

Uppgörande av flexibla stålanslutningsdetaljer i IDEA StatiCa

Analys och jämförande kontrollberäkningar enligt eurokod

Johanna Björkqvist

Examensarbete för ingenjör (YH)-examen

Byggnads- och samhällsteknik

Vasa 2023

EXAMENSARBETE

Författare: Johanna Björkqvist
Utbildning och ort: Byggnads- och samhällsteknik, Vasa
Inriktning: Konstruktionsteknik
Handledare: Anders Borg (Novia), Rickard Nybacka (Nordec Oy)

Titel: Uppgörande av flexibla stålanslutningsdetaljer i IDEA StatiCa

Datum: 18.05.2023

Sidantal: 63

Bilagor: 3

Abstrakt

Detta examensarbete har utförts på beställning av företaget Nordec Oy, med syftet att effektivisera beräkningsprocessen vid detaljprojektering. Det här förverkligades genom att uppgöra ett bibliotek i IDEA StatiCa med företagets mest använda stålanslutningsdetaljer. Stålanslutningsdetaljerna laddades upp i programvarans verktyg Connection design browser. Biblioteket främjar och förbättrar detaljprojekteringen då stålanslutningsdetaljerna är tillgängliga för konstruktörer på företaget. Detta sparar både tid och resurser i projekteringsprocessen. Utöver stålanslutningsbiblioteket skapades också enskilda beräkningsbottnar med IDEA StatiCa enligt landspecifika partialkoefficienter.

IDEA StatiCa använder en komponentbaserad finita elementmetod, förkortat CBFEM av Component-Based Finite Element Method, vid analys av stålanslutningsdetaljer. Examensarbetets teoridel omfattas av allmän litteratur om IDEA StatiCa och CBFEM, inklusive en introduktion till användningen av IDEA StatiCa.

Resultaten består av en sammanställning av det uppgjorda biblioteket i IDEA StatiCa med fem olika typer av anslutningsdetaljer. Dimensioneringen av stålkonstruktioner styrs av EN 1993-1-1, eurokod 3, varav den mest relevanta för detta examensarbete är EN 1993-1-8 som behandlar dimensionering av knutpunkter och förband. Tre av anslutningarna har beräknats i Mathcad Prime 7.0.0.0 med hjälp av riktgivande handböcker och eurokoder för att verifiera och jämföra hur resultaten skiljer sig från IDEA StatiCas analys och kontroll.

Språk: svenska

Nyckelord: stålanslutning, dimensionering, IDEA StatiCa, CBFEM, EN 1993-1-8

OPINNÄYTETYÖ

Tekijä: Johanna Björkqvist
Koulutus ja paikkakunta: Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Vaasa
Suuntautumisvaihtoehto: Rakennesuunnittelu
Ohjaajat: Anders Borg (Novia), Rickard Nybacka (Nordec Oy)

Nimike: Joustavien teräslitosten yksityiskohtien luominen IDEA StatiCassa

Päivämäärä: 18.05.2023

Sivumäärä: 63

Liitteet: 3

Tiivistelmä

Tämä opinnäytetyö on tehty Nordec Oy:n tilauksesta, jonka tarkoituksena on tehostaa laskentaprosessia yksityiskohtaisessa suunnittelussa. Tämä saavutettiin luomalla IDEA StatiCaan kirjasto, joka sisältää yrityksen eniten käytetyt teräslitokset. Teräslitokset ladattiin ohjelmiston Connection design browser työkaluun. Kirjasto edistää ja parantaa yksityiskohtien suunnittelua, kun teräslitokset ovat yrityksen suunnittelijoiden käytettävissä. Tämä säästää sekä aikaa että resursseja suunnitteluprosessissa. Teräslitostikirjaston lisäksi IDEA StatiCaan luotiin myös yksilölliset laskentapohjat maakohtaisten osakertoimien mukaisesti.

IDEA StatiCa käyttää komponenttipohjaista elementtimenetelmää, lyhennettynä CBFEM nimellä Component-Based Finite Element Method, analysoidessaan teräslitosten yksityiskohtia. Opinnäytetyön teoriaosa kattaa yleisesti IDEA StatiCa ja CBFEM:ää käsittelevän kirjallisuuden, sisältäen johdannon IDEA StatiCan käyttöön.

Tulokset koostuvat IDEA StatiCan valmistetun kirjaston kokoelmasta, jossa on viisi erityyppistä liitosta. Teräsrakenteiden mitoitus säätelee EN 1993-1-1, eurokoodi 3, josta tämän opinnäytetyön kannalta oleellisin on liitosten suunnittelua käsittelevä EN 1993-1-8. Kolme liitoksista on laskettu Mathcad Prime 7.0.0.0:ssa käyttämällä viitekäsikirjoja ja eurokoodeja, jotta voidaan todentaa ja vertailla, miten tulokset eroavat IDEA StatiCan mukaisesta analyysistä ja tarkistuksesta.

Kieli: ruotsi

Avainsanat: teräslitos, rakennesuunnittelu, IDEA StatiCa, CBFEM, EN 1993-1-8

BACHELOR'S THESIS

Author: Johanna Björkqvist
Degree Programme: Construction and Civil Engineering
Specialisation: Structural Engineering
Supervisors: Anders Borg (Novia), Rickard Nybacka (Nordec Oy)

Title: Creation of Flexible Steel Connection Details in IDEA StatiCa

Date: 18.05.2023 Number of pages: 63 Appendices: 3

Abstract

This thesis is written on behalf of the company Nordec Oy, with the purpose of making the calculation process more efficient in detailed design. This was achieved by creating a library in IDEA StatiCa with the company's most used steel connection details. The steel connection details were uploaded into the software's Connection design browser tool. The library promotes and improves detail design as the steel connection details are available to designers at the company. This saves both time and resources in the design process. In addition to the steel connection library, individual calculation bases were also created with IDEA StatiCa according to country-specific partial coefficients.

IDEA StatiCa uses the Component-Based Finite Element Method, abbreviated CBFEM, when analysing steel connection details. The theory part of the thesis is covered by general literature on IDEA StatiCa and CBFEM, including an introduction to the use of IDEA StatiCa.

The results consist of a compilation of the made library in IDEA StatiCa with five different types of connection details. The dimensioning of steel structures is governed by EN-1993-1-1, Eurocode 3, of which the most relevant for this thesis is EN 1993-1-8, which deals with the dimensioning of joints and connections. Three of the connections have been calculated in Mathcad Prime 7.0.0 using reference manuals and Eurocodes to verify and compare how the results differ from IDEA StatiCas analysis and checking.

Language: swedish

Key words: steel connection, steeldesign, IDEA StatiCa, CBFEM, EN 1993-1-8

Innehållsförteckning

1	Inledning	1
1.1	Beställare	1
1.2	Bakgrund.....	1
1.3	Mål och syfte	2
1.4	Metodval och avgränsningar	3
2	Teori.....	4
2.1	Stålförband	4
2.2	IDEA StatiCa	6
2.3	CBFEM	7
2.3.1	Material.....	8
2.3.2	Modellering av plåtar och nätsystem.....	9
2.3.3	Svetsar	11
2.3.4	Bultar	11
2.3.5	Analys	13
3	Introduktion till IDEA StatiCa Steel Connection.....	15
3.1	Geometri och projektdata.....	15
3.2	Design.....	16
3.3	Kodkontroll och analys.....	18
3.4	Rapport	23
3.5	Svårigheter	23
3.6	Import av anslutningar.....	24
3.7	Connection design browser	25
4	Stålslutningsdetaljer.....	27
4.1	Nedre ramstångens dragförband	33
4.1.1	Resultatjämförelse mellan IDEA StatiCa och manuella beräkningar	33
4.2	Bultat ändplåtsskarv	39
4.2.1	T-styckefläns.....	40
4.2.2	Resultatjämförelse mellan IDEA StatiCa och manuella beräkningar	43
4.3	Enskärigt skjuvförband mellan balk och pelare.....	48
4.3.1	Resultatjämförelse mellan IDEA StatiCa och manuella beräkningar	48
4.4	Enskärigt skjuvförband genom pelare	54
4.5	Ledad pelartopp med fackverksbalk.....	55
5	Resultat.....	56
6	Diskussion.....	60
6.1	Kommentar av Nordec.....	61
7	Källförteckning	62

Bilagor

- | | |
|----------|---|
| Bilaga 1 | Manuell beräkning för nedre ramstångens dragförband (sekretessbelagd) |
| Bilaga 2 | Manuell beräkning för bultat ändplåtsskarv (sekretessbelagd) |
| Bilaga 3 | Manuell beräkning för enskärt skjuvförband mellan balk och pelare (sekretessbelagd) |

1 Inledning

Manuell beräkning vid dimensionering av olika typer av stålanslutningar kan upplevas som en lång och komplicerad process. Idag finns det programvaror som är ämnade för att underlätta och snabba upp dimensioneringsprocessen. Beställaren för detta examensarbete vill ytterligare effektivera dimensioneringsprocessen genom att skapa och samla de mest använda stålanslutningsdetaljerna i ett bibliotek i den använda designprogramvaran. Utöver stålanslutningsbiblioteket vill beställaren dessutom skapa enskilda beräkningsbottnar enligt landspecifika partialkoefficienter.

1.1 Beställare

Nordec Oy blev det nya namnet när Ruukki Building Systems Oy och Normek Oy förenades år 2019. Nordec såldes i september 2022 till ett nytt konsortiumbolag vars större aktieägare är Harjavalta Oy och Tirinom Oy. Nordec, som är en av de ledande leverantörerna av stomkonstruktioner i Norden, dimensionerar, tillverkar, levererar och installerar ramkonstruktioner för enplans-, flervånings- och industribyggnader. Nordec är även känt för produktion och installation av brokonstruktioner samt för deras tekniskt utmanande fasadlösningar. (Nordec, 2023).

Företaget har idag cirka 600 anställda i sex länder: Finland, Sverige, Norge, Litauen, Tjeckien och Polen. Företaget har fem produktionsanläggningar varav tre av dem är lokaliserade i Finland och de två övriga i Litauen respektive Polen. Sommaren 2022 utförde jag min praktik och företagsförlagda utbildning på Nordecs kontor i Vasa, där beställningen på examensarbetet utvecklades.

1.2 Bakgrund

Beställaren använder programvaran IDEA StatiCa som dimensioneringsverktyg men hävdar att beräkningsförloppet för stålanslutningsdetaljer vid detaljprojektering är för tidskrävande. För att effektivera dimensioneringsprocessen och spara både tid och resurser vill beställaren skapa ett bibliotek i IDEA StatiCas verktyg *Connection design browser* där de mest allmänt förekommande stålanslutningsdetaljerna ska finnas tillgängliga. Utöver stålanslutningsbiblioteket vill beställaren dessutom skapa enskilda beräkningsbottnar enligt Finlands, Sveriges och Norges partialkoefficienter. Skapandet av biblioteket och beräkningsbottnar främjar och förbättrar anslutningsdesignen då det finns en tillgänglig databas synlig och disponibel för konstruktörer på företaget.

1.3 Mål och syfte

Målet med detta examensarbete var att skapa ett bibliotek åt beställaren med de mest använda anslutningsdetaljerna i IDEA StatiCas verktyg Connection design browser. Detaljerna som skapades i biblioteket är flexibla så att företaget lätt kan använda sig av dem vid dimensionering av liknande anslutningar i framtiden, endast med justeringar på profiltyper, dimensioner och lastinsättning. Konstruktorer på företaget ska kunna välja från biblioteket en relevant anslutning för ändamålet och därefter justera och anpassa enligt projektvisa och landspecifika behov. Ytterligare ett mål var att skapa beräkningsbottnar som sparades enligt landspecifika partialkoefficienter för de länder företaget primärt levererar projekt till.

Syftet med detta examensarbete var att effektivera beräkningsprocessen vid detaljprojektering åt företaget. Utöver detta förbättras även kvalitén då tidsåtgången minskar om det redan finns en liknande modell att välja från biblioteket när dimensioneringen påbörjas i IDEA StatiCa och anslutningars bärförmåga ska beräknas. En teoribaserad textdel beskriver IDEA StatiCa i allmänhet inklusive en teorifördjupning med programmets användning av den komponentbaserade finita elementmetoden, CBFEM. Därutöver var en målsättning att skapa en introduktion till debutanter på designprogramvaran IDEA StatiCa. Introduktionen kan fungera som ett hjälpmedel för nybörjare och presenterar enkla funktioner och egenskaper av hur dimensioneringen i IDEA StatiCa Steel Connection fungerar och vilka möjligheter programmet erbjuder användaren. I IDEA StatiCa är det möjligt att utforma nästan vilken anslutning som helst och därmed skapas oändligt med möjligheter för modelleringsfel vilket ger felaktiga resultat. Därmed var ytterligare en målsättning att jämföra och verifiera anslutningsdetaljernas beräkningsprocess och resultat i IDEA StatiCa med manuella beräkningar. De manuella beräkningarna gjordes för att kunna bevisa att beräkningsmodellerna i IDEA StatiCa är korrekt modellerade. De manuella beräkningarna beräknades med Finlands partialkoefficienter. Frågor som besvaras under examensarbetets gång är:

- Hur ska en anslutningsdetalj vara designad i IDEA StatiCa så att den är flexibel och justerbar?
- Vilka är de största skillnaderna mellan IDEA StatiCas beräkningsprocess och manuella beräkningar enligt eurokod?

1.4 Metodval och avgränsningar

Examensarbetet utfördes med hjälp av litteraturstudier om IDEA StatiCa och CBFEM. Teoridelen baserar sig på kunskapsstoff om programvaran för strukturell design och med en teorifördjupning om dess användning av CBFEM. Stålslutningsdetaljerna som uppgjordes i IDEA StatiCa begränsades till fem i antal enligt de anslutningar som företaget helst ville ha tillgängliga i biblioteket.

Med IDEA StatiCa Steel Connection är det möjligt att utföra helhetskontroll, spänningskontroll, styvhetsanalys och kontroll av delarnas kapacitet och buckling. Examensarbetets manuella beräkningar begränsades till att endast utföra en helhetskontroll för tre av fem anslutningsdetaljer. Med andra ord var det främst svetsarna och bultarna som kontrollerades samt andra nödvändiga beräkningar för att verifiera att anslutningen var hållbar. Dessa beräknades i PTC Mathcad Prime 7.0.0.0 med hjälp av riktgivande handböcker och eurokoder för att verifiera och jämföra hur resultaten skiljer sig från IDEA StatiCa.

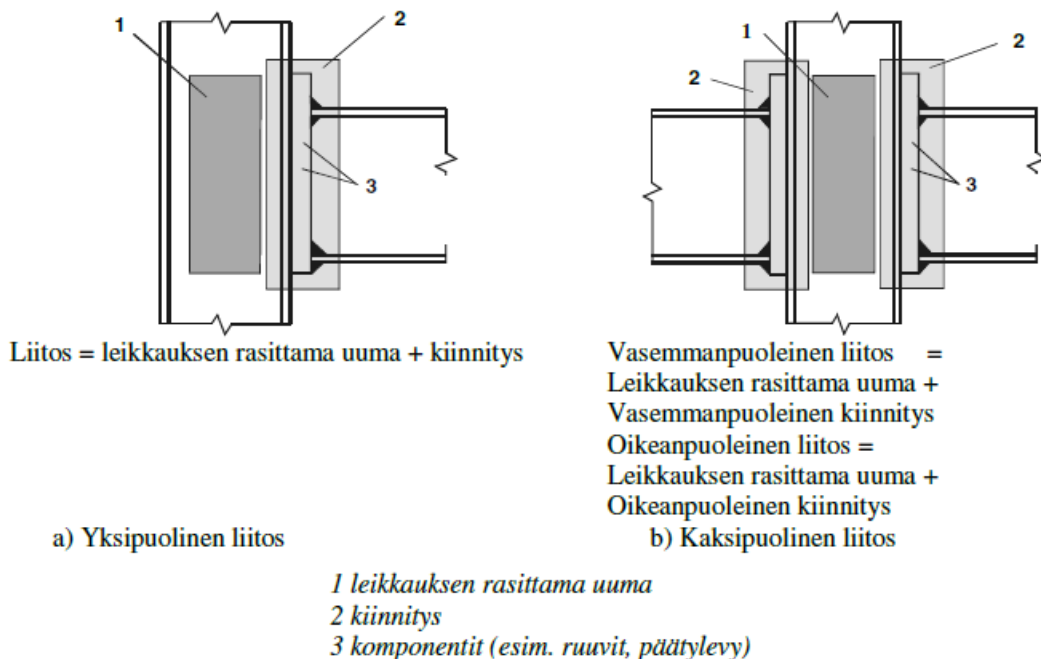
2 Teori

Med anledning av stålets höga hållfasthet, draghållfasthet och sträckgräns har det redan i årtionden varit ett populärt konstruktions- och byggmaterial. Stål har också viktiga egenskaper gällande formbarhet och svetsbarhet. De flesta stålkonstruktioner består vanligen av konstruktionsrör med pelare och balkar, sammanfogade till olika typer av anslutningar. Sammanfogning görs antingen med svetsförband eller bultförband. Svetsförbandet erbjuder den mest ekonomiska metoden att utföra starka förband om sammanfogningen utförs i verkstaden medan bultförband lämpligast görs på byggsplatsen med snabbare montering än svetsning. (BE Group Sverige AB, 2016).

Dimensioneringen av stålkonstruktioner styrs av EN 1993-1-1, eurokod 3, som i sin tur är uppdelad i flera delar som täcker olika rubriker, varav den mest relevanta för detta examensarbete är EN 1993-1-8 som omfattar dimensionering av knutpunkter och förband. Processen att dimensionera anslutningar baserade på eurokod 3 kan vara komplicerad och tidskrävande och dimensioneringen av komplexa anslutningar omfattas inte av standarden. Därför har användningen av programvaror med finita elementmetoden, FEM, blivit populär inom byggkonstruktion. En av de världsledande programvarorna för design och kontroll enligt eurokod av olika typer av svets- och bultförband är IDEA StatiCa. Det här kapitlet kommer att presentera vad som menas med ett stålförband och en omfattning av den teoretiska bakgrunden till IDEA StatiCa samt programmets association med CBFEM.

2.1 Stålförband

För att ansluta konstruktionselement med varandra används stålförband. Med ett förband avses ett delområde inom anslutningen med en uppsättning komponenter som mekaniskt förbinder två eller flera större konstruktionselement så att krafter kan överföras mellan elementen (figur 1). Förband och anslutning används som synonymer till varandra. Elementen kan vara exempelvis balkar, pelare, stänger medan komponenterna består av skruvar, muttrar, brickor, svetsar och plåtar. Inom stålkonstruktion ansluts element oftast genom bultförband eller svetsförband. En grundregel är att bultförband i första hand används vid montage på byggarbetsplatsen medan svetsförband utförs i verkstaden. Bultförbandets största fördel är dess relativt enkla och snabba montage. Däremot är svetsförbanden normalt enklare anslutningslösningar och kan ge mycket starka och tillförlitliga anslutningar, vilka dock kräver att personalen har kunskaper inom svetsning. (Norlin, Veljkovic, & Husson, 2015, s. 1).



Figur 1. Delar i en balk-pelarknutpunkt. Förbandet avser ett delområde inom anslutningen där påverkan mellan delarna är som störst, där komponenterna överför krafter. (SFS-EN 1993-1-8, 2005, figur 1.1).

Det är viktigt att noga överväga vilken typ av anslutning som kommer att användas i en stålkonstruktion, eftersom hållbarheten och stabiliteten hos strukturen beror på styrkan och tillförlitligheten hos anslutningen. Valet av anslutningsdetaljer påverkar även installations- och byggprocessen samt den totala kostnaden för projektet. Vid dimensionering av knutpunkter och förband används EN 1993-1-8 som ger dimensioneringsmetoder för konstruktion av huvudsakligen statiskt belastade förband vid användning av stål. För att praktiskt kunna dimensionera förband krävs också tillgång till många andra referensstandarder. (European Steel Design Education Programme, u.d.).

Bultförband kan delas in i två huvudkategorier beroende på anslutningens utformning och belastning: skjuvkraftsbelastade förband och dragkraftsbelastade förband. Skjuvkraftsbelastade bultförband indelas ytterligare i typ A: hålkantförband, typ B: friktionsförband i bruksgränstillståndet eller typ C: friktionsförband i brottgränstillståndet. I ett draget bultförband överförs kraften genom dragbelastning av bultarna där bultens kropp belastas av en vinkelrät dragande kraft. Förband med dragna bultar delas in i två klasser med typ D: icke förspända och typ E: förspända. Skillnaden mellan dessa två beror på vilken bultklass som bör användas och ifall förspänning av bultarna fordras eller inte. Dimensioneringskrav för bultförbanden hittas i EN 1993-1-8 tabell 3.2. (SFS-EN 1993-1-8, 2005, kap. 3.4).

För bultförband kan också ett dragbelastat ekvivalent T-stycke användas för att modellera bärförmågan. Modellen av den ekvivalenta T-styckesflänsen kan användas för att beräkna bärförmågan för de grundläggande komponenterna i ett bultförband. T-styckeflänsmetoden förenklar åskådliggörandet av det beteende i spänningszonen som uppkommer då bultarna utsätts för dragspänning. Om bändningskrafter kan uppstå bör dimensioneringen för dragkraftskapacitet bestämmas som det lägsta värdet för tre möjliga brottmoder enligt EN 1993-1-8 tabell 6.2. Mod 1 innebär fullständig plasticering av ändplåten, vid mod 2 sker skruvbrott med plasticering av ändplåten och mod 3 innefattar totalt skruvbrott. Om bändningskrafter inte kan uppstå dimensioneras dragkraftskapaciteten som det lägsta värdet för två möjliga brottmoder. (SFS-EN 1993-1-8, 2005, kap. 6.2.4).

Svetsförbandens olika svetstyper omfattar kälsvets, kälsvets i hål, stumsvets, pluggsvets och svets i utflackande fog. Vilken typ av svets som används beror på egenskaperna och utgångsläget hos det element som ska sammanfogas. Svetsförband kan vara skjuvbelastade, momentbelastade eller dragbelastade. Vid dimensioneringen av bärförmåga för kälsvets, som är den vanligaste typen av svetsförband, väljs svetslängd och effektivt a-mått. (SFS-EN 1993-1-8, 2005, kap. 4).

2.2 IDEA StatiCa

Företaget IDEA StatiCa etablerades år 2009 i Tjeckien och efter fem års forskning samt teoretiska förberedelser släpptes den första versionen av deras programvara i mars 2014. IDEA StatiCa använder en komponentbaserad finita elementmetod, förkortat CBFEM av Component-Based Finite Element Method, vid analys av stålanslutningsdesign och därmed ges möjligheten att undersöka spänningar för alla olika typer av anslutningar och förband. Programvaran gör det möjligt för konstruktionsingenjörer att snabba upp dimensioneringsprocessen, beräkna enligt eurokoden och optimera mängden material. (IDEA StatiCa, 2009-2023a).

IDEA StatiCa erbjuder möjligheten att modellera med antingen stål eller betong och kan utföra helhetskontroll, spänningskontroll, styvhetsanalys och analyserar delarnas kapacitet och buckling av svetsade eller bultade anslutningar, förankringar och fundament av olika typer. Med IDEA StatiCa är det möjligt att designa nästan vilken stålanslutning som helst men programvaran erbjuder också möjligheten att importera och synkronisera från något annat FEA, förkortat av Finite Element Analysis, och CAD-program för att ytterligare minska designtiden. (IDEA StatiCa, 2009-2023b).

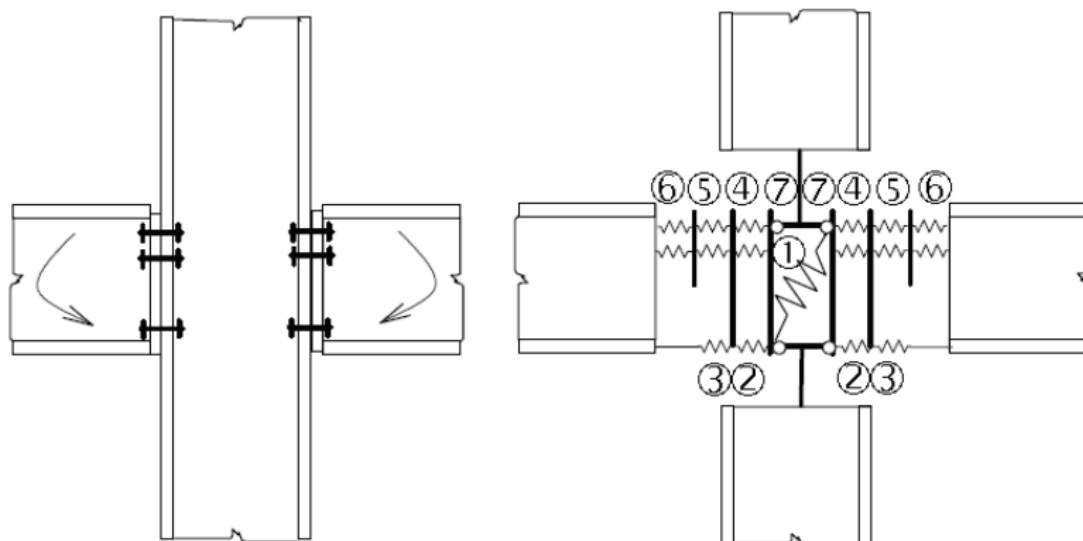
2.3 CBFEM

För att analysera och designa anslutningar av stålkonstruktioner under olika belastningsförhållanden har traditionella numeriska metoder som FEA, förkortat av Finite Element Analysis, och FEM, förkortat av Finite Element Method, använts under flera årtionden. Termen FEM innebär en uppsättning regler som styr hur tekniska problem kan lösas, medan termen FEA är den faktiska metoden som används för att lösa problemen. FEA och FEM är två vanliga förkortningar inom området för numerisk analys av strukturer och syftar på samma metod. Metoden tillämpas för att analysera strukturer och används inom nästan alla områden av teknisk analys på grund av den mångsidiga numeriska metod som används för problemlösning. Även om metoden har visat sig vara mycket effektiv har den också vissa begränsningar. (IEEE, u.d.).

Två universitet och utvecklarna av IDEA StatiCa introducerade grundidén med CBFEM, en komponentbaserad finita elementmetod. CBFEM är en synergi mellan komponentmetoden och finita elementmetoden. Komponentmetoden, CM, löser en anslutning som ett system av sammankopplade komponenter och bestämmer krafterna och spänningarna separat för varje komponent. Det här innebär att en modell måste skapas för varje anslutning och metodanvändningen är därmed begränsad till generella former och belastningar. (Wald, Sabatka, Bajer, & Kabelac, 2021, s. 11-13).

Wald och hans medförfattare föreslog den nya metoden CBFEM för att analysera och designa anslutningar av stålkonstruktioner. Metoden innebär en nedbrytning av en anslutning till komponenter. Jämfört med den vanliga komponentmetoden och finita elementmetoden, uppnår CBFEM en balans mellan effektivitet och verkningsgrad för att bedöma anslutningens säkerhet. Detta samtidigt som den kan tillhandahålla tillräcklig information för konstruktörer för att analysera mer komplexa anslutningars strukturella beteende. Ett stort antal valideringsstudier har genomförts som belyser noggrannheten och tillförlitligheten med CBFEM. (Ye, Quan, Yun, Guo, & Chen, 2022).

Utvecklingen inom datorhårdvara har gjort det enkelt och effektivt att använda finita element-programvara för att lösa problem. En av de viktigaste delarna av statisk beräkning och design av stålkonstruktioner är anslutningsberäkningen. Intentionen med CBFEM är metodens sätt att sönderdela en anslutning i enskilda komponenter där var och en komponent har en egen analysmodell (figur 2). På så sätt kan man ta hänsyn till de olika typerna av laster och påfrestningar som verkar på olika delar av anslutningen. (Sabatka, Wald, Kabelac, Kolaja, & Posisil, 2015).



Figur 2. Indelning av komponenter för delar i en symmetrisk balk-pelaranslutning. (Sabatka m.fl., 2015).

Tanken bakom CBFEM är att metoden ska kunna tillämpas för att snabbt och effektivt designa, analysera och kontrollera en mängd olika stålanslutningar enligt eurokod. Metoden möjliggör en mer detaljerad analys av anslutningen och kan ge mer exakta resultat än traditionella numeriska metoder. Dessutom möjliggör metoden att ta hänsyn till olika komponenters olika material och geometriska egenskaper. Genom att använda CBFEM fås därmed en bättre förståelse av hur en anslutning fungerar. (CBFEM team, 2021).

2.3.1 Material

Vid finita elementmodellering av konstruktionsstål används ideal plasticitet, elasticitet med töjningshärdning och det verkliga spännings-töjningsdiagrammet, som är de vanligaste materialdiagrammen. Detta illustreras i figur 3. Det verkliga spännings-töjningsdiagrammet beräknas utifrån materialegenskaperna hos det mjuka stålet som erhållits från dragprov och kan erhållas med följande formler (SFS-EN 1993-1-5, 2006, bilaga C.6):

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

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2)$$

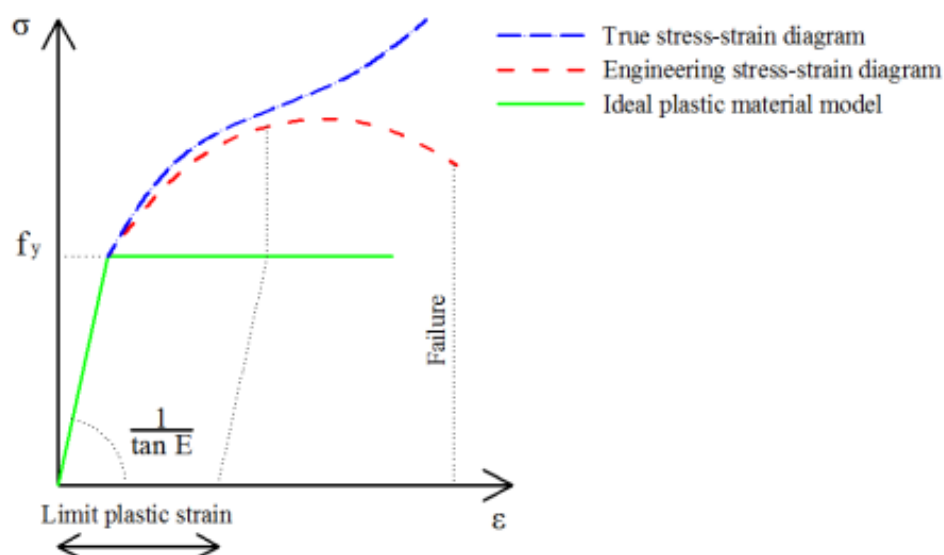
σ_{true} = verklig, sann spänning

ε_{true} = verklig, sann töjning

σ = nominell spänning

ε = nominell töjning

Element och plåtar i IDEA StatiCa är modellerade med elastiskt-plastiskt material enligt EN 1993-1-5, bilaga C 6(2) där materialbeteende är baserat på von Mises brottshypotes. De antas vara elastiska innan den dimensionerande sträckgränsen f_{yd} uppnås. Eurokod rekommenderar ett värde på 5 % för plastisk töjning. Faktum är att den ultimata belastningen har låg känslighet för gränsvärdet av plastisk töjning när den idealiska plasticitetsmodellen används. (Wald m.fl., 2021, s. 19).

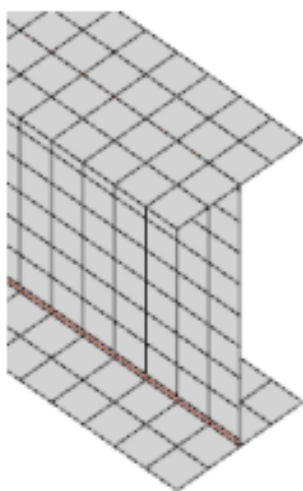


Figur 3. Materialdiagram av stål i numeriska modeller. (Wald m.fl., 2021, s. 19).

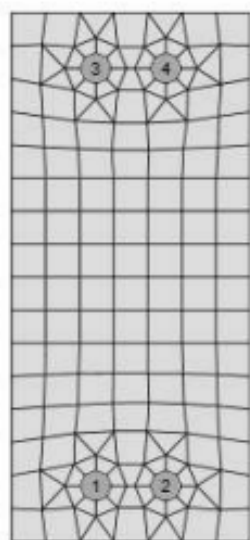
2.3.2 Modellering av plåtar och nätsystem

Plåtar gestaltas som rektangulära element med en nod i varje hörn där varje nod beaktar sex frihetsgrader. Frihetsgraderna omfattar tre linjära, u_x, u_y, u_z , och tre roterande, $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$. Deformationer av elementet är uppdelade i membran- och böjkomponenter. Membranbeteendets formulering är baserat på Ibrahimbegovic verk (1990) och böjningskomponenterna där skjuvdeformationer, rotationer, som sker vinkelrätt ut ur elementets plan är baserat på Mindlin-hypotesen. Plåten är uppdelad i fem integrationspunkter längs dess höjd varav det plastiska beteendet analyseras vid varje punkt, vilket kallas för Gaus-Lobatto integration. (Wald m.fl., 2021, s. 21).

Elementens nätgenerering avgör resultatets säkerhet. Med för litet konvergenstoleranser, för stora rutor, blir de erhållna resultaten felaktiga och för strikt tolerans, för många små rutor, innebär stor beräkningsbelastning med onödig noggrannhet. Storleken på nätgenereringen går att justera i inställningarna i IDEA StatiCa. Förinställningen på den minimala elementstorleken är inställd på 10 mm och den maximala elementstorleken till 50 mm. Nätgenereringen på flänsar och liv är oberoende av varandra, med standardtal på åtta stycken rutor per tvärsnittshöjd (figur 4). Plåtar är separata och oberoende av andra delar i en anslutning och dess standardstorlek är inställd på 16 rutor per tvärsnittshöjd och sju stycken på bredden (figur 5). (Wald m.fl., 2021, s. 21-22).



Figur 4. Nätgenereringen mellan flänsar och liv är oberoende av varandra. (Wald m.fl., 2021, s. 21).



Figur 5. Nätgeneration på en plåt med 16 element per tvärsnittshöjd och sju element på bredden. (Wald m.fl., 2021, s. 22).

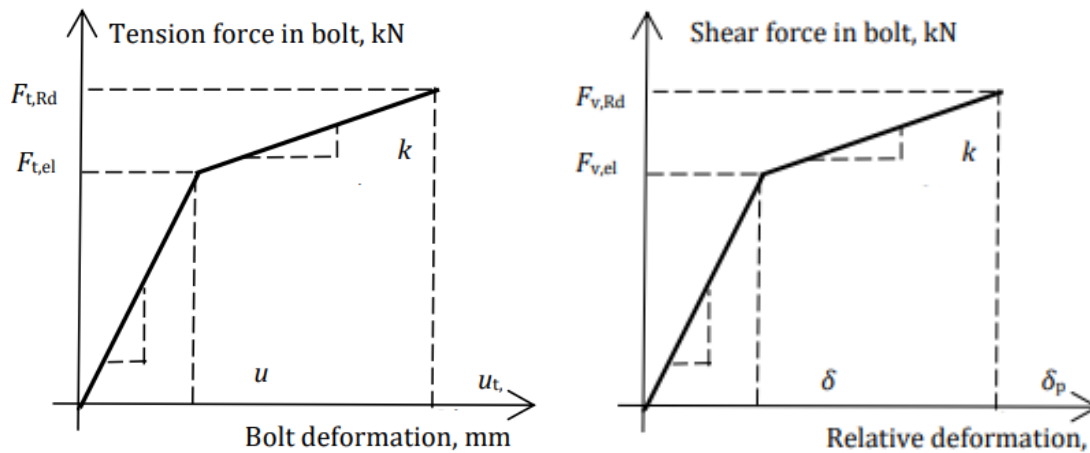
2.3.3 Svetsar

För hanteringen av svetsar i numeriska modeller finns det flera metoder. Den mest använda för svetskonstruktion är plasticitetmodellen enligt von Mises brotthypotes. För svetsar används två metoder där det första alternativet är direkt sammanfogning mellan plåtar. Den direkta sammanfogningen mellan plåtar innebär att belastningen överförs genom kraft- och deformationsbegränsningar baserade på Lagranges ekvationer mellan de anslutna elementen. Lagranges ekvationer används för att bestämma rörelsen för ett mekaniskt system. Anslutningen definieras som *multipoint constraint*, MPC, och relaterar de finita elementnoderna av en plåtkant till en annan plåt. Fördelen med detta tillvägagångssätt är möjligheten att ansluta nätsystem med olika densitet. Begränsningen gör det möjligt att modellera mittlinjeytan på de anslutna plåtarna med förskjutning, vilket respekterar den verkliga svetskonfigurationen och plåttjockleken. Programmet beräknar exakta spänningsvärden i svetsarna. Den andra metoden för svetskonstruktion är den plastiska metoden där ett elastoplastiskt element placeras mellan plåtarna. Svetsen analyseras då genom olinjär materialanalys och det elastoplastiska beteendet för svetsen bestäms. Den elastoplastiska modellen av svetsar ger verkliga värden på spänningen och det finns inget behov av att ange ett medelvärde eller interpolera spänningen. Ideal plasticitetsmodell används och plasticeringen har samma begränsning för svetsarna som för plåtarna, det vill säga 5 %, rekommenderat enligt eurokod. (IDEA StatiCa, 2009-2023c).

2.3.4 Bultar

Med CBFEM bestäms en bults beteende vad gäller spänning, skjuvning och belastningskapacitet av en olinjär fjäder. En bult med spänning beskrivs av en fjäder med axiell initialstyvhet, bärförmåga, initialisering av eftergivlighet och deformationskapacitet. Vid början av brott och deformerbarhet antas plastisk deformation endast ske i den gängade delen av bulten och elastisk deformation uppstår i bultkroppen. Bultens kraftdeformationsdiagram visas i figur 6. (Wald m.fl., 2021, s. 29).

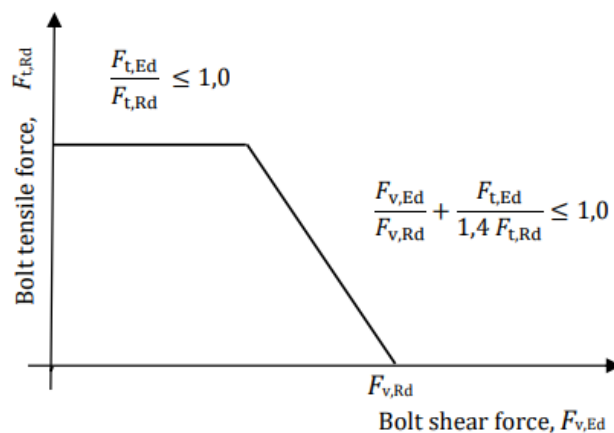
Den initiala styvheten och designmotståndet för en bult i skjuvning är modellerad i CBFEM enligt kapitel 3.6 och kapitel 6.3.2 i EN 1993-1-8. Fjädern som representerar bulten i skjuvning (figur 6) har bi-linjär kraftdeformation. (Wald m.fl., 2021, s. 30).



Figur 6. Kraftdeformationsdiagram av en bult i spänning och kraftdeformationsdiagram av en bult i skjuvning. (Wald m.fl., 2021, s. 29-30).

Den olinjära fjädern har ett speciellt beteende i växelverkan mellan skjuvning och spänning. Skjuv- och dragkrafterna representeras som olinjära funktioner av skjuvnings- och dragdeformationer sammansatta av styrda ytor. Ett tillstånd som begränsar bultmotståndet visas i figur 7. Det är tydligt att bulten kan vara i tre tillstånd: linjärt beteende, plastiskt tillstånd vid spänning och plastiskt tillstånd vid dragning och skjuvning. (Wald m.fl., 2021, s. 31). Samspelet mellan bult skjuvkraft och spänning uttrycks enligt följande (SFS-EN 1993-1-8, 2005, tabell 3):

$$\max \left\{ \frac{F_{t,Ed}}{F_{t,Rd}}, \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \right\} \leq 1,0 \quad (3)$$



Figur 7. Gränsvillkor för samverkan mellan skjuvning och spänning i en bult. (Wald m.fl., 2021, s. 31).

Förspänning av bultar har stor inverkan på bultförbandens rotationsstyvhet. Spänningsmodellen för en förspänd bult liknar standardbultar men skjuvkraften överförs endast genom friktion. Syftet med att förspänna bultar är att säkerställa att anslutningen håller ihop på ett säkert sätt genom att öka friktionen mellan bulten och anslutningsytan och därigenom öka bultens hållfasthet. IDEA StatiCa kontrollerar gränstillståndet för glidning för förspända bultar. Glidmotståndet hos en förspänd bult påverkas av en applicerad dragkraft. Om en glideffekt uppstår uppfyller bultarna inte kontrollen och därefter bör efterglidningsgränsen kontrolleras som en standard kontroll av bärförmåga för bultar där bulthål och bultar är i skjuvning. Designalternativ inkluderar motstånd mot större slirning eller efterglidning, förutsatt att bultarna beter sig normalt efter den höga slirningen. Att bultar utsätts för slirning innebär att bultarna rör sig i anslutningen, trots att de dragits åt med rätt spänning. Slirning minskar bultarnas spänning och därmed bultens hållfasthet vilket kan leda till ökad risk för bultbrott. (IDEA StatiCa, 2009-2023c).

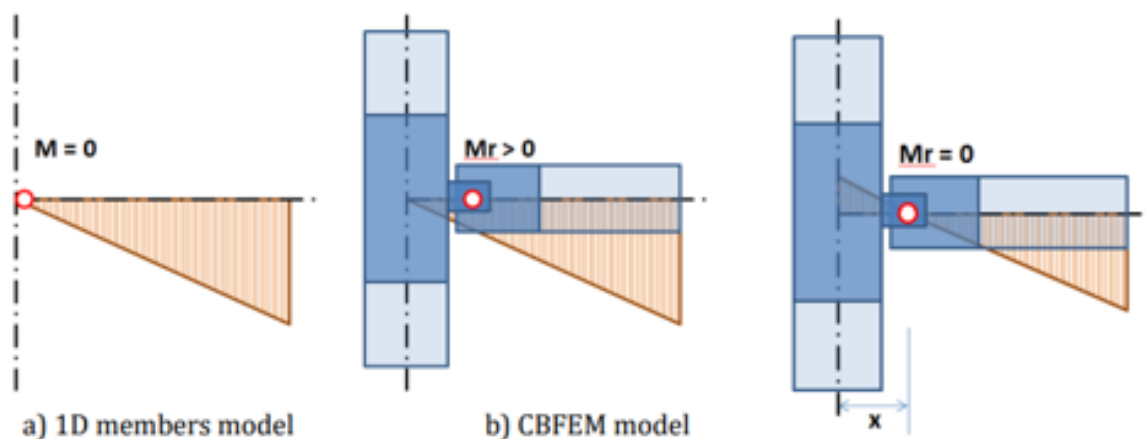
2.3.5 Analys

Snabb analys av komplexa geometrier är möjlig tack vare CBFEM. Programmet skapar automatiskt en analyserad FEM-modell. Konstruktören väljer vilka element och tillverkningsoperationer (till exempel snitt, svetsar, plåtar och förstyvningar) modellen ska bestå av. Ett element bör alltid vara bärande, vald av konstruktören. Det bärande elementet kan vara kontinuerligt med stöd i bägge ändorna eller ha stöd i endast ena ändan. Övriga element, de som inte är valda som bärande, är anslutna, sammankopplade element. Det finns flera typer av anslutna delar. Beroende på belastningen är det möjligt att välja mellan följande modelltyper:

- N-Vy-Vz-Mx-My-Mz – elementet kan överföra alla sex interna kraftkomponenter.
- N-Vy-Mz – elementet kan överföra krafter endast i XY-planet.
- N-Vz-My – elementet kan överföra krafter endast i XZ-planet.
- N-Vy-Vz – elementet kan endast överföra normalkraften N och skjuvkrafterna Vy och Vz.

Vid analys av ramstrukturer är varje anslutning i jämviktsläge. Om ändkrafter appliceras på element i en mer komplex och detaljerad anslutning uppnås också jämvikt. Varje nod måste vara i jämvikt, såvida det inte är en enkel anslutning. En enkel anslutning innebär att det bärande elementet är kontinuerligt. (IDEA StatiCa, 2009-2023c).

Den teoretiska 1D-modellen skiljer sig från ledens verkliga position i strukturen (figur 8). Vid applicering av de beräknade inre krafterna appliceras ett betydande böjmoment på den förskjutna anslutningen och då blir anslutningen antingen överbelastad eller omöjlig att konstrueras. Båda modellerna måste överensstämja, antingen genom att definiera leden i 1D-elementmodellen i rätt position eller så måste skjuvkraften flyttas så att man får ett nollmoment i leden. (Wald m.fl., 2021, s. 51).



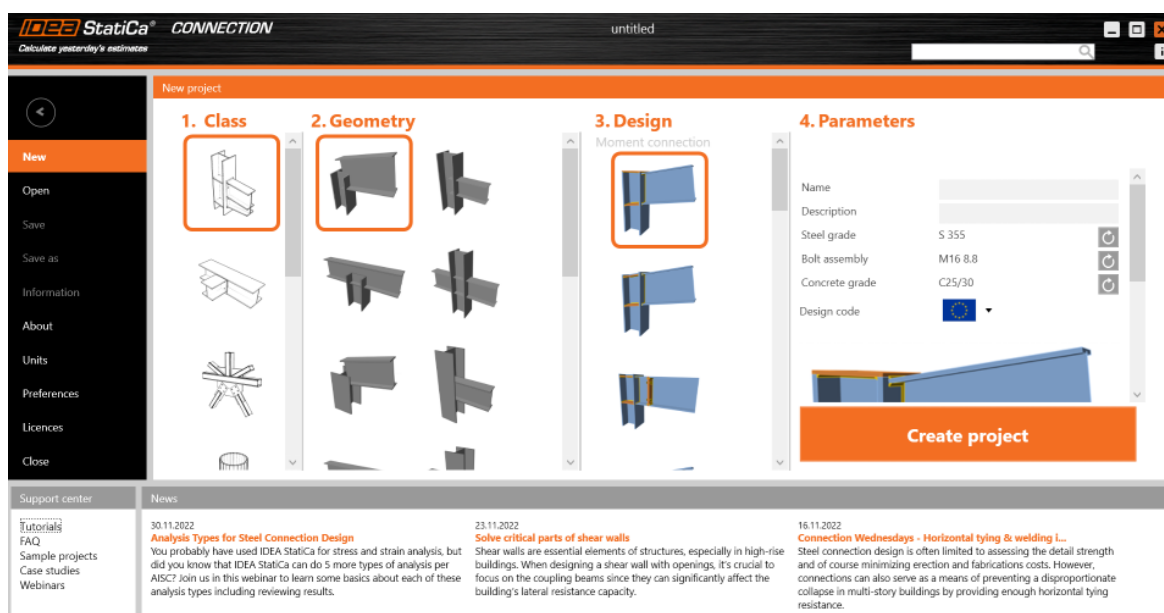
Figur 8. Ledens position i den teoretiska och i den verkliga strukturen. Leden eller kraften måste flyttas enligt figuren, så att ett nollmoment fås vid leden. (Wald m.fl., 2021, s. 51).

3 Introduktion till IDEA StatiCa Steel Connection

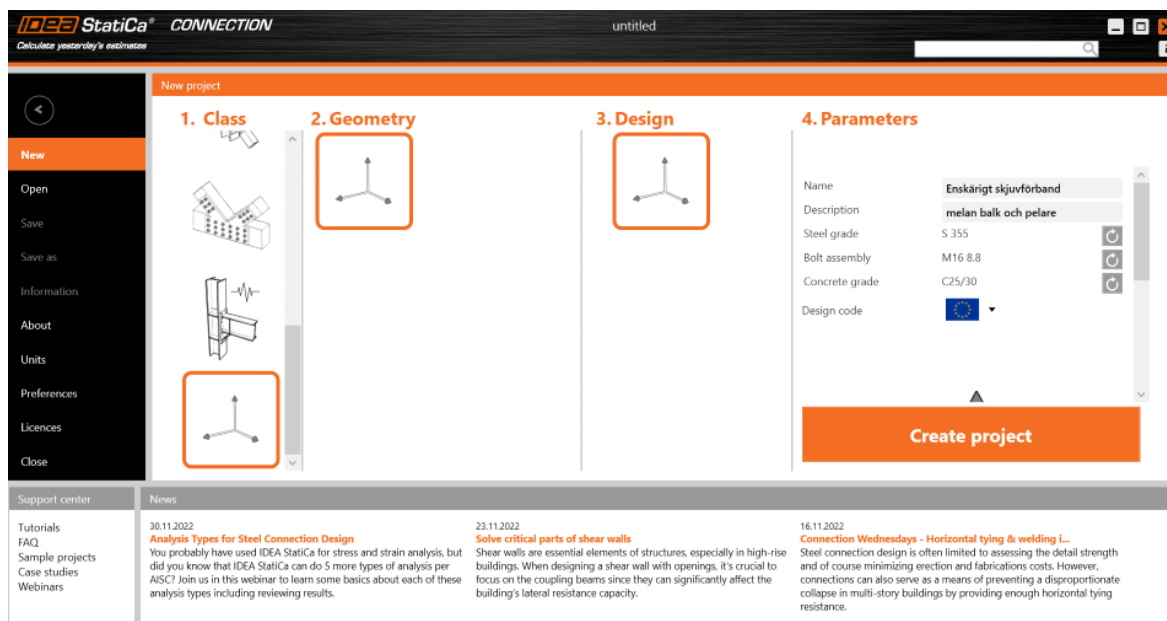
Moderna programvaror förlitar sig på användarens förståelse av de tekniska principerna som ingår i programmet. Detta kapitel ger en introduktion till IDEA StatiCa version 22.1 och är tänkt att fungera som en manual för programvaran. Andra versioner av programvaran kan ha något olika användargränssnitt och illustrationerna kanske inte kan följas med de exakta stegen som har använts i denna introduktion. Kapitlets avsikt är att vägleda den nya användaren att undvika vanliga misstag som potentiellt kan leda till felaktiga resultat. Introduktionen vägleder skapandet av ett förband i IDEA StatiCa Steel Connection och förevisar de mest relevanta funktionerna vid modellering och analys.

3.1 Geometri och projektdata

När programmet startas visas dialogen i figur 9. I dialogen är det möjligt att skapa ett nytt projekt alternativt öppna en tidigare modellerad anslutning. När en ny detaljprojekteringsprocess påbörjas är det möjligt att utgå från en av programvarans befintliga modeller. Det är också möjligt att påbörja utifrån ett tomt projekt och skapa anslutningen helt från början enligt figur 10. I startdialogen fylls även projektparametrar i, så som projektnamn och projektbeskrivning. I det här skedet är det också möjligt att definiera kvalitet för vilka material dimensioneringen görs med och vilken eurokod som ska användas vid analys. Parametrarna kan ändras efter att modellen skapats.



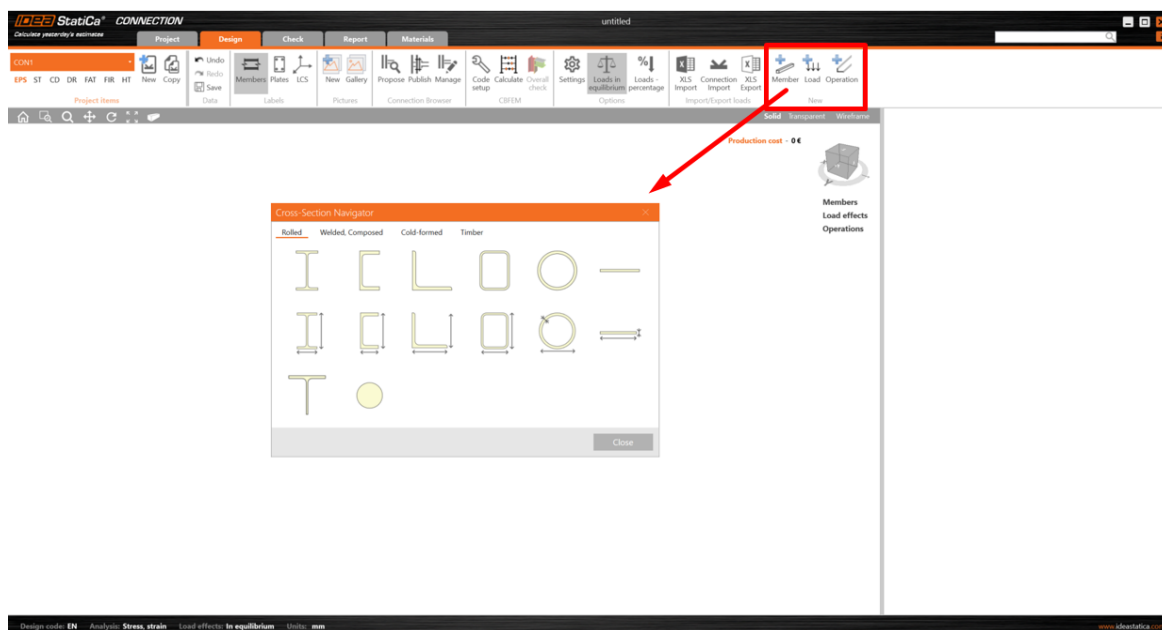
Figur 9. Startdialog i IDEA StatiCa Steel Connection med möjlighet att välja en geometri som liknar det som ska skapas.



Figur 10. Val vid skapandet av en anslutning helt från början utifrån ett tomt projekt.

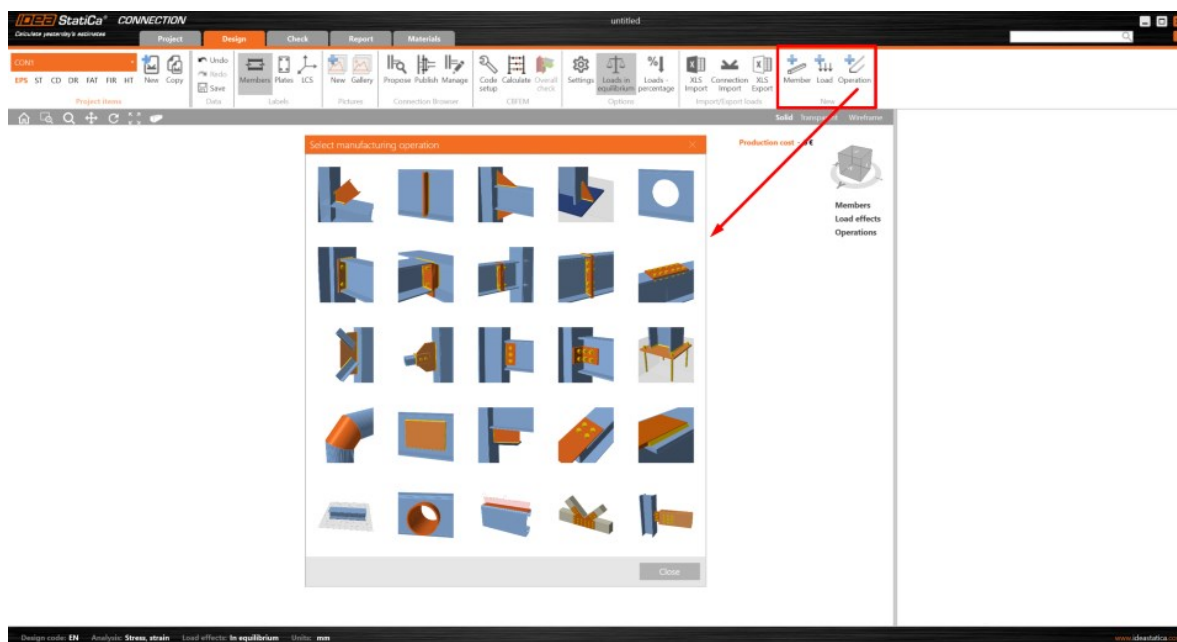
3.2 Design

Genom att klicka på knappen *member* i verktygsfältet är det möjligt att börja designa element. Huvudelementen, exempelvis pelare, balkar och stag, som utgör anslutningen är de element som senare belastas. Egenskaperna för varje element kan ändras i fönstret för funktionen och det är även möjligt att skräddarsy stålsektioner med avancerade former. På samma ställe finns även *load* som används för att lastinsättning (figur 11). Insättningen av laster på anslutningen är lika viktigt som modelleringen av själva anslutningen. De angivna krafterna bör anges som dimensionerande last. Lastens position ställs in i dialogrutan för elementen. Det är möjligt att välja att kraften ska positioneras antingen i noden, bultarna eller enligt vald position. Positionen har stor betydelse i resultatet eftersom detta avgör hur kraften fördelas i anslutningen. Därtill är det viktigt att se till att lasterna är i jämvikt. IDEA StatiCa erbjuder en jämviktskontroll genom knappen *loads in equilibrium* som även den hittas i verktygsfältet. Om strukturen är i jämvikt blir summan av krafterna och momenten noll. Det här innebär att det kontinuerliga elementet frigörs i ena änden och hela anslutningen bör representera ett jämviktsstillstånd av laster. Belastningar som inte uppfyller detta, tas inte med i analysen och felaktiga resultat kan uppkomma.



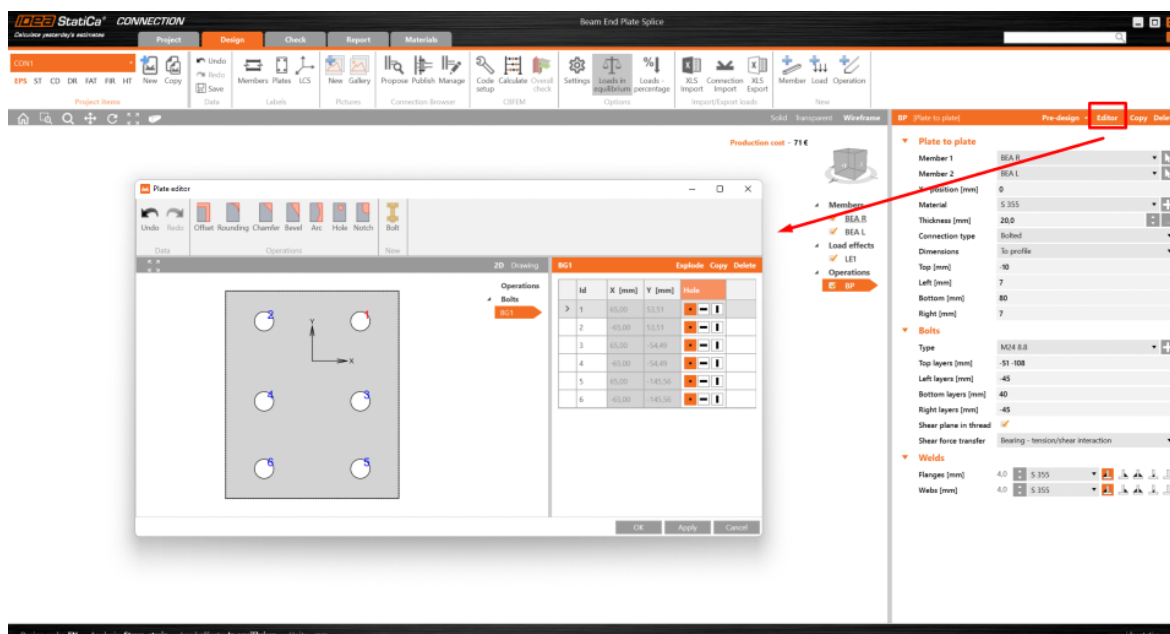
Figur 11. Verktygsfält för insättning av element och laster med möjligheter till funktionsval.

För att koppla ihop elementen används *operation* vilket innebär modellering av plåtar, svetsar och bultar. Användningen av *operations* rekommenderas eftersom dessa föreskrivs som intelligenta makron och med hjälp av dem är det möjligt att ställa in många detaljer (figur 12).



Figur 12. *Operation* består av intelligenta makron som används för modellering av plåtar, svetsar och bultar.

En plåt kan ytterligare modifieras med hjälp av plåteredigeraren som gör det möjligt att exempelvis lägga till avrundningar i hörnen (figur 13). Varje tillagt element, lastfall och operation presenteras i listan på höger sida av det grafiska fönstret.



Figur 13. Plåteredigeraren gör det möjligt att ytterligare modifiera plåtdesignen.

Visualiseringen av modellen är justerbar i verktygsfältet med alternativen heldragnet, *solid*, genomlysande, *transparent*, eller trådrams, *wireframe*, utseende. Den genomlysande displayen kan vara användbar för placering av element i komplexa anslutningar där vissa delar är svårvisualiserade. Vid insättning av elementen dimensioneras anslutningen önskvärt så att tyngdpunkten, noden, påträffas i mitten av anslutningen. Under dimensioneringsprocessen är det viktigt att beakta var noden befinner sig eftersom den representerar den faktiska noden i en fullständig beräkningsmodell av anslutningen. Noden görs synlig med alternativet *wireframe*.

3.3 Kodkontroll och analys

Det är viktigt att följa de relevanta designkoderna och standarderna vars land projektet ska utföras i. Vid design av stålkonstruktioner bör landspecifika partialkoefficienter användas. Partialkoefficienterna beskriver säkerhetsmarginaler på konstruktionsdelars bärlighet och varierar mellan länder. De landspecifika partialkoefficienterna definieras vanligtvis av de karakteristiska värdena för lasterna och lastkombinationerna och används för att ta hänsyn till osäkerheten hos de laster som kommer att appliceras på konstruktionen. För att säkerställa att strukturen är säker och effektiv för det specifika landet i fråga justeras partialkoefficienterna i IDEA StatiCa vid knappen *code setup* som hittas i verktygsfältet. Under samma flik finns många förinställda värden baserade på vilken designkod som valts. Dessa värden kan ändras manuellt vid behov. Länders partialkoefficienter hittas lämpligast i relevanta designkoder, standarder och nationella annex, bilagor, som gäller för landet.

Beställaren för detta examensarbete utför främst projekt i Finland, Sverige och Norge. Ländernas partialkoefficienter som behövs för analys av en modelldesign i IDEA StatiCa presenteras i tabell 1. Partialkoefficienter hittas i ländernas nationella bilaga för eurokod EN 1992-1-1, EN 1993-1-1 och EN 1993-1-8.

Tabell 1. Finlands, Sveriges och Norges partialkoefficienter som behövs för designanalys

Partialkoefficient	Finland	Sverige	Norge
γ_{M0}	1.0	1.0	1.05
γ_{M1}	1.0	1.0	1.05
γ_{M2}	1.25	1.2	1.25
γ_c	1.5	1.5	1.5
γ_{Inst}	1.0	1.0	1.0
γ_{M3}	1.25	1.2	1.25
$\gamma_{M.fi}$	1.0	1.0	1.0
γ_{Mu}	1.1	1.1	1.1

γ_{M0} = partialkoefficient, säkerhetsmarginal för tvärsnittets bärförmåga

γ_{M1} = partialkoefficient vid dimensionering mot instabilitet

γ_{M2} = partialkoefficient, säkerhetsmarginal vid dimensionering mot brotthållfasthet

γ_c = partialkoefficient för betong

γ_{Inst} = partialkoefficient, säkerhetsmarginal för installation

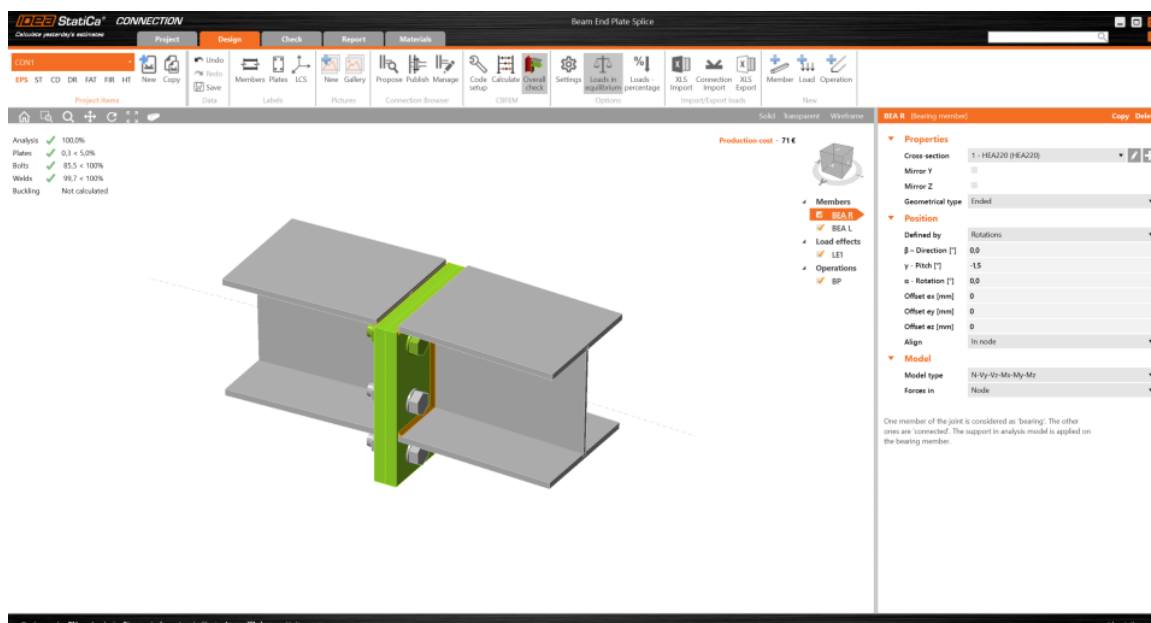
γ_{M3} = partialkoefficient för friktionsmotstånd

$\gamma_{M.fi}$ = partialkoefficient för bultar och svetsar i branddesign

γ_{Mu} = partialkoefficient för horisontell koppling

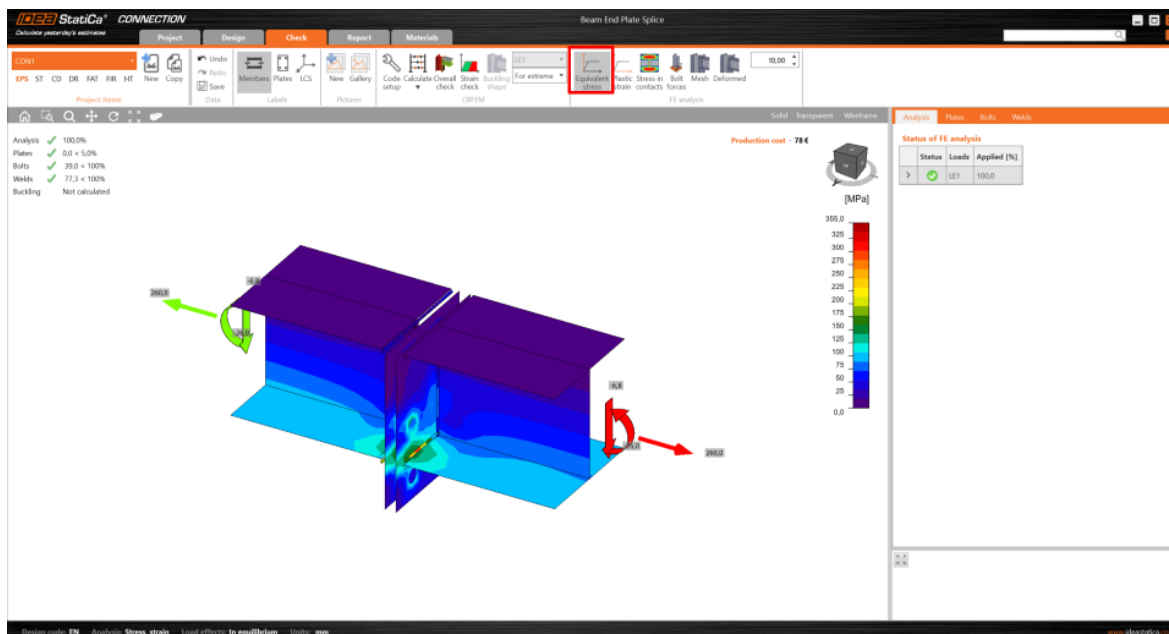
Med korrekta inställningar och en komplett designad anslutning kan analysen göras genom knappen *calculate* som hittas i verktygsfältet. Analysen ger procentandelen av de laster som ingår i anslutningen som har tillämpats. Det finns två sätt att erhålla resultaten för en anslutning. Ett sätt är att applicera hela belastningen och utvärdera komponenternas tillstånd. Då beräknas hela anslutningen med de givna lastkombinationerna och en kort sammanfattning av resultatet påträffas i det övre vänstra hörnet. Det andra sättet är att applicera belastning tills en av komponenterna brister. Det här styrs också vid fliken *code setup* där alternativet *stop at strain limit* kan aktiveras och avaktiveras.

En färgpresentation kommer i samband med att anslutningen räknats och analyserats igenom (figur 14). Ett grönt resultat av färgpresentationen innebär 60 % utnyttjande, gult betyder över 95 % utnyttjande och är en varningsnivå medan rött är ett misslyckande. Vid orange färg har komponenten plasticerats till en viss nivå men inom acceptabla gränser. Procentsatser kan ändras i *code setup*.



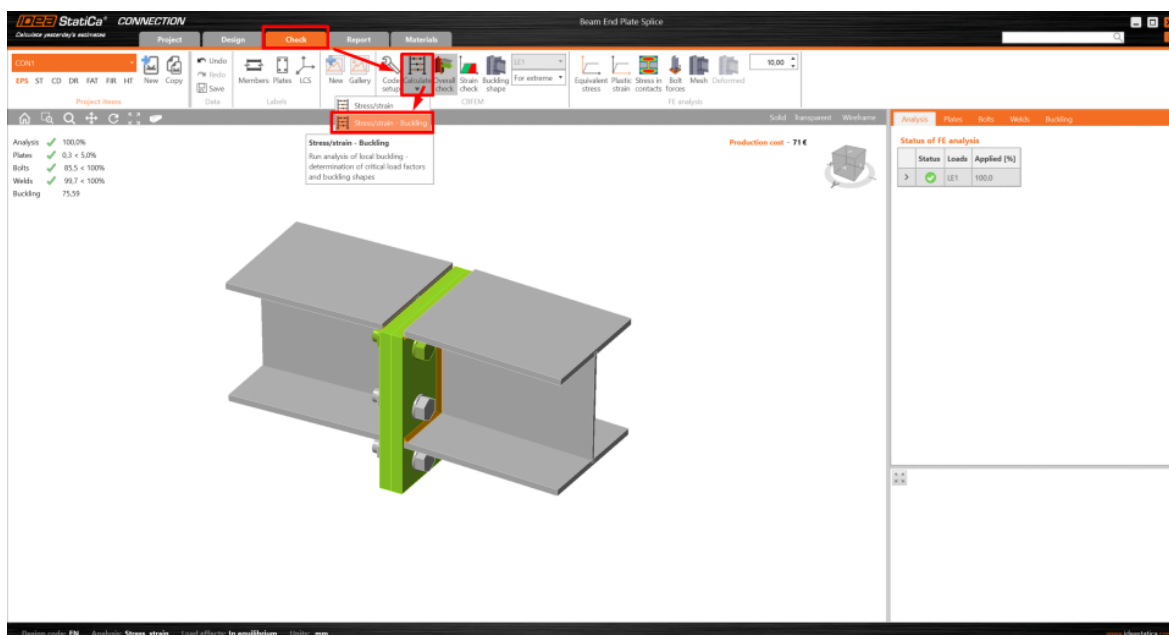
Figur 14. Färgpresentation av resultatet efter genomförd analys av anslutningen.

Mer detaljerade resultat hittas vid fliken *check* i huvudnavigatören, där det bland annat är möjligt att utvärdera fördelningen av spänningar och töjningar genom hela anslutningen. Genom att aktivera *equivalent stress* är det möjligt att se den ekvivalenta spänningen för den designade anslutningen. Ekvivalent spänning är ett mått på den spänning som en konstruktion upplever under olika belastningar och randvillkor. Den ekvivalenta spänningen tar hänsyn till olika typer av spänningar, axial-, böj- och skjuvspänningar, som strukturen utsätts för, och kombinerar dem till ett värde som representerar den totala spänningen som strukturen upplever. IDEA StatiCa presenterar ekvivalenta spänningen med färgkoder (figur 15). Den ekvivalenta spänningen jämförs med materialets sträckgräns och tillåtna spänning för att verifiera om konstruktionen är säker och stabil. Ju högre spänning desto rödare färg och ju lägre spänning desto grövre färg. Dessutom kan motsvarande spänning användas för att kontrollera konstruktionens beteende under olika lastkombinationer. Den kan också användas för att identifiera kritiska områden av strukturen där spänningen är högst och optimera utformningen av strukturen för att minska spänningen i dessa områden. De plastiska töjningar som förekommer i anslutningen presenteras med *plastic strain* där gränsvärdet är 5 % enligt Eurokod 1993-1-5 Bilaga C.8 ANM. 1.

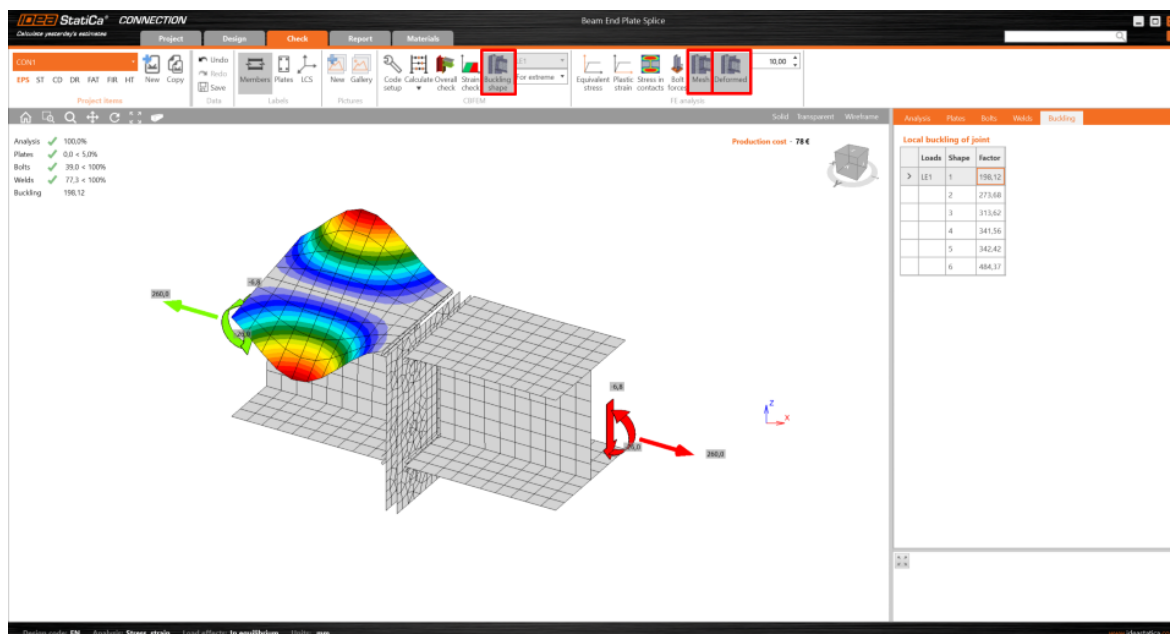


Figur 15. Visuellt resultat av ekvivalent stress. En röd färgkod indikerar hög spänning eller att spänningen överstiger materialets sträckgräns. En gul färgkod antyder på medelhög spänning som kan indikera till en potentiell deformation medan grön och blå färg indikerar låg spänning och konstruktionen anses vara stabil.

Utöver detta har IDEA StatiCa ytterligare flera analyser inbyggda. Bland annat kan anslutningens buckling analyseras. Även om analysen av anslutningens komponenter är tillfredsställande, kan anslutningen vara instabil och uppvisa en hög känslighet för buckling, vilket då gör resultaten ogiltiga. Bucklingsanalysen hittas vid *check* fliken och genom rullgardinsmenyn vid *calculate* (figur 16). Bucklingsformer kan observeras genom *buckling shape* knappen och med knapparna *mesh* och *deformed* aktiverade fås en tydligare visualisering över hur anslutningen deformeras vid buckling (figur 17).

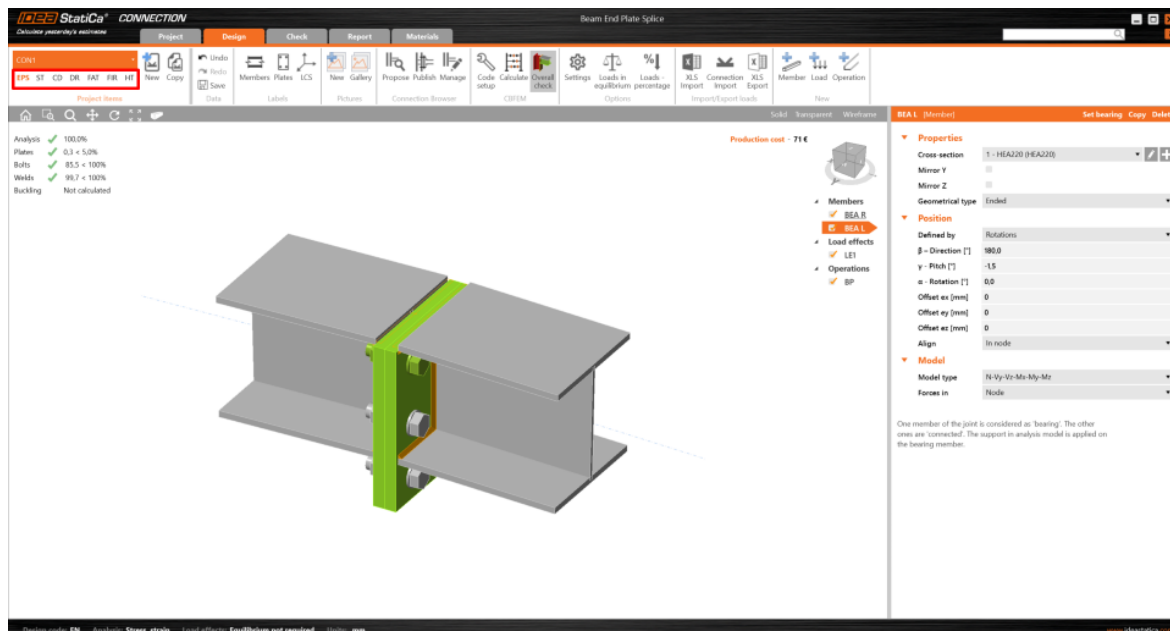


Figur 16. Bucklingsanalysen hittas vid fliken *check* och genom rullgardinsmenyn vid *calculate*.



Figur 17. Bucklingsdeformationer visualiseras genom att aktivera knapparna *buckling shape*, *mesh* och *deformed*.

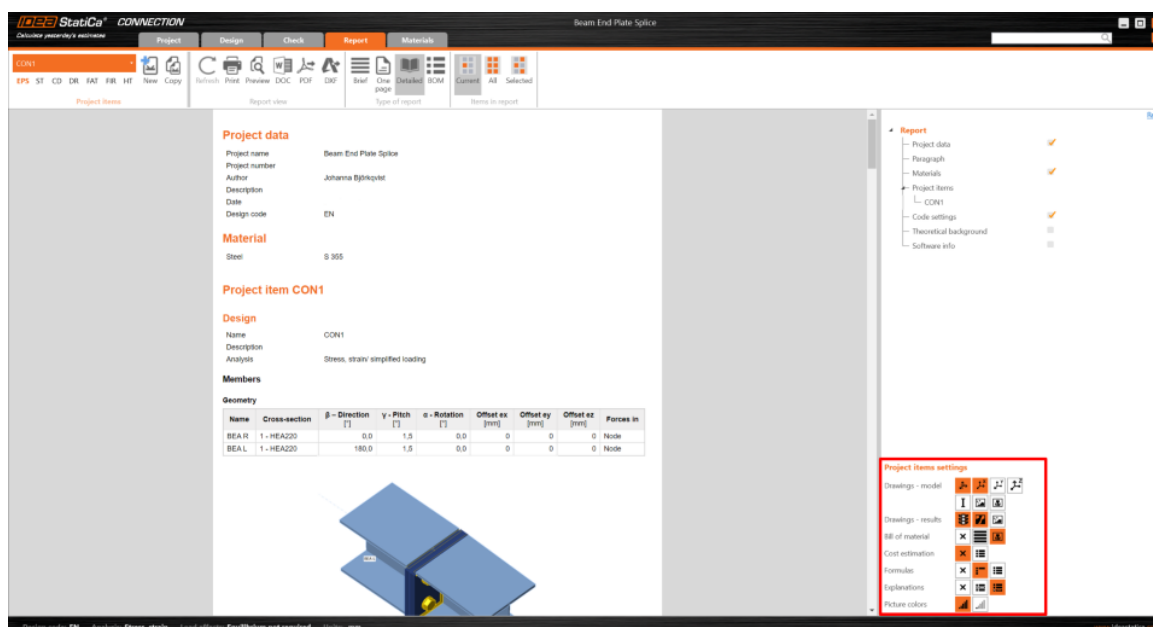
Dessutom finns det möjlighet att utföra styvhetsanalys av enskilda element och kapacitetsanalys där anslutningens avledande beteende kontrolleras. Genom att välja mellan knapparna inramade i figur 18 kan även anslutningen analyseras för designmotstånd, utmattning, branddesign och horisontal koppling.



Figur 18. Funktionsknappar för att analysera designmotstånd, utmattning, branddesign och horisontal koppling.

3.4 Rapport

När modelleringen och analysen av anslutningen är klar är det sista steget i arbetsflödet genereringen av rapporten. Rapporten nås genom fliken *report* i huvudnavigatören och är konfigurerbar på många sätt. Vad som ska ingå i rapporten kan enkelt ändras genom att klicka på kryssrutorna och bilderna som finns ned till höger (figur 19). Rapportstrukturens ordning kan även ändras genom att dra och släppa rubrikerna uppe till höger. Det är möjligt att komma åt specifik, detaljerad information om de olika elementen som utgör anslutningen, samt tillverkningsritningar, med måttlinjer, som kan skrivas ut och exporteras till .dxf format. Rapporten presenterar detaljerad information för var och en av bultarna samt svetsarna som ingår i anslutningen. Resultatet för kontroll av bultar och svetsar beräknas enligt EN 1993-1-8 tabell 3.4 och EN 1993-1-8 tabell 4.5.3.



Figur 19. Omfattningen av rapporten styrs med kryssrutor.

3.5 Svårigheter

Trots att IDEA StatiCa har haft en enorm inverkan på konstruktionsingenjörers vardag vid design och analys av stålanslutningar med dess tidsbesparing, produktivitet och säkerhet gällande stålkonstruktioner, är risken stor att någonting under designprocessen fallerar vilket resulterar i felaktiga resultat. Detta eftersom IDEA StatiCa förlitar sig på användarens kunskaper för programvaran. Vid design i IDEA StatiCa finns det flera viktiga faktorer att ta hänsyn till. Samma som att valet av material och deras egenskaper påverkar strukturens styrka och styvhet påverkas även strukturens beteende och prestanda genom den geometriska

utformningen av strukturen. Statiska modeller kan vara svåra att förstå och implementera, speciellt för de mindre erfarna. Användaren uppmanas försiktighet gällande insättning av *offset* vid design av element för att undvika att excentricitet och tilläggsmoment uppkommer. I stället är det möjligt att använda operationen *cut of member* och genom det påverka placeringen av profilen. På samma sätt kan placeringen av förslagsvis en plåt i förhållande till en balkprofil påverkas genom att använda någon form av *operation*. På det här sättet kommer nodpunkten för hela anslutningen alltid behållas som en punkt i mitten av anslutningen, vilket är eftersträvarsvärt. Vid applicering av laster som belastar strukturen är det viktigt att definiera i vilken riktning elementet utsätts för normal, böj- och skjuvkrafter. (IDEA StatiCa, 2022a).

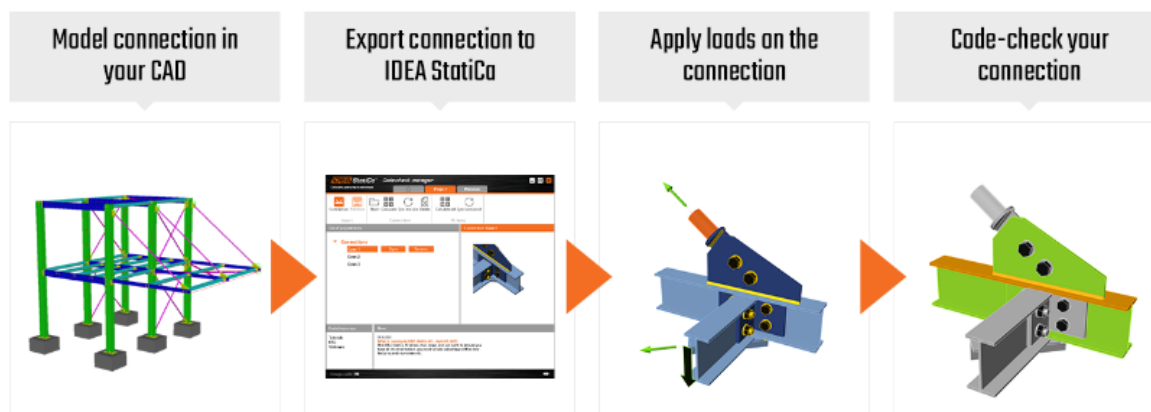
För en framgångsrik modelldesign i IDEA StatiCa behövs en noggrann och komplett strukturmodell. Det första steget är att definiera elementens geometri och dimensioner i korrekt ordning, där insättningsordningen på operationerna i IDEA StatiCa spelar roll. Namngivningen av elementen föreskrivs enligt företagets specifikationer för att underlätta förståelsen för andra som bekantar sig med modellen. Ytterst viktigt är att krafter och moment som verkar på strukturen ska vara balanserade, att summan av dem är noll. Det här ger att strukturen är i jämvikt och kommer inte roteras. (IDEA StatiCa, 2022b).

3.6 Import av anslutningar

Oftast använder företag inom konstruktionsplanering flera programvaror under projektskedens gång. För att ytterligare effektivisera detaljberäkningsprocessen ges möjligheten att importera och synkronisera IDEA StatiCa med FEA och CAD program. IDEA StatiCa samarbetar exempelvis med Tekla Structures, vilket innebär att det är möjligt att valfritt välja en anslutning inklusive alla dess element i Tekla Structures, exportera till IDEA StatiCa med hjälp av en macro-funktion, addera belastningar och kontrollera om den håller (figur 20). (IDEA StatiCa, 2009-2023b).

Trots flera fördelar med möjligheten att importera stålanslutningar som innebär att konstruktören sparar tid, minimerar fel och öppnar upp för optimeringsmöjligheter förhindrar importen en del relevanta funktioner i IDEA StatiCa. För import av en anslutning väljs en nod-punkt för hela anslutningen varefter alla element förhåller sig till punkten. Det här innebär att importerade plåtar inte kan modifieras desto mera i IDEA StatiCa på grund av deras bestämda positioner enligt koordinater som relaterar till den valda noll-punkten. Exempelvis ändplåtar är ofta relaterade till profilens storlek men eftersom plåtarna inte

förhåller sig till profilen utan till koordinaterna, ändras inte plåtens dimensioner vid ändring av profilmått. Det kan vara värt att ta bort den importerade plåten och skapa en ny med hjälp av IDEA StatiCas funktioner. IDEA StatiCa klarar inte heller av att upptäcka vissa svetsar som importeras från Tekla Structures. Därför lönar det sig för konstruktören att kontrollera så att behövliga svetsar faktiskt utformas korrekt. (IDEA StatiCa, 2009-2023d).

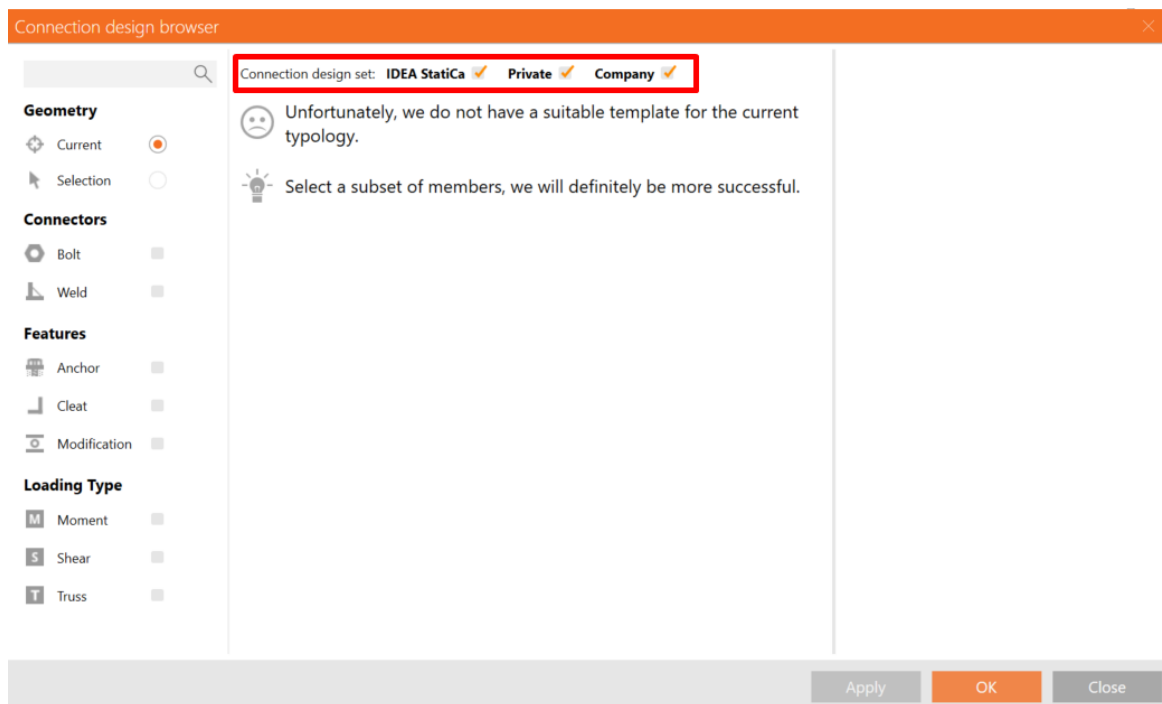


Figur 20. Import från Tekla Structures till IDEA StatiCa. (IDEA StatiCa, 2009-2023b).

3.7 Connection design browser

I slutet av 2021 lanserade IDEA StatiCa verktyget Connection design browser. Verktöget erbjuder tre användningsområden, så som allmän design, en personlig modelldatabas och delning av modeller (figur 21). Med den allmänna designuppsättningen fås tillgång till IDEA StatiCas egna standardbibliotek. Designuppsättningen ger förslag till en lämplig designlösning från ett molndatabas för alla typer av geometrikombinationer. Användaren kan tillika välja att skapa en egen modelldatabas, ett bibliotek, med personliga designuppsättningar. Det är möjligt att spara vilka anslutningsdesigner som helst till biblioteket för att återanvända designlösningen senare.

De skapade designuppsättningarna kan användas för privat bruk men IDEA StatiCa tillhandahåller också möjligheten att dela modellerna med kollegor på företaget. Det här innebär att det är möjligt att använda en designlösning bekräftad av en annan kollega som har laddat upp designen till modelldatabasen. Vid val av lämplig designuppsättning appliceras designen direkt på anslutningen. Verktöget gör det möjligt för konstruktörer att hitta den bästa och mest lämpliga lösningen från ett bibliotek med fördefinierade utformningar vid design av anslutningar. Syftet med verktöget är alltså att konstruktören inte ska slösa tid på att skapa det som redan tidigare har skapats. (IDEA StatiCa, 2021).



Figur 21. Verktöget Connection design browser i IDEA StatiCa.

Verktöget styrs med hjälp av tre knappar (figur 22). Genom att välja *propose* från verktygsfältet hittas IDEA StatiCas, de privata och företagets förslag på designlösningar. För att ladda upp en egen design i molndatabasen för kollegorna används *publish*. Alla designobjekt kan hanteras och redigeras med kommandot *manage*. Det är möjligt att föreslå en design för hela anslutningen alternativt endast använda några utvalda delar som ska tillämpas och designa det återstående manuellt. (IDEA StatiCa, 2021).



Figur 22. Menyfliksområdet för Connection design browser.

4 Stålslutningsdetaljer

Anslutningar används för att överföra belastningar mellan strukturella element och för att ge strukturen stabilitet. Bärigheten hos en anslutning bestäms av grundkomponenterna som ingår, oftast plåtar, bultar och svetsar. De fem anslutningsdetaljerna som uppgjorts i IDEA StatiCa redovisas i detta kapitel. De tre första anslutningsdetaljerna förevisar programvarans beräkningsprocess som jämfördes med resultaten av manuella beräkningar enligt eurokod av den identiska anslutningen. Som hjälpmedel för de manuella beräkningarna har Ruukki Hitsatut Profiilit EN 1993 Käsikirja, SSAB Rakenneputket EN 1993 Käsikirja, SCI Publikation 398 Moment-Resisting Joints to Eurocode 3 och SCI Publikation 358 Simple Joints to Eurocode 3 använts. I beräkningarna användes produktstandarden EN 10025-2 för stålqualitén hos plåtar och profiler och produktstandard EN 10219-1 för rörprofiler. Lastfallen som användes i anslutningsdetaljerna är realistiska och tagna ur beställarens verkliga projekt.

IDEA StatiCa genererar ett resultat för bultar och svetsar kontrollerade enligt eurokod och den ekvivalenta och plastiska töjningen beräknas på element och plåtar. Beräkningsprocessen i programvaran fördelar kraften komponentvis mellan alla bultar enligt bultarnas enskilda egenskaper och kapacitet medan de manuella beräkningarna antar att kraftfördelningen är lika mellan bultarna som ingår i anslutningen.

Dimensionerande bärförmåga belastat med skjuv- och/eller dragkraft

För bultar utsatta för skjuv- och/eller dragkraft dimensioneras styvheten och bärförmågan för ett enskilt fästelement enligt EN 1993-1-8 tabell 3.4. Analysen beräknar bultarna med följande formler:

Bärförmåga för skjuvning per skjuvplan

$$F_{v.Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} \quad (4)$$

Bärförmåga för hållkanttryck för plåten

$$F_{b.Rd} = \frac{k_1 \cdot a_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad (5)$$

Bärförmåga för dragkraft för en bult

$$F_{t.Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad (6)$$

När det gäller bultar, finns det tre olika brottmoder som kan uppstå vid dragbelastning. Brottmod 1 innebär fullständig plasticering av ändplåt. Brottmod 2 innebär delvis plasticering av ändplåt med skruvbrott. Brottmod 3 innebär rent skruvbrott. Detta presenteras mer ingående i kapitel 4.2.1 i detta examensarbete.

Bärförmåga för genomstansning av bulthuvud

$$B_{p.Rd} = \frac{0.6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (7)$$

Utnyttjandegrad för drag

$$U_{tt} = \frac{F_{t.Ed}}{\min(F_{t.Rd}, B_{p.Rd})} \quad (8)$$

Utnyttjandegrad för skjuvning

$$U_{ts} = \frac{V}{\min(F_{v.Rd}, F_{b.Rd})} \quad (9)$$

Utnyttjandegrad för kombinerad skjuvning och dragning

$$U_{tts} = \frac{F_{v.Ed}}{F_{v.Rd}} + \frac{F_{t.Ed}}{1.4 \cdot F_{t.Rd}} \quad (10)$$

A = bultens spänningsarea där skjuvplanet går genom den ogängade delen av bulten

A_s = bultens spänningsarea där skjuvplanet går genom den gängade delen av bulten

α_v = faktor enligt EN 1993-1-8 tabell 3.4

f_{ub} = brottgräns för bulten enligt EN 1993-1-8 tabell 3.1

k_1 = faktor enligt EN 1993-1-8 tabell 3.4

k_2 = faktor enligt EN 1993-1-8 tabell 3.4

a_b = faktor enligt EN 1993-1-8 tabell 3.4

f_u = brottgräns för den svagare av de förbundna konstruktionsdelarna

d = nominell bultdiameter

t = plåttjocklek

d_m = medelvärde för största och minsta tvärmått för bulthuvud

γ_{M2} = partialkoefficient

$F_{t.Ed}$ = dimensionerande dragkraft

V = tvärkraft

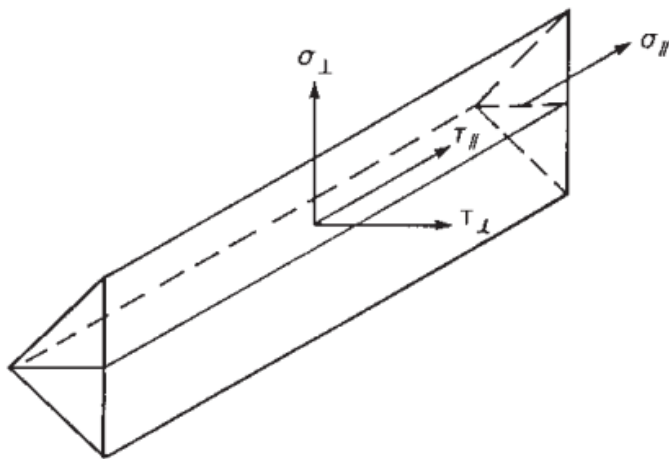
Dimensionerande bärförmåga för kälsvets

EN 1993-1-8 tabell 4.5.3 ger två metoder för dimensionering av en kälsvets bärförmåga. Antingen kan man använda den noggrannare komposantmetoden eller den förenklade metoden som förutsätter att kälsvetsens bärförmåga ges av dess skjuvhållfasthet. IDEA StatiCa kontrollerar svetsarna enligt komposantmetoden. Med komposantmetoden delas krafterna upp som verkar på anslutningens svetsar (figur 23) och följande formler tillämpas:

$$\sigma_{w.Ed} = (\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2))^{0.5} \quad (11)$$

$$\sigma_{w.Rd} = \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (12)$$

$$\sigma_{\perp.Rd} = \frac{0.9 \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (13)$$



Figur 23. Spänningar över svetsarean i en kälsvets. (SFS-EN 1993-1-8, 2005, figur 4.5).

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

σ_{\parallel} = normalspänningen parallell med svetsens längdaxel

τ_{\perp} = skjuvspänningen (i svetsareans plan) vinkelrätt mot svetsens längdaxel

τ_{\parallel} = skjuvspänningen (i svetsareans plan) parallellt med svetsens längdaxel

Kälsvetsens dimensionerande bärförmåga anses vara tillräcklig om följande villkor är uppfyllda:

$$\sigma_{w.Ed} \leq \sigma_{w.Rd} \quad (14)$$

$$\sigma_{\perp} \leq \sigma_{\perp.Rd} \quad (15)$$

Dimensionering mot områdesbrott

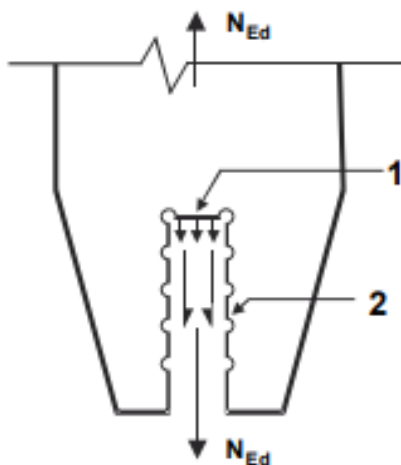
Brott kan avgöra en anslutnings hållbarhet när höghållfast stål och små bultkantsavstånd används. Dimensionering mot områdesbrott innebär skjuvbrott längs skruvraden tillsammans med dragbrottet mellan skruvradena (figur 24). För en symmetrisk skruvgrupp med centrisk last dimensioneras bärförmågan med hänsyn till områdesbrott enligt följande formel (SFS-EN 1993-1-8, 2005, kap. 3.10.2):

$$V_{eff.Rd} = \frac{f_u \cdot A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y \cdot A_{nv}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \quad (16)$$

A_{nt} = nettoarean utsatt för dragning

A_{nv} = nettoarean utsatt för skjuvning

γ_{M0} = partialkoefficient



Figur 24. Områdesbrott där 1 – dragkraft och 2 – skjuvkraft. (SFS-EN 1993-1-8, 2005, figur 3.8)

Dimensionering mot normalkraft

EN 1993-1-1 kapitel 6.2.3 omfattar dimensionering mot normalkraft. Vid dimensionering med hänsyn till deformationsförmåga, bör den plastiska bärförmågan för $N_{pl.Rd}$ vara lägre än dimensionerande bärförmåga för brott i nettotvärsnittet $N_{u.Rd}$. Eurokoden specificerar att dimensioneringsvillkoret i varje snitt för dragkraft, N_{Ed} , bör uppfyllas:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t.Rd}} \leq 1,0 \quad (17)$$

Den plastiska bärförmågan för bruttotvärsnittet

$$N_{t.Rd} = N_{pl.Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (18)$$

Dimensionerande bärförmåga vid brott för nettotvärsnittet i snitt med hål för fästelement

$$N_{t.Rd} = N_{u.Rd} = \frac{0,9 \cdot A_{net} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (19)$$

Dimensionering mot tvärkraft

För dimensionerande tvärkraft, V_{Ed} , ska villkor (ekvation 20) uppfyllas i varje snitt enligt EN 1993-1-1 kapitel 6.2.6. Tvärkraft ger skjuvspänning. Dimensionering mot tvärkraft görs enligt plasticitetsteorin eller elasticitetsteorin. Den främsta skillnaden mellan dimensionering enligt plasticitetsteori och elasticitetsteori är att plasticitetsteorin tar hänsyn till den plastiska deformationen som kan uppstå i materialet vid höga belastningar, medan elasticitetsteorin antar att materialet deformeras elastiskt och återgår till sin ursprungliga form när belastningen upphör. Enligt elasticitetsteorin dimensioneras konstruktionen så att materialet inte överstiger sin elasticitetsgräns, vilket garanterar att konstruktionen inte deformeras permanent. Enligt plasticitetsteorin dimensioneras konstruktionen så att materialet får lov att plastiskt deformeras men att det är tillräckligt starkt för att klara av belastningarna utan att kollapsa. Vid plastisk dimensionering är $V_{c.Rd}$ dimensionerande plastisk bärförmåga $V_{pl.Rd}$ (ekvation 21). För kontroll av dimensionerande elastisk bärförmåga för tvärkraft bör villkor (ekvation 22) för en kritisk punkt i tvärsnittet användas om inte instabilitetskontrollen enligt EN 1993-1-5 kapitel 5 är tillämplig.

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c.Rd}} \leq 1,0 \quad (20)$$

$$V_{pl.Rd} = \frac{A_v \cdot \frac{f_y}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M0}} \quad (21)$$

A_v = skjuvarean

$$\frac{\frac{\tau_{Ed}}{f_y}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} \leq 1,0 \quad (22)$$

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed} \cdot S}{I \cdot t} \quad (23)$$

V_{Ed} = dimensionerande värde på tvärkraften

S = det statiska momentet kring tyngdpunkten för den del av tvärsnittet som ligger mellan punkten där tvärkraften kontrolleras och tvärsnittets kant

I = tvärsnittets tröghetsmoment

T = tjockleken i betraktad punkt

f_y = sträckgräns

γ_{M0} = partialkoefficient

Dimensionering mot moment

För dimensionering mot böjmomentet, M_{Ed} , ska följande villkor enligt EN 1993-1-1 kapitel 6.2.5 uppfyllas i varje snitt:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c.Rd}} \leq 1,0 \quad (24)$$

Bärförmågan för moment kring en tyngdpunktsaxel bestäms enligt följande beroende på tvärsnittsklass:

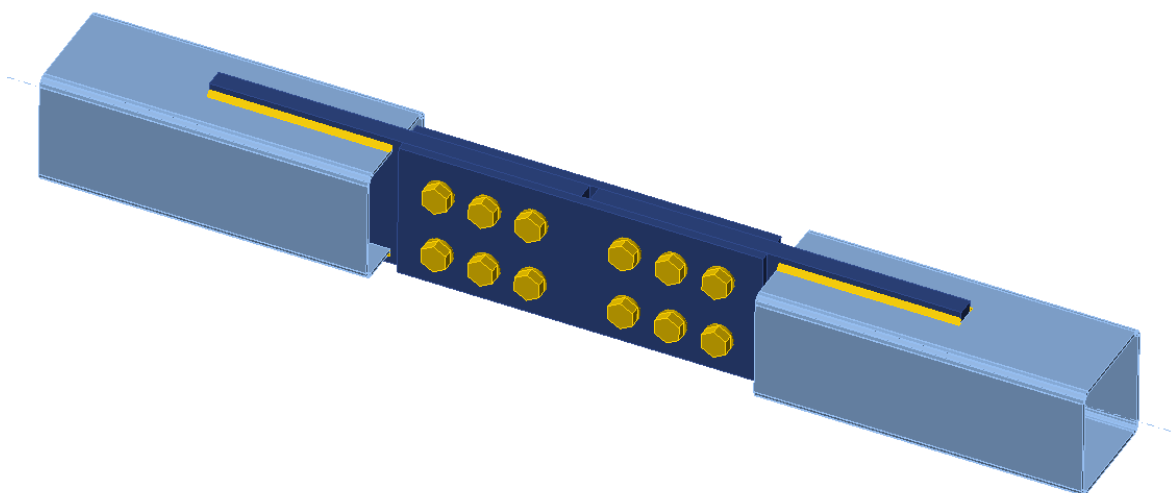
$$M_{c.Rd} = M_{pl.Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{för tvärsnitt i klass 1 och 2} \quad (25)$$

$$M_{c.Rd} = M_{el.Rd} = \frac{W_{el.min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{för tvärsnitt i klass 3} \quad (26)$$

$$M_{c.Rd} = \frac{W_{eff.min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{för tvärsnitt i klass 4} \quad (27)$$

4.1 Nedre ramstångens dragförband

Nedre ramstångens dragförband är ett dragkraftsbelastat bultförband där kraften överförs genom skjuvbelastning av bultarna och där kraften har samma riktning som förbandsplåtarna. Denna typ av anslutning lämpar sig som anslutningsfog av fackverkets dragna nedre bom. Anslutningen består av bultar storlek M36 med hållfasthetsklass 8.8 som överför kraften i förbandet genom sin skjuvbärförmåga. Ramstångerna utformas med rörprofiler CFRHS 250 mm x 250 mm x 8 mm. Anslutningsplåtarna har tjockleken 40 mm och fogplåtarna tjockleken 20 mm. Anslutningens geometri visas i figur 25. Anslutningen belastas med en dimensionerande dragkraft på 2211 kN. Eftersom ändplåtarnas betydelse endast marginellt påverkar bärförmågan har de inte beaktats i beräkningsmodellen. IDEA StatiCa beaktar inte anslutningsplåtarnas ändsvets mot ramstången och därmed försummas den i de manuella beräkningarna.



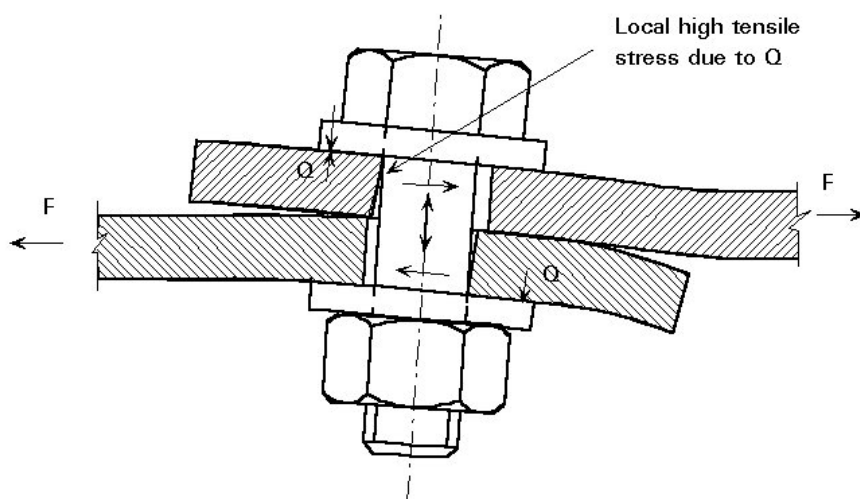
Figur 25. Nedre ramstångens dragförband designad i IDEA StatiCa.

4.1.1 Resultatjämförelse mellan IDEA StatiCa och manuella beräkningar

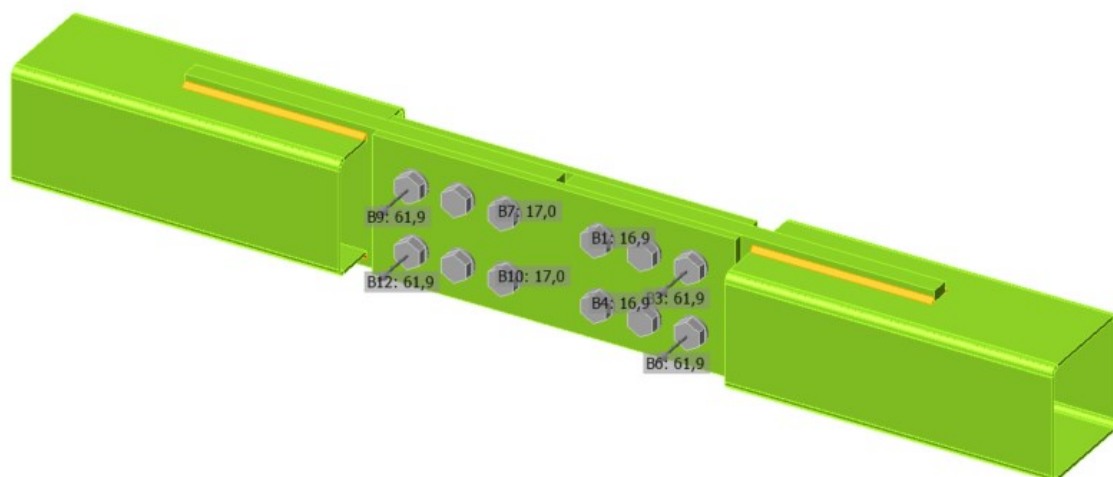
Anslutningens bärförmåga beräknas genom att beakta hållfastheten för bultar och anslutningsplåtar separat. Anslutningen hör till skjuvkraftsbelastade förband typ A där den dimensionerande skjuvkraften varken bör överstiga skjuvkraftskapaciteten eller bärförmågan med hänsyn till hållkantryck. Bultarna överför kraften som verkar i anslutningen med hjälp av deras skjuvmotstånd.

I de manuella beräkningarna antas det att belastningen som anslutningen utsätts för är likfördelad på alla bultar, medan IDEA StatiCa delar upp kraften komponentvis enligt bultkapacitet. Kraftfördelningen mellan bultarna enligt IDEA StatiCa visar att de yttersta bultarna i anslutningen är utsatt för störst belastning. Vid jämförelse av bultarnas skjuvbärförmåga och bärförmåga för hållkantryck ges ett tillförlitligt jämförelseresultat över utnyttjandegradsprocenter. För bultarnas skjuvbärförmåga ger manuella beräkningar 47,1 % och IDEA StatiCa ger 46,9 % medan utnyttjandegraden för bärförmågan för hållkantryck ges som 45 % enligt manuella beräkningar och 44,8 % enligt IDEA StatiCa. Resultaten för de manuella beräkningarna presenteras i bilaga 1.

Trots att anslutningen är ett skjuvförband uppstår ett visst drag i bultarna. Belastningen tenderar att sträcka ut anslutningen samt rotera bultarna (figur 26). Denna rotation är dock mindre i ett tvåskärigt skjuvförband. Bultarna utsätts för drag på grund av excentriciteten mellan anslutningsplåtarna. Dragkraften som uppstår i bultarna beaktas i FEM program men beaktas inte i manuella beräkningar i och med att man utgår från att kraften endast överförs genom skjuv. Med hjälp av visualiseringsverktyg tillgängliga i IDEA StatiCa är det möjligt att åskådliggöra bultarnas krafter som erhålls via finita elementanalys. I figur 27 presenteras bultarnas dragkraft, $F_{t,Ed}$, där det är synligt att den största dragkraften uppstår i de yttersta bultarna för anslutningen.



Figur 26. Skjuv och drag i en bult. (European Steel Design Education Programme, u.d.).

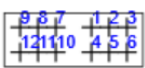


Figur 27. Drag som uppstår i bultar enligt IDEA StatiCa.

Eftersom anslutningen utsätts för kombinerad skjuvning och dragning bör kravet i ekvation 10 uppfyllas enligt EN 1993-1-8, tabell 3.4. Då dragkraften för en bult inte beaktas i manuella beräkningar, beräknas inte heller den kombinerade skjuv- och dragkraften, vilket IDEA gör med en största utnyttjandegrad på $U_{ts} = 56,3 \%$ (tabell 2). På grund av att det uppstår drag i bultarna så finns det en viss risk att bulthuvudet eller muttern stansas igenom plåten. Då man i manuella beräkningar inte beaktar dragkraften som uppstår i skjuvförbandet beräknas inte heller bärförmågan för genomstansning, vilket IDEA StatiCa gör (figur 28). Plåttöjningen gör att kraften inte fördelas jämnt men kapaciteten förblir ändå den samma. Risken för genomstansning är större vid litet bulthuvud och om brickor saknas.

Tabell 2. IDEA StatiCas resultatanalys för varje enskild bult komponentvis

Bolts

	Name	Loads	$F_{t,Ed}$ [kN]	V [kN]	$F_{b,Rd}$ [kN]	U_t [%]	U_s [%]	U_{ts} [%]	Detailing	Status
	B1	LE1	16,9	187,6	409,3	3,6	48,0	50,6	OK	OK
	B2	LE1	7,7	181,9	409,3	1,6	46,5	47,7	OK	OK
	B3	LE1	61,9	183,3	818,5	13,2	46,9	56,3	OK	OK
	B4	LE1	16,9	187,6	409,3	3,6	48,0	50,6	OK	OK
	B5	LE1	7,7	181,9	409,3	1,6	46,5	47,7	OK	OK
	B6	LE1	61,9	183,3	818,5	13,2	46,9	56,3	OK	OK
	B7	LE1	17,0	187,7	409,3	3,6	48,0	50,6	OK	OK
	B8	LE1	7,7	181,9	409,3	1,6	46,5	47,7	OK	OK
	B9	LE1	61,9	183,2	818,5	13,2	46,9	56,3	OK	OK
	B10	LE1	17,0	187,7	409,3	3,6	48,0	50,6	OK	OK
	B11	LE1	7,7	181,9	409,3	1,6	46,5	47,7	OK	OK
	B12	LE1	61,9	183,2	818,5	13,2	46,9	56,3	OK	OK

Punching resistance check (EN 1993-1-8 tab 3.4)

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}} = 820,7 \text{ kN} \geq F_t = 61,9 \text{ kN}$$

where:

$d_m = 57,9 \text{ mm}$ – The mean of the across points and across flats dimensions of the bolt head or the nut, whichever is smaller

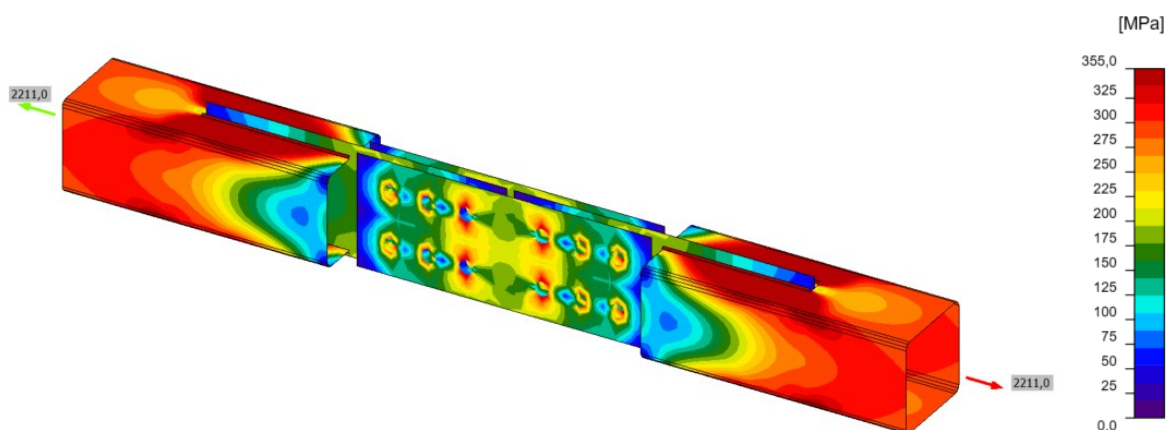
$t_p = 20,0 \text{ mm}$ – Thickness

$f_u = 470,0 \text{ MPa}$ – Ultimate strength

$\gamma_{M2} = 1,25$ – Safety factor

Figur 28. Bärförmåga mot genomstansning för den max utnyttjade bulten enligt IDEA StatiCa.

Jämförelse av områdesbrott mellan manuella beräkningar och IDEA StatiCa är utmanande och aningen knepig eftersom områdesbrott endast syns i plåtarnas töjningar. Om den ekvivalenta spänningen når elasticitetsgränsen uppkommer eftergivning av plåten. IDEA StatiCa presenterar heller ingen tydlig beräkningsprocess för dragbärförmåga för nettotvärsnitt av ramstång eller för dragbärförmågan för förbandsplåtarna. Det manuella beräkningsresultatet för ramstängernas bärförmåga ger en utnyttjandegrad på 95,4 % och för plåtarna 73,6 %. Detta innebär i praktiken att anslutningen skulle klara av en högre dragkraft enligt de manuella beräkningarna. Analys av ekvivalent stress i IDEA StatiCa presenterar anslutningens spänningar och töjningar (figur 29). Analysen möjliggör identifiering av zoner där spänningar är koncentrerade och som följaktligen är kritiska punkter för anslutningen. Spänningsaxeln presenterar spänningen i anslutningen där färgskalan anger spänningens storlek i megapascal.



Figur 29. Visuellt resultat för ekvivalent stress i IDEA StatiCa.

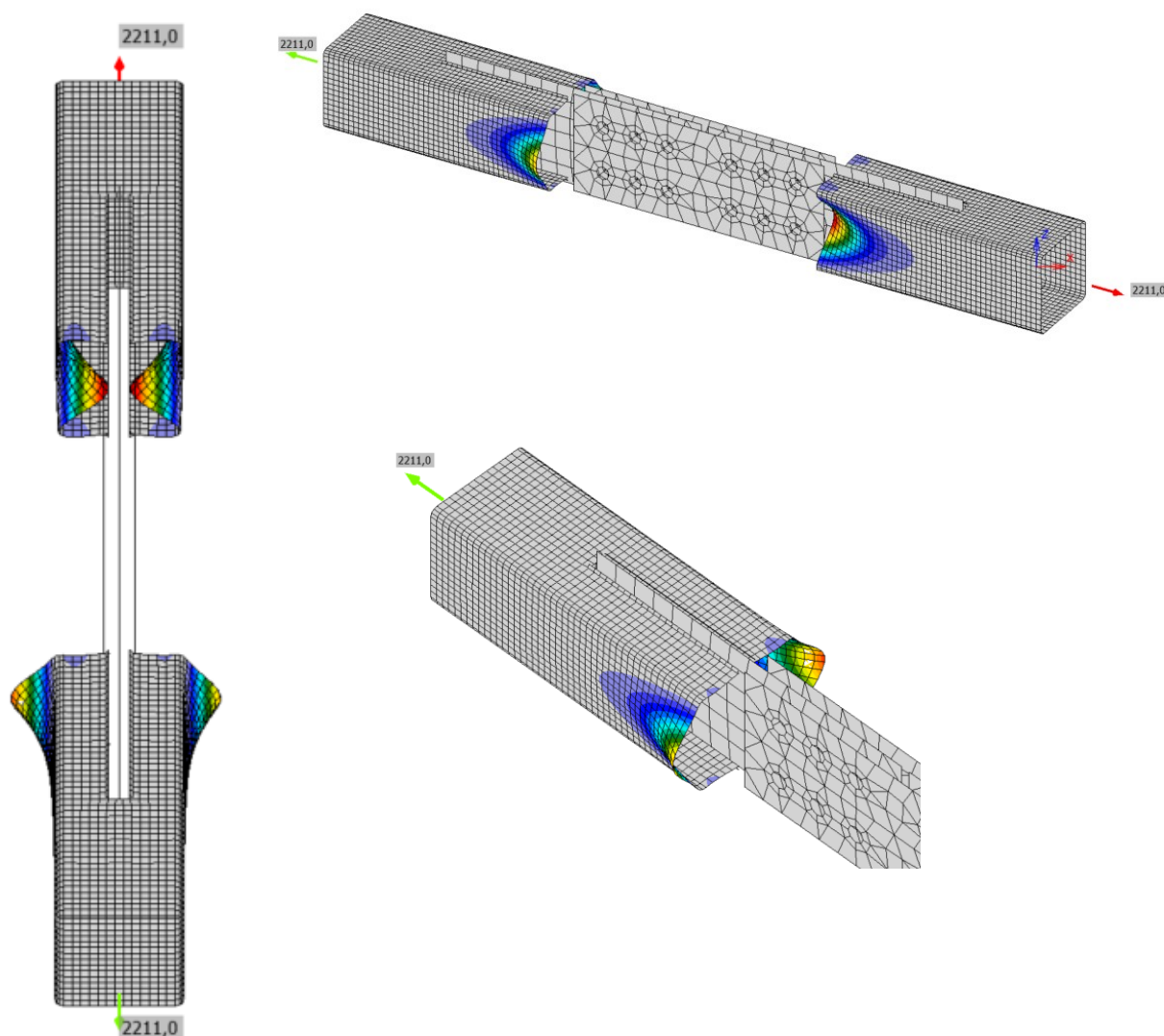
Utöver grafiska visualiseringsverktyg finns det även detaljerade numeriska resultat tillgängliga i tabellformat. För element och plåtar uppges värden på den maximala ekvivalenta spänningen, σ_{Ed} , och värdet för den maximala plastiska töjningen, ϵ_{pl} . Enligt resultatet presenterat i tabell 3 har ramstängerna en ekvivalent spänning på 357,7 MPa, vilket överstiger deras sträckgräns. Elementet antas vara elastiskt innan den dimensionerande sträckgränsen 355 MPa uppnås. CBFEM metoden kan däremot ge högre spänning än sträckgränsen. Anledningen är att en plastisk töjning på 5 % tillåts enligt EN1993-1-5, bilaga C 6(2) som teoridelen i kapitel 2.3.1 behandlar. Ramstängerna har en plastisk töjning på 1,3 % och ligger inom gränsvärdet. I beräkningarna används produktstandarden EN 10025-2 för stålqualitén hos plåtar vilket innebär att deras sträckgräns är 345 MPa, med hänsyn till plåttjockleken. En plastisk töjning på 0,1 % fås därmed för fogplåtarna i och med att deras resultat på 345,2 MPa överstiger sträckgränsen.

Tabell 3. Resultat för element och plåtar i IDEA StatiCa

Check of members and steel plates for extreme load effect

	Status	Item	Material	Th [mm]	Loads	σ_{Ed} [MPa]	ϵ_{pl} [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]
>	✓	TRS BC R	S 355 H (EN 10219-1)	8,0	LE1	357,7	1,3	0,0
	✓	TRS BC L	S 355 H (EN 10219-1)	8,0	LE1	357,7	1,3	0,0
	✓	R R	S 355 (EN 10025-2)	40,0	LE1	325,2	0,0	24,8
	✓	R L	S 355 (EN 10025-2)	40,0	LE1	325,2	0,0	24,8
	✓	ERP 1	S 355 (EN 10025-2)	20,0	LE1	345,2	0,1	24,8
	✓	ERP 2	S 355 (EN 10025-2)	20,0	LE1	345,2	0,1	24,8

För en dragbelastad anslutning behövs inte buckling mellan fästelement kontrolleras. Buckling av bärverksdelar har ej beaktats i manuella beräkningar. Vid kontroll av buckling enligt IDEA StatiCa uppstår buckling i ramstängerna enligt figur 30. Detta beror på att ändplåtarna inte är utformade i IDEA StatiCa, vilket gör att en viss buckling sker inåt och utåt av profilerna. Beställaren för examensarbetet utformar alltid ändplåtarna och använder denna anslutning endast för dragna konstruktioner, därmed försummas buckling. I fall anslutningen skulle vara belastad med en tryckkraft skulle anslutningen utsättas för större risk för buckling.



Figur 30. Deformation som uppstår på ramstängerna på grund av buckling enligt IDEA StatiCa. Eftersom ändplåtarna inte har beaktats i modellen sker en viss buckling inåt och utåt av ramstängerna.

Svetsanalysens resultat (tabell 4) presenteras i IDEA StatiCa som tabellformat med numeriska värden för varje svetslängd, varifrån detaljerade kontrollekvationerna också kan erhållas. Svetsens spänningsutnyttjandeprocent, U_t , erhålls genom jämförelse av den maximala ekvivalenta spänningen med den maximala motståndskapaciteten som fås för varje punkt i svetsen. U_t anger alltså utnyttjandegradprocenten för den kritiska punkten. Faktum är att det inte är en jämnt fördelad spänning i svetsarna. Kapacitetsutnyttjandeprocenten, U_{tc} , anges längs hela svetsens längd. Det vill säga, i stället för att ta den maximala spänningen som erhålls, beräknas medelvärdet av de ekvivalenta spänningarna längs hela svetsen och därifrån fås en utnyttjandeprocent för en konstant kälsvets längs hela dess längd och inte i den kritiska punkten.

Enligt de manuella beräkningarna, som beaktar hela svetsens längd, är utnyttjandegraden 83,9 %. För att få en realistisk jämförelse jämförs de manuella beräkningarna med IDEA StatiCas resultat på U_{tc} , som ger en utnyttjandegrad på 93,3 %. Skillnaden på 9,4 % kan bero på att anslutningsplåtarnas ändsvets mot ramstången är försummade vilket för de manuella beräkningarna innebär att $\sigma_T = \tau_T = 0$ MPa. Däremot presenterar IDEA StatiCa ett resultat för en normal- och skjuvspänning vinkelrätt mot a-måttet trots att ingen sådan svets finns synlig i modelldesignen. Det här kan bero på att ramstången deformeras när den utsätts för dragkraft och ger en vridning av ramstången. Det här leder till en viss vinkelrät spänning mot svetsen. För svetsarna uppges också värden på den maximala ekvivalenta spänningen, σ_{Ed} , och värdet för det maximala plastiska töjningen, ϵ_{pl} . Svetsarna har en ekvivalent spänning på 416,4 MPa, vilket överstiger deras dimensionerande sträckgräns som antas vara densamma som grundelementen. Svetsarna antas vara elastiska innan den dimensionerande sträckgränsen uppnås. Med CBFEM tillåts en plastiskt töjning på 5 % enligt EN1993-1-5, bilaga C 6(2). Svetsarna har en plastisk töjning på 4,2 % och ligger inom gränsvärdet.

Tabell 4. Resultatet för svetsanalysen som erhålls ur IDEA StatiCa

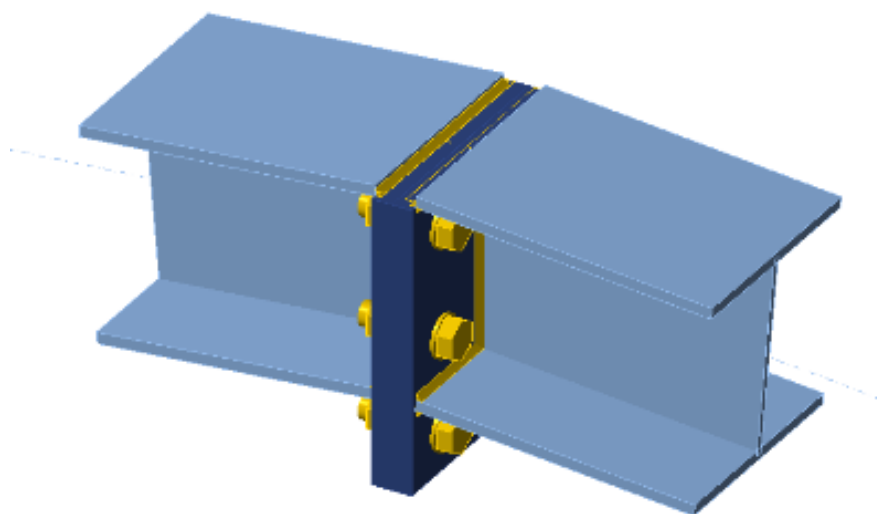
Check of welds for extreme load effect

		Status	Item	Edge	Th [mm]	L [mm]	Loads	$\sigma_{w,Ed}$ [MPa]	ϵ_{pl} [%]	σ_{\perp} [MPa]	$\tau_{ }$ [MPa]	τ_{\perp} [MPa]	Ut [%]	Utc [%]
>	+	✓	R R	TRS BC R-w 1	▲ 7,0	390	LE1	416,4	4,2	-20,9	-239,5	16,7	99,7	93,3
	+	✓	R R	TRS BC R-w 1	▲ 7,0	390	LE1	416,4	4,2	-20,8	239,5	16,7	99,7	93,3
	+	✓	R R	TRS BC R-w 3	▲ 7,0	390	LE1	416,4	4,2	-20,9	-239,5	16,8	99,7	93,3
	+	✓	R R	TRS BC R-w 3	▲ 7,0	390	LE1	416,4	4,2	-20,8	239,5	16,7	99,7	93,3
	+	✓	R L	TRS BC L-w 1	▲ 7,0	390	LE1	416,4	4,2	-20,9	-239,5	16,8	99,7	93,3
	+	✓	R L	TRS BC L-w 1	▲ 7,0	390	LE1	416,4	4,2	-20,9	239,5	16,7	99,7	93,3
	+	✓	R L	TRS BC L-w 3	▲ 7,0	390	LE1	416,4	4,2	-20,9	-239,5	16,8	99,7	93,3
	+	✓	R L	TRS BC L-w 3	▲ 7,0	390	LE1	416,4	4,2	-20,8	239,5	16,7	99,7	93,3

4.2 Bultat ändplåtsskarv

Bultat ändplåtsskarv är ett momentstyvt nockskarv med bultar och ändplåtar svetsade till I-balkar. Anslutningen består av storlek M24 bultar med hållfasthetsklass 8.8, I-balkar med HEA220 profiler och ändplåtarna utgörs med tjockleken 20 mm. Anslutningen belastas med en dragkraft på 260 kN, ett moment på 26 kNm och en tvärkraft på 6,8 kN. Anslutningens geometri visas i figur 31.

Vid användning av ett bultat ändplåtsskarv förutsätts det att nedstickande plåtar accepteras. Ändplåten svetsas med kälsvets på ömse sidor till fläns och liv, varefter plåtarna bultas fast till varandra. Ändplåtarna överför dragkrafter i tjockleksriktningen. Bultarna i förbandet överför krafter genom dragbelastning vilket leder till att det uppkommer tillskottskrafter i bultarna, så kallade bändkrafter. Det här beror på lastexcentricitet och deformationer i ändplåtarna. För att åskådliggöra beteendet i spänningszonen som uppkommer i en anslutning där bultar utsätts för dragspänning används T-styckeflänsmetoden för förenkling av verkligheten. Vid dimensionering av bärförmågan för ett bultförband som överför dragkrafter tillämpas EN 1993-1-8 kapitel 6.2.4 för ett dragbelastat ekvivalent T-stycke.



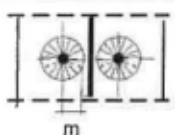
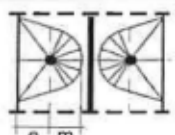
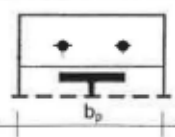
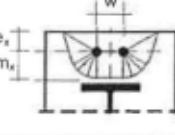
Figur 31. Bultat ändplåtsskarv designad i IDEA StatiCa.

4.2.1 T-styckefläns

Prövningar utförda av Back och Zoetemeijer (1972) visar att summan av krafter som överförs av enskilda bultar är större än den yttre lasten. Det här beror på bändkrafter som uppstår när plåtar böjs och deras ytterkanter pressas mot varandra. Förbandshalvornas kraftjämvikt blir därmed uppfylld då dragkrafterna i bultarna ökar lika mycket som kontaktrycket ökar. Beroende på anslutningens geometri minskar bändkrafter bultars bärförmåga för yttre last. (Norlin, Veljkovic, & Husson, 2015, s. 22).

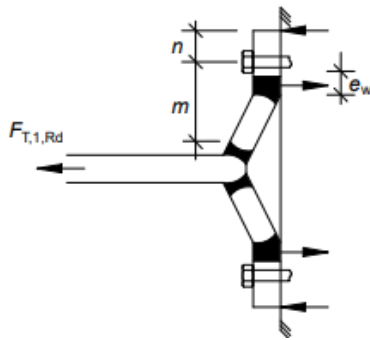
Genom att ersätta den riktiga anslutningen med en ekvivalent T-styckefläns kan komplexa anslutningar dimensioneras med hjälp av en relativt enkel modell. Anslutningen delas in i ett eller flera teoretiska modeller av imaginära T-styckeflänsar. Med uppdelningen är det sedan möjligt att räkna ut de bändande krafter som uppkommer i knutpunkten. I EN 1993-1-8 listas grundkomponenter i en knutpunkt i tabell 6.1.

För att beräkna bärförmågan för de grundläggande komponenterna i bultförband kan modellen av den ekvivalenta T-stycke-fläns användas. Enligt standarden kan de möjliga brottmoderna för ändplåten i ett ekvivalent T-stycke antas likna de som förväntas uppträda i grundkomponenten som den efterliknar. Bändkraften som påverkar bultarna reducerar bärförmågan för de yttre krafter som bultarna borde ta. Det är möjligt att beakta de verkliga brottlinjerna som uppkommer i den riktiga baskomponenten genom att ge en fiktiv effektiv längd åt T-stycke-flänsen, enligt figur 32. Måtten på m och n kan anta ett fiktivt värde men ändå ge ett godtagbart resultat som motsvarar den verkliga baskomponentens bärförmåga. (Norlin m.fl., 2015, s. 26).

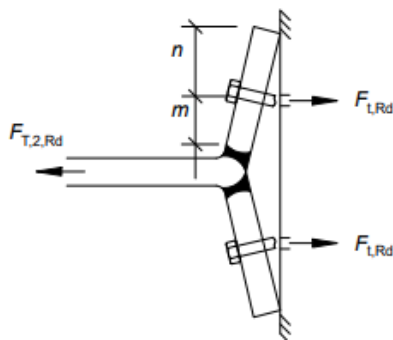
Ett par skruvar separerade av en livplåt i en pelare eller ändplåt	
	Cirkulär brottlinje $l_{eff,cp} = 2 \pi m$
	Brottlinje ut mot fri kant $l_{eff,nc} = 4 m + 1,25 e$
Ett par skruvar i en utstickande ändplåt	
	En rak brottlinje tvärs över livplåten $l_{eff,nc} = 0,5 b_p$
	Brottlinje kring hela gruppen ut mot fria kanten $l_{eff,nc} = 0,5 w + 2 m_s + 0,625 e_s$

Figur 32. Effektiva längder för brottlinjer. (Norlin m.fl., 2015, s. 26).

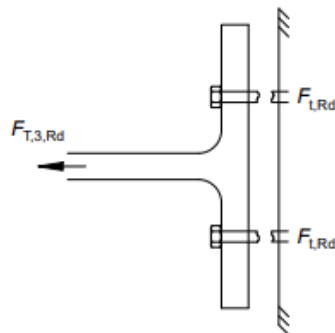
T-stycke-flänsar har tre olika brottmoder. Vid brottmod 1 plasticeras flänsen dels längs en linje genom varje bultrad, dels längs övergången till livplåten (figur 33). I bultarna uppstår bändkrafter och vid brott överskrider flänsen sin plasticeringsgräns och det leder till fullständig plasticering av ändplåten. Ifall bultarna inte är tillräckligt starka inträffar brottmod 2 (figur 34). Flytmoment uppnås i två brottlinjer längs med övergången från fläns till liv samtidigt som stora bändkrafter verkar där flänsarnas ytterkanter pressas mot varandra på grund av flänsplåtarnas böjning. När bändkrafterna tillsammans med den yttre lasten överskrider bultarnas draghållfasthet, före det att flänsen plasticeras, inträffar brottet. Brottmod 3 innebär skruvbrott (figur 35). (The Steel Construction Institute, 2013, s. 10).



Figur 33. T-styckeflås i brottmod 1. Tunna plåtar och överdimensionerade bultar ger fullständigt böjbrott i flänsplåtarna. (The Steel Construction Institute, 2013, s. 10).



Figur 34. T-styckeflås i brottmod 2. Dragbrott i bultarna kombinerat med böjbrott i flänsplåtarna. (The Steel Construction Institute, 2013, s. 10).



Figur 35. T-styckeflås i brottmod 3. Tjocka plåtar och klena bultar ger rent skruvbrott i bultarna. (The Steel Construction Institute, 2013, s. 10).

Inom eurokod härleds bärförmågan för T-styckesflås enligt följande för varje brottmod:

$$\text{Brottmod 1: } F_{T.1.Rd} = \frac{4 \cdot M_{pl.1.Rd}}{m} \quad (28)$$

$$\text{Brottmod 2: } F_{T.2.Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl.2.Rd} + n \cdot \Sigma F_{t.Rd}}{m + n} \quad (29)$$

$$\text{Brottmod 3: } F_{T.3.Rd} = \Sigma F_{t.Rd} \quad (30)$$

$F_{t.Rd}$ = dragkraftsbärförmågan för en enskild bult

$M_{pl.Rd}$ = flänsens plastiska momentbärförmåga

l_{eff} = effektiv längd

m = hävarmen lika med avståndet mellan brottlinjerna

n = kantavståndet

Om bändningskrafter kan uppstå bör dimensionerande dragkraftskapacitet för ett T-stycke-fläns bestämmas som det lägsta värdet för de tre möjliga brottmoden. Om bändningskrafter inte kan uppstå bör dimensionerande dragkraftskapacitet bestämmas som det lägsta värdet för två möjliga brottmoder. Dimensionerande bärförmåga för ett T-styckesfläns bestäms med hjälp av EN 1993-1-8, tabell 6.2. För brottmod 1 och brottmod 2 kan bärförmågan beräknas med ekvation 31 om inverkan av bändning kan försummas enligt ekvation 32. Töjningssträckan L_b för skruvarna ska vara större än gränsfaktorn L_b^* för att effekten av bändning kan försummas.

$$F_{T.1-2.Rd} = \frac{2 \cdot M_{pl.1.Rd}}{m} \quad (31)$$

$$L_b \geq L_b^* \quad (32)$$

L_b = skruvens töjningssträcka, som sätts till klämlängden (sammanlagd tjocklek på material och brickor), plus halva summan av skruvhuvudets och mutterns höjd

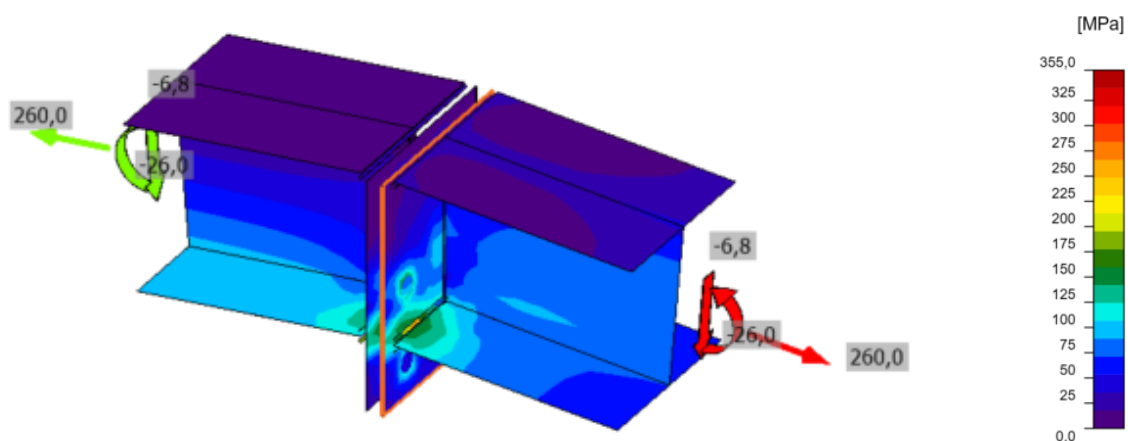
$$L_b^* = \frac{8.8 m^3 \cdot A_s}{\sum l_{eff.1} \cdot t_f^3} \quad (33)$$

4.2.2 Resultatjämförelse mellan IDEA StatiCa och manuella beräkningar

Anslutningen belastas med moment, tvärkraft och normalkraft. Vid samtidigt verkande tvärkraft och normalkraft bör hänsyn tas till dess inverkan på momentbärförmågan. Då den dimensionerande tvärkraften är mindre än halva plastiska bärförmågan för tvärkraften, kan dess inverkan på momentbärförmågan och normalkraft försummas enligt EN 1993-1-1 6.2.10. Enligt det manuella beräkningsresultatet för anslutningen (bilaga 2) försummas reduktion av momentbärförmågan.

Vid manuella beräkningar används en förenklad metod för att åskådliggöra dragkraftskapaciteten för bultar med hjälp av ett ekvivalent T-stycke. Spänningen fördelar dragkraften mellan de två nedre bultraderna vilket innebär att de två nedersta bultraderna räknat vågrätt uppifrån är i spänningszon. Den första bultraden är inte i spänningszon för dragkraft och därmed utgås det från att de bultarna endast bär tvärkraften. Bärförmågan för bultrader i spänningszon delas in i T-stycke-flänsar. Den manuella beräkningen ger ett resultat på det ekvivalenta T-styckets dragbärförmåga som 325,2 kN. Enligt EN 1993-1-8 bestäms bärförmågan och styvheten för anslutningar genom att beräkna grundkomponenterna i en anslutning. Därmed fås anslutningens slutliga bärförmåga som det lägsta av motstånden som beräknats för anslutningens balkdelar, vilket är 314,6 kN.

Jämförelse av T-stycke-fläns mellan manuella beräkningar och IDEA StatiCa är inte möjlig då IDEA StatiCa endast presenterar anslutningens hållbarhet enligt ekvivalent spänning och plastisk töjning för element och plåtar. Analysen av ekvivalent stress i IDEA StatiCa presenterar anslutningens spänningar och töjningar (figur 36). Analysen möjliggör identifiering av zoner där spänningar är koncentrerade och som följaktligen är kritiska punkter för anslutningen. Spänningsaxeln presenterar spänningen i anslutningen där färgskalan anger spänningens storlek i megapascal. De detaljerade numeriska resultaten tillgängliga i tabellformat i IDEA StatiCa uppger värden för element och plåtar för den maximala ekvivalenta spänningen, σ_{Ed} , och värden för den maximala plastiska töjningen, ϵ_{pl} . Enligt tabell 5 uppstår ingen plastisk töjning för elementen och plåtarna, $\epsilon_{pl} = 0\%$. De nedre balkflänsarna utsätts för störst ekvivalent spänning på 151,1 MPa respektive 145,6 MPa. Plåtarnas ekvivalenta spänning är 161,7 MPa respektive 173,0 MPa. Det manuella beräkningsresultatet för den plastiska bärförmågan av balken visar att balken utnyttjas endast 11,4 %.



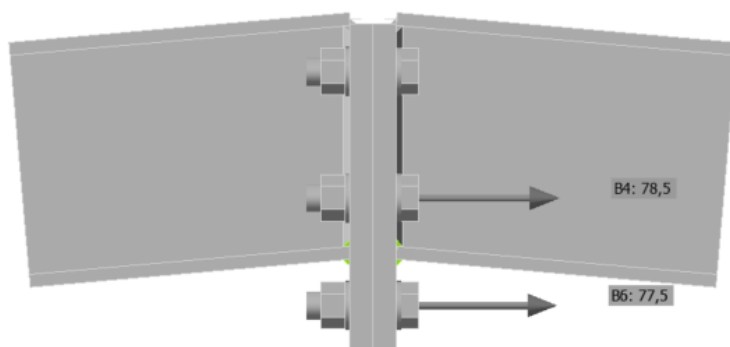
Figur 36. Visuellt resultat för ekvivalent stress i IDEA StatiCa.

Tabell 5. Resultat för element och plåtar i IDEA StatiCa där balkarna delas in i plåtdelar enligt dess övre fläns, liv och nedre fläns

Check of members and steel plates for extreme load effect

	Status	Item	Material	Th [mm]	Loads	σ_{Ed} [MPa]	ϵ_{pl} [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]
>	✓	BEA R-bfl 1	S 355 (EN 10025-2)	11,0	LE1	151,1	0,0	0,0
	✓	BEA R-tfl 1	S 355 (EN 10025-2)	11,0	LE1	27,1	0,0	0,0
	✓	BEA R-w 1	S 355 (EN 10025-2)	7,0	LE1	95,3	0,0	0,0
	✓	BEA L-bfl 1	S 355 (EN 10025-2)	11,0	LE1	145,6	0,0	0,0
	✓	BEA L-tfl 1	S 355 (EN 10025-2)	11,0	LE1	14,4	0,0	0,0
	✓	BEA L-w 1	S 355 (EN 10025-2)	7,0	LE1	87,3	0,0	0,0
	✓	BPa	S 355 (EN 10025-2) - 1	20,0	LE1	161,7	0,0	36,4
	✓	BPb	S 355 (EN 10025-2) - 1	20,0	LE1	173,0	0,0	36,4

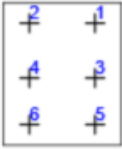
IDEA StatiCa presenterar varje bults kapacitet komponentvis där kraftfördelningen mellan bultarna visar att de två nedre bultraderna utsätts för störst dragkraft (figur 37). Resultatet för den dimensionerande dragkraften per bult i brottgränstillstånd, $F_{t,Ed}$, förevisar att dragkraften är 78,5 kN respektive 77,5 kN i de två nedersta bultraderna (tabell 6). För den manuella beräkningen förenklas den totala dragkraften genom att normalkraften delas jämnt mellan totala antalet bultar för anslutningen adderat med de två nedersta bultraderna som tar momentet, alltså fyra bultar. De manuella beräkningarna ger en dimensionerande dragkraft per bult i brottgränstillstånd som 74,3 kN. Det manuella beräkningsresultatet för dragkraftsbärförmågan för en bult ger en utnyttjandegrad på 36,5 % och IDEA StatiCa presenterar en utnyttjandegrad på 38,6 % för den mest belastade bulten. Trots förenklingar som görs i de manuella beräkningarna är resultatjämförelsen tillförlitlig. På grund av att det uppstår drag i bultarna så finns det en viss risk att bulthuvudet eller muttern stansas igenom plåten. IDEA StatiCa ger en utnyttjandegrad på 14,6 % gällande bärförmågan för genomstansning och manuella beräkningarna ger 13,8 %.



Figur 37. Drag som uppstår i bultar enligt IDEA StatiCa.

Tabell 6. IDEA StatiCas resultatanalys för varje enskild bult komponentvis

Bolts

	Name	Loads	$F_{t,Ed}$ [kN]	V [kN]	$F_{b,Rd}$ [kN]	U_{t_t} [%]	U_{t_s} [%]	$U_{t_{ts}}$ [%]	Detailing	Status
	B1	LE1	7,7	5,2	234,3	3,8	3,0	5,7	OK	OK
	B2	LE1	7,7	5,2	234,3	3,8	3,0	5,7	OK	OK
	B3	LE1	78,5	5,1	418,2	38,6	2,9	30,5	OK	OK
	B4	LE1	78,5	5,1	418,2	38,6	2,9	30,5	OK	OK
	B5	LE1	77,5	4,5	234,3	38,1	2,6	29,8	OK	OK
	B6	LE1	77,5	4,5	234,3	38,1	2,6	29,8	OK	OK

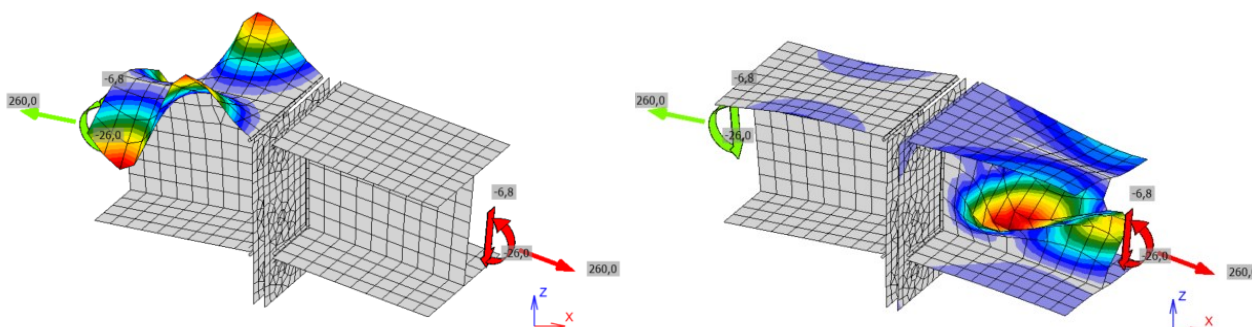
Eftersom anslutningens bultar utsätts för kombinerad skjuvning och dragning bör kravet i ekvation 10 uppfyllas enligt EN 1993-1-8, tabell 3.4. Trots att det dimensionerande värdet för drag- och skjuvkraft per bult i brottgränstillstånd är generaliserade och förenklade för den manuella beräkningsprocessen fås en relativt jämförbar utnyttjandegrad med 26,1 % enligt manuell beräkning medan IDEA StatiCa ger $U_{tts} = 30,5 \%$.

Resultaten från IDEA StatiCa och manuella beräkningar är mycket nära varandra när det gäller beräkning av hållkantryck och skjuvbärförmåga. I de manuella beräkningarna beräknas hållkantryck separat för alla tre bultrader i och med bultradernas olika änd- och kantavstånd i lastöverföringsriktning. IDEA StatiCas analys presenterar att den andra bultraden, ovanför den nedre flänsen, är mest påverkad i anslutningen vilket också är resultatet för de manuella beräkningarna. Den manuella beräkningen ger ett hållkantryckskapacitet på 413,6 kN och IDEA StatiCa ger 418,2 kN. Den lilla avvikande marginalen beror på att de manuella beräkningar inte beaktar plåtens lutning, vilket påverkar precisionen av beräkningarna av bultavståndet och därmed blir bultavståndet något oexakt i de manuella beräkningarna. IDEA StatiCa tar hänsyn till plåtens lutningar och andra geometriska faktorer, vilket gör att programmet ger ett mer exakt resultat för bultcentrumavstånden.

Enligt EN 1993-1-8, tabell 3.3 behövs buckling mellan fästelement inte kontrolleras ifall kravet i ekvation 34 uppfylls. Enligt de manuella beräkningarna uppfylls kravet och därmed behövs buckling mellan fästelement inte kontrolleras. Däremot gör momentet och tvärkraften att balkarna blir utsatta för buckling. IDEA StatiCas grafiska visualiseringsverktyg presenterar olika bucklingsområden som förekommer främst på balkarnas övre fläns och liv. Två visuella resultat på deformation orsakat av buckling presenteras i figur 38. Buckling av balkprofilerna har ej beaktats i de manuella beräkningarna.

$$\frac{p_1}{t} \leq 9 \cdot \varepsilon$$

(34)



Figur 38. Deformation som uppstår på grund av buckling enligt IDEA StatiCa.

Anslutningens svetsar dimensioneras för att överföra dragkraft och moment längs flänssvetsarna medan balklivet ytterligare dimensioneras för skjuvkraft. Svetsanalysens resultat i IDEA StatiCa presenteras i tabellformat med numeriska värden för varje svetslängd, varifrån de detaljerade kontrollekvationerna också kan erhållas (tabell 7). Värdet för det maximala plastiska töjningen, $\epsilon_{pl} = 0 \%$, innebär att svetsarna inte plasticeras. Svetsens spänningsutnyttjandeprocent, U_t , för den kritiska punkten enligt IDEA StatiCa ges som 80,7 % medan maxvärdet för kapacitetsutnyttjandeprocenten, U_{tc} , längs hela svetsens längd i medeltal är 48,3 %. Ett medeltal av 40,1 % och 56,4 % tas för att få en tillförlitligare jämförelse eftersom IDEA StatiCa beräknar ovan- och undersidan av en flänssvets skilt medan de manuella beräkningarna analyserar en flänssvets som en helhet. Det manuella beräkningsresultatet för svetsdimensioneringen ger en utnyttjandegrad på 41,1 %. Differensen mellan manuella beräkningar och IDEA StatiCas resultat beror på anslutningens geometri då det uppstår ett något tredimensionellt beteende som inte beaktas i manuella beräkningar.

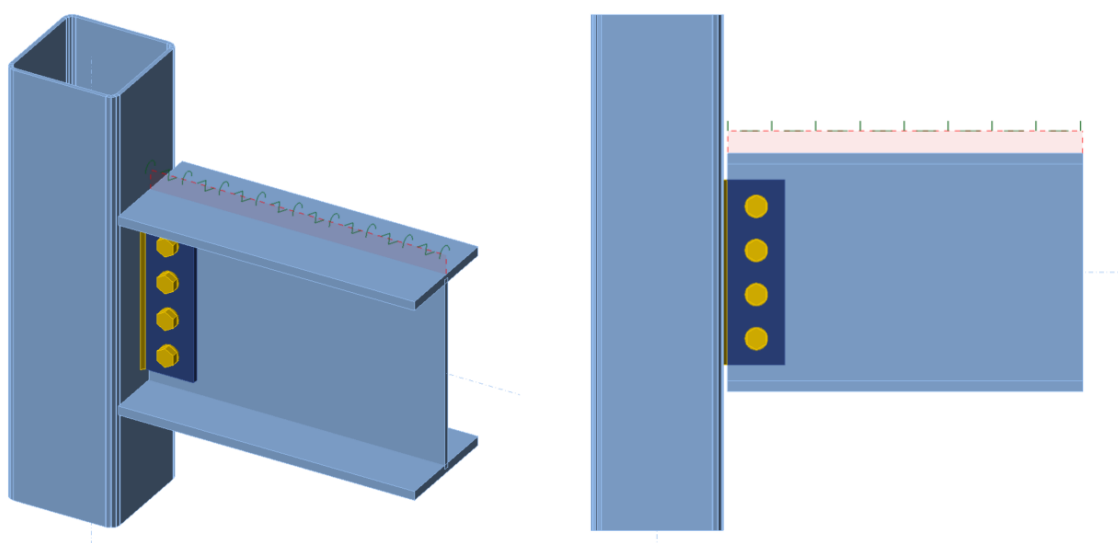
Tabell 7. Resultatet för svetsanalysen som erhålls ur IDEA StatiCa där numeriska värden fås för varje svetslängd och enligt komponentvis beräkning av skjuv- och normalspänning

Welds

Item	Edge	Throat th. [mm]	Length [mm]	Loads	$\sigma_{w,Ed}$ [MPa]	ϵ_{pl} [%]	σ_{\perp} [MPa]	τ_{\parallel} [MPa]	τ_{\perp} [MPa]	U_t [%]	U_{tc} [%]	Status
BPa	BEA R-bfl 1	▲ 4,0 ▼	220	LE1	260,8	0,0	133,3	2,1	129,4	62,4	40,1	OK
		▲ 4,0 ▼	220	LE1	329,1	0,0	161,4	-16,7	-164,7	78,8	56,4	OK
BPa	BEA R-tfl 1	▲ 4,0 ▼	220	LE1	42,3	0,0	-37,9	4,4	9,9	11,2	8,4	OK
		▲ 4,0 ▼	220	LE1	35,2	0,0	34,7	0,7	3,4	10,3	6,3	OK
BPa	BEA R-w 1	▲ 4,0 ▼	195	LE1	94,9	0,0	42,7	23,8	42,7	22,7	14,4	OK
		▲ 4,0 ▼	195	LE1	95,0	0,0	42,8	-23,8	-42,8	22,7	14,5	OK
BPb	BEA L-bfl 1	▲ 4,0 ▼	220	LE1	279,2	0,0	146,4	6,8	137,1	66,8	43,5	OK
		▲ 4,0 ▼	220	LE1	337,1	0,0	159,5	-23,0	-169,9	80,7	56,1	OK
BPb	BEA L-tfl 1	▲ 4,0 ▼	220	LE1	34,6	0,0	-28,5	4,5	10,4	8,4	6,9	OK
		▲ 4,0 ▼	220	LE1	19,7	0,0	18,1	0,2	4,5	5,3	3,7	OK
BPb	BEA L-w 1	▲ 4,0 ▼	195	LE1	90,0	0,0	30,4	-38,3	30,5	21,5	13,7	OK
		▲ 4,0 ▼	195	LE1	90,1	0,0	30,4	38,5	-30,3	21,6	13,6	OK

4.3 Enskärigt skjuvförband mellan balk och pelare

Enskäriga skjuvförband mellan balk och pelare är en populär anslutning tack vare dess snabba montage. Anslutningen består av en plåt som svetsas till pelaren i fabriken, varefter den bultas fast till balken på byggarbetsplatsen. Fyra bultar med storleken M30 med hållfasthetsklass 8.8 används. Balken som utgörs av HEA550 profil ansluts till pelaren med rörprofil CFRHS 300 mm x 300 mm x 10 mm med en plåt vars tjocklek är 15 mm. Anslutningens geometri visas i figur 39. Det är vanligt att balkens övre fläns är stagad av exempelvis håldäcksbjälklag vilket begränsar balken att rotera. Balken belastas av en skjuvkraft på 358 kN och pelaren har en normalkraft på 358 kN.



Figur 39. Enskärigt skjuvförband mellan balk och pelare designad i IDEA StatiCa.

4.3.1 Resultatjämförelse mellan IDEA StatiCa och manuella beräkningar

De manuella beräkningarna för enskärigt skjuvförband mellan balk och pelare (bilaga 3) baserar sig på teori enligt *The Steel Construction Institute Publication 358 Joints in Steel Construction: Simple Joints to Eurocode 3*. Den rekommenderade detaljpraxisen för ett enskärigt skjuvförband hänvisar till att kontrollera plåten. Plåten i ett enskärigt skjuvförband mellan balk och pelare kan klassificeras som lång eller kort enligt ekvation 35 och ekvation 36. (The Steel Construction Institute, 2014, s. 109).

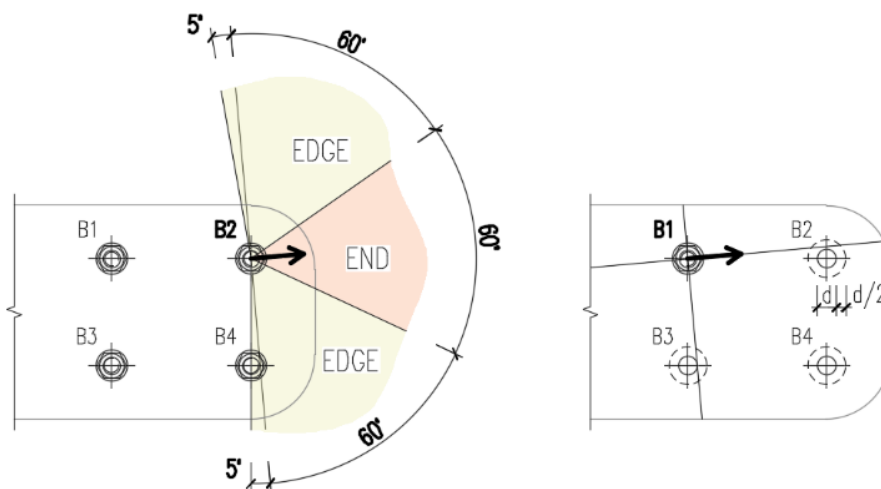
$$\text{kort plåt: } \frac{t_p}{z_p} \geq 0,15 \quad (35)$$

$$\text{lång plåt: } \frac{t_p}{z_p} < 0,15 \quad (36)$$

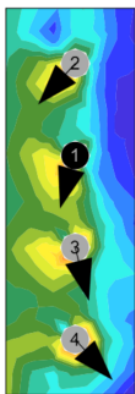
z_p = avståndet mellan pelarens yta och den första bultraden

Det manuella beräkningsresultatet för enskärigt skjuvförband mellan balk och pelare ger att plåten klassificeras som en kort plåt. Då plåten klassificeras som en kort plåt behövs bland annat inte bärförmågan för livet kontrolleras (The Steel Construction Institute, 2014, s. 123).

Bultarna överför kraften som verkar i anslutningen med hjälp av deras skjuvmotstånd. En tillförlitlig resultatjämförelse ges av bultarnas skjuvbärförmåga där IDEA StatiCa ger en utnyttjandegrad på 44,2 % och de manuella beräkningarnas resultat ger en utnyttjandegrad på 44,4 %, där det tas i beaktande att momentnollpunkten är längs pelarytan. Däremot fås en större differens mellan IDEA StatiCa och manuella beräkningar vid resultatjämförelsen av bärförmågan för hålkanttryck. IDEA StatiCa ger en utnyttjandegrad på 35,6 % medan de manuella beräkningarna ger 45,4 % enligt plåtens hålkantsbrottskapacitet. Differensen beror på algoritmen där änd- och kantavstånden bestäms enligt den resulterande skjuvkraftsvektorn i en given bult. I IDEA StatiCa bestäms änd- och kantavstånden genom att plåten delas upp i tre segment, två kantsegment och ett ändsegment enligt figur 40 (IDEA StatiCa, 2009-2023e). Det kortaste avståndet från en bult till ett relevant segment tas då som en ände eller ett kantavstånd. Därmed skiljer resultatjämförelsen då manuella beräkningar utgår från plåtens statiska geometriska utformning där avståndet från en bult till plåtkant antas vara vertikalt mot och parallellt med skjuvkraftens riktning. De manuella beräkningarna beräknar änd- och kantavstånd med ett antal formler som finns tillgängliga i eurokoden och tar inte i beaktande övriga faktorer som gör att änd- och kantavståndet minimeras eller maximeras. Resultatet för bultarnas kraftvektorer i IDEA StatiCa (figur 41), förevisar hur änd- och kantavståndet inte är vinkelrätt mot plåtkant.

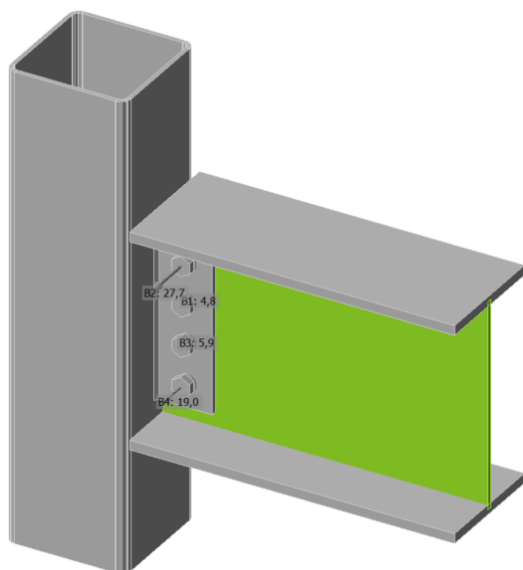


Figur 40. För att beräkna änd- och kantavstånden läser algoritmen i IDEA StatiCa av den verkliga riktningen för den resulterande skjuvkraftsvektorn för en bult. (IDEA StatiCa, 2009-2023e).



Figur 41. Anslutningsplåtens skjuvkraftsvektorer enligt IDEA StatiCa.

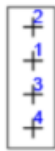
Trots att anslutningen är ett skjuvförband uppstår ett visst drag i bultarna som beaktas i FEM-program men inte i manuella beräkningar. Bultarna belastas av skjuvkraft och en dragkraft på grund av deformationen av det ensidiga skjuvförbandet samt det moment som uppstår i bultarna då kraften går längs pelarytan. Med hjälp av visualiseringsverktyg tillgängliga i IDEA StatiCa presenteras bultarnas dragkrafter som erhålls via finita elementanalys (figur 42). Den dimensionerande dragkraften per bult i brottgränstillstånd, $F_{t,Ed}$, är 27,7 kN respektive 19 kN för de mest utsatta bultarna. Enligt IDEA StatiCas resultat för den komponentvisa kraftfördelningen utsätts anslutningens översta och nedersta bult för mest påfrestning och påvisar störst utnyttjandegrad (tabell 8). Eftersom anslutningen utsätts för kombinerad skjuvning och dragning bör kravet i ekvation 10 uppfyllas enligt EN 1993-1-8, tabell 3.4. Då dragkraften för en bult inte beaktas i manuella beräkningar, beräknas inte heller den kombinerade skjuv- och dragkraften, vilket IDEA StatiCa gör med en utnyttjandegrad på $U_{tts} = 50,3 \%$.



Figur 42. Drag som uppstår i bultar enligt IDEA StatiCa.

Tabell 8. IDEA StatiCas resultatanalys för varje enskild bult komponentvis

Bolts

	Name	Loads	$F_{t,Ed}$ [kN]	V [kN]	$F_{b,Rd}$ [kN]	$U_{t,t}$ [%]	$U_{t,s}$ [%]	$U_{t,ts}$ [%]	Detailing	Status
	B1	LE1	4,8	93,0	267,9	1,5	34,7	35,3	OK	OK
	B2	LE1	27,7	119,9	337,0	8,6	44,2	50,3	OK	OK
	B3	LE1	5,9	92,8	267,9	1,8	34,6	35,5	OK	OK
	B4	LE1	19,0	121,7	242,5	5,9	50,2	49,0	OK	OK

På grund av att det uppstår drag i bultarna så finns det en viss risk att bulthuvudet eller muttern stansas igenom plåten. Då man i manuella beräkningar inte beaktar dragkraften som uppstår i skjuvförbandet beräknas inte heller bärförmågan för genomstansning. Detta beräknar IDEA StatiCa (figur 43).

Punching resistance check (EN 1993-1-8 tab 3.4)

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}} = 429,0 \text{ kN} \geq F_t = 27,7 \text{ kN}$$

where:

$d_m = 48,4 \text{ mm}$ – The mean of the across points and across flats dimensions of the bolt head or the nut, whichever is smaller

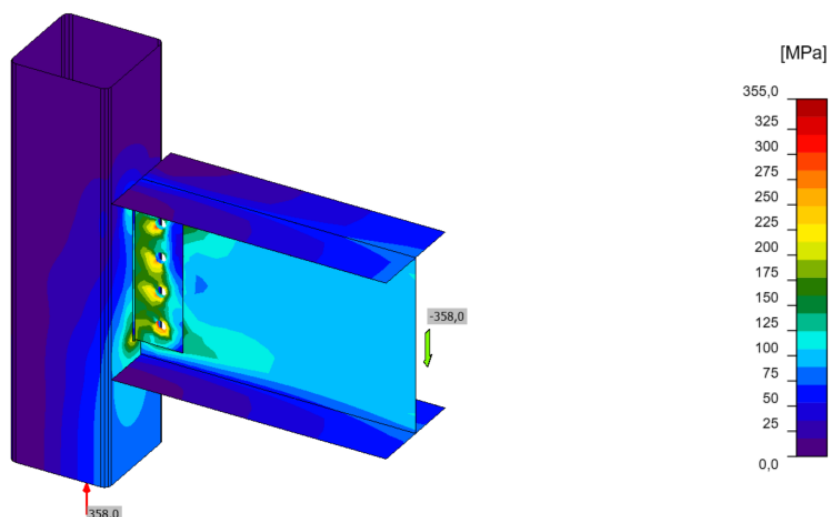
$t_p = 12,5 \text{ mm}$ – Thickness

$f_u = 470,0 \text{ MPa}$ – Ultimate strength

$\gamma_{M2} = 1,25$ – Safety factor

Figur 43. Bärförmåga mot genomstansning för den max utnyttjade bulten enligt IDEA StatiCa.

Skjuvbärförmågan för balken och plåten samt plåtens momentbärförmåga och anslutningens vippningsbärförmåga är enligt manuella beräkningar inom de ansatta kraven. Resultatjämförelse med IDEA StatiCa är dock utmanande och aningen knepig då IDEA StatiCa endast analyserar anslutningens spänningar och töjningar. Analysen möjliggör identifiering av zoner där spänningar är koncentrerade och som följaktligen är kritiska punkter för anslutningen (figur 44). Spänningsaxeln presenterar spänningen i anslutningen där färgskalan anger spänningens storlek i megapascal. Utöver de grafiska visualiseringsverktyg finns även detaljerade numeriska resultat tillgängliga i tabellformat. IDEA StatiCa presenterar resultatet för plåtar enligt spänning och töjning. För element och plåtar uppges värden på den maximala ekvivalenta spänningen, σ_{Ed} , och värdet för den maximala plastiska töjningen, ϵ_{pl} . Enligt tabell 9 är det balkens liv som har störst ekvivalent spänning på 333,9 MPa. Ingen plasticering uppstår för någondera av elementen och plåtarna som ingår i anslutningen.



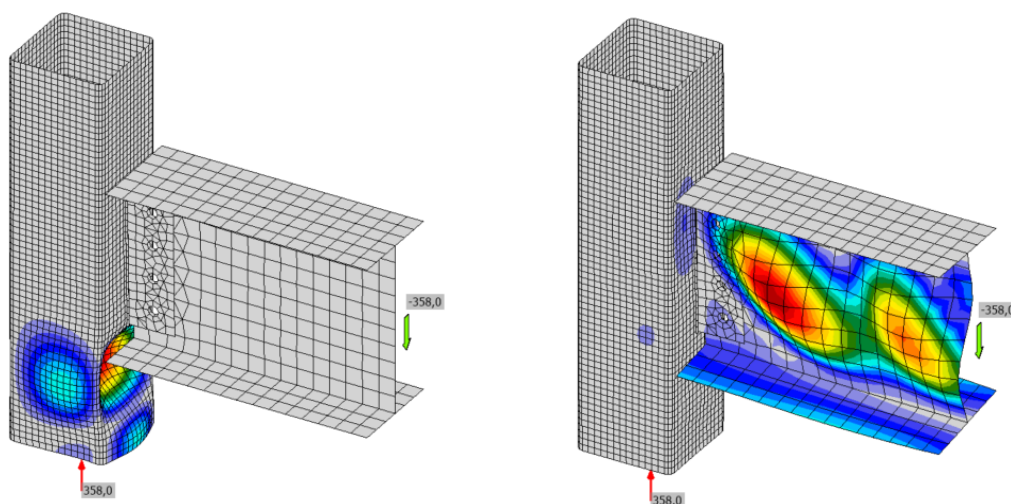
Figur 44. Visuellt resultat för ekvivalent stress i IDEA StatiCa.

Tabell 9. Resultat för element och plåtar i IDEA StatiCa

Check of members and steel plates for extreme load effect

	Status	Item	Material	Th [mm]	Loads	σ_{Ed} [MPa]	ϵ_{Pl} [%]	$\sigma_{c,Ed}$ [MPa]
>	✓	COL	S 355 H (EN 10219-1)	10,0	LE1	229,1	0,0	0,0
	✓	BEA-bfl 1	S 355 (EN 10025-2)	24,0	LE1	72,2	0,0	0,0
	✓	BEA-tfl 1	S 355 (EN 10025-2)	24,0	LE1	73,9	0,0	0,0
	✓	BEA-w 1	S 355 (EN 10025-2) - 1	12,5	LE1	333,9	0,0	19,3
	✓	O	S 355 (EN 10025-2) - 1	15,0	LE1	276,2	0,0	19,3

Resultatet för den manuella beräkningsprocessen av lokal buckling mellan fästelement på grund av långa avstånd förevisar att det inte kan ske buckling mellan fästelement. Det här innebär att plåtarna i anslutningen inte utsätts för buckling. Skjuvkraften gör dock så att elementen blir utsatta för buckling. IDEA StatiCas grafiska visualiseringsverktyg presenterar olika bucklingsområden som förekommer främst på balken. Två visuella resultat på deformation orsakat av buckling presenteras i figur 45. Buckling av huvudelement har ej beaktats i de manuella beräkningarna.



Figur 45. Deformation som uppstår på grund av buckling enligt IDEA StatiCa.

Svetsanalysens resultat presenteras i IDEA StatiCa som tabellformat med numeriska värden för varje svetslängd, varifrån de detaljerade kontrollekvationerna också kan erhållas. För den mest utsatta svetsens ges en spänningsutnyttjandeprocent, U_t , för den kritiska punkten enligt IDEA StatiCa som 51,6 % medan maxvärdet för kapacitetsutnyttjandeprocenten, U_{tc} , längs hela svetsens längd tas som ett medeltal av 25,6 % och 37,2 %, vilket ger en utnyttjandegrad på 31,4 % (tabell 10). Ett medeltal tas eftersom IDEA StatiCa tolkar svetsarna längs plåtens sidor separat medan de manuella beräkningar beaktar svetsarna kombinerat i sin helhet. Det manuella beräkningsresultatet för svetsdimensioneringen ger en utnyttjandegrad på 39,1 %. Värdet för den maximala plastiska töjningen, $\epsilon_{pl} = 0$ %, vilket innebär att svetsarna inte plasticeras.

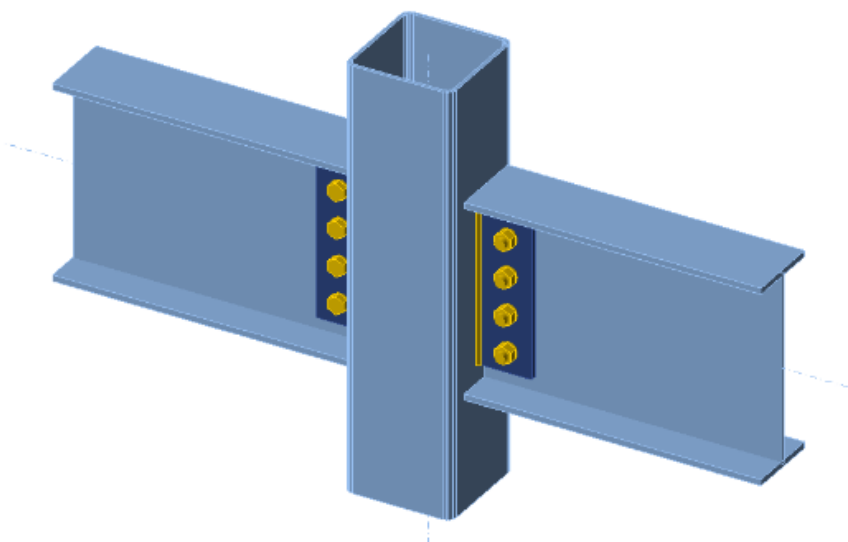
Tabell 10. Resultatet för svetsanalysen som erhålls ur IDEA StatiCa där de två lodräta svetsarna beräknas enskilt

Welds

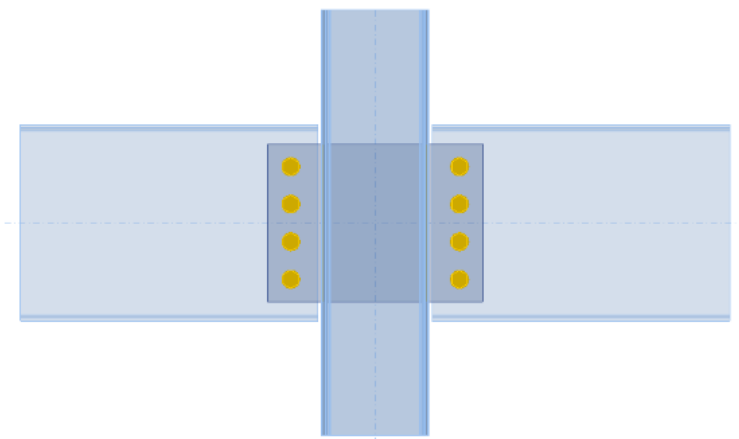
Item	Edge	Throat th. [mm]	Length [mm]	Loads	$\sigma_{w,Ed}$ [MPa]	ϵ_{pl} [%]	σ_{\perp} [MPa]	τ_{\parallel} [MPa]	τ_{\perp} [MPa]	U_t [%]	U_{tc} [%]	Status
COL-w 1	O	▲ 6,0 ▼	420,0	LE1	159,6	0,0	-85,5	73,3	-26,2	38,2	25,6	OK
		▲ 6,0 ▼	420,0	LE1	215,4	0,0	55,6	-120,1	3,6	51,6	37,2	OK

4.4 Enskärigt skjuvförband genom pelare

För det enskäriga skjuvförbandet mellan balk och pelare krävs det att plåten är tillräckligt tjock för att överföra lasterna till pelarens sidovägg. När högre kapacitet krävs är det vanligt att använda sig av genomgående plåt, fastsvetsad i pelaren, där balkarna bultas till plåten (figur 46). Ytterligare en fördel med en genomgående plåt är dess stabilitet och styvhet som den bidrar med till anslutningen. Det här innebär att den har kapacitet att ta mer moment och skjuvbelastning än andra anslutningar. Den genomgående plåten är däremot en relativt komplicerad monteringsmetod och innebär en dyrare tillverkningsprocedur. Balkarna utgörs med I-profiler och pelaren utformas med rörprofil. Anslutningens geometri förtydligas i figur 47.



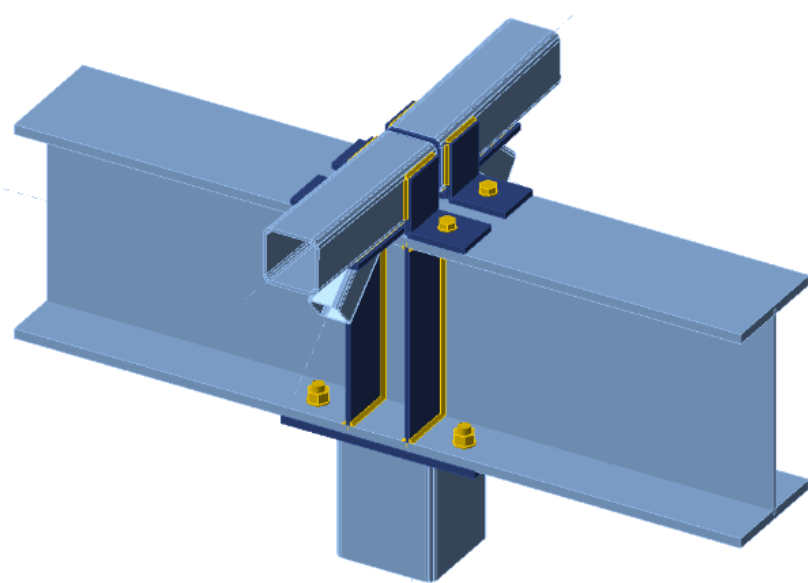
Figur 46. Enskärigt skjuvförband genom pelare designad i IDEA StatiCa.



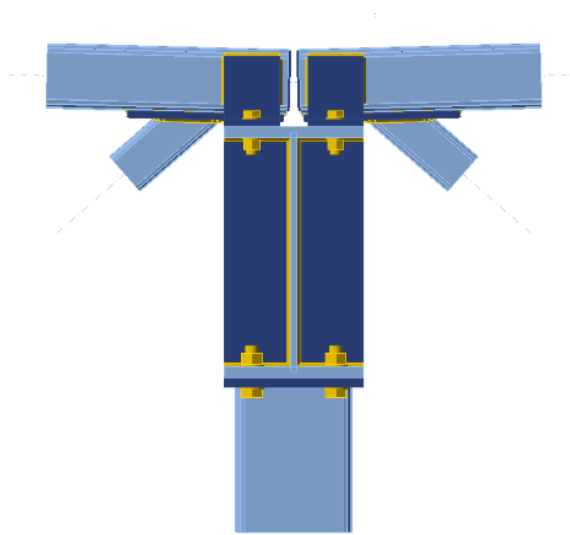
Figur 47. Enskärigt skjuvförband genom pelare designad i IDEA StatiCa.

4.5 Ledad pelartopp med fackverksbalk

Denna anslutning används vid ersättande av primärfackverk med HEA balk. Anslutningen består av kontinuerliga HEA-balkar som går över pelare. Sekundärfackverken som ansluter ovanpå balken placeras tätare än pelarna för att spännvidden för takplåten inte ska bli för lång. Sekundärfackverkens anslutningstyp kan också användas med primärfackverk när pelaravstånden är för stora för att HEA-balkar ska vara ekonomiskt. Anslutningen belastas från flera håll. Fackverken stöder ovanpå primärbalken och denna upplagsreaktion går genom HEA-profilen där primärbalkens tvärkrafter kombineras till att krafterna överförs till pelaren som en normalkraft. Anslutningens geometri visas i figur 48 och figur 49.



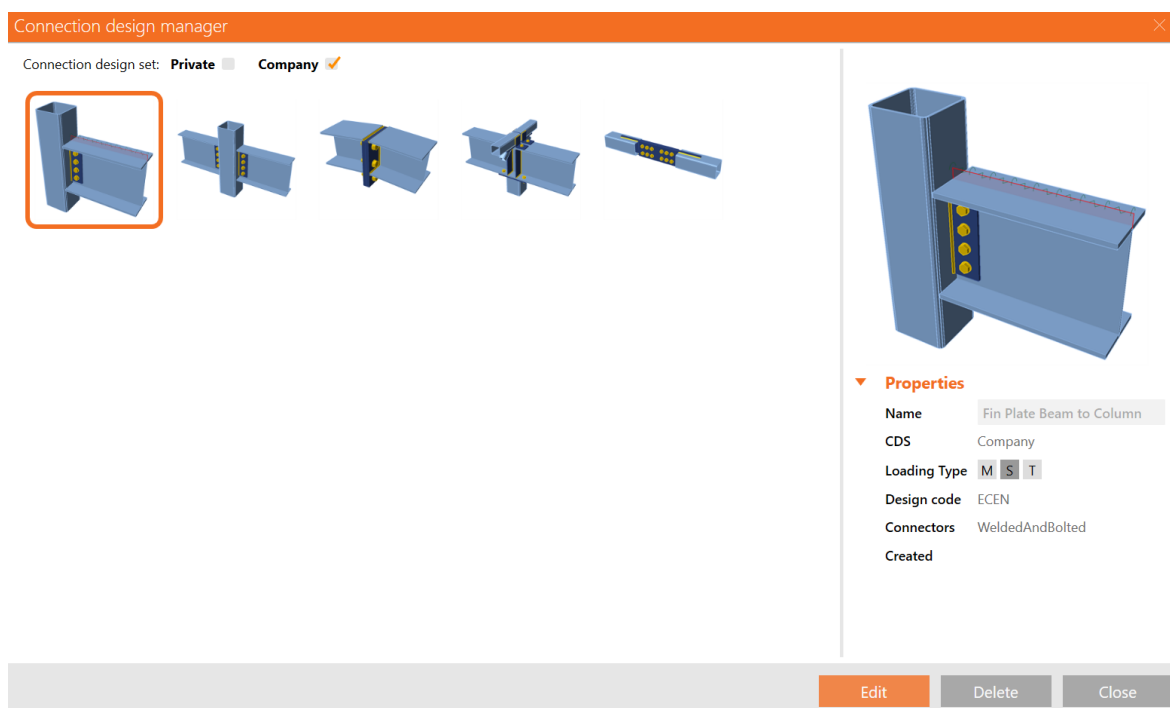
Figur 48. Ledad pelartopp med fackverksbalk designad i IDEA StatiCa.



Figur 49. Ledad pelartopp med fackverksbalk designad i IDEA StatiCa.

5 Resultat

Resultatet av den praktiska delen, som gjordes åt Nordec Oy, består av fem stålanslutningsdetaljer uppgjorda i IDEA StatiCa. Stålanslutningsdetaljerna finns tillgängliga för konstruktörer i programvarans Connection design browser hos företaget (figur 50). Därtill har tre enskilda beräkningsbottnar skapats med Finlands, Sveriges och Norges partialkoefficienter. Inställningarna för beräkningsbottnarna, skapade i IDEA StatiCa, är programmerade enligt de landspecifika partialkoefficienterna. Beräkningsbottnarna finns tillgängliga på Nordecs server, disponibla för konstruktörerna.

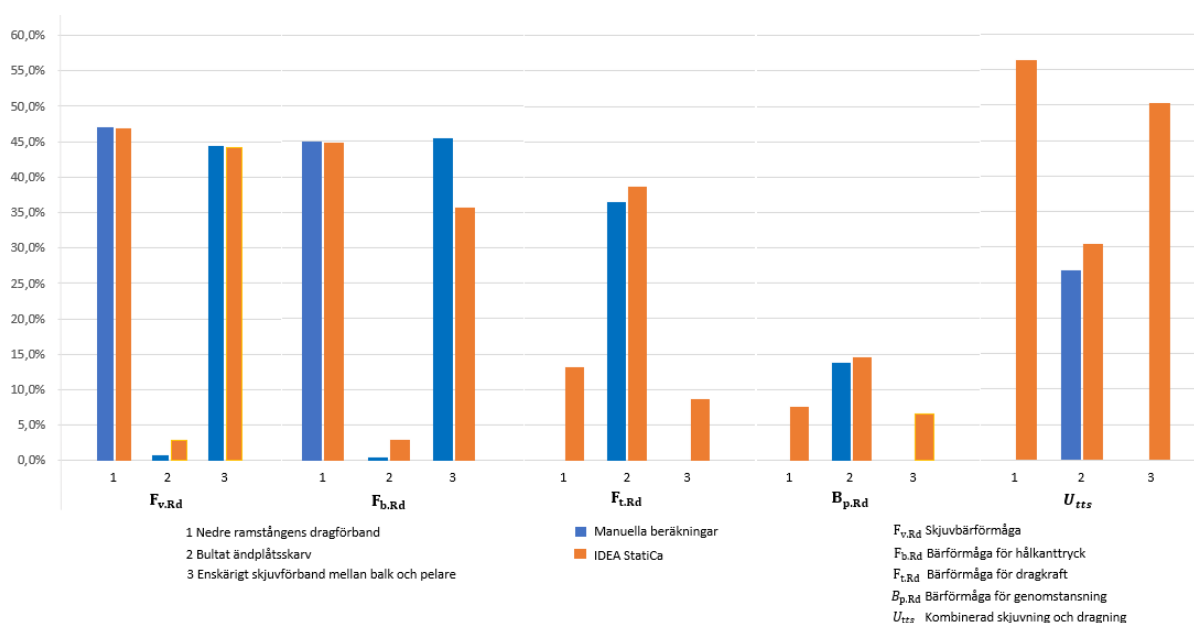


Figur 50. Stålanslutningsdetaljerna tillgängliga i IDEA StatiCa Connection design browser hos Nordec.

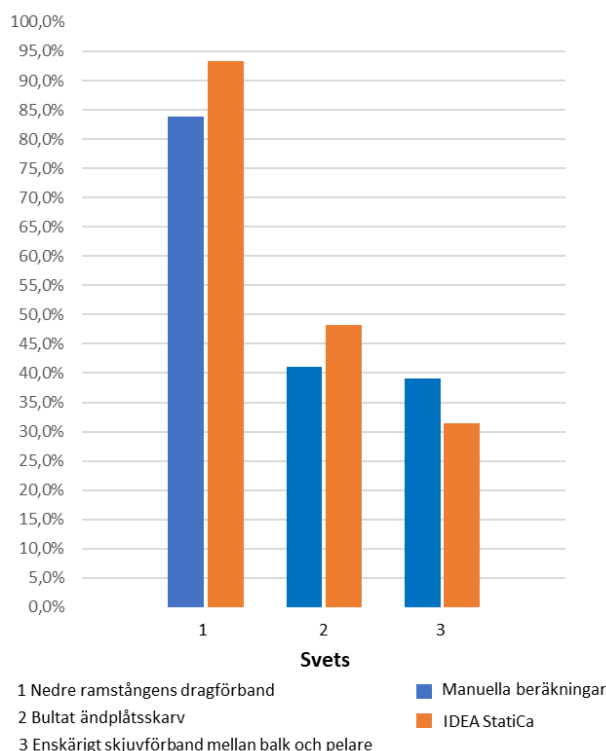
FEM är allmänt accepterat inom konstruktionsteknik och ger mycket goda och pålitliga resultat. Genom att använda en FEM-programvara kan konstruktören förutsäga hur en konstruktion kommer att bete sig i olika scenarier och därmed optimera den för att uppfylla krav på styrka, styvhet och hållbarhet. När man använder FEM-programvara i konstruktionsteknik är det viktigt att vara bekant med eurokoder och andra gällande standarder. Genom att vara bekant med dem kan konstruktören säkerställa att FEM-analysen görs på ett korrekt och tillförlitligt sätt och att konstruktionen uppfyller säkerhetskraven.

Det är svårt att ge ett specifikt svar på hur resultaten mellan IDEA StatiCa och manuella beräkningar skiljer sig ifrån varandra. I figur 51 och figur 52 är det tydligt att de manuella beräkningarnas noggrannhet varierar beroende på anslutningstyp. Beroende på hurdan belastning som anslutningen utsätts för, varierar dimensioneringsgången för de manuella beräkningarna. På grund av att flera antaganden och förenklingar görs i manuella beräkningar genereras inte ett lika exakt resultat som IDEA StatiCa. Manuella beräkningar är ofta mer förenklade och tar inte hänsyn till alla faktorer som faktiskt påverkar anslutningens beteende. Programvaran tar bland annat hänsyn till anslutningens tredimensionella beteende utsatt för belastning, till exempel gällande rotation och deformation, vilket ger ett mer exakt resultat. Därefter beaktar IDEA StatiCa plåtars töjningar och lokala plasticeringar vilket gör att krafter fördelas olika. Det här innebär bland annat svårigheter gällande den korrekta fördelningen av anslutningens inre krafter över de enskilda bultar eftersom bultarnas krafter varierar, medan manuella beräkningar utgår från att kraftfördelningen mellan bultarna är lika.

Med IDEA StatiCa minskar risken för fel i beräkningarna och ger tillförlitliga resultat förutsatt att anslutningsdetaljen är utformad på rätt sätt och att nödvändig information är rätt ifyllt. Det är däremot en vanlig praxis att utföra manuella beräkningar för att verifiera och kontrollera resultaten från datorprogram. På det sättet ges en bra indikation på tillförlitligheten hos programvarans resultat men det är viktigt att komma ihåg att manuella beräkningar är mer generaliserade.



Figur 51. Sammanställning av utnyttjandegradprocenter för bultarnas bärförmågor för de tre beräknade anslutningarna.



Figur 52. Sammanställning av utnyttjandegradprocenter för svetsarna för de tre beräknade anslutningarna.

Hur ska en anslutningsdetalj vara designad i IDEA StatiCa så att den är flexibel och justerbar?

IDEA StatiCas verktyg Connection design browser är utformad för att vara en lättanvänd och användbar resurs för ingenjörer som snabbt och enkelt behöver dimensionera stålanslutningar. Med verktyget kan användaren spara tid och minska risken för felaktiga konstruktioner och kostsamma förseningar. För framtida användning av en anslutning uppladdad i IDEA StatiCas Connection design browser krävs det dock noggrann eftertanke vid utformning av designen så att den är flexibel och justerbar när en annan användare vill ändra dimensioner enligt deras behov.

För att en anslutning i IDEA StatiCa ska vara lätt justerbar och flexibel för en annan användare bör designaspekter övervägas vid utformning av anslutningen. Till en början är det viktigt att anslutningens element är försedd med tydliga namn och beskrivningar på parametrar. Namngivningen av elementen föreskrivs enligt företagets specifikationer för att underlätta förståelsen för andra som bekantar sig med modellen. Insättning av element och operationer i programvaran bör vara organiserat med en logisk layout som är systematisk att följa så att den andra användaren begriper och kan justera anslutningen utan att behöva kontakta skaparen för att förstå vad det är som ändras i anslutningen.

Genom att beakta infästningspunkter av element och plåtar kan anslutningsprocessen förenklas. Infästningspunkter påverkar hur och i vilken riktning som element och plåtar rör på sig vid justeringar på dimensioner och tjocklekar. Därför är det viktigt att insättningspunkterna är korrekt i förhållande till andra, så att justering av dimensioner inte orsakar onödiga kollisioner mellan element och plåtar som den andra användaren ytterligare måste korrigera. Innan man delar designen med andra bör man testa och verifiera den för att se till att den fungerar som den ska. Genom att överväga designaspekter i IDEA StatiCa är det möjligt att skapa en anslutning som är flexibel och anpassningsbar till olika belastningar och profiltyper. Detta kan minska tiden och kostnaden för framtida anpassningar och göra det enklare för andra att arbeta med anslutningen.

Vilka är de största skillnaderna mellan IDEA StatiCas beräkningsprocess och manuella beräkningar enligt eurokod?

Det finns flera skillnader mellan IDEA StatiCas beräkningsprocess och manuella beräkningar enligt eurokod. En av skillnaderna är att IDEA StatiCa automatiserar beräkningsprocessen, vilket minskar tidsåtgången för att beräkna och dimensionera en konstruktion. Programvaran använder avancerade analysmetoder och teknik för att beräkna och dimensionera konstruktioner, vilket ger högre grad av noggrannhet jämfört med manuella beräkningar. Programvaran tar också hänsyn till komplexa lastfall och beteendemönster som kan vara svåra att hantera manuellt, vilket också kan hjälpa till att minska kostnader och öka effektiviteten genom att optimera anslutningslösningarna baserat på konstruktionens krav och standarder. Dessutom har IDEA StatiCa inbyggda kontroller och valideringsprocesser som kan hjälpa till att upptäcka eventuella fel eller brister i konstruktionen, vilket inte är möjligt på samma sätt med manuella beräkningar.

Den största skillnaden är däremot att IDEA StatiCa beräknar varje del i anslutningen komponentvis och ger resultat för varje komponent. Manuella beräkningar är mer baserade på enklare matematiska formler med antagandet att komponenterna i anslutningen delar lika på belastningen som den utsätts för. Manuella beräkningar är därför ofta mindre precisa samt mer tidskrävande att genomföra. IDEA StatiCa kan utföra beräkningar och bearbeta stora mängder data på kort tid, vilket sparar både tid och resurser när beräkningsprocessen är mycket snabbare än manuella beräkningar. IDEA StatiCa kan göra beräkningar mer noggrant och mer automatiserat än manuella beräkningar, men som konstruktör är det ändå viktigt att ha kunskap om både programvaran och bakgrunden för tillämpade eurokoder.

6 Diskussion

Examensarbetet har gett mig en djupare förståelse för hur viktigt det är att ha kunskap om den bakomliggande teorin som krävs vid dimensioneringsprocessen av stålanslutningsdetaljer. Programvaran IDEA StatiCa var helt ny för mig och det krävdes tid att lära mig programmets användarområden och möjligheter. Den största utmaningen var att få fram en tydlig jämförelse mellan programvaran och manuella beräkningar. Jag insåg snabbt att resultatjämförelsen mellan IDEA StatiCa och manuella beräkningar kommer bli svårtolkade. Både med finjusteringar i användningen av IDEA StatiCa och med beräkningsprocessen har jag haft stor hjälp av min handledare från Nordec.

Användningen av IDEA StatiCa var mer tidseffektivt än de manuella beräkningarna trots att utformningen av stålanslutningsdetaljer i IDEA StatiCa kräver tålamod, kunskap och precision. Under examensarbetets gång insåg jag att konstruktörer använder funktioner i IDEA StatiCa på olika sätt. Jag insåg även att man inte helt ska förlita sig på programvaran utan att det krävs kritiskt tänkande, egen kunskap och sunt bondförnuft för att förstå om programmets resultat faktiskt kan stämma.

Målet med detta examensarbete var att skapa fem stålanslutningsdetaljer i IDEA StatiCa samt tre enskilda beräkningsbottnar med de länders partialkoefficienter som beställaren primärt levererar projekt till. Målet har uppnåtts och resultatet finns tillgängligt hos företaget. Syftet var att effektivisera beräkningsprocessen vid detaljprojekteringen åt företaget vilket nu är möjligt då stålanslutningsdetaljerna finns tillgängliga i verktyget Connection design browser. Anslutningsdetaljerna är utformade för att vara flexibla och justeringar på anslutningsdetaljerna kan göras enligt projektvisa profildimensioner.

Examensarbetet lämnar utrymme för vidareutveckling i form av skapandet av stålanslutningsbiblioteket. Förutom att biblioteket kommer att utvidgas med flera anslutningar med tiden kan det även komma att bli aktuellt att spara anslutningsdetaljerna med landspecifika partialkoefficienter var för sig. I det här skedet är det inte nödvändigt förrän detaljerna har bearbetats och använts då eventuella förändringar och optimeringar ännu kan tillkomma. Det kan även bli aktuellt att utforma färdiga profilkataloger som ingår i beräkningsbottnarna.

6.1 Kommentar av Nordec

Enligt Rickard Nybacka, Senior Structural Engineer på Nordec, har *Connection design browser* inte tidigare använts i större utsträckning inom företaget eftersom det är ett relativt nytt verktyg i IDEA StatiCa. Under examensarbetets gång framkom det att verktyget har stora fördelar men också en del begränsningar. Biblioteket som uppgjorts i IDEA StatiCa ligger som en bra grund för det som kommer bli en användbar funktion för Nordecs konstruktörer. De nu sparade anslutningsdetaljerna används redan och biblioteket kommer fyllas på med flera anslutningar med tiden. De begränsningar som uppdagats med *Connection design browser* kommer gås igenom med utvecklarna av IDEA StatiCa för att ytterligare förbättra både effektiviteten och kvalitén på planeringen av stålanslutningar hos Nordec, menar Nybacka.

7 Källförteckning

BE Group Sverige AB. (2016). *Byggstålshandboken*.

CBFEM team. (2021). *Component-based Finite Element Method (CBFEM)*. Hämtat från <https://www.cbfem.com/about-cbfem> den 9.11.2022

European Steel Design Education Programme. (u.d.). *Connection Design: Static Loading - Connections with Non-Preloaded Bolts*. Hämtat från http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/~pmoze/ESDEP/master/wg11/10310.htm#SEC_1 den 12.1.2023

IDEA StatiCa. (2009-2023a). Hämtat från <https://www.ideastatica.com/> den 7.11.2022

IDEA StatiCa. (2009-2023b). *BIM links - Tekla Structures*. Hämtat från <https://www.ideastatica.com/bim/tekla-structures> den 15.11.2022

IDEA StatiCa. (2009-2023c). *Theoretical background: IDEA StatiCa Connection – Structural design of steel connections*. Hämtat från <https://www.ideastatica.com/support-center/general-theoretical-background> den 29.11.2022

IDEA StatiCa. (2009-2023d). *Known limitations for Tekla Structures*. Hämtat från <https://www.ideastatica.com/support-center/known-limitations-for-tekla-structures> den 14.12.2022

IDEA StatiCa. (2009-2023e). *Bolt bearing distances for Eurocode*. Hämtat från <https://www.ideastatica.com/support-center/bolt-bearing-distances-for-eurocode> den 6.4.2023

IDEA StatiCa. (den 18.11.2021). *Connection design evolution part 1 - Connection Browser*. Hämtat från <https://www.ideastatica.com/blog/connection-design-evolution-part-1-connection-browser> den 15.12.2022

IDEA StatiCa. (den 5.8.2022a). *Modeling tips&tricks - US*. Hämtat från Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=wZIGQJhYFjs> den 8.12.2022

IDEA StatiCa. (den 30.3.2022b). *Get the most out of Connection modeling*. Hämtat från Youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=zQgCNRD9kr8> den 8.12.2022

IEEE. (u.d.). *How the Finite Element Method (FEM) and Finite Element Analysis (FEA) Work Together*. Hämtat från <https://innovationatwork.ieee.org/how-the-finite-element-method-fem-and-finite-element-analysis-fea-work-together/> den 20.4.2023

Nordec. (2023). Hämtat från <https://nordec.com/>

Norlin, B., Veljkovic, M., & Husson, W. (2015). *Att konstruera med stål - Modul 10: Förband*. Stålbyggnadsinstitutet.

Ongelin, P., & Valkonen, I. (2010). *HITSATUT PROFILIT EN1993 -käsikirja*. Rautaruukki Oyj.

- Ongelin, P., & Valkonen, I. (2016). *SSAB Domex Tube RAKENNEPUTKET*. SSAB Europe Oy.
- Sabatka, L., Wald, F., Kabelac, J., Kolaja, D., & Posisil, M. (2015). *Structural Analysis and Design of Steel Connections Usin Component-Based Finite Element Model*. Hämtat från Journal of Civil Engineering and Architecture.
- SFS-EN 1993-1-1. (2005). Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. i *Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu*. Suomen Standardisoimisliitto.
- SFS-EN 1993-1-5. (2006). Osa 1-5: Tasomaiset levyrakenteet. i *Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu*. Suomen Standardisoimisliitto.
- SFS-EN 1993-1-8. (2005). Osa 1-8: Liitosten mitoitus. i *Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu*. Suomen Standardisoimisliitto.
- Stålbyggnadsinstitutet. (2013). Balkskarv. i *Detaljhandboken*. Stockholm: The Swedish Institute of Steel Construction.
- The Steel Construction Institute. (2013). *SCI Publication 398 Joints in Steel Construcion: Moment-Resisting Joints to Eurocode 3*. The Steel Construction Institute and The British Constructional Steelwork Association.
- The Steel Construction Institute. (2014). *SCI Publication 358 Joints in Steel Construction : Simple Joints to Eurocode 3*. The Steel Construction Institute and The British Constructional Steelwork Association.
- Wald, F., Sabatka, L., Bajer, M., & Kabelac, J. (2021). *Component-Based Finite Element Design of Steel Connections*.
- Ye, J., Quan, G., Yun, X., Guo, X., & Chen, J. (2022). *An improved and robust finite element model for simulation of thin-walled steel bolted connections*.