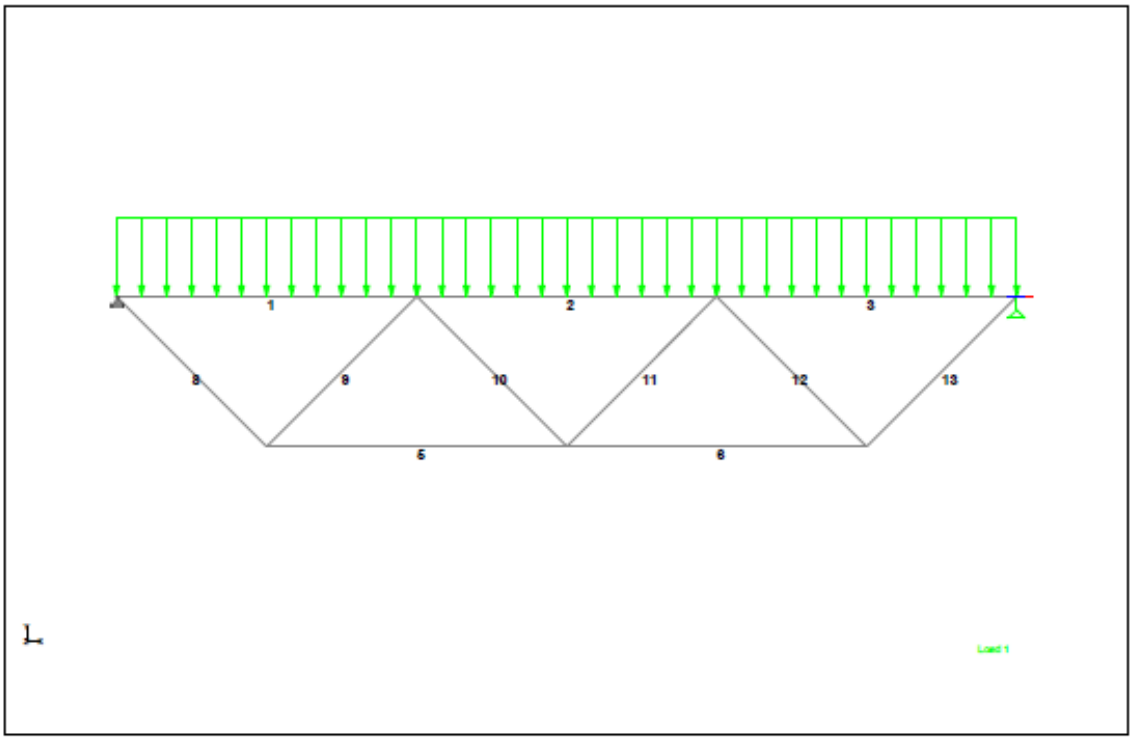
Whole Structure (Input data was modified after picture taken)

Beams

Beam	Node A	Node B	Length (m)	Property	β (degrees)
1	1	2	2.000	1	0
2	2	3	2.000	1	0
3	3	4	2.000	1	0
5	6	7	2.000	1	180
6	7	8	2.000	1	180
8	1	6	1.414	2	90
9	6	2	1.414	2	90
10	2	7	1.414	2	90
11	7	3	1.414	2	90
12	3	8	1.414	2	90
13	8	4	1.414	2	90

Section Properties

Prop	Section	Area (cm^2)	I_{yy} (cm^4)	I_{zz} (cm^4)	J (cm^4)	Material
1	L100X100X10 LD	38.400	2.74E+3	360.009	13.000	STEEL
2	UPE100	12.500	38.210	206.900	1.828	STEEL



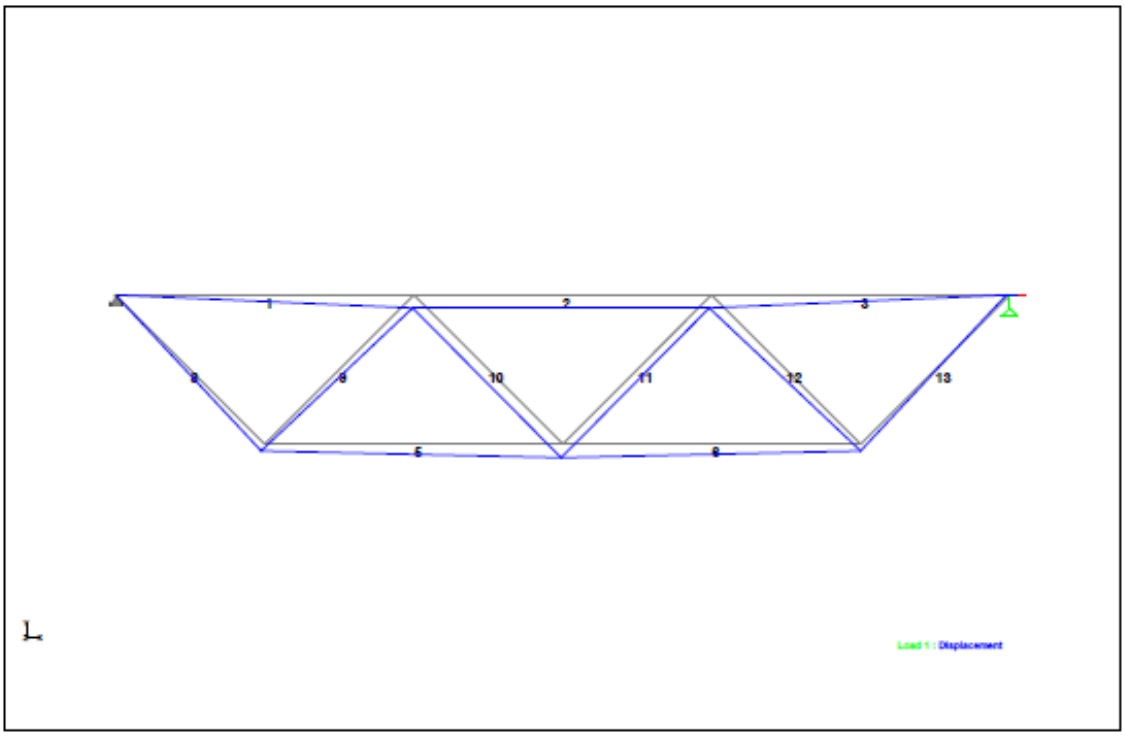
Whole Structure Loads 0.1kN:1m 1 PERMANENT LAST (Input data was modified after picture taken)

Load Generators

There is no data of this type.

Beam Loads : 1 PERMANENT LAST

Beam	Type		Direction	Fa	Da (m)	Fb	Db	Ecc. (m)
1	UNI	kN/m	GY	-10.000	-	-	-	-
2	UNI	kN/m	GY	-10.000	-	-	-	-
3	UNI	kN/m	GY	-10.000	-	-	-	-



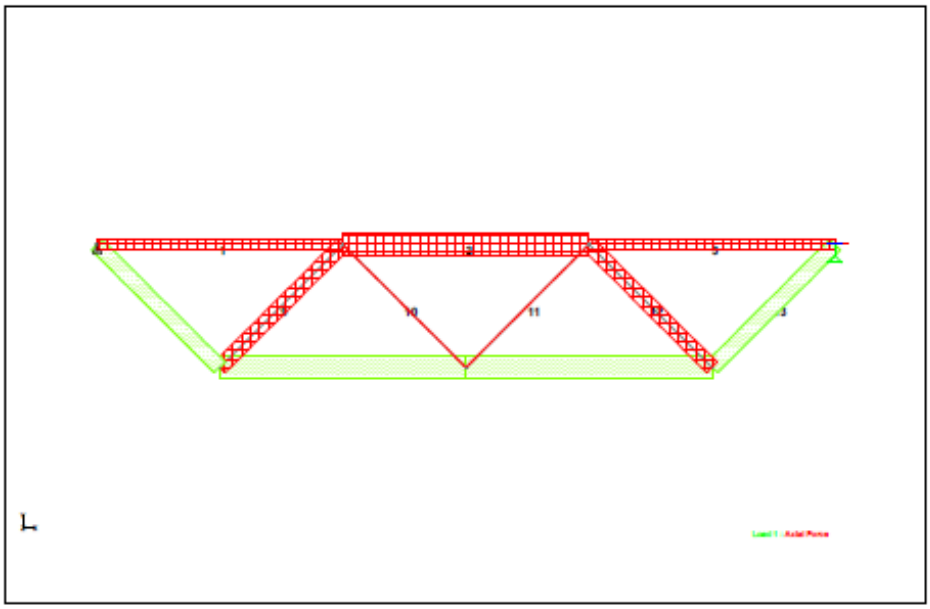
Whole Structure Displacements 10mm:1m 1 PERMANENT LAST (Input data was modified after picture taken)

Reactions

Node	L/C	Horizontal FX (kN)	Vertical FY (kN)	Horizontal FZ (kN)	Moment MX (kNm)	MY (kNm)	MZ (kNm)
1	1:PERMANEN	0.000	30.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4	1:PERMANEN	0.000	30.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Node Displacements

Node	L/C	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	Resultant (mm)	rX (rad)	rY (rad)	rZ (rad)
1	1:PERMANEN	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000	-0.000	-0.003
2	1:PERMANEN	-0.057	-0.867	0.000	0.869	-0.000	-0.000	0.000
3	1:PERMANEN	-0.167	-0.867	0.000	0.883	-0.000	0.000	-0.000
4	1:PERMANEN	-0.224	-0.000	0.000	0.224	-0.000	0.000	0.003
6	1:PERMANEN	-0.223	-0.466	0.000	0.516	-0.000	-0.000	-0.000
7	1:PERMANEN	-0.112	-0.918	0.000	0.925	-0.000	-0.000	0.000
8	1:PERMANEN	-0.001	-0.466	0.000	0.466	0.000	0.000	0.000



Whole Structure Fx 500kN:1m 1 PERMANENT LAST (Input data was modified after picture taken)

Beam End Forces

Sign convention is as the action of the joint on the beam.

			Axial	Shear		Torsion	Bending	
Beam	Node	L/C	Fx (kN)	Fy (kN)	Fz (kN)	Mx (kNm)	My (kNm)	Mz (kNm)
1	1	1:PERMANEN	22.419	8.337	0.000	0.000	-0.000	0.519
	2	1:PERMANEN	-22.419	11.663	-0.000	-0.000	-0.000	-3.844
2	2	1:PERMANEN	43.217	10.000	-0.000	0.000	-0.000	3.600
	3	1:PERMANEN	-43.217	10.000	0.000	-0.000	0.000	-3.600
3	3	1:PERMANEN	22.419	11.663	-0.000	-0.000	0.000	3.844
	4	1:PERMANEN	-22.419	8.337	0.000	0.000	0.000	-0.519
5	6	1:PERMANEN	-43.612	-0.241	-0.000	0.000	0.000	-0.156
	7	1:PERMANEN	43.612	0.241	0.000	-0.000	0.000	-0.326
6	7	1:PERMANEN	-43.612	0.241	0.000	-0.000	-0.000	0.326
	8	1:PERMANEN	43.612	-0.241	-0.000	0.000	-0.000	0.156
8	1	1:PERMANEN	-31.171	0.000	0.535	-0.000	-0.519	0.000
	6	1:PERMANEN	31.171	-0.000	-0.535	0.000	-0.238	0.000
9	6	1:PERMANEN	30.132	-0.000	-0.162	0.000	0.082	0.000
	2	1:PERMANEN	-30.132	0.000	0.162	-0.000	0.147	-0.000
10	2	1:PERMANEN	0.450	-0.000	-0.109	0.000	0.097	-0.000
	7	1:PERMANEN	-0.450	0.000	0.109	-0.000	0.057	-0.000
11	7	1:PERMANEN	0.450	0.000	0.109	-0.000	-0.057	0.000
	3	1:PERMANEN	-0.450	-0.000	-0.109	0.000	-0.097	0.000
12	3	1:PERMANEN	30.132	-0.000	0.162	-0.000	-0.147	0.000
	8	1:PERMANEN	-30.132	0.000	-0.162	0.000	-0.082	-0.000
13	8	1:PERMANEN	-31.171	-0.000	-0.535	0.000	0.238	-0.000
	4	1:PERMANEN	31.171	0.000	0.535	-0.000	0.519	-0.000