

# Beregning av endeplate i høyfast stål

**Kristian Lauknes**

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Arne Aalberg, KT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for konstruksjonsteknikk





*Institutt for konstruksjonsteknikk*

Fakultet for ingeniørvitenskap og teknologi

**NTNU- Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet**

TILGJENGELIGHET

Åpen

## **MASTEROPPGAVE 2013**

FAGOMRÅDE: Stålkonstruksjoner	DATO 10.06.2013:	ANTALL SIDER: 14+97+(24)
----------------------------------	---------------------	-----------------------------

TITTEL:

**Beregninger av endeplateforbindelser i høyfast stål**

End plate joints in high-strength-steel

UTFØRT AV:

Kristian Lauknes



#### SAMMENDRAG:

Boltede endeplateforbindelser er mye brukt som delvis og helt momentstive forbindelser, slike knutepunkt klassifiseres ofte som delvis kontinuerlige knutepunkt etter NS-EN 1993-1-8. Beregningsmodellene for oppførsel til knutepunkter og skjøter med denne klassifiseringen tillates ikke brukt i dag for fastheter over S460 etter bestemmelser i NS-EN 1993-1-12. I denne rapporten blir endeplateforbindelser i Weldox 700 og S355 undersøkt, der utnyttelsesgraden for Weldox 700 ved de predikerte verdiene fra Eurokode 3 blir vektlagt spesielt. Forsøk med prøvestykker for endeplateforbindelser ble utført ved Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU. Prøvestykkene ble dimensjonert for å oppnå full flytning i endeplatene etter T-stykke modellen i NS-EN 1993-1-8.

Tre prøvestykker ble undersøkt, det ble brukt både H- og HUP-profiler. Begge fasthetene ble undersøkt med H-profiler og Weldox 700 ble undersøkt med HUP-profiler. Alle prøvestykke ble kjørt med konstant hastighet 0,5 mm/min til brudd, og forskyvningene mellom endeplatene ble analysert ved hjelp av programmet Ecoor v2.0 basert på Digital Image Correlation. De predikerte kapasitetene og stivhetene til prøvestykkene ble basert på midlere verdier av endeplatenes eksakte mål og materialegenskaper funnet ved materialforsøk. Dimensjonerende flytemekanismene samsvarte med det som ble observert for prøvestykkene etter brudd.

Prøvestykkene ble modellert i elementprogrammet Abaqus 6.11-1 for etterregning av forsøksresultatene. Analysene ga ikke-konservative og konservative anslag henholdsvis kapasitet og stivhet. Dimensjonerende flytemekanisme var lett gjenkjennelig i de numeriske modellene ved forskyvninger mellom endeplatene tilsvarende de virkelige forskyvningene.

Sammenligning av utnyttelsesgrader for Weldox 700 og S355 ved H-profiler ble utført. Forsøket med HUP-profiler i Weldox 700 ble sammenlignet med forsøk i en parallell masteroppgave med tilsvarende prøvegeometri der endeplatene hadde fasthet S355. Sammenligningene viste at predikerte verdier for kapasitet og stivhet etter Eurokode 3 var på konservativ side for begge fasthetene. Forsøksresultatene viste at for å få samme utnyttelses grad av kapasitet for Weldox 700 og S355 etter flytemodellen kunne en mulighet være å innføre en reduksjonskoeffisient i Eurokode 3 for Weldox 700. Stivheter beregnet etter Eurokode 3 samsvarte dårlig med de observerte stivhetene, og grunnen til dette kan være stivhetesmodellen.

FAGLÆRER: Førstemanuensis Arne Aalberg

VEILEDER(E): Førstemanuensis Arne Aalberg

UTFØRT VED: Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU



*Department of Structural Engineering*

Faculty of Engineering Science and Technology

**NTNU- Norwegian University of Science and Technology**

ACCESSIBILITY

Open

## **MASTER THESIS 2013**

SUBJECT AREA: Steel Construction	DATE: 10.06.2013	NO. OF PAGES: 14+97+(24)
-------------------------------------	---------------------	-----------------------------

TITLE:

**End Plate Joints in High-Strength Steel**

Beregning av endeplateforbindelser i høyfast stål

BY:

Kristian Lauknes



## SUMMARY:

Bolted end plate connections are widely used as moment-resistant connections, and this type of joints is often grouped as semi rigid/partial strength joints according to NS-EN 1993-1-8. Calculation models for the behavior of joints with this classification is not allowed used for strength higher than S460 after rules given in NS-EN 1993-1-12. In this report end-plate joints with Weldox 700 and S355 examined, where the utilization of values from Eurocode 3 is emphasized in particular. Experiment with end-plate samples were performed at the Department of Structural Engineering, NTNU. The test samples were design to achieve full yielding in the end plate after the T-stub model in NS-EN 1993-1-8.

Three samples were examined, it was used both H- and HUP- profiles. Both strength were tested with H-profiles and Weldox 700 were examined for HUP-profiles. All samples were run with constant velocity 0,5 mm/min to fracture, and the displacement between the end plate were analyzed using eCoor v2.0 based on Digital Image Correlation. The predicted capacity and stiffness of the samples was based on the mean values of the exact dimensions and material properties found in material experiment. Design yield line mechanism were consistent with those observed after fracture.

The samples were model in the element program Abaqus 6.11-1, for recalculation of the test result. The analyzes gave non-conservative and conservative estimates for the capacity and stiffness. The yield line mechanisms was easily recognizable in the numerical model with a displacement between the end plate corresponding to the real displacement.

Comparison utilization ratios for Weldox 700 and S355 by H-profiles was performed. The experiment with HUP-profiles were compared with experiment in a parallel thesis in a with corresponding samples geometry where the plates had strength S355. The comparison showed that the predicted values for capacity and stiffness by Eurocode 3 were on the conservative side for both strength. The result showed that for the same utilization level of capacity for Weldox 700 and S355 by the yield line model could be to introduce a reduction coefficient in the yield line model for Weldox 700. Stiffness calculated accordingly to Eurocode 3 correlated poorly with the observed stiffness.

RESPONSIBLE TEACHER: Associate Professor Arne Aalberg

SUPERVISOR(S): Associate Professor Arne Aalberg

CARRIED OUT AT: Department of Structural Engineering, NTNU



## MASTEROPPGAVE VÅREN 2013

Kristian Lauknes

### Beregning av endeplateforbindelser i høyfast stål

#### End Plate Joints in High-Strength Steel

##### 1. Bakgrunn

I knutepunksstandarden NS-EN 1993 del 1.8, Dimensjonering av knutepunkter, er det gitt omfattende beregningsanvisninger for sammenføyninger i stålrammer og fagverk. Reglene dekker grunnleggende forbindelseselementer som skruer, sveiser og plater, og komplette knutepunksgeometrier. Hovedsakelig dekker reglene stålelementer med I-tverrsnittsform, for de vanlige knutepunkter vi benytter i stålrammer. Anvisningene i standarden dekker både kapasitetsberegning og stivhetsberegning. Standarden benytter en *komponentmetode*, hvor knutepunkter modelleres som en samling enkle basiskomponenter med kjent oppførsel. For hulprofilknutepunkter er standardens anvisninger mer begrenset, til typiske fagverkselementer og da kun med hensyn på kapasitet.

Stivhet og kapasitet til bjelke-søyle-forbindelser og søyleføtter er behandlet i en rekke studentarbeider ved Institutt for konstruksjonsteknikk i de senere årene. Bakgrunnen for reglene i standarden er gjennomgått, og det er foretatt laboratorieforsøk og numeriske simuleringer for flere knutepunksgeometrier, med sikte på å undersøke og verifisere bestemmelsene i standarden. I en fortsettelse av disse arbeidene ønsker vi nå å se på flere varianter av knutepunkter.

I denne masteroppgaven skal det sees på beregningsmodellene for oppførsel til knutepunkter og skjøter med endeplater. Det skal sees spesielt på bruk av høyfast stål for endeplatene, og hvilke

konsekvenser dette har for beregningene og oppførselen til forbindelsene. Det tenkes spesielt på effekter av materialets lavere duktilitet sammenlignet med vanlig konstruksjonsstål.

## 2. Gjennomføring

Oppgaven kan gjennomføres med følgende elementer:

- Kort redegjørelse for beregningsregler for knutepunkter.
- Gjennomgang av bakgrunn og regler for flytelinjeteori for tverrbelastede plater.
- Litteraturstudium for bruk av høyfast stål i konstruksjoner og knutepunkter.
- Utvelgelse og dimensjonering av prøvestykker for endeplateforbindelser i høyfast stål.
- Gjennomføring av materialforsøk og komponentforsøk i laboratoriet, rapportering av forsøk og resultater.
- Etterregning med analytisk modeller og med elementmetodeprogram.
- Forslag til endring i dagens regler eller forslag til nye beregningsmodeller.

Kandidaten kan i samråd med faglærer velge å konsentrere seg om enkelte av punktene i oppgaven, eller justere disse.

## 3. Rapporten

Oppgaven skal skrives som en teknisk rapport i et tekstbehandlingsprogram slik at figurer, tabeller og foto får god rapportkvalitet. Rapporten skal inneholde et sammendrag, evt. en liste over figurer og tabeller, en litteraturliste og opplysninger om andre relevante referanser og kilder.

Oppgaver som skrives på norsk skal også ha et sammendrag på engelsk. Oppgaven skal leveres igjennom «DAIM».

Sammendraget skal ikke ha mer enn 450 ord og være egnet for elektronisk rapportering.

Masteroppgaven skal leveres innen 10. juni 2013.

Trondheim, 14. januar 2013

Arne Aalberg

Førsteamanuensis, Faglære



## Forord

Denne rapporten er utarbeidet som en masteroppgave ved Institutt for konstruksjonsteknikk ved Norges tekniske-naturvitenskapelige universitet (NTNU) våren 2013. Rapporten utgjør 20 ukers arbeid, tilsvarende 30 studiepoeng.

Der hensikten har vært å undersøke beregningsmodellene for oppførselen til knutepunkter og skjøter med endeplater. Det har blitt lagt spesielt vekt på bruk av høyfast stål i endeplatene. Det har blitt utført et litteraturstudium for bruk av høyfast stål i konstruksjoner og knutepunkter. Prøvestykker har blitt dimensjonert og undersøkt eksperimentelt og etterregnet med numeriske modeller i elementprogrammet Abaqus 6.11-1.

Jeg ønsker å rette en takk til min veileder Arne Aalberg ved Institutt for konstruksjonsteknikk for veiledning. Ønsker også å rette en stor takk til overingeniør Trond Auestad for god hjelp med laboratorietestene. Må i tillegg rette en stor takk til Ivar Mogstad og Tom Inge Asheim for all veiledningen ved bruk av programmet Abaqus 6.11-1.

Trondheim, juni 2013

---

Kristian Lauknes



## Sammendrag

Boltede endeplateforbindelser er mye brukt som delvis og helt momentstive forbindelser, slike knutepunkt klassifiseres ofte som delvis kontinuerlige knutepunkt etter NS-EN 1993-1-8. Beregningsmodellene for oppførsel til knutepunkter og skjøter med denne klassifiseringen tillates ikke brukt i dag for fastheter over S460 etter bestemmelser i NS-EN 1993-1-12. I denne rapporten blir endeplateforbindelser i Weldox 700 og S355 undersøkt, der utnyttelsesgraden for Weldox 700 ved de predikerte verdiene fra Eurokode 3 blir vektlagt spesielt. Forsøk med prøvestykker for endeplateforbindelser ble utført ved Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU. Prøvestykkene ble dimensjonert for å oppnå full flytning i endeplatene etter T-stykke modellen i NS-EN 1993-1-8.

Tre prøvestykker ble undersøkt, det ble brukt både H- og HUP-profiler. Begge fasthetene ble undersøkt med H-profiler og Weldox 700 ble undersøkt med HUP-profiler. Alle prøvestykke ble kjørt med konstant hastighet 0,5 mm/min til brudd, og forskyvningene mellom endeplatene ble analysert ved hjelp av programmet Ecoor v2.0 basert på Digital Image Correlation. De predikerte kapasitetene og stivhetene til prøvestykkene ble basert på midlere verdier av endeplatenes eksakte mål og materialeegenskaper funnet ved materialforsøk. Dimensjonerende flytemekanismene samsvarte med det som ble observert for prøvestykkene etter brudd.

Prøvestykkene ble modellert i elementprogrammet Abaqus 6.11-1 for etterregning av forsøksresultatene. Analysene ga ikke-konservative og konservative anslag henholdsvis kapasitet og stivhet. Dimensjonerende flytemekanisme var lett gjenkjennelig i de numeriske modellene ved forskyvninger mellom endeplatene tilsvarende de virkelige forskyvningene.

Sammenligning av utnyttelsesgrader for Weldox 700 og S355 ved H-profiler ble utført. Forsøket med HUP-profiler i Weldox 700 ble sammenlignet med forsøk i en parallell masteroppgave med tilsvarende prøvegeometri der endeplatene hadde fasthet S355. Sammenligningene viste at predikerte verdier for kapasitet og stivhet etter Eurokode 3 var på konservativ side for begge fasthetene. Forsøksresultatene viste at for å få samme utnyttelses grad av kapasitet for Weldox 700 og S355 etter flytemodellen kunne en mulighet være å innføre en reduksjonskoeffisient i Eurokode 3 for Weldox 700. Stivheter beregnet etter Eurokode 3 samsvarte dårlig med de observerte stivhetene, og grunnen til dette kan være stivhetesmodellen.



# Innholdsfortegnelse

Forord.....	I
Sammendrag .....	III
1. Innledning.....	1
2. Teori.....	3
2.1 Høyfast stål.....	3
2.2 Sann spenning og sann tøyning.....	5
2.3 Flytelinjeteori .....	5
2.3.1 Kinematiske mekanismer .....	6
2.3.2 Kapasitet av tverrbelastede palter .....	7
2.3.3 Flytekriterium for plater .....	8
2.4 Klassifisering av knutepunkt.....	10
2.5 Kapasitet og Stivhet.....	11
2.5.1 T-stykke .....	11
2.5.2 kapasitet .....	14
2.5.3 Stivhet.....	16
2.6 Digital Image Correlation (DIC).....	20
3. Bruk av høyfast stål i konstruksjoner .....	21
3.1 Eksempler på bruk av høyfast stål.....	21
4. Tidligere arbeid.....	27
4.1 Bolteforbindelser.....	27
4.1.1 Forsøksprogram av Hyeong & Yara [25].....	27
4.1.2 Forsøksprogram av Aalberg & Larsen [14] .....	28
4.1.3 Brudd i nettotverrsnitt Aalberg & Larsen [27] .....	29
4.1.4 Forsøksprogram for blokkutrivning grunnet skjær av Aalberg & Larsen [26] .....	30
4.1.5 Forsøksprogram for blokkutrivning grunnet strekk av Aalberg & Larsen [26].....	32
4.2 Endeplateforbindelser.....	33
5. Dimensjonering av prøvestykker.....	37
6. Laboratorieforsøk.....	43
6.1 Materialtest.....	43
6.2 Prøveoppsett .....	47
6.3 Forsøksprosedyre .....	49
6.4 Observasjoner ved testene .....	50
6.5 Resultater .....	54
7. Numerisk analyse .....	59
7.1 Materialer.....	59

7.1.1	Endeplater .....	59
7.1.2	Profiler .....	60
7.1.3	Bolter .....	61
7.1.4	Sveiser .....	63
7.2	Elementmodellen .....	64
7.3	Resultater .....	71
8.	Sammenligning av resultater.....	81
8.1	Kapasitet.....	81
8.1.1	Kapasitet bestemt ut fra regler i Eurokode 3 .....	81
8.1.2	Sammenligning med numerisk modell.....	84
8.2	Stivhet.....	85
8.2.1	Stivheter bestemt ut fra regler i Eurokode 3.....	85
8.2.2	Sammenligning med numerisk modell.....	88
8.3	Forslag til modifikasjon av dagens regelverk .....	88
8.3.1	Kapasitet.....	89
8.3.2	Stivhet.....	89
9.	Konklusjon.....	91
10.	Videre Arbeid.....	93
11.	Referanser .....	95
	Vedlegg A – Eksakte mål av endeplatene.....	1
	Vedlegg B – Beregninger .....	7
	Kapasitet og stivhet basert på nominelle verdier .....	7
	Kapasitet og stivhet basert på eksakte verdier .....	17
	Vedlegg C – Materialdata .....	23

## Figurliste

FIGUR 2.1: SPENNINGS-TØYNINGSKURVER .....	3
FIGUR 2.2: FASTE OG RELATIVE DREIEAKSER .....	7
FIGUR 2.3: BRUDDMEKANISME FOR KVADRATISK PLATE .....	7
FIGUR 2.4: FLYTEKRITERIUM FOR PLATER .....	9
FIGUR 2.5: LIKEVEKTSYSTEM FOR MEMBRANKREFTER .....	9
FIGUR 2.6: KONSTRUKTIV UTFØRELSE OG GRAD AV MOMENTSTIVHET .....	10
FIGUR 2.7: EFFEKTIVE LENGDER FOR T-STYKKE .....	12
FIGUR 2.8: DEFINISJON AV ENDE- OG KANTAVSTANDER FOR ENDEPLATE .....	14
FIGUR 2.9: BRUDDFORM 1 .....	15
FIGUR 2.10: BRUDDFORM 2 .....	15
FIGUR 2.11: BRUDDFORM 3 .....	16
FIGUR 2.12: FJÆRMODELL FOR BJELKE-SØYLE FORBINDELSE .....	17
FIGUR 2.13: ELASTISK DEFORMASJON AV T-STYKKE .....	18
FIGUR 2.14: STREKKBELASTET ENDEPLATESKJØT .....	19
FIGUR 3.1: AKASHI KAIKYO BRIDGE [17] .....	22
FIGUR 3.2: TOKYO GATE BRIDGE [18] .....	22
FIGUR 3.3: MILITÆRBRU LASTET MED TANKS [13] .....	23
FIGUR 3.4: NYE HOLMENKOLLEN [20] .....	24
FIGUR 3.5: FRIENDS ARENA .....	25
FIGUR 4.1: GEOMETRIER OG PRØVEOPPSETT [25] .....	27
FIGUR 4.2: UTVIKLING AV FLYTELINJER [25] .....	28
FIGUR 4.3: KRAFT-FORSKYVNINGSKURVER [14] .....	28
FIGUR 4.4: BRUDDLOKALISERING [14] .....	29
FIGUR 4.5: WELDOX 700 [14] .....	29
FIGUR 4.6: PRØVEOPPSETT FOR NETTOTVERRSNITT [27] .....	29
FIGUR 4.7: GEOMETRIER, BLOKKUTRIVNING SKJÆR [26] .....	30
FIGUR 4.8: FORSØKSOPPSETT, BLOKKUTRIVNING SKJÆR [26] .....	30
FIGUR 4.9: GEOMETRI S3 [26] .....	31
FIGUR 4.10: PRØVEOPPSETT FOR BLOKKUTRIVNING STREKK [26] .....	32
FIGUR 4.11: GEOMETRIER TEST FOR BLOKKUTRIVNING GRUNNET STREKK [26] .....	32
FIGUR 4.12: KRAFT-FORSKYVNINGSKURVER PRØVESERIE II [26] .....	33
FIGUR 4.13: ENDEPLATEKONFIGURASJON [27] .....	33
FIGUR 4.14: PRØVEOPPSETT FOR MOMENTBELASTET ENDEPLATE [27] .....	34
FIGUR 4.15: MOMENT-ROTASJONSKURVER [27] .....	35
FIGUR 5.1: ENDEPLATE GEOMETRIER .....	37
FIGUR 5.2: NOMINELL GEOMETRI FOR PRØVESTYKKENE MED H-PROFILER (ALLE DIMENSJONER I MM) .....	38
FIGUR 5.3: NOMINELL GEOMETRI FOR PRØVESTYKKE MED HUP-PROFILER (ALLE DIMENSJONER I MM) .....	38
FIGUR 5.4: NOMINELLE MÅL FOR ENDEPLATER (ALLE DIMENSJONER I MM) .....	40
FIGUR 6.1: NOMINELL GEOMETRI AV MATERIALPRØVE .....	43
FIGUR 6.2: MATERIALPRØVER ETTER BRUDD .....	43
FIGUR 6.3: KRAFT-FORSKYVNINGSKURVER .....	44
FIGUR 6.4: SPENNINGS-TØYNINGSKURVER, W700 .....	45
FIGUR 6.5: FLYTESPENNING MATERIALPRØVER, W700 .....	46
FIGUR 6.6: FLYTESPENNING MATERIALPRØVER S355 .....	47
FIGUR 6.7: PRØVEOPPSETT .....	48
FIGUR 6.8: RELATIV FORSKYVNING MELLOM ENDEPLATER .....	48
FIGUR 6.9: ELEMENTNETT BRUKT VED ANALYSE .....	49

FIGUR 6.10: KALIBRERING AV KAMERA VED TEST.....	49
FIGUR 6.11: PRØVE H-W700 ETTER ENDT FORSØK.....	51
FIGUR 6.12: PRØVE H-S355 ETTER ENDT FORSØK .....	52
FIGUR 6.13: PRØVE HUP-W700 ETTER ENDT FORSØK .....	53
FIGUR 6.14: FLYTEMEKANISME HUP-W700.....	54
FIGUR 6.15: KRAFT-FORSKYVNINGSKURVER FOR H-W700 OG H-S355 .....	55
FIGUR 6.16: KRAFT-FORSKYVNINGSKURVER FOR HUP-W700 OG HUP-S355 .....	56
FIGUR 6.17: KRAFT-FORSKYVNINGSKURVER FOR HUP-W700 OG HUP-S355 .....	57
FIGUR 7.1: MATERIALKURVER ENDEPLATEMATERIALER.....	60
FIGUR 7.2: MATERIALKURVER FOR PROFILER .....	61
FIGUR 7.3: MATERIALKURVER FOR BOLTENE .....	62
FIGUR 7.4: MATERIALKURVER FOR SVEISENE .....	64
FIGUR 7.5: MODELLER BRUKT I DE NUMERISKE SIMULERINGENE .....	65
FIGUR 7.6: RANDBETINGELSER FOR SIDEKANTENE I MODELLEN.....	66
FIGUR 7.7: FASTLÅSTE OMRÅDER.....	66
FIGUR 7.8: LASTPÅFØRING FOR MODELLENE MED H-PROFIL .....	67
FIGUR 7.9: C3D8R ELEMENT.....	67
FIGUR 7.10: SKJÆRLÅSING AV C3D8R ELEMENT [33] .....	67
FIGUR 7.11: ELEMENTINDELING AV ENDEPLATER .....	68
FIGUR 7.12: ELEMENTINDELING AV PROFILER.....	69
FIGUR 7.13: ELEMENTINDELING FOR SVEISER .....	70
FIGUR 7.14: ELEMENTINDELING AV BOLTER .....	70
FIGUR 7.15: NODER Plassering Brukt til Forskyvningsmåling.....	71
FIGUR 7.16: NUMERISK KRAFT-FORSKYVNINGSKURVE H-W700 .....	72
FIGUR 7.17: ANALYSERT MODELL VED MAKSIMAL STREKKRAFT, H-W700.....	72
FIGUR 7.18: SPEILET OG TILLAGD MODELL AV H-700W .....	73
FIGUR 7.19: SPENNINGSTILSTAND FOR SIMULERT H-W700 KOMPONENTER VED 609 kN.....	74
FIGUR 7.20: FLYTELINJEMØNSTER.....	74
FIGUR 7.21: NUMERISK KRAFT-FORSKYVNINGSKURVE, H-S355.....	75
FIGUR 7.22: MODELL MED MAKSIMAL STREKKRAFT, H-S355.....	75
FIGUR 7.23: SPEILET OG TILLAGD MODELL AV H-S355.....	76
FIGUR 7.24: SPENNINGSTILSTAND FOR KOMPONENTER VED H-S355 VED 502 kN .....	76
FIGUR 7.25: KRAFT-FORSKYVNINGSKURVER FOR SIMULERTE PRØVESTYKKE MED HUP-PROFILER.....	77
FIGUR 7.26: MODELL ETTER ENDT ANALYSE, HUP-W700 .....	78
FIGUR 7.27: SPEILET OG TILLAGD MODELL AV HUP-W700 .....	78
FIGUR 7.28: SPENNINGSTILSTAND FOR KOMPONENTER VED HUP-W700 VED 240 kN .....	79
FIGUR 8.1: KAPASITET AV PRØVESTYKKE MOT EC3, H-PROFILER.....	82
FIGUR 8.2: KAPASITET AV PRØVESTYKKE MOT EC3, H-PROFILER.....	83
FIGUR 8.3: FLYTELINJEMEKANISME FOR HUP-PROFILER .....	83
FIGUR 8.4: NUMERISKE KRAFT-FORSKYVNINGSKURVER MOT FORSØKSRESULTAT .....	84
FIGUR 8.5: DEFORMASJON FRA NUMERISK SIMULERING SAMMENLIGNET MOT VIRKELIG DEFORMASJON. ....	85
FIGUR 8.6: STIVHET AV PRØVESTYKKE MOT EUROKODE 3 .....	86
FIGUR 8.7: STIVHET FOR PRØVESTYKKE HUP-S355/HUP-W700 MED OG UTEN FORSPENNING .....	87
FIGUR 8.8: NUMERISK KRAFT-FORSKYVNING MOT TESTRESULTATER DE FØRSTE 3 MM .....	88



## Tabeller

TABELL 2.1: VALG AV KNOTEPUNKTMODELL [1] .....	11
TABELL 2.2: FLYTEMEKANISMER: YTRE BOLTERAD VED SIDEN AV BJELKENS STREKKFLENS [1] .....	13
TABELL 2.3: FLYTEMEKANISME: INDRE BOLTERAD VED SIDEN AV BJELKENS STREKKFLENS [1] .....	14
TABELL 4.1: NUMMERERING AV PRØVESTYKKER[14] .....	28
TABELL 4.2: EUROKODE 3/FORSØKSRESULTAT [14].....	29
TABELL 4.3: RESULTAT BLOKKUTRIVNING GRUNNET SKJÆR [26] .....	31
TABELL 4.4: FORHOLD EC3/TEST [28] .....	35
TABELL 5.1: NOMINELLE DETALJER AV PRØVEKOMPONENTER (ALLE DIMENSJONER GITT I MM) .....	39
TABELL 5.2: GEOMETRISKE PARAMETERE PÅ BAKGRUNN AV NOMINELLE MÅL .....	40
TABELL 5.3: DIMENSJONERENDE EFFEKTIVE LENGDER (ALLE LENGDER I MM) .....	41
TABELL 5.4: KARAKTERISTISKE DIMENSJONERENDE KAPASITETER (KAPASITETER GITT I KN).....	42
TABELL 5.5: ELASTISK INITIAL STIVHET BASERT PÅ NOMINELLE VERDIER .....	42
TABELL 6.1: EKSakte MÅL AV MATERIALPRØVENE (ALLE MÅL I MM).....	43
TABELL 6.2: FORSØKSRESULTATER FOR MAKSIMAL KRAFT OG INITIAL ELASTISK STIVHET .....	54
TABELL 7.1: MATERIALDATA H-PROFILER .....	60
TABELL 7.2: MATERIALDATA FOR 10.9 BOLTER .....	62
TABELL 7.3: MATERIALDATA FOR 8.8 BOLTER .....	62
TABELL 7.4: MATERIALDATA SVEIS H-S355 OG HUP-W700 .....	63
TABELL 7.5: MATERIALDATA SVEIS H-W700 .....	63
TABELL 8.1: SAMMENLIGNING MELLOM EC3 OG TESTER (FORHOLD=EC3/TEST) .....	82



## 1. Innledning

Stivhet og kapasitet til bjelke-søyle-forbindelser og søyleføtter er undersøkt i en rekke studentarbeider de siste årene ved Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU. Bakgrunnen for reglene i standarden er gjennomgått, og det er blitt utført laboratorieforsøk og numeriske simuleringer for flere knutepunksgeometrier, med sikte på å undersøke og verifisere bestemmelsene i NS-EN 1993-1-8 [1] heretter kalt knutepunksstandarden.

I en videre føring av disse arbeide skal beregningsmodellene for oppførsel til strekkbelastede endeplateskjøter undersøkes i denne rapporten. Det er valgt å legge spesielt vekt på bruk av endeplater i høyfast stål.

Boltede endeplateforbindelser er mye brukt i stålrammer som delvis og helt momentstive forbindelser og slike knutepunkt klassifiseres ofte som delvis-kontinuerlig knutepunkt [2]. NS-EN 1993-1-12 [3] tillater ikke at bestemmelsene fra knutepunksstandarden brukes for delvis-kontinuerlig knutepunkt med fastheter høyere enn S460. Det skal derfor i denne rapporten undersøkes om beregningsmodellene for oppførsel i knutepunksstandarden kan brukes også for fastheter opp til 700 MPa eller om disse modellene må modifiseres.

Rapporten er delt inn i fem deler. Det er en introduksjonsdel i kapittel 2, et litteraturstudium i kapittel 3-4, en eksperimentell del i kapittel 5-6, en numerisk analysedel i kapittel 7 og diskusjon og konklusjon i kapittel 8-9.

**Kapittel 2, Teoretisk bakgrunn:** Gir en introduksjon de beregningsmodellene som blir benyttet i rapporten. Kapitlet utfyller også den eksperimentelle og numeriske delen ved å presentere teori som det der gjøres nytte av.

**Kapittel 3, Bruk av høyfast stål i konstruksjoner:** Presentasjon av konstruksjoner der det har blitt benyttet høyfast stål. Kapitlet nevrer også fordeler som ble oppnådde ved å bruke høyfast stål kontra ordinært konstruksjonsstål.

**Kapittel 4, Tidligere arbeid:** Oppsummering av tidligere arbeid som er foretatt på knutepunkter i høyfast stål, og hvordan oppførsel var etter beregningsmodellene i knutepunksstandarden.

**Kapittel 5, Dimensjonering av prøvestykker:** Forklarer de valg som ble tatt ved dimensjoneringen av prøvestykkene med tanke på dimensjoner og fastheter. Karakteriske dimensjonerende kapasitet basert på nominelle verdier presenteres.

**Kapittel 6, Laboratorieforsøk:** Presenter de forsøkene gjort på laboratoriet. Hvordan de ble gjennomført, observasjoner og resultater.

**Kapittel 7, Numerisk analyse:** Beskriver de valg gjort ved de numeriske modellen i elementprogrammet Abaqus 6.11-1, og presenterer resultatene fra de numeriske analysene.

**Kapittel 8, Sammenligning av resultater:** De predikerte kapasitetene og stivhetene til prøvestykkene sammenlignes mot forsøksresultatene. Bruk av beregningsmodellene for oppførsel av knutepunkt og skjøter til høyfast stål diskuteres.

**Kapittel 9, Konklusjon:** Oppsummering av resultatene fra forsøkene.

**Kapittel 10, Videre arbeid:** Foreslår videre arbeid innenfor undersøkelser av høyfast stål.

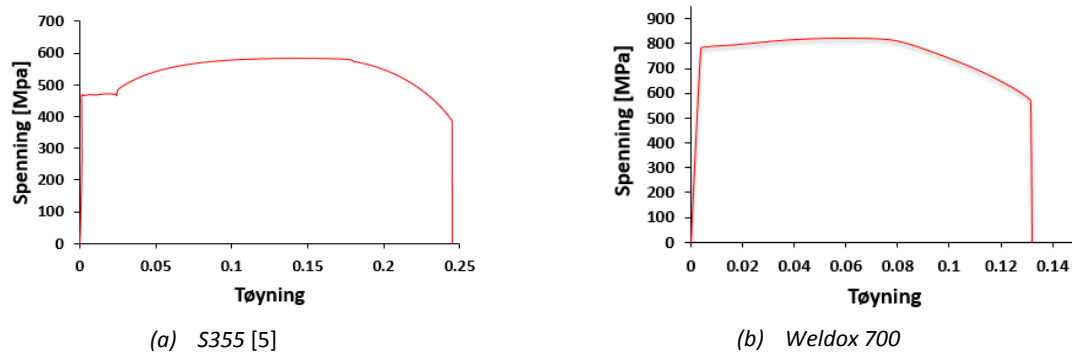
## 2. Teori

Kapitlet presenterer temaer og modeller, som det gjøres nytte av senere i rapporten. Begrepene høyfast stål, sann spenning og sann tøyning forklares og hvordan man går fra ingeniørverdier til sanne verdier. Videre presenteres flytelinjeteorien for tverrbelastede plater med de antagelser den bygger på, og hvordan knutepunkter klassifiseres i knutepunktstandarden. Det blir redegjort for beregningsreglene av endeplateskjøter med hensyn på kapasitet og stivhet etter T-stykke modellen i knutepunktstandarden. Det blir redegjort for hovedprinsippet bak Digital Image Correlation (DIC) brukt til forskyvningsmåling under laboratorieforsøkene gjennom programmet eCoor v2.0.

### 2.1 Høyfast stål

I konstruksjonssammenheng blir høyfast stål brukt om fastheter med flytespenning større eller lik 420 MPa, og man kan i dag få kjøpt stål med fastheter helt opp til 1300 MPa [4].

Høyfast stål mangler ofte det helt veldefinerte flyteplataet man finner på spenning-tøyningskurven for S355 vist i figur 2.1. En tilnærming for fastsettelse av flytespenningen er å velge  $f_{0,2}$  til flytespenning, som er den spenningen som tilsvarer en varig tøyning på 0,2 %.



Figur 2.1: Spennings-tøyningskurver

En utfordring med bruk av høyfast stål i plastisk analyse er å tilfredsstille kravene gitt til stål i NS-EN 1993-1-12 [3]:

- $f_u/f_y \geq 1,05$ ;  $f_u$  og  $f_y$  henholdsvis maksimal ingeniør spenning og flytespenning
- Forlengelse ved brudd skal ikke være mindre enn 10 %;
- $\varepsilon_u \geq 15\varepsilon_y$   $\varepsilon_u$  og  $\varepsilon_y$  henholdsvis maksimal ingeniørtøyning og ingeniørtøyning ved flytning.

Trykkpåkjennte konstruksjonsdeler i høyfast stål kan ikke utnyttes i like stor grad som ordinært konstruksjonsstål. Dette kommer av at grensene for tverrsnittklassene og den relative slankheten  $\bar{\lambda}$  påvirkes av  $\varepsilon$  [6].

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} \quad (2.1)$$

For at en tverrsnittsdeler skal kunne klassifiseres i en klasse er man avhengig av at forholdet i ligning (2.2) oppfylles.

$$c/t \leq k\varepsilon \quad (2.2)$$

Der  $c$  er bredden eller høyden på en tverrsnittdel og  $t$  er tykkelsen. Koeffisienten  $k$  brukt her inngår ikke i ligningen fra NS-EN 1993-1-1 [6], men er brukt for å illustrere at  $\varepsilon$  multipliseres med en faktor avhengig av belastningssituasjon og tverrsnittklassegrense, og disse faktoren er gitt i NS-EN 1993-1-1 [6]. Fra forholdet ser man at grensen for en tverrsnittsklasse vil synke med økt fasthet. En tverrsnittsdelt i trykk vil dermed komme nærmere knekkspenningen, som vil si at det knekker før dimensjonerende plastisk momentkapasitet er utviklet.

For trykkstaver øker den relative slankheten  $\bar{\lambda}$  med økt fasthet. Dette kommer fram ved ligningene (2.3)-(2.5) [6].

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93.9\varepsilon \quad (2.3)$$

For tverrsnittsklasse 1-3:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\lambda_1} \quad (2.4)$$

Tverrsnittsklasse 4:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}} \frac{1}{\lambda_1} \quad (2.5)$$

Her ser man at med økt fasthet vil slankhetsverdien  $\lambda_1$  minke, og den relative slankheten  $\bar{\lambda}$  vil øke. Figur 6.4 i NS-EN 1993-1-1 [6] viser at ved økt relativ slankhet  $\bar{\lambda}$  vil en reduksjonsfaktoren  $\chi$  minke. Denne faktoren inngår i uttrykkene for dimensjonerende kapasitet for bøyekneking ligning (2.6) og (2.7), og man ser at en lavere reduksjonsfaktor vil redusere den dimensjonerende kapasiteten [6]. Man oppnår dermed at en trykkstav i høyfast stål ikke kan utnyttes like stor grad som en i ordinært konstruksjonsstål.

Tverrsnittsklasse 1-3:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \quad (2.6)$$

Tverrsnittsklasse 4:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \quad (2.7)$$

Ved lik utnyttelse av høyfast stål og ordinært konstruksjonsstål vil nedbøyningene være størst for høyfast stål. Dette fordi bøyestivheten ikke øker med fastheten, men kun er avhengig av  $EI$ .

## 2.2 Sann spenning og sann tøyning

Sann spenning og sann tøyning blir brukt ved spennings-tøynings relasjoner for store deformasjoner. Ingeniør spenning og tøyning beregnes på bakgrunn av opprinnelig lengde og tverrsnitt, som måles før deformasjon starter. Arealet til et materiale endres når det tøyes, og en spennings-tøynings relasjon basert på ingeniørverdier vil ikke lengre beskrive den virkelige oppførselen til materialet. En mer korrekt beskrivelse av spenning og tøyning får man ved bruk av sann tøyning  $\varepsilon_l$  og sann spenning  $\sigma_t$  [7].

$$\varepsilon_l = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (2.8)$$

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (2.9)$$

Der  $A$  er det deformerte tverrsnittsarealet, og  $L$  er den virkelige lengden av prøven. For metaller er den elastiske tøyningen liten, og man antar at volumet forblir konstant ved plastisk deformasjon som vist i ligning (2.10) [7]. Der  $A_0$  og  $L_0$  er opprinnelig tverrsnitt og lengde.

$$A_0 L_0 = AL \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_l = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{A_0}{A} \quad (2.11)$$

Sann tøyning ofte blir referert til som logaritmisk tøyning. Sammenhengen mellom ingeniør tøyning  $\varepsilon_e$  og logaritmisk tøyning  $\varepsilon_l$  er gitt ved [7]:

$$\varepsilon_l = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \left( \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \right) = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (2.12)$$

Under en materialtest måles kraft og tilhørende forskyvning med en gitt frekvens. Dersom  $L_0$  og  $A_0$  er kjent kan man beregne ingeniør spenningene og tøyningene. Ved å kombinere ligning (2.9), (2.11) og (2.12) får man sann spenning som en funksjon av ingeniør spenning og tøyning.

$$\sigma_t = \sigma_e \exp(\varepsilon_l) = \sigma_e(1 + \varepsilon_e) \quad (2.13)$$

Antagelsen om sann spenning og sann tøyning har bare gyldighet fram til diffus innsnevring, som er at arealet endrer seg raskere enn materialet hardner i det innsnevrede området. Dette starter på toppen av  $\sigma$ - $\varepsilon$  kurven basert på ingeniørverdier, og markerer dermed slutten på det gyldige området for sann spenning og sann tøyning i en materialtest [7].

## 2.3 Flytelinjeteori

Ved elastisk dimensjonering tillates vanligvis materialet å flyte i det mest påkjente punktet, det vil si  $\sigma = f_y$  i dette punktet. Denne kapasiteten representerer nødvendigvis ikke den maksimale kapasiteten til konstruksjon, som er den påkjeningen konstruksjon tåler før den bryter sammen. Denne kapasiteten finner man ved plastisk analyse [8].

For tverrbelastede plater bruker man flytelinjeteorien til å beregne den plastiske kapasiteten. Den ble opprinnelig utviklet for beregning av bruddlast til armerte betongplater av K. V. Johansen, og er en generalisering av flyteleddmetoden brukt for bruddlastberegninger av bjelker og rammer. Der det antas at all plastisk deformasjon er lokalisert til et bestemt antall plastiske ledd, og at resten av konstruksjonen forblir elastisk og udeformert under en virtuell forskyvning. For flytelinjer antas

tilsvarende at all plastisk deformasjon er lokalisert til et bestemt antall flytelinjer, som til sammen danner en kinematisk mekanisme i platen. Samtidig som resten av platen forblir elastisk og udeformert [8].

Både flyteledd- og flytelinjemetoden bygger på plastisitetsteoriens øvre grenseteorem, som sier:

*«En valgt (antatt) kinematisk mulig mekanisme vil ved arbeidsbetraktning, hvor det ytre arbeidet settes lik det indre arbeid, gi en kapasitet som er større eller lik den korrekte verdi»*

Flytelinjebetraktninger vil dermed gi en ikke-konservativ løsning med mindre man har valgt den korrekte mekanismen.

Det antas også at platens deformasjoner er så små at virkningene av membrankreftene  $N_x$ ,  $N_y$  og  $N_{xy}$  kan neglisjeres ved beregning av plastiske arbeidet [8].

### 2.3.1 Kinematiske mekanismer

Bruddmekanisme for plater dannes ved flytelinjer mellom tilstøtende platesegmenter. Der flytelinjene kan dannes av faste eller relative dreieakser. Platesegmentene mellom flytelinjene forblir plane og udeformerte [8].

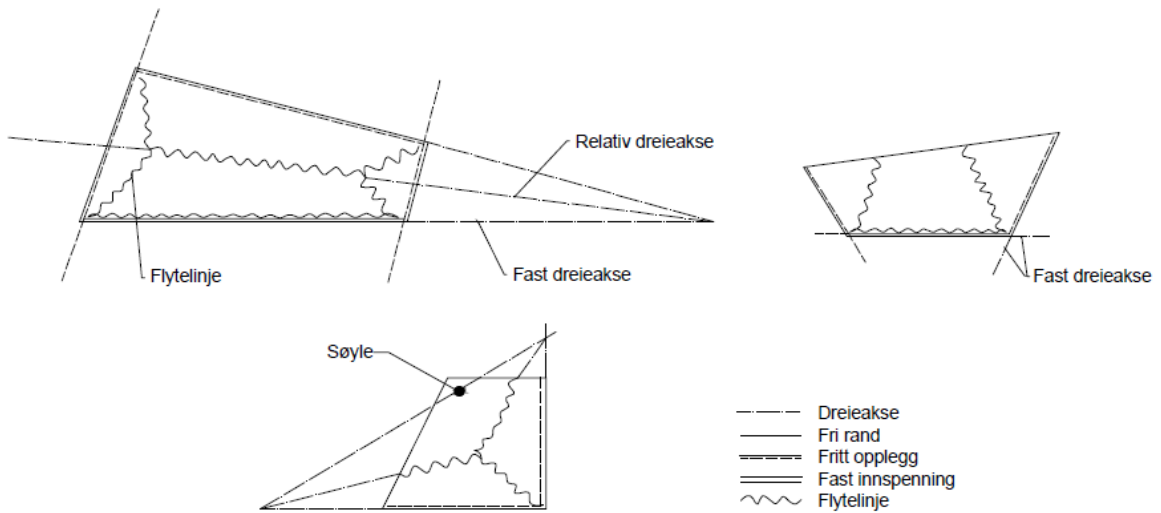
**Faste dreieakser:** Er en dreieakse som faller sammen med platens opplegg, enten i form av en understøttet sidekant eller punktopplegg på søyler.

**Relativ dreieakse:** Er en dreieakse som tillater to platesegmenter å rotere relativt til hverandre.

Figur 2.2 under viser hvordan faste og relative dreieakser dannes ved ulike opplagerbetingelse for plater. Ut fra figur 2.2 kan man sette opp følgende retningslinjer for dannelse faste og relative dreieakser [8]:

- En rett opplagsrand som er fast innspent gir en fast dreieakse
- En relativ dreieakse, vil si en flytelinje mellom to platesegmenter, og går ut fra skjæringspunktet mellom to fast dreieakser.
- En relativ dreieakse kan ikke gå inn mot en fast dreieakse
- En relativ dreieakse kan gå mot en fri rand
- Over punktopplegg legger man faste dreieakser





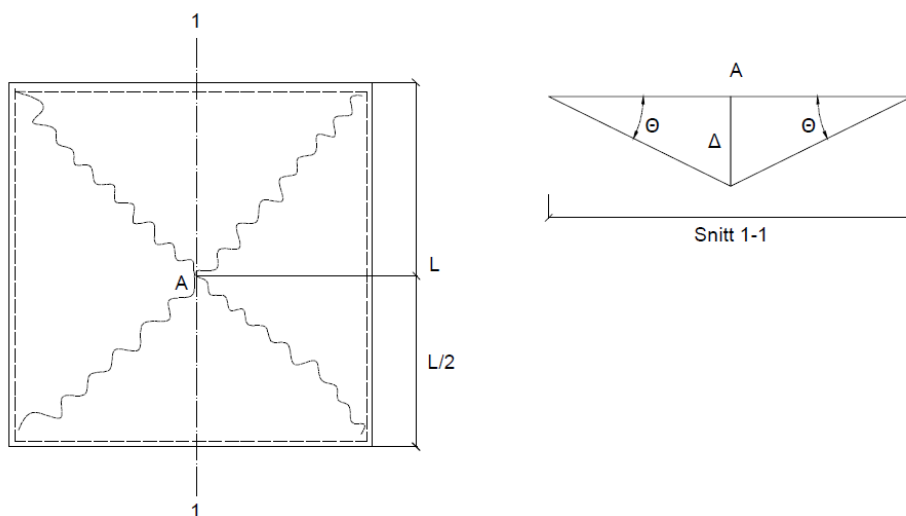
Figur 2.2: Faste og relative dreieakser

### 2.3.2 Kapasitet av tverrbelastede palter

Det plastiske arbeidet  $W_p$  i en flytelinje er avhengig av platens flytemoment per lengdeenhet  $m_p$ , rotasjon  $\Theta$  og lengden  $L$ .

$$W_p = m_p \theta L \tag{2.14}$$

$$m_p = f_y t^2 / 4 \tag{2.15}$$



Figur 2.3: Bruddmekanisme for kvadratisk plate

For platen illustrert i figur 2.3 får man det totale plastiske arbeidet  $W_p$  lik:

$$W_p = m_p L \frac{2\Delta}{L} 4 = 8m_p \Delta \quad (2.16)$$

Det ytre arbeidet  $W_y$  utført av punktlast og fordelt last:

Punktlast: 
$$W_y = P\Delta \quad (2.17)$$

Fordelt last: 
$$W_y = qV = \frac{1}{3}L^2\Delta \quad (2.18)$$

Der  $V$  er volumet av en pyramide avgrenset av platens opprinnelige mål.

Platens kapasitet for en punktlast eller fordelt last finnes så ved å sette det indre arbeidet lik det ytre arbeidet utført av lasten.

Kapasitet punktlast: 
$$P = 8m_p \quad (2.19)$$

Kapasitet fordelt last: 
$$q = 24 \frac{m_p}{L^2} \quad (2.20)$$

### 2.3.3 Flytekriterium for plater

Von Mises kriteriet for begynnende flytning i platen kan ved å neglisjere membrankreftene  $N_x$ ,  $N_y$  og  $N_{xy}$  og skjærkreftene  $Q_x$  og  $Q_y$  uttrykkes [8]:

$$M_x^2 + M_y^2 + 3M_x M_y = m_y^2 \quad (2.21)$$

Der  $m_y$  er momentet per lengdeenhet som gir begynnende flytning i platen. På samme måte kan man uttrykke kriteriet for full plastifisering over tykkelsen uttrykkes [8]:

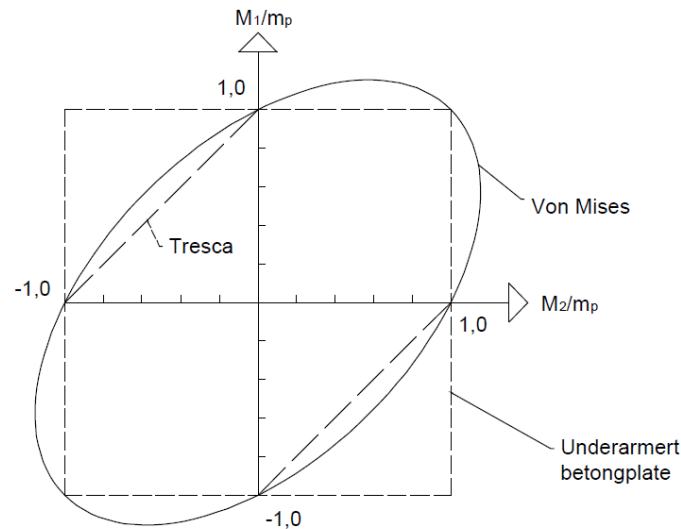
$$M_x^2 + M_y^2 + 3M_x M_y = m_p^2 \quad (2.22)$$

Ved å transformere platens momenter i X- og Y-retning over til hovedmoment  $M_1$  og  $M_2$ , kan platens flytekriterium uttrykkes [8]:

$$M_1^2 + M_2^2 - M_1 M_2 = m_p^2 \quad (2.23)$$

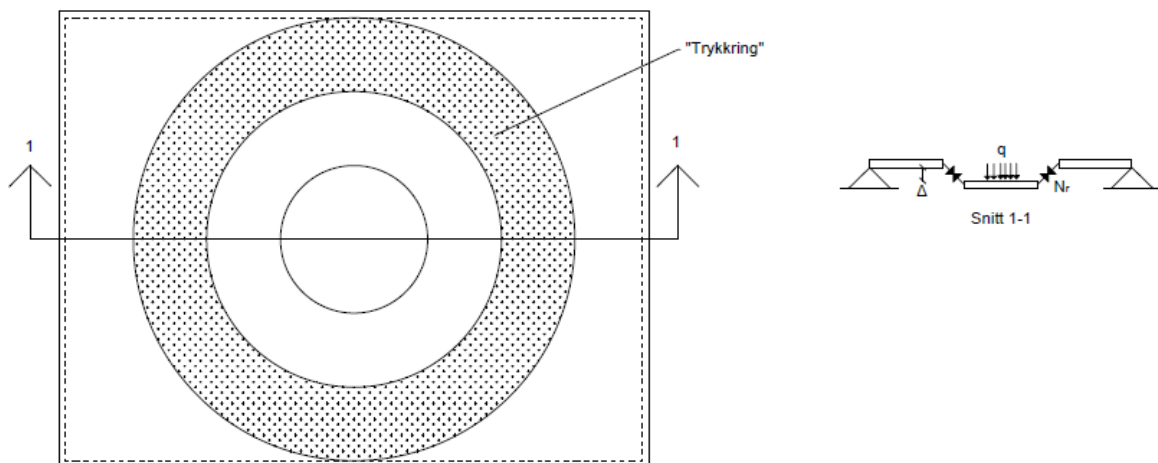
Flytelinjeteorien ble som nevnt tidligere i delkapitlet først utviklet for armerte betongplater. Dersom en betongplate er underarmert i begge retningene, vil det si armeringen flyte i strekk før betongen knuses i trykk, er den plastiske momentkapasiteten i platens to retninger er uavhengig av hverandre. Det innebærer at man kan anta at det plastiske momentet i flytelinjen er uavhengig av størrelsen på momentet normalt på flytelinjen [8].

For stålplater er flytekriteriet illustrert i figur 2.4 med von Mises ellipse. Dersom momentene parallelt med og normalt på flytelinjen har ulike fortegn, 2 og 4 kvadrant, gjelder ikke antagelsen om at plastisk moment er uavhengig av størrelsen på momentet normalt på flytelinjen. Bruk av  $m_p$  vil da gi et ikke-konservativt resultat ved plastisk kapasitetsberegning. Grunnen til at flytelinjemetoden likevel benyttes er at metoden neglisjerer fastningen i stålet og virkningen av membrankreftene i lastbæringen [8].



Figur 2.4: Flytekriterium for plater

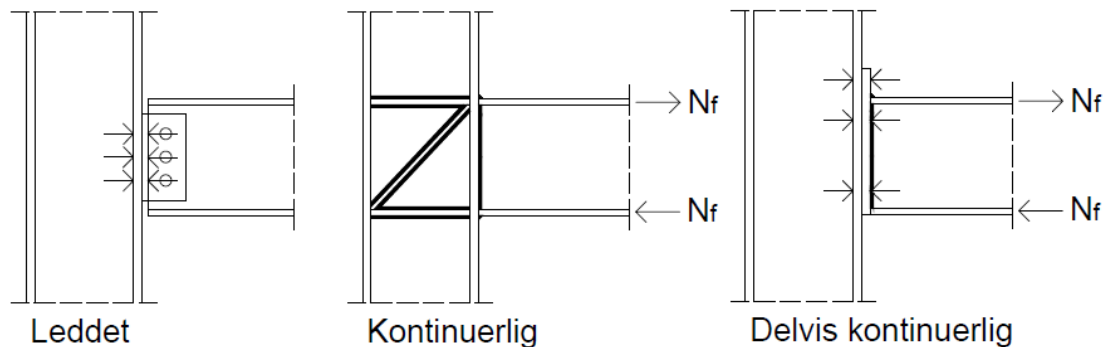
Virkningene av membrankreftene er illustrert i figur 2.5, der en fritt opplagt plate er belastet med en fordelt belastning i senter av platen. Ved kantene av platen er membrankreftene fraværende. Etter hvert som deformasjon i platen øker oppstår det et likevektsystem bestående av en trykkring langs platens ytterkant og en indre sone med radielle strekkrefter  $N_r$ . De radielle strekkreftene  $N_r$  kan ved brudd gi et betydelig bidrag til lastbæringen [8].



Figur 2.5: Likevektsystem for membrankrefter

## 2.4 Klassifisering av knutepunkt

Knutepunkt kan grupperes etter deres strukturelle egenskaper. Det skilles mellom tre typer knutepunkter i bygningskonstruksjoner leddet, bøyingsstivt (kontinuerlig) og delvis bøyingsstivt (delvis kontinuerlig), og de tre typene er illustrert i figur 2.6. Ved å prosjektere knutepunkt som delvis kontinuerlige kan man oppnå enklere og mer økonomiske konstruksjoner [2]. Det er imidlertid bare tillatt å bruke denne måten å prosjektere knutepunkter på i stålrammer gitt at det kan utvikles tilstrekkelig rotasjonskapasitet, som gjør at det vil oppstå brudd i konstruksjon før det dannes brudd i knutepunktet [2].



Figur 2.6: Konstruktiv utførelse og grad av momentstivhet

Knutepunktsstandard klassifiserer knutepunkter etter styrke (full styrke, delvis styrke eller nominelt leddet) og stivhet (bøyingsstivt, delvis bøyingsstivt eller nominelt leddet).

Ved styrke klassifisering vil full styrke i knutepunktet si at det har en dimensjonerende kapasitet som ikke er mindre enn de stavene som møttes i knutepunktet [1]. Et nominelt leddet knutepunkt bør ved styrke klassifisering kunne overføre lastvirkningene uten at det oppstår momenter av betydning, som kan virke ugunstig for de innfestede stavene eller på konstruksjonen som helhet [1]. Et knutepunkt klassifisert som et med delvis styrke tilfredstiller verken kravene til full styrke eller som nominelt leddet knutepunkt. Grensene for klassifisering er gitt i knutepunktsstandard [1].

Et knutepunkt klassifisert som bøyingsstivt, kan forutsettes å ha tilstrekkelig rotasjonsstivhet til at det man kan forutsette full kontinuitet ved forskyvningene [1]. De samme kravene gjelder for nominelt leddet knutepunkt klassifisert etter stivhet som for styrke. Et delvis bøyingsstivt knutepunkt oppfyller ikke kriteriene knutepunktstandard setter til et bøyingsstivt eller nominelt leddet knutepunkt [1]. De ulike grenseverdier for klassifisering ved stivhet er gitt i knutepunktsstandard.

Om et knutepunkt skal klassifiseres etter styrke, stivhet eller begge avgjøres av valgt global analysemetode. Knutepunktsstandard tillater at de globale lastvirkningene bestemmes ved elastisk, stiv-plastisk eller elastisk plastisk analyse. Ved elastisk analyse bør knutepunktene klassifiseres etter stivhet, og ved stiv-plastisk analyse bør styrke brukes som klassifiseringsmetode av knutepunktene. Mens knutepunktene ved elastisk-plastisk analyse bør klassifiseres etter både stivhet og styrke.

Tabell 2.1 viser at ved valgt global analysemetode og kjent klassifisering er knutepunktmodellen kjent.

Tabell 2.1: Valg av knutepunktmodell [1]

Global analysemetode		Klassifisering av knutepunkt	
Elastisk	Nominelt leddet	Bøyingsstivt	Delvis bøyingsstivt
Stiv-plastisk	Nominelt leddet	Full styrke	Delvis styrke
			Delvis bøyingsstivt og delvis styrke
Elastisk-plastisk	Nominelt leddet	Bøyingsstivt og full styrke	Delvis bøyingsstivt og full styrke
			Bøyingsstivt og full styrke
<b>Knutepunktmodell</b>	Leddets	Kontinuerlig	Delvis kontinuerlig

## 2.5 Kapasitet og Stivhet

Stivhet og styrke for knutepunkter med H- eller I-profil bestemmes i knutepunktsstandardene ved hjelp av komponentmetoden. Denne metoden er ikke direkte anvendbar på hulprofiler.

Komponentmetoden går ut på at man bryter knutepunktet ned i et bestemt antall basiskomponenter, og 20 ulike komponenter vist i knutepunktsstandardene danner grunnlaget for analysen. Basiskomponentene består av reelle komponenter som skruer, sveiser og lasker, men også spesielle belastningssituasjoner som søylesteg påkjent av strekk/trykk, endeplater påkjent av bøyning og stegpaneler påkjent av skjærkrefter [8]. Det er videre bare valgt å se på basiskomponentene som er relevante for denne rapporten.

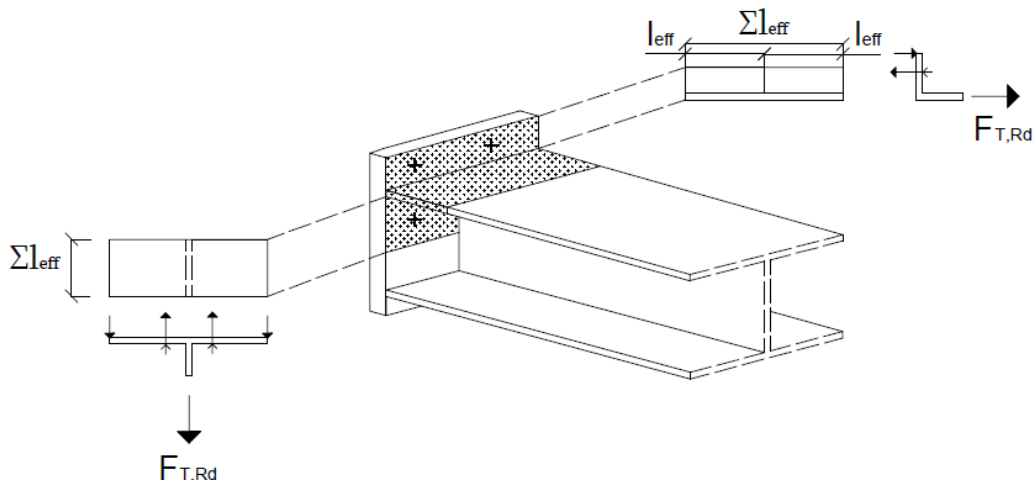
### 2.5.1 T-stykke

Plater påkjent av en tverrkraft forekommer i en rekke konstruksjonsdetaljer. For bolteforbindelser kan man modellere følgende basiskomponenter påkjent av strekk som et ekvivalent T-stykke [1]:

- Søyleflens påkjent av bøyning;
- Endeplate påkjent av bøyning;
- Vinkelbein påkjent av bøyning;
- Fotplate påkjent av bøyning fra strekk.

Denne rapporten omhandler strekkbelastede endeplateskjøter. Endeplatene vil være momentpåkjennte grunnet tverrkraften fra boltene, og dimensjoneres derfor som et ekvivalent T-stykke. Dersom platen kan oppnå full flytning vil kapasiteten være bestemt av flytemekanismen som dannes. Det vil være en tidkrevende prosess å sjekke alle mulige flytemekanismer, og knutepunktsstandardene modellerer derfor plater og steg som et strekkbelastet ekvivalent T-stykke. Ulike plasseringer av bolterader i forhold til bjelkens strekkflens tilnærmes med forskjellige ekvivalente T-stykker som indikert i figur 2.7. Der man gir det en effektiv lengde  $\Sigma l_{eff}$  slik at kapasiteten bestemtes av den svakeste flytemekanismen.

Den effektive lengden er en teoretisk lengde, og representerer nødvendigvis ikke den fysiske lengden til basiskomponentene i knutepunktet. Ekvivalente T-stykker med tilhørende effektive lengder er illustrert for skruerader over bolterader over og under bjelkens strekkflens i figur 2.7.



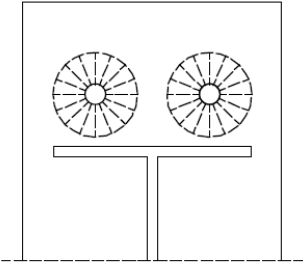
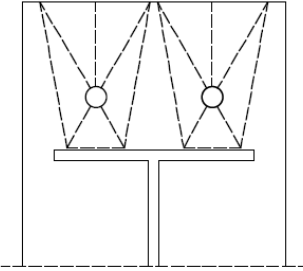
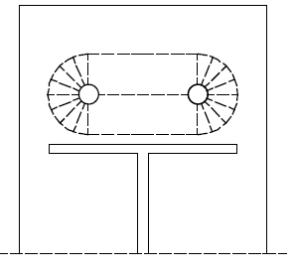
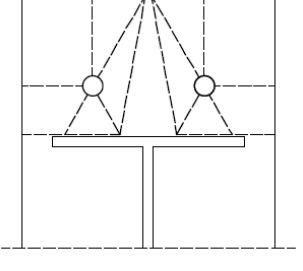
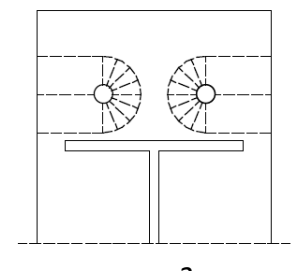
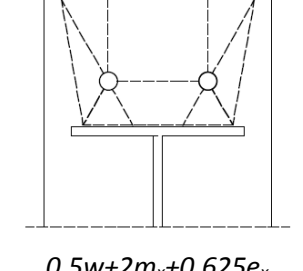
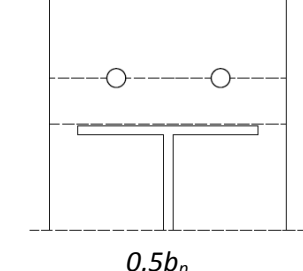
Figur 2.7: Effektive lengder for T-stykke

Knutepunktstandarden kategoriserer bolterader ved endeplate inn etter deres plassering i forhold til bjelkens strekkflens [1].

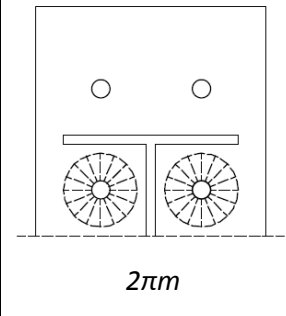
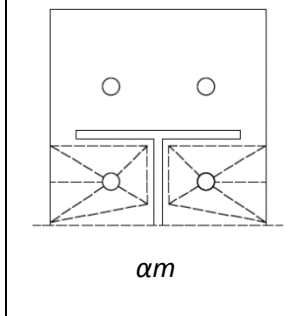
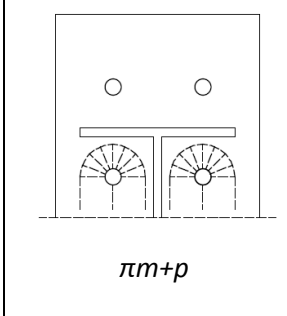
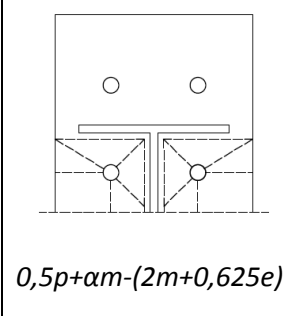
- Ytre bolterad ved siden av bjelkens strekkflens;
- Indre bolterad ved siden av bjelkens strekkflens;
- Øvrige indre bolterader;
- Øvrige ytre bolterader;

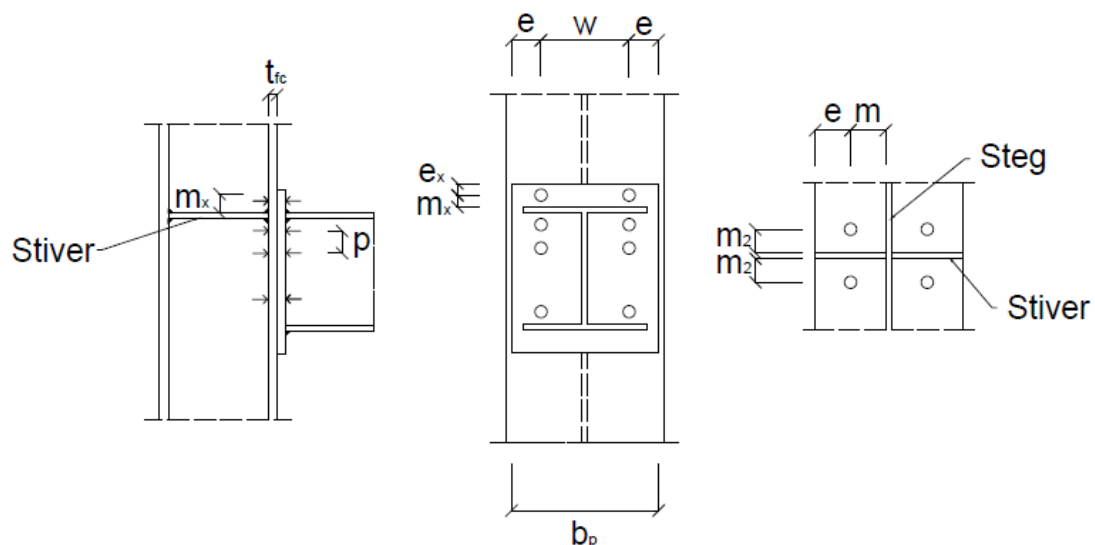
Endeplateskjøtene som ble undersøkt i laboratoriet hadde H- eller HUP- profiler med fire bolter. Aktuelle bolterader å betrakte var ytre bolterad ved siden av bjelkens strekkflens og indre bolterad ved siden av bjelkens strekkflens. Formlene for å beregne de effektive lengdene og tilhørende flytemekanismer er vist i tabell 2.2 og 2.3 for de to typer av skruerader. Flytemekanismene deles inn i sirkulære mønster og ikke-sirkulære mønster og om man betrakter en bolterad som en enkeltstående rad eller som del av en gruppe av bolterader. De ulike geometriske parameterne i tabell 2.2 og 2.3 er forklart ved figur 2.8. Den geometriske parameteren  $\alpha$  bestemmes etter metode i knutepunktstandarden og er avhengig av avstandene  $e$ ,  $m$  og  $m_2$ .

Tabell 2.2: Flytemekanismer: Ytre bolterad ved siden av bjelkens strekkflens [1]

<i>Bolterad betraktet som en enkeltstående rad</i>	
<i>Sirkulært mønster <math>l_{eff,cp}</math></i>	<i>Ikke-sirkulært mønster <math>l_{eff,nc}</math></i>
<i>Minst av</i>	<i>Minst av</i>
 <p style="text-align: center;"><math>2\pi m_x</math></p>	 <p style="text-align: center;"><math>4m_x + 1,25e_x</math></p>
 <p style="text-align: center;"><math>\pi m_x + w</math></p>	 <p style="text-align: center;"><math>e + 2m_x + 0,625e_x</math></p>
 <p style="text-align: center;"><math>\pi m_x + 2e</math></p>	 <p style="text-align: center;"><math>0,5w + 2m_x + 0,625e_x</math></p>
 <p style="text-align: center;"><math>0,5b_p</math></p>	
$l_{eff,1} = l_{eff,nc}$ men $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$	
$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$	

Tabell 2.3: Flytemekanisme: Indre bolterad ved siden av bjelkens strekkflens [1]

Bolterad betraktet som en enkeltstående rad		Bolterad betraktet som del av en gruppe av skruerader	
Sirkulært mønster $l_{eff,cp}$	Ikke-sirkulært mønster $l_{eff,nc}$	Sirkulært mønster $l_{eff,cp}$	Ikke-sirkulært mønster $l_{eff,nc}$
 $2\pi m$	 $\alpha m$	 $\pi m + p$	 $0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e)$
$l_{eff,1} = l_{eff,nc}$ men $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$		$\Sigma l_{eff,1} = \Sigma l_{eff,nc}$ men $\Sigma l_{eff,1} \leq \Sigma l_{eff,cp}$	
$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$		$\Sigma l_{eff,2} = \Sigma l_{eff,nc}$	



Figur 2.8: Definisjon av ende- og kantavstander for endeplate

### 2.5.2 kapasitet

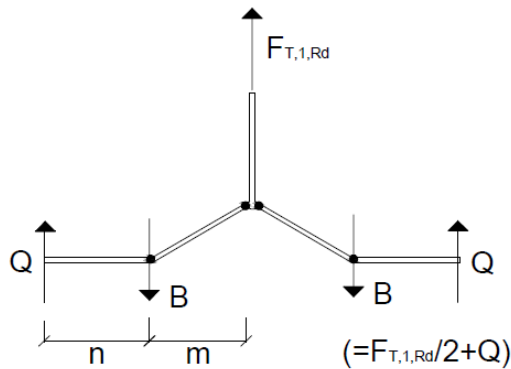
Et ekvivalent T-stykke kan ha tre mulige bruddformer. De mulige bruddformene forklares her bare kort. Da de er viet mye plass i tidligere studentarbeid av Ersland [9]. De effektive lengdene  $\Sigma l_{eff,1}$  og  $\Sigma l_{eff,2}$  fra tabell 2.2 og 2.3 er effektiv lengder som brukes i beregningene av momentkapasitetene til flensene i det ekvivalente T-stykket. Momentkapasitetene brukes til å beregne strekkapasitet for to av bruddformene.

$$M_{pl,1-2,Rd} = 0,25 \Sigma l_{eff,1-2} t_f^2 f_y / \gamma_{M0} \tag{2.24}$$



### Bruddform 1

Denne bruddformen vil oppstå når boltene har stor kapasitet sammenlignet med flensene. Det ekvivalente T-stykke vil danne flyteledd både ved flens og bolt på hver side av steget, som vist i figur 2.9. Der  $Q$  og  $B$  er henholdsvis hevearmkraft og boltekraft ved full flytning i flensen. Strekkapasiteten for bruddform 1 er gitt ved [1]:



Figur 2.9: Bruddform 1

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} \quad (2.25)$$

For bruddform 1 gir knutepunktsstandarden også en alternativ metode for å beregne strekkapasiteten lik:

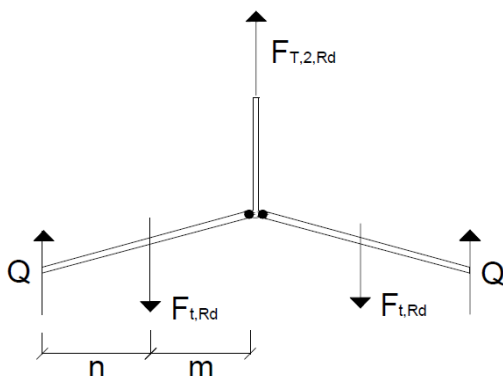
$$F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{pl,1,Rd}}{2mn - e_w(m+n)} \quad (2.26)$$

Denne alternative metoden forutsetter at boltekraften som virker på T-stykkets flens er jevnt fordelt under skiven, og at det ikke oppstår en konsentrert kraft i senterlinjen av boltene. Disse forutsetningene fører til en høyere bæreevne for bruddform 1 [1].

Strekkapasitetene fra ligning (2.25) og (2.26) gjelder for bruddform 1 uten bakplate, og knutepunktsstandarden gir også formler for å beregne strekkapasiteten med bakplate, men er ikke tatt med her da det ikke ble benyttet ved laboratorieforsøkene.

### Bruddform 2

Ved denne bruddformen finner boltebrudd og sammenfallende flytning i flensen sted, som illustrert i figur 2.10. Strekkapasiteten ved bruddform 2 er gitt ved [1]:



Figur 2.10: Bruddform 2

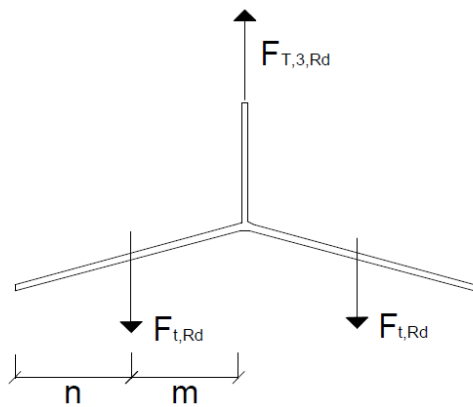
$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m+n} \quad (2.27)$$

Der

$F_{t,Rd}$  er boltens strekkapasitet og  
 $n = e_{min}$  men  $n \leq 1,25 m$  [1].

### Bruddform 3

Her oppstår brudd i boltene før det oppstår flytning i flensene til det ekvivalente T-stykke, som illustrert i figur 2.11. Bruddformen dannes når flensene er sterke sammenlignet med boltene, og strekkapasiteten til bruddform 3 vil være bestemt av kapasiteten boltene gitt ved:



Figur 2.11: Bruddform 3

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} \quad (2.28)$$

### Ingen hevearmkrefter

Dersom det ikke kan oppstå hevearmkraft  $Q$  i det ekvivalente T-stykke for bruddform 1 og 2 vil disse ha samme strekkapasitet, fordi det da ikke vil dannes flyteledd ved boltene. Strekkapasiteten er dermed gitt ved [1]:

$$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd}}{m} \quad (2.29)$$

#### 2.5.3 Stivhet

Deformasjon i et knutepunkt vil være avhengig av knutepunktets stivhet, som bestemmes på bakgrunn av fleksibilitetene til basiskomponentene. Knutepunktstandard bruker en fjærmodell for å simulere interaksjon mellom basiskomponentene i en knutepunktdeformasjon. Der fjærer kan kombineres i serier eller i parallell avhengig av hvordan de påvirker hverandre. Fjærer kombinert i serie belastes med samme kraft, mens fjærer i parallell gjennomgår den samme deformasjon. Figur 2.12 viser et eksempel på hvordan en fjærmodell for et knutepunkt blir ut fra komponentmetoden brukt i knutepunktstandard. Der første og andre indeks på stivhetskoeffisienten  $k$  angir henholdsvis basiskomponent og bolterad. Modellen viser at fjærene i trykk er lokalisert ved trykkflensen, mens fjærene i strekk er lokalisert ved tilhørende bolterader [9]. Sammenhengen mellom initialstivhet  $k$  og initial rotasjonsstivhet  $S_{j,ini}$  er vist ved ligningene (2.30)-(2.33), der  $\delta_i$  og  $k_i$  er deformasjon og stivhet av fjær  $i$ .

$$F_i = Ek_i\delta_i \quad (2.30)$$

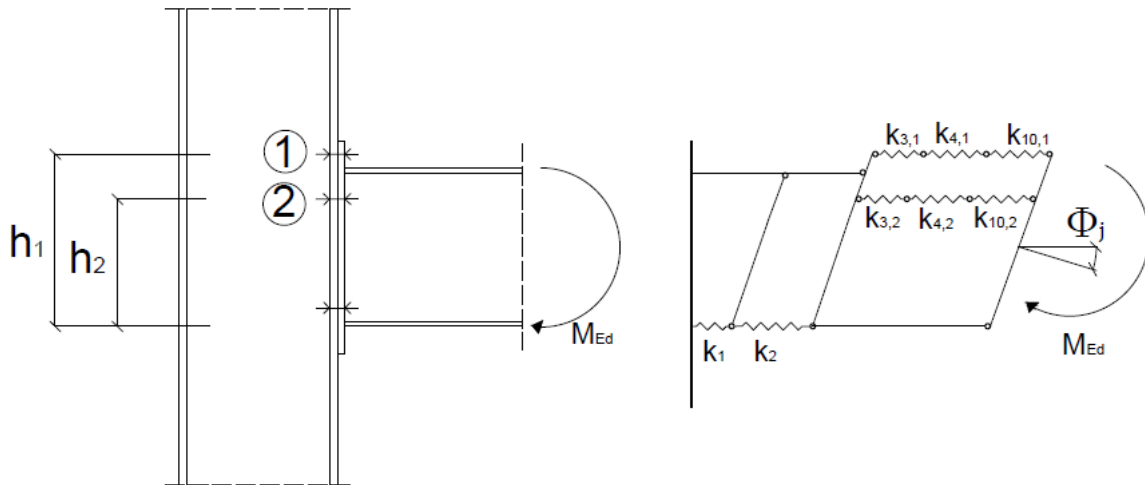
$$\delta_i = \frac{F}{Ek_i} \quad (2.31)$$

Rotasjon  $\phi_j$  i knutepunktet er gitt ved:

$$\phi_j = \frac{\sum \delta_i}{z} \quad (2.32)$$

Dette gir formelen knutepunktsstandarden bruker for initial rotasjonsstivhet:

$$S_{j,ini} = \frac{M_j}{\phi_j} = \frac{Fz}{\sum_i \delta_i / z} = \frac{Fz^2}{\frac{F}{E} \sum_i \frac{1}{k_i}} = \frac{EZ^2}{\sum_i \frac{1}{k_i}} \quad (2.33)$$

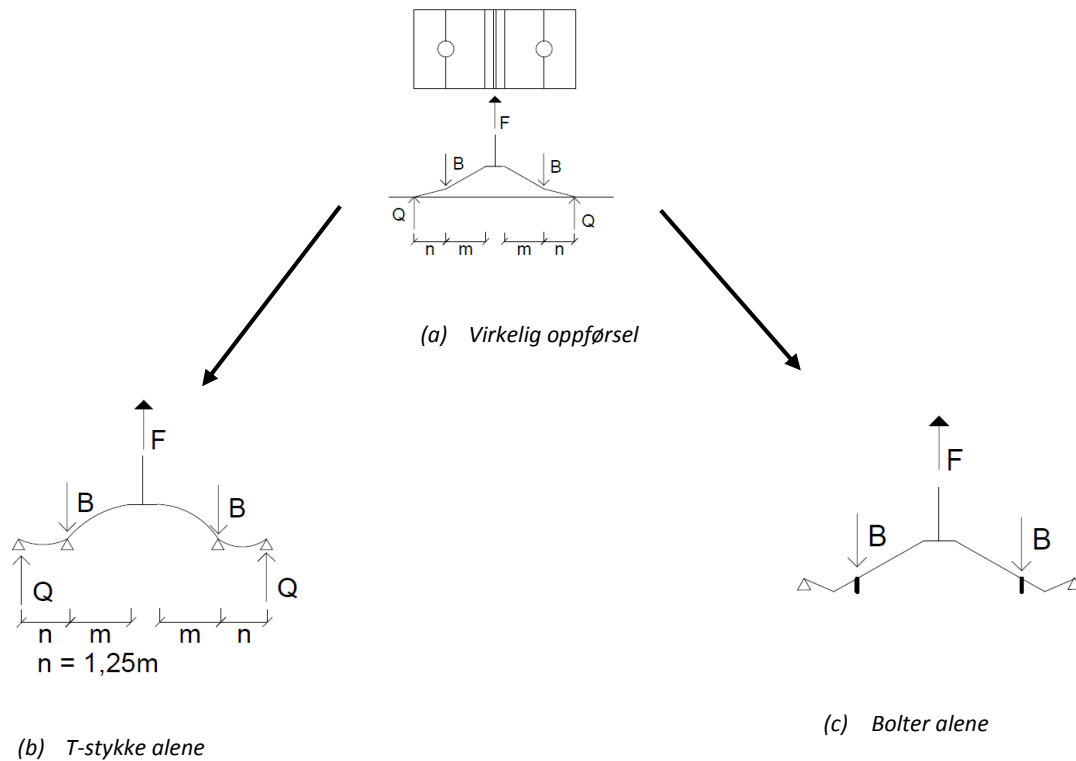


Figur 2.12: Fjærmodell for bjelke-søyle forbindelse

### T-Stykke stivhet

Stivheten til de strekkbelastede endeplateskjøtene undersøkt i denne rapporten ble beregnet ut fra de stivheten til de ekvivalente T-stykkene i forbindelsene, som bestemmes av stivhetskoeffisientene til basiskomponentene endeplate påkjent av bøyning og bolter påkjent av strekk. Stivhetsmodellen brukt for å utlede de to stivhetskoeffisientene for ekvivalent T-stykke ble utviklet av Weynand, Jaspert & Steenhuis [10], og modellen bygger på to antagelser:

- Distansen  $n$  antatt lik  $1,25m$ ,  $n$  og  $m$  er vist i figur 2.13
- boltedeformasjon kan adskilles fra T-stykke deformasjon alene, figur 2.13 (b) og (c).



Figur 2.13: Elastisk deformasjon av T-stykke

Ved å bruke antagelsene som illustrert i figur 2.13 fikk Weynand, Jaspert & Steenhuis [10] følgende uttrykk for initial stivhetskoeffisientene:

$$k_{flens} = \frac{l_{eff,ini} t^3}{m^3} \quad (2.34)$$

$$k_{bolte} = 1,6 \frac{A_s}{L_b} \quad (2.35)$$

Ved utledningen av uttrykket i ligning (2.35) ble det antatt at boltekraften  $B$  økte fra  $0,5F$  til  $0,63F$  grunnet hevearmkraften. Weynand, Jaspert & Steenhuis [10] antok en hevearmkraft lik  $0,13F$ , og utledningen av denne hevearmkraften er vist i tidligere studentarbeid av Erslund [11].

Ved bruk av enhetslastmetoden på den ene flensen kan man finne et uttrykk for forskyvningen av flensen ved bolten. Denne utledningen er vist i studentarbeid av Karlsen 2011 [12], og gav følgende uttrykk for forskyvningen:

$$\Delta = \frac{1011}{12800} \frac{Fm^3}{EI} \quad (2.36)$$

Ved å kombinere uttrykkene i (2.34) og (2.36) får man kraften lik:

$$F = 1,055 \frac{l_{eff,ini} t^3}{m^3} E \Delta \quad (2.37)$$

I uttrykk (2.37) inngår  $l_{eff,ini}$  som er en initial effektivlengde for å beskrive stivheten i det elastiske området, mens  $t$  er tykkelsen på flensen. For å få stivheten til flensen uttrykt ved  $l_{eff}$  som for kapasitet. Tok Weynand, Jaspert & Steenhuis [10] utgangspunkt i det maksimale bøyemomentet i flensen inne ved steget, samt at det ble antatt at forholdet mellom dimensjonerende kapasitet og

elastisk kapasitet var  $3/2$ . Figur 2.14 (b) viser at T-stykket var antatt opplagt ved boltene, og bruddmekanismen i T-stykket vil da være utvikling av plastisk ledd i flensen [10]. Strekkkapasiteten for denne mekanismen tilsvarer bruddform 1 og er gitt ved uttrykk (2.25). Ved disse antagelsene fikk Weynand, Jaspart & Steenhuis [10] forholdet mellom  $l_{eff,ini}$  og  $l_{eff}$ :

$$l_{eff,ini} = 0,859l_{eff} \approx 0,85l_{eff} \quad (2.38)$$

I knutepunktsstandarden har stivhetskoeffisientene benevnning mm, fordi  $E$  er utlatt fra stivhetskoeffisientene. Ved å sette uttrykket for  $l_{eff,ini}$  inn i uttrykk (2.37) får man stivhetskoeffisienten knutepunktsstandarden bruker med for endeplate påkjent av bøyning. Stivhetskoeffisientene til det ekvivalente T-stykke er dermed gitt ved:

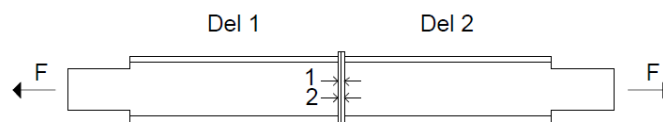
$$k_5 = \frac{0,9l_{eff}t^3}{m^3} \quad (2.39)$$

$$k_{10} = 1,6\frac{A_s}{L_b} \quad (2.40)$$

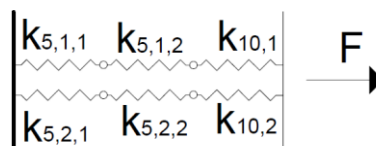
Der  $l_{eff}$  er den dimensjonerende effektive lengden forklart i 2.5.1, avstanden  $m$  er forklart i figur 2.8 og definisjon av koeffisientene  $A_s$  og  $L_b$  er forklart i knutepunktsstandarden.

### Fjærmodell brukt i rapporten

Illustrert i figur 2.14 er fjærmodellen brukt i denne rapporten for å beregne stivheten til de strekkbelastede endeplateskjøtene, her vist for et prøvestykke med H-profiler. Indeks på stivhetskoeffisienten  $k$  representerer henholdsvis basiskomponent og prøvedel. Fjærene innen hver serie ble betraktet som seriekoblede mens hver serie ble betraktet som parallellkoblede til hverandre. Man fikk dermed den totale stivheten til forbindelsen ved å summere bidragene fra de to seriene.



(a) Prøvestykke



(b) Fjærmodell

Figur 2.14: Strekkbelastet endeplateskjøt

## 2.6 Digital Image Correlation (DIC)

Den grunnleggende formen av 2D-DIC algoritmen kan ses på en "point tracker", det vil si en algoritme som følger translasjon til et spesifikt punkt på overflaten av et plant legeme gjennom en serie av bilder [12]. Translasjon til et punkt blir funnet ved å sammenligne bilder fra deformert tilstand med bilde fra referansetilstand. Hovedprinsippet til DIC er basert på å finne korrelasjon mellom disse bildene. Denne korrelasjon kan finnes ved å optimalisere et sett av frihetsgrader for en piksel undergruppe, ved å minimalisere summen av gråtone forskjell mellom to bilder innen en spesiell undergruppe [12].

Framfor å finne korrelasjon individuelt for hver undergruppe som ved tradisjonell DIC algoritme. Kan man finne en global korrelasjon for et sett av noder i et elementnett [12]. Node forskyvningene kan så finnes ved iterasjon av et lineært ligningssystem som gir et forskyvningsfelt. Fra forskyvningsfeltet er det så mulig å beregne et tøyingsfelt.

### 3. Bruk av høyfast stål i konstruksjoner

S355 som for 30 år siden sett på som høyfast stål betraktes i dag som vanlig konstruksjonsstål [13]. Trenden er at stadig høyere fastheter brukes i konstruksjoner, og man har i dag en økende bruk av S420 og S460 varmevalsedde plater og tverrsnitt innen konstruksjonsformål [14]. De siste tiårene har høyfast stål vunnet en stadig større markedsandel innen bruk i konstruksjoner [13], og høyfast stål benyttes i dag blant annet innen brukonstruksjoner, større stålbygg og rørledninger. Utviklingen av høyfast stål har kommet så langt at man i dag kan kjøpe Weldox 1300, som er stålplater med minimum en flytespenning på 1300 MPa. Samtidig som det har samme vekt-til-styrke forhold som mange aluminiums legeringer [15].

Motivasjon for bruk av høyfast stål i konstruksjoner kan deles inn i fire [16]:

- Økonomi: Ved økt flytespenning kan ståltverrsnittet reduseres. Dette kan gi til lavere fabrikkasjons- og oppføringskostnader.
- Arkitektur: Størrelsen på konstruksjonsdelene kan reduseres ved økt flytespenning, som igjen muliggjør spesielle estetiske og elegante konstruksjoner.
- Miljø: Konstruksjoner med mindre ståltverrsnitt, gir en mer effektiv bruk av jordas ressurser.
- Sikkerhet: Moderne stål har ikke bare høy flytespenning. Spesielle legeringer kombinerer den høye flytespenningen med høy bruddseighet slik at sikkerheten både under oppføring og bruk av konstruksjon blir tatt vare på.

Det største hindret for bruk av høyfast stål er i dag Eurokode 3, fordi beregningsreglene her hovedsakelig bare gjelder for fastheter opp til S460.

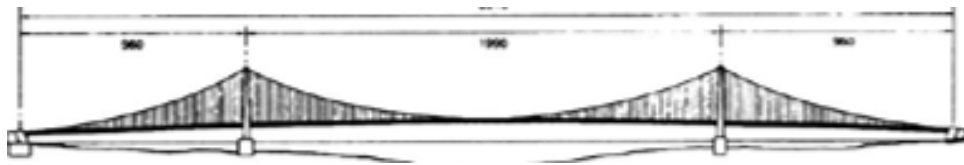
Den reduserte duktiliteten i høyfast stål grunnet redusert  $f_u/f_y$  forhold har tidligere vært en av bekymringene ved bruk av høyfast stål i konstruksjoner

#### 3.1 Eksempler på bruk av høyfast stål

Bruken av høyfast stål innen konstruksjoner vil nok øke i framtiden, fordi man da kan oppnå økt forhold mellom nytte- og egenlast. Det kan gi kortere oppføringstid og en mer kostnadseffektiv konstruksjon.

##### ***Bruer i Japan***

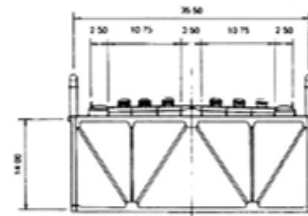
I Japan var de tidlig ute med å ta i bruk høye fastheter i bruer. Stål med strekkfasthet 600 MPa ble utviklet rundt 1950, og ble tatt i bruk ved to bruer i Hyogo på forsøksbasis. Stål med denne strekkfastheten ble i tillegg brukt ved tre bruer på Meishin motorvei, og ved mange bruer på Metropolitan motorvei. I 1964 var utviklingen kommet så langt at man begynte å ta i bruk 800 MPa stål i Hanawa brua [17].



(a) lengdeprofil



(b) Ferdig bru



(c) T verrsnitt

Figur 3.1: Akashi Kaikyo bridge [17]

Akashi Kaikyo Bridge i Japan vist i figur 3.1 var når den sto ferdig i 1998 var verdens lengste hengebru med et spenn på 1990 m. Store mengder stål med fasthet 800 MPa ble benyttet i det avstivende fagverket av brua for å redusere egenvekten [17].

Tokyo Gate Bridge vist i figur 3.2 ble åpnet Juli 2011, og er en fagverksbru med et spenn over marint område på 1618 m og midtspenn på 440 m. Ved å bruke stål med fasthet 500 MPa fikk man redusert egenvekten av stål med 3 % samt kostnadene med 12 % ved konstruksjon [18].



Figur 3.2: Tokyo Gate Bridge [18]

### **Hardanger brua**

Hardanger brua i Norge ei hengebru med et spenn på 1310 m ble stålkabler med flytespenning 1570 MPa brukt [19]. Ved å bruke stålkabler med så høy fasthet, kunne konstruktøren redusere tverrsnittet av kablene og dermed egenvekten av dem. Brukassen av denne konstruksjonen var for øvrig av vanlig S355 stål.



### **Militærbru**

Karlskronavervet AB i Sverige utviklet ei bru for det svenske forsvaret i høyfast stål. Hvor kravene til brua var:

- Måtte tåle 1000 passeringer av pansrede kjøretøy på 70 tonn
- Ha et spenn på opp mot 48 meter
- Kunne transporteres med ordinær lastebil
- Ha en oppføringstid på 75 minutter

For å oppfylle kravet om vekt ble de nødt til å bruke fasthet S1100 [13]. Bøyestivheten øker ikke med fastheten, og nedbøyningene ble da store uten at det hadde noe å si for den militære bruken.



Figur 3.3: militærbru lastet med tanks [13]

### **Holmenkollen**

I 2006 ble Oslo tildelt VM i de nordiske grener 2011 av FIS. En av forutsetningene for tildelingen var at den eksisterende storbakken i Holmenkollen ble tilpasset dagens hopp tekniske krav eller at en ny storbakke ble bygget. Oslo kommune besluttet å bygge et nytt tilløp basert på arkitekttegningene fra en internasjonal arkitektkonkurranse [20] vist i figur 3.4 (a).

Stål som konstruksjonsmateriale for tilløpet ble valgt med tanke på å ha en høy framdrift. For ytterligere optimalisering av framdriften la man til rette for en mest mulig effektiv monteringsprosess på anleggsplassen samt en vektreduksjon av konstruksjon. [20].

Hovedkonstruksjonen utgjør ca. 850 tonn og består hovedsakelig av sveiste kasse og H-profiler med fasthet S460 samt RHA-profiler og H-profiler med fasthet S355. Fastheten S460 ble valgt framfor den ordinære konstruksjonsfastheten S355, fordi det gav reduserte sveise dimensjoner, hadde god sveisbarhet og gav mindre materialer å frakte som igjen ga spart tid. Ved å benytte S460 framfor S355 fikk man en økning i fastheten på 30 % samtidig som man reduserte stålmengden med omtrent like mye uten en tilsvarende økning i kostnader.

Ulempen ved å bruke fastheten fra S460 framfor S355 var det ga økte nedbøyninger i tilløpet samt at man ikke kunne utnytte fasthetsøkningen i slanke trykkstaver i like stor grad. Det ble av den grunn

valgt å bruke kortest mulig trykkstaver, og økt nedbøyning i tilløp ble kompensert for ved å bygge tilløpet med en overhøyde [20].



(a) Arkitektskisse [20]



(b) Nye Holmenkollen sett forfra [20]

Figur 3.4: Nye Holmenkollen [20]

Fastheten S460 er relativt høyfast sammenlignet med ordinært konstruksjonsstål S355, men dekkes i dag av Eurokode 3.

### **Friends Arena**

Friends Arena den nye hjemmebanene til Sveriges landslag fotball, og den mest moderne flerbruks arenaen i Skandinavia. Arenaen har en kapasitet på 50 000 tilskuere ved sportsbegivenheter, og kan øke ved konserter til 65 000 ved å ta i bruk den indre delen [21].

Sweco structures AB fikk følgende retningslinjer ved prosjektering av taket til arenaen [21]:

1. Måtte ha mulighet til å ha mange ulike typer arrangement, og taket måtte være i stand til motstå store laster.
2. Taket måtte være mobilt

Man ønsket en kostnadseffektiv konstruksjon med små dimensjoner for å minske følelsen av å være innendørs. Da bæresystem var valgt begynte jobben med å optimalisere utnyttelsen av profilene, og det ble da besluttet å bruke høyfast stål i deler av konstruksjon for å redusere kostnadene ytterligere [21].

Hovedbæresystemet strekker seg 162 m over arenaen, og består av fire trekantede fagverk. Der de to toppgurtene består av rundstål med fasthet S460 med ytre diameter på 1067 mm. Bunngurten i fagverket er et U-formet profil med fasthet S690. Diagonalene som knytter fagverkene til oppleggene består av doble plater med fasthet S900 [21]. Figur 3.5 viser et av de fire trekantede fagverkene i hovedbæresystemet.



(a) Friends Arena [22]



(b) Fagverk [21]

Figur 3.5: Friends Arena

I det mobile taket ble det totalt benyttet 4000 tonn stål, og av dette var 265 tonn S690, 904 tonn S460 og 44 tonn S900. I en hypotetisk referansekonstruksjon med kun S355 ville behovet vært behov for 4585 tonn stål. Ruukki som produserte og monterte løsningen med høyfast stål priset også dette alternativet, og det ble 2,2 millioner Euro dyrere [21].

Totalt ble det i byggingen av Friends Arena brukt 32 % stål med fasthet høyere enn S355. Bruken av høyfast stål ga også miljøbesparelser sammenlignet med den hypotetiske referansekonstruksjon i kun S355. Denne besparelsen ble ved å redusere antall tonn stål beregnet til 1340 tonn CO<sub>2</sub> og 5 000 MWh ikke fornybare energiresurser gjennom tilvirkningen og transporten [23].

### **Mobilkraner**

Høyfast stål brukes også i den lastbærende delen av mobile kraner. Dette gjør at egenvekten til kranene går ned samtidig som kapasiteten for nyttelast går opp. I større mobilkraner benyttes derfor høyfast stål i hele den lastbærende delen [24].



## 4. Tidligere arbeid

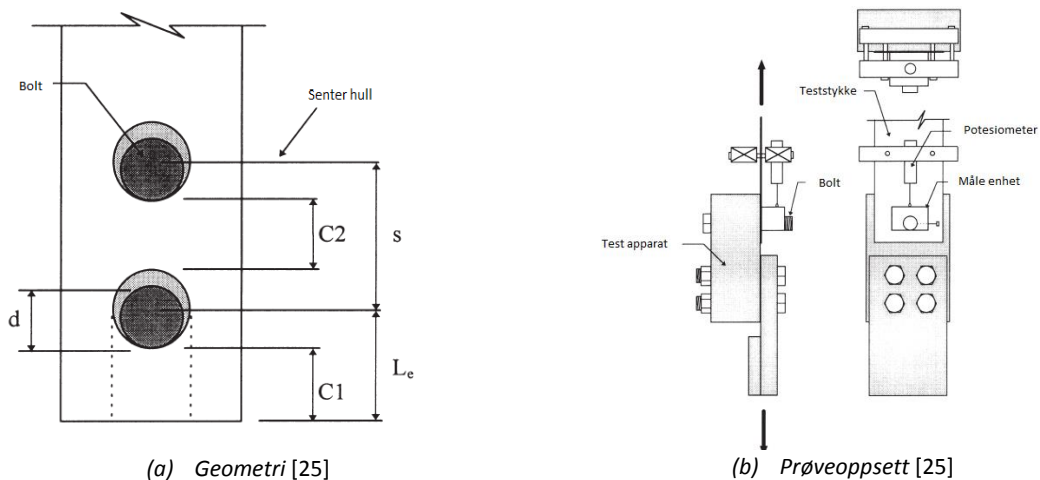
Presenterer her tidligere arbeid utført på forbindelser i høyfast stål. Da det ikke har vært mulig å finne mange artikler angående endeplateforbindelser, bli også tidligere arbeid på typer forbindelser i høyfast stål presentert. Dette kan likevel være relevant da det gir en indikasjon på hvordan det mindre duktile høyfaste stålet oppfører sammenlignet med S355.

### 4.1 Bolteforbindelser

For boltede forbindelser i skjær har det blitt gjennomført flere forsøksprogrammer med høyfast stål. Der prøveresultatene har blitt sammenlignet med de gjeldende beregningsreglene i Eurokode 3.

#### 4.1.1 Forsøksprogram av Hyeong & Yara [25]

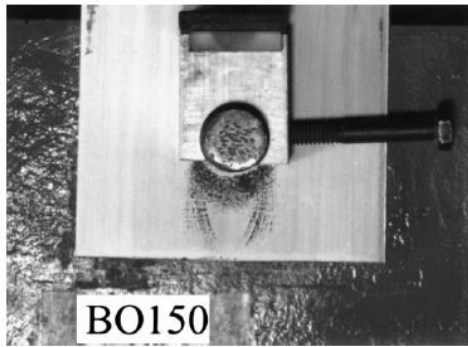
Hyeong & Yara [25] gjennomførte et forsøksprogram på skjøteforbindelser der endeavstanden til en-bolt og to-bolt forbindelser ble undersøkt. Figur 4.1 viser geometrien til prøvestykkene som ble undersøkt og prøveoppsettet som ble brukt. For en-bolt forbindelsene ble fire verdier av  $C_1$  undersøkt. Mens for to-bolt forbindelsene ble seks kombinasjoner av  $C_1$  og  $C_2$  avstandene undersøkt [25]. De benyttede platene hadde nominell tykkelse på 5 mm, og nominell bredde lik 89 mm og 150 mm for henholdsvis en-bolt og to-bolt forbindelsene. Det ble benyttet 19 mm A490 bolter med 21 mm boltehull.



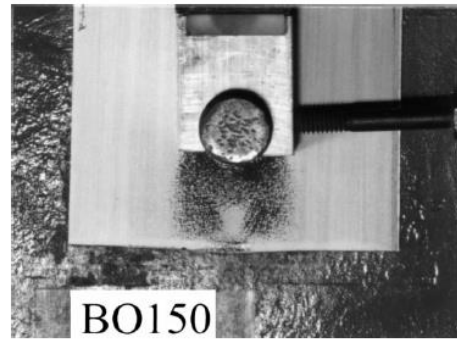
Figur 4.1: Geometrier og prøveoppsett [25]

Forsøksprogrammet ble gjennomført med to fastheter for å undersøke effekten av forholdet mellom brudd- og flytespenning for kapasitet i bolteforbindelser. Fasthetene som ble brukt hadde en flytespenning på 267 MPa og 483 MPa, og et forhold mellom brudd- og flytespenning på henholdsvis 1,61 og 1,13.

Forsøkene til Hyeong & Yara [25] visste at bruddene fant sted ved kanten av boltehullene eller ved kanten av platen. Figur 4.2 viser utviklingen av flytelinje fra boltehull til platekanten. Hyeong & Yara [25] konkluderte med at et forhold større enn 1,13 mellom brudd- og flytespenning ikke hadde noe å si for styrken ved en forskyvning på 6,35 mm, og at Eurokode 3 var konservativ med 25 % sammenlignet med forsøksresultatene.



(a) Flytelinjer [25]



(b) Fortykning av flytelinjer [25]

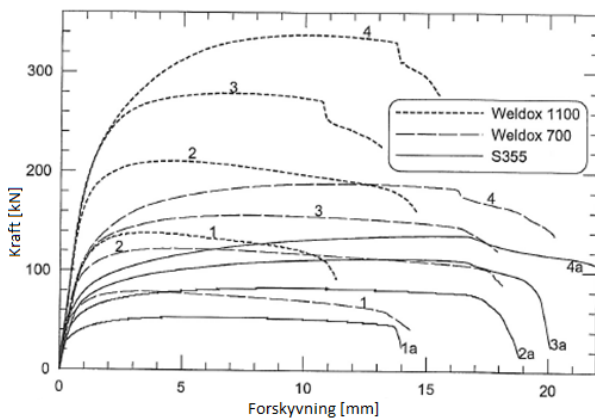
Figur 4.2: Utvikling av flytelinjer [25]

Dette forsøksprogrammet var ikke utført i høyfast stål selv om en flytespenning på 483 MPa er relativt høyt.

#### 4.1.2 Forsøksprogram av Aalberg & Larsen [14]

Aalberg & Larsen [14] undersøkte om lag de samme nominelle geometrier som Hyeong & Yara [25] for fasthetene S355, Weldom 700 og Weldom 1100. I forsøksprogrammet til Aalberg & Larsen [14] ble M20 12.9 bolter med boltehull 21 mm benyttet mot A490 bolter med 19 mm boltehull for Hyeong & Yara [25].

Figur 4.3 viser kraft-forskyvningskurvene Aalberg & Larsen [14] fikk for en-bolt forbindelsene. Tabell 4.1 forklarer hvilke geometrier de ulike kurvene tilhører, og  $C_1$  er endeavstanden i skjøteforbindelsen.

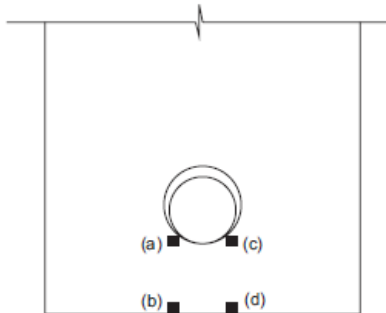


Figur 4.3: kraft-forskyvningskurver [14]

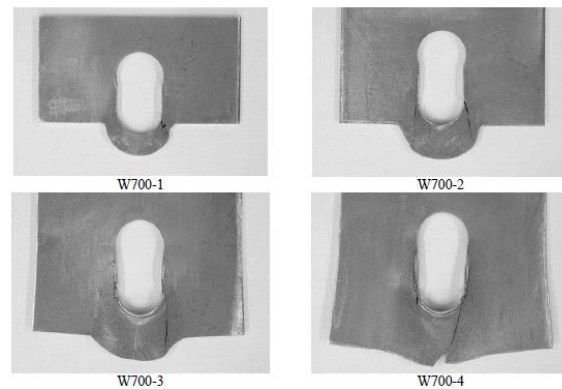
Tabell 4.1: Nummerering av prøvestykker[14]

	1	2	3	4
$C_1$	0,5d	1,0d	1,5d	2,0d

Aalberg & Larsen [14] rapporterte at for geometrier med kort kantavstand som for 1 og 2 oppsto brudd ved skjær/strekk langs linjene (a)-(b) eller (c)-(d) vist i figur 4.4. Mens for geometriene 3 og 4 oppsto det strekkbrudd ved punktene (b) eller (d) som fortsatte 5-8 mm inn i prøvestykkene [15]. Figur 4.5 viser de ulike bruddformene for Weldom 700. For to-bolt geometriene rapporterte Aalberg & Larsen at alle bruddene oppsto ved den bakerste boltene [14].



Figur 4.4: Bruddlokalisering [14]



Figur 4.5: Weldom 700 [14]

Aalberg & Larsen [14] sammenlignet forsøksresultatene med kapasitet predikert kapasitet etter Eurokode 3 for de ulike fasthetene, og tabell 4.2 oppsummerer disse sammenligningene.

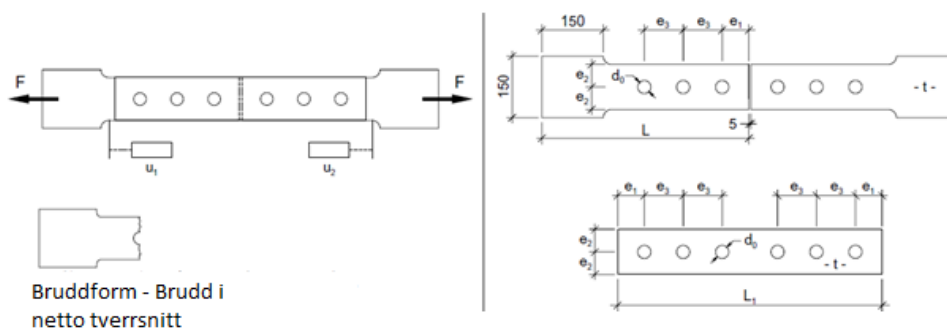
Tabell 4.2: Eurokode 3/Forsøksresultat [14]

	$F_{EC3}/F_u$	$F_{EC3}/F_u$	$F_{EC3}/F_u$
Antall bolter	S355	W700	W1100
En-bolt	0,73-0,80	0,82-0,87	0,83-0,90
To-bolt	0,64-0,88	0,70-0,93	0,76-0,98

Aalberg & Larsen [14] fikk et midlere forhold mellom Eurokode 3 og forsøksresultateneresultatene på 0,76, 0,85 og 0,86 for henholdsvis S355, W700 og W1100. For geometrier med to-bolter ble tilsvarende forhold 0,75, 0,83 og 0,87 [14]. Aalberg & Larsen [14] konkluderte med at en liten reduksjonsfaktor for høyfast stål ville være tilstrekkelig for å oppnå samme utnyttingsgrad som ved ordinært konstruksjonsstål.

#### 4.1.3 Brudd i nettotverrsnitt Aalberg & Larsen [27]

Aalberg & Larsen [26] gjennomførte strekkforsøk av boltede plater som vist i figur 4.6.

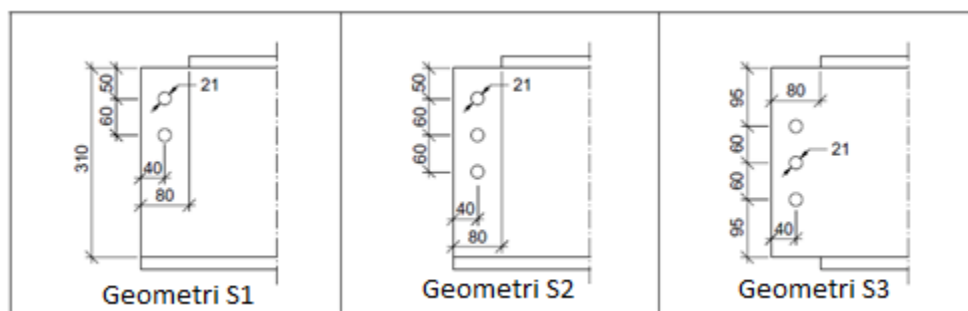


Figur 4.6: Prøveoppsett for nettotverrsnitt [27]

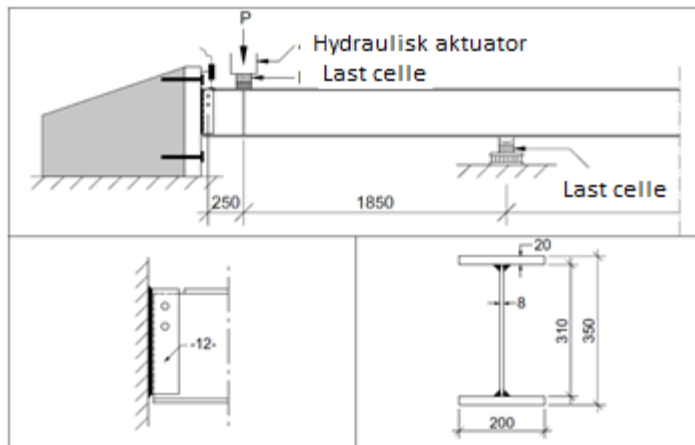
Det ble gjennomført tester med tre forskjellige boltestørrelser M20, M24 og M30, og fire fastheter ble testet S235, Raex 420, Weldox 460 og Weldox 700. Hensikten med forsøkene var å undersøke forholdet mellom  $\sigma_u/f_u$ . Der  $f_u$  var bruddspenningen funnet på bakgrunn av materialforsøk, mens  $\sigma_u$  var bruddspenning beregnet ut fra forsøkene. Forsøksresultatene til Aalberg & Larsen [26] viste et tilnærmet konstante forhold for alle geometriene innen en fasthet, og det ble konkluderte med at utnyttelsen var uavhengig av  $A_{net}/A_{brutto}$  [27].

#### 4.1.4 Forsøksprogram for blokkutrivning grunnet skjær av Aalberg & Larsen [26]

Aalberg & Larsen [26] gjennomførte et forsøksprogram for blokkutrivning grunnet skjær på sveiste I-profiler. To varianter av I-profiler ble sveist opp. Begge variantene hadde flenser med fasthet S275, og i stegene hadde det ene S355 mens det andre hadde Weldox 700. De undersøkte geometriene var som vist i figur 4.7, og ble undersøkt for begge variantene av I-profil. Det ble brukt M20 10.9 bolter under forsøkene med boltehull 21 mm, og boltene ble strammet til 100 Nm [26].



Figur 4.7: Geometrier, blokkutrivning skjær [26]



Figur 4.8: Forsøksoppsett, blokkutrivning skjær [26]

Figur 4.8 viser prøveoppsettet, der pålastingen av bjelken fant sted nær forbindelsen i form av en konsentrert punktlast. Punktlasten og opplagerkraften lengre bort ble målt med lastceller, og kraften i forbindelsen beregnet ut fra statikk [26]. Vertikal forskyving i forbindelsen ble målt med en optisk forskyvningsmåler plassert ved toppflensen til bjelken [26].

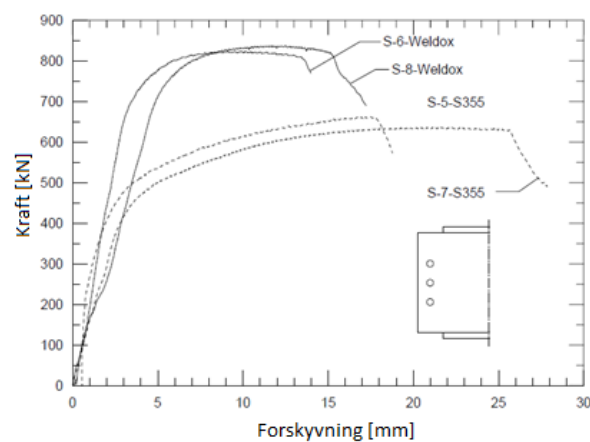
Aalberg & Larsen [26] rapporterte at bruddmønstrene var innsnevring og brudd i strekkflaten, langs en horisontal linje fra stegkant til senter av nederste bolt [26]. Bruddmønstret for begge I-profil variantene ved geometrien S3 er vist i figur 4.9.





(a) S355 [26]

(b) W700 [26]



(C) Kraft-forskyvningskurve S3 [26]

Figur 4.9: Geometri S3 [26]

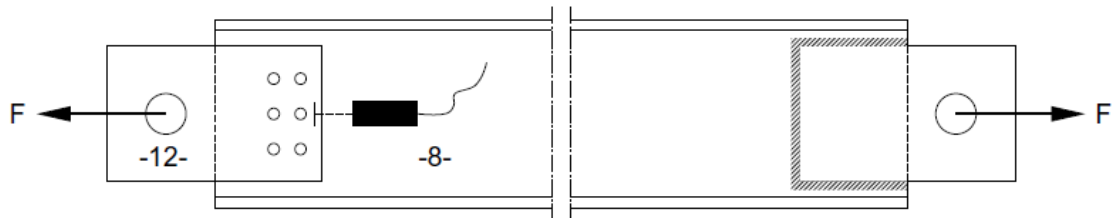
Aalberg & Larsen [26] sammenlignet forholdet mellom predikert kapasitetet fra Eurokode 3 og forsøkene, og ved beregningene ble  $f_{0,2}$  brukt som flytespenning for Weldom 700 [26]. Tabell 4.3 oppsummerer disse resultatene.

Tabell 4.3: Resultat blokkutrivning grunnet skjær [26]

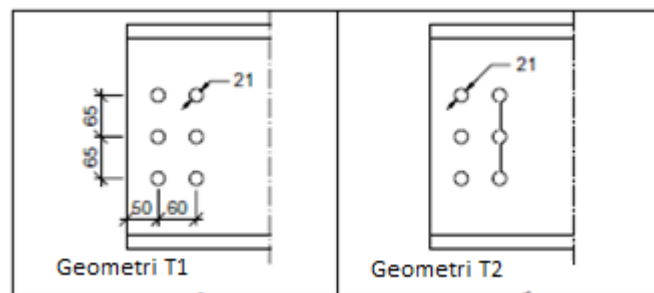
Fasthet	Geometri	EC3/Bruddkraft
S355	S1	0,688
W700	S1	0,943
S355	S2	0,683
W700	S2	0,983
S355	S3	0,704
W700	S3	1,047
S355	S3	0,732
W700	S3	1,03

#### 4.1.5 Forsøksprogram for blokkutrivning grunnet strekk av Aalberg & Larsen [26]

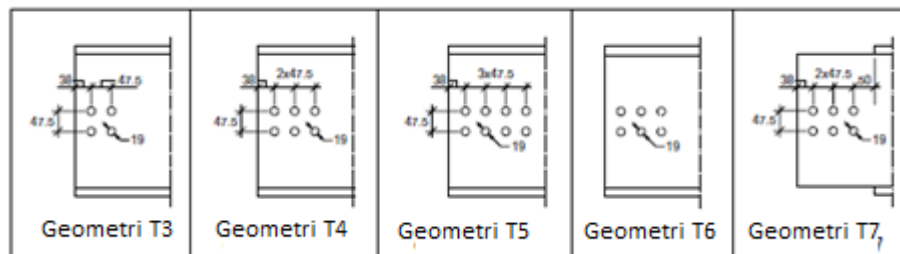
Aalberg & Larsen [26] gjennomførte et forsøksprogramprogrammet med de samme I-profilene som i prøveprogrammet for blokkutrivning grunnet skjær. Forsøksprogrammet hadde to serier, serie I bestod av 20mm bolter og 21mm boltehull og serie II bestod 18mm bolter og 19mm boltehull. Boltene ble i begge seriene strammet til 100 Nm [26]. Figur 4.10 viser prøveoppsettet som ble brukt under forsøkene og de undersøkte geometriene var som vist i figur 4.11.



Figur 4.10: Prøveoppsett for blokkutrivning strekk [26]



(a) Serie I [26]

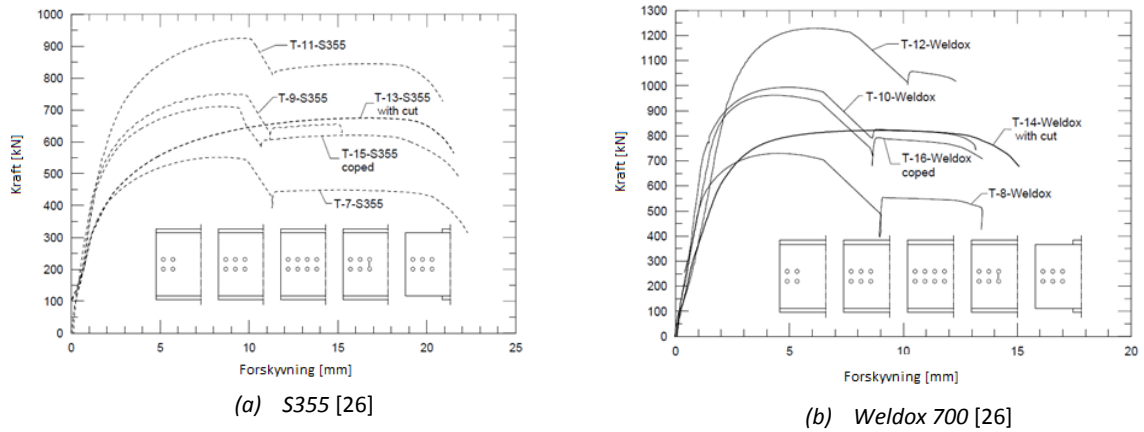


(b) Serie II [26]

Figur 4.11: Geometrier test for blokkutrivning grunnet strekk [26]

Aalberg & Larsen [26] rapporterte at alle bruddene kom ved den innerste bolteraden. Figur 4.12 viser kraft-forskyvningskurvene for serie II, og man ser at kraft-forskyvningskurvene for S355 og Wieldox 700 har samme form. Den største forskjellen mellom kurvene var at Wieldox 700 bare vist omtrent halvparten av bruddforskyvningen til S355.

Forsøkene utført av Aalberg & Larsen [26] visste at forholdet mellom kapasitet predikert etter Eurokode 3 og forsøkene varierte fra 68 % til 84,5 % for S355 og fra 99,6 % til 117,6 % for W700. For å komme nærmere flytemodellen i Eurokode 3 foreslo Aalberg & Larsen [26] å innføre en reduksjonsfaktor på 0,8 for Wieldox 700.

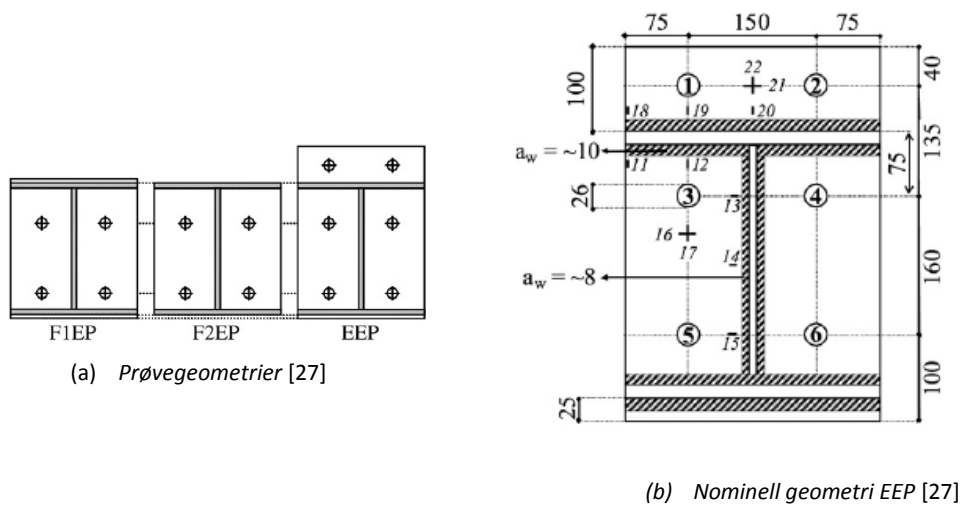


Figur 4.12: Kraft-forskyvningskurver prøveserie II [26]

## 4.2 Endeplateforbindelser

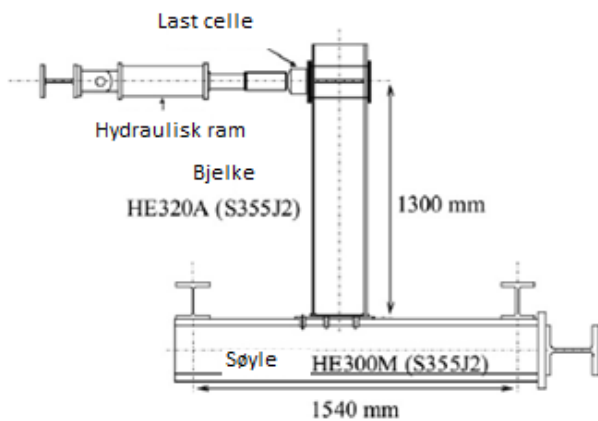
Coelho & Bijlaard [27] gjennomførte et forsøksprogram for momentforbindelser med endeplate i S690. Der man blant annet så på effekten av endringer i endeplatetykkelse og boltefasthet på rotasjonsstivhet og momentkapasitet.

Tre endeplategeometriener ble undersøkt, og de nominelle målene for EEP endeplatene var som vist i figur 4.13. Endeplatene F1EP og F2EP hadde tilsvarende nominelle mål [27].

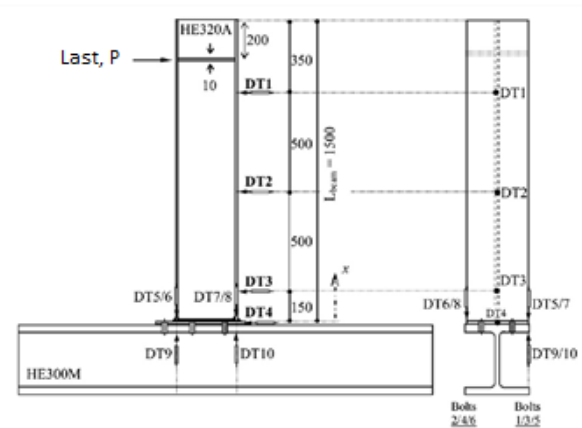


Figur 4.13: Endeplatekonfigurasjon [27]

Figur 4.14 viser prøveoppsettet og lokaliseringen av forskyvningsmålerne under forsøkene.



(a) Prøveoppsett [27]



(b) Lokalisering av forskyvningsmålere [27]

Figur 4.14: Prøveoppsett for momentbelastet endeplate [27]

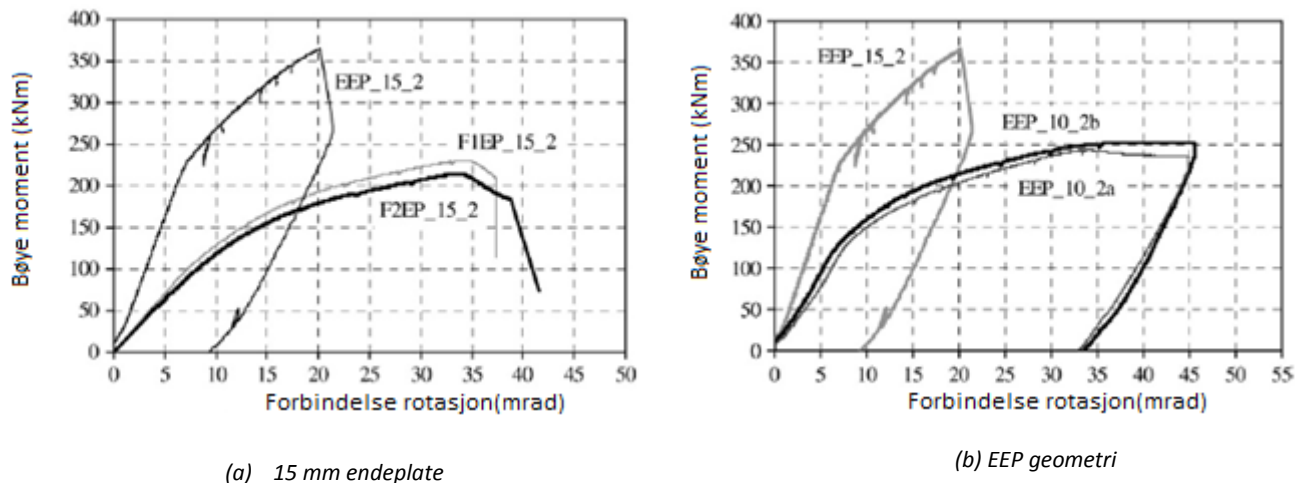
Under forsøkene ble det antatt at søylen oppførte seg som et stivt legeme, og rotasjon av senterlinjen til bjelken ble derfor brukt som rotasjon i forbindelsen [27]. Rotasjon av bjelkens senterlinjen ble beregnet ved:

$$\theta_b = \arctan\left(\frac{\delta_{DT1} - \delta_{DT4} - \delta_{b.el}(DT1)}{1150}\right) = \arctan\left(\frac{\delta_{DT2} - \delta_{DT4} - \delta_{b.el}(DT2)}{650}\right) \quad (4.1)$$

Der  $\delta_{DTi}$  var vertikalforskyvning ved forskyvningsmåler  $i$  vist i figur 4.14, og  $\delta_{b.el}(DTi)$  var bjelkens elastiske deformasjon [27]:

$$\delta_{b.el}(DT1) = -\frac{P}{E_b I_b} \left( \frac{x_{DT1}^3}{6} - \frac{L_{load} x_{DT1}^2}{2} \right) \quad (4.2)$$

Figur 4.15 (a) viser  $M-\phi$  kurvene som Coelho & Bijlarrrd [27] fikk for 15 mm endeplate. Fra kurvene kan man se at F1EP og F2EP hadde tilnærmet samme form i hele det elastisk-plastiske området, mens at EEP hadde høyere kapasitet men mindre deformasjon. Effekten av endeplatetykkelse er vist i figur 4.15 (b) for EEP geometrien, der man ser at 15 mm endeplate hadde større kapasitet men mindre deformasjonskapasitet enn 10 mm endeplater. Kurvene EEP\_10\_2a og EEP\_10\_2b tilsvarer henholdsvis 12.9 og 8.8 bolter og hadde tilnærmet samme responskurve i hele det elastisk-plastisk område.

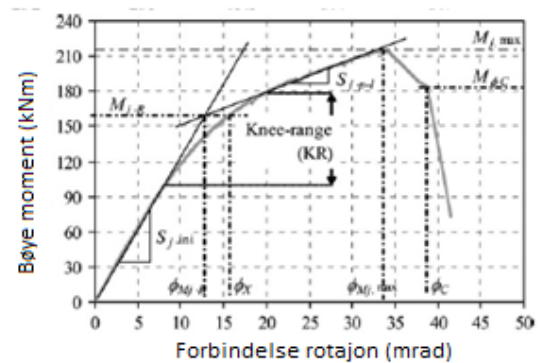


Figur 4.15: Moment-rotasjonskurver [27]

Coelho & Bijlaard [27] sammenlignet de predikerte kapasitetene og rotasjonsstivhetene etter Eurokode 3 mot de beregnede verdiene fra forsøksresultatene, og disse resultatene er gitt i tabell 4.4. Predikert momentkapasiteten ble beregnet på bakgrunn av T-stykke kapasiteten i strekksonen, og rotasjonsstivheten ble funnet ved lineær regresjon av  $M-\phi$  kurvene før KR (KR punktet er vis i figur 4.16) [28].

Tabell 4.4: Forhold EC3/Test [28]

Teststykke	$M_{j,Rd}$	$S_{j,ini}$
F1EP_15_2	0,95	1,60
F2EP_15_2	1,03	1,75
EEP_15_2	1,51	1,64
F1EP_10_2	1,09	1,59
F2EP_10_2	1,17	1,72
EEP_10_2a	1,06	1,85
EEP_10_2b	0,98	1,72



Figur 4.16: Rotasjonsstivhet [28]

Ut fra resultatene konkluderte Coelho & Bijlaard [27] med:

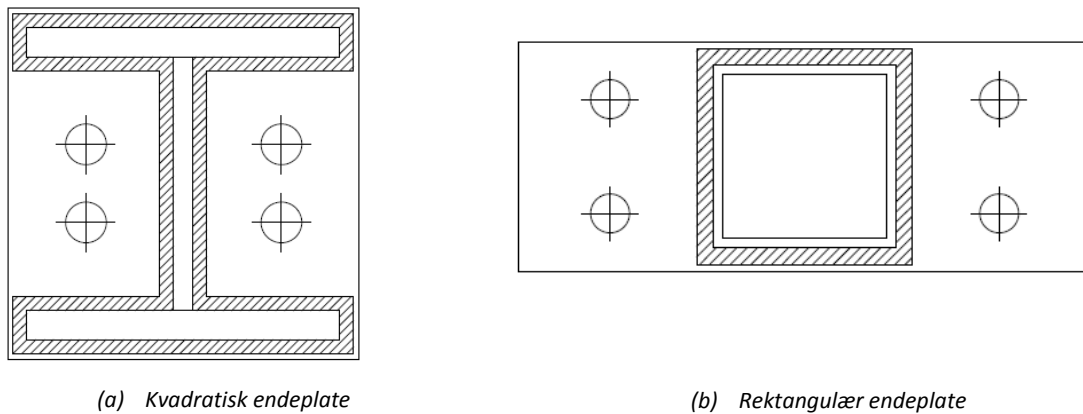
- Initial rotasjonsstivhet  $S_{j,ini}$  og momentkapasitet øker med økende endeplatetykkelse
- Tilgjengelig rotasjonskapasitet synker med økende platetykkelse
- T-stykke idealiseringen fra knutepunktstandarden gav resultat som samsvarte godt med faktisk kapasitet.

-

## 5. Dimensjonering av prøvestykker

Dette testprogrammet inkluderte tre forbindelser av endeplateskjøter. To ulike geometrier ble undersøkt, kvadratisk endeplate sveist til H-profiler og rektangulær endeplate sveist til HUP-profiler, som vist i figur 5.1. For kvadratisk endeplate ble fasthetene S355 og Weldox 700 undersøkt. Den rektangulære geometrien ble undersøkt med endeplate i fastheten Weldox 700. De tre prøvestykkene blir heretter i rapporten kalt H-W700, H-S355 og HUP-W700, der H og HUP indikerer geometri av endeplatene mens W700 og S355 angir fastheten i endeplaten.

Geometriene av endeplatene og profilene ble valgt ut fra hva man antok kunne være aktuelle i faktiske konstruksjoner. Ved plassering av boltene ønsket man ikke at de skulle være for nært flensene i H-profilene eller for nært platekanten. For nært flensene ville gi en stivere oppførsel, og for nært platekanten ville gi dårlig utviklet hevearmkraft. Det ble av den grunn valgt å plassere boltene omtrent midt mellom profil og platekanten, samt tett midt mellom flensene til H-profilene.

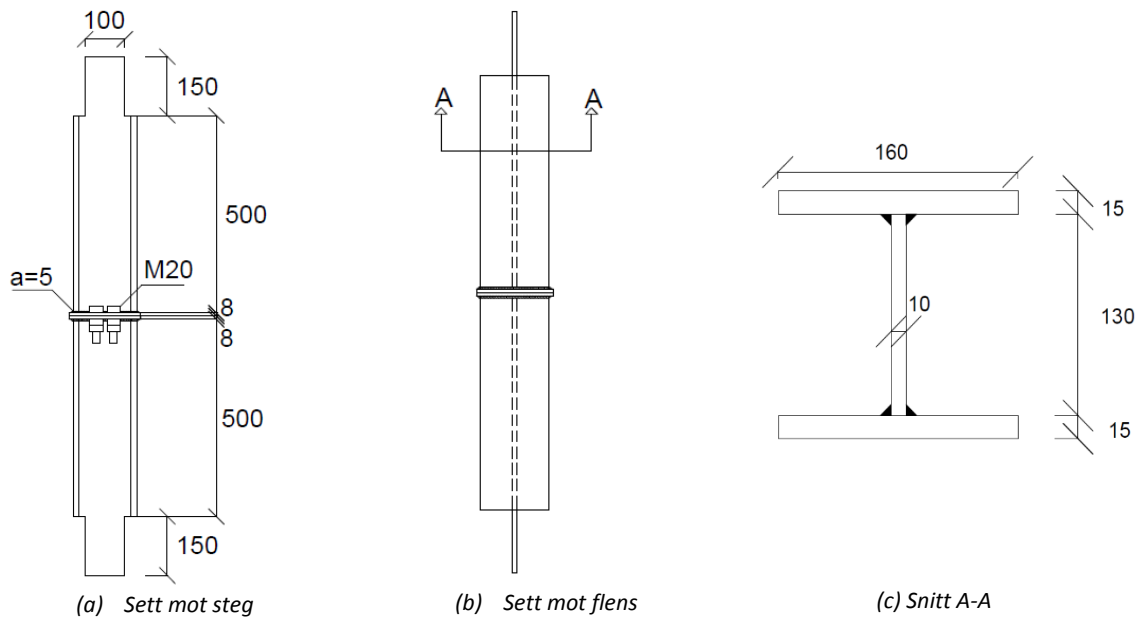


Figur 5.1: Endeplate geometrier

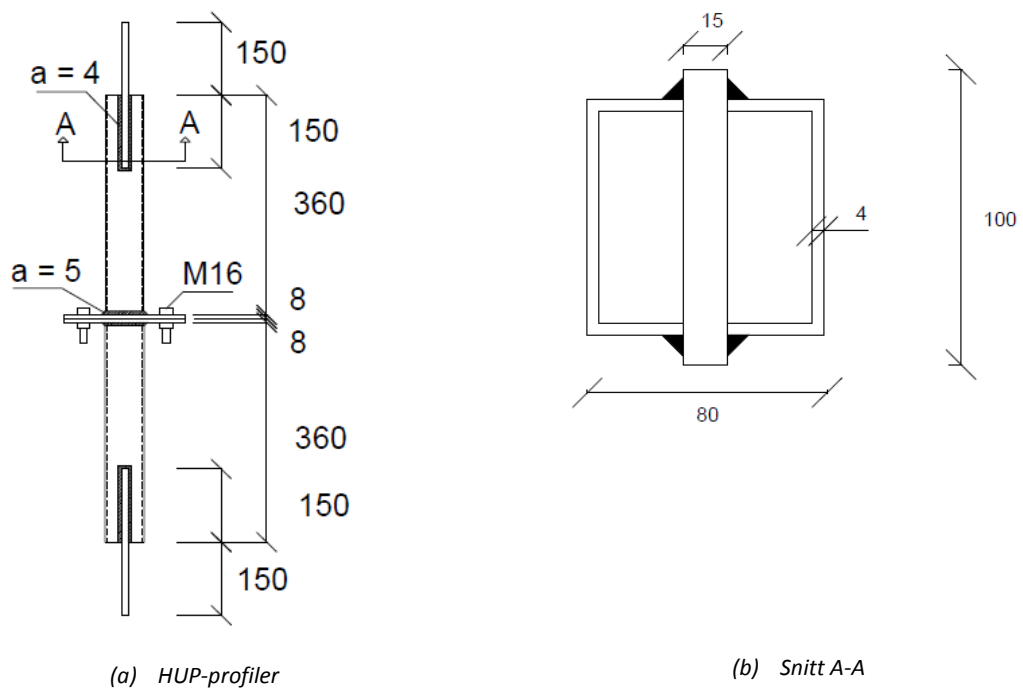
I forsøksprogrammet ønsket man å sammenligne den virkelige kapasiteten for høyfast stål mot den ekvivalente T-stykke kapasiteten fra knutepunktstandard. Man ønsket derfor at dimensjonerende bruddmekanisme var full flytning i endeplatene. Det vil si at man ønsket at bruddform 1 skulle være dimensjonerende for det ekvivalente T-stykke. Valg av endeplatetykkelse, a-mål på sveisene rundt profilene, boltediameter og boltefasthet ble gjort på bakgrunn av dette. For H-profilene måtte man i tillegg ta hensyn til plassen mellom flensene ved valg av boltediameter. For å oppnå full flytning i endeplatene måtte boltene ha tilstrekkelig kapasitet til at det kunne utvikles full hevearmkraft. Samt at profiltverrsnittene og sveisene måtte ha større kapasitet enn bruddform 1.

Figur 5.2 og figur 5.3 viser den nominelle geometrien av prøvestykkene i forsøksprogrammet. Prøvestykkene med H-profiler ble lagd fra en bjelke sveist opp av Weldox 700. To deler på 650 mm ble kuttet fra bjelken. Hver del fikk flenser samt deler av steg kuttet av i den ene enden, som man ser av figur 5.2. Dette ble gjort for at prøvestykkene skulle få plass mellom klembakkene i prøvemaskin. I andre enden av H-profilene ble endeplatene sveist fast. Etter det første forsøket med H-profiler ble deler av profilene med endeplater skjært vekk før nye endeplater ble sveist fast. HUP-profilene var tidligere blitt benyttet til testing av endeplateskjøter i studentarbeider. De hadde nominelle mål 80 mm\*80 mm\*4 mm og fasthet S355. En 300 mm lang stålplate med tverrsnitt 15mm\*100mm var

slisset inn i HUP-profilene og sveist med a-mål 4 mm, som vist i figur 5.3. Dette var gjort for å ha gripe flater for klembakkene i prøvemaskin. I tabell 5.1 er det presentert nominelle detaljer over de ulike komponentene i prøvestykkene.



Figur 5.2: Nominell geometri for prøvestykkene med H-profiler (alle dimensjoner i mm)



Figur 5.3: Nominell geometri for prøvestykke med HUP-profiler (alle dimensjoner i mm)



Tabell 5.1: Nominelle detaljer av prøvekomponenter (alle dimensjoner gitt i mm)

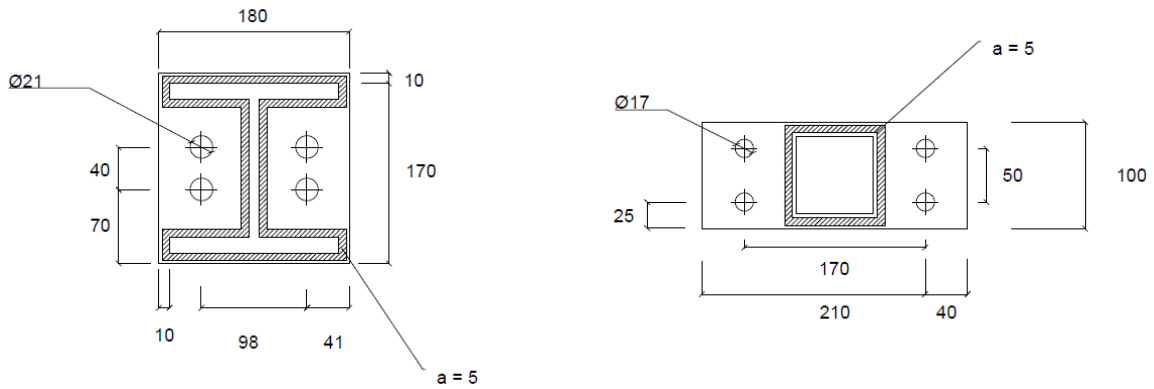
Prøve ID	H-profil*		HUP-profil				Endeplate		Bolt		
	Steg		Flens		Flens		t <sub>p</sub> (mm)	Fasthet	φ <sub>b</sub>	Fasthet	
	Dim.	Fasthet	Dim.	Fasthet	Dim.	Fasthet					
H-W700	10*130	W700	15*160	W700	15*160	W700	8,00	W700	20	10.9	
H-S355	10*130	W700	15*160	W700	15*160	W700	8,00	S355	20	10.9	
HUP-W700						80*80*4	S355	8,00	W700	16	8.8

\* H-profiler var sveist opp av W700 komponenter.

Fire fullgjengede M20 10.9 bolter ble brukt ved testene av H-W700 og H-S355. Like bolter ble benyttet for best kunne å undersøke hvordan forholdet mellom predikerte og virkelige kapasiteter og stivheter ble påvirket av fasthet. Ved forsøket av HUP-S355 ble fire fullgjengede M16 8.8 bolter benyttet. Denne type bolt ble valgt fordi man ville sammenligne forsøksresultatet med forsøk utført av Egeland & Torstvedt [5]. Der de samme HUP-profilene med endeplater i geometri og fasthet S355 hadde blitt benyttet, og dette prøvestykket blir i rapporten kalt HUP-S355. Mutterne benyttet i under forsøkene hadde fasthet 8.8. For å hindre utrivning av bolt fra mutterne ble to muttere per bolt benyttet for H-W700 og H-S355. Nominell diameter av boltehullene ble valgt bare 1 mm større enn boltene for å få minst mulig bevegelse av boltene i endeplateskjøtene. For alle prøvestykkene ble det brukt skiver under boltehodene og mutterne.

Prøvestykkene fikk endeplatene sveist til profilene på verksted med kontinuerlig kilsveis. For endeplatene i Wieldox 700 ble det benyttet ESAB OK 75.75 elektroder. Dette er elektroder egnet for sveising av høyfast stål, og har en flytespenning på 755 MPa [28]. Endeplatene i S355 ble sveist med ESAB OK 50.10 elektroder, og dette er elektroder med en flytespenning på 430 MPa [29]. For prøvestykkene ble et nominelt a-mål lik 5 mm valgt, fordi man ønsket å være sikre på at man oppnådd full flytning i endeplatene før brudd i sveisene fant sted. Prøvestykket HUP-S355 hadde nominelt a-mål lik 4 mm for sveisen rundt profilet.

De nominelle geometriene for endeplatene er vist i figur 5.4, og de geometriske parameterne basert på nominelle mål er gitt i tabell 5.2.



(a) Kvadratisk endeplate (mål i mm)

(b) Rektangulær endeplate (mål i mm)

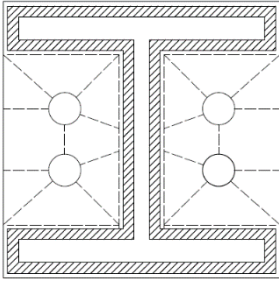
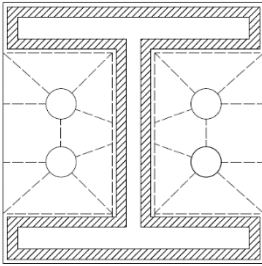
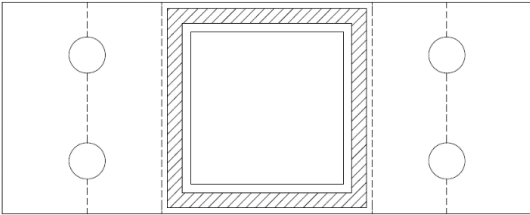
Figur 5.4: Nominelle mål for endeplater (alle dimensjoner i mm)

Tabell 5.2: Geometriske parametere på bakgrunn av nominelle mål

Prøve ID	$h_p$	$b_p$	$t_p$	$m$	$\alpha$	$P$	$e$	$m_x$	$w$	$e_x$
H-W700	180	180	8,00	38,34	5,83	40,0	41,0			
H-S355	180	180	8,00	38,34	5,83	40,0	41,0			
HUP-W700	250	100	8,00				25,0	39,34	50,0	40,0

Dimensjonerende effektive lengder med tilhørende mekanismer er gitt i tabell 5.3. De effektive lengdene av T-stykkene for kvadratisk endeplate ble beregnet for endeplate og indre skruerad ved siden av bjelkens strekkflens [1]. Mens effektiv lengde av T-stykke for rektangulær geometri ble beregnet fra endeplate og ytre skruerad ved siden av bjelkens strekkflens [1].

Tabell 5.3: Dimensjonerende effektive lengder (alle lengder i mm)

Prøvestykke	Flytemekanisme og effektiv lengde
H-W700	 <p>282,44 mm</p>
H-S355	 <p>282,44 mm</p>
HUP-W700	 <p>100 mm</p>

Karakteristiske dimensjonerende kapasiteter for mulige bruddformer av det ekvivalente T-stykke, sveis og tverrsnitt er presentert i tabell 5.6. Der de beregnede verdiene er basert på nominelle verdier, og beregningene er lagt i vedlegg B. Beregningene for bruddform 1, 2 og 3 er basert på formlene i delkapittel 2.5.2, mens formlene brukt for kapasitet av brutto tverrsnittet og sveis er gitt i uttrykk (5.1) og (5.2) [6] [30].

Dimensjonerende plastisk kapasitet for bruttotverrsnitt [6]:

$$N_{pl,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.1)$$

Dimensjonerende kapasitet for sveis [30]:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\gamma_{M2}\beta_w} \quad (5.2)$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{F}{\sqrt{2}La} \quad (5.3)$$

Der [30]:

$\sigma_{\perp}$  = Normalspenning i sveisesnittet (rettet normalt på sveisens lengderetning)

$\tau_{\perp}$  = Skjærspenningskomponent i sveisesnittet (rettet normalt på sveisens lengderetning)

$\tau_{\parallel}$  = Skjærspenningskomponent i sveisesnittet (rettet parallelt med sveisens lengderetning)

L = Sveiselengde

a = sveisens nominelle rotmål («a-mål»)

Ved beregningene av kapasitet til sveisene ble det benyttet  $f_u=510$  og MPa og  $f_u=820$  for henholdsvis H-S355/HUP-W700 og H-W700. For korrelasjonsfaktoren  $\beta_w$  ble det benyttet 0,9 og 1,0 for henholdsvis for H-S355/HUP-W700 og for H-W700.

Tabell 5.4: Karakteristiske dimensjonerende kapasiteter (Kapasiteter gitt i kN)

Teststykke	T-stykke			Sveis	Profil
	Bruddform 1	Bruddform 2	Bruddform 3		
H-W700	330	536	882	2725	700
H-S355	167	496	882	1883	700
HUP-W700	114	256	452	641	430

Elastisk initial stivhet til prøvestykkene beregnet etter nominelle mål er gitt i tabell 5.5, og beregningene er vist i vedlegg C.

Tabell 5.5: Elastisk initial stivhet basert på nominelle verdier

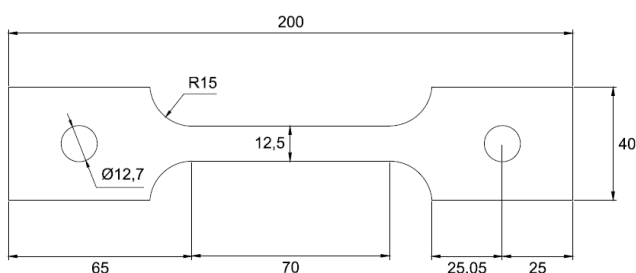
	H-W700	H-S355	HUP-W700	HUP-S355
$K_{el}$ (N/mm)	227 640	227 640	77 280	77 280

## 6. Laboratorieforsøk

Forsøksprogrammet i denne rapporten bestod av to materialforsøk og tre forsøk av endeplateskjøter.

### 6.1 Materialtest

To materialforsøk av Weldox 700 materiale ble gjennomført, der materialprøvene var hentet fra lengderetningen og tverretningen av en større stålplate, og de blir heretter kalt henholdsvis W700-1 og W700-2 i rapporten. Figur 6.1 viser den nominelle geometrien til en standard materialprøve brukt i materialforsøk. Fra materialforsøkene fikk man kraft-forskyvningskurver som ble brukt til å finne flyte- og bruddspenningen til materialet, og til å konstruere en materialkurve for Weldox 700 til bruk i numerisk analyse.



Figur 6.1: Nominell geometri av materialprøve



Figur 6.2: Materialprøver etter brudd

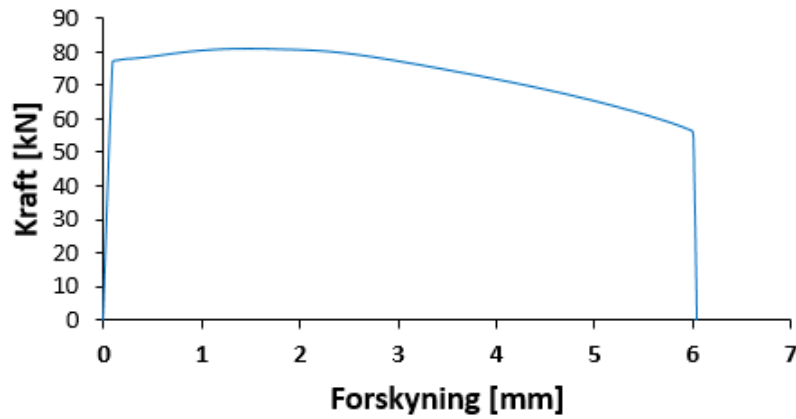
Bredden og tykkelsen til materialprøvene ble målt eksakt før start. Dette for å kunne konstruere et mest mulig korrekt spenning-tøyings forløp for materialprøvene, og de eksakte målene er gitt i tabell 6.1.

Tabell 6.1: Eksakte mål av materialprøvene (alle mål i mm)

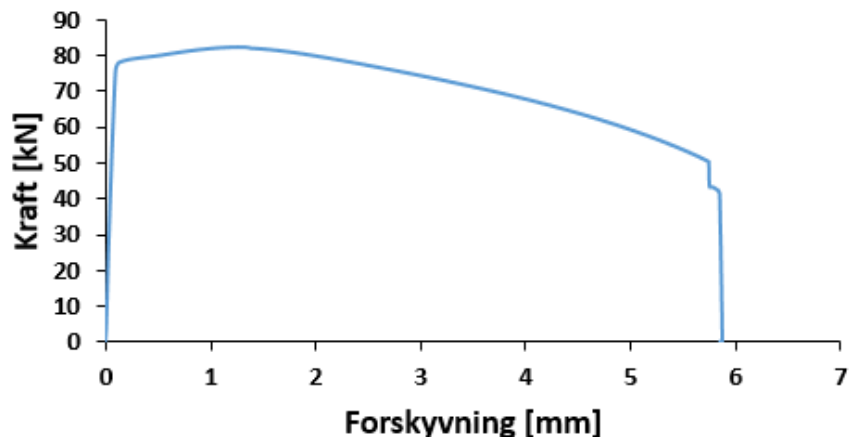
Materialprøve	Tykkelse	Bredde
W700-1	7,77	12,67
W700-2	7,78	12,68

Materialforsøkene ble utført i en INSTRON 100 kN universalprøvningsmaskin med konstant hastighet på 1 mm/min til brudd. Før forsøkene startet ble et måleinstrument kalt ekstensiometer brukt til å måle små lengdeforandringer festet midt på materialprøvene. En datamaskin logget kraft og tilhørende forskyvning fra maskin og ekstensiometret med en frekvens på 10 Hz. I første del av forsøkene kom forskyvningene fra ekstensiometret, men dette ble tatt av da kraften i maskin var kommet opp i 80 kN og 82 kN for henholdsvis W700-1 og W700-2. Dette ble gjort for å hindre at ekstensiometret ble ødelagt. Etter dette er forskyvningene i maskin brukt til å beregne tøyningene i materialprøvene. Figur 6.2 viser de to materialprøvene etter brudd med W700-1 øverst i bildet og W700-2 nederst.

Figur 6.3 viser kraft-forskyvningskurvene for materialprøvene. Fra kurvene ser man at største kraft under forsøkene var i overkant av 80 kN for begge materialprøvene, og at brudd kom ved omtrent 6 mm tøyning av prøvene.



(a) W700-1



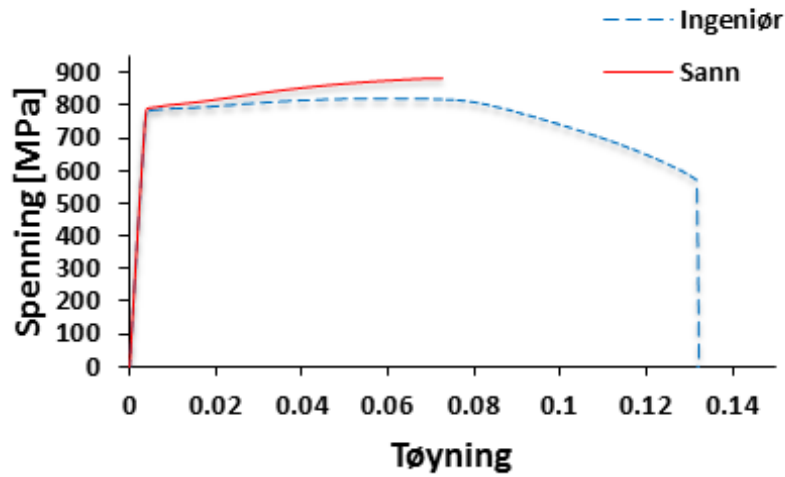
(b) W700-2

Figur 6.3: Kraft-forskyvningskurver

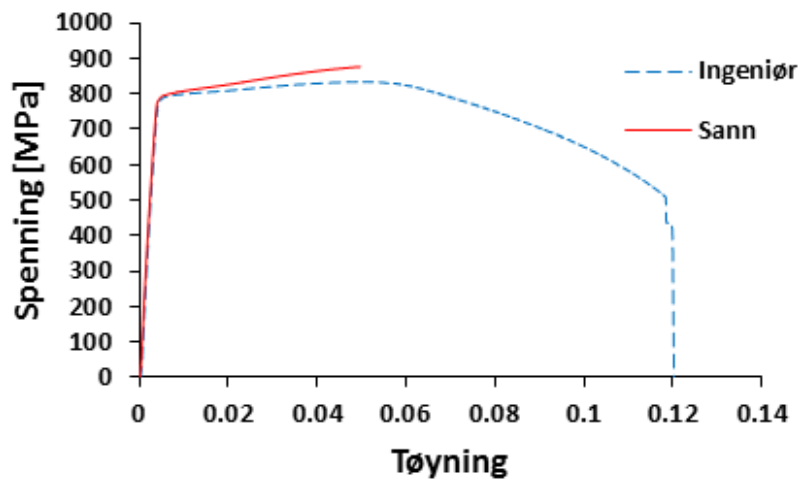
Figur 6.4 viser spenningstøyningskurvene for materialprøvene for både ingeniør verdier og sanne verdier. Kurvene for sann spenning-sann tøyning vises bare fram til man fikk diffus innsnevring i materialprøvene, fordi beregningsreglene for sanne verdier ikke er gyldige etter dette.

Bruddspenningene til materialprøvene ble satt lik den maksimale ingeniørspenningene prøven, og de ble funnet til 823 MPa for W700-1 og 834 for W700-2. Dette gav en midlere verdi av bruddspenningen lik 829 MPa.

Fra figur 6.4 ser man at Wieldox 700 manglet flyteplatå, og ingeniørspenningen som ville gitt en varig tøyning på 0,2 % i materialprøvene kalt  $f_{0,2}$  spenningen ble valgt til flytespenning.

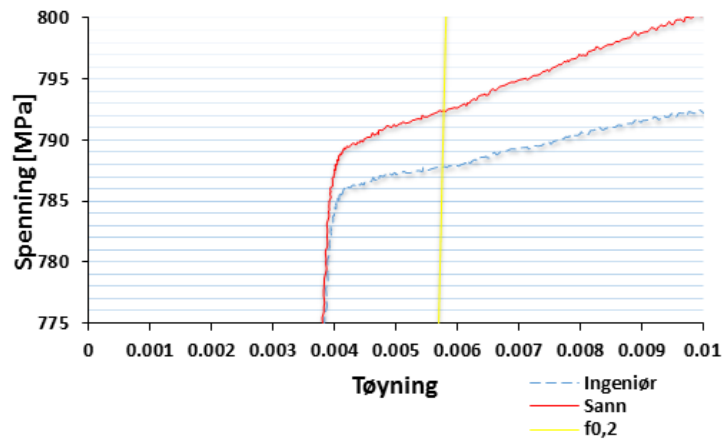


(a) W700-1

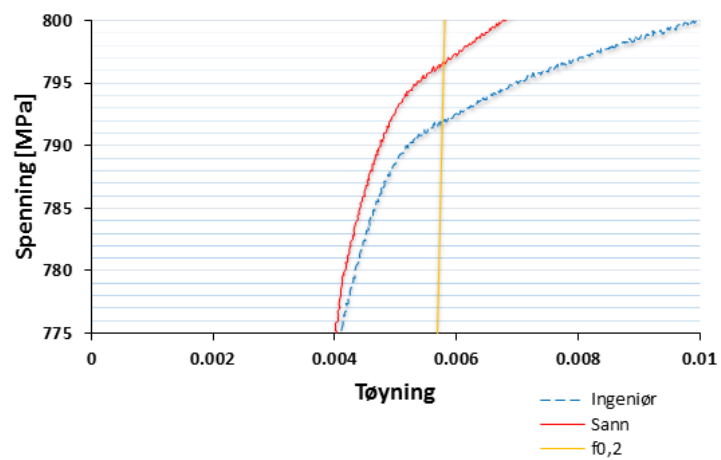


(b) W700-2

Figur 6.4: Spennings-tøyningskurver, W700



(a) W700-1



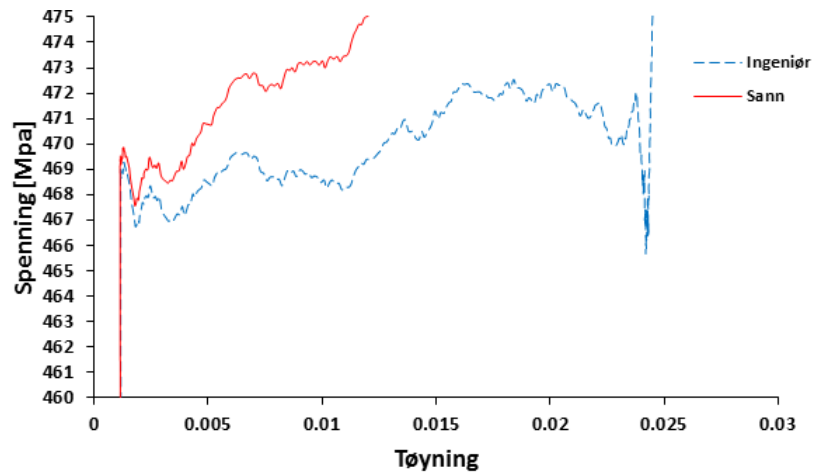
(b) W700-2

Figur 6.5: Flytespenning materialprøver, W700

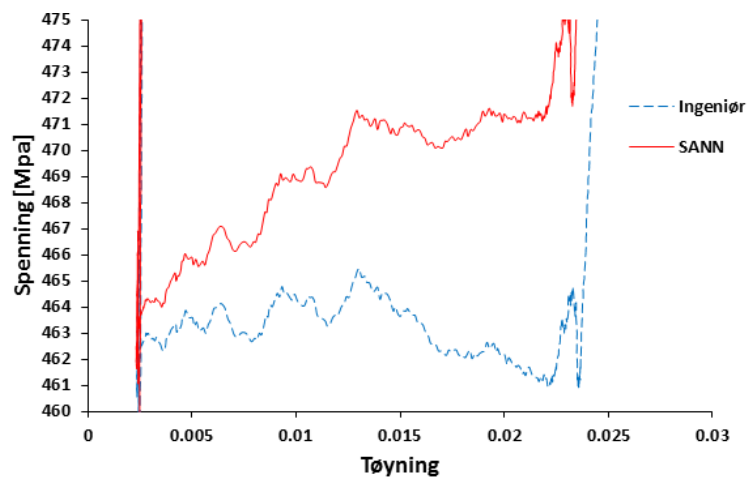
Flytespenningen i de to materialprøvene ble ut fra kurvene i figur 6.5 funnet lik 788 MPa og 792 MPa for henholdsvis W700-1 og W700-2. Dette gav en midlere  $f_{0,2}$  spenning for de to materialprøvene lik 790 MPa.



Materialprøvene for S355 ble undersøkt av Egeland & Torstvedt [5], og der ble flytespenningen satt til den ingeniørspenningen som ville ført til en permanent tøyning materialprøvene.



(a) S355-Lengderetning



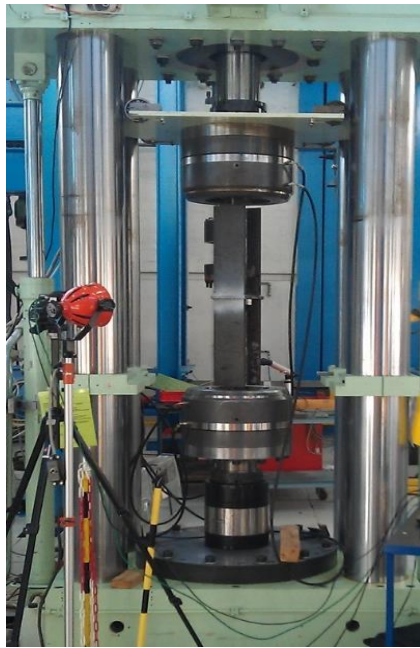
(b) S355-Tverretning

Figur 6.6: Flytespenning materialprøver S355

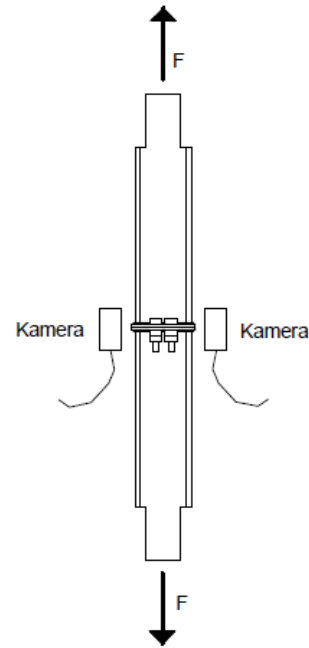
Fra spenning-tøyningskurvene i figur 6.6 ble flytespenningen for lenge- og tverretningen bestemt til henholdsvis 468 MPa og 463 MPa, og flytespenningen til S355 ble satt lik 465 MPa.

## 6.2 Prøveoppsett

Ved undersøkelse av prøvestykkene ble det benyttet en Schenck TREBEL strekkmaskin med kapasitet på 1000 kN, som betydde at den kunne holde et prøvestykke fast mellom klembakkene for en strekkraft opp til 1000 kN. Utstikkene på 150 mm i hver ende av prøvestykkene ble plassert mellom klembakkene til strekkmaskin. Den nedre delen av prøvestykket ble holdt fast, mens den øvre delen ble dratt oppover med en konstant hastighet. Figur 6.7 (a) viser prøvestykket H-W700 klart til forsøk mens figur 6.7 (b) illustrere prøveoppsettet.



(a) Strekkmaskin



(b) Prøveoppsett (illustrert med H-profiler)

Figur 6.7: Prøveoppsett

De viktige parameterne å dokumentere fra forsøkene var kraft fra strekkmaskinen og tilhørende relative forskyvning i endeplateskjøten (forskyvningen mellom endeplatene). For å kunne måle den relative forskyvningen mellom endeplatene ble to digitale kameraer brukt til å ta bilder av forbindelsene gjennom forsøkene. For prøvestykkene med H-profiler ble kameraene plassert på hver sin side av skjøten og rettet mot midten av flensene. Ved forsøket med HUP-profiler ble kameraene plassert på hver sin side av skjøten og rettet mot midten av de lengste sidene på endeplatene. Dette ble gjort fordi det var der de største relative forskyvningene mellom endeplatene ville finne sted, som er illustrert i figur 6.8 med prøvestykkene H-W700 og HUP-W700 etter endt forsøk. En datamaskin logget kraft og forskyvning fra strekkmaskin og tilhørende bilder fra de to kameraene.



(a) H-W700

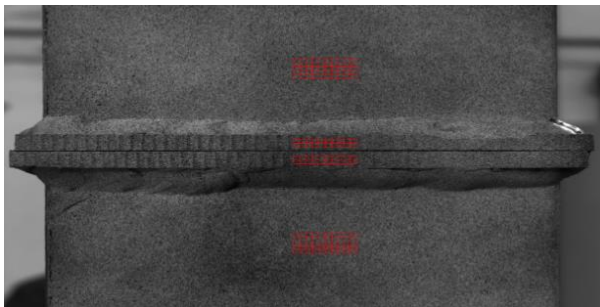


(b) HUP-S355

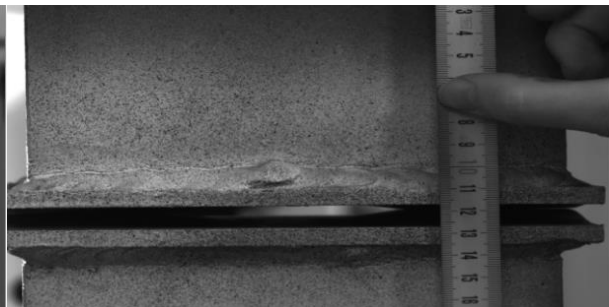
Figur 6.8: Relativ forskyvning mellom endeplater

Programmet eCorr v2.0 ble brukt til å analysere bildene fra forsøkene. Ved analysene ble det lagd et elementnett i begge endeplatene ved midten av skjøten. Programmet eCorr v2.0 baserer analysen på Digital Image Correlation, der et prikkmønster i et elementnett følges fra bilde til bilde som

forklart i kapittel 2.6. På den måten vil elementnettene forskyves i takt med forskyvningen mellom endeplatene. Ved å feste en vektor i noder på elementnettene vil den tøyes i takt med økningen i avstand mellom endeplatene, og man kan måle forskyvningen mellom endeplatene. I analysene ble vektorene lagt mellom midten av endeplatene. Deformasjon over tykkelsen av endeplatene under testene var så liten sammenlignet med den totale forskyvningen mellom endeplatene, at det ble derfor sett bort fra deformasjon over endeplatetykkelsen. Lengde forandringen av vektoren fra bilde til bilde ble av programmet eCoor v2.0 oppgitt i piksler. Hvert kamera ble derfor kalibrert mot en kjent avstand ved forsøkene, for å kunne konvertere forskyvningen mellom endeplatene fra piksler over til mm. Figur 6.9 og figur 6.10 viser elementnett brukt ved analyse av H-W700 og hvordan kameraene ble kalibrerte ved testene.



Figur 6.9: Elementnett brukt ved analyse



Figur 6.10: Kalibrering av kamera ved test

### 6.3 Forsøksprosedyre

Før prøvestykkene ble montert sammen og installert i strekkmaskin ble dimensjonene til endeplatene og profilene målt. De eksakte målene av endeplater og profiler er lagt i vedlegg A.

Ved prøvestykkene H-W700 og H-S355 ble boltene strammet opp for hånd og før avstanden mellom endeplatene ble målt. Forsøket med av prøvestykket HUP-W700 hadde to trinn. I første trinn ble boltene kun ble strammet opp for hånd, mens boltene i andre trinn ble strammet opp med momentnøkkel til 100 Nm.

For å kunne bruke programmet eCoor v2.0 til å finne forskyvningene mellom endeplatene ble de ferdig monterte prøvestykkene sprayet med hvit lakk over endeplateskjøtene og deretter et svart prikkemønster.

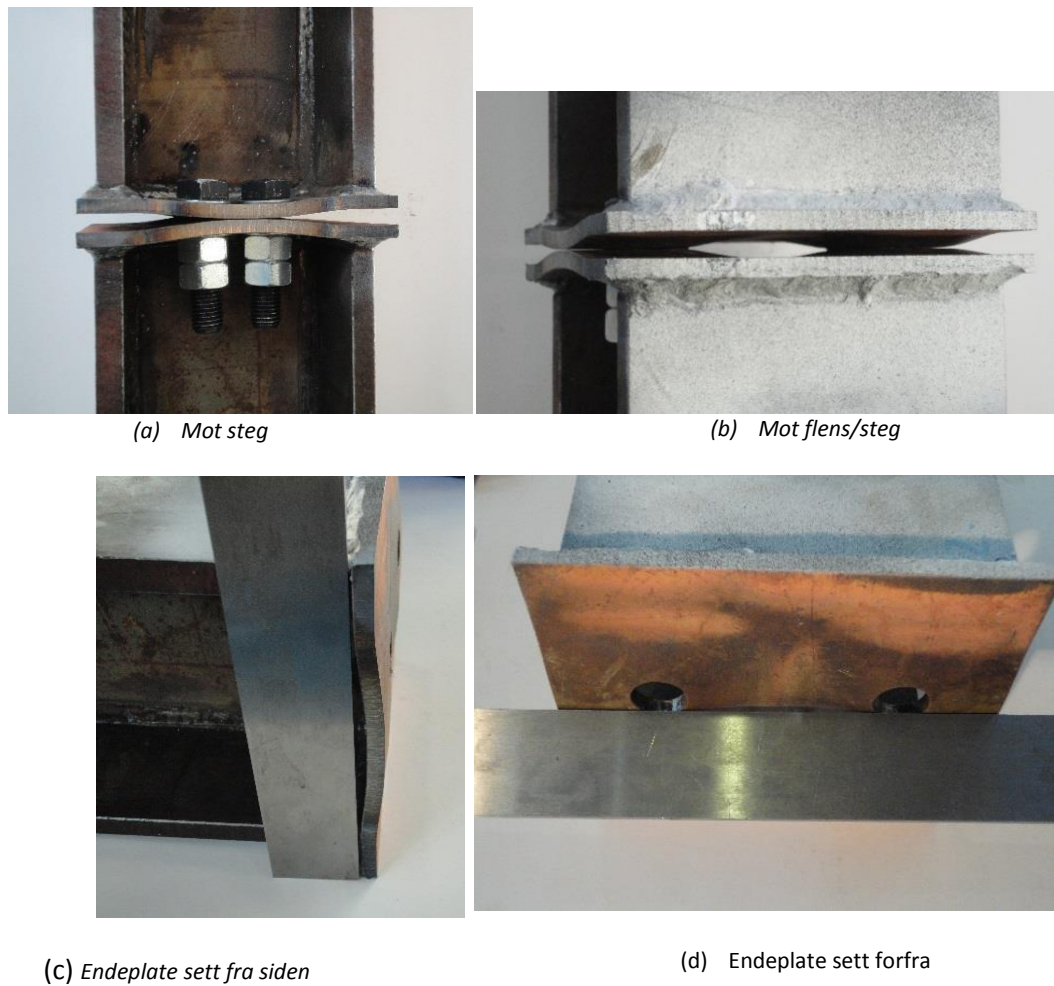
Strekkingen av prøvestykkene H-W700 og H-S355 skjedde med en konstant hastighet til brudd. Mens prøvestykket HUP-W700 ble i trinn I kjørt opp til strekkraft 50 kN og ned til 0 kN to ganger ned to ganger. I trinn II av forsøket ble det kjørt opp til strekkraft 50 kN og ned til 0 kN før prøvestykket ble kjørt til brudd. I begge trinnene skjedde strekkingen med en konstant hastighet, og strekkingen var 0,5 mm/min ved alle prøvestykkene. Dette tilsvarte hastigheten den øvre klembakken beveget seg oppover med. Data fra forsøket med prøvestykke H-W700 ble logget hvert sekund, mens data ble logget hvert tredje sekund under forsøkene med prøvestykkene H-S354 og HUP-W700.

## 6.4 Observasjoner ved testene

### **H-W700**

- Det ene kameraet sluttet å registrere bilder etter 100 sekund, og 28 bilder hadde gått tapt på denne tiden.
- Etter 1173 sekund sluttet også kamera to å registrere bilder. Fra start av forsøket til det sluttet å registre bilder hadde 263 bilder gått tapt. Etter dette ble forskyvningene basert på maskinforskyvningene.
- Etter at prøvestykket var ferdig montert hadde man en klaring på ca. 0,5 mm mellom endeplatene ved flensene. Man kunne stikke et ark lagt dobbelt inn mellom endeplatene og helt inn til boltene.
- Ved 135 kN var det blitt dannet en glippe mellom endeplatene i prøvestykket.
- Ved 210 kN hadde man begynnende sammen klemming av endeplatene.
- Ved 420 kN hadde klaringen mellom flensetuppene kommet opp i ca. 5 mm.
- Maksimal kraft under forsøket ble 491 kN, og tilsvarte en relativ forskyvning mellom endeplatene på 10,7 mm målt med kameraene. Den korresponderende maskinforskyvningen var 12,3 mm.
- Etter avlasting ble avstanden mellom endeplatene målt til 10 mm. Noe mindre enn den maksimale forskyvningen, fordi det elastiske bidraget hadde gått tilbake.
- Boltene hadde ingen merkbar deformasjon etter forsøket.

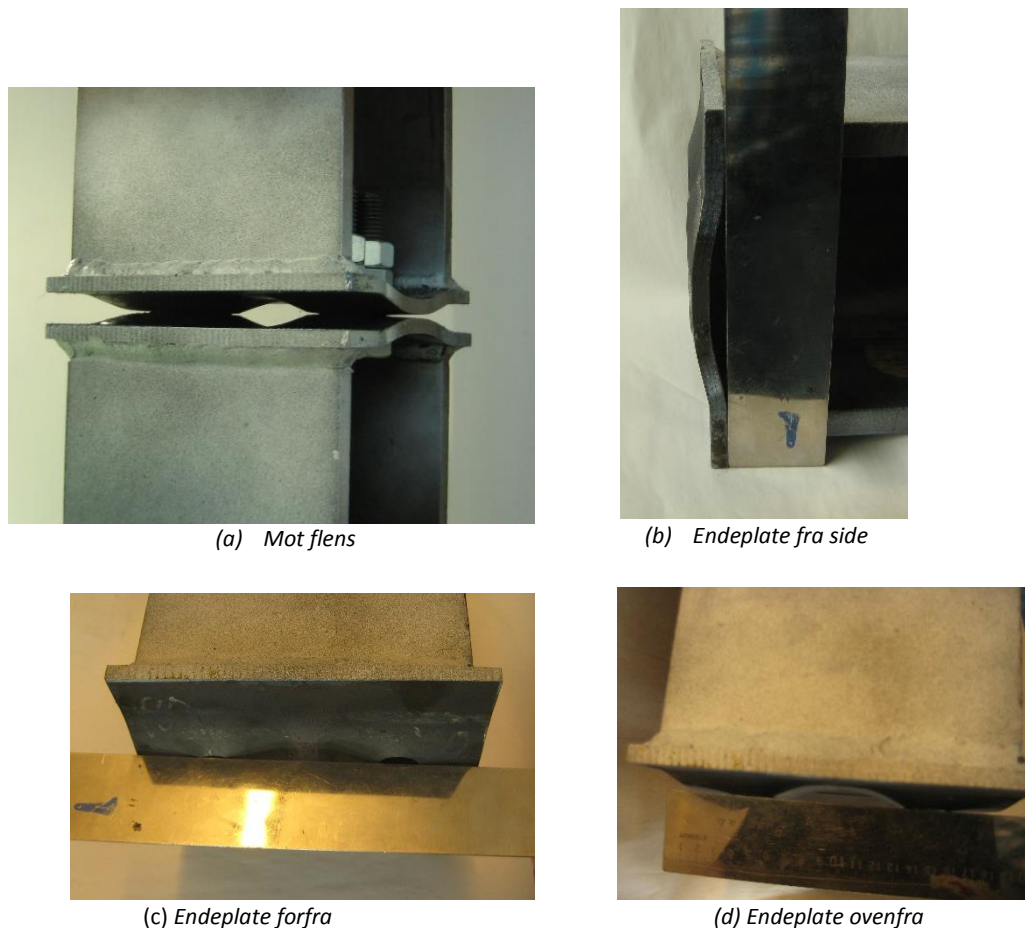
Bildene (a) og (b) i figur 6.11 viser H-W700 etter brudd avlastet til en strekkraft på 200 kN. Her ser man tydelig at det er kontakt mellom endeplatene ved boltene for utvikling av hevearmkraft. At endeplatene har gjennomgått plastiske deformasjoner illustreres i bilde (c) og (d) med den ene endeplaten. Der man ser at platen etter forsøket har fått en varig deformasjon ved profilet og boltene.



Figur 6.11: Prøve H-W700 etter endt forsøk

### H-S355

- Bildene fra det ene kamerat ble ødelagt grunnet sollys fra 207 sekund og ut forsøket.
- Prøvestykket hadde anlegg rundt hele endeplaten før forsøksstart.
- Ved 150 kN begynnende glippe mellom endeplatene.
- Ved 200 kN var det blitt dannet glippe mellom endeplatene.
- Ved 280 kN klaringen mellom flensetuppene kommet opp i ca. 5 mm.
- Ved 430 kN klaringen mellom flensetuppene på ca. 20 mm.
- Den maksimale kraften man oppnådde var 435 kN, og det tilsvarte en relativ forskyvning mellom endeplatene målt med kameraene lik 19,7 mm og korresponderende maskinforskyvningen var 21,0 mm.
- Etter avlasting ble avstand mellom endeplatene målt lik 18,0 mm.



Figur 6.12: Prøve H-S355 etter endt forsøk

Fra figur 6.12 kjenner man igjen det samme deformasjonsmønsteret som for H-W700. Man ser tydelig at endeplatene ble bøyd ved profilet og boltene. Fra bilde (a) ser man at det ikke var kontakt mellom endeplatene ved boltene etter avlasting. Dette kommer av at endeplatene hadde fått en varig deformasjon ved boltene grunnet strekkingen av prøvestykket. Ved avlasting roterte endeplatene om boltene, som følge av at endeplaten gikk litt ned ved steget i H-profilet ved avlasting ble derfor kantene av endeplatene løftet. Man ser man også at endeplatene i S355 hadde større plastiske deformasjoner enn endeplatene i Weldox 700. Ved H-W700 var den relative forskyvningen i endeplatene ved boltene og steget ca. 5 mm, mens den ved H-S355 var ca. 10 mm.

### **HUP-W700**

#### *Trinn 1*

- Glippen mellom tuppene på endeplatene var 4,53 mm og 5,51 mm før forsøkstart
- Ved 50 kN var avstand mellom tuppene på endeplatene 3,09 mm og 4,71 mm
- Ved 50 kN var avstand mellom endeplatene ved profil 3,42 mm

#### *Trinn 2*

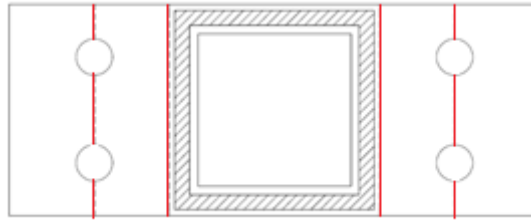
- Det ene kameraet sluttet å registrere bilder etter at strekkraften var kommet ned til 0 kN før man begynte å kjøre det til brudd.
- Ingen målbar glippe mellom endeplatene med skyvelær før forsøksstart

- Ved 77 kN begynner sammenklemming av tuppene på endeplatene.
- Ved 88 kN glippe gjennom hele prøvestykket.
- Ved 150 kN glippe på ca. 3 mm mellom endeplatene ved profilene.
- Ved 180 kN glippe på ca. 5 mm mellom endeplatene ved profilene.
- Ved 200 kN glippe på ca. 10 mm mellom endeplatene ved profilene.
- Den maksimale kraften man oppnådde i løpet av testen var 215 kN. Avstanden mellom profilene ved denne kraften ble målt til 21,42 mm ved profilene med skyvelær.
- Etter avlasting var avstanden mellom endeplatene ved profilene 16,71 mm med skyvelær.



Figur 6.13: Prøve HUP-W700 etter endt forsøk

Figur 6.13 viser bilder av HUP-W700 ved trinn II. Bilde (a) viser at endeplatene hadde anlegg ved hele langsiden i bildet. Ved bilde (b) ser man tydelig at endeplatene er klemt sammen ved de korte side, som gjør at hevearmkraften har begynt å utvikle seg ved boltene. Etter endt forsøk ser man tydelig i bilde (c) og (d) at det endeplatene har fått en permanent deformasjon ved profilet og boltene. Ut fra den dimensjonerende flytemekanismen for det ekvivalente T-stykke var der også her man forventet å få flytelinjene som vist i figur 6.13.



Figur 6.14: Flytemekanisme HUP-W700

Ved sammenligning av prøvestykkene HUP-W700 og HUP-S355 (uten profiler) ser man at endeplatene i begge tilfeller har gjennomgått det samme deformasjonsmønsteret, men at deformasjon var noe større med endeplater i S355 kontra W700. Dette var det samme som man observert ved testene av H-W700 og H-S355.

## 6.5 Resultater

### **Kraft-forskyvningskurver**

Grafene i denne delen ble basert på kraft fra strekkmaskin, og analyserte forskyvninger fra bildene med eCoor v2.0 og maskinforskyvninger. En midlere verdi av forskyvningene til kameraene ble brukt så lenge begge registrerte bilder, med bare et kamera som registrerte bilder ble forskyvningen beregnet ut fra bilder hentet fra dette. I de tilfellene ingen kameraer hadde registrert bilder ble maskinforskyvningene brukt til å beregne forskyvningene mellom endeplatene. For HUP-profilene blir også kraft-forskyvning for prøvestykket HUP-S355 undersøkt av Egeland & Torstvedt [5] presentert. Den maksimale kraften prøvestykkene tålte fikk man rett ut av dataene som ble logget fra forsøkene.

Forsøksresultatene er vist i tabell 6.2 for maksimal strekkraft. Mens kraft-forskyvningskurvene for de ulike profilene blir sammenlignet under.

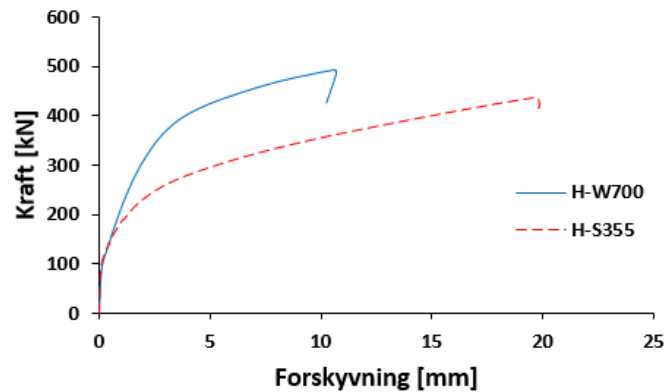
Tabell 6.2: Forsøksresultater for maksimal kraft og initial elastisk stivhet

Prøvestykke	$F_{Rd}$ [kN]
H-W700	491
H-S355	435
HUP-W700	217
HUP-S355	150

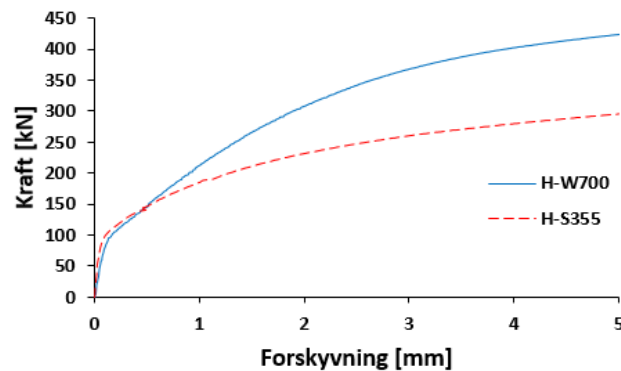


### Prøvestykker med H-profiler

Kraft-forskyvningskurvene for prøvestykkene med H-profiler er vist i figur 6.18.



(a) Kraft-forskyvning



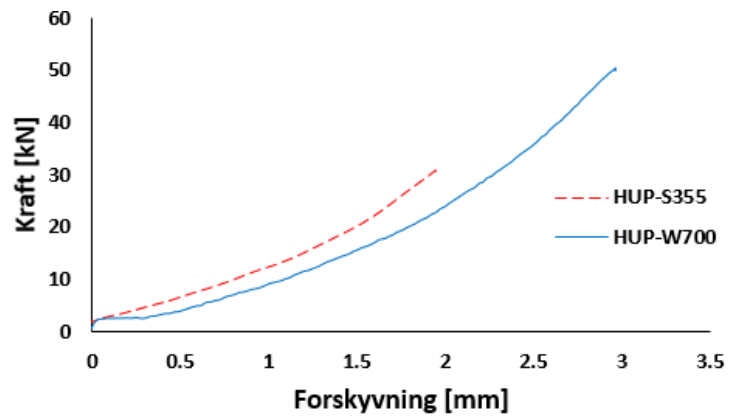
(a) Kraft-forskyvning første 5 mm

Figur 6.15: Kraft-forskyvningskurver for H-W700 og H-S355

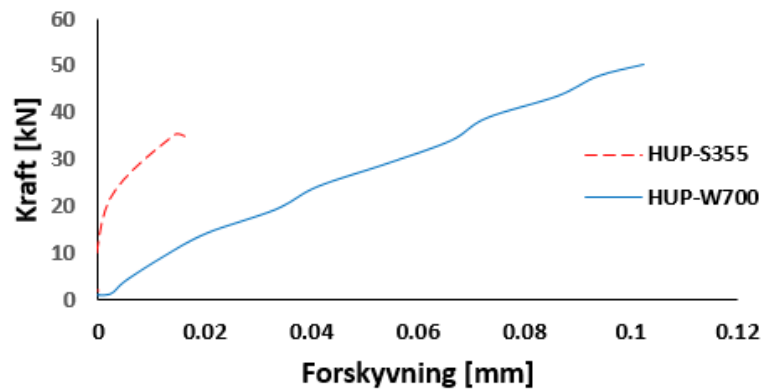
Kurvene viser at prøvestykkene hadde omtrent samme oppførsel opp til en forskyvning på 0,5 mm med H-S355 litt over H-W700. Grunnen til at H-S355 hadde en stivere oppførsel helt i starten kan være at det her var anlegg mellom endeplatene rundt hele skjøten mens det ved H-W700 var en klaring mellom flensene på ca. 0,5 mm. Etter dette viser H-W700 en stivere oppførsel enn H-S355 og oppnår en høyere maksimal strekkraft, men har en mindre deformasjonskapasitet. Forskyvningen i H-W700 var bare omtrent halvparten av det H-S355 oppnådde. Strekkingen av begge prøvestykkene ble stoppet etter at det kom et klikk fra dem. Noe som kunne tyde på at en sveis hadde gått til brudd.

### Prøvestykker med HUP-profiler

Kraft-forskyvningskurvene for prøvestykker med HUP-profiler er vist i figur 6.19 og 6.20.

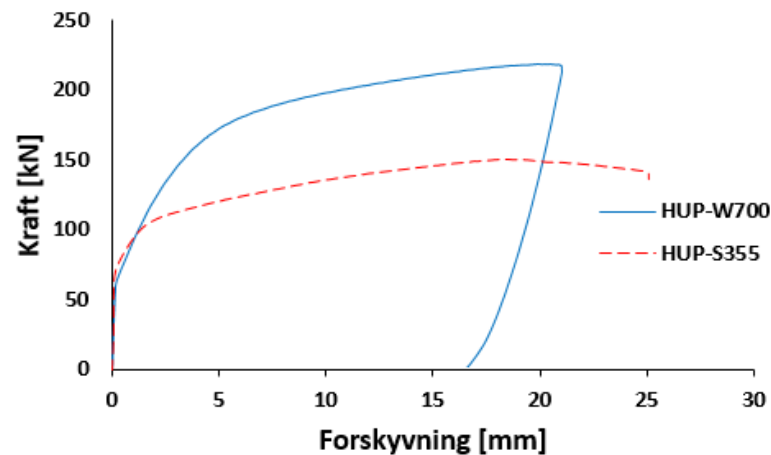


(a) Trinn I

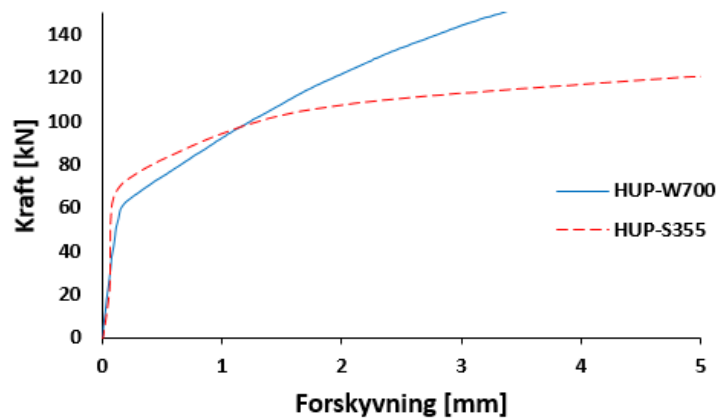


(b) Trinn II

Figur 6.16: Kraft-forskyvningskurver for HUP-W700 og HUP-S355



(a) Trinn II, Kraft-forskyvning



(b) Trinn II, Kraft-forskyvning første 5 mm

Figur 6.17: Kraft-forskyvningskurver for HUP-W700 og HUP-S355

Bilde (a) i figur 6.19 viser kurvene for prøvestykkene HUP-W700 og HUP-S355 kjørt til henholdsvis 50 kN og 30 kN uten forspenning. Kurvene ser ut til å gå rimelig parallelt der de slutter, og det betyr at stivheten er omtrent det samme. Noe man også forventer da stivheten bare er avhengig av  $E$ ,  $t$  og  $b$ . Med forspenning viser HUP-W700 en tilnærmet lineær oppførsel opp til 50 kN, som tilsvarte en forskyvning mellom endeplatene på 0,1 mm. HUP-S355 nådde med forspenning i underkant av 40 kN etter ca. 0,02 mm.

Fra kraft-forskyvningskurvene for prøvestykkene i figur 6.20 ser man at kurvene har tilnærmet samme stivhet opp til en forskyvning på ca. 1 mm. Etter dette viser HUP-W700 stivere oppførsel og oppnår en større maksimal strekkraft, men akkurat som for H-profilene har prøvestykket med Wieldox 700 mindre deformasjonskapasitet sammenlignet med S355. Forskjellen i forskyvning mellom prøvestykker med Wieldox 700 og S355 var rundt 5 mm for HUP-profiler, mens det var en forskjell på rundt 10 mm med H-profiler. Strekkingen av prøvestykkene ble også her stoppet etter at man hørte et klikk fra dem.



## 7. Numerisk analyse

Det ble gjennomført numerisk analyse av prøvestykkene ved hjelp av elementprogrammet Abaqus 6.11-1. Prøvestykkene ble modellert med de samme belastningsbetingelsene som i laboratorieforsøket. Der endeplateforbindelsene ble modellert bestående av følgende komponenter:

- Profil
- Sveis
- Bolter
- Endeplater
- Stiv plate

Stål oppfører seg lineært elastisk for små spenninger eller tøyninger. Ved en gitt spenning, flytespenning, blir oppførselen til materialet elastisk-plastisk. I det elastisk-plastisk domenet er responsen til stålet irreversibel, som betyr at deler av tøyningen ikke går tilbake ved avlastning. Tøyningen blir derfor delt inn i en reversibel del, elastisk tøyning, og en irreversibel del, plastisk tøyning [7].

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p \quad (7.1)$$

Der  $\varepsilon^e$  er elastisk tøyning og  $\varepsilon^p$  er plastisk tøyning.

De elastiske materialdataene for de ulike delkomponentene ble hentet fra NS-EN 1993-1-1 [6]. De plastiske materialegenskapene nødvendig for å få fram effekten av de ikke-lineære materialegenskapene i analysene var basert på materialforsøk og nominelle verdier. Materialegenskapene til Weldox 700 ble hentet fra materialforsøk utført med maskinerte strekkstaver fra endeplatematerialet Weldox 700 i forbindelse med denne rapporten. For de oppsveiste H-profilene ble det brukt materialdata hentet fra prosjektoppgaven av Furnes [31], og for hulprofilet og S355 ble det brukt materialdata hentet fra masteroppgaven av Egeland & Torstvedt [5]. Materialegenskapene til bolter og sveiser ble basert på nominelle verdier.

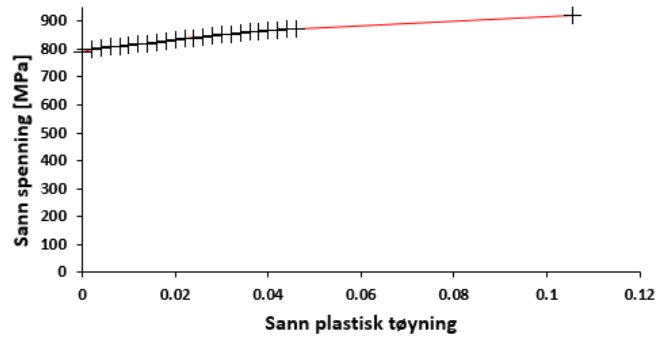
### 7.1 Materialer

Presenterer her materialkurvene for de ulike komponentene som ble benyttet ved de numeriske analysene av endeplateforbindelsene. Der kurvene er basert på mange punkter er materialdata lagt i vedlegg C.

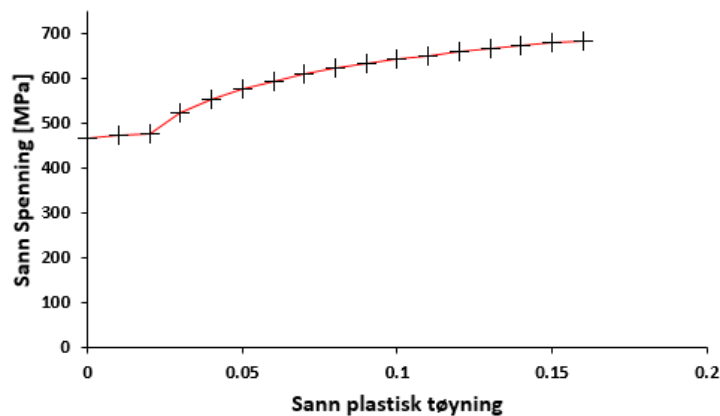
#### 7.1.1 Endeplater

Materialkurvene benyttet for endeplatematerialene er vist i figur 7.1. For Weldox 700 var kurven en middelvei av de to gjennomførte materialtestene. Der antall punkter benyttet til å definere kurvene i Abaqus 6.11-1 var tilstrekkelig til å beskrive forløpet, som materialtestene hadde generert for Weldox 700, og materialdata for kurven er lagt i vedlegg C.

Materialkurven benyttet for endeplatene av S355 var middelvei av materialdata fra Egeland & Torstvedt [5] og Karlsen [11], og materialdata på kurven finnes i vedlegg C.



(a) Weldox 700



(b) S355

Figur 7.1: Materialkurver endeplatematerialer

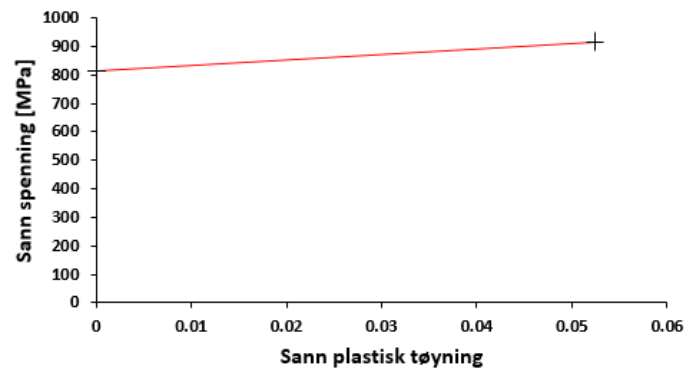
### 7.1.2 Profiler

H-profilet var som nevnt tidligere sveist opp av Weldox 700 materiale. Det var blitt gjort seks materialforsøk av de forskjellige komponentene i profilet ved prosjektoppgaven av Furnes [31]. En middelvei av disse seks materialforsøkene ble benyttet ved de numeriske analysene. Tabell 7.1 viser hvilke materialdata materialkurven var basert på.

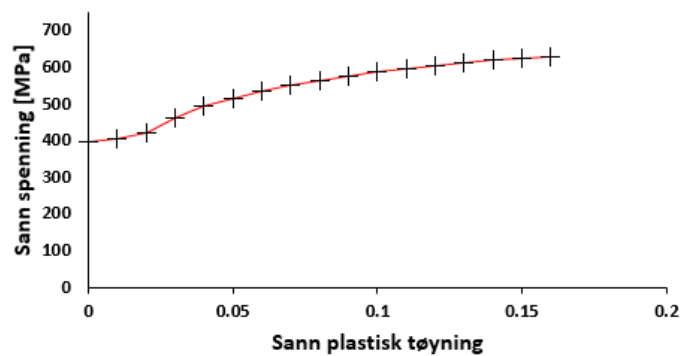
Tabell 7.1: Materialdata H-profiler

Sann spenning	Sann plastisk tøyning
$\sigma_{\text{sann}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\epsilon_{\text{pl}}$
818	0
917	0,0524

Materialkurven i figur 7.2 (b) for hulprofilet brukt i den numeriske analysen var basert på materialforsøk utført i masteroppgaven til Egeland & Torstvedt [5], og materialdata til kurven er lagt i vedlegg C.



(a) H-profiler



(a) HUP-Profilen

Figur 7.2: Materialkurver for profiler

### 7.1.3 Bolter

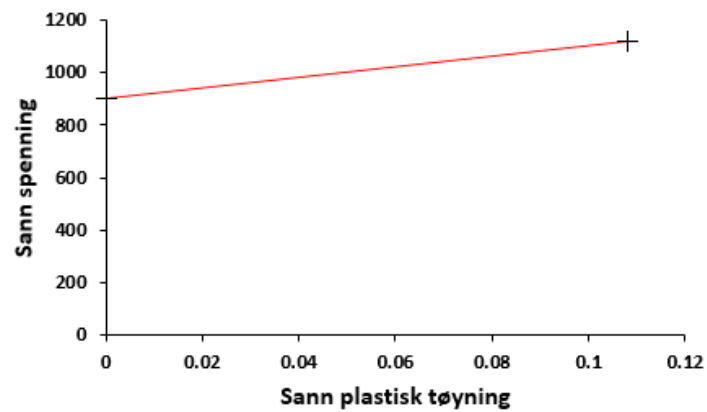
Forsøksprogrammet i denne rapporten benyttet bolter i fasthetsklasse 10.9 og 8.8, som vil si at den nominelle bruddspenningen til boltene var henholdsvis 1000 MPa og 800 MPa. Mens den nominelle flytespenningen var 900 MPa og 640 MPa for henholdsvis fasthetsklasse 10.9 og 8.8. For begge fasthetsklassene ble det antatt lineært elastisk materiale fram til flytespenning, og deretter en plastisk oppførsel. Materialdata som materialkurvene i figur 7.3 ble basert på er presentert i tabell 7.2 og 7.3.

Tabell 7.2: Materialdata for 10.9 bolter

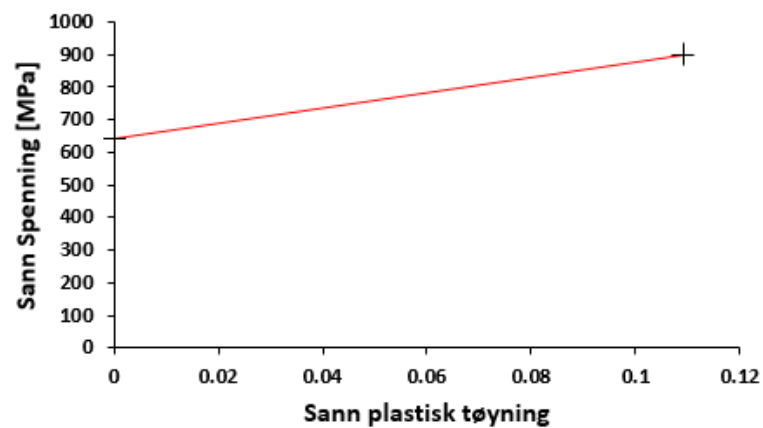
Sann spenning	Sann plastisk tøyning
$\sigma_{\text{sann}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\epsilon_{\text{pl}}$
900	0
1120	0,1080

Tabell 7.3: Materialdata for 8.8 bolter

Sann spenning	Sann plastisk tøyning
$\sigma_{\text{sann}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\epsilon_{\text{pl}}$
640	0
896	0,1091



(a) 10.9 bolter



(b) 8.8 bolter

Figur 7.3: Materialkurver for boltene



#### 7.1.4 Sveiser

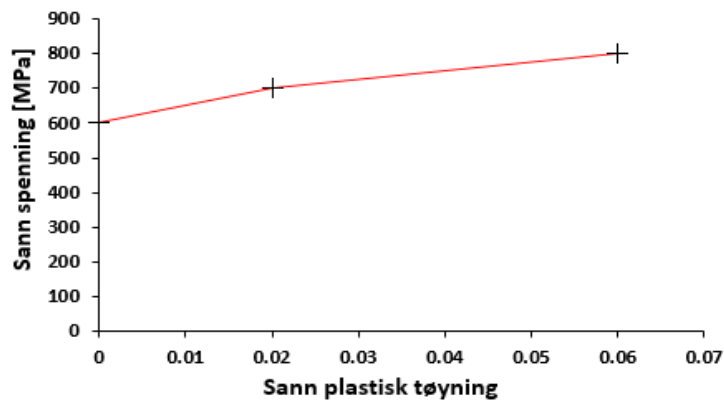
I forbindelse med testprogrammet til denne rapporten ble det brukt to typer sveiseavsett som forklart i kapittel 5. Da sveisematerialet alltid vil være en oppblanding av materialene til delene som sveises og sveiseavsettet ble det valgt å bruke to materialkurver for sveisene ved de numeriske analysene. Ved H-W700 ble det brukt en egen materialkurve, fordi både delene som ble sveist og avsett hadde høy fasthet. For H-S355 og HUP-W700 ble det brukt samme materialkurve, og denne materialkurven hadde en noe lavere flytespenning. De to typene sveis ble tilnærmet med materialdataene i tabell 7.4 og 7.5, som gav materialkurvene vist i figur 7.4. Materialdataene til sveisen ved H-W700 ble antatt på bakgrunn av flytespenning til sveiseavsettet og delene som ble sveist. Sveisene ville uansett ikke bli den avgjørende komponenten i de numeriske analysene, som disse antatte verdiene ville ikke påvirke resultatene fra analysen mye.

Tabell 7.4: Materialdata sveis H-S355 og HUP-W700

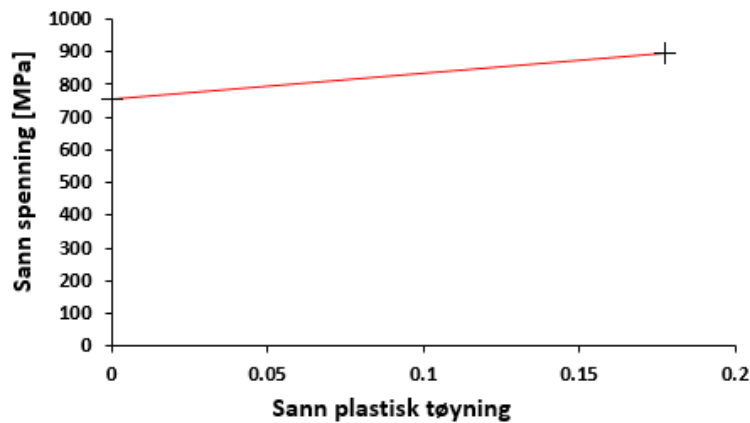
Sann spenning	Sann plastisk tøying
$\sigma_{\text{sann}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\epsilon_{\text{pl}}$
600	0
700	0,2
800	0,06

Tabell 7.5: Materialdata sveis H-W700

Sann Spenning	Sann plastisk tøying
$\sigma_{\text{sann}}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\epsilon_{\text{pl}}$
755	0
894	0.1776



(a) Sveis H-S355/HUP-W700



(b) Sveis HUP-W700

Figur 7.4: Materialkurver for sveisene

## 7.2 Elementmodellen

Ved H-profilene ble det som en forenkling ikke tatt hensyn til sveisene mellom steg og flens. For både H-profilene og HUP-profilene ble alle hjørner modellert med rette vinkler. Det ble i tillegg ikke tatt med skiver i modellen, fordi boltene ble modellert med perfekt runde bolteholder med diameter omtrent lik diameter på skivene. Det ville dermed ikke ha noe å si for kontaktflaten mellom bolt og endeplate. Det eneste vil være at man fikk et ekstra tøyingsbidrag fra boltene, men 3 mm lengre bolter i disse tilfellene vil ikke gi tøyninger av betydning i boltene. Det ble derfor valgt å forenkle modellene ved ikke å ha med skiver. For bolteskaftet ble diameteren beregnet ut fra  $A_s$ . De modellerte lengdene av profilene ble satt til å være 250 mm, mens den gjennomsnittlige profillengden ved de ulike prøvestykkene var:

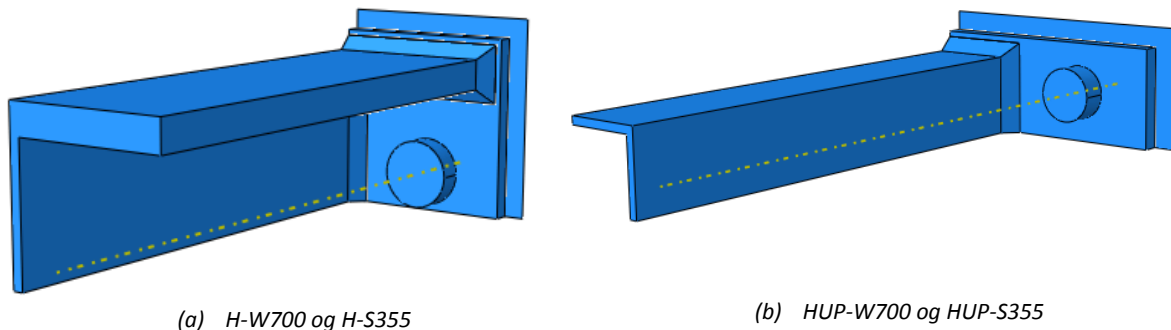
- H-W700 – 500 mm
- H-S355 – 457 mm
- HUP-W700 – 360 mm

Profilene ble modellert kortere enn den virkelige lengden, fordi det reduserte antall element og dermed analysertiden, samt at spenningene i de frie profilenden i modellene ville være små. Resultatet ville derfor ikke bli nevneverdig påvirket av å modellere profilene kortere.

For prøvestykkene med H-profiler ble boltene bare strammet til kontakt mellom prøvedelene, og det ble derfor ikke brukt forspenning i boltene ved modellering av disse forsøkene. I forsøkene med HUP-profiler ble boltene strammet opp med momentnøkkel til 100 Nm før prøvestykkene ble kjørt til brudd. I modelleringen ble det sett bort fra oppstramningen av boltene, fordi dette ga en liten kraft i boltene. I analysene ble det brukt en statisk generell analysemetode, og ikke-lineær geometri ble inkludert.

### **Symmetri**

Ved å bruke tre symmetriplan trengte man bare å modellere en åttendedel av prøvestykkene. Planene XZ og YZ ble antatt som geometriske symmetriplan for prøvestykkene og brukt som symmetriplan ved modelleringen. Planet XY var ikke et geometrisk symmetriplan for teststykkene, fordi boltehodene var på en side på endeplateskjøten og mutterne på den andre siden av skjøten. Tøyningene av boltene ville heller ikke være eksakt like Z-retningen. For å kunne bruke tre symmetriplan ble det sett bort fra dette i modellene. Modellene i figur 7.5 viser hvordan symmetrien i prøvestykkene ble brukt ved at man bare modellerte en åttendedel av forbindelsene.



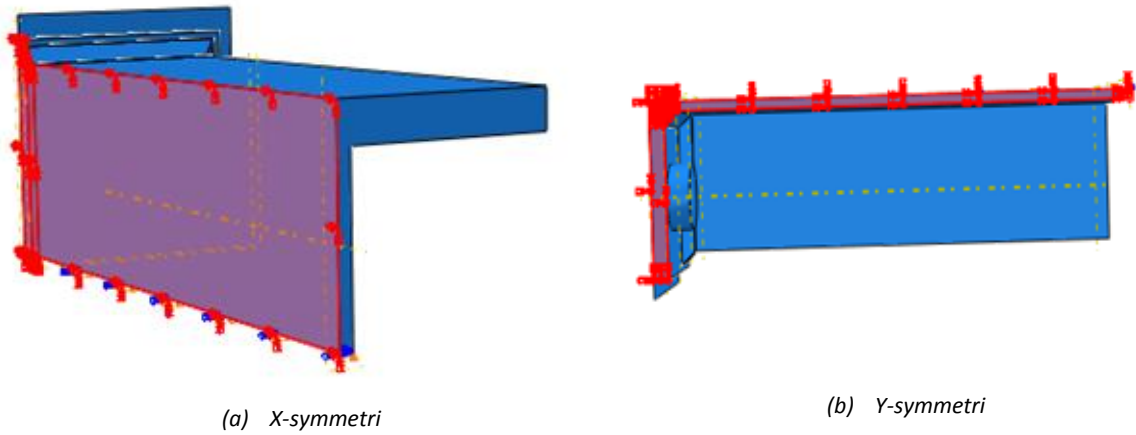
Figur 7.5: Modeller brukt i de numeriske simuleringene

### **Randbetingelser**

Under endeplatene i modellene ble det modellert en uendelig stiv plate fastholdt mot alle translasjoner og rotasjoner. Den stive platen gjorde at man kunne utnytte planet XY som et symmetriplan, fordi den stive platen vil gi samme hevarms-motholdet som endeplatene på motsatt side.

Siden ikke hele prøvestykkene ble modellert måtte det legges inn randbetingelser på sidekantene. Der prøvestykkene i modellen var kuttet i YZ planet ble det lagt inn X-symmetri, mens der det var kuttet i XZ planet ble det lagt inn Y-symmetri. Dette vil si at sidekantene ble forhindret fra translasjon X-retning og rotasjon i Y- eller Z-retningen og translasjon i Y-retningen og rotasjon i X- eller Z-

retningen for henholdsvis X- og Y-symmetri. Sidekantene det ble lagt inn symmetri på for H-W700 og H-S355 er vist i figur 7.6.

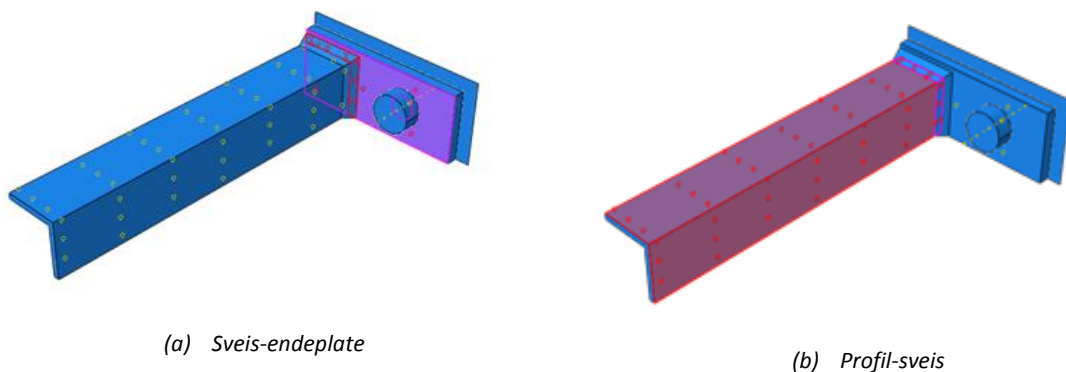


Figur 7.6: Randbetingelser for sidekantene i modellen

I modellene ble bare den fysiske lengden av boltene til midtsnittet av endeplateskjøten modellert. Underkanten av boltene ved midtsnittet ble fastholdt mot å bevege seg i lengderetningen. Boltene ble på den måten brukt til fastholdelse av modellene i lengderetningen.

### Intraksjoner

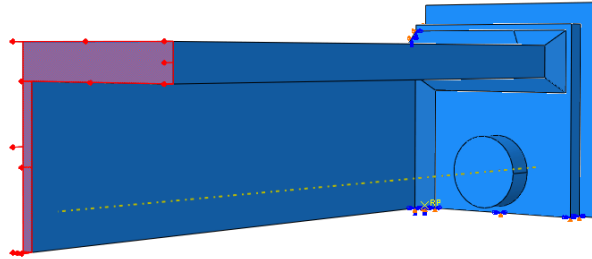
I modellene ble det brukt to typer interaksjoner kontakt og fastlåsning. Det ble brukt surface to surface kontakt med friksjonskoeffisient lik 0,3 der komponentene kunne bevege seg i forhold til hverandre. Denne type interaksjon ble brukt mellom endeplatene og boltene og mellom endeplatene og de stive platene. For å få overflatene mellom profil og sveis samt mellom sveis og endeplate til å ha samme translasjon og rotasjon ble det brukt en TIE-funksjon [32]. Det ble valgt en surface to surface tilnærming, fordi dette vil hindre problemer skapt av ulik elementinndeling i delene som bindes sammen [32]. For HUP-profiler er områder fastlåst med TIE-funksjon illustrert i figur 7.7.



Figur 7.7: Fastlåste områder

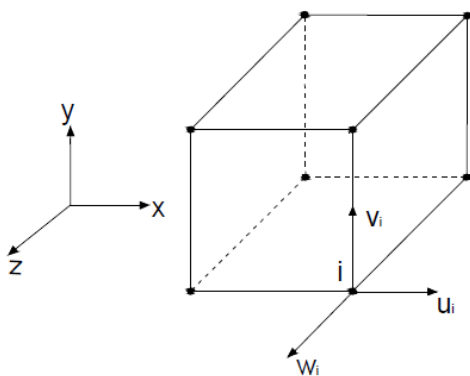
## Laster

Selve lastpåføringen av modellene skjedde ved at alle nodene i den frie enden av profilet, "Lastsnittet", ble gitt en forskyvning i profilets lengderetning. Dette er illustrert for H-profil i figur 7.8.



Figur 7.8: Lastpåføring for modellene med H-profil

## Element

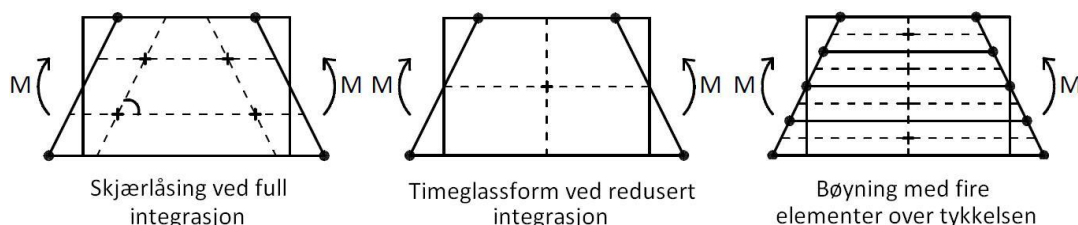


Figur 7.9: C3D8R element

Det ble i denne rapporten valgt å benytte C3D8R elementer, som vist i figur 10.15. Denne type elementer har blitt benyttet ved numeriske simuleringer i tidligere studentarbeid av lik karakter som Karlsten [12]. Dette er som navnet indikerer et volumelement med åtte noder, tre frihetsgrader i hver noder og med redusert integrasjon, og et C3D8R element er vist i figur 7.9.

Det ble benyttet redusert integrasjon for å redusere analysetiden, samt at full integrasjon av denne elementtypen kan gi en for stiv oppførsel ved bøyning grunnet skjærlåsing.

Ved redusert integrasjon er det bare et integrasjonspunkt i senter av hvert element. Dette punktet vil ikke tøyes noe ved bøyning. Elementet vil dermed ikke ha noe energioptak og vil få en timeglassfigur, som vist i figur 7.10. Dette gjør at det må være flere elementer over tykkelsen av en komponent for å kunne beskrive tøyningen forårsaket av bøyning. Av den grunn ble det valgt å bruke fire elementer over tykkelsen av endeplatene i de numeriske analysene.



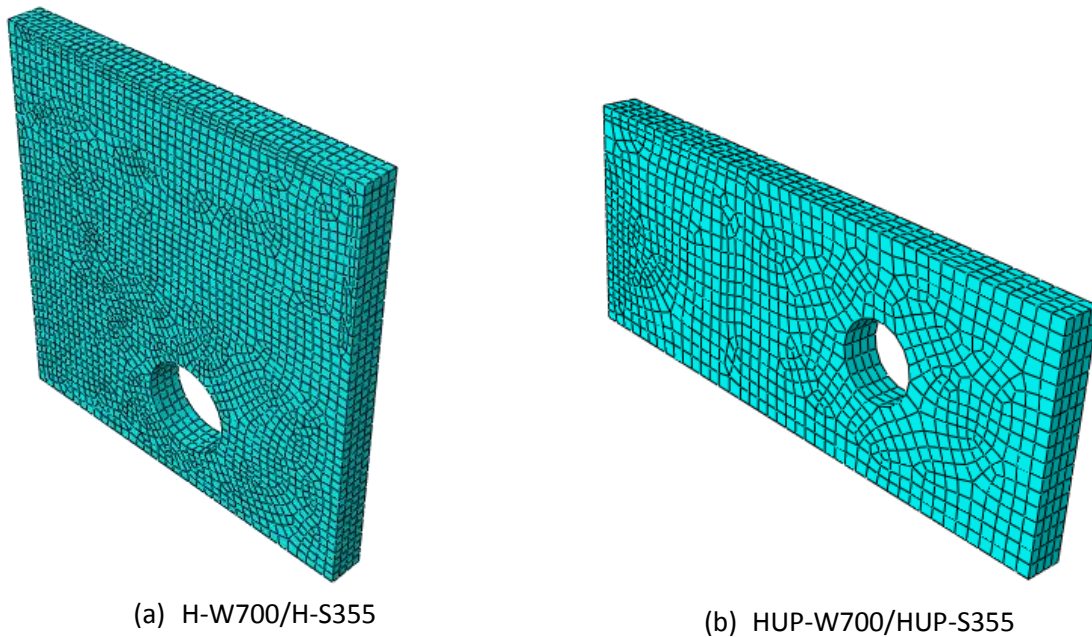
Figur 7.10. Skjærlåsing av C3D8R element [33]

### ***Elementinndeling***

Det ble brukt samme elementinndeling i modellene med lik geometri.

### ***Endeplate***

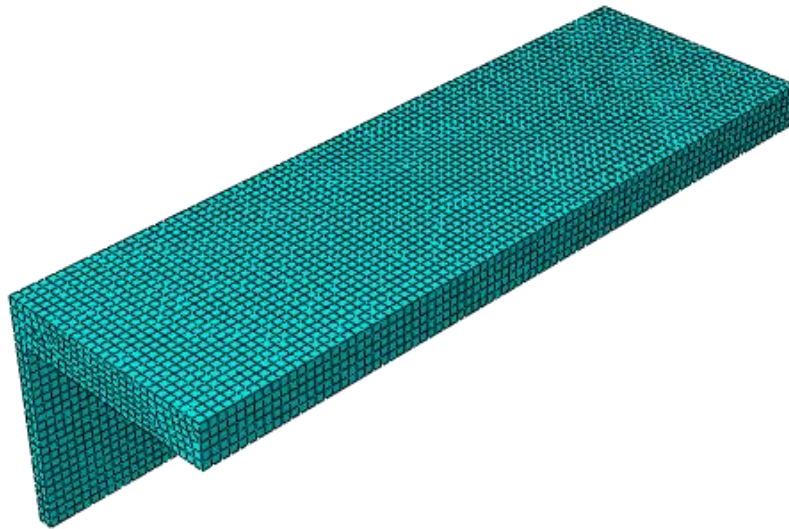
Endeplatene hadde fire element over tykkelsen. Hullene i endeplatene førte til at elementene fikk varierende form, som man ser av figur 7.11.



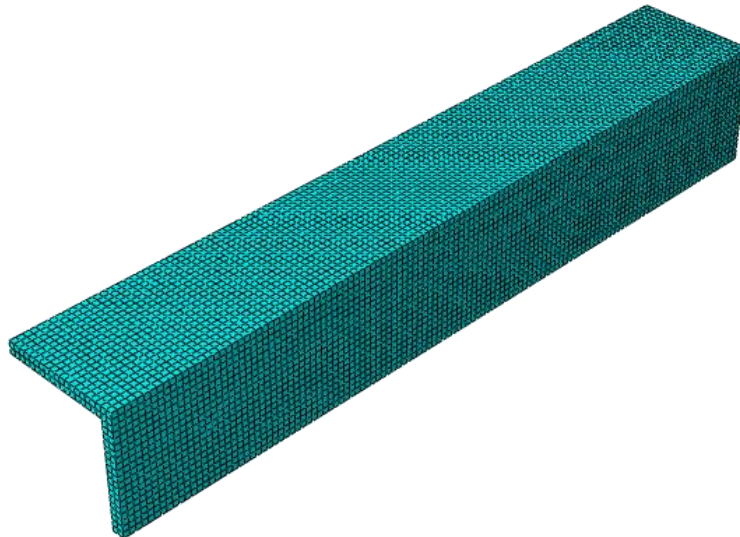
*Figur 7.11: Elementinndeling av endeplater*

### **Profiler**

Flensene til prøvestykkene H-W700 og H-S355 ble modellert med fem elementer over tykkelsen og halve steget med to elementer over tykkelsen, og HUP-profilene ble modellert med to elementer over tykkelsen, som vist i figur 7.12.



(a) H-W700/H-S355

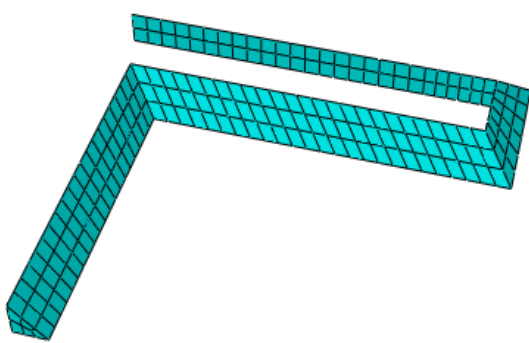


(b) HUP-W700/HUP-S355

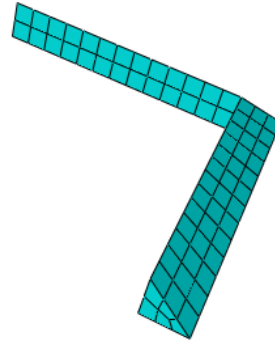
Figur 7.12: Elementinndeling av profiler

### Sveiser

Alle modellene ble analysert med fem elementer i sveisetverrsnittet, illustrert i figur 7.13 for de to geometriene av sveis.



(a) H-W700/H-S355

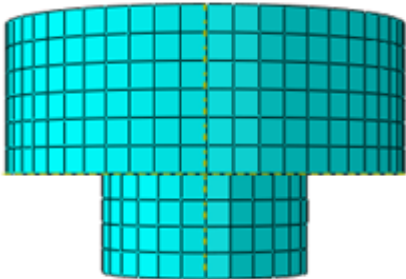


(b) HUP-W700/HUP-S355

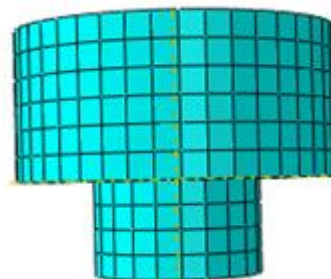
Figur 7.13: Elementinndeling for sveiser

### Bolter

Approximate global size av elementene for elementinndelingen av boltene ble satt lik to i alle modellene. Forskjellen mellom modellene var diameteren og fasthetsklassen på boltene i prøvestykkene de to typer bolter er illustrert i figur 7.14.



(a) H-W700/H-S355



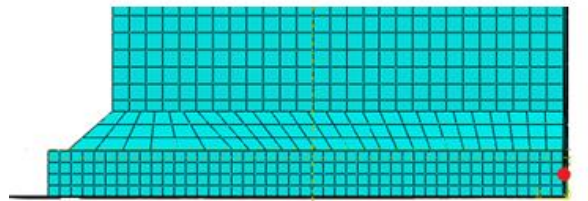
(b) HUP-W700/HUP-S355

Figur 7.14: Elementinndeling av bolter

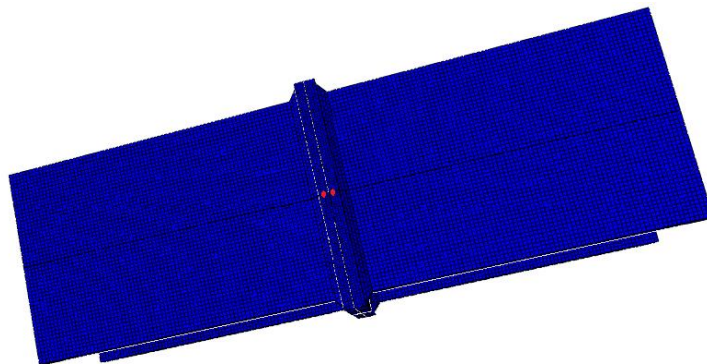


### 7.3 Resultater

Forskyvningene i de numeriske analysene ble hentet fra elementnoder som lå midt i endeplatene. For modellene med H-profiler lå nodene også midt på flensene, mens for HUP-profiler lå de midt på den lengste siden. Symmetrien i modellene gjorde at de relative forskyvningene mellom endeplatene ble lik det dobbelte av forskyvningene til disse elementnodene. Nodene tilsvarte omtrent de samme punktene som brukt ved forskyvningsanalysene i programmet eCooor v2.0. Node plasseringen forskyvningen ble hentet fra ved H-W700 og H-S355 er vist med en rød prikk i figur 7.15 (a). Bilde (b) illustrer med røde prikker hvilke noder forskyvningene mellom endeplatene ble hentet fra hentet i den speilede modellen.



(a) Node plassering til forskyvningsmåling



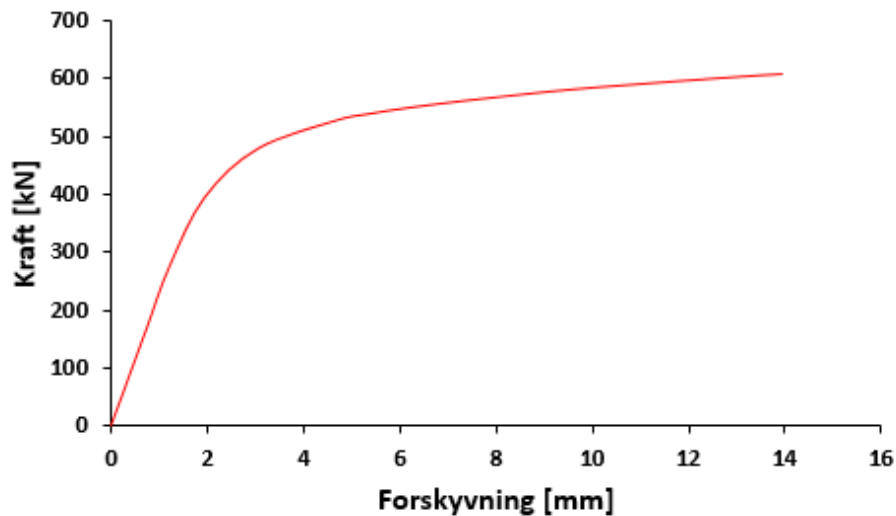
(b) Noder for relativ forskyvning mellom endeplater

Figur 7.15: Noder plassering brukt til forskyvningsmåling

Kraften i de forskjellige modellene ble hentet fra nodene i den frie enden av profilet, som var snittet der forskyvningene ble påsatt. Siden bare en fjerdedel av profilene ble modellert måtte summen av kreftene snittene multipliseres med fire for å få den totale kraften i profilet.

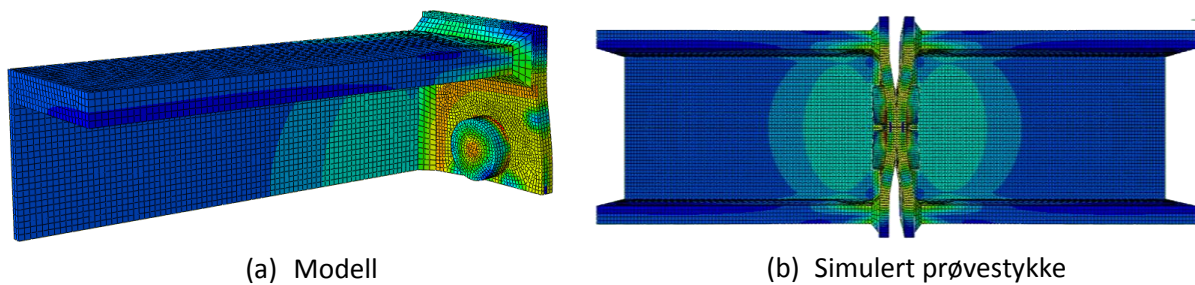
### H-W700

Forskyvningen i den numeriske analysen ble kjørt noe lengre enn det som var tilfelle i laboratoriet. Nodene i den frie enden av profilet ble foreskrevet en forskyvning på 7,0 mm.



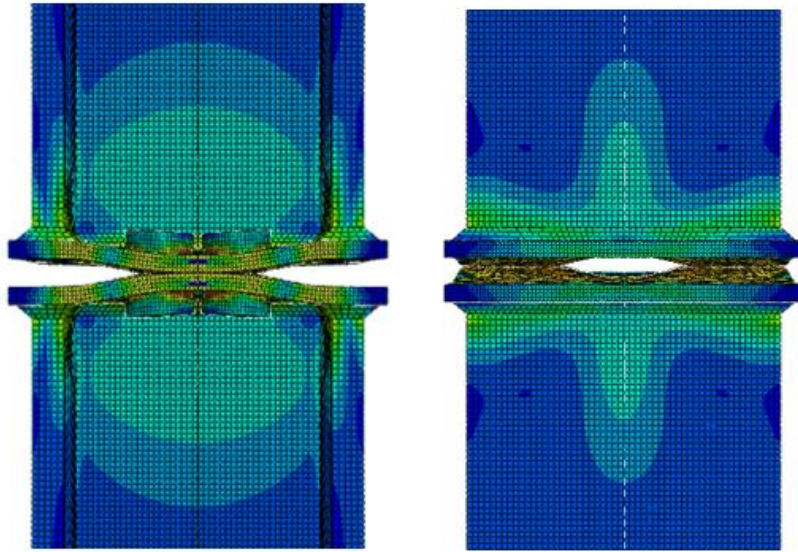
Figur 7.16: Numerisk kraft-forskyvningskurve H-W700

Fra den numeriske kraft-forskyvningskurven ser man at modellen oppførte seg elastisk helt opp til rundt 400 kN, der begynner kurven å bøye av. Den maksimale kraften modellen kom opp i var 609 kN og det tilsvarte en forskyvning på 13,92 mm. Den analyserte modellen og tilhørende prøvestykke er vist i figur 7.17 ved maksimal strekkraft.



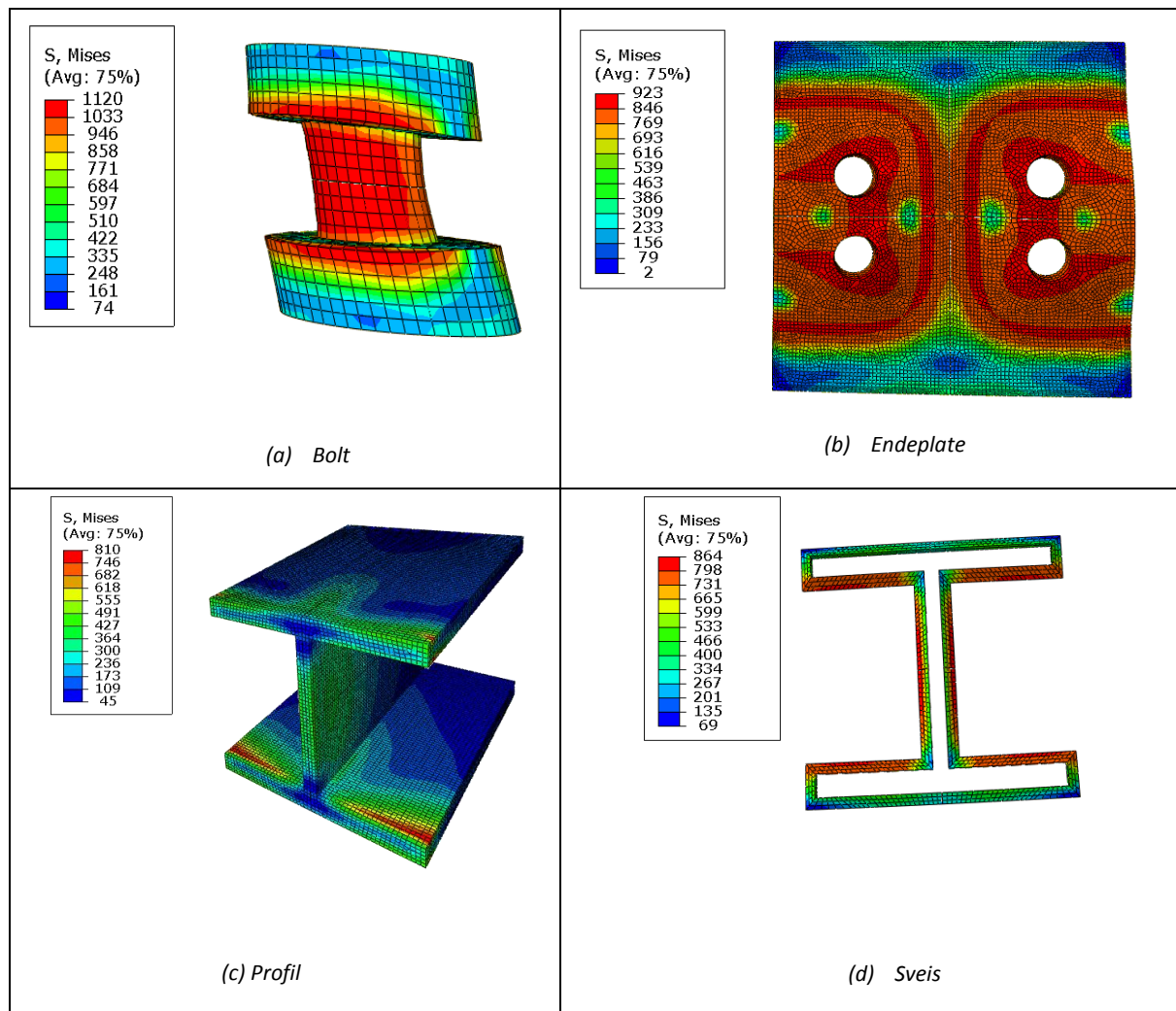
Figur 7.17: Analysert modell ved maksimal strekkraft, H-W700

Skjøten i endeplateforbindelsen ved en kraft på 609 kN er vist i figur 7.18. Man kjenner igjen de samme deformasjons mekanismene som man hadde i laboratorieforsøkene. Der endeplaten bøyes av ved boltene og ved steg/flens av profilet.



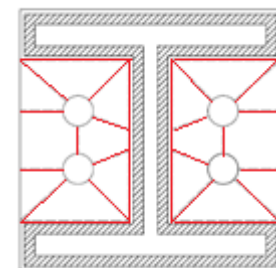
Figur 7.18: Speilet og tillagd modell av H-700W

Spenningsstilstandene ved kraft lik 609 kN til komponentene i endeplateforbindelsen vises i figur 7.19. Simuleringen viser at hele bolteskaftet har en spenning over 900 MPa og dermed nådd flytning. Man kan også se antydning til at bolten har blitt litt bøyd ved analysen. Det ble ikke sett noe klare tegn av noen av delene ved testen i laboratoriet.



Figur 7.19: Spenningstilstand for simulert H-W700 komponenter ved 609 kN

De røde linjene ved profiletts flenser og steg samt mellom boltene viser at det i modellen fant sted flytning på disse plassene. Ser også røde linjer som går fra boltene og rett ut mot platekanten. Det er også antydning til røde linjer fra boltene til hjørnene mellom steg og flens. Dette flytemønsteret ligner veldig på det som ble dimensjonerende for det ekvivalente T-stykke, som vist med røde flytelinjer i figur 7.20.



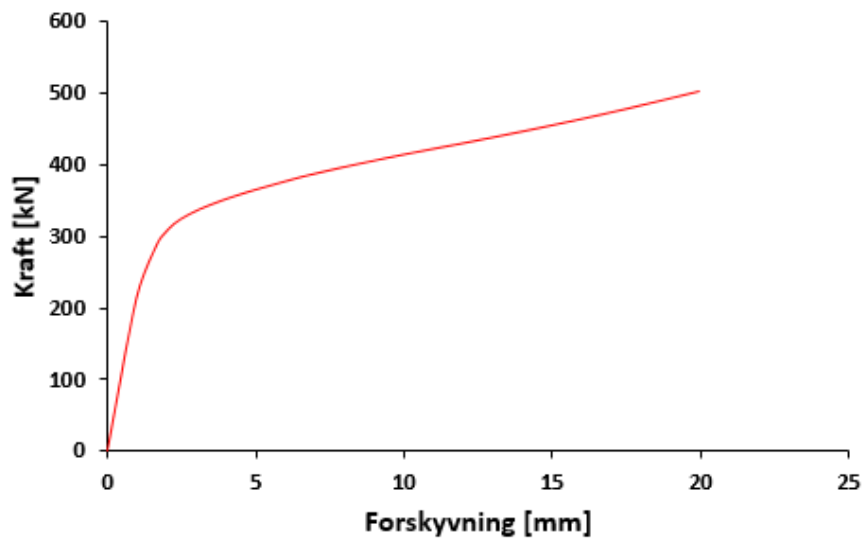
Figur 7.20: Flytelinjemønster

Profilen er helt blått i den frie enden, som indikerer spenninger på under rundt 50 MPa. De røde områdene på tuppene av flensene indikerer at det kun var her det hadde vært spenninger av betydning ved en strekkraft på 609 kN.

I modellen hadde sveisen nådd flytning ved flensene og steget, som også er de plassene at endeplatene bøyes.

**H-S355**

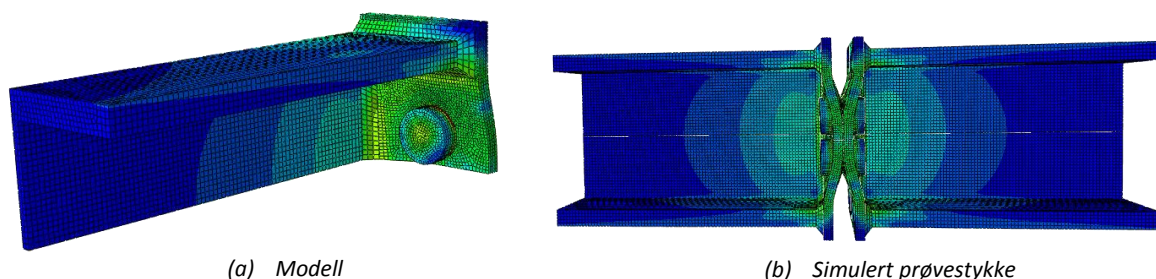
Den numeriske analysen ble som for H-W700 kjørt til noe lengre forskyvning enn det som var tilfelle i laboratoriet. Nodene i den frie enden foreskrevet en forskyvning på 10,0 mm .



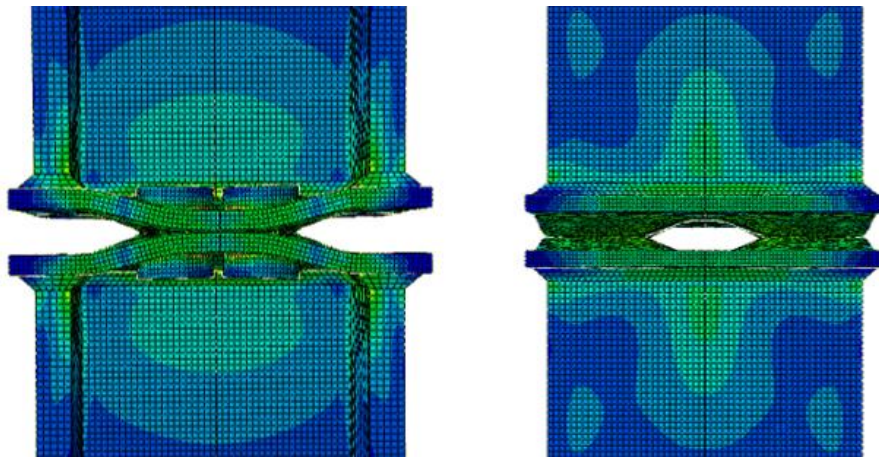
Figur 7.21: Numerisk kraft-forskyvningskurve, H-S355

Fra den numeriske kraft-forskyvningskurven i figur 7.21 ser man at den numeriske modellen oppførte seg elastisk til i underkant av 300 kN, der begynte kurven å bøye av. På slutten av analysen hadde kraften kommet opp i 502 kN med tilhørende forskyvning lik 19,96 mm.

Figur 7.22 viser at modellen hadde gjennomgått samme deformasjonsmønster som H-W700, med eneste forskjell at deformasjon av endeplaten her var større. At deformasjon var noe større i endeplaten kommer tydeligere fram i figur 7.23, som viser endeplateskjøten ved en strekkraft på 502 kN. Man ser at endeplaten har gjennomgått store deformasjoner ved bolt og profil, og at deformasjonene er noe større enn ved modellen til H-W700 i figur 7.18.

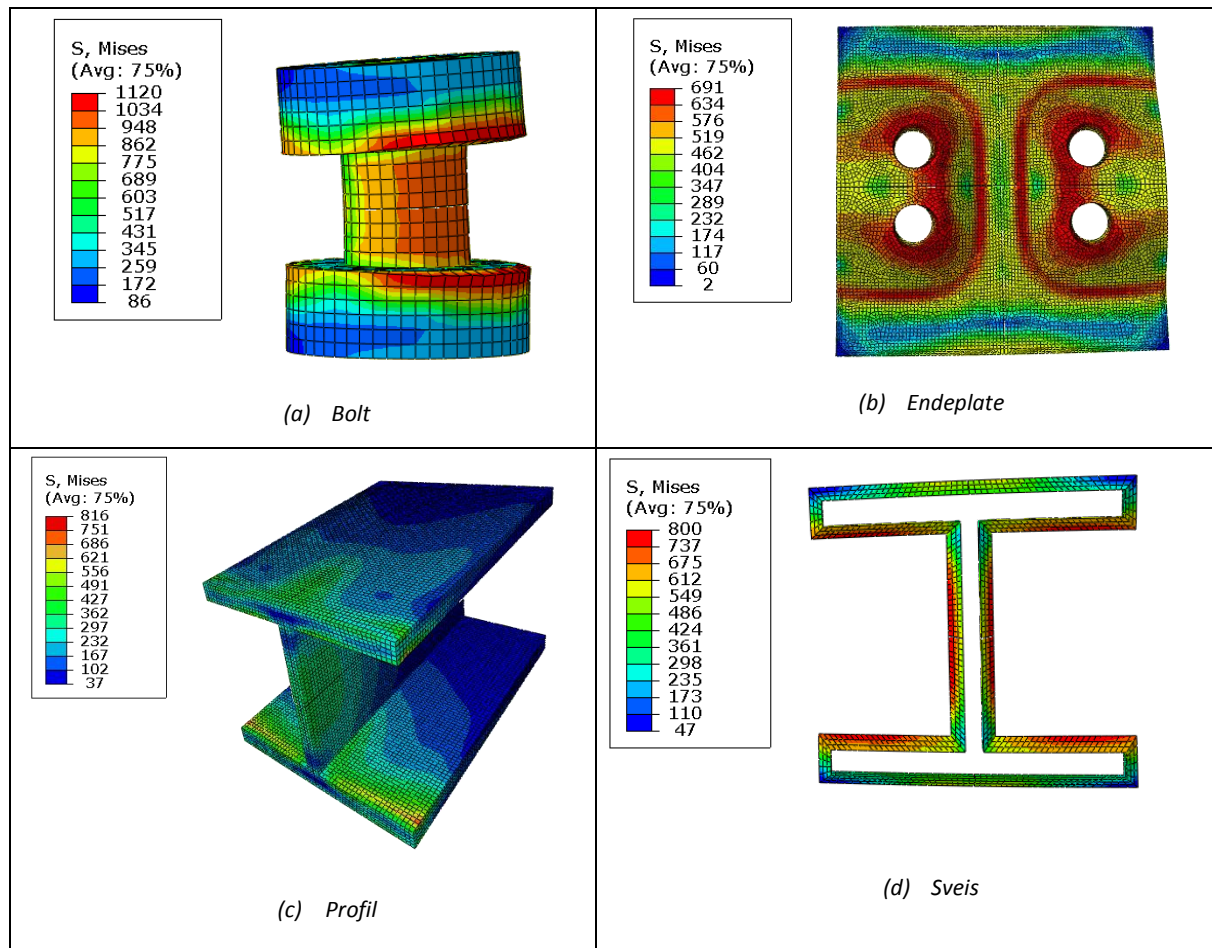


Figur 7.22: Modell med maksimal strekkraft, H-S355



Figur 7.23: Speilet og tillagd modell av H-S355

Spenningstilstand for de ulike komponentene i H-S355 ved en strekkraft lik 502 kN er vist i figur 7.24.



Figur 7.24: Spenningstilstand for komponenter ved H-S355 ved 502 kN

Spenningstilstand i profilet og boltene var likt det i H-W700 selv om kraften var mindre. Man ser blant annet at maksimal spenning ved profilet i dette tilfellet var 816 MPa mot 810 MPa for H-W700. Ut fra fargene ved profilet ser man at dette var på tuppene av flensene mot endeplatene, som var områder endeplatene fikk stor deformasjon. Ved boltene ser man at bolteskaftet har fått en liten bøy.

Spenningstilstand viser at strekksiden har nådd flytning, mens trykksiden enda er i det elastiske området. Der strekksiden og trykksiden var henholdsvis mot steget og mot platekanten.

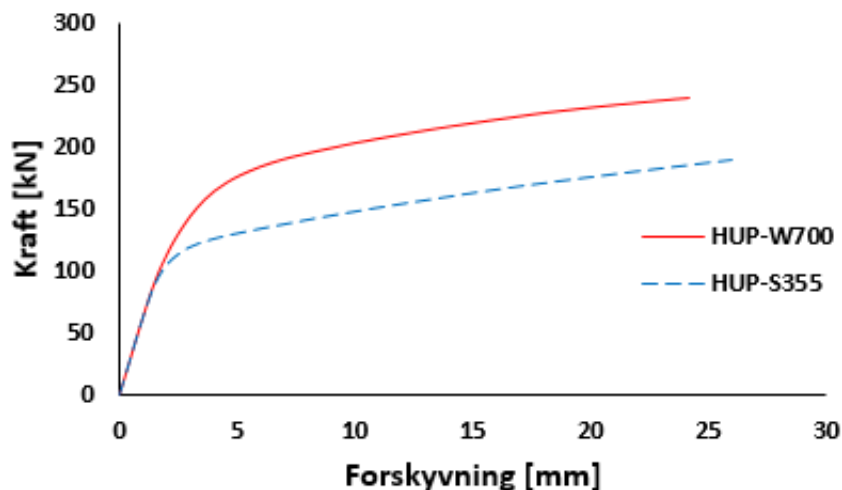
Sveisen ble i dette tilfellet modellert med en materialkurve med lavere flytespenning, og spenningene lå dermed også som forventet lavere enn for sveisen i modellen til H-W700. Sveisen hadde også i dette tilfellet nådd flytning ved de samme punktene som ved modellen til H-W700 ved maksimal strekkraft.

For endeplaten kjenner man igjen de samme flytelinjene langs profilet, mellom boltene og fra boltene til platekant som ved H-W700.

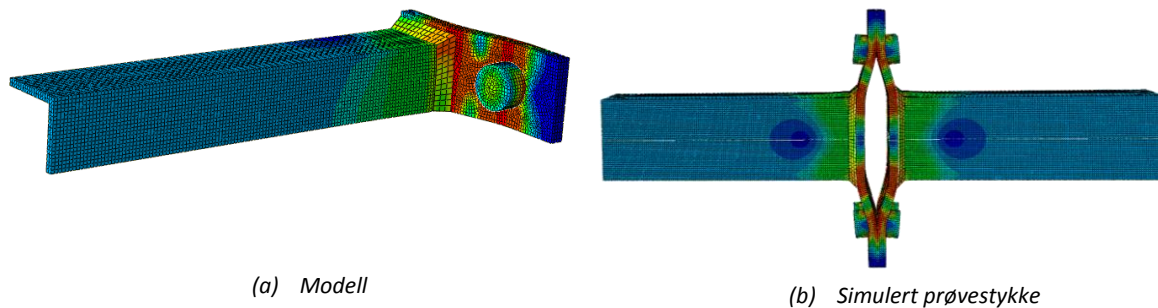
### **HUP-W700**

Denne analysen ble som de to foregående analysene foreskrevet en forskyvning, som var noe større enn det man fikk fra laboratorietesten. Ved analysen av HUP-W700 ble profilenden foreskrevet en forskyvning på 12,5 mm. Det gav en kraft på slutten av analysen lik 240 kN og en tilhørende forskyvning på 24,13 mm.

Den numeriske kraft-forskyvningskurven for HUP-S355 ble også tatt med for å sammenligne de simulerte kraft-forskyvningskurvene til prøvestykkene med HUP-profiler. Ved simuleringen av HUP-S355 ble den frie enden foreskrevet en forskyvning på 13 mm. Dette gav en total forskyvning på 25,98 mm med en tilhørende maksimal strekkraft lik 200 kN. Grafene til de to simulerte prøvestykkene med HUP-profiler følger hverandre opp til rundt 100 kN. Der bøyer HUP-S355 av mens HUP-W700 kommer opp i rundt 150 kN før det bøyer av og får en mykere oppførsel. At kurvene viser samme stivhet er ikke uventet, fordi stivheten bare er avhengig av  $E$ ,  $b$  og  $t$  som er like de de to modellene.



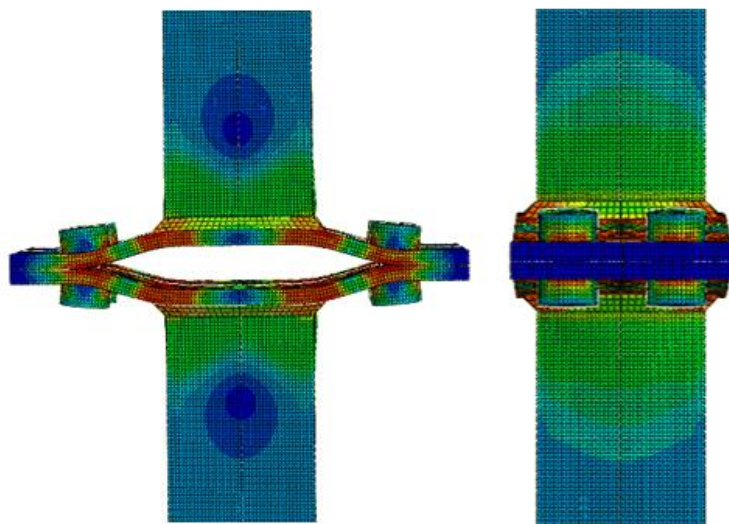
Figur 7.25: Kraft-forskyvningskurver for simulerte prøvestykker med HUP-profiler



Figur 7.26: Modell etter endt analyse, HUP-W700

På den modellerte modellen i figur 7.26 ser man at det er dannet røde tverrstriper i endeplatene ved boltene og profilkantene, som indikerer at man har de største spenningene og flytning ved disse linjene.

I den speilede og tillagde modellen ved full strekkraft av endeplateskjøten i figur 7.27 ser man tydelig at endeplatene er klemt sammen ved tuppene, og man har godt mothold for utvikling av hevearmkraft. Her ser man også de røde stripene i forbindelsen ved boltene og profilkantene. Der flytelinjene ble dannet.

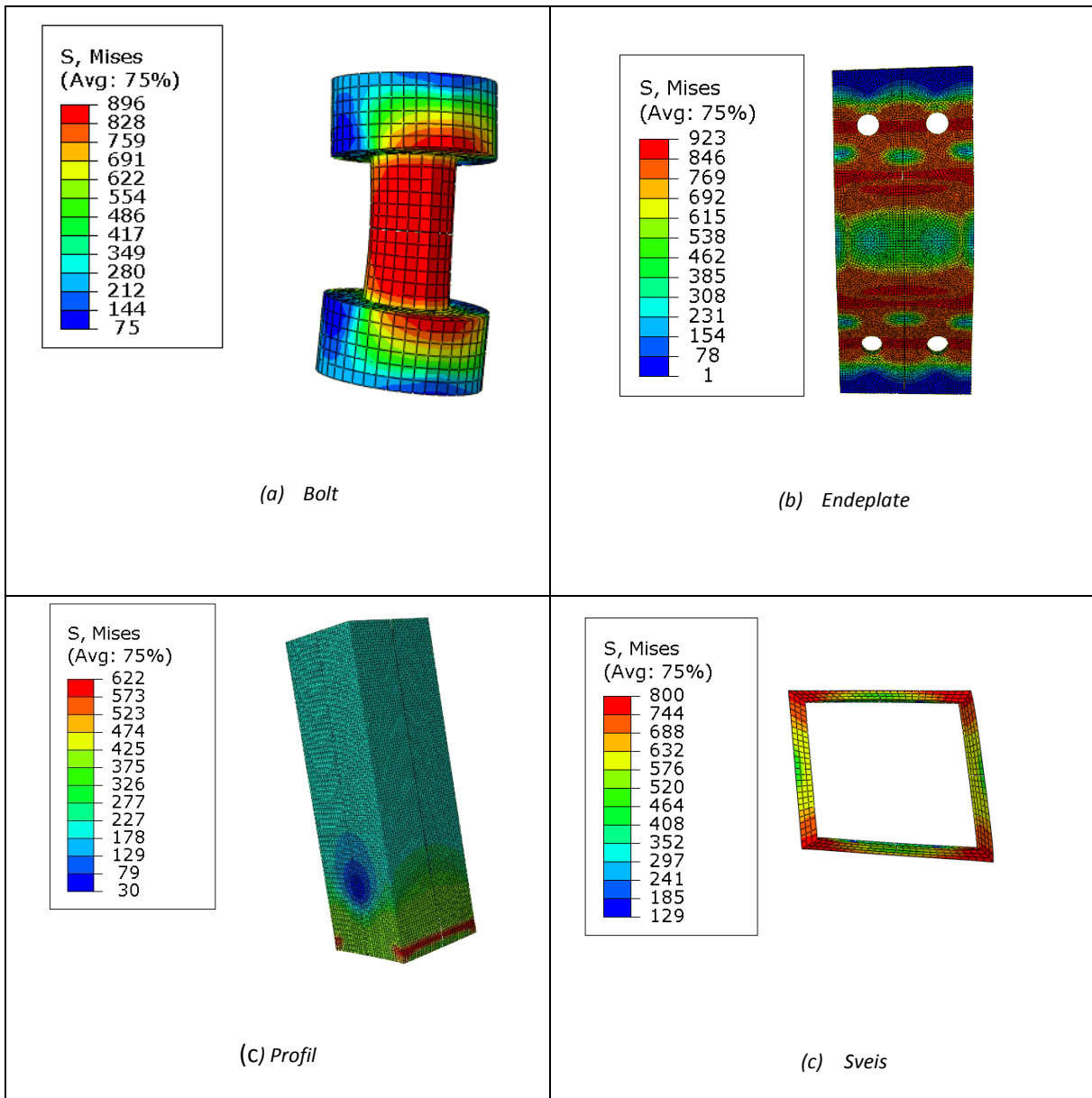


Figur 7.27: Speilet og tillagd modell av HUP-W700

Spenningstilstanden er som ved de foregående modellene gitt ved den maksimale strekkraften under simuleringen. Fra figur 7.28 ser man at bolteskaftet hadde nådd flytning ved en strekkraft på 240 kN. For endeplaten ser man tydelige røde tverrstriper ved bolt og profil. Der har spenningen vært mellom 846 MPa til 923 MPa.

For profilet ser man at kontaktflaten med sveis på langsiden har nådd store spenninger på grunn av deformasjon i endeplatene der. Profilet har på det høyeste nådd en spenning på 622 MPa godt over flytespenningen til profilet på 396 MPa. Sveisene ble modellert med en flytespenning på 600 MPa, og ved hjørnene hadde sveisen nådd spenninger på 800 MPa.





Figur 7.28: Spenningstilstand for komponenter ved HUP-W700 ved 240 kN



## 8. Sammenligning av resultater

Dimensjonering av forbindelser med fasthet opp til S700 dekkes av NS-EN 1993-1-12 [3], men den dekker ikke prosjektering av delvis kontinuerlige/delvis bøyingsstive forbindelser i høyfast stål. For denne type forbindelser bør kapasiteten beregnes basert på en elastisk fordeling av kreftene over komponentene i forbindelsen. Forsøkene med Weldox 700 viste at det ble oppnådd flytning. Det er uansett bare tillatt å modellere forbindelser på denne måten ved global analyse gitt at forbindelsen kan utvikle tilstrekkelig rotasjon, som gjør at man vil få duktilt brudd i konstruksjon før brudd i forbindelsen oppstår. Tidligere forskning på endeplateforbindelser i ordinært konstruksjonsstål har vist at de kan oppnå tilstrekkelig rotasjon gitt at endeplaten er det svake leddet i forbindelsen [27]. Tester utført av Coelho & Bijlaard [27] visste at endeplater i høyfast stål tilfredstilte relative store rotasjonsbehov.

Denne rapporten så på endeplateforbindelser med ulike fastheter, og det blir i de påfølgende delkapitlene gjort en sammenligning mellom forsøk i Weldox 700 og S355 mot beregningsmodellene for oppførsel i Eurokode 3. Hensikten i rapporten var å undersøke om dette forholdet endret seg med fastheten.

### 8.1 Kapasitet

Knutepunktstandarder inneholder beregningsregler for sannsynlige plastiske kapasiteter og stivheter av forbindelser. Disse strukturelle egenskapene ble beregnet med bruk av middelerdi for de eksakte geometriene og materialprøvene. Ved beregning av karakteristisk dimensjonerende kapasitet etter Eurokode 3 ble sikkerhetsfaktoren satt lik 1,0. Beregning av de sannsynlige kapasitetene er lagt i vedlegg B.

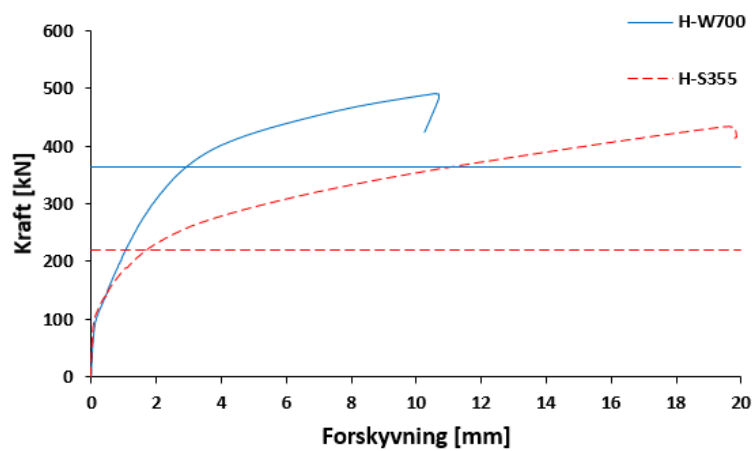
De numeriske beregningene ble basert på nominell geometri av endeplateforbindelsene, og antatte materialkurver ut fra materialforsøk og nominelle verdier.

#### 8.1.1 Kapasitet bestemt ut fra regler i Eurokode 3

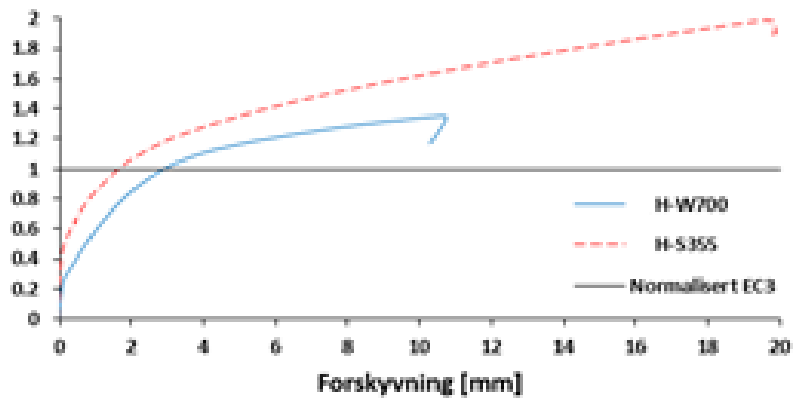
Tabell 8.1 gir beregnede kapasiteter etter regler Eurokode 3 for bruddform 1, resultatene fra forsøkene samt beregningene av forholdet mellom Eurokode 3 og forsøk for de tre prøvestykkene. Forsøket utført med H-S355 av Egeland & Torstvedt [5] er også tatt med i tabell 8.1. De rette linje i figur 8.1 (a) og figur 8.2 (a) er de predikerte kapasitetene etter Eurokode 3, mens de rette linjene i figur 8.1 (b) og figur 8.2 (b) er de normaliserte kapasiteten til Eurokode 3.

Tabell 8.1: Sammenligning mellom EC3 og tester (Forhold=EC3/Test)

Teststykke	Kapazität [kN]		
	Test	EC3	Forhold
H-W700	491	365	0,743
H-S355	435	219	0,503
HUP-W700	217	131	0,604
HUP-S355	150	75,4	0,502



(a) Kraft-forskyvning, H-profiler

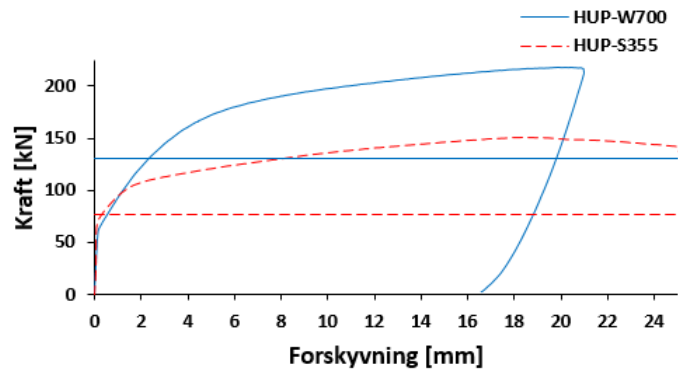


(b) Utnyttelse i forhold til EC3, H-profiler

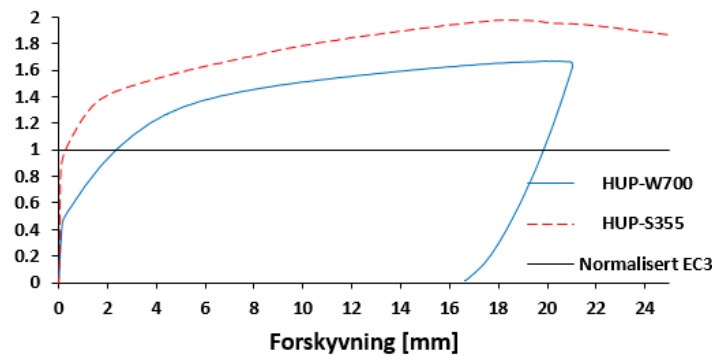
Figur 8.1: Kapasitet av prøvestykker mot EC3, H-profiler

Sammenligningene mellom Eurokode 3 og forsøkene for H-W700 og H-S355 i figur 8.1 (a) viser at Eurokode 3 underestimerer kapasitetene for begge prøvestykkene. De beregnede kapasitetene ligger i området der forsøkskurvene begynner å bøye av. Fra figur 8.1 (b) ser man H-S355 oppnådde

omtrent 2 ganger den predikerte kapasiteten for brudd, mens tilsvarende verdi var i overkant av 1,3 for H-W700.



(a) Kraft-forskyvningskurver, HUP-profiler

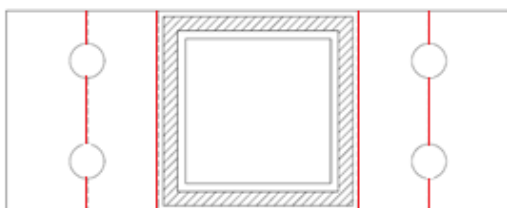


(b) Utnyttelse i forhold til EC3, HUP-profiler

Figur 8.2: Kapasitet av prøvestykker mot EC3, H-profiler

Eurokode 3 underestimerer også kapasiteten ved HUP-profiler for begge fasthetene, og for HUP-profilene ligger disse kapasitetene i det elastiske området som man ser av figur 8.2 (a). For prøvestykket med S355 oppnådde man også her omtrent 2 ganger den predikerte kapasiteten, mens tilsvarende forhold for Weldox 700 var omtrent 1,6.

Det dimensjonerende flytelinjemønstret ved HUP-profilene på tvers av endeplatene ved boltene og profilkanten var lett gjenkjennelig ved forsøkene, som vist i figur 8.3. For H-profilene var tilsvarende flytelinjemønstret noe vanskeligere å kjenne igjen.



(a) Dimensjonerende mekanisme

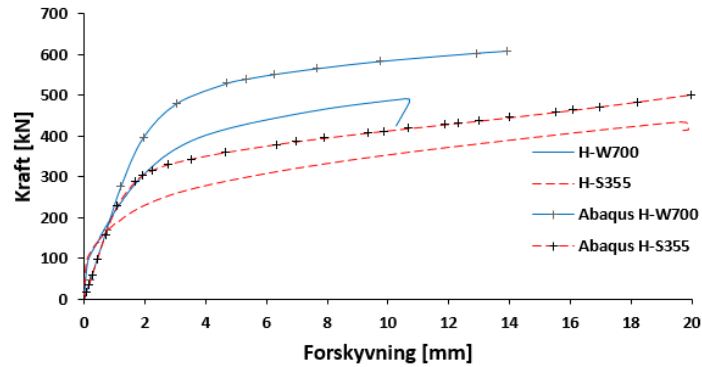


(b) Faktisk mekanisme

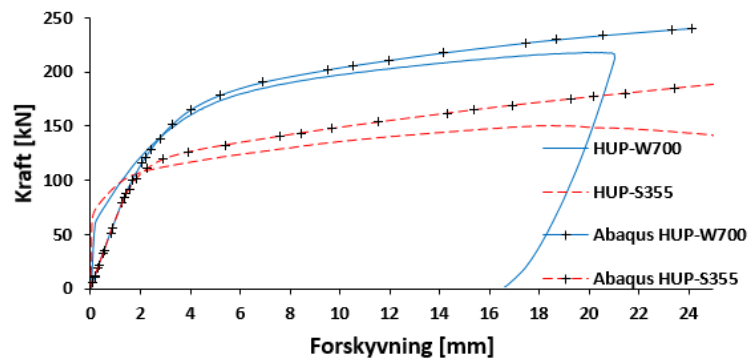
Figur 8.3: Flytelinjemekanisme for HUP-profiler

### 8.1.2 Sammenligning med numerisk modell

Kraft-forskyvningskurven fra Abaqus 6.11-1 ble ikke satt til å stoppe ved en bestemt kraft eller forskyvning, og ville derfor ha fortsatt med svak økning derom analysene hadde blitt kjørt lengre.



(a) H-profiler

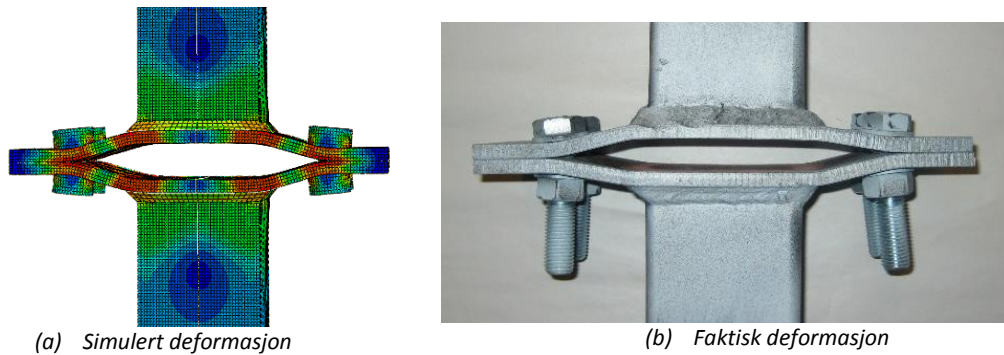


(b) HUP-profiler

Figur 8.4: Numeriske kraft-forskyvningskurver mot forsøksresultat

Kurvene for H-profilene viser at den numeriske simuleringen overestimerer kapasiteten til prøvestykkene i disse tilfellene, og for H-W700 noe mer enn for H-S355. Ved kurvene for HUP-profilene i figur 8.4 ligger de numeriske kraft-forskyvningskurvene nærmere testresultatene.

Analyseresultatene viste at Abaqus 6.11-1 gjenskapte de dimensjonerende flytelinjemønstrene samt deformasjonene man så i endeplatene ved forsøkene, og dette er vist ved figur 8.5.



Figur 8.5: Deformasjon fra numerisk simulering sammenlignet mot virkelig deformasjon.

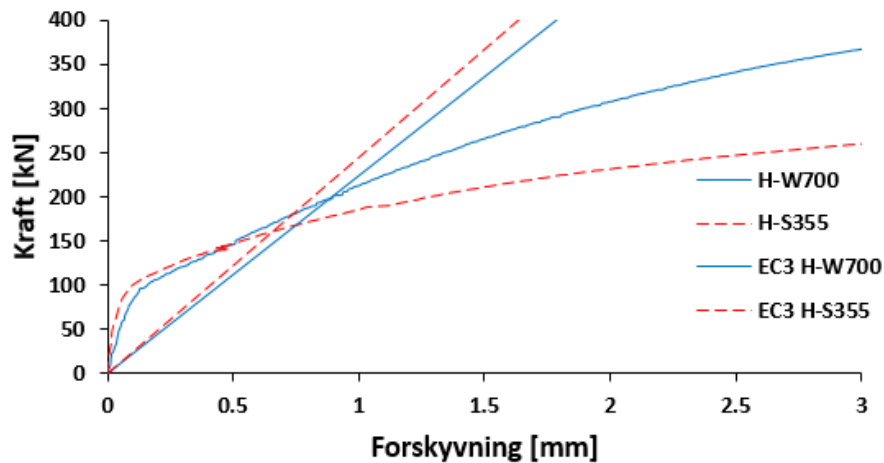
## 8.2 Stivhet

Den initiale elastiske stivheten ble sammenlignet med beregninger etter komponentmetoden i kuntepunktsstandarden og numeriske analyser med Abaqus 6.11-1.

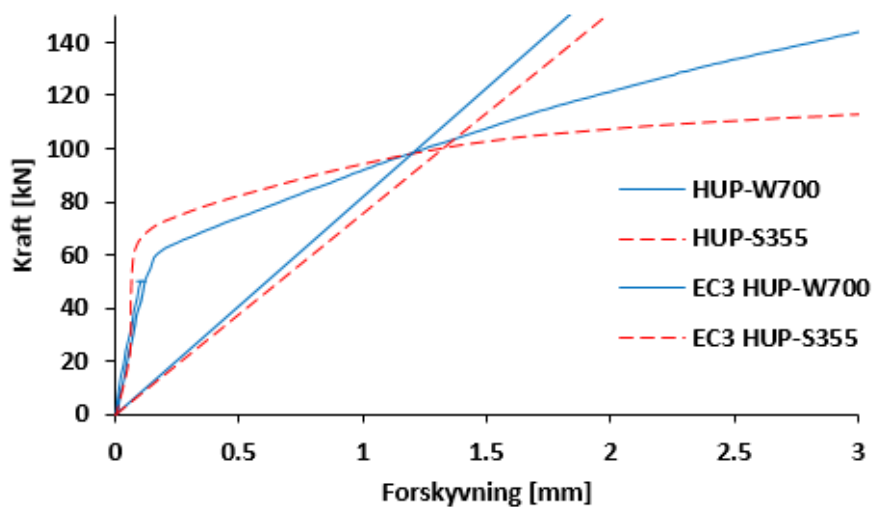
### 8.2.1 Stivheter bestemt ut fra regler i Eurokode 3

Eurokode 3 sine beregningsregler bygger på komponentmetoden som forklart i kapittel 2.

Figur 8.6 viser sammenligningene mellom Eurokode 3 og forsøksresultatene. H-profilene var strammet opp for hånd mens HUP-profilene var forspent med 100 Nm. Ser bort fra stivheten de første 0,1 mm på kurvene, fordi den representere en løfting av profilene med kun stivheten til boltene. Ser da fra figur 8.6 at Eurokode 3 overvurderer stivheten for alle prøvestykkene. Fra begge geometriene ser det ut som Weldox 700 viser en noe stivere oppførsel enn S355.



(a) H-profiler

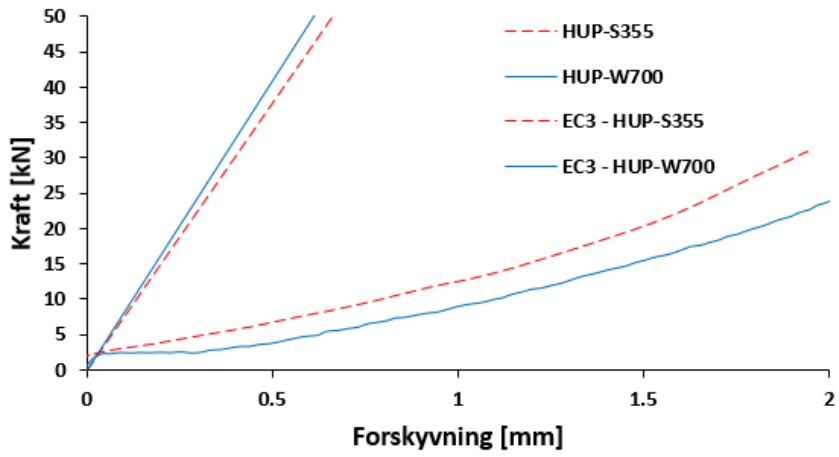


(b) HUP-profiler

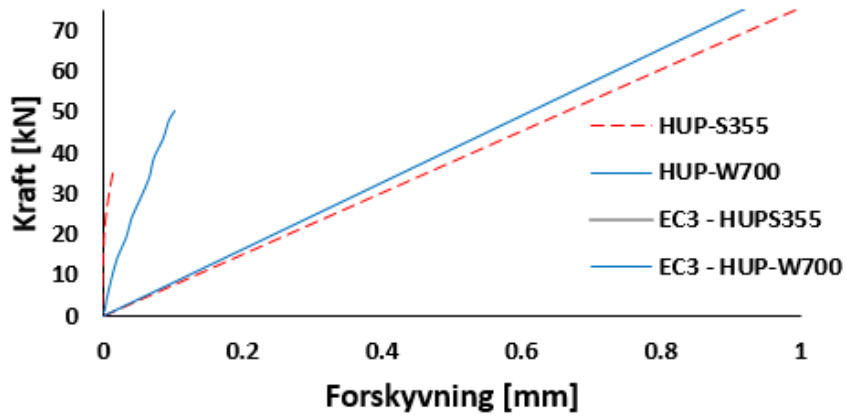
Figur 8.6: Stivhet av prøvestykkene mot Eurokode 3

Figur 8.7 viser kraft-forskyvningskurvene for prøvestykkene med HUP-profiler med og uten forspenning sammenlignet med Eurokode 3. Uten forspenning var det glippe på 4-5 mm for HUP-W700, og endeplaten kun da betraktes som en utkragerbjelke med punktlast. Kurvene viser at stivheten nå for begge fasthetene er betydelig under Eurokode 3 sine verdier. Med forspenning lå endeplatene helt inntil hverandre før forsøket starte, og stivheten til forbindelsen er betydelig større nå. Med forspenning viser prøvestykkene med begge fasthetene større stivhet enn Eurokoden 3 i starten.





(a) Trinn I uten forspenning

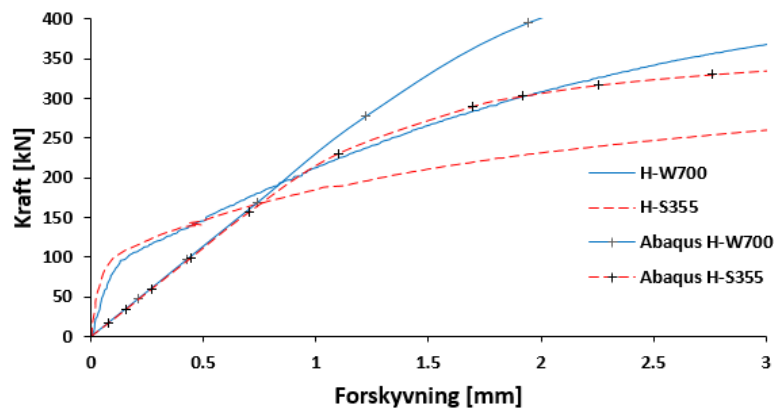


(b) Trinn II med forspenning

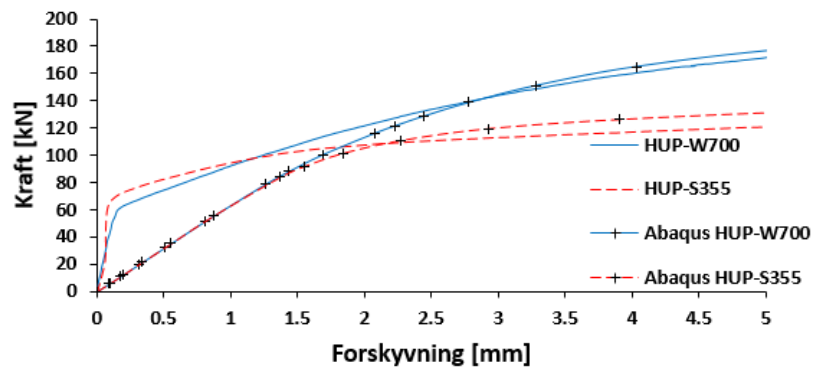
Figur 8.7: Stivhet for prøvestykkene HUP-S355/HUP-W700 med og uten forspenning

### 8.2.2 Sammenligning med numerisk modell

Forventet at den numeriske analysen ville gi et stivere resultat enn det testresultatene gav. Dette da alle komponentene var i helt perfekt kontakt med hverandre fra start av i analysen. Det ble også forventet at begge modellene til sammen geometri viste lik stivhet i starten, fordi stivheten bare er avhengig av  $E$ ,  $t$  og  $b$ . Det ble da også observert i figur 8.8 at stivheten var lik for de numeriske modellene i starten.



(a) H-profiler



Figur 8.8: Numerisk kraft-forskyvning mot testresultater de første 3 mm

Den initiale elastiske stivheten fra de numeriske simuleringen ble som følger 63 613 N/mm og 228 257 N/mm for henholdsvis prøvestykker med HUP-profiler og H-profiler. Dette var nær den initiale elastiske stivheten beregnet etter Eurokode 3 basert på nominell geometri, som også den numeriske modellen ble basert på. De initiale elastiske stivheten basert på nominell geometri etter eurokoden var 226 640 N/mm for H-profiler og 77 280 N/mm for HUP-profiler.

### 8.3 Forslag til modifikasjon av dagens regelverk

Ut fra kun et forsøk å sammenligne med innen hver geometri og for med og uten forspenning er det vanskelig å generalisere noe.

### 8.3.1 Kapasitet

Ut fra de forsøkene som ble kjørt kan det se ut til at utnyttelsesgraden av Weldox 700 er noe lavere enn S355 både for endeplateforbindelser med og uten forspenning. Det kan da være en mulighet å innføre en reduksjonsfaktor i flytemodellen til Eurokode 3 for å komme nærmere utnyttelsesgraden til S355. S355 viste en utnyttelsesgrad lik 0,5 ved predikert kapasitet både med og uten forspenning, mens tilsvarende verdier for Weldox 700 var 0,60 og 0,74. At S355 viser samme utnyttelsesgrad med og uten forspenning mens at Weldox 700 ikke kan være tilfeldig, fordi klemkraften fra forspenningen vil forstyrre resultatene noe. Ved å ta utgangspunkt i forsøkene uten forspenning vil dermed en reduksjonsfaktor lik 0,7 for Weldox 700 gi omtrent samme utnyttelsesgrad for de to fasthetene.

En annen mulighet kunne vært å bruke samme metode som i NS-EN 1999-1-1 [35] for beregning av kapasiteten til det ekvivalente T-stykke. Der det antas at de plastiske leddene i T-stykket ikke dannes samtidig ved bolte og steg. Summen av de plastiske momentkapasitetene multipliseres da med en faktor, som avhengig av forholdet mellom tøyning og spenning ved brudd og flytning. Nevnt i starten av kapittel to setter NS-EN 1993-1-12 [3] anbefalinger til bruddtøyning og forholdet mellom bruddspenning og flytespenning. Ved å bruke disse verdiene kan det vises at man vil få en høyere kapasitet for T-stykket enn det kuntepunktsstandarder gjør i dag.

Faktoren NS-EN 1999-1-1 operer med er [35]:

$$\frac{1}{k} = \frac{f_0}{f_u} \left( 1 + \psi \frac{f_u - f_0}{f_0} \right) \quad (8.1)$$

Der  $f_0$  og  $f_u$  er henholdsvis flytespenning ved 0,2 % varig tøyning og bruddspenning.

$$\psi = \frac{\varepsilon_u - 1,5\varepsilon_0}{1,5(\varepsilon_u - \varepsilon_0)} \quad (8.2)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{f_0}{E} \quad (8.3)$$

For Weldox 700 med flytespenning og bruddspenning lik 790 MPa og 829 MPa brukt i forbindelse med denne rapporten ville man fått en faktor 1,08, og dermed en høyere predikert kapasitet. Dette er ikke ønskelig da man vil minke utnyttelsesgraden.

### 8.3.2 Stivhet

Eurokode 3 ga et veldig konservative anslag for stivheten til begge fasthetene. Grunn til at Eurokode 3 bommer så mye på stivheten kan være at den ikke greier å modellere oppførselen til såpass kompakte knutepunkter som de endeplateforbindelsene undersøkt i denne rapporten. Da stivheten kun er avhengig av  $E$  og geometrien skulle man forventet lik stivhet for de to fasthetene. Forsøkene viste en mye mykere oppførsel enn det beregninger etter Eurokode 3 skulle tilsi. Det er derfor er mulighet at Eurokoden 3 overvurderer stivheten til flensen i T-stykket. Det kan være at platene får en mykere oppførsel når du får skikkelig mothold på motsatt side for hevearmkraften, og at de av den grunn gjenspeiler en mykere oppførsel.



## 9. Konklusjon

Denne rapporten har sett på gyldigheten av beregningsreglene i NS-EN 1993-1-8 [1] brukt på høyfast stål. Tre strekktester med to endeplategeometrier ble gjennomført. Parallele tester med kvadratisk endeplate i fasthetene S355 og Weldox 700 med H-profiler, samt rektangulær endeplate i Weldox 700 med HUP-profiler.

For de kvadratiske endeplatene i Weldox 700 med H-profiler ble den predikerte kapasiteten og stivheten funnet lik 74,3 % og 193 % av de faktiske egenskapene til forbindelsen. Tilsvarende tall for S355 ble 50,3 % og 371 %.

Ved den rektangulære endeplate geometrien med HUP-profiler utgjorde den predikerte kapasiteten og stivheten 60,4 % og 251 % av de faktiske verdiene til prøvestykket.

På grunnlag av disse forsøkene foreslås det innføre en reduksjonsfaktor lik 0,7 for Weldox 700 for å bringe utnyttelsesgraden ved predikert kapasitet nærmere utnyttelsesgraden til S355. For stivheten er det vanskelig å si noe bastant, fordi man hadde forventet at disse utnyttelsesgradene skulle være lik. Det er dermed mulig at det stivhetsmodellen ikke greier å modellere stivheten i de kompakte endeplate forbindelsene godt nok. Det kan se ut som om flensene i t-stykket har en mykere oppførsel i virkeligheten enn det stivhetsmodellen i Eurokoden skulle tilsi.



## 10. Videre Arbeid

Flere geometrier bør undersøkes for å få mere kunnskap om hvordan forholdet mellom predikerte kapasiteter og stivheter etter Eurokode 3 forandrer seg mot virkelige verdier ved endring i fasthet.

Det bør også gjøres flere undersøkelser på stivhet, for å se hvorfor man får ulike stivhet for ulike fastheter ved samme geometri.





## 11. Referanser

- [1] CEN. NS-EN 1993-1-8: Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner - Del 1-8: Knutepunkter og forbindelser. Standard Norge. 2009.
- [2] Girão Coelho, A. M., «Characterization of the ductility of bolted end-plate beam-to-beam steel connections [Ph.D. thesis] Comibra(Portugal): Univerity of Comibra; 2004».
- [3] CEN. NS-EN-1993-1-12: Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner - Del 1-12: Konstruksjoner med høyfast stål. Standard Norge. 2009.
- [4] Moze, P. & Beg. D., «High strength steel tension splices with one or two bolts. Journal of Constructional Steel Research. 2010; 66: 1000-1010».
- [5] Egeland, B. & Torstvedt, I. -M., Stivhet til endeplateforbindesler i hulprofiler [ Materoppgave] Trondheim: NTNU; 2013.
- [6] «CEN. NS-EN 1993-1-1: Prosjektering av stålkonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger. Standard Norge. 2008».
- [7] Hopperstad, O. S. & Børvik, T., «Lecture Notes TKT 4135 Mechanics of materials. Trondheim: Structural Impact Laboratory;2012».
- [8] Larsen P. K., Dimensjonering av stålkonstruksjoner. Trondheim: Tapir Akademiske Forlag; 2010.
- [9] Erslund, H., «Endeplate [Masteroppgave]. Trondheim. NTNU. 2013».
- [10] Weynand k., Jaspart, JP., Steenhuis, ., «The stiffness modell og revised Annex J of Eurokode 3. In prrcessings of Third international workshop on connections in steel III, Behaviour, strength and design.».
- [11] Weynand, K., Jaspart, J. -P. & Steenhuis, M., «The stiffness Model of revised Annex J of Eurocode 3. Proceedings of the third International Workshop on Connections in Steel Structures. 1995. 441-452».
- [12] Karlsen, F. T., Knutepunkter for staver med hulprofiltverrsnitt [Masteroppgave] Trondheim: NTNU; 2011.
- [13] Fagerholt, E., Børvik, T. & Hopperstad, O. S., «Measuring discontinuous displacment fields in cracked specimens using digital image corrolation with mesh adaptation and crack-path optimazation. Optics and Laers in Engineering. 2013; 51 (3): 299-310».
- [14] Johansson, B. & Collin, P., High strength steel - the construction material of the future. Development/Projects; 01.06.1995; Stocholm.

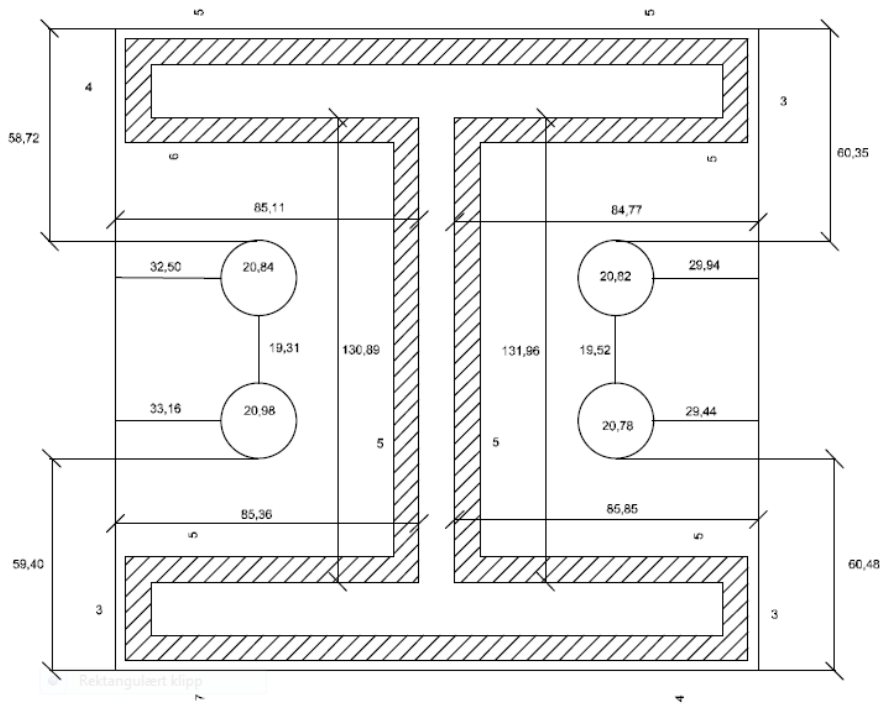
- [15] Aalberg, A. and Larsen, P. K., «The effect of steel strength and ductility on bearing failure of bolted connections».
- [16] SSAB, «ssab.com [Internett] (29.04.2013). <http://www.ssab.com/en/Brands/Weldox/>».
- [17] Schröter, F. & Muller, M., Current world-wide trends in the usage of modern steel plates for bridge constructions. Steelbridge 2004..
- [18] Miki, C., Homma, K. & Tominaga, T., High strength and high performance steels and their use in bridge structures. Journal of Constructional Steel Research 2012; 58 (1): 3-20.
- [19] Nibbon, «nssmc.com [Internett] (20.05.2013) <http://www.nssmc.com/en/product/use/case/bridge/gatebridge.html/>».
- [20] Ilkjær, J. & Christensen, M. S., «Hardanger Bridge - The longest suspension bridge in Norway. Nordic Steel Construction Conference 2012; 5-7 September; Oslo, Norge».
- [21] Koche, F., «Nye Holmenkollen tilløp - Ingeniørkonstruksjon. Stålbyggnad. 2010 (1): 12-17».
- [22] Cederfeldt, L. & Sperle, J. -O., «High strength steel in the roof of swedbank arena savings in weight, cost and environmental impact. Nordic Steel Construction Conference 2012; 5-7 september; Oslo, Norge».
- [23] «google.no (16.05.2013) [http://products.esab.com/Templates/T041.asp?id=2530](http://www.google.no/search?q=friends+arena&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ei=7wamUczYIiN4AS8sYGwBA&sqi=2&ved=0CAcQ_AUoAQ&biw=1438&bih=626#facrc=_&imgrc=TRY42SQ43gaO8M%3A%3BWqQHZNiw6WRtvM%3Bhttp%253A%252F%252Fwww.dn.se%252FImages%252F20,» [Internett].</a></p><p>[24] Sperle, J. -O., «Minska miljöbelastningen med konstruktioner i höghållfast stål! Stålbyggnad. 2012; (4): 31-32».</p><p>[25] SSAB, «Weldox; SSAB oxeløvsund».</p><p>[26] Hyeong, J. K. & Yara, J. A., «The effect of ultimate-to-yield ratio on the bearing strength of bolted connections. Journal of Constructional Steel Research. 1999; 49 (3): 255-269».</p><p>[27] Aalberg, A. & Larsen, P. K., «Strength and Ductility of Bolted Connections in Normal and High Strength Steels».</p><p>[28] Coelho, A. M. G. & Bijlaard, F. S. K., «Experimental behaviour of high strength steel end-plates connections. Journal of Constructional Steel Research. 2007. 63 (9): 1228-1240».</p><p>[29] ESAB, «products.esab.com [Internett] (20.05.2013) <a href=)».

- [30] Tööstuse Teenindus, «[www.alas-kuul.com](http://www.alas-kuul.com/webmain.nsf/ESABok5010eng!openpage) [Internett] (20.05.2013) <http://www.alas-kuul.com/webmain.nsf/ESABok5010eng!openpage>,» [Internett].
- [31] Larsen, P. K., Aalberg. A. & Clausen. A. H., «Stålkonstruksjoner Profiler og Formler. 3 utg. Trondheim: Tapir Akademiske Forlag; 2007».
- [32] Furnes, H., «Kapasitet av høyfast stål [Prosjektoppgave] Trondheim: NTNU; 2003».
- [33] Simula, «Abaqus Analysis User's Manual 6.9».
- [34] Lervik, A. & Kolstrøm. A. Ø., Masteroppgave, Kapasitet og stivhet til bjelke/søyleknutepunkt, 2009, NTNU.
- [35] «CEN, NE-EN-1999-1-1 Prosjktering av aluminiumskonstruksjoner».

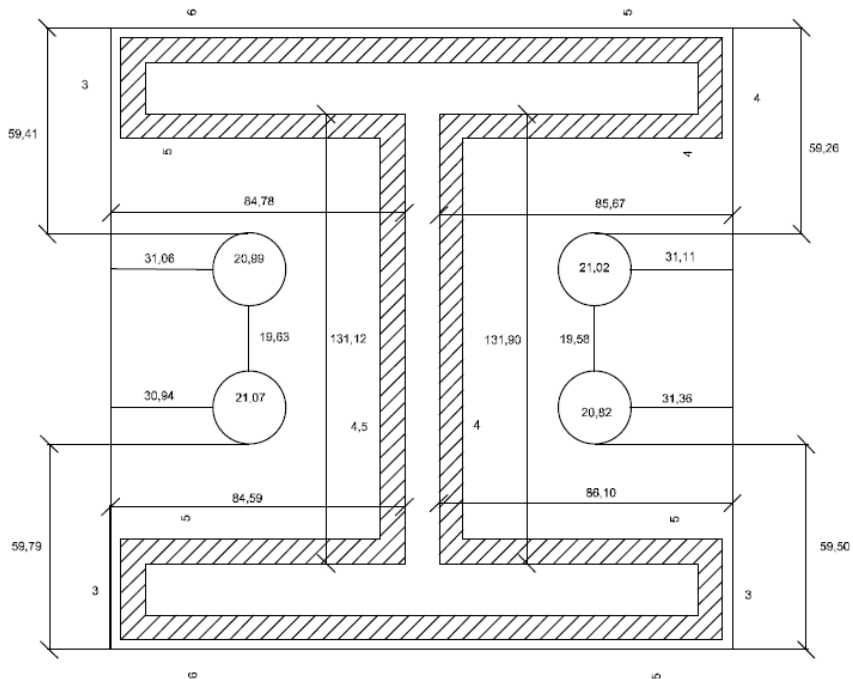


Vedlegg A – Eksakte mål av endeplatene

**H-W700**

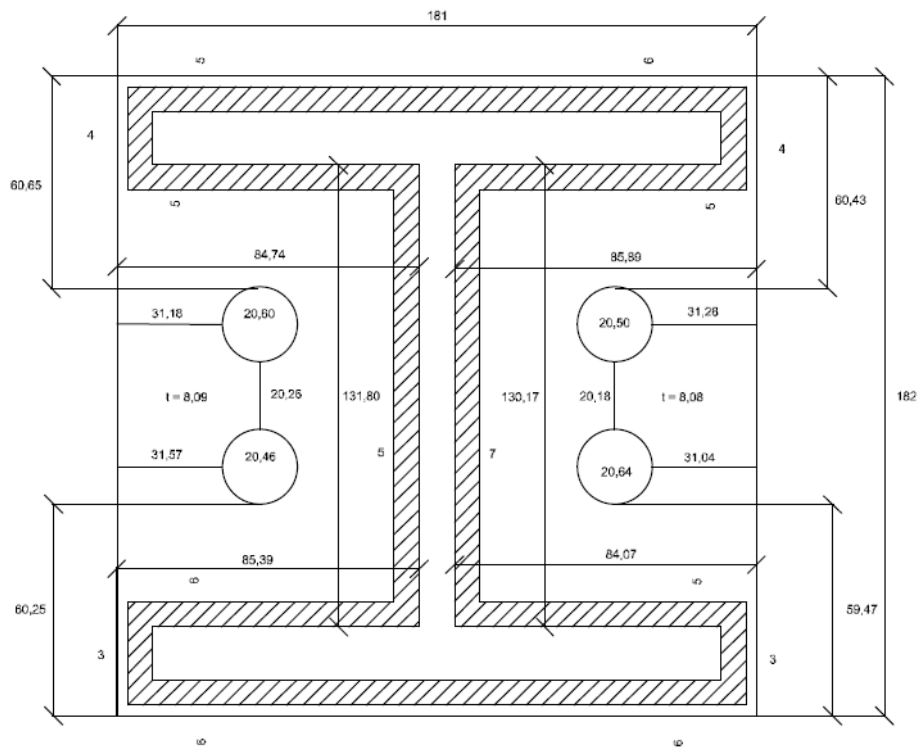


Figur B.1: Endeplate H-W700, 1 (mål i mm)

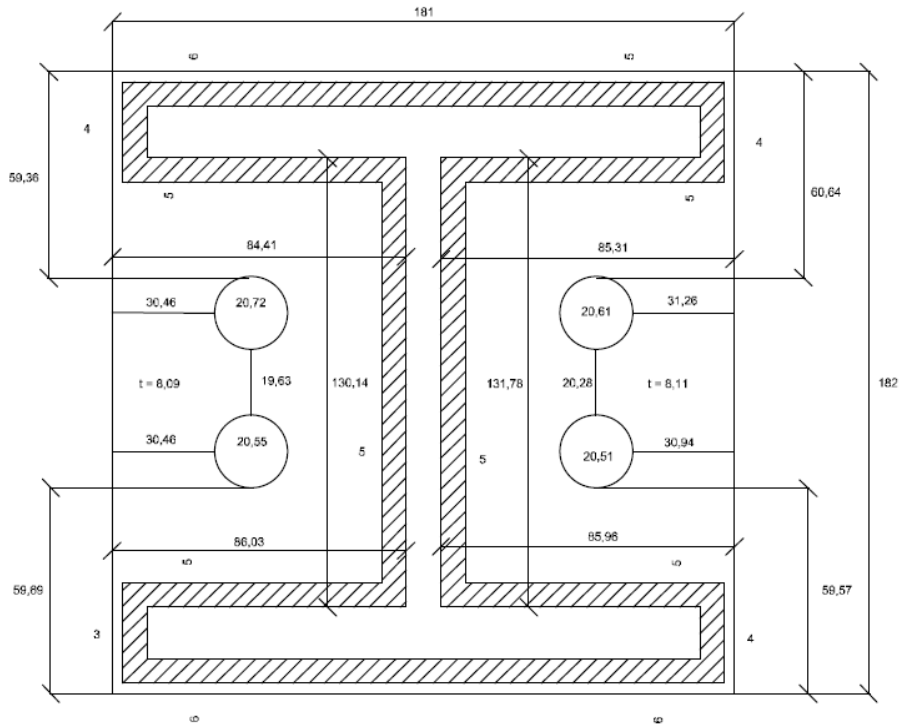


Figur B.2: Endeplate H-W700, 2 (mål i mm)

**H-S355**

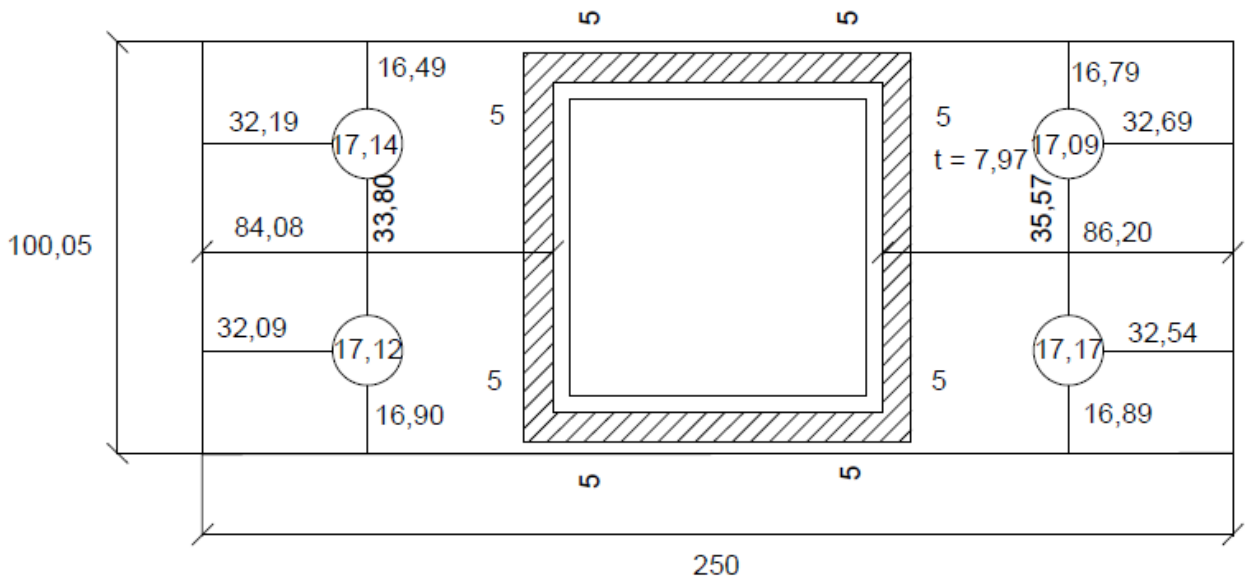


Figur B.3: Endeplate H-S355, 1 (mål i mm)

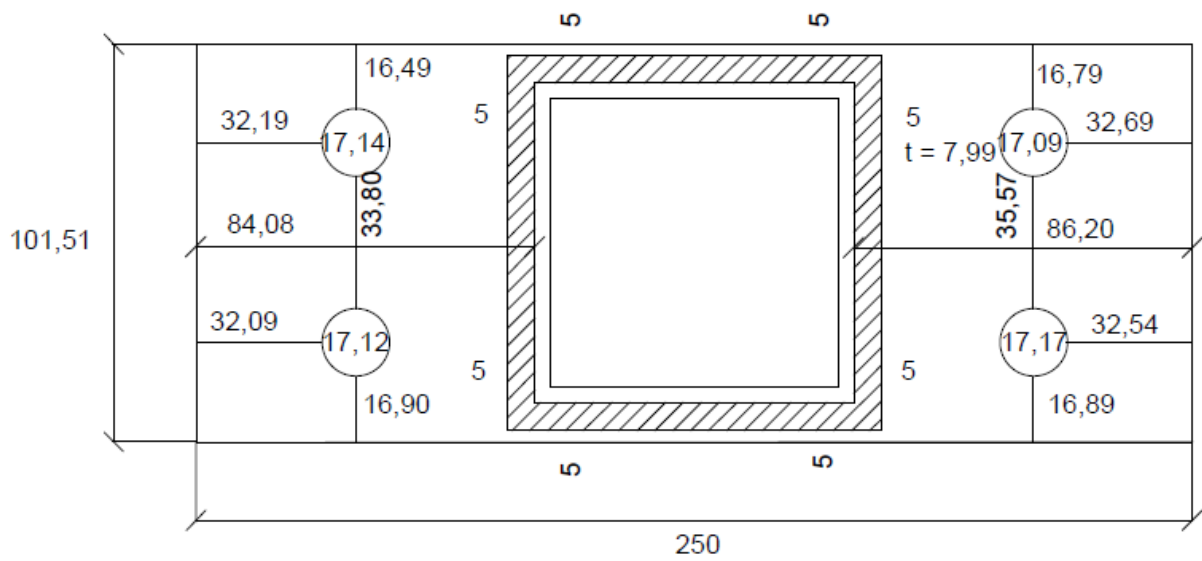


Figur B.4: Endeplate H-S355, 2 (mål i mm)

**HUP-W700**



Figur B.5: Endeplate HUP-W700, 1 (mål i mm)



Figur B.6: Endeplate HUP-W700, 2 (mål i mm)

Her presenteres de geometriske parametere basert på de eksakte målene. Parameterne for hver enkelt endeplate i prøvestykkene er basert på en middelvei.

Tabell B.1: Geometriske parametere H-W700

$m$	$m_2$	$\alpha$	$p$	$e$
37,93	40,01	5,83	40,27	41,68
38,03	39,66	5,83	40,58	41,73

Tabell B.2: Geometriske parametere H-S355

$m$	$m_2$	$\alpha$	$p$	$e$
37,82	39,82	5,83	40,77	41,54
38,70	39,46	5,83	41,53	41,08



Tabell B.3: Geometriske parametere HUP-W700

$e$	$m_x$	$w$	$e_x$
25,42	38,60	51,82	40,93
26,06	38,60	50,55	40,92

Tabell B.4.: Eksakte mål av profiler (alle mål gitt i mm)

Teststykke	H-profil*						HUP-profil		
	Lengde	Steg		Flens		Flens		Bredde	Tykkelse
		Bredde	Høyde	Bredde	Høyde	Bredde	Høyde		
H-W700	502	10,28	130,17	160	15,09	162	15,04		
	498	10,20	130,29	162	15,06	162	15,11		
H-S355	460	10,28	130,17	160	15,09	162	15,04		
	454	10,20	130,29	162	15,06	162	15,04		
HUP-W700	353							79,71	4,14
	367							79,76	4,17



## Vedlegg B – Beregninger

Beregner også kapasitet og stivhet for prøvestykke tilsvarende HUP-W700 med endeplate i S355. Dette fordi testresultatene fra dette prøvestykket testet av Egeland & Torstvedt [5] ble brukt til å si noe om testresultatene i denne rapporten sammenlignet med beregninger etter knutepunksstandard.

### Kapasitet og stivhet basert på nominelle verdier

Prøvestykkene H-W700 og H-S355 hadde samme effektive lengde av det ekvivalente T-stykke, fordi den nominelle geometrien var lik.

Dimensjonene man trenger for å beregne den effektiv lengden for T-stykke finnes i vedlegg A, og disse gav de geometriske parameterne presentert i tabell C.1. Avstandene  $m$ ,  $m_2$  og  $m_x$  er avstanden fra senter av hull til profil minus  $0,8\sqrt{2}a$ . Der  $a$  er  $a$ -målet på sveisen, og i dette tilfelle lik 5 mm. Verdien  $\alpha$  er funnet etter metode i knutepunksstandard. I prøvestykkene var det to T-stykker, og det multiplisere derfor med to for å få forbindelsens kapasitet.

### Effektiv lengde av T-stykke for H-W700 og H-S355

Tabell B.1: Geometriske parametere for H-W700 og H-S355

$m$	$m_2$	$\alpha$	$p$	$e$
38,34 mm	39,34 mm	5,83	40,0 mm	41,0 mm

$$\lambda_1 = \frac{m}{m+e} = \frac{38,3 \text{ mm}}{38,3 \text{ mm} + 41,0 \text{ mm}} = 0,483 \quad (\text{C.1})$$

$$\lambda_2 = \frac{m_2}{m+e} = \frac{39,3 \text{ mm}}{38,3 \text{ mm} + 41,0 \text{ mm}} = 0,496 \quad (\text{C.2})$$

### Effektiv lengden er den minste av:

Skruerad betraktet som en enkeltstående rad:

Sirkulært mønster  $l_{eff,cp}$ :

$$2\pi m = 240,90 \text{ mm} \quad (\text{C.3})$$

Ikke-sirkulært mønster  $l_{eff,nc}$ :

$$\alpha m = 223,52 \text{ mm} \quad (\text{C.4})$$

Skruerad betraktet som del av en gruppe av skruerader:

Sirkulært mønster  $l_{eff,cp}$ :

$$\pi m + p = 160,45 \text{ mm} \quad (\text{C.5})$$

Ikke-sirkulært mønster  $l_{eff,nc}$ :

$$0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e) = 141,22 \text{ mm} \quad (\text{C.6})$$

Bruddform 1:

$$\sum l_{eff,1} = \sum l_{eff,nc} \text{ men } \sum l_{eff,1} \leq \sum l_{eff,cp}$$

$$\sum l_{eff,1} = 141,22 \text{ mm}$$

Bruddform 2:

$$\sum l_{eff,2} = \sum l_{eff,nc}$$

$$\sum l_{eff,2} = 141,22 \text{ mm}$$

### Effektiv lengde av t-stykke for HUP-W700 og HUP-S355

Tabell C.2: Geometriske parametere for HUP-W700

$m_x$	$e_x$	$e$	$w$	$b_p$
39,34 mm	40 mm	25 mm	50 mm	100 mm

Effektivlengden er den minste av:

Skruerad betraktet som en enkeltstående rad:

Sirkulært mønster  $l_{eff,cp}$ :

$$2\pi m_x = 247,18 \text{ mm} \quad (\text{C.7})$$

$$\pi m_x + w = 173,59 \text{ mm} \quad (\text{C.8})$$

$$\pi m_x + 2e = 173,59 \text{ mm} \quad (\text{C.9})$$

Ikke-sirkulært mønster  $l_{eff,nc}$ :

$$4m_x + 1,25e_x = 207,36 \text{ mm} \quad (\text{C.10})$$

$$e + 2m_x + 0,625e_x = 128,68 \text{ mm} \quad (\text{C.11})$$

$$0,5b_p = 50 \text{ mm} \quad (\text{C.12})$$

$$0,5w + 2m_x + 0,625e_x = 128,68 \text{ mm} \quad (\text{C.13})$$

Bruddform 1:

$$l_{eff,1} = l_{eff,nc} \text{ men } l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$$

$$l_{eff,1} = 50 \text{ mm}$$

Bruddform 2:

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 50 \text{ mm}$$

### **H-W700**

#### **Kapasitet etter knutepunksstandarden**

Momentkapasiteten for bruddform 1 og 2 vil være lik. Da de har samme effektive lengde for T-stykke.

$$M_{pl,1,Rd} = M_{pl,2,Rd} = 0,25 \sum l_{eff} t_f^2 f_y / \gamma_{M0} = 0,25 * 141,22 * 8,00^2 * \frac{700}{1,00} = 1581664 \text{ Nmm} \quad (\text{C.14})$$

Kapasitet bruddform 1:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 1581664 \text{ Nmm}}{38,34 \text{ mm}} = 165 \text{ kN} \quad (\text{C.15})$$

To T-stykker:

$$165 \text{ kN} * 2 = 330 \text{ kN}$$

Kapasitet bruddform 2:

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m+n} = \frac{2 * 1581664 \text{ Nmm} + 41,0 \text{ mm} * 441 \text{ kN}}{38,34 \text{ mm} + 41,0 \text{ mm}} = 268 \text{ kN} \quad (\text{C.16})$$

To T-stykker:

$$268 \text{ kN} * 2 = 536 \text{ kN}$$

Kapasitet bruddform 3:

$$F_{T,3,Rd} = 441 \text{ kN} \quad (\text{C.17})$$

To T-stykker:

$$441 \text{ kN} * 2 = 882 \text{ kN}$$

Profilets karakteristiske dimensjonerende plastiske kapasitet [6]:

$$N_{pl,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{10\text{mm} * 100\text{mm} * 700\text{N/mm}^2}{1,00} = 700 \text{ kN} \quad (\text{C.18})$$

Karakteristisk dimensjonerende kapasitet sveis [30]:

Beregningene er basert på  $f_u$  lik 820 MPa og  $\beta_w$  lik 1,0.

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\gamma_{M2}\beta_w} \quad (\text{C.19})$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{F}{\sqrt{2}La} \quad (\text{C.20})$$

Lengde av sveis:

$$L = 4 * 15\text{mm} + 4 * 75\text{mm} + 2 * 160\text{mm} + 2 * 130\text{mm} = 940\text{mm}$$

a-mål = 5mm

Karakteristisk dimensjonerende kapasitet sveis:

$$\frac{2F}{\sqrt{2}La} = \frac{820}{1,00 * 1,0} \quad (\text{C.21})$$

$$F = \frac{820 * \sqrt{2} * 940 * 5}{1,00 * 1,0 * 2} = 2725 \text{ kN} \quad (\text{C.22})$$

**Stivhet etter knutepuntsstandarden**

Stivhetskoeffisienter for en endeplate:

$$k_{5,1} = k_{5,2} = \frac{0,9l_{eff}t_p^3}{m^3} = \frac{0,9*141,22*8,00^3}{38,34^3} = 1,155 \text{ mm} \quad (\text{C.23})$$

Indeksene 1 og 2 angir de to endeplatene i forbindelsen.

Stivhetskoeffisient for bolt:

$L_b$  er tatt som lengden av godstykkelsen til to plater (16 mm), to skiver (6 mm), en mutter (16 mm) og et halvt boltehode (6 mm).

$$k_{10} = \frac{1,6A_s}{L_b} = \frac{1,6*245}{6+6+16+16} = 8,91 \text{ mm} \quad (\text{C.24})$$

Den totale stivhetskoeffisienten for halve knutepunktet:

$$\frac{k_{total}}{2} = \frac{1}{\frac{1}{k_{5,1}} + \frac{1}{k_{5,2}} + \frac{1}{k_{10}}} = 0,542 \text{ mm} \quad (\text{C.25})$$

$$k_{total} = 1,084 \text{ mm}$$

Multipliserer med elastisitetsmodulen  $E$  for å finne den elastiske initiale stivheten for knutepunktet:

$$K_{el}^* = k_{total} * E = 1,091 \text{ mm} * 210000 \text{ N/mm}^2 = 227640 \text{ N/mm} \quad (\text{C.26})$$

**H-S355****Kapasitet etter knutepunksstandarden**

Profilets karakteristiske dimensjonerende plastiske kapasitet er lik kapasiteten ved H-W700. Momentkapasiteten for bruddform 1 og 2 vil være lik. Da de har samme effektive lengde for T-stykke.

$$M_{pl,1,Rd} = M_{pl,2,Rd} = 0,25 \sum l_{eff} t_f^2 f_y / \gamma_{M0} = 0,25 * 141,22 * 8,00^2 * \frac{355}{1,00} = 802130 \text{ Nmm}$$

Kapasitet bruddform 1:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 802130 \text{ Nmm}}{38,34 \text{ mm}} = 83,7 \text{ kN}$$

To T-stykker:

$$83,7 \text{ kN} * 2 = 167,4 \text{ kN}$$

Kapasitet bruddform 2:

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 802130 \text{ Nmm} + 41,0 \text{ mm} * 441 \text{ kN}}{38,34 \text{ mm} + 41,0 \text{ mm}} = 248 \text{ kN}$$

To T-stykker:

$$248 \text{ kN} * 2 = 496 \text{ kN}$$

Kapasitet bruddform 3:

$$F_{T,3,Rd} = 441 \text{ kN}$$

To T-stykker:

$$441 \text{ kN} * 2 = 882 \text{ kN}$$



Karakteristisk dimensjonerende kapasitet sveis:

Beregningene er basert på  $f_u$  lik 510 MPa og  $\beta_w$  lik 0,9.

Lengde av sveis:

$$L = 4 * 15\text{mm} + 4 * 75\text{mm} + 2 * 160\text{mm} + 2 * 130\text{mm} = 940\text{mm}$$

a-mål = 5mm

$$\frac{2F}{\sqrt{2}La} = \frac{510}{1,00 * 0,9}$$

$$F = \frac{510 * \sqrt{2} * 940 * 5}{1,00 * 0,9 * 2} = 1883 \text{ kN}$$

#### Stivhet etter knutepunktsstandarden

Stivheten for H-S355 basert på nominelle verdier vil være den lik stivheten til H-W700.

$$K_{el}^* = k_{total} * E = 1,091 \text{ mm} * 210000 \text{ N/mm}^2 = 227640 \text{ N/mm}$$

**HUP-W700****Kapasitet etter knutepunksstandarden**

Momentkapasiteten for bruddform 1 og 2 vil være lik. Da de har samme effektive lengde for T-stykke.

$$M_{pl,1,Rd} = M_{pl,2,Rd} = 0,25 \sum l_{eff} t_f^2 f_y / \gamma_{M0} = 0,25 * 50 * 8^2 * \frac{700}{1,00} = 560000 \text{ Nmm}$$

Kapasitet bruddform 1:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 560000 \text{ Nmm}}{39,3 \text{ mm}} = 56,9 \text{ kN}$$

To T-stykker:

$$56,9 \text{ kN} * 2 = 113,8 \text{ kN}$$

Kapasitet bruddform 2:

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 560000 \text{ Nmm} + 40 \text{ mm} * 226000 \text{ N}}{39,34 \text{ mm} + 40 \text{ mm}} = 128 \text{ kN}$$

To T-stykker:

$$128 \text{ kN} * 2 = 256 \text{ kN}$$

Kapasitet bruddform 3:

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 226 \text{ kN}$$

To T-stykker:

$$226 \text{ kN} * 2 = 452 \text{ kN}$$

Profilets karakteristiske dimensjonerende plastiske kapasitet:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$$

HUP 80\*80\*4:

A= 1210mm<sup>2</sup>

$$N_{pl,Rd} = \frac{1210 \text{ mm}^2 * 355 \text{ N/mm}^2}{1,00} = 430 \text{ kN}$$

Karakteristisk dimensjonerende kapasitet sveis:

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

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{F}{\sqrt{2}La}$$

Lengde av sveis:

$$L = 4 \cdot 80 \text{ mm} = 320 \text{ mm}$$

a-mål = 5 mm

Dimensjonerende kapasitet sveis:

$$\frac{2F}{\sqrt{2}La} = \frac{510}{1,00 \cdot 0,9}$$

$$F = \frac{510 \cdot \sqrt{2} \cdot 320 \cdot 5}{1,00 \cdot 0,9 \cdot 2} = 641 \text{ kN}$$

### **Stivhet etter knutepunktsstandarden**

Stivhetskoeffisient endeplate:

$$k_{5,1} = k_{5,2} = \frac{0,9l_{eff}t_p^3}{m^3} = \frac{0,9 \cdot 50 \cdot 8,00^3}{39,34^3} = 0,378 \text{ mm}$$

Indeksene 1 og 2 angir de to endeplatene i forbindelsen.

Stivhetskoeffisient for bolt:

$L_b$  er tatt som lengden av godstykkelsen til to plater (16 mm), to skiver (6 mm) en halv mutter (6 mm) og en halve boltehode (5 mm).

$$k_{10} = \frac{1,6A_s}{L_b} = \frac{1,6 \cdot 157}{11 + 6 + 16} = 7,61 \text{ mm}$$

Den totale stivhetskoeffisienten for halve knutepunktet:

$$\frac{k_{total}}{2} = \frac{1}{\frac{1}{k_{5,1}} + \frac{1}{k_{5,2}} + \frac{1}{k_{10}}} = 0,184 \text{ mm}$$

$$k_{total} = 0,368 \text{ mm}$$

Multipliserer med elastisitetsmodulen,  $E$ , for å finne den elastiske initiale stivheten for knutepunktet:

$$K_{el}^* = k_{total} * E = 0,368 \text{ mm} * 210000 \text{ N/mm}^2 = 77280 \text{ N/mm}$$

### **HUP-S355**

#### **Kapasitet etter knutepunksstandarden**

Bare bruddform 1 for det ekvivalente T-stykke er beregnet her. Dette på grunn av at dette prøvestykket kun ble brukt til sammenligning.

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \sum l_{eff} t_f^2 f_y / \gamma_{M0} = 0,25 * 50 * 8^2 * \frac{355}{1,00} = 284000 \text{ Nmm}$$

Kapasitet bruddform 1:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 284000 \text{ Nmm}}{39,34 \text{ mm}} = 28,9 \text{ kN}$$

To T-stykker:

$$28,9 \text{ kN} * 2 = 57,8 \text{ kN}$$

#### **Stivhet etter knutepunksstandarden**

Den nominelle stivheten for dette prøvestykke vil være lik den for HUP-W700.

$$K_{el}^* = k_{total} * E = 0,369 \text{ mm} * 210000 \text{ N/mm}^2 = 77280 \text{ N/mm}$$

### Kapasitet og stivhet basert på eksakte verdier

Ved kapasitetsberegningene basert på eksakte verdier blir bare kapasiteten for bruddform 1 til de ekvivalente T-stykkene i prøvestykkene beregnet. Da det var denne bruddmekanismen som var dimensjonerende for prøvestykkene.

#### H-W700

Den effektive lengden i T-stykke vil være bestemt av samme mekanisme som for den nominelle geometrien. Beregningene er basert på verdiene vist i tabell C.3, som er en middelverdi av begge endeplatene.

Tabell C.3: Midlere geometriske parametere og mål for H-W700

$m$	$m_2$	$e$	$p$	$\alpha$	$t_p$
37,98	39,84	41,71	40,43	5,83	7,91

Ikke-sirkulært mønster  $l_{eff,nc}$ :

$$0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e) = 139,61 \text{ mm}$$

#### Kapasitet etter knutepunktstandarden

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \sum l_{eff} t_f^2 f_y / \gamma_{M0} = 0,25 * 139,61 * 7,91^2 * \frac{790}{1,00} = 1725189 \text{ Nmm}$$

Kapasitet bruddform 1:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 1725189 \text{ Nmm}}{37,98 \text{ mm}} = 182 \text{ kN}$$

To T-stykker:

$$182 \text{ kN} * 2 = 364 \text{ kN}$$

#### Stivhet etter knutepunktstandarden

De eksakte målene av endeplatetykkelse er gitt i vedlegg B.

Stivhetskoeffisienter for endeplatene:

$$k_{5,1} = \frac{0,9 l_{eff} t_p^3}{m^3} = \frac{0,9 * 139,61 * 7,90^3}{37,98^3} = 1,131 \text{ mm}$$

$$k_{5,2} = \frac{0,9 l_{eff} t_p^3}{m^3} = \frac{0,9 * 139,61 * 7,91^3}{37,98^3} = 1,136 \text{ mm}$$

Indeksene 1 og 2 angir de to endeplatene i forbindelsen.

Stivhetskoeffisient for bolt:

$L_b$  er tatt som lengden av godstykkelsen til to plater (15,81 mm), to skiver (6 mm), en mutter (16 mm) og en halve boltehode (6 mm).

$$k_{10} = \frac{1,6A_s}{L_b} = \frac{1,6 * 245}{6 + 6 + 15,81 + 16} = 8,95 \text{ mm}$$

Den totale stivhetskoeffisienten for halve knutepunktet:

$$\frac{k_{total}}{2} = \frac{1}{\frac{1}{k_{5,1}} + \frac{1}{k_{5,2}} + \frac{1}{k_{10}}} = 0,533 \text{ mm}$$

$$k_{total} = 1,066 \text{ mm}$$

Multipliserer med elastisitetsmodulen  $E$  for å finne den elastiske initiale stivheten for knutepunktet:

$$K_{el}^* = k_{total} * E = 1,066 \text{ mm} * 210000 \text{ N/mm}^2 = 223860 \text{ N/mm}$$

### H-S355

Den effektive lengden i T-stykke vil være bestemt av samme mekanisme som for den nominelle geometrien. Beregningene er basert på verdiene vist i tabell C.4, som er en middelværdi av begge endeplatene.

Tabell C.4: Midlere geometriske parametere og mål for H-S355

$m$	$m_2$	$e$	$p$	$\alpha$	$t_p$
38,26	39,64	41,31	41,15	5,83	8,09

Ikke-sirkulært mønster  $l_{eff,nc}$ :

$$0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e) = 146,58 \text{ mm}$$

### Kapasitet etter Eurokode 3

Flytespenningen ble basert på en middelværdi ut fra materialtester utført av Karlsen [11] og Egeland & Torstvedt [5] og ble satt lik 465 MPa.

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \sum l_{eff} t_f^2 f_y / \gamma_{M0} = 0,25 * 146,58 * 8,09^2 * \frac{465}{1,00} = 1115231 \text{ Nmm}$$

Kapasitet bruddform 1:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 1115231 \text{ Nmm}}{38,26 \text{ mm}} = 117 \text{ kN}$$

To T-stykker:

$$117 \text{ kN} * 2 = 234 \text{ kN}$$

### **Stivhet etter knutepunktstandarden**

Stivhetskoeffisienter for en endeplate:

$$k_{5,1} = \frac{0,9l_{eff}t_p^3}{m^3} = \frac{0,9 * 146,58 * 8,08^3}{38,26^3} = 1,243 \text{ mm}$$

$$k_{5,2} = \frac{0,9l_{eff}t_p^3}{m^3} = \frac{0,9 * 146,58 * 8,10^3}{38,26^3} = 1,252 \text{ mm}$$

Indeksene 1 og 2 angir de to endeplatene i forbindelsen.

Stivhetskoeffisient for bolt:

$L_b$  er tatt som lengden av godstykkelsen til to plater (16,18 mm), to skiver (6 mm), en mutter (16 mm) og en halve boltehode (6 mm).

$$k_{10} = \frac{1,6A_s}{L_b} = \frac{1,6 * 245}{6 + 6 + 16,18 + 16} = 8,87 \text{ mm}$$

Den totale stivhetskoeffisienten for halve knutepunktet:

$$\frac{k_{total}}{2} = \frac{1}{\frac{1}{k_{5,1}} + \frac{1}{k_{5,2}} + \frac{1}{k_{10}}} = 0,583 \text{ mm}$$

$$k_{total} = 1,166 \text{ mm}$$

Multipliserer med elastisitetsmodulen  $E$  for å finne den elastiske initiale stivheten for knutepunktet:

$$K_{el}^* = k_{total} * E = 1,166 \text{ mm} * 210000 \text{ N/mm}^2 = 244860 \text{ N/mm}$$

**HUP-W700**

Den effektive lengden i T-stykke vil være bestemt av samme mekanisme som for den nominelle geometrien. Beregningene er basert på en middelvei av breddene vist i figur B.5 og B.6.

Ikke-sirkulært mønster  $l_{eff,nc}$ :

$$0,5b_p = 50,39 \text{ mm}$$

**Kapasitet etter knutepunksstandarden**

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \sum l_{eff} t_f^2 f_y / \gamma_{M0} = 0,25 * 50,39 * 7,98^2 * \frac{790}{1,00} = 633749 \text{ Nmm}$$

Kapasitet bruddform 1:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 633749 \text{ Nmm}}{38,60 \text{ mm}} = 65,7 \text{ kN}$$

To T-stykker:

$$182 \text{ kN} * 2 = 131,4 \text{ kN}$$

**Stivhet etter knutepunksstandarden**

Stivhetskoeffisienter for en endeplate:

$$k_{5,1} = \frac{0,9 l_{eff} t_p^3}{m^3} = \frac{0,9 * 50,39 * 7,97^3}{38,60^3} = 0,399 \text{ mm}$$

$$k_{5,2} = \frac{0,9 l_{eff} t_p^3}{m^3} = \frac{0,9 * 50,39 * 7,99^3}{38,60^3} = 0,402 \text{ mm}$$

Indeksen 1 og 2 angir de to endeplatene i forbindelsen.

Stivhetskoeffisient for bolt:

$L_b$  er tatt som lengden av godstykkelsen til to plater (15,96 mm), to skiver (6 mm), en halv mutter (6 mm) og en halve boltehode (5 mm).

$$k_{10} = \frac{1,6 A_s}{L_b} = \frac{1,6 * 157}{6 + 11 + 15,96} = 7,62 \text{ mm}$$



Den totale stivhetskoeffisienten for halve knutepunktet:

$$\frac{k_{total}}{2} = \frac{1}{\frac{1}{k_{5,1}} + \frac{1}{k_{5,2}} + \frac{1}{k_{10}}} = 0,195 \text{ mm}$$

$$k_{total} = 0,39 \text{ mm}$$

Multipliserer med elastisitetsmodulen  $E$  for å finne den elastiske initiale stivheten for knutepunktet:

$$K_{el}^* = k_{total} * E = 0,39 \text{ mm} * 210000 \text{ N/mm}^2 = 81900 \text{ N/mm}$$

### **HUP-S355**

Beregningene her er basert på eksakte mål foretatt av Egeland og Torstvedt [5]. Ut fra målingene til Egeland & Torstvedt [5] ble følgende middelveier bestemt og brukt i beregningene:

- $b_p = 100 \text{ mm}$
- $m = 40,19 \text{ mm}$
- $t_p = 8,10 \text{ mm}$

Ikke-sirkulært mønster  $l_{eff,nc}$ :

$$0,5b_p = 50 \text{ mm}$$

### **Kapasitet etter knutepunktstandard**

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \sum l_{eff} t_f^2 f_y / \gamma_{M0} = 0,25 * 50,00 * 8,10^2 * \frac{465}{1,00} = 381358 \text{ Nmm}$$

Kapasitet bruddform 1:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{4 * 381358 \text{ Nmm}}{40,19 \text{ mm}} = 38 \text{ kN}$$

To T-stykker:

$$38 \text{ kN} * 2 = 76 \text{ kN}$$

**Stivhet etter knutepunktstandarden**

Stivhetskoeffisienter for en endeplate:

$$k_{5,1} = k_{5,2} = \frac{0,9l_{eff}t_p^3}{m^3} = \frac{0,9 * 50 * 8,10^3}{40,19^3} = 0,368 \text{ mm}$$

Indeksen 1 og 2 angir de to endeplatene i forbindelsen.

Stivhetskoeffisient for bolt:

$L_b$  er tatt som lengden av godstykkelsen til to plater (15,96 mm), to skiver (6 mm), en halv mutter (6 mm) og en halve boltehode (5 mm).

$$k_{10} = \frac{1,6A_s}{L_b} = \frac{1,6 * 157}{6 + 11 + 16,20} = 7,57 \text{ mm}$$

Den totale stivhetskoeffisienten for halve knutepunktet:

$$\frac{k_{total}}{2} = \frac{1}{\frac{1}{k_{5,1}} + \frac{1}{k_{5,2}} + \frac{1}{k_{10}}} = 0,18 \text{ mm}$$

$$k_{total} = 0,36 \text{ mm}$$

Multipliserer med elastisitetsmodulen  $E$  for å finne den elastiske initiale stivheten for knutepunktet:

$$K_{el}^* = k_{total} * E = 0,39 \text{ mm} * 210000 \text{ N/mm}^2 = 75600 \text{ N/mm}$$

## Vedlegg C – Materialdata

Materialdata som materialkurvene i de numeriske analysene er basert på er presentert her.

### **Endeplatematerialer**

#### **Weldox 700**

Tabell C.1: Materialdata Weldox 700

Sann plastiske tøyning	Sann spenning
0	790
0.002	798.5
0.004	803.9
0.006	807.1
0.008	810.5
0.01	813.7
0.012	817.2
0.014	820.9
0.016	824.7
0.018	828.6
0.02	832.7
0.022	836.7
0.024	840.6
0.026	844.5
0.028	848.1
0.03	851.3
0.032	854
0.034	858
0.036	860.8
0.038	863.8
0.04	866.3
0.042	868.7
0.044	870.7
0.046	872.2
0.1055	922.9

#### **S355**

Tabell C.2: Materialdata for S355

Sann plastisk tøyning	Sann spenning
0	464.66
0.01	472.9
0.02	477.93
0.03	525.33

0.04	554.27
0.05	577
0.06	595.33
0.07	609.66
0.08	621.66
0.09	632.33
0.1	642
0.11	650.66
0.12	658.66
0.13	665
0.14	672
0.15	678.66
0.16	683
0.17	688.7
0.18	691.3

### ***Profiler***

#### ***HUP-profiler (S355)***

Sann plastisk tøyning	Sann spenning
0	396.6
0.01	402.6
0.02	420.6
0.03	462.2
0.04	492.7
0.05	515.5
0.06	535.1
0.07	551
0.08	564.4
0.09	576
0.1	586.1
0.11	595.2
0.12	603.4
0.13	611
0.14	617.8
0.15	623.6
0.16	628.8