

Undersökning av stålanslutningar med Idea Statica

Eino Valkola

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen

Utbildningsprogrammet för byggnadsteknik

Vasa 2019



EXAMENSARBETE

Författare: Eino Valkola
Utbildning och ort: Byggnadsteknik, Vasa
Inriktningsalternativ/Fördjupning: Byggnadskonstruktion
Handledare: Anders Borg, Olli Hirvonen

Titel: Undersökning av stålanslutningar med Idea Statica

Datum: 27.04.2019

Sidantal: 33

Abstrakt

Detta examensarbete är ett beställningsarbete gjort åt SS-Teracon Oy. Företaget ville ha undersökt ett antal stålanslutningar med Idea Statica, vilket det hade nyligen införskaffat. Eftersom programmet var relativt nytt ville företaget se hur det fungerar med svårare anslutningar och hur spänningarna i profilerna verkligen fördelas. Företaget var intresserad av en djupare kunskap om hur anslutningarna skulle kunna optimeras och om det skulle komma fram ny information som man inte tidigare hade tagit i beaktande vid liknande beräkningar. Framför allt önskade företaget få färdiga beräkningsbottnar för att snabba upp dimensioneringen av liknande anslutningar i framtiden. Resultatet av detta examensarbete blir ett antal lätt modifieringsbara och förståeliga beräkningsbottnar gjorda i Idea Statica.

Metoder som använts i detta examensarbete är främst litteraturstudier och studier om och hur programmet Idea Statica fungerar, dess brister och programmets funktionsduglighet att skapa enkla beräkningsbottnar för anslutningar.

I examensarbetet tas det även upp allmänt om FEM-analys och mera ingående om CBFEM. En ny, unik sammanslagning som Idea Statica använder som tillämpar både FEM-analys och komponentmetoden. De undersökta anslutningarna och deras beräkningsproblematik beskrivs i korthet.

Språk: Svenska

Nyckelord: Idea Statica, anslutning, stål, FEM

OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Eino Valkola
Koulutus ja paikkakunta: Rakennustekniikka, Vaasa
Suuntautumisvaihtoehto/Syventävät opinnot: Rakennesuunnittelu
Ohjaaja: Anders Borg, Olli Hirvonen

Nimike: Teräslitosten tutkinta Idea Statica ohjelmalla

Päivämäärä: 27.04.2019

Sivumäärä: 33

Tiivistelmä

Tämä insinöörityö on tilaustyö SS-Teracon Oy:lle. kyseinen suunnittelutoimisto halusi muutaman teräslitoksen tutkittua Idea Statica-ohjelmalla minkä he olivat äskettäin hankkinut. Koska ohjelma oli melko uusi halusi yritys selvittää kuinka ohjelma toimii hankalimmissa liitoksissa ja miten jännitteet jakautuvat profiileissa. Yritys halusi syvemmän tietämyksen liitosten optimoinnista ja ennen huomaamattomista asioista joita ei aikaisemmissa laskuissa oltu huomioittu. Ennen kaikkea toivottiin valmiita laskentapohjia jotka nopeuttaisivat mitoitusta samantyyppisistä liitoksista tulevaisuudessa. Insinöörityö tuloksesta tulee muutamia Idea Staticalla tehtyjä laskentapohjia jotka ovat yksinkertaisia muokata ja ymmärtää.

Työn menetelmiin kuuluu kirjallisuustutkimuksia ja ohjelman oppimista, sen puutteita ja ohjelman toiminnallisuutta luoda helppokäyttöisiä laskentapohjia.

Insinöörityössä selitetään myös yleisesti FEM-analyysistä ja perusteellisemmin CBFEM:stä joka Idea Statican uusi, ainutlaatuinen menetelmä joka yhdistää FEM:in ja komponenttimenetelmän. Tutkitut liitokset ja niitä lakennalliset ongelmat selvitetään työssä lyhyesti.

Kieli: Ruotsi

Avainsanat: Idea Statica, rakennesuunnittelu, teräs, FEM

BACHELOR'S THESIS

Author: Eino Valkola
Degree Programme: Building Engineering, Vasa
Specialization: Structural Design
Supervisor: Anders Borg, Olli Hirvonen

Title: Investigation of steel connections with Idea Statica

Date: 27.04.2019

Number of pages: 33

Abstract

This Bachelor's thesis was ordered by SS-Teracon Oy who wanted to investigate a few steel connections with Idea Statica, an analysis software which the company recently obtained. Due to the software being quite new the company wanted to find out how it works with more complex connections and how the stresses are distributed in the profiles. The company A deeper knowledge on how the connections could be optimized and if new information would reveal itself that wasn't taken into account in earlier calculations. Above all the company wanted a set of templates for faster calculations of similar connections in the future. The result of this thesis will be a set of modifiable and easy to use templates made with Idea Statica.

Methods used in this Bachelor's thesis are literature studies and learning to use Idea Statica, its flaws and the functionality.

In this thesis there will also be content about FEM-analysis and more in-depth about CBFEM. A new, unique method used by Idea Statica consisting of FEM and the component method. The investigated connections are described briefly.

Language: Swedish

Key words: Idea Statica, structural design, steel, FEM

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund.....	1
1.2	Beställare	1
1.3	Syfte och målsättning.....	2
1.4	Avgränsningar.....	2
2	Vad är FEM?	3
2.1	Noder och förskjutningar	4
2.2	Förskjutningsmetoden.....	5
2.3	3-dimensionella element	6
3	Idea Statica	8
3.1	Idea Statica Steel.....	8
3.2	Idea Statica Concrete	8
3.3	CBFEM och dess komponenter	8
3.3.1	Material.....	9
3.3.2	Modellering av plåtar och mesh-system.....	10
3.3.3	Svetsar	11
3.3.4	Bultar	11
3.4	Analysen	12
3.4.1	Laster	14
3.4.2	Kontroller	15
4	Undersökta anslutningar	18
4.1	Första sekundär-primärfackverksanslutningen	19
4.2	Andra sekundär-primärfackverksanslutningen	19
4.3	Pelare med anslutna stag och fackverk	20
4.4	Pelare med anslutet fackverk	21
5	Resultat	29
6	Diskussion	30

7	Litteraturförteckning.....	31
7.1	Formler.....	32
7.2	Figurer.....	33

1 Inledning

Alla sorters stålanslutningar och förband går att räkna. Vissa kräver lite mera tid än andra och därför används ofta olika dimensionerings program för att snabba upp processen och således blir allt mer ekonomiskt. Enkla förband så som tvåskäriga bultförband eller två plåtar ihopsvetsade med en kälsvets går enkelt med papper och penna. När det börjar bli lite knepigare anslutningar och större laster, till exempel sekundärfackverk som ansluts till ett primärfackverk kan det löna sig att ta stöd av dataprogram som är ämnade till detta. Ett relativt nytt sådant program är Idea Statica.

1.1 Bakgrund

Sommaren 2018 jobbade jag på SS-Teracon i Vasa. Där gjorde jag också min företagsförlagda utbildning. När skolan började närma sig igen tog jag upp frågan om de skulle ha behov av ett examensarbete som beställningsarbete. Några veckor gick och det gav mig som förslag att undersöka några av deras typanslutningar med Idea Statica programmet. Inom företaget hade man ganska nyligen införskaffat denna programvara och det fanns varken tid eller mycket kunskap om detta program inom företaget. En stor fas i detta examensarbete blir att lära sig använda Idea Statica på en sådan nivå att jag vet vad som händer när programmet räknar en anslutning. Från skolan sida fick detta arbete godkänt som examensarbete och vi började fundera på vilka olika anslutningar som jag skulle undersöka. De anslutningar som jag fick som undersökningsobjekt var sådana anslutningar där man inte hade helt på klart hur de beter sig och därför har man varit på säkra sidan när man har gjort anslutningsplåtar och dylikt.

1.2 Beställare

SS-Teracon är ett konstruktionsplanerings företag som konstruerar i både stål och betong. Största delen av projekten är ändå primärt stålplanering. SS-Teracon grundades 1992 och har idag 22 anställd. Företagets huvudkontor är belägen i Tammerfors, utöver det kontoret finns ett i Vasa, Åbo och Esbo. SS-Teracon gör planeringsprojekt i hela Finland och även runt om i Norden.

1.3 Syfte och målsättning

Syftet med detta examensarbete är att undersöka ett antal anslutningar för företaget SS-Teracon. Jag kommer även att förklara lite om vad FEM-analys är och hur FEM-analysen beräknar. Resultatet blir beräkningsbottnar eller *templates* som företaget kan använda sig av vid dimensionering av liknande anslutningar i framtiden. Min förhoppning är också att lära mig programmet så bra att jag kan lära ut det åt andra inom företaget, samt få en djupare kunskap om hur stål och anslutningar beter sig vid påkänningar. Några frågor som jag hoppas få svar på under examensarbete är:

- Hur fungerar Idea Statica vid svårare anslutningar?
- Hur bra överensstämmer spänningsfördelningarna med verkligheten?
- Hur tillämpar programmet normerna?
- Hur enkelt går det att skapa beräkningsbottnar och är dessa lätt att modifiera?

1.4 Avgränsningar

Med Idea Statica kan man olika kontroller helhetskontroll, spänningskontroll, styvhetsanalys, delarnas kapacitet och buckling. I detta examensarbete gör jag endast en helhetskontroll av anslutningarna. Med andra ord kontrolleras ståldelarnas placering, svetsarnas och bultarnas utnyttjandegrader med Idea Statica för att se om anslutningarna beter sig på väntat sätt och om de skulle gå att optimeras. Dessutom ville SS-Teracon se om programmet klarar av att beräkna svårare anslutningar och om dessa är svåra att skapa.

2 Vad är FEM?

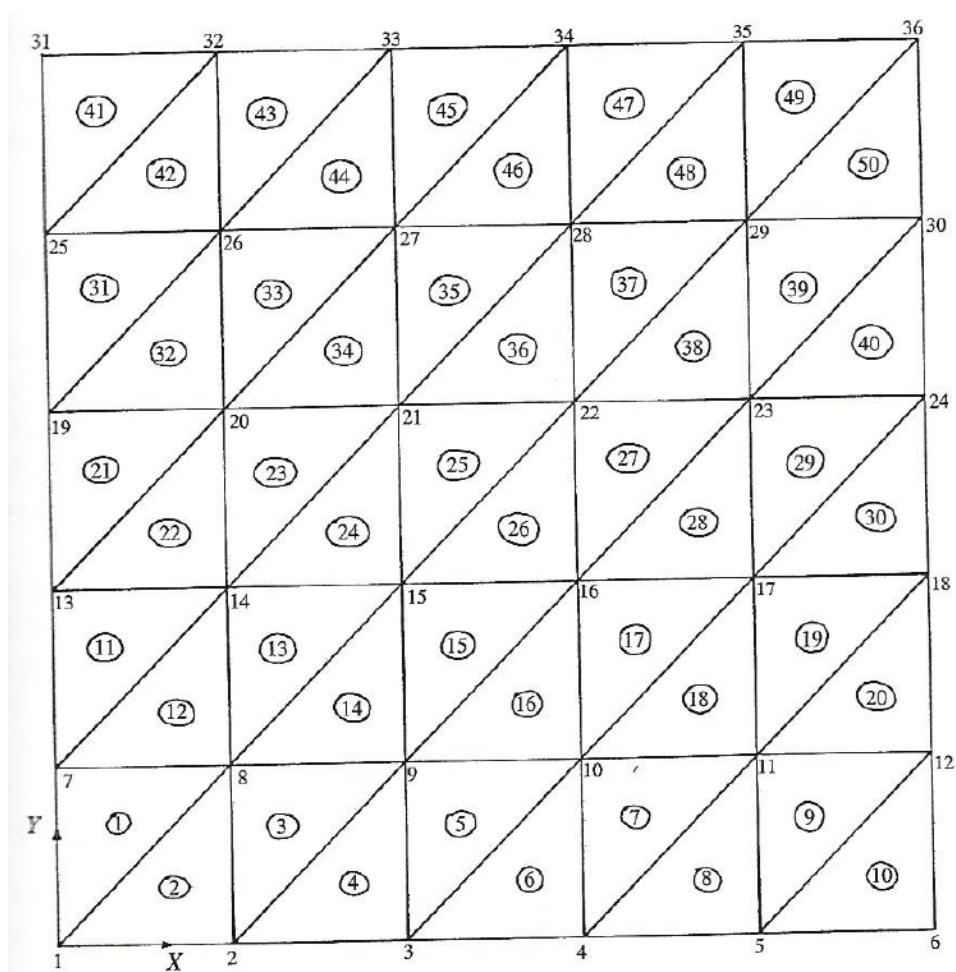
FEM eller *Finite Element Method* är en metod som härstammar från 1950 och 1960-talet. Många praktiska problem inom ingenjörskonst är nästan omöjliga att lösa med konventionella analytiska metoder, eftersom dessa metoder kräver att man hittar de matematiska ekvationerna som definierar de samtidigt obekanta variablerna. Exempel på sådana problem är spännings fördelning och förflyttningar i en fast komponent. Förr var det vanligt att man förenklade problemen så mycket att man kunde hitta en lösning till problemet som man hoppades hade likhet med det verkliga problemet. I och med att man var osäker på likheterna efter förenklingen blev man tvungen att använda säkerhetsfaktorer för att vara på den säkra sidan. Vid snabbare datorers ankomst flyttades ingenjörskonsten mot en mångsidigare numerisk metod. En av dessa metoderna fick namnet *Finite Element Method*. (Fenner, 2013)

Alla FEM baserar sig på att dela upp fysiska helheter till små delområden eller element. Varje delområde är i huvudsak en enkel enhet vars beteende lätt kan analyseras. Komplikationen i helheterna ligger snarare i mängden delområden än i förståelsen av den sofistikerade matematiken som krävs. Ett av de största charmerna med FEM är att den kan relativt lätt tillämpas på geometriskt komplicerade problem. Trots enkelheten hos de enskilda delområden krävs det en stor mängd numeriskt beräkning för helheten. En enorm mängd med serier av simultana algebraiska ekvationer måste lösas, till detta är det mest effektivt, och ekonomiskt, att ta stöd av digital utrustning. (Fenner, 2013)

Det som FEM baserade dataprogram gör är att den delar in elementet i fråga i ett nät. Nätet kan bestå av trianglar och/eller kvadrater. Nätet eller "mesh" tjänar till att etablera den grundläggande meshgeometrin och numrerar det nyss skapta noderna och elementen.

Det första kravet med nätet är att det bör passa så bra som möjligt in på gränsen av lösningens område. Detta krav kan uppfyllas om det går att definiera elementets gränser/form med hjälp av linjer som bildar ett område. Förutom elementets storlek, form och fördelningen inom nätet, måste numreringen av elementen samt noderna övervägas. Numreringen av dessa kan vara godtycklig, men i praktiken lönar det sig att ha dem att följa ett mönster. I figur 1 ser man att noderna och elementen är numrerade från vänster till höger för att ha bra struktur på problemet. Efter att man har lokaliserat och numrerat alla noder bör man definiera vilka noder som bildar hörn i ett element. Moderna FEM

beräkningsprogram har ett eget meshbildningssystem som tillåter användaren att skapa problemet antingen två dimensionellt eller tre dimensionellt. (Fenner, 2013)



Figur 1 Numrering av element och noder (Fenner, 2013)

2.1 Noder och förskjutningar

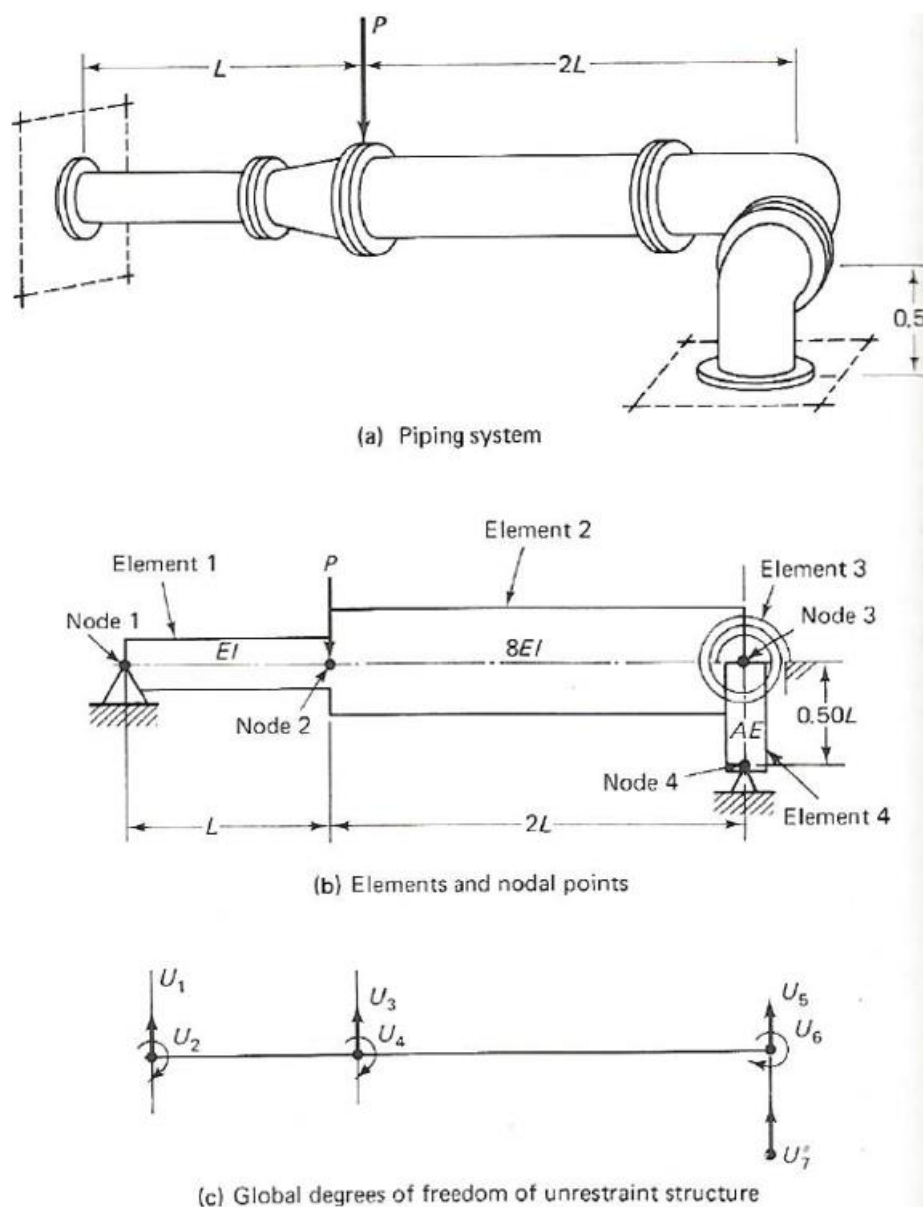
För varje nod som bildas definieras förskjutningar som är betydande för just det elementet. För ett plant bärverk (t.ex. balkelement) är detta två translationer (förflyttningar) medan en plan ram har två translationer och en vinkelrotation i x- eller y-led. Dessa relaterar man till som nodförskjutningar. Till varje nodförskjutning associerar man krafter och/eller moment som kallas för nodkrafter. Krafterna eller förskjutningarna bildar varsin vektor. Bärverket, krafterna och förskjutningarna hänvisas till ett karakteristisk (globalt) koordinatsystem, xyz. Man bestämmer elementets egenskaper genom att först införa ett elementorienterat, lokalt koordinatsystem, var efter man får egenskaperna i det globala systemet genom en transformationsmatrix. En vanlig strukturanalysmetod är förskjutningsmetoden som presenteras i korthet i nästa kapitel. (Fredriksson, 1978)

2.2 Förskjutningsmetoden

Finita elementmetoden som är baserad på förskjutning har man använt länge för analyser av balk- och stavkonstruktioner. De grundläggande skeden man gör när man använder sig av förskjutningsmetoden vid analys av en konstruktion är:

1. Idealisera verkliga konstruktionen som en montering av balk- och stavelement vilka är sammanfogade vid en led.
2. Identifiera de okända förskjutningarna vid lederna som definierar förskjutningsreaktionerna hos den idealiserade konstruktionen.
3. Etablera balans mellan krafterna som motsvarar de okända förskjutningarna och lös dessa ekvationer.
4. När ändförskjutningarna hos balkarna och stavarna är kända beräknas de inre spänningar i elementen.
5. Analysera förskjutningarna och spänningsfördelningarna som förutses på basis av den idealiserade konstruktionen när man beaktar antaganden som använts.

I praktiken är de viktigaste stegen rätt idealisering av verkliga problemet (1) och rätt tolkning av resultaten (5). (Bathe, 1982)



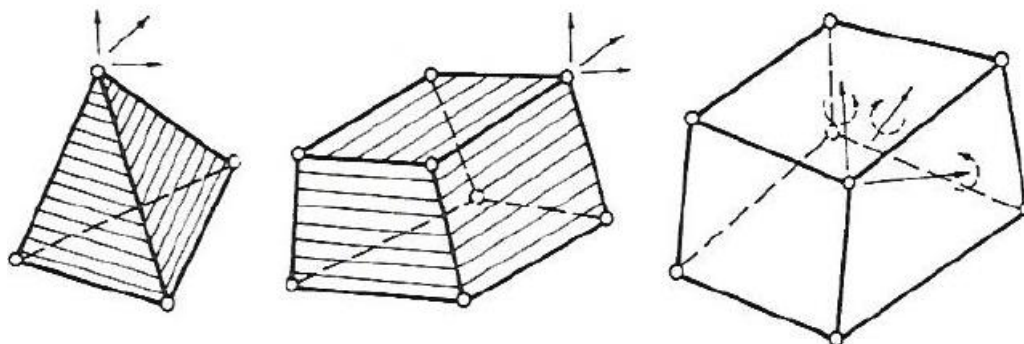
Figur 2 Exempel på idealisering av problem (Bathe, 1982)

2.3 3-dimensionella element

Analysen av kroppar (3D element) har försummats länge för att kraven på data resurser var överdriven. Idag går det enkelt att analysera olika sorters 3D-modeller. FEM-analysens formuleringar av plana problem är utökade till ett 3-dimensionellt plan. Vanliga grundgrupper inom FEM 3D analys:

- Tetraedrar med plana och böjda sidor
- Block med plana och böjda sidor

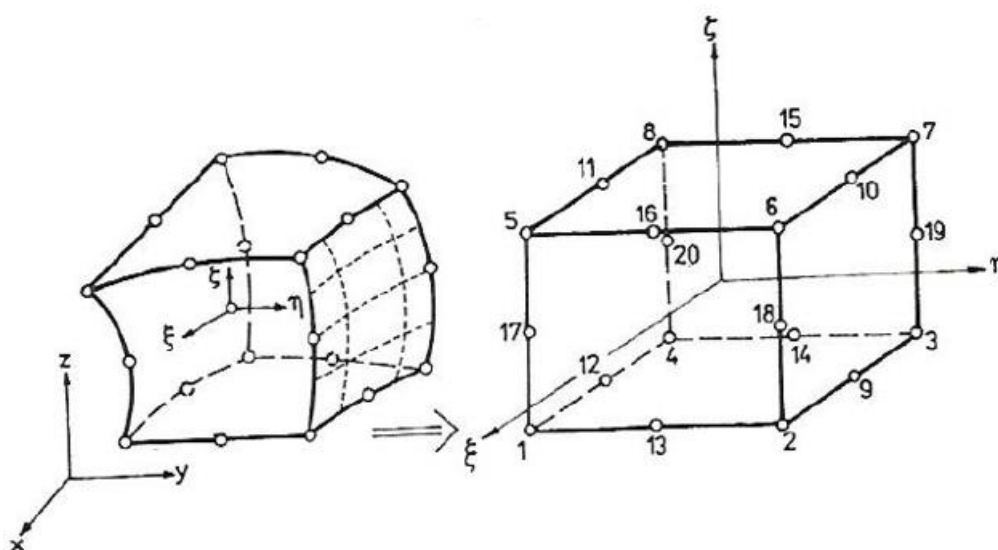
- Element med roterande frihetsgrader
(Zdenek Bittnar, 1996)



Figur 3 Vanliga typer av 3D element (Zdenek Bittnar, 1996)

Den enklaste tetraedern har fyra noder, en i varje hörn. Varje nod är relaterade till tre olika förskjutningsriktningar längs med det globala planet xyz . Förskjutningarna inne i elementet är approximerade med hjälp av linjära funktioner. Spänningarna är således konstanta inom elementet. (Zdenek Bittnar, 1996)

Block är inom FEM väldigt populära. Kommersiella FEM-program använder vanligen linjära och kvadratiska element. Det är fördelaktigt för att introducera isoparametriska koordinater som kartlägger ett verkligt block till ett block med lika långa sidor såsom i fig. 04. (Zdenek Bittnar, 1996)



Figur 4 Omvandling av verklig kub till vanlig kub (Zdenek Bittnar, 1996)

3 Idea Statica

Idea Statica är ett tjeckiskt företag som har skapat en programvara för byggnadsingenjörer och andra som utför eller använder strukturell analys i sin vardag. Idea Statica är en programvara som snabbar upp dimensioneringen, räknar enligt eruokoden och optimerar mängden material. Idea Statica har två delområden: stål (steel) och betong (concrete). Idea Statica ger också en möjlighet att importera data från de mesta FEA och CAD program. Man kan enkelt importera en anslutning från till exempel Tekla Structures, belasta den och kontrollera om den håller. Andra program som man kan importera data ifrån är bland annat SAP 2000, Revit och Robot. (Idea Statica, u.d.)

3.1 Idea Statica Steel

Med Idea Statica Steel kan man modellera och kontrollera svetsade eller bultade anslutningar, förankringar och fundament av alla dess slag. Programvaran förser tydliga kontroller enligt eurokod / AISC / CISC standarderna. För analysen använder Idea Statica den unika CBFEM (Component-Based Finite Element Method). CBFEM gör undersökningen av spänningar för alla anslutningar och förband möjliga. Idea Statica Steel gör en helhets kontroll, spänningskontroll, styvhetsanalys, delarnas kapacitet och buckling. (Idea Statica, u.d.)

3.2 Idea Statica Concrete

Idea Statica Concrete armerar och kontrollerar alla typer av väggar, balkar och detaljer (i 2D) så som öppningar, öglor, konsoler mm. Programmet kan även identifiera den mest effektiva positionen för armeringen. Liksom Steel förser även betongdelen tydliga kontroller av brottgränstillstånd (ULS) och bruksgränstillstånd (SLS) enligt standarderna och ger fullständiga rapporter och armeringsmängder. (Idea Statica, u.d.)

3.3 CBFEM och dess komponenter

Komponentmetoden räknar anslutningar som ett system av sammankopplade objekt/komponent och bestämmer spänningar i varje komponent. Varje komponent kollas med motsvarande formel. Det innebär att man måste skapa en modell för varje anslutning, och metoden är begränsad till generella former och belastningar. Därför har Idea Statica

tillsammans med andra institut och universitet utvecklat en ny metod för avancerad design och analys av stålanslutningar. Resultatet blev en metod som behåller de mest bekräftade och användbara delarna av komponentmetoden, och med FEM (finita elementmetoden) som ersätter komponentmetodernas svaghet, vilket är dess generalitet i sättet att analysera belastningar för enskilda komponenter. Fördelen med komponentmetoden är den experimentella och analytiska kunskapen om beteendet hos komponenter i anslutningar, såsom bultar, svetsar och plattor. Detta resulterar i en noggrann förutsägelse av elastisk och ultimata belastning. Den nya metoden blev att heta CBFEM (Component Based Finite Element Method). (Idea Statica, 2017) & (Lubomír Sabatka, 2014)

Inom stålkonstruktion är det den elastiska/plastiska analysen det som intresserar, för att det är stålet som vanligtvis ger efter i en konstruktion. Resultatet av den linjära analysen är oviktig när det gäller design av anslutningar. FEM modeller av anslutningar är till för att se hur de beter sig. Det gäller rumsliga element och uppmätta värden på materialegenskaper. Både liv och flänsar hos elementen i anslutningen modelleras med hjälp av skalelement i CBFEM-modellen för vilken den kända och bekräftade lösningen är befintlig.

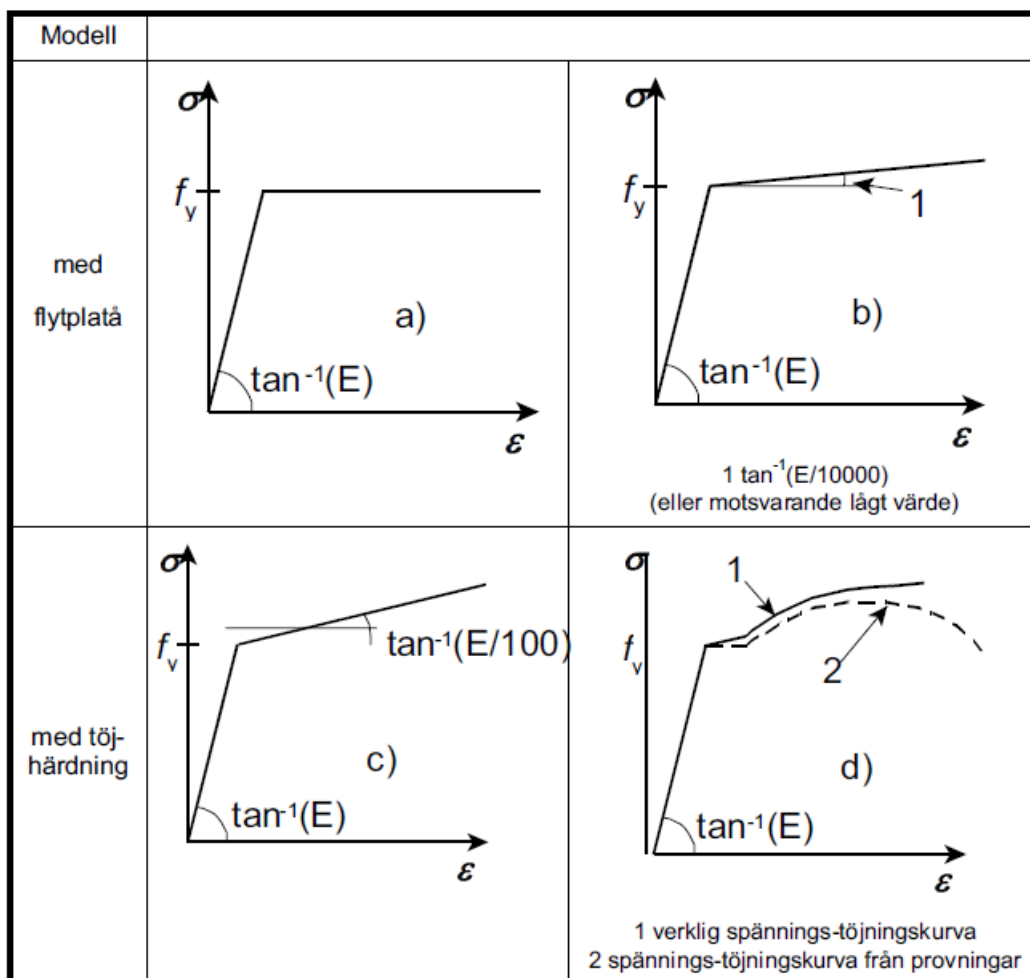
Det svåraste för analysen av en modell är bultarnas och svetsarnas beteende i en anslutning. Själva modelleringen av dessa i vanliga FEM program är svårt eftersom programmen inte erbjuder de egenskaper som behövs. Därför har man inom CBFEM utvecklat speciella komponenter som beter sig rätt i anslutningarna. Vid modelleringen av anslutningen används olika funktioner: skärningar, hål, avstyvningar, ändplåtar mm. Fästdon (bultar och svetsar) finns också som funktioner. (Idea Statica, 2017)

3.3.1 Material

Det vanligaste material diagrammen som används inom FE modellering av stål är ideal plasticitet och elasticitet med töjhårdning, och det verkliga spänning-töjning diagrammet. Det verkliga spännings-töjnings diagrammet beräknas från materialegenskaperna hos svagare stål vid dragprov. Plåtarna i Idea Statica är modellerade med elastiskt-plastiskt material enligt kurvan under EN1993-1-5, Bilaga C 6(2). Materialets beteende är baserat på Von Mises brotthypotes. Det antas vara elastiskt innan det når sträckgränsen, f_y . (Idea Statica, 2017)

$$\sigma_{true} = \sigma (1 + \varepsilon)$$

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon)$$



Figur 5 Modellering av materialbeteende (Eurokod 3, 2006)

Gränsvärdet för plasticering av stålverk diskuteras ofta. Faktum är att den ultimata belastningen har låg känslighet för gränsvärdet av plastisk töjning när den perfekta plasticitetsmodellen används. Eurokod rekommenderar att plasticiteten inte överskrider 5 %. (Idea Statica, 2017) (Eurokod 3, 2006)

3.3.2 Modellering av plåtar och mesh-system

Plåtar syns som fyrkantiga element med en nod i varje hörn. Varje nod har totalt sex frihetsgrader, tre linjära och tre roterande. Deformationer av plåtelement är uppdelade i membranet och böjningskomponenterna. Formuleringen av beteendet i membranet är baserat på Ibrahimbegovic verk (1990). De skjuvdeformationer som sker ut ur planet är beaktade med Mindlins hypotes. Plåten delas upp i fem integrationspunkter längs dess höjd

och plastiskt beteende analyseras vid varje punkt. Det kallas Gauss-Lobatto integration. Det olinjära elastiska-plastiska skedet i material analyseras i varje skikt baserat på känd töjning.

Alla plåtar i ett ståltvårsnitt har en gemensam uppdelning i element. Storleken på genererade element är begränsat. Storleken på elementen som en stålprofil/plåt går att justera. Mesh på flänsar och livet är oberoende av varandra. Idea Statica har ett standard antal för element på 8 stycken rutor per tvärsnittshöjd. Mesh av plåtar är separata och oberoende av andra anslutningsdelar. Standard antal för element i plåtar är inställd på 16 rutor per tvärsnittshöjd i Idea Statica. (Idea Statica, 2017)

3.3.3 Svetsar

Det finns flera olika sätt att hantera svetsar i numeriska modeller. Den metod som används mest är hastighetsberoende plasticitetsmodellen baserad på Von Mises brotthypotes. CBFEM använder sig av två olika metoder. Den första metoden för modellering av svets mellan plåtar är en direkt sammanslagning av meshnätet. Lasten överförs genom kraftdeformationsbegränsningar baserade på Lagrangian formulering till motsatt plåt. Anslutningen kallas multipunktstrafik (MPC) och relaterar de noder som bildats i en plåtkant till den andra, men de är inte direkt anslutna. Fördelen med detta tillvägagångssättet är att man kan ansluta två nätverk med olika egenskaper.

Den andra metoden är plastiska metoden består av ett speciellt elastoplastiskt element som placeras mellan plåtarna. Elementet respekterar svetsens a-mått, position och orientering. Svetsar analyseras genom olinjär materialanalys och det elastoplastiska beteendet bestäms för svetsen. Liksom i föregående metod styr spänningen i svetsens a-mått och spänningstopparna omfördelas längs svetslängden. Ideal plasticitetsmodell används och plasticeringen är samma för svetsarna som för plåtarna dvs. 5%. (Idea Statica, 2017)

3.3.4 Bultar

I CBFEM är bultarnas beteende med tanke på spänning, skjuvning och bärförmåga beskriven med de olinjära fjädrarna. Bulten i spänning beskrivs av en fjäder med sin axiella initialstyvhet, bärförmåga, initialisering av brotts- och deformationskapaciteten. För initiering av brotts- och deformationskapaciteten antas det att plastisk deformation endast uppträder i den gängade delen av bulten. Kraften vid början brott beskrivs som;

$$F_{y,ini} = f_{y,b} * A_t \quad (1)$$

där $f_{y,b}$ är sträckgränsen för bulten och A_t är bultens dragarea. Relationen ger högre värden för material med lågt förhållande av den ultimata styrkan och sträckgräns. För att säkerställa ett positivt värde av plastiskstyvhet bör;

$$F_{y,ini} \leq F_{t,Rd} \quad (2)$$

Bultens deformationskapacitet δ_c består av elastisk deformation av bultskaftet δ_{el} och plastisk deformation en av endast gängade partiet δ_{pl} .

$$\delta_c = \delta_{el} + \delta_{pl} \quad (3)$$

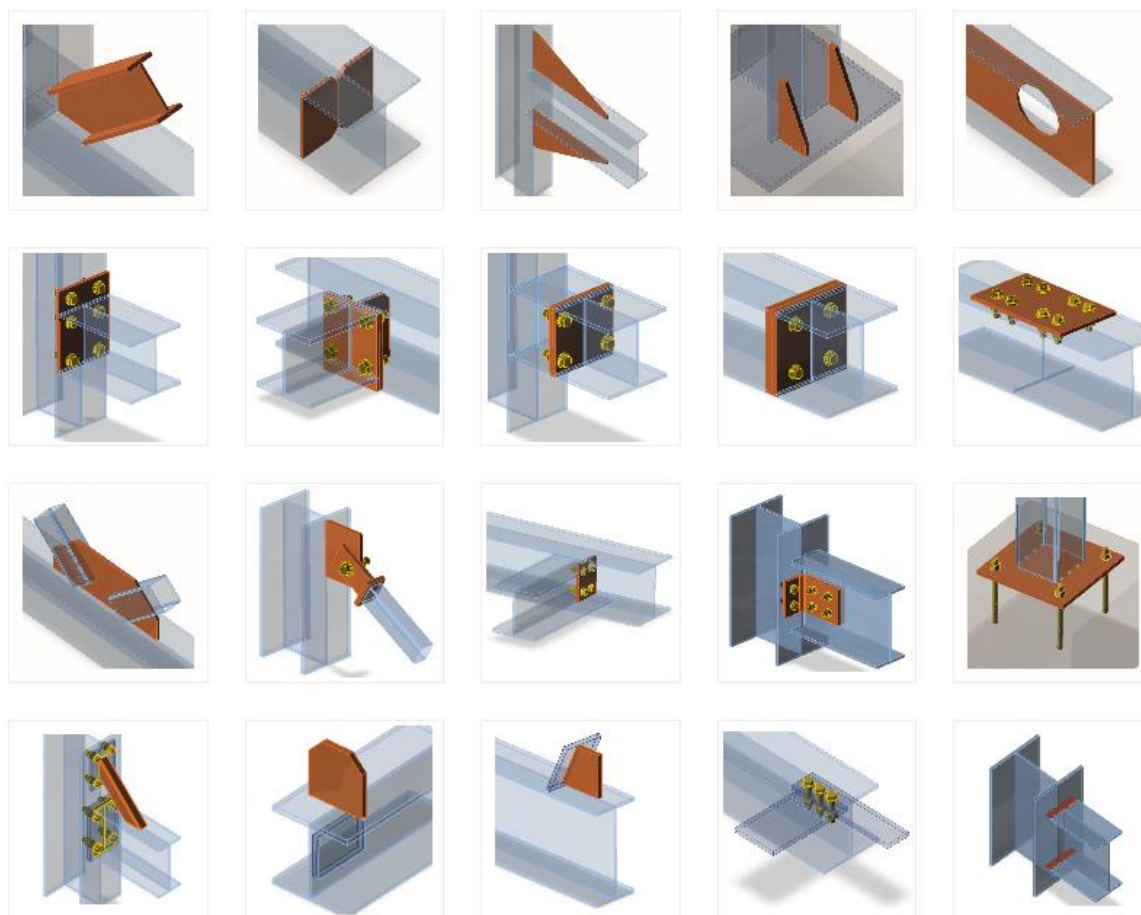
$$\delta_{el} = \frac{F_{t,Rd}}{k_{ini}} \quad (4)$$

$$\delta_{pl} = \varepsilon_{pl} * l_t \quad (5)$$

k_{ini} är initial deformationsstyvheten av bulten i spänning, ε_{pl} är gränsen av plasticitet (5%) och l_t är längden av bultens gängade del. Kraften överförs till plåtarna genom interpolationslänkar mellan bultskenan och noderna i plåten. Området där kraften överförs motsvarar medelvärdet för bultskenan och cirkeln som är inskriven i bulthuvudet. (Idea Statica, 2017)

3.4 Analysen

CBFEM möjliggör en snabb analys av anslutningar. Modellen består av element och olika funktioner som ansluter elementen till varandra. Användaren skapar alltså inte FEM modellen utan han/hon skapar själva anslutningen med hjälp av olika funktioner. Varje funktion skapar nya objekt i anslutningen; skär, svetsar, bultar, plåtar mm. (Idea Statica, 2017)



Figur 6 Idea Staticas modellerings funktioner: Ändplåtar, förstärkningsplåtar, balkskarv, öppningar, besäkringar, bultar och svetsar mm. (Idea Statica, 2017)

Användaren väljer alltid ett element/bärverk som är bärande. Det bärande elementet kan ha en ända med ett ”stöd”, till exempel en pelare med topplåt, eller så kan elementet vara kontinuerligt med ett stöd i bägge ända. Övriga element dvs de som inte är valda som bärande, är anslutna element. Dessa element har olika typer beroende på hurdana laster den kan överföra:

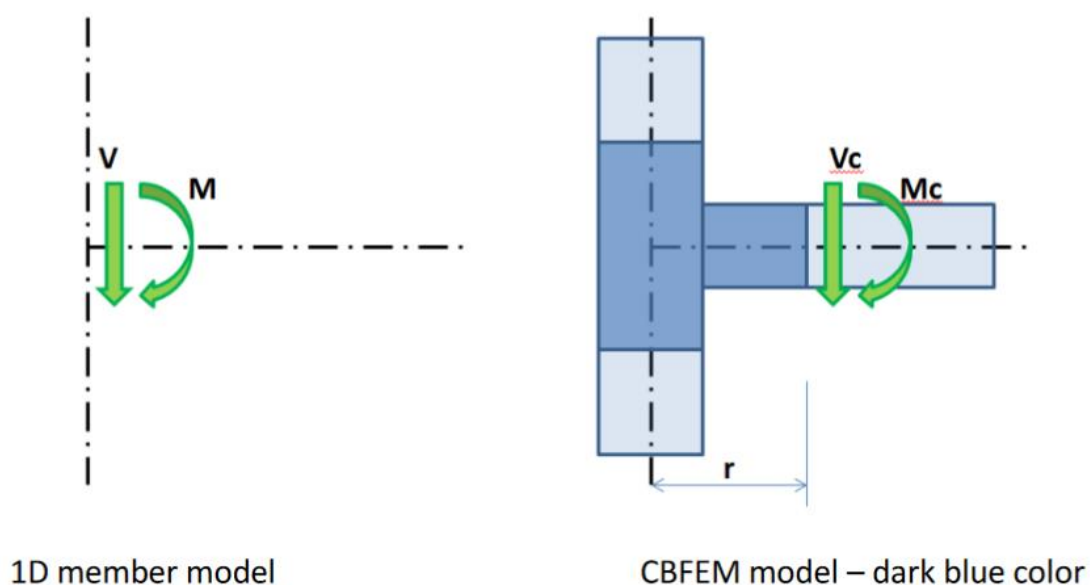
- Typ N-Vy-Vz-Mx-My-Mz – elementet kan överföra alla 6 komponenter av inre krafter.
- Typ N-Vy-Mz – elementet kan endast överföra krafter i XY-planet.
- Typ N-Vz-My – elementet kan endast överföra krafter i XZ-planet.
- Typ N-Vy-Vz – elementet kan endast överföra normalkraft N och skjuvkrafter Vy och Vz. (Idea Statica, 2017)

Varje anslutning är i jämviktsläge vid analys av ramsrukturer. Om ändkrafterna appliceras på elementen i en mera invecklad/detaljerad anslutning uppfylls också jämviktsläge. Det behövs därmed inte definieras stöd i analysläget. Standardlängden för elementen är inställd på två gånger dess höjd. Varje nod bör vara i jämviktsläge såvida det inte är en enkel anslutning. Med enkel anslutning menas att det bärande elementet är kontinuerligt. (Idea Statica, 2017)

3.4.1 Laster

Analysmodellen som CBFEM-metoden skapar motsvarar den verkliga modellen. Analys av interna krafter utförs på en 3D FEM-stavmodell med centrumlinjer för varje element och leder som använder immateriella noder. Detta leder till att interna krafter som utförs från en stavmodell inte kommer att motsvara CBFEM-modellen, eftersom stavmodellen inte tar excentriciteterna i beaktande. Därför kan användaren välja mellan tre alternativ för position av kraft: nod, bult eller position som väljs manuellt. (Idea Statica, 2017)

Moment M och tvärkraft V verkar i den teoretiska leden. Punkten för den teoretiska leden existerar inte i CBFEM-modellen, så belastningen kan inte appliceras här. Till modellen bör man lägga handlingar av M och V som överförs till segmentets slut på avståndet r . (Idea Statica, 2017)

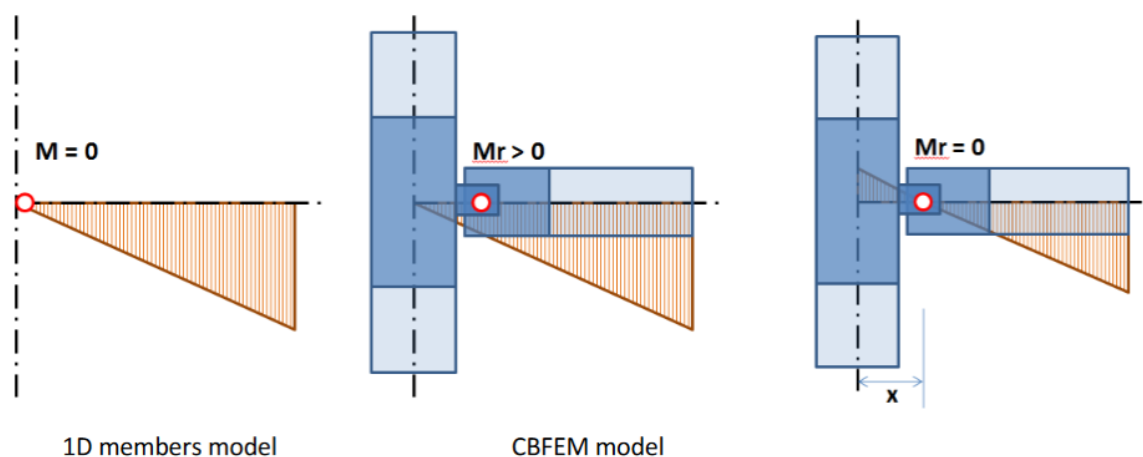


Figur 7 Teoretisk modell (stavmodell) och CBFEM modell (verklig modell, det mörkblåa är det område som är av intresse dvs själva anslutningen. (Idea Statica, 2017)

$$M_c = M - V * r \quad (6)$$

$$V_c = V \quad (7)$$

När anslutningen belastas bör man se till att lösningen av den riktiga anslutningen motsvarar den teoretiska modellen som används för att beräkna inre krafter. Detta bör beaktas vid beräkningar av ledade anslutningar. Figur 08 förevisar hur ledens position skiljer sig mellan den teoretiska modellen och CBFEM-modellen. Vid beräkning av inre krafter bör man se till att båda modellerna motsvarar varandra. Antingen bör leden i den teoretiska modellen definieras i rätt läge eller så måste skjuvkraften flyttas så att man får ett nollmoment i leden. (Idea Statica, 2017)



Figur 8 Ledens position i teoretiska och verkliga modellen. Leden eller kraften bör flyttas enligt figuren, så att man får ett noll moment vid leden. (Idea Statica, 2017)

3.4.2 Kontroller

Spänningar och inre krafter beräknade med CBFEM-modellen används vid kontroll av alla komponenter. Individuella komponenter kontrolleras enligt Eurokod EN 1993-1-8.

Den resulterande ekvivalenta spänningen och plastisk spänning beräknas för plåtar. En kontroll av en ekvivalent plastisk spänning utförs. Gränsvärdet på 5%, som rekommenderas i Eurokod går att ändras på vid behov. Plåtarna delas upp i 5 lager och elastiskt / plastiskt beteende undersöks i varje lager separat. Resultatet visar det mest utsatta från alla 5 lagren. (Idea Statica, 2017)

Även svetsar har ett gränsvärde på 5% när det gäller plastisk spänning. Spänningen i svetsens a-mått bestäms enligt EN1993-1-8: 4.5.3. Spänningar beräknas utifrån svetsens inre spänningar. Böjmomentet runt svetsens längdaxel beaktas inte. Svetsarna kontrolleras med följande formler:

(Idea Statica, 2017)

$$\sigma_{w,Ed} = [\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0.5} \quad (8)$$

$$\sigma_{w,Rd} = f_u / (\beta_w * \gamma_{M2}) \quad (9)$$

$$U_t = \min \left\{ \frac{\sigma_{w,Ed}}{\sigma_{w,Rd}} ; \frac{\sigma_{\tau}}{(0.9f_u/\gamma_{M2})} \right\} \quad (10)$$

σ_{\perp} = normalspänningen vinkelrätt mot a-måttet

τ_{\perp} = skjuvspänning vinkelrätt mot svetsens längdaxel

τ_{\parallel} = skjuvspänning parallellt med svetsens längdaxel

f_u = nominell brottgräns för den svagare av de förbundna konstruktionsdelarna

β_w = koefficient för kälsvets (tab 4.1)

γ_{M2} = partialkoefficient

U_t = utnyttjandegrad

Den initiala styvheten och bärförmåga hos bultar utsatta för skjuvning är i CBFEM modellerad enligt EN1993-1-8: kapitel 3.6 och 6.3.2. Fjäders som representerar lager och spänning har ett linjärt kraftdeformationsbeteende med en initial styvhet och bärförmåga enligt samma ställen i eurokoden som ovan. I analysen beräknas bultarna med följande formler:

(Idea Statica, 2017)

$$F_{t,Rd} = 0.9f_{ub}A_s/\gamma_{M2} \quad (11)$$

$$B_{p,Rd} = 0.6\pi d_m t_p f_u / \gamma_{M2} \quad (12)$$

$$F_{V,Rd} = \alpha_V f_{ub} A_s / \gamma_{M2} \quad (13)$$

$$F_{b,Rd} = k_1 a_b f_u d t / \gamma_{M2} \quad (14)$$

$$F_{b,Rd} = 0.6k_1 a_b f_u d t / \gamma_{M2} \quad (15)$$

$$U_{tt} = F_{t,Ed} / \min(F_{V,Rd}, B_{p,Rd}) \quad (16)$$

$$U_{ts} = V / \min(F_{V,Rd}, F_{b,Rd}) \quad (17)$$

$$U_{tts} = V / F_{V,Rd} + F_{t,Ed} / 1.4 F_{t,Rd} \quad (18)$$

A_s = spänningsarea för skruv/bult

f_{ub} = brottgräns för skruv/bult

d_m = medelvärde för största och minsta tvärmått for skruvhuvud eller mutter

d = nominell skruvdiameter

t_p = tjocklek för plåt under skruv eller mutter

f_u = nominell brottgräns för den svagare av de förbundna konstruktionsdelarna

α_V = tas från tabell 3.4

k_1 = tas från tabell 3.4

a_b = tas från tabell 3.4

$F_{t,Ed}$ = dimensionerande dragkraft

V = tvärkraft

γ_{M2} = partialkoefficient

4 Undersökta anslutningar

De fyra anslutningar som har undersökts har blivit planerade till en transport och logistikbyggnad i huvudstadsregionen. Två av anslutningarna är av typ sekundärfackverk som ansluter sig till primärfackverk. Det ena av dessa har större belastning och anslutningen är belägen mellan två primärfackverk, så att sekundärfackverken på vardera sida är anslutna till ändan av båda primärfackverken. Den tredje anslutningen som har blivit undersökt var en pelare till vilken det ansluts fackverk, takstag och väggstag. Den fjärde anslutningen var en vanlig anslutning mellan pelare och fackverk. Anslutningarna har först blivit modellerade i Tekla Structures varifrån de sedan har importerats till Idea Statica med hjälp av en macro-funktion. Importen skedde via Tekla Structures.

Vid import av anslutningar väljer man först en nod-punkt för hela anslutningen. Denna punkt blir en noll-punkt och alla element förhåller sig till denna punkt. Efter man valt noll-punkten väljer man de element (bärverk) som anslutningen skall innehålla, till sist väljer man plåtar och bultar som skall vara med i anslutningen. Idea Statica startar och man har sin anslutning där. Ett väsentligt problem som uppkom i ganska tidigt skede var att Idea Statica skapade s.k. ”Workplanes” mellan till exempel stag och ändplåt eller fackverkets övrebom och diagonal. Beskärningar av elementen gjordes sedan på basis av dessa workplanes. Mycket tydligare fick man det om man tog bort alla workplanes och beskärningar, och skapade egna som var relaterade till själva bärverken.

Ett annat problem uppkom vid modelleringen av plåtarna. För det första så var de importerade plåtarna i DXF form och kunde därmed inte modifieras desto mer i Idea Statica. För det andra var deras positioner bestämda enligt koordinater som relaterar till den valda noll-punkten. Plåtar, så som ändplåtar, är ofta relaterade till profilens storlek men i och med att plåtarna inte var relaterade till profilen stannade den på sina koordinater även om man flyttade på bärverket eller ändrade profilmått. Man upptäckte att det kan löna sig att ta bort den befintliga plåten och skapa en ny med hjälp av funktionerna i Idea Statica och binda den till profilen. På det sättet fick man plåten sina mått när bärverkets profil ändrades.

Efter att man modellerat sin anslutning färdigt ställde man in vilket typ av elementet var, dvs. hur den kan ta emot laster (se kap. 3.4) och var man ville att lasten skulle påverka (noll-punkten, bultar eller position x). Lasterna och deras riktningar applicerades på varje

element och anslutningen gick nu att analyseras. Av företagets önskan visas bilder bara av en anslutning.

4.1 Första sekundär-primärfackverksanslutningen

Primärfackverket var ett K-fackverk. I mitten av fackverket ansluts två mindre sekundärfackverk till primärfackverket med hjälp av gängade stänger som gick från det ena fackverkets ändplåt genom primärfackverkets övre bom till det andra fackverkets ändplåt. Fackverken var av RHS-profiler och varierande material. Primärfackverkets mittersta diagonaler var svetsade på en förstärkningsplåt på fackverkets övreboms undre sida. Sekundärfackverkens ändplåtar hade ovala hål som sträckte sig ner till ena kanten så att man bara kan lyfta på det. Primärfackverkets förstärkningsplåt mellan övrebommen och diagonalerna fungerar även som en konsol för sekundärfackverken. Det mest väsentliga i undersökningen av denna anslutning var hur beter sig denna förstärkningsplåt. Optimering av förstärkningsplåten var huvudsaken i undersökningen av denna anslutning.

Efter importen skapades svetsar och bultar så att de motsvarade tillverkningsritningarna för sammanställningen. Hela hallen hade blivit räknat med Autodesk Robot Structural Analysis programmet och anslutningens laster togs direkt därifrån. Efter analysen insåg man att de bildas ett stort drag i bultarna vilket man inte hade beräknat med tidigare. Dragkraften som uppstod var alltför stor enligt vad det var beräknat med och man visste inte varifrån den uppkom. Utredningar över detta pågår ännu.

Anslutningen modifierades till sist så att den går att modifieras utan att behöva ha mycket kunskap om själva programmet. Ändringar i profilerna går att alla plåtar modifieras till lika.

4.2 Andra sekundär-primärfackverksanslutningen

Till skillnad från ovanstående anslutning var det fyra stycken fackverk i denna, två primärfackverk och två sekundärfackverk. När den föregående hade anslutningen i mitten av primärfackverket har denna sin anslutning i ändan av två primärfackverk. Primärfackverken vilade på en RHS pelare och var bultad i pelarens ändplåt. På samma sätt var sekundärfackverken bultade i varandras ändplåtar, skillnaden här var att den ena bulten går igenom ett primärfackverk och den andra bulten går igenom det andra primärfackverket. Även här kollades förstärkningsplåtarna som sekundärfackverken vilar

på. Lasterna togs från samma Robot-modell och applicerades på elementen. Den slutliga modellen är modifieringsbar på samma sätt som föregående.

4.3 Pelare med anslutna stag och fackverk

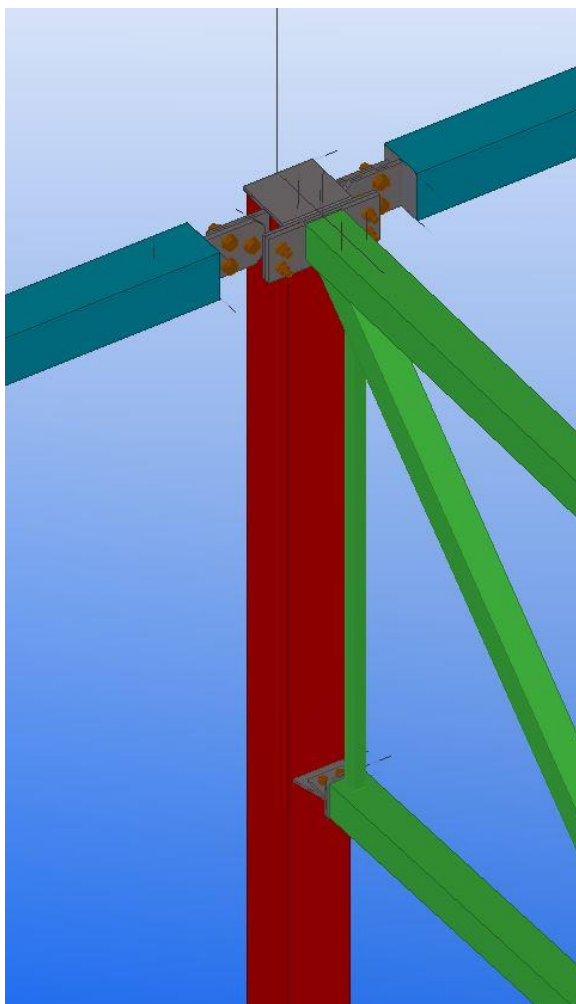
Den undersökta RHS pelaren hade två väggstag som var anslutna till pelaren med hjälp av en plåt som går lodrätt igenom pelaren nära dess topplåt. Stagen var anslutna med en bultad s.k. T-anslutning med plåten dragen genom stagets ändplåt in i själv staget. Till pelarens genomdragna plåt var även ett snett väggstag anslutet. På pelarens sida mot hallens insida ansluts ett fackverk med en bultad ändplåt. På ändplåten var en annan plåt fastsvetsad som går igenom fackverkets övrebom till vilken takstagen var fastbultade. Som säkerhet hade man mellan väggstagets anslutningsplåt och fackverkets anslutningsplåt lagt en till plåt på liggande genom pelaren mellan dessa två plåtar. Det bildas ett "T" av två plåtar på liggande som sträcker sig från pelarens ena sid ungefär till mitten av pelaren. Dessa plåtar skär pelaren och är fastsvetsade på pelarens ytor och i anslutningsplåtarna.

Plåten mellan anslutningsplåtarna hade blivit lagt dit som säkerhet och nu skulle det undersökas om pelaren håller ifall man skulle ta bort denna plåt, så att pelaren skärs bara av anslutningsplåten för stagen. Anslutningen var den mest krångligaste av de undersökta för den innehåll flera olika element och plåtar. Till en början var det tänkt att man skulle jämföra hur pelaren beter sig med och utan plåten mellan anslutningsplåtarna men det uppstod problem vid modelleringen. Pelaren gick inte att beskäras på önskvärt sätt och det resulterade till att man undersökte endast utan plåten i fråga. Modelleringen tog oväntat länge och anslutningen blev onödigt krånglig. Vid analysen av anslutningen gav den resultat som var irrelevanta för undersökningen i och med att anslutningen innehåll många olika element och bultar. Detta ledde till att anslutningen förenklades. Fackverket och alla stag togs bort, plåten som genomskar pelaren ändrades till ett bärverk så att kraften kunde direkt appliceras på den. Fackverket och takstagen ändrades till en gemensam massiv plåt som motsvarade övrebommens storlek. Det som lämnade oförändrat var fackverkets ändplåt, dess bultar och anslutningsplåten mellan ändplåten och pelaren.

I den färdiga modellen applicerar man en kraft i ändan av plåten som går genom pelaren så att det blir tryck i plåten. På den massiva plåten läggs en kraft av motsvarande storlek men åt motsatt håll. Tryckkraften i plåten genom pelaren gör att den vill tryckas in i pelaren och kraften i den massiva plåten gör att pelaren och plåtarna vill vridas åt kraftens håll.

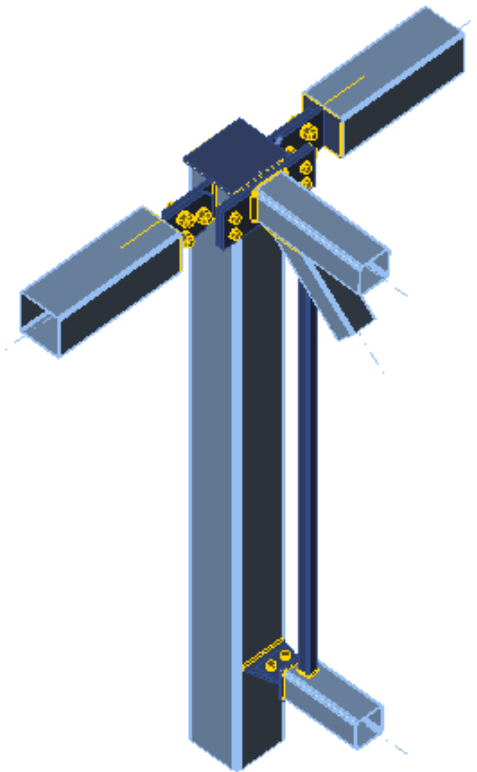
4.4 Pelare med anslutet fackverk

Den fjärde anslutningen som undersöktes var en RHS pelare med anslutet fackverk. Av detta fackverk gjordes två varianter: en med överlappning av yttersta diagonalen och en utan. Denna anslutning och problemen kring den beskrivs noggrannare. Anslutningen importerades från Tekla Structures (figur 9) och alla element som var anslutna till pelaren togs med. I Tekla-modellen var fackverket modellerat med ett transportstag som var fastsvetsat mellan fackverkets örebom och undrebom. Detta stag hade ingen annan egentlig funktion än att stöda fackverket under transporten från tillverkningsfabriken till byggsplatsen och den togs bort vid monteringen. Till anslutningen tillhörde också två stag som var anslutna till pelaren genom en plåt som går genom pelaren. Fackverkets örebom var av stål kvalitet S550MH, diagonalen S355J2H och pelaren S420MH.



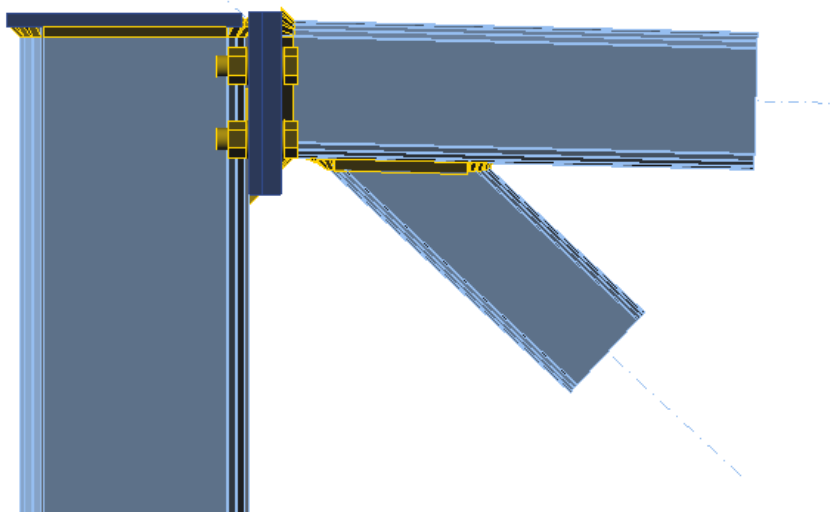
Figur 9 Anslutningen i Tekla Structures

Denna anslutning är en typisk anslutning mellan pelare och fackverk. Fackverkets överbom och svetsad till en ändplåt som är ansluten till pelarens plåt. Fackverkets yttersta diagonal är svetsad till överbommen. Först modellerades anslutningen med alla stag så som den var i modellerad i Tekla.

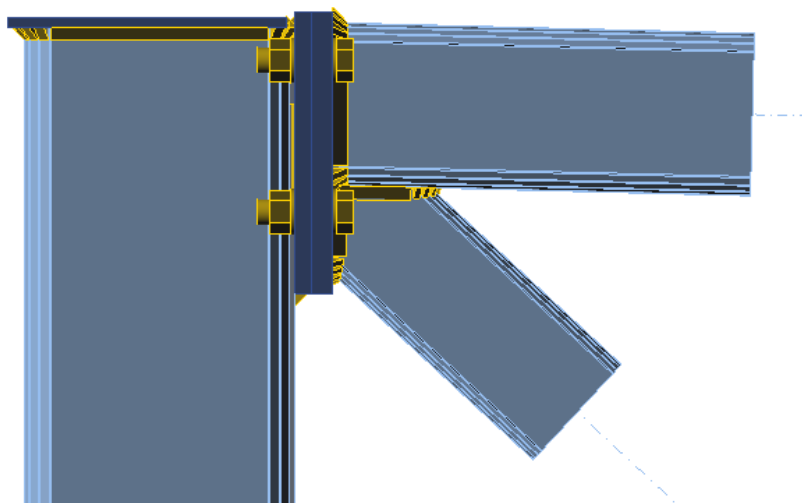


Figur 10 Anslutningen färdig modellerad i Idea Statica

Efter samtal med handledaren slopades allt annat förutom pelaren, dess ändplåt och anslutningsplåten till fackverket, fackverkets överbom, dess ändplåt och diagonal. Detta gjordes så att anslutningen skulle bli mera lättförstådd och enklare att modifiera. Av denna anslutning gjordes sedan en variant med diagonalen överlappad så att halva är svetsad till överbommen och halva i ändplåten.



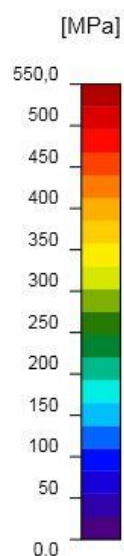
Figur 11 Anslutningen utan överlappning



Figur 12 Anslutningen med överlappning

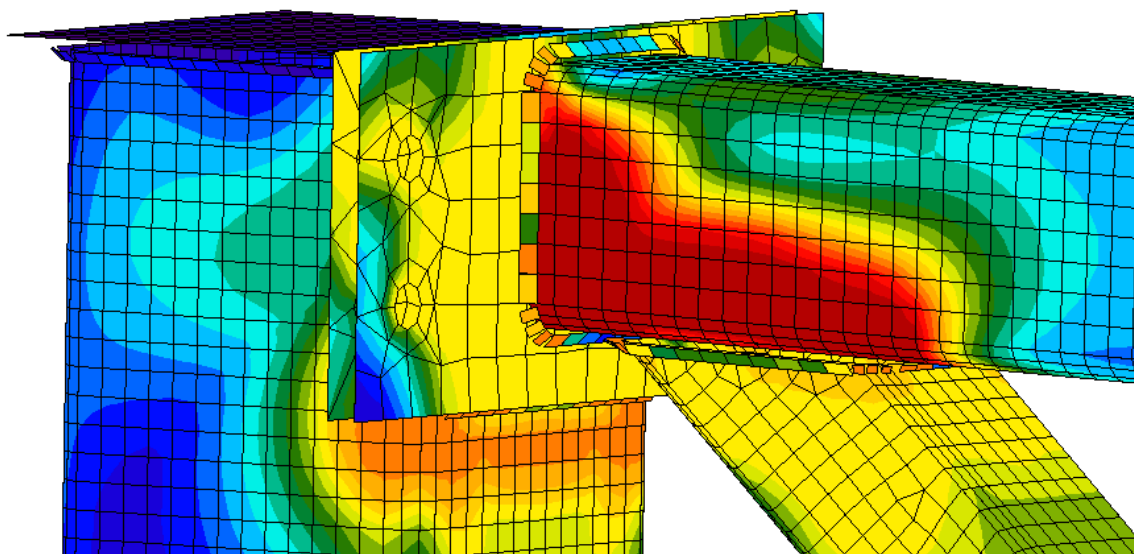
Samma krafter applicerades på båda varianterna och resultaten jämfördes. Vid den övergripande kontrollen såg man att den vanliga anslutningen inte håller. Plastiska deformationen steg till 6,2% för diagonalen och bultarnas utnyttjandegrad blev 105%. I den andra anslutningen, med överlappning, steg plastiska deformationen till 3,4% och bultarnas utnyttjandegrad till 97,1%. Svetsarna i båda anslutningarna låg mellan 98,4% och 99,0%. Svetsarna kontrollerades okulärt i och med att svetsarnas högsta utnyttjandegrad betyder inte att det bara finns, i detta fall, 1.0% kvar av hela svetsens bärförmåga. Spänningarna i svetsarna stiger på ett ställe och när spänningarna blir för höga just där börjar en större del av svetsen arbeta. I figur 14 och 15 kan man se hur svetsarna fördelar

kraften och spänningarna som uppstår i svetsens olika element. Spänningsaxeln (fig. 13) visar spänningen i anslutningen relaterad till färger så att man lättare kan se var spänningen är som störst.

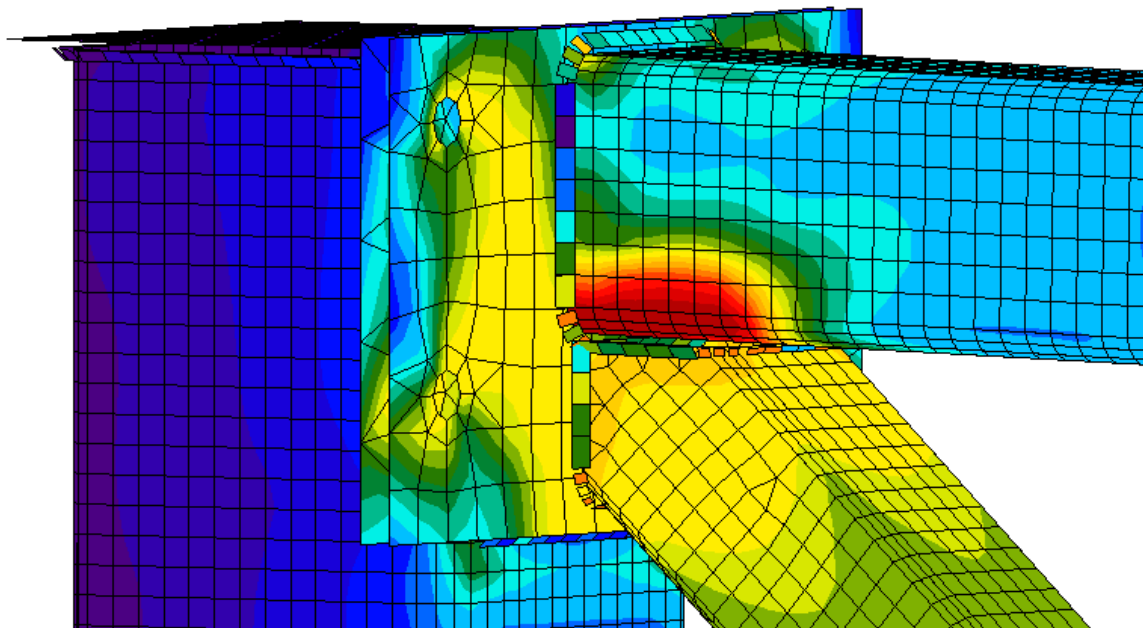


Figur 13 Spänningsaxel i Idea Statica

När man okulärt jämförde svetsen mellan övrebom och ändplåt såg man att i den vanliga anslutningen hade svetsen mera delar som var närmare sträckgränsen, som var 355 N/mm^2 för svetsar (mellan gul och orange). Detta betyder då att svetsen i anslutningen med överlappning klarar av större belastning. Svetsarna börjar arbeta i hörnen av profilerna och börjar fördela spänningarna längs kanterna av profilerna.

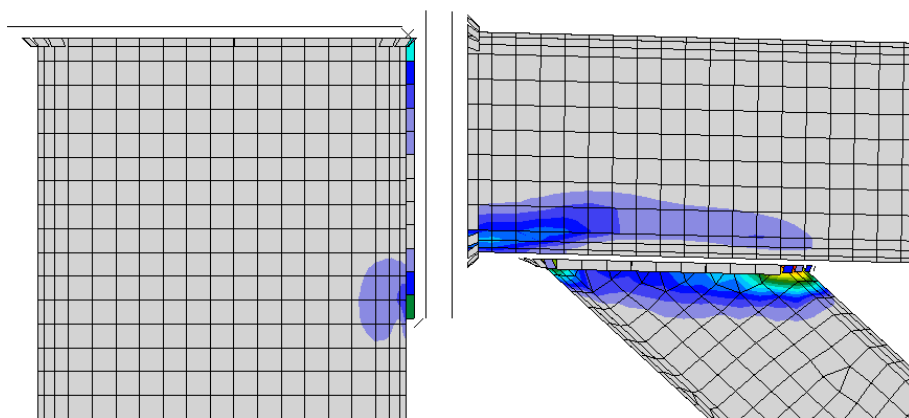


Figur 14 Spänningsfördelningen i vanliga anslutningen

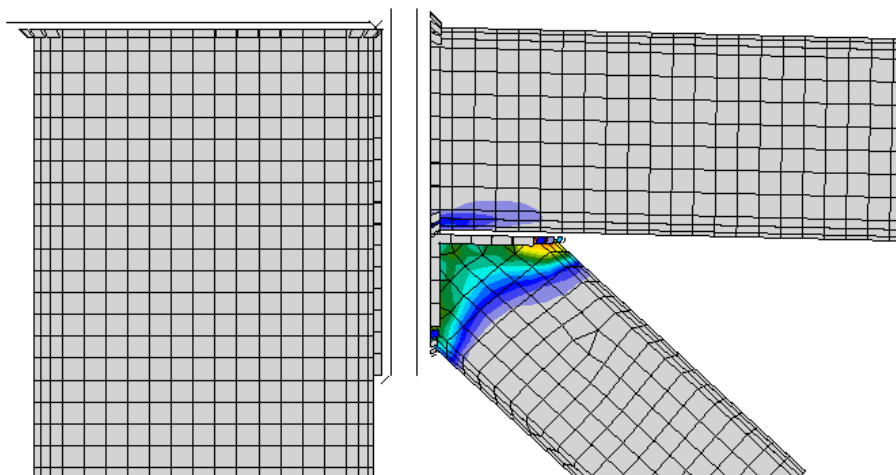


Figur 15 Spänningsfördelningen i överlappade anslutningen

Spänningsfördelningen i bärverken skilde sig också åt. Man kan tydligt se att övrebommen och pelaren är mera utsatt i den vanliga anslutningen. I den vanliga anslutningen plasticerades fackverkets diagonal med 6,2%, medan övrebommens plasticitet steg till 1,9%. Plasticering av profiler sker när spänningarna i profilen överstiger sträckgränsen. Plasticering i den vanliga anslutningen skedde i diagonalen, övrebommen och i pelaren. Diagonalen blev den mest utsatta och plasticeringen i profilen steg till 6,4%, vilket överskrider rekommendationen med 1,2%. I den överlappade anslutningen skedde plasitska deformationen främst i diagonalen men även i övrebommen. Spänningarna överskrider sträckgränsen i anslutningarna mellan de olika elementen, se fig. 16 och fig. 17.



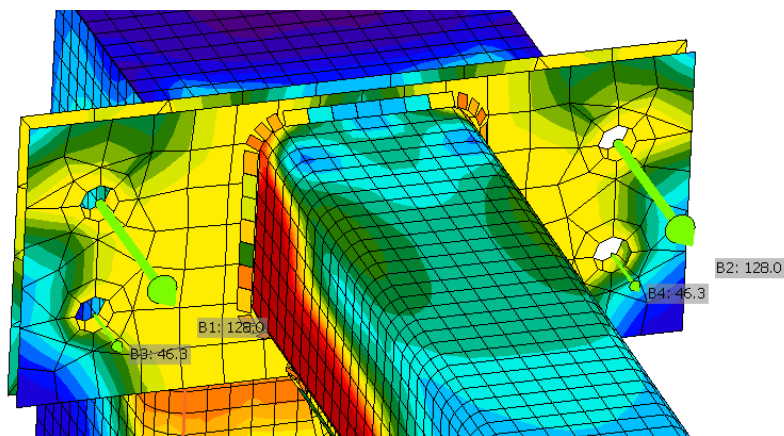
Figur 16 Plasticering i den vanliga anslutningen



Figur 17 Plasticering i den överlappade anslutningen

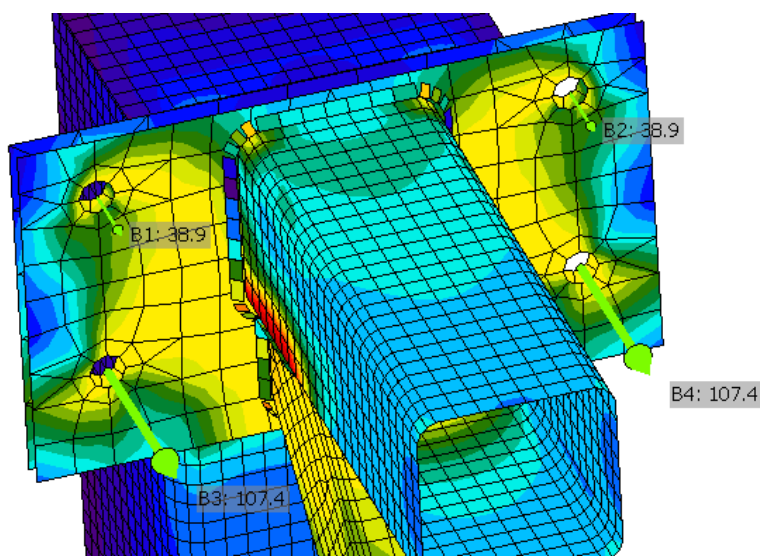
Drag som uppstod i bultarna i anslutningarna blev olika. I den vanliga anslutningen uppstod det störst drag i de bultar som befann sig på övre raden (B1 och B2) medan i den överlappade anslutningen var det den undre radens bultar som fick störst drag (B3 och B4). Enligt Idea Statica fick bultarna som störst en dragkraft på 128 kN. Här uppkommer återigen en alldeles för stor dragkraft. Då man ur Robot kollade hur stor normalkraften i excentricitetselementet modellerad mellan fackverket och pelaren skulle bli var den 10,4 kN. Draget i bultarna borde inte ha blivit större än det. Detta påvisade att något var fel modellerad eller inställt i Idea Statica.

Man försökte ändra på var lasten påverkar (noll-punkten, bultar eller position x) men resultatet förblev det samma. Efter vidare undersökning kom man till den slutsatsen att när man tog diagonalens lodräta resultant multiplicerat med avståndet till nollpunkten bildas ett moment på 102,5 kNm vilket även Idea Statica gav som en obalanserad kraft. Efter detta gjordes en till modell som har sin nollpunkt mellan plåtarna i anslutningen och därmed borde excentricitetsmomentet ha blivit det som Robot anvisade, vilket var 56 kNm. Efter analysen hade dock ingenting förändrats. Tillsammans med företagets handledare kom vi fram till att detta måste undersökas vidare.



Figur 18 Drag som uppstår i bultar för den vanliga anslutningen

I den överlappade anslutningen var diagonalen svetsad i både övre bommen och ändplåten. I och med att man hade problem med den vanliga anslutningen kunde man inte lita på att den överlappade anslutningen gav rätt resultat. Även i denna anslutning uppkom en stor dragkraft i bultarna, i detta fall dock i de nedre bultarna.



Figur 19 Drag som uppstår i bultar för den överlappade anslutningen

Dragkraften F_t som uppkom i bultarna varierade när man jämförde anslutningarna med varandra. Skjuvkraften V var väldigt nära varandra i de olika anslutningarna men den var omkastad. I den vanliga anslutningen var skjuvkraften 104,1 kN för bultar B1 och B2 och 143 kN för bultar B3 och B4. I den överlappade anslutningen var den 143,6 kN i bultar B1 och B2 respektive 103,6 kN för B3 och B4, se fig. 20 och 21.

Max utnyttjandegraden för båda anslutningarna befann sig i bultar B1 och B2 och det var interaktionen av töjning (drag) och skjuvning. Den stora frågan i dessa två anslutningarna var dragkraften i bultarna och detta skall man undersöka vidare.

		Status	Item	Loads	Ft [kN]	V [kN]	Fb,Rd [kN]	Utt [%]	Uts [%]	Utts [%]
>	+	✘	B1	LE1	128,0	104,1	273,6	63,0	60,0	105,0
	+	✘	B2	LE1	128,0	104,1	273,6	63,0	60,0	105,0
	+	✔	B3	LE1	46,3	143,0	273,1	22,8	82,4	98,6
	+	✔	B4	LE1	46,3	142,9	273,1	22,8	82,4	98,6

Figur 20 Krafter som uppstår i den vanliga anslutningen

		Status	Item	Loads	Ft [kN]	V [kN]	Fb,Rd [kN]	Utt [%]	Uts [%]	Utts [%]
>	+	✔	B1	LE1	40,4	143,6	352,8	19,9	82,8	96,9
	+	✔	B2	LE1	40,4	143,6	352,8	19,9	82,7	96,9
	+	✔	B3	LE1	101,5	103,6	273,1	49,9	59,7	95,4
	+	✔	B4	LE1	101,5	103,6	273,1	49,9	59,7	95,4

Figur 21 Krafter som uppstår i den överlappade anslutningen

5 Resultat

Resultatet av detta examensarbete blev fem stycken modellerade anslutningar i Idea Statica. Anslutningarna blev modellerade så att användaren lätt kan ändra profiler, dess material och geometrin. Anslutningarnas plåtar modellerades så att de följer profilens storlek och ändras vid behov. Bultarna och svetsarna är lätta att hitta och deras storlek går att ändras snabbt. Anslutningarna blev enkla i och med att man tog bort de oväsentliga delarna så att man inte blir förvirrad. Från företagets sida ville man se på och pröva de olika beräkningsbottnar som hade blivit skapade. Då upptäcktes det en del brister varav största var dragkraften som uppstod i bultarna. Beräkningsbottnarna går inte att tas i bruk förrän detta har blivit utrett.

Beräkningsbottnarna var relativt svåra att skapa. Vissa anslutningar höll inte ihop till en början och man var tvungen att sätta kontakt mellan vissa ytor så att inte plåtarna for iväg när laster applicerades. Det krävdes en hel del arbete och funktioner innan man hade en anslutning som höll ihop. Spänningsfördelningen hade man inte helt koll på. Med hjälp av Idea Statica så har man fått en djupare kunskap i hur olika anslutningar ger upphov till olika spänningar i bärverken bara med små justeringar. Optimering av anslutningar går lättare när man vet och man kan visuellt se hur spänningarna fördelar sig i profilerna. Idea Statica använder sig av samma formler som normerna vid kontroll av bultar och svetsar. Vid importen av anslutning från Tekla Structures går det redan i ett tidigt skede att ta bort vissa saker som ställer till med problem senare och göra dem rätt från början.

Vidare undersökning pågår för tillfället och man försöker ta reda på om det kan vara fel på inställningarna i Idea Statica eller om det är modelleringen av anslutningen som har brister.

6 Diskussion

Examensarbetet som helhet har varit väldigt intressant att göra. Stålkonstruktioner har alltid varit ett stort intresse för mig och att jag fick ett ämne som kretsade kring stål gjorde mig ivrig att lära mera. Själva Idea Statica hade jag aldrig hört om men efter att handledaren visade hastigt hur det fungerar verkade det inte alltför svårt. Den kanske största utmaningen med detta examensarbete var att lära sig Idea Statica. Många timmar gick åt till att modellera och beräkna anslutningar som vi räknat i skolan och studera med hjälp av s.k. webinar, där Idea Statica teamet visade och beräknade olika anslutningar. Självt anser jag att min kunskap kring stålanslutningar har ökat. Beräkningsprogrammet Idea Statica har jag fått en bra baskunskap i. De problem som jag stött på under vägen har jag i stort sett fått klura ut själv. Detta har jag gjort genom försök och misstag. En del frågor har jag fått svar på från Idea Staticas webinar. Allting har jag ju inte koll på när bultarnas dragkraft ännu är ett mysterium.

Det har varit mycket funderingar kring anslutningarna med min handledare och även han har fått en del ut av denna undersökning. Detta arbete kräver ännu en hel del utveckling och undersökning över bultarna bör göras noggrannare. Dessutom kunde man göra en jämförelsekalkyl för att bekräfta att Idea Statica faktiskt räknar rätt och enligt normerna. Tyvärr hinner inte detta med i mitt examensarbete.

Idea Statica som beräkningsprogram tycker jag fungerar relativt bra. Speciellt gillar jag att man tydligt ser spänningsfördelningen i profilerna. Visst finns det brister med programmet också, som ibland när inte beräkningen blir slutförd berättar inte programmet var felet ligger utan man blir tvungen att själv fundera. CBFEM var även ett nytt koncept för mig och jag läste mig in på det en hel del för att förstå hur Idea Statica egentligen fungerar. I framtiden tror jag definitivt att jag kommer att jobba mera med Idea Statica och analys av anslutningar i arbetslivet nu när jag har kommit igång med det.

7 Litteraturförteckning

Bathe, K.-J., 1982. *Finite element procedures in engineering analysis*. New Jersey: Prentice-Hall Inc..

Eurokod 3 Del 1-8, tab 3.4, 2005. *SS-EN1993-1-8:2005 Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner - Del 1-8 Dimensionering av knutpunkter och förband*, u.o.: u.n.

Eurokod 3, 2005. *SS-EN1993-1-8:2005 Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner - Del 1-8 Dimensionering av knutpunkter och förband*, u.o.: u.n.

Eurokod 3, 2006. *SS-EN 1993-1-5:2006 Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner - Del 1-5 Plåtbalkar*, u.o.: u.n.

Eurokod 3, 2006. *SS-EN 1993-1-5:2006 Eurokod3: Dimensionering av stålkonstruktioner - Del 1-5: Plåtbalkar, Bilaga C8 ANM.1*, u.o.: u.n.

Fenner, R. T., 2013. *Finite Element Methods for Engineers*. 2:a red. London: Imperial College Press.

Fredriksson, B., 1978. *Hållfasthets beräkningar med finita elementmetoden*. Lund: Studentlitteratur.

Idea Statica, 2017. *IDEA statica connection - Theoretical background*. [Online] Available at:

https://www.ideastatica.com/resource/#02_Steel/Theoretical_background/IDEA_Connection_Theoretical_Manual_EN_ver_8_2.pdf%3FTocPath%3DSteel%7C_____9

[Använd Februari 2019].

Idea Statica, u.d. *Concrete details made simple*. [Online]

Available at: <https://www.ideastatica.com/concrete/>

[Använd 6 Februari 2019].

Idea Statica, u.d. *Idea Statica*. [Online]

Available at: <https://www.ideastatica.com/>

[Använd 5 Februari 2019].

Idea Statica, u.d. *Steel connection design - reinvented*. [Online]

Available at: <https://www.ideastatica.com/steel/>

[Använd 6 Februari 2019].

Lubomír Sabatka, F. W. J. K. L. G. J. N., 2014. *Component Based Finite Element Model of Structural Connections*. [Online]

Available at:

https://www.ideastatica.com/resource/Content/02_Steel/Verifications/Articles/11_CVUT_Sabatka_SS14_CBFEM_v7_SM.pdf

[Använd Februari 2019].

Zdenek Bittnar, J. S., 1996. *Numerical methods in structural mechanics*. USA: American Society of Civil Engineers.

7.1 Formler

- (1) Initialkraft vid brott (Idea Statica, 2017)
- (2) Krav för initialkraft (Idea Statica, 2017)
- (3) Bultens deformationskapacitet (Idea Statica, 2017)
- (4) Deformation av bultskaft (Idea Statica, 2017)
- (5) Deformation av bultens gängade del (Idea Statica, 2017)
- (6) Moment i CBFEM (Idea Statica, 2017)
- (7) Tvärkraft i CBFEM (Idea Statica, 2017)
- (8) Dimensionerande spänning i svets
(Eurokod 3 Del 1-8, tab 3.4, 2005)
- (9) Dimensionerande bärförmåga i svets
(Eurokod 3 Del 1-8, tab 3.4, 2005)
- (10) Svetsens utnyttjandegrad (Idea Statica, 2017)
- (11) Bärförmåga för dragkraft (Eurokod 3 Del 1-8, tab 3.4, 2005)
- (12) Bärförmåga för genom stansning (Eurokod 3 Del 1-8, tab 3.4, 2005)
- (13) Bärförmåga för skjuvning per skjuvplan
(Eurokod 3 Del 1-8, tab 3.4, 2005)
- (14) Bärförmåga för hålskantryck (vanliga hål)
(Eurokod 3 Del 1-8, tab 3.4, 2005)
- (15) Bärförmåga för hålskantryck (ovala hål)
(Eurokod 3 Del 1-8, tab 3.4, 2005)
- (16) Bultens utnyttjandegrad med avseende på spänning
(Idea Statica, 2017)

- (17) Bultens utnyttjandegrad med avseende på skjuvning
(Idea Statica, 2017)
- (18) Bultens utnyttjandegrad med avseende på spänning och
skjuvning (Idea Statica, 2017)

7.2 Figurer

- Figur 1 (Fenner, 2013)
- Figur 2 (Bathe, 1982)
- Figur 3 (Zdenek Bittnar, 1996)
- Figur 4 (Zdenek Bittnar, 1996)
- Figur 5 (Eurokod 3, 2006)
- Figur 6 (Idea Statica, 2017)
- Figur 7 (Idea Statica, 2017)
- Figur 8 (Idea Statica, 2017)
- Figur 9 (Skärmsklipp från Tekla Structures)
- Figur 10 (Skärmsklipp från Idea Statica)
- Figur 11 (Skärmsklipp från Idea Statica)
- Figur 12 (Skärmsklipp från Idea Statica)
- Figur 13 (Skärmsklipp från Idea Statica)
- Figur 14 (Skärmsklipp från Idea Statica)
- Figur 15 (Skärmsklipp från Idea Statica)
- Figur 16 (Skärmsklipp från Idea Statica)
- Figur 17 (Skärmsklipp från Idea Statica)
- Figur 18 (Skärmsklipp från Idea Statica)
- Figur 19 (Skärmsklipp från Idea Statica)
- Figur 20 (Skärmsklipp från Idea Statica)
- Figur 21 (Skärmsklipp från Idea Statica)