

Momentbelastede endeplateforbindelser - med bruk av høystål

Markus Sjølund Dyrstad
Erik Olav Kristiansen

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2017

Hovedveileder: Arne Aalberg, KT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for konstruksjonsteknikk



MASTEROPPGAVE 2017

FAGOMRÅDE: Stålkonstruksjoner	DATO: 11.06.17	ANTALL SIDER: 146 + 32 (Vedlegg)
----------------------------------	-------------------	-------------------------------------

TITTEL:

Momentbelastede endeplateforbindelser – med bruk av høyfast stål

Torque-loaded end plate connections – with use of high strength steel

UTFØRT AV:

Markus Sjølund Dyrstad og
Erik Olav Kristiansen



SAMMENDRAG:

I rapporten beregnes kapasitet og initialstivhet til knutepunkter satt sammen av kvadratiske hulprofiler sveist til en endeplate i høyfast stål (WELDOX 700). Dette gjøres da Eurokode 3 del 1-8: «Knutepunkter og forbindelser» ikke gir en spesifikk anvisning for beregning av slike forbindelser. Det er sett på hvordan Eurokodens føringer kan videreføres og modifiseres til også å gjelde for de aktuelle knutepunktene testet i denne rapporten. Rapporten fastslår at initialstivheten til knutepunktene som er undersøkt, overestimeres stort ved bruk av Eurokodens måte å beregne rotasjonsstivhet på.

Det er utført laboratorieforsøk på tre ulike prøvestykker. Dette for å ha et sammenligningsgrunnlag for de analytiske beregningene, og for å se prøvestykkens reelle oppførsel ved belastning. I laboratoriet ble prøvestykkene betraktet som søyleføtter uten aksiallast, og ble av praktiske hensyn montert som utkragerbjelker og last ble påført manuelt.

Resultatene fra laboratorieforsøkene ble brukt til å lage numeriske modeller i elementprogrammet Abaqus. Modellene ble benyttet for verifisering og utvidelse av stivhetsmodeller.

Tidligere er det utført lignende rapporter om momentbelastede endeplateforbindelser. Det er gjort sammenligninger og vurderinger av knutepunktens oppførsel i de tilfeller hvor det foreligger resultater for to like prøvestykker med ulik stål kvalitet. Dette for å vise forskjeller mellom høyfast og vanlig konstruksjonsstål.

FAGLÆRER: Førsteamanuensis Arne Aalberg

VEILEDER(E): Førsteamanuensis Arne Aalberg, NTNU
Professor emeritus Per Kristian Larsen, NTNU

UTFØRT VED: Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU



Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for konstruksjonsteknikk

MASTEROPPGAVE VÅREN 2017

Markus Sjølund Dyrstad og Erik Olav Kristiansen

Momentbelastede endeplateforbindelser – med bruk av høystål

Torque-loaded end plate connections – with use of high strength steel

1. Bakgrunn

Dimensjoneringsregler og formler for skjøter og knutepunkter i stålkonstruksjoner er gitt i knutepunktsstandarden NS-EN 1993-1-8, «Dimensjonering av knutepunkter». Standarden gir anvisning for dimensjonering av forbindelseselementer som skruer, sveiser og plater, og tar for seg de mest brukte knutepunktsgeometriene i typiske bygningsrammer og fagverksbærere. Standarden dekker i hovedsak komponenter med I-tverrsnittsform (standardens kapittel 6). Reglene i standarden er basert på komponentmetoden, hvor hvert knutepunkt betraktes som en samling av enkle basiskomponenter med kjent oppførsel. For skrudde knutepunkter og skjøter mellom hulprofiler gir ikke standarden spesifikk anvisning, annet enn det som er gitt for helsveiste knutepunkter i fagverk (kap.7).

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 typiske knutepunktsgeometrier, i strekk og i bøyning. I denne oppgaven skal det sees spesielt på hulprofiler med endeplateforbindelser med belastning i form av bøyemoment, og hvordan forbindelsene kan beregnes med hensyn på momentkapasitet og bøyestivhet. Det skal sees spesielt på hvordan reglene i standarden stemmer for knutepunkter med endeplater av høystål.

2. Gjennomføring

Oppgaven kan gjennomføres med følgende elementer:

- Kort redegjørelse for beregningsreglene for knutepunkter, og bakgrunnen for disse.
- Redegjørelse for bruk av høyfast stål og hva det medfører når det brukes til endeplater i forbindelsene.
- Utvelgelse og dimensjonering av knutepunktgeometrier for prøving i laboratoriet. Komplettering av tidligere forsøk, utvelgelse av nye, relevante geometrier. Det skal sees spesielt på hulprofiler med endeplate, med momentbelastning. Det kan også bli aktuelt å prøve endeplateforbindelser for H-profiler.
- Nøyaktig oppmåling og registrering av geometrien til produserte knutepunkter, gjennomføring av forsøk, rapportering og vurdering av disse.
- Etterregning med eksisterende analytiske modeller for kapasitet og stivhet, og vurdering av hvor godt dette samsvarer med forsøkene.
- Etterregning av forsøk med et elementmetodeprogram (ABAQUS).
- Eventuelt forslag til, og utprøving av, egne kapasitets- og stivhetsmodeller for endeplateforbindelsene.
- Evt. gjøre lastvirkningsberegninger for en eller flere bygningsrammer med et egnet rammeprogram (FAP eller lignende) for å belyse hvordan oppførselen (stivhet og kapasitet) til knutepunktet påvirker rammens oppførsel. Diskutere stivhetsgrensene i NS-EN 1993-1-8 for leddet oppførsel og kontinuerlig oppførsel.

Kandidatene kan i samråd med faglærer og veileder 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 11. juni 2017.

Medveileder er professor emeritus Per Kristian Larsen, NTNU.

Trondheim, 12. januar 2017

Arne Aalberg, Professor NTNU/UNIS

Forord

Denne rapporten er en masteroppgave skrevet våren 2017 ved Institutt for konstruksjonsteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelig universitet (NTNU). Oppgaven utgjør 30 studiepoeng og tilsvarer 20 ukers arbeid.

Rapporten omhandler undersøkelse og vurdering av stivhet og kapasitet til momentpåkjennte hulprofilskjøter med endeplate av høyfast stål. Det er utført laboratorieforsøk for ulike knutepunksgeometrier. Resultatene benyttes til sammenligning av håndberegninger, FEM-analyser og forsøk gjort med vanlig konstruksjonsstål, samt utvikling av beregningsmodell for rotasjonsstivhet.

Vi ønsker å rette en stor takk til vår veileder, førsteamanuensis Arne Aalberg ved Institutt for konstruksjonsteknikk, for god veiledning og støtte under arbeidet. Ved Institutt for konstruksjonsteknikk vil vi også takke avdelingsingeniør Gøran Loraas, avdelingsingeniør Ragnar Moen, overingeniør Trond Auestad og ingeniør Steinar Seehuus for hjelp i forbindelse med laboratorieforsøk. Til slutt vil vi også takke hverandre for et meget godt samarbeid i prosessen med å utarbeide denne rapporten.

Trondheim, 11. juni 2017

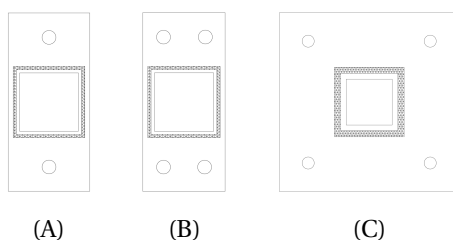
Markus Sjølund Dyrstad

Erik Olav Kristiansen

Sammendrag

I denne oppgaven undersøkes oppførselen til endeplateforbindelser av høyfast stål belastet med bøyingsmoment. Knutepunktet er satt sammen av et kvadratisk hulprofil sveist til en endeplate. I *Eurokode NS-EN 1993-1-8*, som omhandler knutepunkter av stål, foreligger beregningsregler for knutepunkter med endeplater for I- og H-profiler. Hulprofilskjøter med endeplater er ikke spesifikt behandlet i Eurokoden.

Denne oppgavens hovedmål er å anvende Eurokodens regelverk fra kapittel 6 *Knutepunkter med H- eller I-profiler*, og undersøke hvor nøyaktig kapasitet og initiell rotasjonsstivhet lar seg bestemme for tre ulike hulprofilskjøter av høyfast stål. De tre knutepunktene som er testet er vist under. Knutepunkt A og B er bøyd om sterk og svak akse med endeplate av WELDOX 700-stål. Knutepunkt C er bøyd om en hovedakse med endeplate av WELDOX 700- og S355-stål.



De tre knutepunktene betraktes som søyleføtter uten aksiallast, og forsøkene i laboratoriet er av praktiske hensyn utført som en fast innspent bjelke. I laboratoriet punktlastes den fast innspente bjelken på enden og rotasjonen av knutepunktet loggføres. Resultatene fra laboratorietestene sammenlignes med håndberegninger basert på Eurokoden og antatte flytelinjer i endeplaten. Det er også laget elementmodeller for alle forbindelsene. Elementmodellene skal simulere knutepunktens oppførsel ved belastning, og avsløre stivhet og kapasitet.

Håndberegninger basert på Eurokoden overestimerer den initielle rotasjonsstivheten til knutepunkt A og B med omtrent 100%, sammenlignet med resultater fra forsøk i laboratoriet. For prøvestykkene med geometri A og B, bøyd om sterk akse, stemmer kapasitetsberegningene godt overens med forsøksresultatene. For bøyning om svak akse gir håndberegningene en for stor kapasitet. Kapasitetsberegninger er basert på flytelinjeteori.

Grunnet utformingen av knutepunkt C, er ikke Eurokoden direkte anvendbar for stivhets-

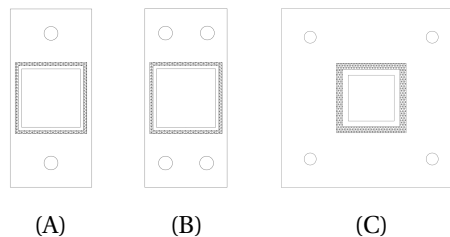
beregninger. Stivhetsberegninger er basert på stivhetskoeffisienter fra Eurokoden og bidrag funnet ved elementanalyser. Håndberegnet momentkapasitet for prøvestykke med geometri C er vesentlig høyere enn kapasitet funnet i laboratoriet. Håndberegnet stivhet stemmer godt overens med stivhet fra laboratoriet. Knutepunkt C med S355-stål avslører at forholdet mellom økning av flytespenning og momentkapasitet er omtrent 1 : 1.

Elementmodellene for knutepunkt A og B gir gode resultater for beregning av kapasitet sammenlignet med laboratorieforsøk. Initialstivheten beregnet i elementprogrammet gir en noe stivere løsning enn forsøk i laboratoriet, men avvikene er relativt små. For knutepunkt C overestimerer elementmodellen både momentkapasitet og initiell stivhet med god margin.

Abstract

In this report, the behaviour of end plate connections of high strength steel subjected to bending are investigated. The connections consists of a rectangular hollow section welded to an extended end plate. In *Eurocode NS-EN 1993-1-8*, which applies to steel connections, design rules for connections with end plates with I- and H-profiles are found. Connections consisting of hollow sections and end plates are not treated spesifically in the Eurocode.

The main goal of this report is to apply the rules in chapter 6 from the Eurocode, *structural joints connecting H or I sections*, and examine how accurate capacity and initial stiffness can be determined for three different square hollow section connections of high strength steel. The three connections which are tested are illustrated below. Specimen A and B are bent about both strong and weak axis with end plate of WELDOX 700 steel. Specimen C is bent about one major axis with end plate of WELDOX 700 and S355 steel.



The three joints are considered as column bases without axial load, and the experiments in the laboratory are due to practical reasons carried out as a cantilever beam. In the laboratory, the cantilever is point loaded on the tip, and the rotation at the joint is logged. The results from the laboratory tests are compared with hand calculations using the Eurocode and the assumed yield lines in the end plate. There are also made numrical models for all the geometries using element analysis program. The element models shall simulate the joints behaviour under load, and reveal stiffness and capacity.

Hand calculations based on the Eurocode overestimates the initial rotational stiffness for specimen A and B with about 100% compared with results from the laboratory. For specimen A and B bent about the strong axis, the analytical capacity calculations closely match the experimental results. For bending about the weak axis, the hand calculations gives a capacity which is too strong. Capacity calculations are based on yield line theory.

Due to its design, the Eurocode is not directly applicable for stiffness calculations for specimen C. Stiffness calculations are based on stiffness coefficients from the Eurocode and contributions found using element analysis. Hand calculated moment capacity for specimen C is considerably higher than the capacity found in the laboratory. Hand calculated stiffness closely match the stiffness found in the laboratory. Specimen C with S355 steel reveals that the ratio between an increase of yield stress and an increase of moment capacity is about 1 : 1.

The finite element models for specimen A and B gives good results for moment capacity compared with laboratory tests. The initial stiffness found from the element models gives a slightly stiffer solution than the laboratory results, but the deviations are small. For specimen C, the element models overestimates both the moment capacity and the initial stiffness with a large margin.

Innhold

Oppgavetekst	i
Forord	iii
Sammendrag	v
Abstract	vii
1 Introduksjon	1
2 Tidligere studentarbeider	3
2.1 Masteroppgave av Arne Martin Uhre	3
2.2 Masteroppgave av Thomas Voksøy Bringsvor	4
2.3 Masteroppgave av Firoz Feruzi Kassim	5
3 Konstruksjonsanalyse	7
3.1 Globalanalyse	7
3.2 Klassifisering av knutepunkter	8
3.2.1 Klassifisering etter stivhet	8
3.2.2 Klassifisering etter styrke	10
3.3 Komponentmetoden	11
3.4 Flytelinjeteori	12
3.5 T-stykke	12
3.6 Rotasjonsstivhet	15
4 Høyfast stål	17
4.1 Bakgrunn og utvikling	17
4.2 Mekaniske egenskaper	18
4.3 Standardverk	19
4.4 Dagens bruk av høyfast stål i konstruksjoner	19
5 Beskrivelse av prøvestykker og forsøksoppsett	21
5.1 Laboratorieoppsett	21

5.2	Utstyr	22
5.3	Forsøksgeometrier	23
5.4	Definisjon av bøyingsakser	24
5.5	Utførelse	25
5.5.1	Forsøksserier i elastisk område	25
5.5.2	Forsøksserier i plastisk område	25
5.6	Egenvekt	26
5.7	Usikkerhet	27
6	Strekktesting av materialprøver	29
6.1	Endeplate av WELDOX 700	30
6.2	Endeplate av S355	31
6.3	80x80x8mm Hulprofil av S355	34
7	Bøyning av knutepunkt A	35
7.1	Innledning	35
7.2	Håndberegninger	36
7.2.1	Kapasitet	36
7.2.2	Stivhet	39
7.3	Laboratorieforsøk	43
7.3.1	Undersøkelse av elastisk oppførsel	43
7.3.2	Undersøkelse av plastisk oppførsel	46
7.4	Sammenligning av håndberegninger mot laboratorieresultater	48
7.4.1	Bøyning om sterk akse	48
7.4.2	Bøyning om svak akse	49
8	Bøyning av knutepunkt B	51
8.1	Innledning	51
8.2	Håndberegninger	52
8.2.1	Kapasitet	52
8.2.2	Stivhet	54
8.3	Laboratorieforsøk	57
8.3.1	Undersøkelse av elastisk oppførsel	57
8.3.2	Undersøkelse av plastisk oppførsel	60

8.4	Sammenligning av håndberegninger mot laboratorieresultater	62
8.4.1	Bøyning om sterk akse	62
8.4.2	Bøyning om svak akse	63
9	Sammenligning og diskusjon - knutepunkt A og B	65
9.1	Diskusjon av resultater	65
9.1.1	Klassifisering av søylefot	65
9.1.2	Bestemmelse av initiell rotasjonsstivhet	66
9.1.3	Bestemmelse av momentkapasitet	68
9.1.4	Kommentarer til momentkapasitetsresultater	70
9.2	Sammenligning mot tidligere arbeid	72
9.2.1	Duplisering av arbeid gjort av Kassim	72
9.2.2	Sammenligning mot endeplate av S355	73
9.3	Oppsummering	77
10	Numerisk analyse - knutepunkt A og B	79
10.1	Deformasjonsmønstre	79
10.2	Responskurver	81
11	Modifisert stivhetsmodell - knutepunkt A og B, sterk akse	85
11.1	Modifisering av stivhetsmodell	87
11.2	Kommentarer til modifisert stivhetsmodell	91
12	Bøyning av knutepunkt C	93
12.1	Innledning	93
12.2	Håndberegninger	94
12.2.1	Kapasitet	94
12.2.2	Stivhet	101
12.3	Laboratorieforsøk	110
12.3.1	Knutepunkt med endeplate av WELDOX 700	111
12.3.2	Knutepunkt med endeplate av S355	113
12.4	Sammenligning av håndberegninger mot laboratorieresultater	116
12.4.1	Endeplate av WELDOX 700	116
12.4.2	Endeplate av S355	117

13 Diskusjon av resultater - knutepunkt C	119
13.1 Klassifisering av søylefot	119
13.2 Beregning av momentkapasitet	120
13.3 Stivhetsmodell for håndberegning	121
13.4 Sammenligning av resultater for endeplate av WELDOX 700 og S355	122
13.4.1 Stivhet	123
13.4.2 Kapasitet	124
13.5 Oppsummering	125
14 Numerisk analyse - knutepunkt C	127
14.1 Modellen	127
14.1.1 Lastpåføring	128
14.1.2 Interaksjon mellom komponenter	129
14.2 Komponentene	130
14.2.1 Endeplate	130
14.2.2 Hulprofil	131
14.2.3 Sveis	132
14.2.4 Bolt	133
14.3 Parameterstudie av endeplate	134
14.4 Sammenligning av numerisk analyse og forsøk	136
14.4.1 Deformasjonsmønster	136
14.4.2 Responskurver	137
15 Konklusjon	141
15.1 Kapasitetsberegninger	141
15.2 Stivhetsberegninger	142
15.3 Forslag til videreføring av oppgave	143
Referanser	145
Vedlegg	
A Forsøksgeometrier	1
A.1 Forsøksgeometri A	1
A.2 Forsøksgeometri B	3

A.3	Forsøksgeometri C	4
B	Utledning av kapasitetsformler for knutepunkt A og B	7
B.1	Knutepunkt A og B - sterk akse	7
B.2	Knutepunkt A - svak akse	8
B.3	Knutepunkt B - svak akse	10
C	Kapasitetsberegninger	13
C.1	Generelt for knutepunkt A og B	13
C.2	Knutepunkt A	15
C.2.1	Sterk akse	15
C.2.2	Svak akse	17
C.3	Knutepunkt B	17
C.3.1	Sterk akse	17
C.3.2	Svak akse	18
C.4	Knutepunkt C	19
D	Beregning av rotasjonsstivhet for knutepunkt A og B	23
D.1	Knutepunkt A	23
D.1.1	Sterk akse	23
D.1.2	Svak akse	24
D.2	Knutepunkt B	24
D.2.1	Sterk akse	24
D.2.2	Svak akse	25
E	Moment-rotasjon-kurver fra laboratorieforsøk	27
E.1	Knutepunkt A - sterk akse	27
E.2	Knutepunkt A - svak akse	28
E.3	Knutepunkt B - sterk akse	29
E.4	Knutepunkt B - svak akse	30
E.5	Knutepunkt C - Endeplate av S355	31
E.6	Knutepunkt C - Endeplate av WELDOX 700	32

1. Introduksjon

Knutepunktstandarden *NS-EN 1993-1-8: Knutepunkter og forbindelser* [5] er del av Eurokode 3 og omhandler hovedsakelig prosjektering av knutepunkter i stål. Standarden tar for seg beregningsregler og prosedyrer for hvordan å bestemme kapasitet og rotasjonstivhet til disse knutepunktene i stålrammer. For bestemmelse av kapasitet og stivhet benytter Eurokoden en komponentmodell hvor knutepunktet deles inn i basiskomponenter. Basiskomponentene har kjent oppførsel og kombineres for å beskrive den totale responsen. I denne rapporten tar kapittel 3 for seg konstruksjonsanalyse i henhold til gjeldende regelverk, samt plastisk kapasitetsanalyse etter flytelinjeteori.

Regler og retningslinjer gitt i NS-EN 1993-1-8 dekker hovedsakelig stålprofiler med H- og I-tverrsnitt og stålsort fra S235 til S460. Det vil i denne rapporten undersøkes hvordan disse er egnet for momentbelastede endeplateforbindelser med hulprofil hvor endeplaten er av høyfast stål. Knutepunktene i denne rapporten blir betraktet som søyleføtter uten aksiallast.

Det er tidligere skrevet flere masteroppgaver som omhandler knutepunkter med skrudd endeplate og påsveist hulprofil. I kapittel 2 gjengis funnene fra tre masteroppgaver skrevet i 2014, 2015 og 2016.

Rapporten er inndelt etter knutepunktenes geometri. For hvert knutepunkt vil det utføres håndberegninger av kapasitet og stivhet før prøvestykket testes i laboratoriet. Resultatene fra de analytiske beregningene sammenlignes med laboratorieresultater. Det vil også gjøres sammenligning av forsøk gjort med vanlig konstruksjonsstål for tilsvarende knutepunkter. Numeriske analyser utføres i Abaqus og har til hensikt å beskrive knutepunktets oppførsel fra laboratoriet. Disse benyttes for å forbedre stivhetsmodellene for de utprøvde geometriene.

2. Tidligere studentarbeider

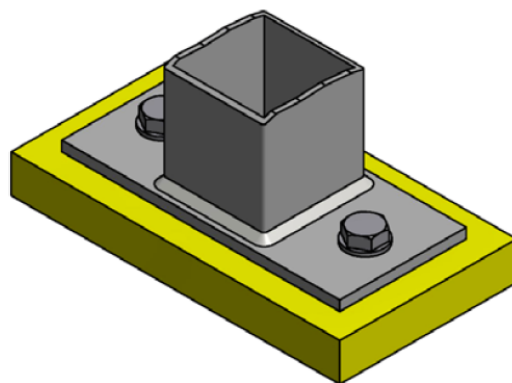
Det er tidligere skrevet flere masteroppgaver som omhandler momentbelastede endeplateforbindelser med hulprofiler. I det følgende vil relevante resultater fra noen av disse presenteres.

2.1 Masteroppgave av Arne Martin Uhre

Arne Martin Uhre skrev sin master i 2014 med fokus på klassifiseringsgrenser for søyleføtter og hulprofiler med endeplateforbindelse, *Hulprofil med endeplateforbindelse* [14]. Resultatene ble brukt i globalanalyse for en rammekonstruksjon bestående av hulprofiler.

For å kontrollere klassifiseringsgrensene for søyleføtter gitt i NS-EN 1993-1-8 [5], ble det gjennomført kapasitet- og stivhetsberegninger etterfulgt av laboratorieforsøk og FEM-analyser for to knutepunkter med hulprofiler med påsveist endeplate. Uhre presenterte relevant innhold fra NS-EN 1993-1-8 med vekt på klassifisering av knutepunkter. Beregningsregler for forbindelser ble redegjort for ved gjennomgang av komponentmetoden, T-stykke og stivhetskoeffisienter.

Uhre kom frem til at det ikke er behov for en nedre grense for klassifisering av stivhet for søyleføtter. Det betyr at søyleføtter opptrer som et stivt eller delvis stivt knutepunkt. Dette er i samsvar med Eurokoden slik den foreligger.



Figur 2.1: Endeplateforbindelsen undersøkt av Uhre

Dimensjoneringsreglene i NS-EN 1993-1-8 er laget for I- og H-profiler. Uhre undersøkte om disse kan benyttes til også å omfatte knutepunkter bestående av hulprofiler med påsveist endeplate. Det ble gjennomført flere eksperimentelle forsøksserier med to ulike prøvestykker. I forsøkene var endeplaten boltet fast i en forsøksrigg med to bolter, en på hver side av hulprofilet.

Kapasitetsberegninger for bøyning om sterk akse utført etter NS-EN 1993-1-8 og flytelinjeberegninger, ga en for lav kapasitet sammenlignet med resultater fra laboratoriet. Kapasiteten funnet i laboratoriet ble estimert til 1,5 ganger kapasitet fra beregninger etter Eurokoden. For bøyning om svak akse, viste det seg vanskelig å anta rett flytelinjemønster i platen grunnet komplisert bruddmekanisme. Flytelinjene ble bestemt i etterkant av forsøket ved visuell inspeksjon. Kapasitetsberegning basert på flytelinjeteori for svak akse ga etter dette samsvarende resultater med laboratorieforsøk.

Resultatene fra Arne Martin Uhre sin masteroppgave [14] ble benyttet ved utarbeidelse av et konferanseforedrag. Dette ble utformet i samarbeid mellom Arne Martin Uhre, Arne Aalberg og Per Kristian Larsen.

2.2 Masteroppgave av Thomas Voksøy Bringsvor

Thomas Voksøy Bringsvor skrev mastoppgave med tittelen *oppførsel til momentbelastede knutepunkter for hulprofiler* [3] våren 2015. Oppgaven hadde som mål å undersøke tre ulike knutepunkter utført som søyleføtter, hvor en av disse var utprøvd i laboratoriet av en annen student ved en tidligere anledning. De to gjenstående forbindelsene var ansett som uprøvede. Forskjellen på prøvestykkene var endeplatens geometri, med platetykkelse og boltavstand som variabler. Til felles hadde alle geometriene en rektangulær endeplate med én bolt på hver side av hulprofilet. Hulprofilet ble festet på endeplatens midtpunkt og forbindelsen ble bøyd om begge hovedaksene.

Bringsvor konstruerte en basismodell i elementprogrammet Abaqus og utførte numeriske analyser på det utprøvede knutepunktet. Videre ble det gjennomført laboratorieforsøk og analytiske håndberegninger på alle de tre prøvestykkene. En tilpasset Abaqus-modell ble benyttet for å utføre numeriske analyser på de to uprøvede knutepunktene.

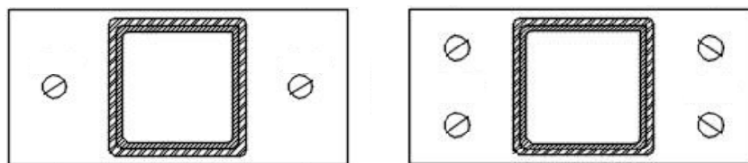
Bringsvor observerte for alle prøvestykkene at Abaqus overestimerete kapasiteten med 10-25% ved bøyning om svak akse. Håndberegningene overestimerte også kapasiteten sammenlignet med laboratorieresultatene. For bøyning om sterk akse samsvarte resultatene bedre.

Tendensen var at Abaqus- og forsøksresultatene sammenfalt godt ved lave momentpåkjenninger, men at flytning forekommer tidligere i laboratoriet. Å sammenligne beregningsresultatene mot det som ble registrert i laboratoriet, ble funnet utfordrende da det elastiske området fra forsøksdataene opplevde en ujevn stigning på moment-rotasjons-kurven. I de numeriske analysene var det elastiske området tydelig lineært før plastifisering. Den initielle stivheten er inntil 40% høyere i Abaqus-analysen sammenlignet med forsøk. Håndberegningene gir en enda større stivhet.

2.3 Masteroppgave av Firoz Feruzi Kassim

Firoz Feruzi Kassim skrev i 2016 masteroppgave om momentbelastede hulprofilskjøter med endeplate av høyfast stål (WELDOX 700) [9]. Oppgaven er en videreføring av tidligere arbeid utført av Uhre [14] og Kirkerud [10], hvor tilnærmet like forbindelser ble undersøkt, men med vanlig konstruksjonsstål (S355).

Kassim utførte beregninger og laboratorieforsøk på hulprofilskjøter hvor rektangulære endeplater ble påført bøyingsmoment om svak og sterk akse. To knutepunkter ble testet. Et med to bolter som Uhre, og et med fire bolter som Kirkerud.



Figur 2.2: Endeplateforbindelser undersøkt av Kassim

Kassim sammenligner kapasitet- og stivhetsberegninger med resultater innhentet fra laboratorieforsøk. Det konkluderes med at kapasitetsberegningene gjort for hånd er konservative, med unntak av når forbindelsen med to bolter bøyes om svak akse. Her overestimeres håndberegningene kapasiteten med 10% sammenlignet med forsøksresultatene. Kassim definerer

knutepunktets momentkapasitet ved forsøkets slutt, altså når bjelken får så stor nedbøyning at den tar i gulvet. Dette er sammenfallende med maksimal last under forsøk.

Det konkluderes med at den initielle stivheten beregnet for hånd overestimeres når forbindelsen med to bolter bøyes om begge akser. Det samme skjer når forbindelsen med fire bolter bøyes om sterk akse. Derimot underestimeres den initielle stivheten med 10% når forbindelsen med fire bolter bøyes om svak akse.

Kassim modellerer forbindelsene i elementprogrammet Abaqus og sammenligner resultatene med målte forsøksresultater. Det konkluderes med at Abaqus-modellen gir en god representasjon av knutepunktens moment-rotasjon-kurver, og kapasitetsresultatene fraviker på sitt meste med 11%. Det er knyttet noe mer usikkerhet til resultatene fra sammenligningen av den initielle stivheten. For de fire gjennomførte forsøkene underestimerer modellen den initielle stivheten (i gjennomsnitt) med 43%. Kassim påpeker at den numeriske modellen ikke tar høyde for forspenning av boltene som kan være en avgjørende feilkilde.

3. Konstruksjonsanalyse

I dette kapittelet presenteres deler av kapittel 5 og 6 fra NS-EN 1993-1-8, videre kalt *knutepunktstandarden*. Tidligere masteroppgaver har gjort rede for mye av innholdet i knutepunktstandarden, men grunnet temaets betydning for oppgaven, vil det også inkluderes her. Kapittel 5 i knutepunktstandarden gir regler for hvordan et knutepunkt skal analyseres og klassifiseres. Kapittel 6 omhandler definisjoner og regneregler for knutepunkter med H- og I-profiler.

3.1 Globalanalyse

Knutepunktstandarden skiller mellom tre ulike forenklede modeller for knutepunkters oppførsel. Hvilken modell som gjelder er avhengig av knutepunktens moment-rotasjon-relasjon for fordeling av lastvirkningene i konstruksjonen. De tre modellene er leddet, delvis bøyingsstiv og bøyingsstiv. Et leddet knutepunkt overfører ikke bøyingsmomenter, men vil få rotasjoner grunnet momentbelastning. Et bøyingsstivt knutepunkt har så små rotasjoner at moment-rotasjon-relasjonen ikke har betydning for analysen. For delvis bøyingsstive knutepunkter, som hverken er leddet eller bøyingsstivt, må det tas hensyn til moment-rotasjon-relasjon i analysen.

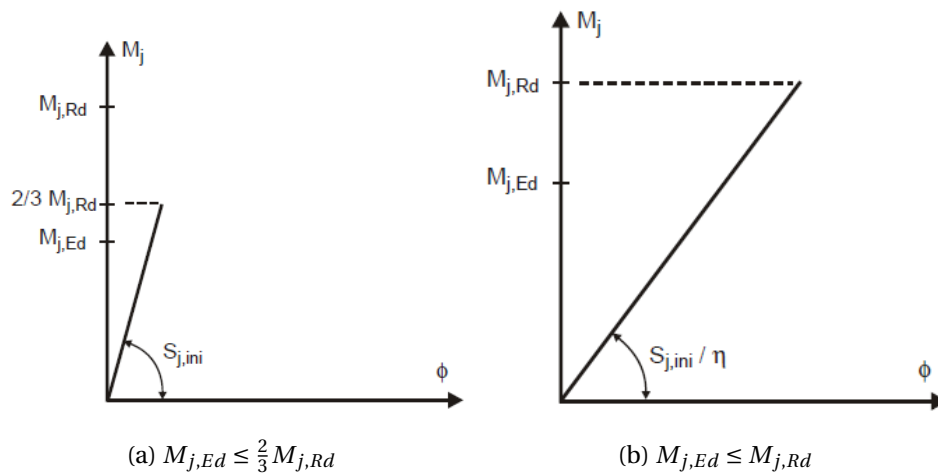
Valg av knutepunktmodell baseres på valg av analysemetode og knutepunktets klassifisering.

Tabell 3.1: Type knutepunktmodell [5]

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

Stiv-plastisk og elastisk-plastisk er forenklede analysemetoder som normalt er konservative. Det ses bort fra herding av materialet ved plastifisering, slik at maksimal spenning i materialet settes lik flytespenningen. For stiv-plastisk ses det bort fra elastiske deformasjoner.

I en lineær elastisk analyse bør knutepunktene klassifiseres etter sin rotasjonsstivhet. Med delvis bøyingsstive knutepunkter bør rotasjonsstivheten S_j som hører til bøyingsmomentet $M_{j,Ed}$, brukes i analysen. Hvis $M_{j,Ed}$ ikke overskrider $\frac{2}{3}M_{j,Rd}$, kan initialstivheten $S_{j,ini}$ brukes i den globale analysen. Som en forenkling kan rotasjonsstivheten i analysen settes lik $\frac{S_{j,ini}}{\eta}$ for alle verdier av momentet $M_{j,Ed}$, se figure 3.1b, der η er en modifikasjonskoeffisient som blant annet tar hensyn til om knutepunktet er sveist eller skrudd med endeplater.



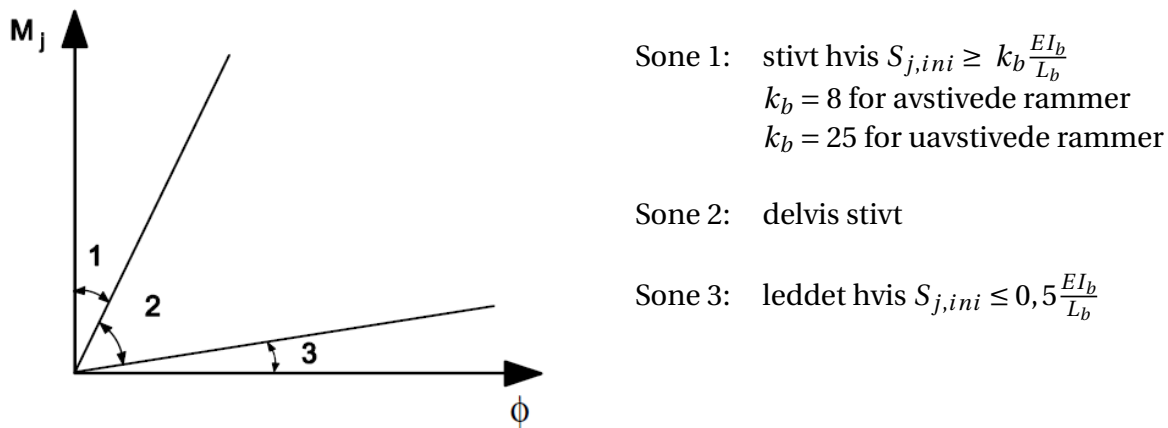
Figur 3.1: Rotasjonsstivhet for lineær elastisk global analyse

3.2 Klassifisering av knutepunkter

Som nevnt i kapittel 3.1 velges en knutepunktmodell basert på en global analysemodell og klassifisering av knutepunktet. Et knutepunkt klassifiseres etter stivhet og styrke.

3.2.1 Klassifisering etter stivhet

Rotasjonsstivheten til et knutepunkt avgjør om knutepunktet regnes som leddet, delvis leddet eller stivt. Ved å sammenligne knutepunktets initialrotasjonsstivhet med gitte klassifiseringsgrenser fra knutepunktstandarden klassifiseres knutepunktet. Se figur 3.2 for klassifiseringsgrenser.



Figur 3.2: Klassifisering av knutepunkter etter stivhet

Tabell 3.2: Tegnforklaring til figur 3.2

- K_b er middelerdien av $\frac{l_b}{L_b}$ for alle bjelker i toppen av den aktuelle etasjen;
- K_c er middelerdien av $\frac{l_c}{L_c}$ for alle søyler i den aktuelle etasjen;
- I_b er en bjelkes andre arealmoment;
- I_c er en søyles andre arealmoment;
- L_b er en bjelkes spennvidde;
- L_c er en søyles etasjehøyde;
- k_b er en faktor som tar hensyn til horisontal avstivning av aktuell konstruksjon

Eurokoden [5] lister opp kravene for de tre knutepunktene, bestemt etter stivhet. Nominelt leddete knutepunkter bør overføre reaksjonskrefter uten at det oppstår momenter av betydning på tilgrensende komponenter. Disse knutepunktene bør også tåle rotasjoner som følge av dimensjonerende last. Stive knutepunkter skal prinsipielt ikke rotere. Det kan derfor forutsettes at det er full kontinuitet ved beregning av forskyvninger. Delvis stive knutepunkter, er knutepunkter som ikke oppfyller kravene til leddete- eller stive knutepunkter. Et delvis stivt knutepunkt bør kunne overføre alle opptredende lastvirkninger. Figur 3.2 er en grafisk fremstilling av definisjonene for stivhet i knutepunkt. Knutepunkter i sone 1 vil få små rotasjoner ved relativt store momenter. Knutepunkter i sone 3 vil få store rotasjoner ved relativt små momenter. Klassifisering av knutepunkter med hulprofiler er ikke gitt i standarden, men et knutepunkt kan klassifiseres på grunnlag av prøving, erfaring eller beregning basert på prøveresultater.

3.2.1.1 Klassifisering av søyleføtter

Søyleføtter med endeplater klassifiseres enten som et stivt eller et delvis stivt knutepunkt. Ina Birkeland [2] viste i sin masteroppgave i 2011 at søyleføtter med endeplate ikke opptrer som ledd. En grense for klassifisering av søyleføtter som ledd er dermed ikke nødvendig. I Eurokoden står det at søyleføtter kan klassifiseres som stive forutsatt at følgende betingelser er oppfylt:

I rammer med et avstivningssystem som reduserer horisontal forskyvning med minst 80%, og der det kan ses bort fra virkninger av sideforskyvning [5]:

- hvis $\bar{\lambda}_0 \leq 0,5$;
- hvis $0,5 < \bar{\lambda}_0 < 3,93$ og $S_{j,ini} \geq 7(2\bar{\lambda}_0 - 1)EI_c/L_c$;
- hvis $\bar{\lambda}_0 \geq 3,93$ og $S_{j,ini} \geq 48EI_c/L_c$.

Ellers hvis $S_{j,ini} \geq 30EI_c/L_c$

der:

- $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}}$
- $\bar{\lambda}_0$ er en søyles slankhet dersom begge endene antas som leddet;
- I_c og L_c er som angitt i tabell 3.2

3.2.2 Klassifisering etter styrke

Knutepunkter klassifiseres etter styrke ved å sammenligne knutepunktets momentkapasitet, $M_{j,Rd}$, med den dimensjonerende momentkapasiteten til de komponentene som forbindes i knutepunktet. Det er tre type knutepunkter basert på styrkeklassifisering [5].

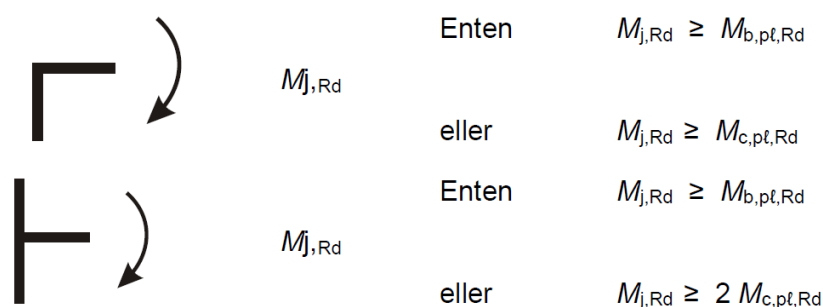
Eurokoden sier følgende om *leddete* knutepunkter:

- (1) Et leddet knutepunkt bør kunne overføre lastvirkningene uten at det oppstår momenter av betydning som kan virke ugunstig for de innfeste stavene eller på konstruksjonen generelt.
- (2) Et leddet knutepunkt bør kunne tåle rotasjonene som følger av dimensjonerende laster.
- (3) Et knutepunkt kan klassifiseres som leddet hvis dets dimensjonerende momentkapasitet $M_{j,Rd}$ ikke er større enn 0,25 ganger den dimensjonerende momentkapasiteten som kreves for en full-styrke-forbindelse, forutsatt at det også har tilstrekkelig rotasjonskapasitet.

Eurokoden sier følgende om knutepunkter med *full styrke*:

(1) Dimensjonerende kapasitet for et knutepunkt med full styrke bør ikke være mindre enn kapasiteten til de stavene som møtes i knutepunktet.

(2) Et knutepunkt kan klassifiseres som en full-styrke-forbindelse hvis det oppfyller kriteriene i figur 3.3. Figuren viser regler for knutepunkter for søyletopp og mellom to etasjer.

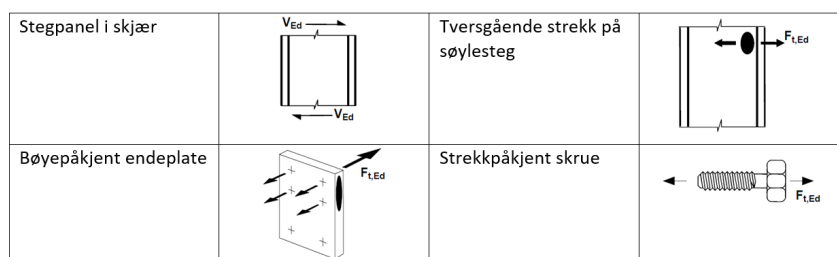


Figur 3.3: Knutepunkter med full styrke [5]

Et knutepunkt som ikke oppfyller kravene til *leddet-* eller *full-styrke-*knutepunkt, bør klassifiseres som et knutepunkt med delvis styrke.

3.3 Komponentmetoden

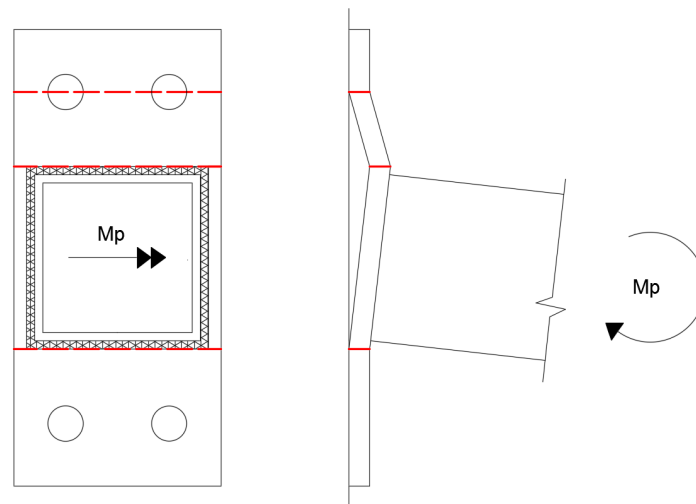
For bestemmelse av konstruksjonsegenskapene til knutepunkter tar knutepunktstandarden [5] utgangspunkt i *komponentmetoden*. Et komplekst knutepunkt blir modellert som en sammenføring av basiskomponenter, hvor hver komponent har en kjent oppførsel og individuelle beregningsmetoder. For kapasitetsberegninger vil den svakeste basiskomponenten være dimensjonerende. For rotasjonsstivhet blir knutepunktet betraktet som et ekvivalent fjærsystem, hvor hver komponent bidrar med hver sin stivhet. I knutepunktstandarden tabell 6.1 finnes de aktuelle basiskomponentene, med henvisning videre til tabell 6.11 for stivhetskoeffisienter. Figur 3.4 viser et utvalg av komponentene.



Figur 3.4: Utvalg av basiskomponenter fra knutepunktstandarden [5]

3.4 Flytelinjeteori

For tverrbelastede plater kan den plastiske momentkapasiteten beregnes ved hjelp av *flytelinjemetoden*. Ved å anta at platens plastiske deformasjon opptrer i et antall flytelinjer, og øvrige deler av platen forblir elastiske og udeformerte, dannes en kinematisk mekanisme. Metoden baseres på plastisitetsteoriens øvre grenseteorem som vil gi en ikke-konservativ løsning med mindre korrekt flytemekanisme er antatt. Det vil derfor i teorien være nødvendig å beregne et uendelig antall mekanismer for å finne platens kapasitet. For kjente geometrier finnes heldigvis kjente løsninger [11]. Figur 3.5 viser et eksempel hvor flytelinjer (røde linjer) oppstår i endeplaten ved bøyning av en hulprofilskjøt.

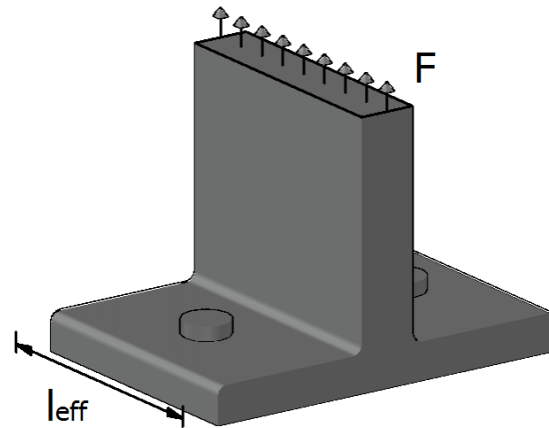


Figur 3.5: Eksempel på kinematisk flytemekanisme

Bjelke-søyle-forbindelser mellom I- og H-profiler modelleres ofte med ekvivalente T-stykker. For slike knutepunkter presenterer knutepunktstandarden tabeller som gir formel for beregning av effektive lengder av T-stykke basert på mulige flytelinjemekanismer. Se kapittel 3.5.

3.5 T-stykke

For å dimensjonere konstruksjonsdetaljer hvor platedeler er påkjent av strekk fra skruer, for eksempel i søyleflens eller endeplater, benyttes det i Eurokoden et ekvivalente *T-stykke* til modellering [11].

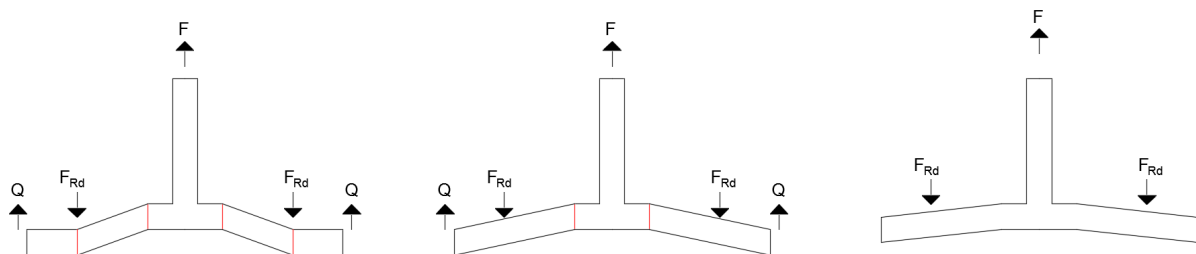


Figur 3.6: T-stykke med strekkraft og effektiv lengde

Gitt at skruene har nok strekkapasitet, vil platen være dimensjonerende og flytelinjemekanismer vil oppstå. Å bestemme hvilken flytelinjemekanisme som vil gjelde, er arbeidskrevende for et gitt antall skruer. Ved å modellere platedelen som et ekvivalent T-stykke, og bestemme dens effektive lengde, kan kapasiteten bestemmes av den svakeste mekanismen. Den effektive lengden Σl_{eff} , er ikke en fysisk lengde, men lengden som tilsvarer energien som skal til for å skape en flytelinjemekansisme. Knutepunktstandarden gir tre mulige bruddformer for et T-stykke. De tre er vist i figur 3.7 og i tabell 3.3.

Tabell 3.3: Dimensjonerende kapasitet $F_{T,Rd}$ i et T-stykke med strekk [5]

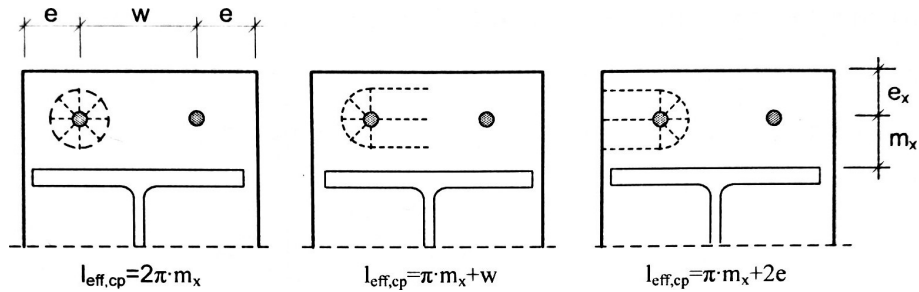
Bruddform	Type brudd	Dimensjonerende kapasitet
Bruddform 1	Fullstendig flyting i flens	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m}$
Bruddform 2	Skruebrudd sammenfallende med flyting i flens	$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n\Sigma F_{T,Rd}}{m+n}$
Bruddform 3	Skruebrudd	$F_{T,3,Rd} = \Sigma F_{T,Rd}$



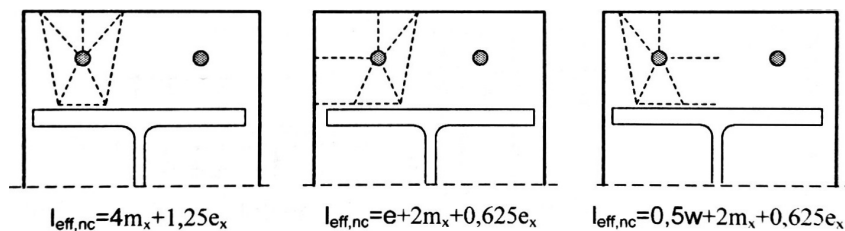
Figur 3.7: Illustrasjon av bruddform 1, 2 og 3

Hvor platens flytemoment er gitt som $M_{pl,i,Rd} = \Sigma l_{eff} \frac{f_y t^2}{4}$, med t for flens- eller platetykkelse.

Som nevnt i kapittel 3.4 er det for bjelke-søyle-forbindelser gitt tabeller med effektive lengder for ulike bruddmekanismer. I figur 3.8 og 3.9 er det vist de ulike flytelinjemekanismene som skjer i overkant av flens, for bjelke-søyle-forbindelser modellert med ekvivalente T-stykker.

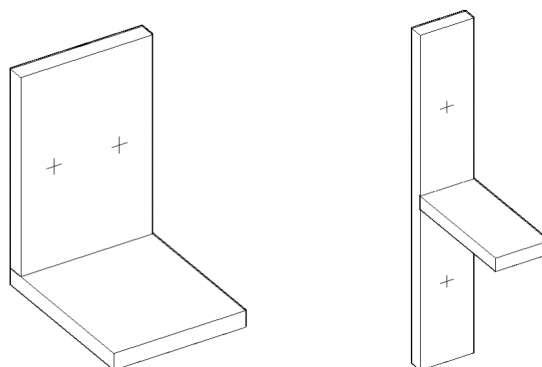


Figur 3.8: Sirkulære bruddmønstre [11]



Figur 3.9: Ikke-sirkulære bruddmønstre [11]

For knutepunkter som har endeplater som stikker ut over bjelkeflensen, modelleres delen mellom flensene og den utstikkende delen som to ekvivalente T-stykker. Platedelen over flensen gjøres om til et T-stykke som vist i figur 3.10. I figuren vil den effektive lengden bli lik bredden til platen til høyre.



Figur 3.10: Modellering av utstikkende platedel

3.6 Rotasjonsstivhet

Et knutepunkt får sin stivhet fra komponentene som inngår i forbindelsen. Ved hjelp av komponentmetoden omtalt i 3.3, bestemmes knutepunktets rotasjonsstivhet. I knutepunktstandarden [5] foreligger en grunnleggende modell for beregning av knutepunktets rotasjonsstivhet. Gitt at aksialkraften i en søyle ikke overskrider 5% av dimensjonerende kapasitet $N_{pl,Rd}$ av tverrsnittet, kan rotasjonsstivheten S_j bestemmes med følgende ligning:

$$S_j = \frac{Ez^2}{\mu \sum \frac{1}{k_i}} \quad (3.1)$$

z er momentarmen

μ er stivhetsforholdet $\frac{S_{j,ini}}{S_j}$

k_i er stivhetskoeffisienten for basiskomponent i i knutepunktet

Ligningen er gyldig for bjelke-søyle-forbindelser for momenter $M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd}$ i knutepunktet. For knutepunkter med endeplate, og mer enn én skruerad har strekk, bør man beregne en ekvivalent stivhetskoeffisient k_{eq} og en ekvivalent momentarm z_{eq} . Ulike komponentstivheter k_i , er tabulert i ligningsform i knutepunktstandarden [5]. Ved å benytte forholdet mellom initialstivheten og sekantstivheten $\mu = \frac{S_{j,ini}}{S_j} = 1$, kan ligning (3.1) skrives om til:

$$S_{j,ini} = k_{tot} E z^2 \quad (3.2)$$

hvor

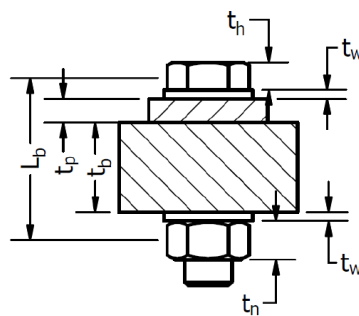
$$k_{tot} = \frac{1}{\sum \frac{1}{k_i}} \quad (3.3)$$

Da det i denne oppgaven er hulprofiler, og ikke I- eller H-profiler som er tilknyttet det aktuelle knutepunktet, vil mange av basiskomponentene i knutepunktstandarden ikke være gjeldende. Det er kun to basiskomponenter som kan benyttes direkte til å bestemme rotasjonsstivheten til de undersøkte knutepunktene. Endeplate påkjent av bøyning og skruer påkjent av strekk, henholdsvis basiskomponent k_5 og k_{10} . Utledning av disse stivhetsbidragene vil ikke forekomme i denne rapporten da det har blitt gjort av en rekke tidligere studenter.

$$k_5 = \frac{0,9 \times l_{eff} \times t_p^3}{m_x^3} \quad (3.4)$$

$$k_{10} = 1,6 \frac{A_s}{L_b} \quad (3.5)$$

L_b i uttrykket for k_{10} er skruens tøyningsslengde, se figur 3.11. L_b settes lik klemlengden (den totale godstykkelsen med underlagsskivene) pluss halve summen av skruehodets høyde og mutterhøyden [5]. Tabell 3.4 og 3.5 angir målte og beregnede lengder benyttet i senere analyser og beregninger.



Figur 3.11: Skruens tøyningsslengde L_b

Tabell 3.4: Verdier for beregning av L_b
[mm]

Knutepunkt	t_h	t_n	t_w	t_p	t_b
A/B/C	10	13	3	6	30

Tabell 3.5: Beregnede tøyningsslengder for
skruene [mm]

Knutepunkt	$L_{b,nom}$	$L_{b,rel}$
A/B/C	53,5	53,5

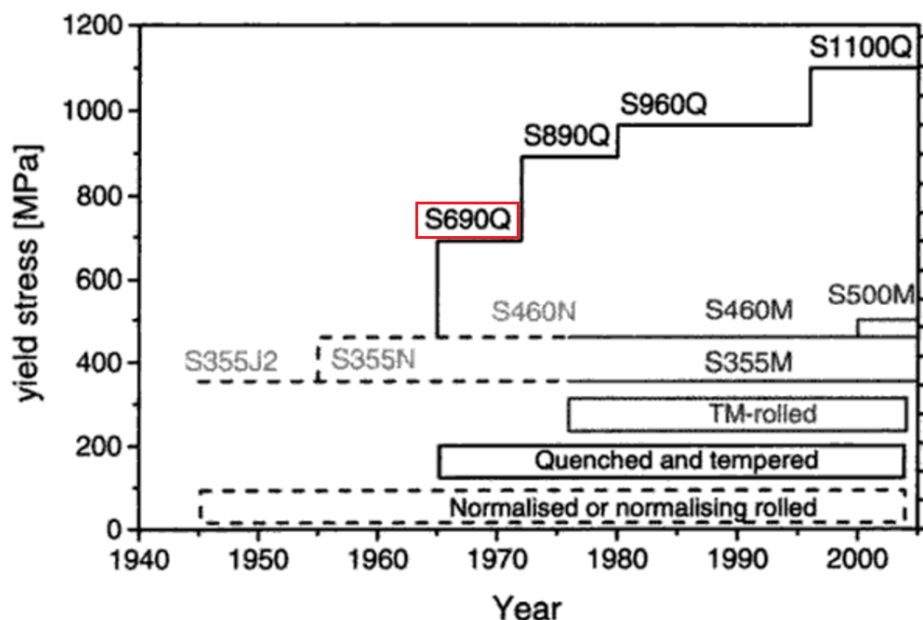
4. Høyfast stål

4.1 Bakgrunn og utvikling

Industrien stiller stadig høyere krav til konstruksjoner, noe som har bidratt til en rivende utvikling av nye materialer og økt materialkunnskap. Over tid har dette resultert i stålsorter med høyere fasthet, bedre sveisbarhet og økt korrosjonsmotstand og seighet [11].

I nye stålkonstruksjoner dominerer bruken av konstruksjonsstål med flytespenning $f_y = 355 - 460 \text{ MPa}$, mens stål med flytespenning opp til $f_y = 1100 \text{ MPa}$ brukes ved spesielle behov [11]. Stålsorter med karakteristisk flytegrense på over 420 MPa betegnes i dag som høyfast stål.

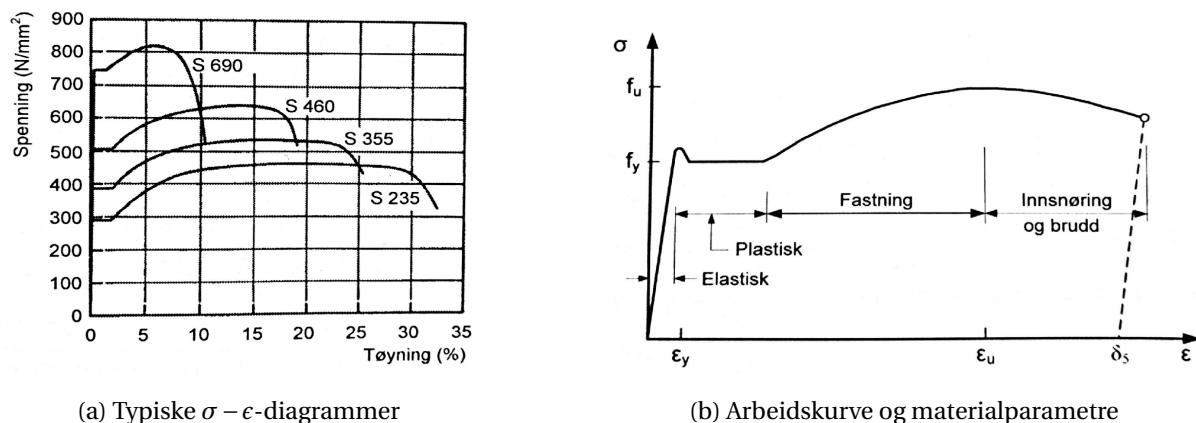
Figur 4.1 viser utviklingsløpet til stålsortenes flytespenning i Europa fra 1940 til i dag.



Figur 4.1: Utviklingsforløpet til stålsorter i Europa [8]

4.2 Mekaniske egenskaper

De viktigste materialparametrene for de ulike fasthetsklassene er flytespenningen f_y , strekkfastheten (bruddspenningen) f_u og bruddforlengelsen δ_5 , som alle er definert grafisk på figur 4.2b.



Figur 4.2: Spenning-tøyningsdiagrammer for konstruksjonsstål [11]

Figur 4.2a viser typiske spenning-tøyningsdiagrammer for ståsortene S235 til S690. Som figuren antyder, endres egenskapene til stålet for ulike fasthetsklasser. Det er grunnen til stålsortenes ulike bruksområder. For høyfast stål (S460-S690) vil flyteplataet være lite, og ofte neglisjerbart, og flytespenning vil da bli definert ved $f_{0,2}$ [11]. Høyfast stål vil dermed ofte ha en kraftig redusert duktilitet og bruddforlengelse. Dette kan i en konstruksjonsmessig sammenheng være ugunstig da lite synlig plastisk deformasjon gir lavere grad av forvarsel før brudd. Der plastisk deformasjon hverken er nødvendig eller ønskelig, vil høyfast stål være godt egnet.

Det er verdt å legge merke til at E-modulen ($E = \frac{\sigma_{el}}{\epsilon_{el}}$) er uavhengig av flytespenningen. Bøye-stivheten (EI) av en komponent forblir uendret, kun ved endring av stålets fasthetsklasse. Øvrige materialkonstanter som er uavhengig av fasthetsklasse er densitet (ρ), skjærmodul (G), tverrkontraksjonstall (ν) og termisk lengdeutvidelseskoeffisient (α).

Ved seigherding av høyfast stål med minste flytegrense lik 460 – 690 MPa oppnås god fasthet kombinert med økt seighet og forbedret sveisbarhet. Noe av grunnen til at høyfast stål ikke brukes mer enn det gjør i dag, skyldes begrensninger i gyldighetsområder i standarder og regelverk, samt mangel på erfaring. Enn så lenge er det også noe mer kostbart å produsere slike stålsorter sammenlignet med de vanligste konstruksjonsstålene [8].

4.3 Standardverk

I dag omfatter standardverket for prosjektering av knutepunkter i stål [5] stålsortene S235, S275, S355, S420, S450 og S460. For prosjektering med stålsorter fra S460 og opp til S700 skal *NS-EN 1993-1-12: Konstruksjoner med høyfast stål* [6] benyttes sammen med de øvrige 19 delene av Eurokode 3. Eurokoden er for øyeblikket under revidering og skal oppdateres til å gjelde for stålsorter opp til S690. Dette vil føre til at del 1-12 [6] vil utgå og dens innhold overføres til resterende deler av Eurokoden.

Da spenning-tøyningskurven til høyfast stål indikerer at flyteplatået enten er lite eller helt fraværende, stilles det strengere krav til plastisk analyse. De anbefalte verdiene etter NS-EN 1993-1-12 [6] med tilhørende forklaring vises i tabell 4.1.

Tabell 4.1: Duktilitetskrav etter NS-EN 1993-1-12 [6]

f_u/f_y	$\geq 1,05$	Forhold mellom angitt minste strekkfasthet (f_u) og angitt minste flytespenning (f_y)
δ_5	$\geq 10\%$	Forlengelse ved brudd
ϵ_u	$\geq 15\epsilon_y$	Forhold mellom bruddtøyning (ϵ_u) og flytetøyning (ϵ_y)

4.4 Dagens bruk av høyfast stål i konstruksjoner

Entreprenører har i nyere tid fremmet innovative løsninger ved bruk av høyfast stål. Dette har resultert i konstruksjoner bestående av lette og tynne elementer med god styrke. Rent arkitektonisk og estetisk er slikt ofte foretrukket, samtidig som den reduserte materialbruken skåner miljøet [7]. Tabell 4.2 sammenfatter og viser noen av motivasjonsfaktorene for bruk av høyfast stål (S460-S690) i byggebransjen, sammenlignet med dagens mest brukte stålsorter (S355-S460) [13].

Tabell 4.2: Motivasjon for bruk av høyfast stål (S460-S690) [13]

Økonomi	En høyere flytespenning kan gi lavere fabrikasjons- og oppføringskostnader da ståltverrsnittet kan reduseres
Arkitektur	En høyere flytespenning muliggjør bygging av slanke konstruksjoner ved bruk av mindre ståltverrsnitt
Miljø	Mindre ståltverrsnitt bidrar til en effektiv bruk av ressurser
Sikkerhet	Spesielle legeringer av høyfaste stål bidrar til god bruddseighet som vil gi sikkerhet ved oppføring og bruk av konstruksjonen

Da den økte styrken i høyfast stål kan gå på bekostning av de plastiske deformasjonsegenskapene, endres bruksområdene deretter. Fordelene ved bruk av disse ståltypene vil da bli utnyttet der konstruksjonselementenes styrke er avgjørende. Stivheten, i betydning av deformasjoner i henhold til grenseverdier i bruksgrensetilstand, vil kunne gi utfordringer.

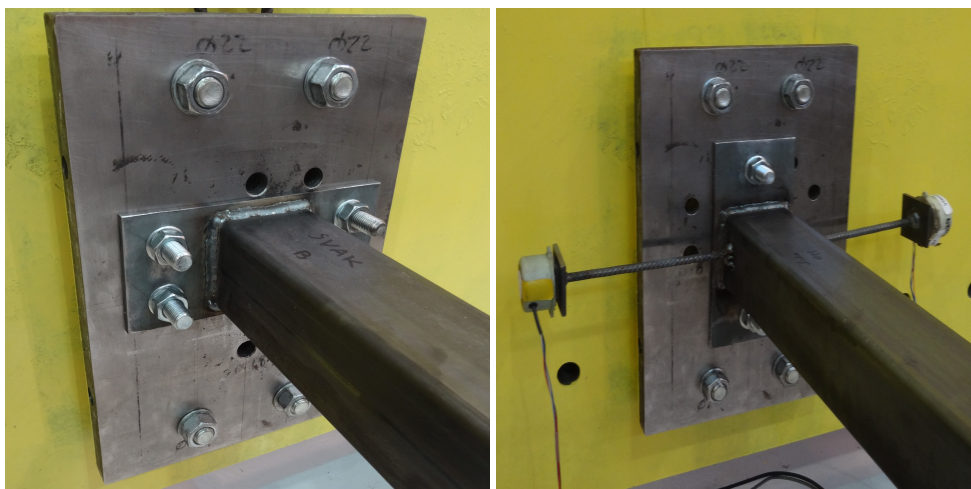
Materialets nevnte egenskaper gjør bruk av høyfast stål gunstig i flere konstruksjonssammenhenger. Utbredte bruksområder i dag er bruer, bygninger og offshore-konstruksjoner.

5. Beskrivelse av prøvestykker og forsøksoppsett

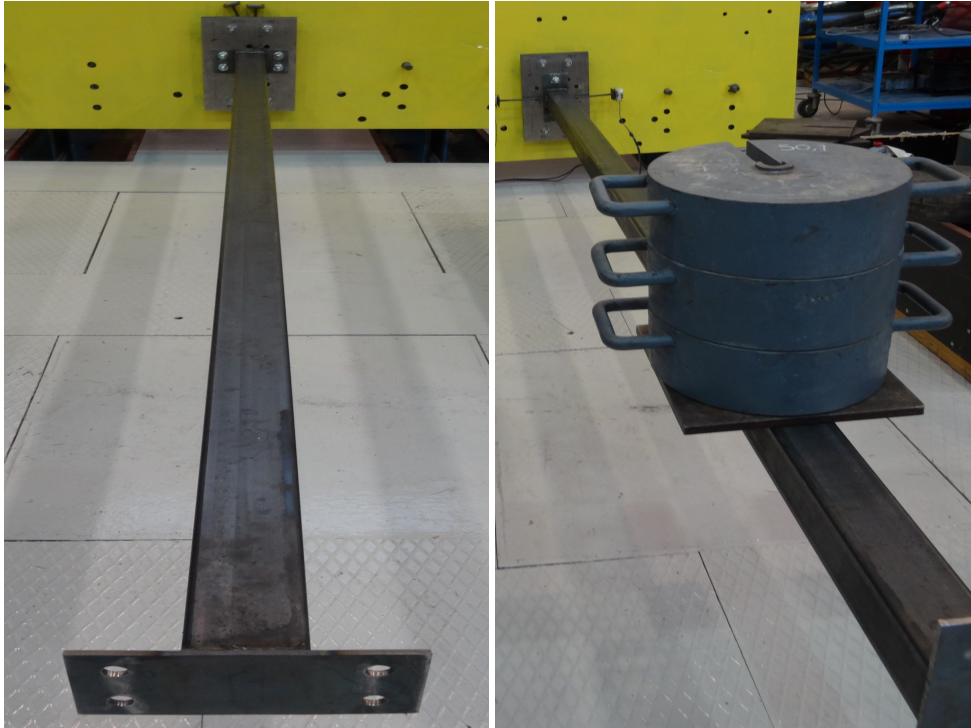
Som en del av denne masteroppgaven er det gjennomført flere forsøk i laboratoriet. Forsøkene innebærer bøyning av knutepunkter med hulprofil og skrudd endeplate av høyfast stål om forbindelsens hovedakser. Målet med laboratorieforsøkene er å se hvordan slike knutepunkt oppfører seg under bøyning. Resultatene fra laboratoriet vil være knutepunktets stivhet og kapasitet. Resultatene sammenlignes med resultater fra håndberegninger og numeriske analyser.

5.1 Laboratorieoppsett

Oppsett og utstyr brukt i forsøkene er det samme som tidligere studenter har benyttet, blant annet Uhre [14] og Kassim [9]. Forsøkene er utført ved manuelt å punktlaste en fast innspent utkrager med vektskiver. Utkrageren forestiller en hulprofiløyle, og knutepunktet er sammenføyningen mellom hulprofilet, endeplate av høyfast stål og en helt stiv bakplate. Resultatene innhentes ved å registrere rotasjonsendring i knutepunktet ved innspenningen.



Figur 5.1: Forsøksoppsett ved knutepunkt



Figur 5.2: Forsøksoppsett

På bildene i figur 5.1 vises innspenning og plassering av klinometere. På bildene i figur 5.2 vises hele utkrageren og et eksempel på punktlasting.

5.2 Utstyr

Utstyr som er brukt til gjennomføring av forsøkene er listet under og illustrert i figur 5.3.

- A-målslære
- Klinometer, 2 stk.
- Målebånd
- Elektronisk skyvelære
- Vekter (5-10-20-50kg)
- Momentnøkkel

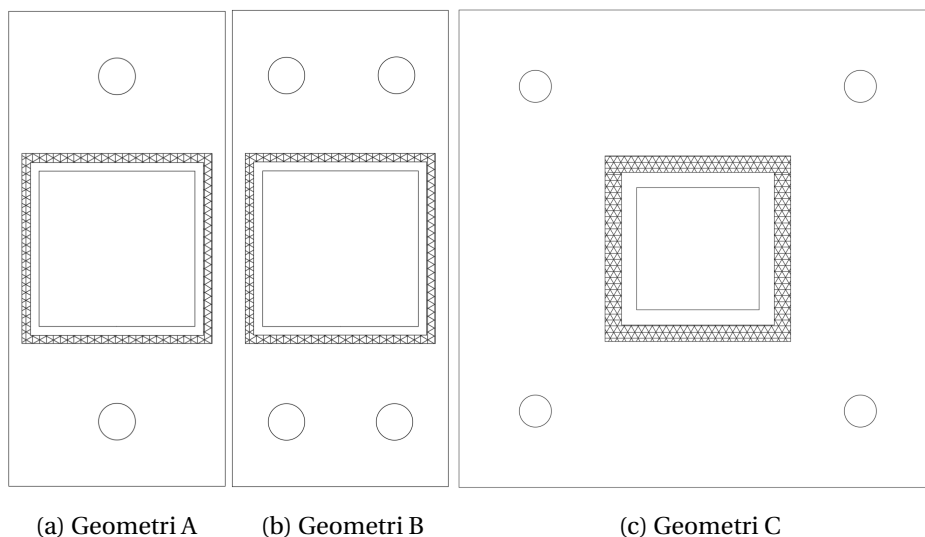


Figur 5.3: Utstyr

5.3 Forsøksgeometrier

Første del av laboratoriearbeidet er å gjennomføre en duplisering av forsøkene utført av Kassim [9]. Dette gjøres for å kontrollere resultatene som ble funnet, og for å lære å gjennomføre forsøk i laboratoriet. Andre del av laboratoriearbeidet er å bøye et knutepunkt med en ny og uprøvd geometri. Knutepunktene er søyleføtter, men belastes av praktiske hensyn som en utkraget bjelke i laboratoriet. For enkelhets skyld er de ulike knutepunktene som skal testes navngitt med store bokstaver. Videre i rapporten vil knutepunktene med geometrier som vist i figur 5.4 betegnes som *knutepunkt A*, *B* og *C*. Nøyaktige mål av disse finnes i vedlegg A.

- Del 1 Duplisering av Kassim [9] Knutepunkt med geometri A og B
Del 2 Ny geometri Knutepunkt med geometri C



Figur 5.4: Forsøksgeometrier

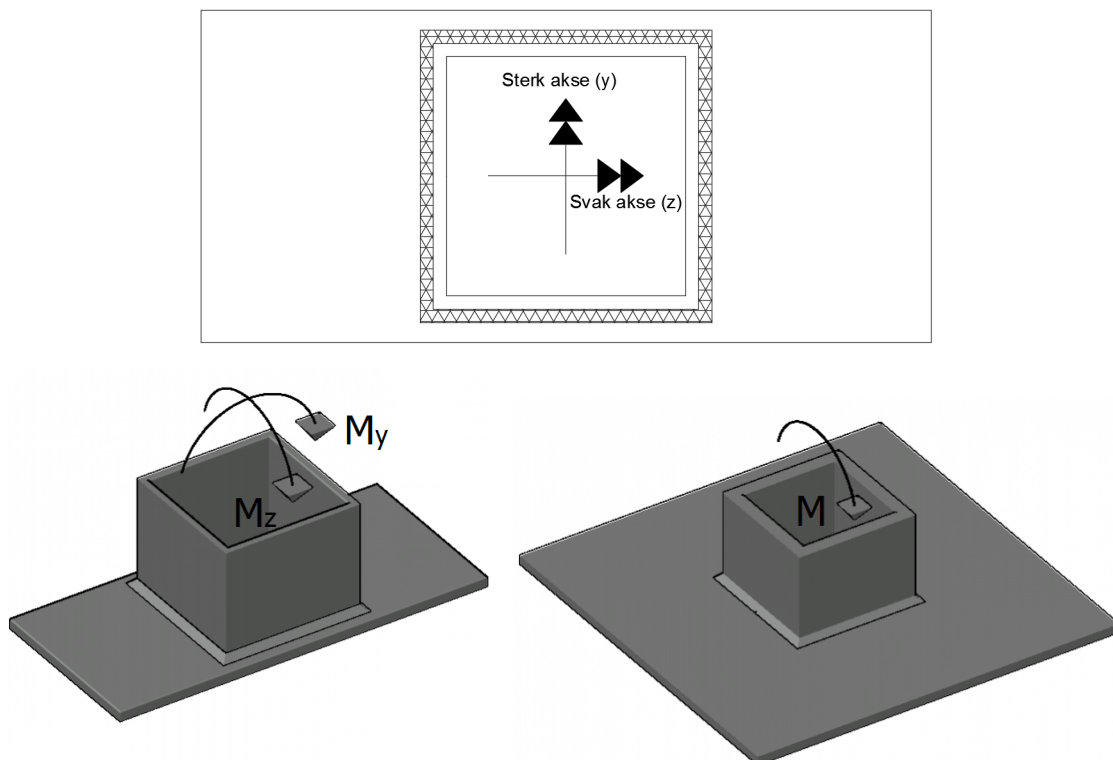
I tabell 5.1 vises de seks prøvestykkene som har blitt undersøkt i denne rapporten. Definisjon av bøyningssakser gis i kapittel 5.4. Oppgitt lengde tilsvarende hulprofilets lengde, mens momentarmen er avstanden fra innspenningen til punktlasten i laboratoriet.

Tabell 5.1: Prøvestykker

Geometri	Bøyningsakse	Endeplate	Lengde HUP	Momentarm
A	Sterk	WELDOX 700	3007mm	2,50m
A	Svak	WELDOX 700		2,35m
B	Sterk	WELDOX 700	3002mm	2,50m
B	Svak	WELDOX 700		2,35m
C	-	WELDOX 700	3000mm	2,50m
C	-	S355		2,50m

5.4 Definisjon av bøyningsakser

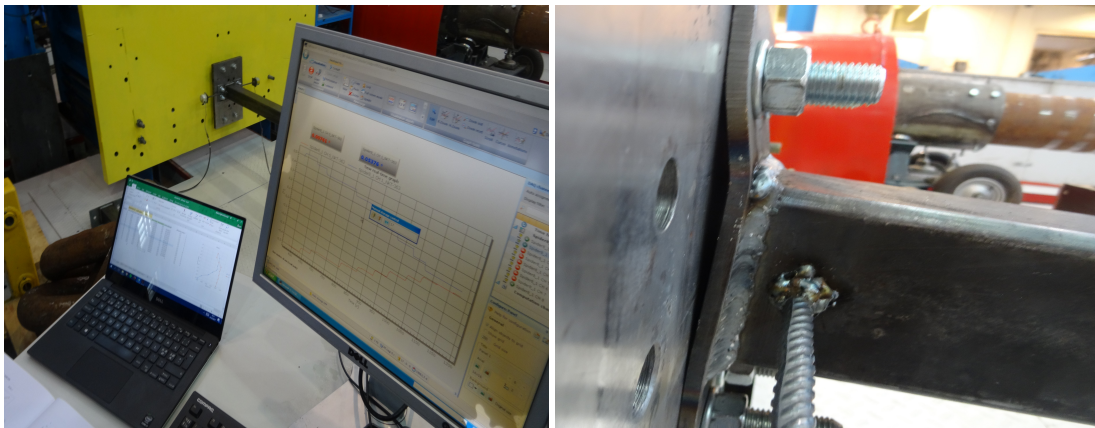
Prøvestykkene med geometri A og B blir bøyd om både sterk og svak akse. Figur 5.5 viser bøyningsaksene hvor y tilsvare knutepunktets sterke akse og z tilsvare knutepunktets svake akse. Geometri C er symmetrisk og prøvestykket blir derfor bøyd om kun én hovedakse.



Figur 5.5: Definisjon av bøyningsakser

5.5 Utførelse

Forsøkene utføres ved å punktlaste det innfestede hulprofilet på den frie enden. Vekter påføres manuelt i serie opp til beregnet og ønsket lastnivå. Nedbøyning leses av på utkragerens ende ved bruk av målebånd. Rotasjonen måles automatisk med to klinometere som er festet nære innspenningspunktet. Alle prøvestykker på- og avlastes først en rekke ganger i det elastiske området, deretter påføres last til knutepunktet opplever flytning.



Figur 5.6: Logging av resultater

5.5.1 Forsøksserier i elastisk område

Forsøksseriene er gjort i både elastisk og plastisk område. Forsøkene i elastisk område er i lastområdet hvor deformasjonene ikke forblir permanente. Fra disse forsøksseriene skal initialrotasjonsstivheten $S_{j,ini}$ til knutepunktet bestemmes. Forbindelsen forblir udeformert og det gjennomføres flere av- og pålastinger for hvert prøvestykke. Resultatene midles og gir en elastisk stivhetskurve for det aktuelle prøvestykket. Ved å registrere avlastningsserier, kontrolleres det om det har forekommet plastiske deformasjoner, eller om rotasjonen går tilbake til utgangspunktet og dermed er udeformert.

5.5.2 Forsøksserier i plastisk område

Forsøksseriene utført i det plastiske området skal avdekke knutepunktets stivhetskurve og dets kapasitet. For å bestemme kapasiteten til endeplaten, er det kritisk at det er endeplaten selv som er den svakeste komponenten i knutepunktet. Det er derfor viktig at forbindelsen er

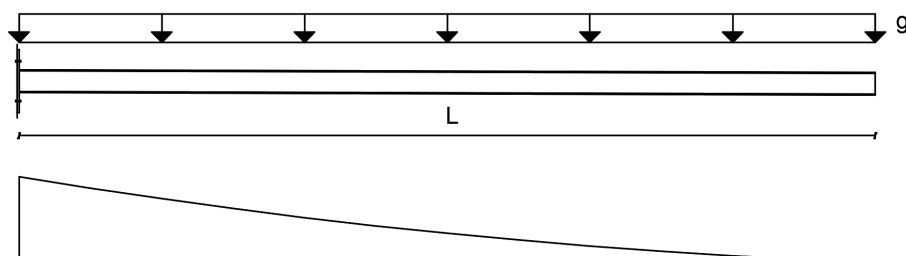
utført slik at endeplaten ikke er for sterk. Kun én serie i plastisk område for hvert prøvestykke gjennomføres, da deformasjonen av knutepunktet forblir permanent. Fra forsøkene presenteres det to ulike verdier for momentkapasiteten. Én momentverdi for forsøkets siste pålasting, da bjelken nådde bakken og markerte forsøkets slutt. Momentet påført ved forsøksslutt sammenlignes med resultater fra tidligere studenter som har definert momentkapasiteten på lignende måte. Den andre verdien for momentkapasitet som presenteres er basert på en egen definisjon. Den plastiske rotasjonen er da lik tre ganger den elastiske rotasjonen, og momentkapasiteten kan leses av stivhetskurven. Dette kommenteres og diskuteres videre i kapittel 9.

5.6 Egenvekt

Før vektene påføres, må knutepunktet allerede håndtere hulprofilets egen vekt. Egenvekten vil medføre et moment, og dermed også en rotasjon av knutepunktet. For enkelthets skyld vil ikke egenvekten tas med i beregningene her. Som Uhre [14] og Kassim [9] påpeker, har egenvekten en så liten påvirkning i forhold til punktlasten, at den kan neglisjeres.

Momentene som neglisjeres er uttrykt ved formel (5.1). For de to ulike hulprofilene brukt i denne oppgaven, viser tabell 5.2 hvor store de neglisjerte momentene ved innspenningen er. Lengden L til hulprofilene er $3m$ og momentarmen er følgelig $1,5m$.

$$M_g = \frac{1}{2} g L^2 \quad (5.1)$$



Figur 5.7: Momentdiagram for hulprofilets egenvekt

HUP-dimensjon [mm]	masse [kg/m]	g [N/m]	M_g [kNm]
80x80x4	9,48	93,00	0,42
80x80x8	17,80	174,62	0,79

Tabell 5.2: Neglisjerte momenter fra egenvekt

Tabellen under viser forholdet mellom momentene induisert av egenvekt (M_g) og momentene som stammer fra punktlast (M_p). Momentene som svarer til M_p er hentet fra forsøkene når maksimal last var påført, og bjelken nådde gulvet. Ved å hente ut en momentetverdi fra forsøket, før bjelken nådde gulvet, gir følgelig andre forhold mellom M_g og M_p . Kun svak akse er vist for knutepunkt A og B da de gir kritisk verdi for de to geometriene.

Knutepunkt	M_g [kNm]	M_p [kNm]	M_g/M_p [%]
A svak	0,42	5,3	8
B svak	0,42	6,9	6
C [WELDOX 700]	0,79	9,6	8
C [S355]	0,79	4,8	16

Tabell 5.3: Forhold mellom moment fra egenvekt og punktlast

5.7 Usikkerhet

Forsøken utført i laboratoriet inneholder flere usikkerhetskilder. De viktigste er nevnt under.

- *Egenvekt.* Neglisjering av egenvekt medfører en unøyaktighet i resultatene. For hulprofilen med dimensjon $80 \times 80 \times 8 \text{ mm}$ er knutepunktet belastet med $0,79 \text{ kNm}$ allerede før punktlastingen starter. Da det i laboratoriet er vanskelig å måle hvor stor rotasjon egenvekten bidrar med og inkludere det i loggføringen, er den utelatt og neglisjert her. Med et startmoment på $0,79 \text{ kNm}$ bør det vurderes måter å inkludere bidrag fra egenvekt på.
- *Rotasjonsavlesning.* Avlesning av rotasjon ble gjort fortløpende etter at vinkelendringen var stabil. Det kan hende at avlesningen ble gjort før klinometerne hadde stabilisert seg.
- *Plassering av klinometer.* Klinometerne skulle helst stått vinkelrett ut i fra hulprofilen, og vært plassert helt inntil endeplaten. Klinometerne ble plassert så tett inntil, og så

normalt på hulprofilet som mulig. Praktisk er det vanskelig å gjennomføre dette helt nøyaktig.

- *Nedbøyningsavlesning.* Avlesningen er gjort manuelt med målebånd. Noe unøyaktighet må påregnes.

6. Strekktesting av materialprøver

Av komponentene som ble brukt i laboratoriet var det kun endeplaten av S355-stål og hulprofilen brukt for knutepunkt C som ikke hadde blitt undersøkt med strekktester av tidligere studenter. Disse strekktestene ble utført og presenteres i kapittel 6.2 og 6.3. En oppsummering av testresultatene for WELDOX-platen vises også (se kapittel 6.1). I laboratoriet ble materialprøvene strekktestet med konstant hastighet på $2,1 \text{ mm/min}$. Et ekstensometer ble festet for å måle små forlengelser over et område på 35 mm . Resultatene ble logget av en datamaskin som ga ut kraft og tilhørende forskyvning. Ekstensometeret ble tatt av før brudd for å hindre at det skulle ødelegges. Figur 6.1 viser bilde av en materialprøve festet i maskin med ekstensometer, samt et bilde av en materialprøve som har gått til brudd.



Figur 6.1: Testing av materialprøver i laboratoriet

Da laboratorietestingen gir spennings- og tøyingsverdier som er basert på opprinnelig areal (ingeniørverdier) omformes til sanne verdier. Dette skyldes at strekkprøvens areal vil endres i løpet av testingen, noe som ingeniørverdier ikke tar hensyn til. Dette gjøres ved å bruke ligningene vist i tabell 6.1.

Tabell 6.1: Spenning- og tøyningsrelasjoner

Begrep	Relasjon
Ingeniørtøyning	$\epsilon = \frac{L-L_0}{L_0}$
Ingeniørspenning	$\sigma = \frac{F}{A_0}$
Sann tøyning	$\epsilon_T = \ln(1 + \epsilon)$
Sann spenning	$\sigma_T = \sigma(1 + \epsilon)$
Sann bruddtøyning	$\epsilon_f = \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right)$

6.1 Endeplate av WELDOX 700

Våren 2016 strekktestet Kassim [9] den samme WELDOX 700-platen som ble benyttet i forsøkene i denne oppgaven. I dette avsnittet vil resultatene fra testen presenteres.

To materialprøver ble skjært ut fra en større WELDOX 700-plate. For å kunne synliggjøre eventuelle forskjeller i stålqualiteten avhengig av hvilken retning materialprøven ble kuttet, ble én prøve kuttet i lengderetningen, mens den andre i tverretningen. Tabell 6.2 viser materialprøvenes eksakte mål.

Tabell 6.2: Eksakte mål på materialprøvene [mm] - WELDOX 700

Materialprøve	Bredde	Tykkelse
W700-A	12,50	6,09
W700-B	12,51	6,16

Etter testing i laboratoriet brukte Kassim kjente spenning- og tøyningssammenhenger for å justere fra ingeniør- til sanne verdier. Begge prøvestykkene tilfredstilte duktilitetskravene vist i tabell 4.1, med unntak av f_u/f_y som var større enn 1,05. Tabell 6.3 gjengir forsøksresultatene fra strekktesten. Ved å ta gjennomsnittet av flytespenningene, finnes den reelle flytespenningen i ligning (6.1). Denne verdien brukes videre i rapporten ved beregning av reelle kapasitetsverdier. Til sammenligning er nominelle størrelser i vedlegg C beregnet med en flytespenning på 700MPa .

$$f_y = 820 \text{ MPa} \quad (6.1)$$

Tabell 6.3: Resultater fra strekktest - WELDOX 700

Materialprøve	f_y [MPa]	f_u [MPa]	Bruddtøyning $\delta_{5,65}$ [%]
W700-A	819	843	17,6
W700-B	821	841	17,6

6.2 Endeplate av S355

For å finne de reelle materialeegenskapene til S355-platen ble fire strekkprøver gjort i laboratoriet. To var kuttet ut fra platens lengderetning (L1 og L2) og to fra platens tverretning (T1 og T2). Tabell 6.4 viser materialprøvenes eksakte mål.

Tabell 6.4: Eksakte mål på materialprøvene [mm] - S355

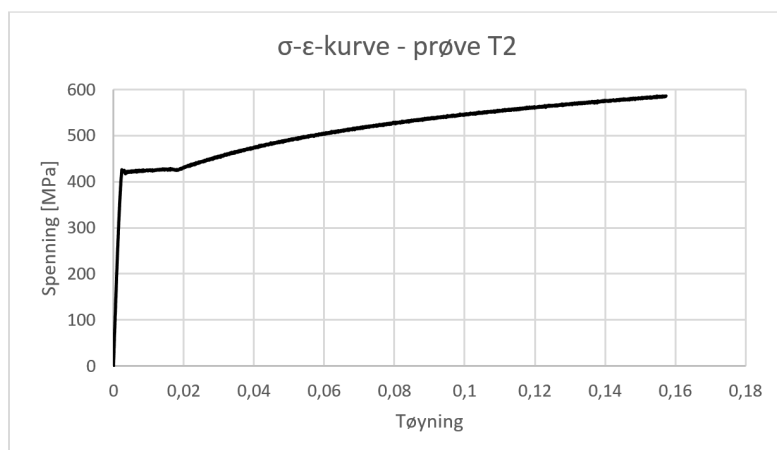
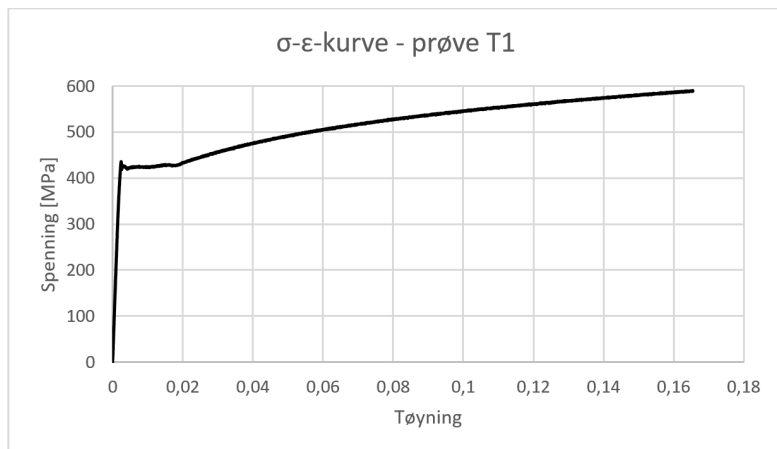
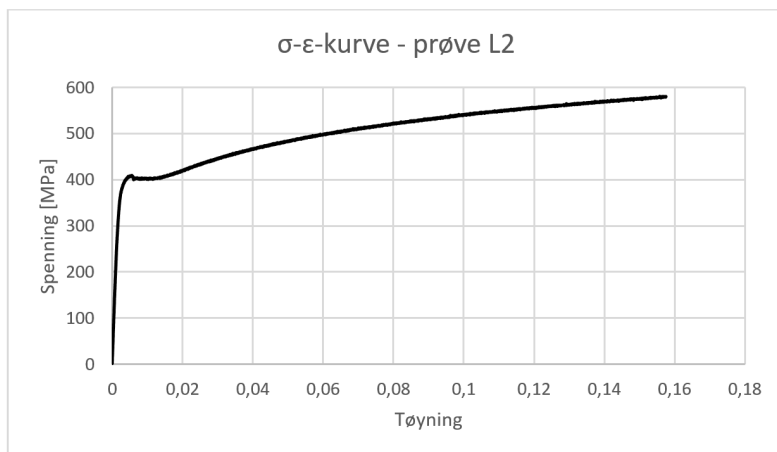
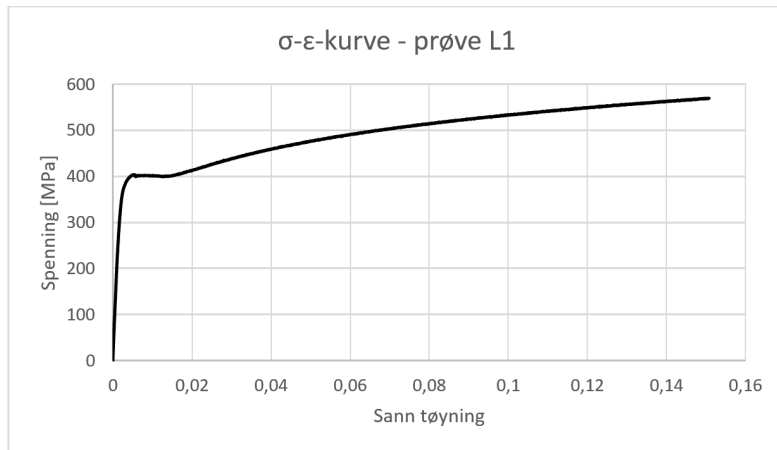
Materialprøve	Bredde	Tykkelse
S355-L1	12,60	6,15
S355-L2	12,48	6,08
S355-T1	12,59	6,13
S355-T2	12,49	6,09

Materialprøvene ble strekktestet og spennings- og tøyingsverdiene ble omgjort til sanne verdier ved bruk av formlene vist i tabell 6.1. Dette resulterte i spenning-tøyings-relasjonene vist i figur 6.2. En midlet flytespenning er utregnet i uttrykk (6.2), og tabell 6.5 oppsummerer resultatene for hver enkelt test. En flytespenning på 410 MPa brukes videre i rapporten.

$$f_y = 410 \text{ MPa} \quad (6.2)$$

Tabell 6.5: Resultater fra strekktest - S355

Materialprøve	f_y [MPa]	f_u [MPa]	Bruddtøyning $\delta_{5,65}$ [%]
S355-L1	400	569	16,3
S355-L2	399	581	16,5
S355-T1	423	590	18,0
S355-T2	419	586	17,1

Figur 6.2: $\sigma - \epsilon$ -relasjon, gitt med sanne verdier

6.3 80x80x8mm Hulprofil av S355

Den reelle flytespenningen til hulprofilet benyttet for prøvestykkene med geometri C, er også funnet ved strekktesting. En materialprøve fra hulprofilet, med mål vist i tabell 6.6, ble testet.

Tabell 6.6: Eksakte mål på materialprøve [mm] - HUP

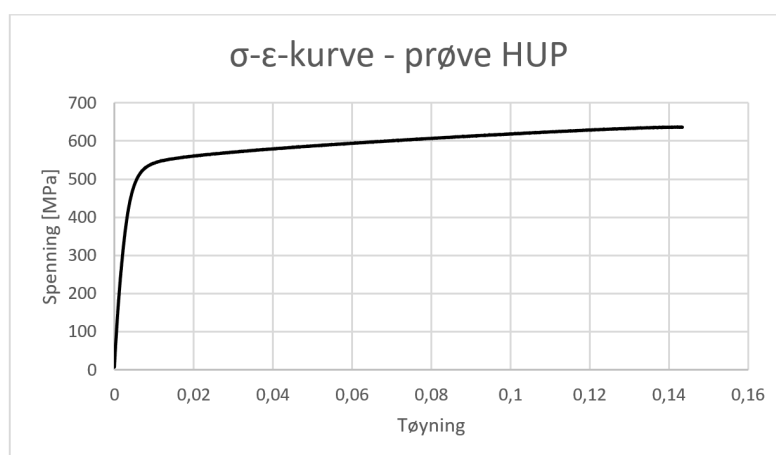
Materialprøve	Bredde	Tykkelse
HUP	12,62	7,95

Strekktesting resulterte i en kraft-forskyvning-kurve som ble omgjort til en spennings-tøyning-kurve med sanne verdier. Denne kurven vises i figur 6.3. Resultatene fra testen oppsummeres i tabell 6.7. Flytespenningen vist i ligning (6.3) benyttes videre.

$$f_y = 510 \text{ MPa} \quad (6.3)$$

Tabell 6.7: Resultater fra strekktest - Hulprofil

Materialprøve	f_y [MPa]	f_u [MPa]	Bruddtøyning $\delta_{5,65}$ [%]
HUP	510	637	15,4

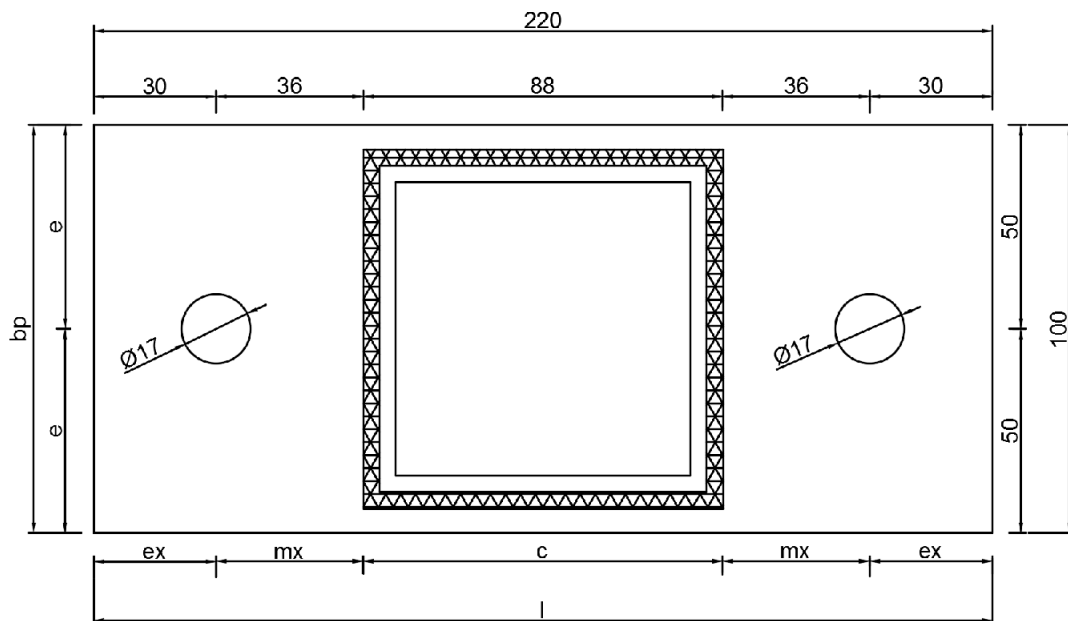


Figur 6.3: $\sigma - \epsilon$ -relasjon, med sanne verdier

7. Bøyning av knutepunkt A

7.1 Innledning

I dette kapitlet undersøkes bøyning av prøvestykker med geometri A om både sterk og svak akse. Håndberegninger av kapasitet og stivhet ved bruk av Eurokoden og flytelinjeteori gjennomføres, før det samme knutepunktet testes i laboratoriet etter prosedyren presentert i kapittel 5. Under viser figur 7.1 knutepunkt med geometri A med symboler og mål. Disse nominelle størrelsene er grunnlaget for håndberegninger i kapittel 7.2, og blir justert med reelle verdier etter oppmåling av forsøksgeometri for bruk i laboratorieforsøk (se vedlegg A).



Figur 7.1: Geometri A

7.2 Håndberegninger

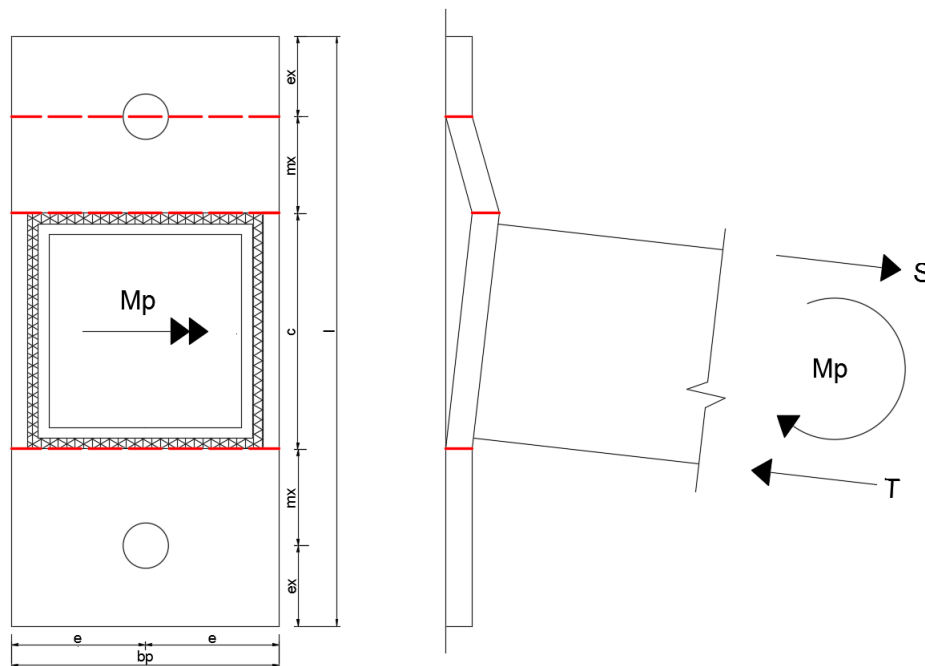
7.2.1 Kapasitet

De analytiske kapasitetsberegningene utført i dette kapitlet er basert på tidligere arbeid av Uhre [14]. Beregningsmodellen baserer seg på flytelinjeteori, hvor det antas en kinematisk flytemekanisme, og den plastiske momentkapasiteten M_p bestemmes. Utledninger av aktuelle, kritiske flytemekanismer finnes i vedlegg B.

7.2.1.1 Sterk akse

For bøyning om sterk akse har Uhre [14] vist at kapasiteten til knutepunktet kan bestemmes fra både flytelinjeteori og ved beregning etter T-stykkemodellen i Eurokode 3 [5]. Uttrykk (7.1) for momentkapasiteten benyttet her, stammer fra flytelinjebetraktning og utledes i vedlegg B.1. Antatt flytemekanisme er vist i figur 7.2, hvor de røde, stiplede linjene illustrerer plastiske flytelinjer i endeplaten.

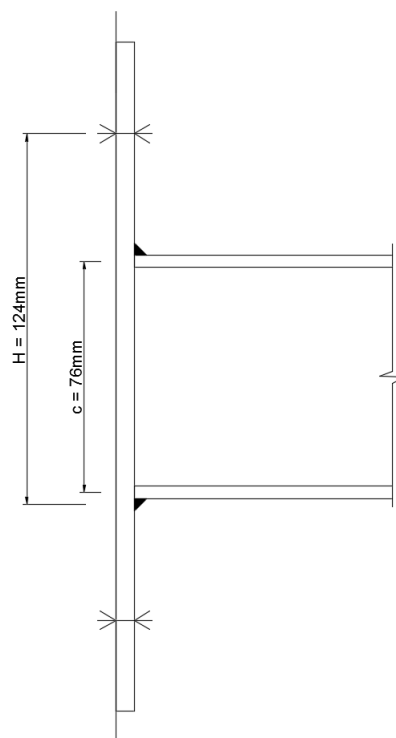
$$M_p = 2m_p b_p \left[\frac{c}{m_x} + 1 \right] \quad (7.1)$$



Figur 7.2: Knutepunkt A - flytemønster for bøyning om sterk akse

Momentarmen (H) brukt til å finne momentkapasiteten fra Eurokoden, er her gitt som avstanden fra senterlinjen i sveisen under hulprofilet, til senter av bolt i øvre del av platen. Dette er i samsvar med resultatene presentert i et konferanseforedrag av Uhre, Aalberg og Larsen [1], presentert på *Nordic Steel Construction Conference 2015*. Til å beregne punktlasten på hulprofilet som svarer til momentkapasiteten funnet fra flytelinjeteori, benyttes formel (7.2), hvor L_c er avstanden fra punktlast til endeplaten.

$$P = \frac{M_P}{L_c} \quad (7.2)$$



Figur 7.3: Momentarm for bøyning om sterk akse (nominelle verdier)

Tabell 7.1 viser resultatene fra kapasitetsberegninger utført ved bruk av både nominelle verdier og reelle verdier oppmålt fra forsøkgeometri vist i vedlegg A. Kapasitetsberegninger for geometri med nominelle verdier finnes i vedlegg C. Både nominell og reell momentarm var på 2,5 m.

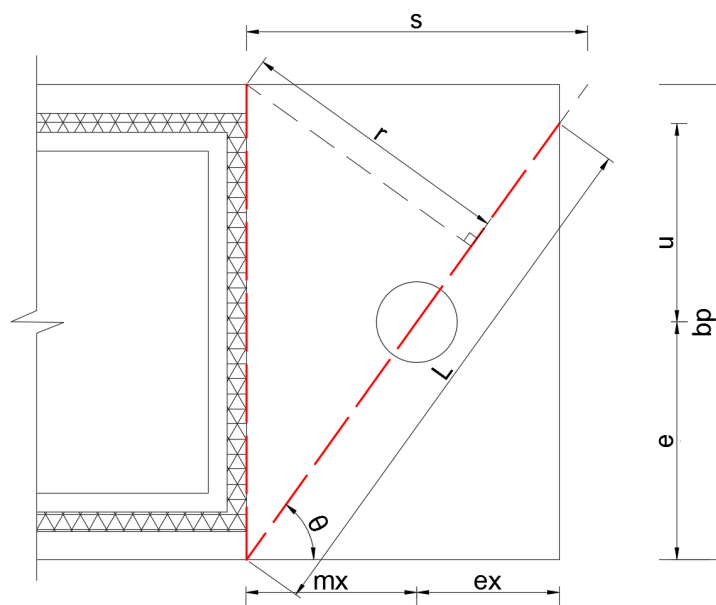
Tabell 7.1: Knutepunkt A - kapasitetsresultater fra bøyning om sterk akse

Beregninger basert på	$M_p [kNm]$	Ekvivalent punktlast [kg]
Nominelle verdier	4,34	177
Reelle verdier	5,25	214

7.2.1.2 Svak akse

Tolkning av resultater fra bøyning av knutepunktet om svak akse blir mer komplisert sammenlignet med bøyning om sterk akse. Det skyldes at kontaktsonen mellom bakplaten og endeplaten ikke er tydelig definert, samtidig som det er knyttet usikkerhet til den ytre lastens angrepspunkt (momentarm). Uhre [14] konkluderte likevel med et flytemønster, som Kassim [9] benyttet videre i sin analyse. Kritisk flytemekanisme er vist i figur 7.4 med tilhørende plastisk momentkapasitet i ligning (7.3). Da e_x i dette tilfellet er mindre enn m_x antas det at flytelinjen skjærer ut mot endeplaten kortsiden, slik Uhre [14] erfarte. Dette ble også observert etter egne laboratorieforsøk. Utleddning av formel for plastisk momentkapasitet for valgt flytemønster er vist i vedlegg B.2.

$$M_p = 2m_p b_p \left[\frac{b_p}{s} + \frac{L}{r} \right] \quad (7.3)$$



Figur 7.4: Knutepunkt A - flytemønster for bøyning om svak akse

Tabell 7.2 viser resultatene fra kapasitetsberegninger utført ved bruk av både nominelle verdier og reelle verdier oppmålt fra forsøkgeometri vist i vedlegg A. Kapasitetsberegninger for geometri med nominelle verdier finnes i vedlegg C. Den reelle momentarmen er $2,35m$ og den nominelle er $2,5m$.

Tabell 7.2: Knutepunkt A - kapasitetsresultater fra bøyning om svak akse

Beregninger basert på	$M_p [kNm]$	Ekvivalent punktlast [kg]
Nominelle verdier	4,24	173
Reelle verdier	5,13	223

7.2.2 Stivhet

Rotasjonsstivheten til knutepunktet beregnes ved bruk av knutepunktstandarden [5]. I avsnitt 3.6 introduseres beregningsmodellen for knutepunkters rotasjonsstivhet. De aktuelle basiskomponentene for knutepunktene i denne masteroppgaven er vist i tabell 7.3.

Tabell 7.3: Stivhetskoeffisienter [5]

Basiskomponent	Stivhetskoeffisient k_i
Endeplate påkjent av bøyning	$k_5 = \frac{0,9l_{eff}t_p^3}{m_x^3}$
Skruer påkjent av strekk	$k_{10} = 1,6\frac{A_s}{L_b}$

7.2.2.1 Sterk akse

Uttrykket for l_{eff} for sterk akse er utledet av Uhre [14]. Den effektive lengden er funnet ved å modellere den utstikkende platen over hulprofilet som et T-stykke, noe knutepunktstandarden tillater. Se kapittel 3.5 om T-stykke. Uttrykket for l_{eff} er:

$$l_{eff} = 0,5b_p \quad (7.4)$$

Ved bruk av nominelle verdier og tøyningsslengder fra tabell 3.5 er:

$$l_{eff} = 0,5 \times 100 = 50 \text{ mm} \quad (7.5)$$

Stivhetsbidrag fra de to basiskomponentene blir:

$$k_5 = \frac{0,9 \times l_{eff} \times t_p^3}{m_x^3} = 0,208 \text{ mm} \quad (7.6)$$

$$k_{10} = 1,6 \frac{A_s}{L_b} \times \frac{1}{2} = 2,348 \text{ mm} \quad (7.7)$$

Den totale stivhetskoeffisienten blir:

$$k_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}} = 0,191 \text{ mm} \quad (7.8)$$

Initialrotasjonsstivheten beregnes fra ligning (3.2). Momentarmen er valgt som avstanden fra trykksenteret i hulprofilet (inkludert sveis) og opp til senter av skruen i strekk.

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 \quad z = 120 \text{ mm}$$

$$S_{j,ini} = k_{tot} \times E \times z^2 = 578 \text{ kNm/rad} \quad (7.9)$$

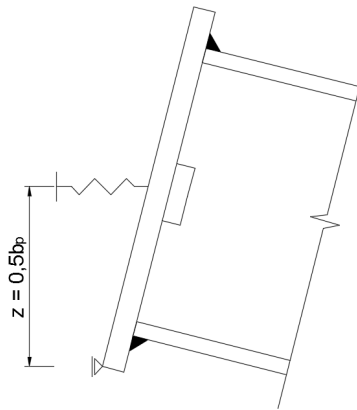
Tabell 7.4 viser resultatene fra stivhetsberegninger utført ved bruk av både nominelle verdier og reelle verdier. Stivhetsberegningene for knutepunkt A med nominelle verdier er oppsummert i vedlegg D.

Tabell 7.4: Knutepunkt A - stivhetsresultater fra bøyning om sterk akse

Beregninger basert på	$S_{j,ini} [\text{kNm/rad}]$
Nominelle verdier	578
Reelle verdier	606

7.2.2.2 Svak akse

Lengden l_{eff} må for svak akse bestemmes ved hjelp av beregnet momentkapasitet fra flytelinjemønster. Dette må gjøres da det ikke finnes fornuftige valg av T-stykker for bøyning om svak akse. Da knutepunktet roterer om endeplatens nedre del foreslår Bringsvor [3] at momentarmen settes til halve bredden til endeplaten. Halve bredden til endeplaten tilsvarer avstanden fra endeplatens nedre kant og opp til boltene senter, se figur 7.5. Dette ble rettferdiggjort etter simulering av momentarm lik en halv og en tredjedel av endeplatens bredde. Knutepunktets momentkapasitet blir da som vist i ligning (7.10), med F_p lik strekkraften som overføres fra hulprofilet til boltene.



Figur 7.5: Momentarm for bøyning om svak akse

Uttrykk for knutepunktets momentkapasitet:

$$M_P = z \times F_p \quad (7.10)$$

Momentkapasitet funnet fra flytelinjeberegninger er vist i vedlegg B.2.

$$M_P = 2m_p b_p \left[\frac{b_p}{s} + \frac{L}{r} \right] \quad (7.11)$$

Ved å sette ligning (7.10) inn i ligning (7.11) fås uttrykket for F_p , som er strekkraften i systemet, basert på flytelinjeteori.

$$F_P = 4m_p \left[\frac{b_p}{s} + \frac{L}{r} \right] \quad (7.12)$$

Ved å sette uttrykket for strekkraften i systemet lik den dimensjonerende strekkraften i et ekvivalent T-stykke med bruddform 1, se tabell 3.3, fås uttrykket for den effektive lengden vist i ligning (7.13).

$$l_{eff} = m_x \left[\frac{b_p}{s} + \frac{L}{r} \right] \quad (7.13)$$

Tallverdi:

$$l_{eff} = 121,1 \text{ mm} > 100 \text{ mm} \quad (7.14)$$

Da den effektive lengden ikke kan være større enn den fysiske lengden, settes l_{eff} lik 100 mm . Stivhetsbidraget fra de to basiskomponentene blir:

$$k_5 = \frac{0,9 \times l_{eff} \times t_p^3}{m_x^3} = 0,417 \text{ mm} \quad (7.15)$$

$$k_{10} = 1,6 \frac{A_s}{L_b} = 4,696 \text{ mm} \quad (7.16)$$

Den totale stivhetskoeffisienten blir:

$$k_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}} = 0,383 \text{ mm} \quad (7.17)$$

Initialrotasjonsstivheten beregnes fra ligning (3.2), hvor den samme momentarmen på $z = \frac{1}{2} b_p$ benyttes.

$$S_{j,ini} = k_{tot} \times E \times z^2 = 201 \text{ kNm/rad} \quad (7.18)$$

Tabell 7.5 viser resultatene fra stivhetsberegninger utført ved bruk av både nominelle verdier og reelle verdier oppmålt fra forsøksgeometri vist i vedlegg A. Stivhetsberegningene for knutepunktet med nominelle verdier er oppsummert i vedlegg D.

Tabell 7.5: Knutepunkt A - stivhetsresultater fra bøyning om svak akse

Beregninger basert på	$S_{j,ini} [\text{kNm/rad}]$
Nominelle verdier	201
Reelle verdier	210

7.3 Laboratorieforsøk

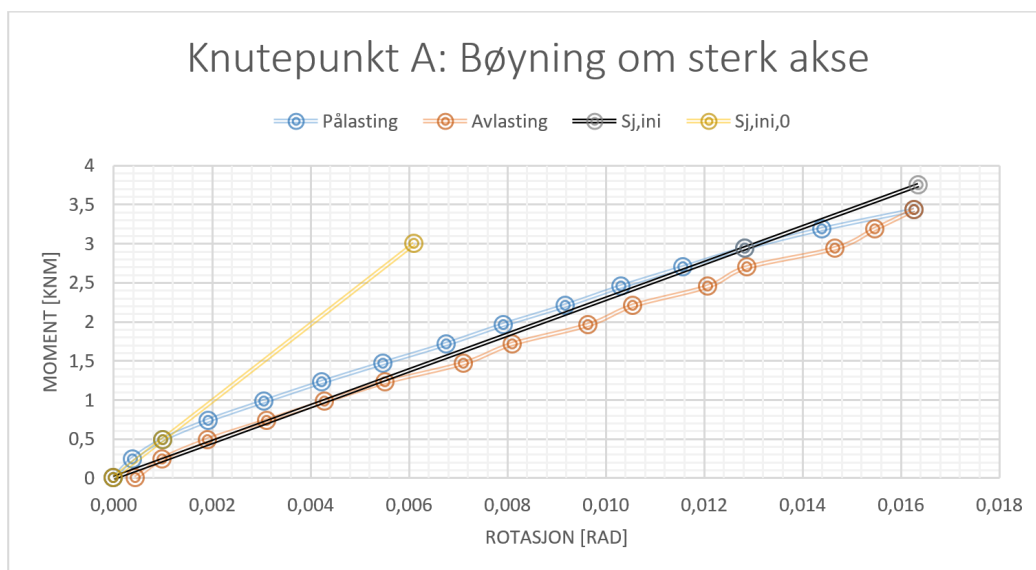
7.3.1 Undersøkelse av elastisk oppførsel

I laboratoriet utføres det fem elastiske serier for bøyning om sterk akse, og sju elastiske serier for bøyning om svak akse. Den maksimale vekten pålastet for hver serie, med tilhørende moment, vises i tabell 7.6 og 7.8 for henholdsvis sterk og svak akse.

7.3.1.1 Bøyning om sterk akse

Figur 7.6 viser en midlet graf av de elastiske forsøksseriene utført for bøyning av knutepunkt A om sterk akse. Hver forsøksserie finnes i vedlegg E. Ligning (7.19) gir den initielle stivheten, $S_{j,ini}$, som grafisk fremstilles ved en sort linje i figur 7.6. Den velges ved å trekke en linje fra origo til det punktet hvor det tilsynelatende skjer en liten permanent deformasjon. Dette tilsvarer den midlede initialstivheten av målepunktene. Både rotasjonsmålingene ved avlasting og nedbøyningsavlesningene viser at en slik rotasjon inntreffer ved et moment på omtrent $2,9kNm$. Bakgrunnen for at den illustrerte rotasjonsstivheten $S_{j,ini,0} = 491,2kNm/rad$ ikke benyttes videre er diskutert i avsnitt 9.1.2.

$$S_{j,ini,y,A} = 229,3kNm/rad \quad (7.19)$$



Figur 7.6: Stivhetskurve for knutepunkt A bøyd om sterk akse

For hver serie blir den maksimale pålastede vekten økt med et intervall på 20kg. Dette for å synliggjøre knutepunktets elastiske område, og for å oppdage en eventuell plastisk deformasjon.

Tabell 7.6: Maksimal belastning for hver forsøksserie - A, sterk akse

Serie	1	2	3	4	5
Belastning [kg]	60	80	100	120	140
Moment [kNm]	1,47	1,96	2,45	2,94	3,43

Kontroll ved måling av nedbøyning

Måling av profilets nedbøyning ved på- og avlasting gjennomføres for å kontrollere at deformasjonen er i det elastiske området. Tabell 7.7 viser avvik fra referansehøyden etter avlasting. For dette knutepunktet var referansehøyden målt til 555mm fra bakkenivå til topp av profilet ved utkragerenden før første elastiske serie. Denne høyden justeres og nullstilles før hver av forsøksseriene. Nedbøyningskontrollen indikerer at de fire første seriene ble utført i det elastiske området da avvikene fra referansehøyden anses som små. For den femte serien er det konkludert med at en liten plastisk deformasjon inntreffer.

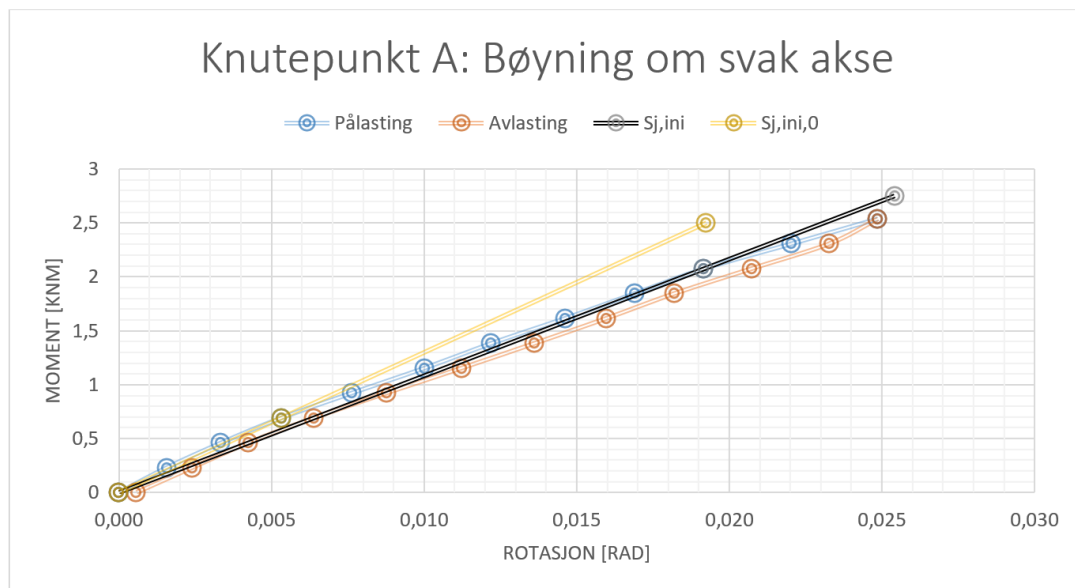
Tabell 7.7: Nedbøyningskontroll - sterk akse

Serie	Elastisk					Plastisk
	1	2	3	4	5	6
Avvik [mm]	0	2	0	2	4	173

7.3.1.2 Bøyning om svak akse

Figur 7.7 viser en midlet graf av de elastiske forsøksseriene utført for bøyning av knutepunkt med geometri A om svak akse. Hver forsøksserie finnes i vedlegg E. Ligning (7.20) gir den initielle stivheten, $S_{j,ini}$, som grafisk fremstilles ved en sort linje i figuren under. Rotasjonsmålingene og nedbøyningsavlesningene viser at en liten, permanent rotasjon inntreffer ved et moment på omtrent 2,1kNm. Rotasjonsstivheten $S_{j,ini,0} = 129,9kNm/rad$ tar kun utgangspunkt i de første punktene på grafen, og vil ikke benyttes som den valgte initielle rotasjonsstivheten. Bakgrunnen for dette valget diskuteres i avsnitt 9.1.2.

$$S_{j,ini,z,A} = 108,2 \text{ kNm/rad} \quad (7.20)$$



Figur 7.7: Stivhetskurve for knutepunkt A bøyd om svak akse

For hver serie økes den maksimale pålastede vekten med 10 kg . Det gjøres for å synliggjøre knutepunktets elastiske område, og for å oppdage når en eventuell plastisk deformasjon oppstår.

Tabell 7.8: Maksimal belastning for hver forsøksserie - A, svak akse

Serie	1	2	3	4	5	6	7
Belastning [kg]	50	60	70	80	90	100	110
Moment [kNm]	1,15	1,38	1,61	1,84	2,07	2,31	2,54

Kontroll ved måling av nedbøyning

Nedbøyningskontroll ble utført som forklart i 7.3.1.1 med en referanse høyde på 528 mm før første elastiske serie. Tabell 7.9 viser avvik fra referanse høyden etter avlasting. Nedbøyningskontrollen indikerer at de sju første seriene ble utført i det elastiske området da avvikene fra referanse høydene anses som små. Det er likevel valgt å se bortifra de siste målepunktene i forsøksserie 7 ved utregning av initialrotasjonsstivheten. Det ble illustrert grafisk i figur 7.7, hvor rotasjonsmålingene indikerer en liten plastisk deformasjon, og dermed overstyrer nedbøyningskontrollen.

Tabell 7.9: Nedbøyningskontroll - svak akse

Serie	Elastisk							Plastisk
	1	2	3	4	5	6	7	8
Avvik [mm]	3	0	1	1	2	2	1	214

7.3.2 Undersøkelse av plastisk oppførsel

Som utdypet i 5.5.2 utføres det én plastisk forsøksserie for hver bøyningsakse. Knutepunktets momentkapasitet ved forsøksslutt ($M_{j,u}$), plastiske momentkapasitet ($M_{j,Rd}$), sekantstivhet (S_j) og den initielle rotasjonsstivheten $S_{j,ini}$ vises grafisk i figur 7.8.

7.3.2.1 Bøyning om sterk akse

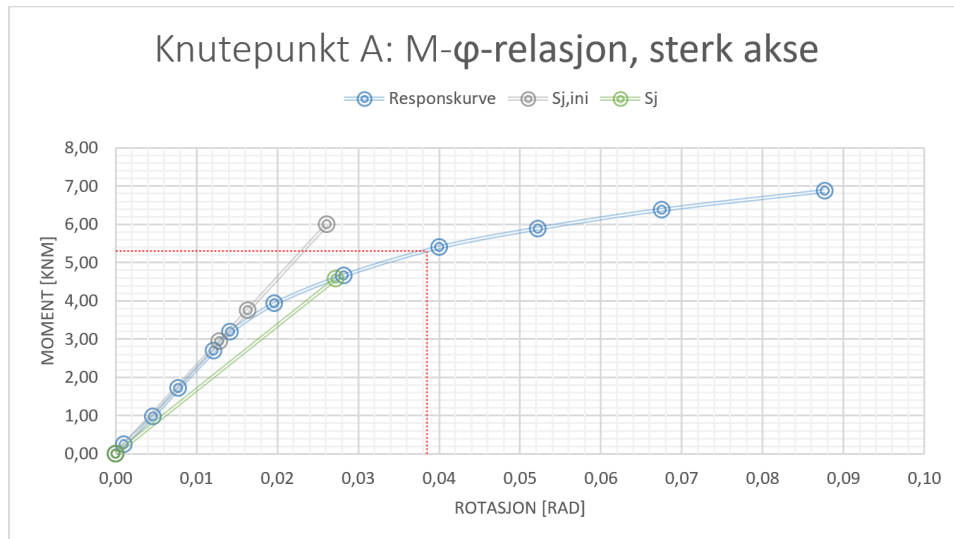
Knutepunkt A bøyd om sterk akse ble belastet med 280kg, som var vekten som måtte til før utkrageren tok ned i gulvet. Momentet som tilsvarer en slik belastning uttrykkes i (7.21). Momentkapasiteten uttrykkes i (7.22), og er grafisk illustrert ved en rød, stiplet linje i figur 7.8. Opphavet til den valgte, plastiske momentkapasiteten diskuteres i 9.1.3.

$$M_{j,u,y,A} = 6,87kNm \quad (7.21)$$

$$M_{j,Rd,y,A} = 5,30kNm \quad (7.22)$$

I figur 7.8 er både initialrotasjonsstivheten $S_{j,ini,y,A}$, uttrykt i (7.19), og sekantstivheten $S_{j,y,A}$ fra (7.23), vist grafisk. Det observeres at den initielle stivheten best representeres ved å trekke en linje fra origo til overgangen fra det elastiske til plastiske området.

$$S_{j,y,A} = 168,0kNm/rad \quad (7.23)$$



Figur 7.8: Moment-rotasjon-relasjon for bøyning om sterk akse

7.3.2.2 Bøyning om svak akse

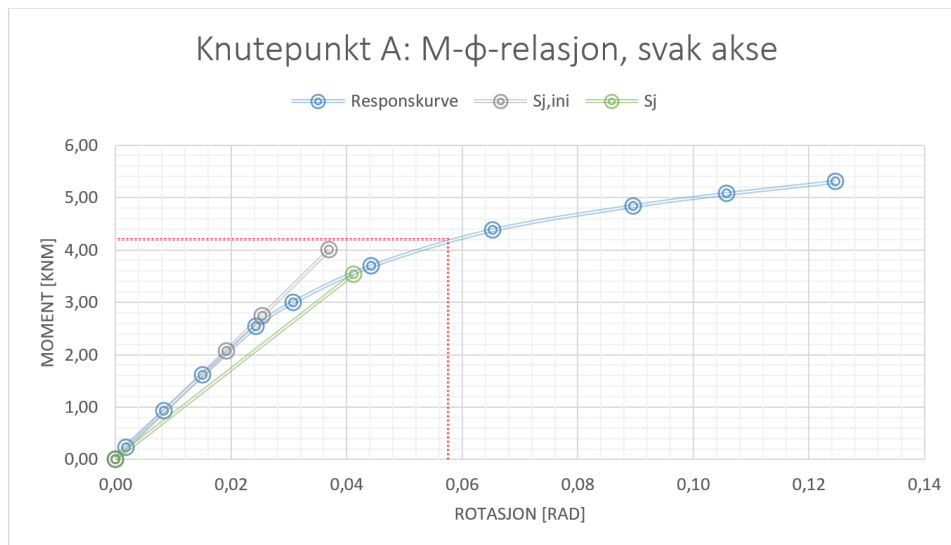
For bøyning om svak akse ble bjelken belastet med 230 kg før utkragerenden tok ned i gulvet. Belastningens tilhørende moment vises i ligning (7.24). Den plastiske momentkapasiteten vises i uttrykk (7.25), og illustreres i figur 7.9 ved en rød, stiplet linje.

$$M_{j,u,z,A} = 5,30 \text{ kNm} \quad (7.24)$$

$$M_{j,Rd,z,A} = 4,20 \text{ kNm} \quad (7.25)$$

Sekantstivheten, som her antas å være en linje fra origo opp til et moment på $\frac{2}{3}M_{j,u,z,A}$, uttrykkes i (7.26). Som for bøyning om sterk akse observeres det i figur 7.9 at valgt initiell rotasjonsstivhet representerer stigningen i det elastiske området på en bedre måte enn sekantstivheten. Uttrykk (7.20) angir $S_{j,ini,z,A}$ illustrert i figuren under.

$$S_{j,z,A} = 85,8 \text{ kNm/rad} \quad (7.26)$$



Figur 7.9: Moment-rotasjon-relasjon for bøyning om svak akse

7.4 Sammenligning av håndberegninger mot laboratorieresultater

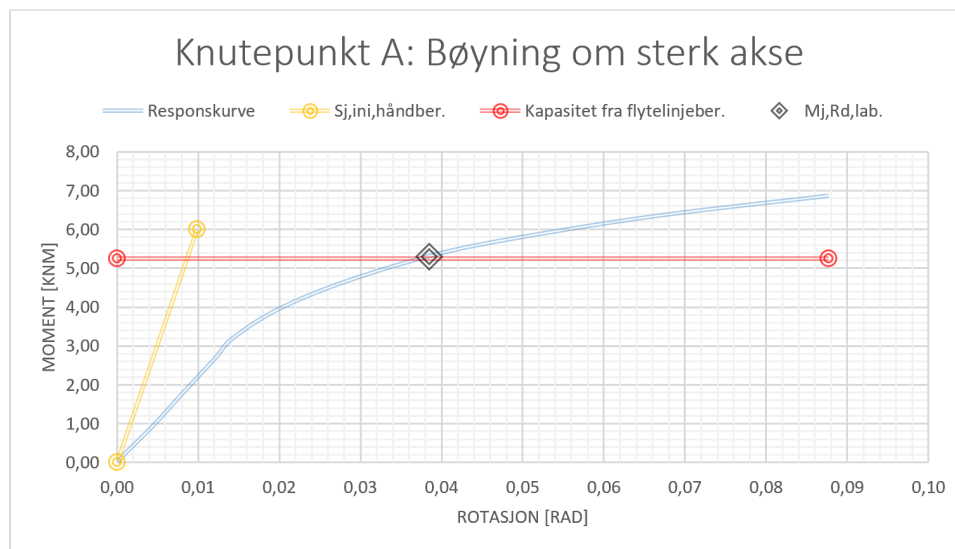
I dette kapitlet sammenlignes de analytisk beregnede stivhetene etter Eurokoden og momentkapasitetene fra flytelinjeteori med laboratorieresultater. Knutepunktens initielle rotasjonsstivhet og kapasitet beregnes med nominelle størrelser i henholdsvis vedlegg D og C. Tabeller og grafer i dette kapitlet tar utgangspunkt i prøvestykkenes reelle verdier for å kunne sammenligne med konstruert responskurve fra laboratorieforsøk. Det betyr endret plattetykkelse (6,1 mm) og en høyere flytespenning (820 MPa), sammenlignet med utregningene utført i nevnte vedlegg.

7.4.1 Bøyning om sterk akse

Tabell 7.10 oppsummerer resultatene tolket fra bøyningforsøk om sterk akse for prøvestykke med geometri A. Håndberegningens verdier er også inkludert. Som tabellen viser, overestimerer håndberegningene den initielle stivheten med over 160%, mens kapasiteten er tilnærmet lik. Resultatene fra håndberegninger og responskurve konstruert fra laboratorieresultater er vist i figur 7.10.

Tabell 7.10: Knutepunkt A - sterk akse: Sammenligning

	$S_{j,ini,y,A}$ [kNm/rad]	$M_{j,Rd}$ [kNm]
Håndberegning	605,6	5,25
Forsøksresultater	229,3	5,30



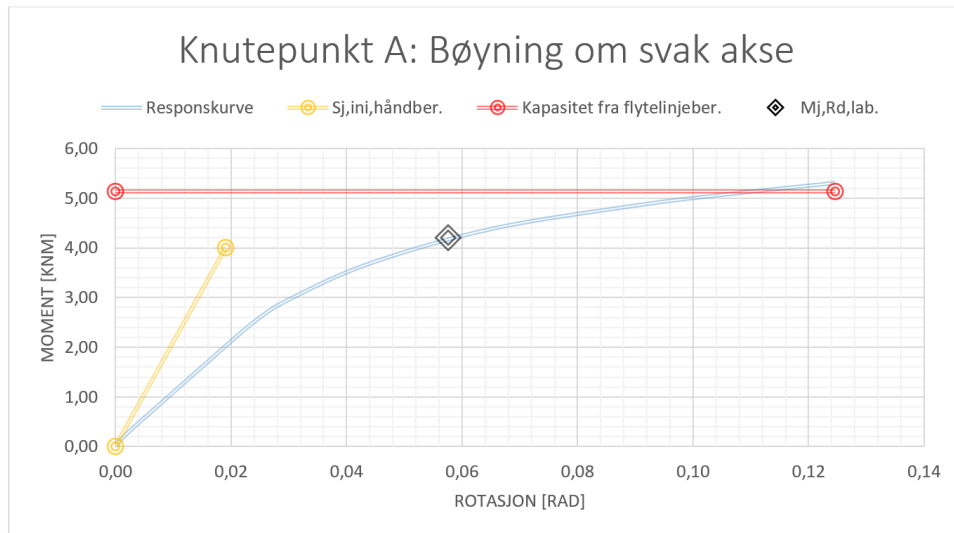
Figur 7.10: Knutepunkt A - sterk akse: Sammenligning av håndberegninger mot responskurve fra forsøk

7.4.2 Bøyning om svak akse

Som det fremgår av tabell 7.11 overestimerer håndberegningene både initialstivheten og kapasiteten. Den håndberegnete stivheten avviker fra laboratorieforsøket med nesten 95%, mens kapasitetsavviket er på litt over 22%. Figur 7.11 illustrerer beregnede resultater mot forsøkets responskurve.

Tabell 7.11: Knutepunkt A - svak akse: Sammenligning

	$S_{j,ini,z,A}$ [kNm/rad]	$M_{j,Rd}$ [kNm]
Håndberegning	210,3	5,13
Forsøksresultater	108,2	4,20

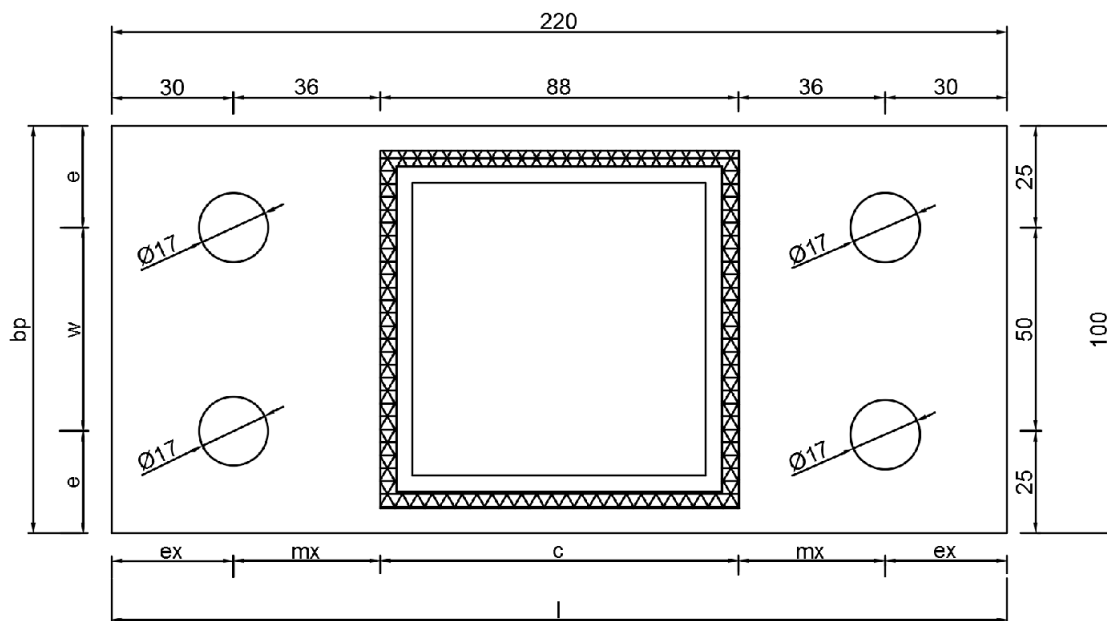


Figur 7.11: Knutepunkt A - svak akse: Sammenligning av håndberegninger mot responskurve fra forsøk

8. Bøyning av knutepunkt B

8.1 Innledning

I dette kapittelet undersøkes bøyning av prøvestykker med geometri B om både sterk og svak akse, slik knutepunkt A ble undersøkt i kapittel 7. Håndberegninger av kapasitet og stivhet ved bruk av Eurokoden og flytelinjeteori gjennomføres, før den samme forbindelsen testes i laboratoriet etter prosedyren presentert i kapittel 5. Under viser figur 8.1 valgt geometri med nominelle størrelser. Disse nominelle størrelsene danner grunnlaget for håndberegninger i 8.2, og justeres med reelle verdier etter oppmåling av forsøksgeometri for bruk i laboratorieforsøk (se vedlegg A).



Figur 8.1: Geometri B

8.2 Håndberegninger

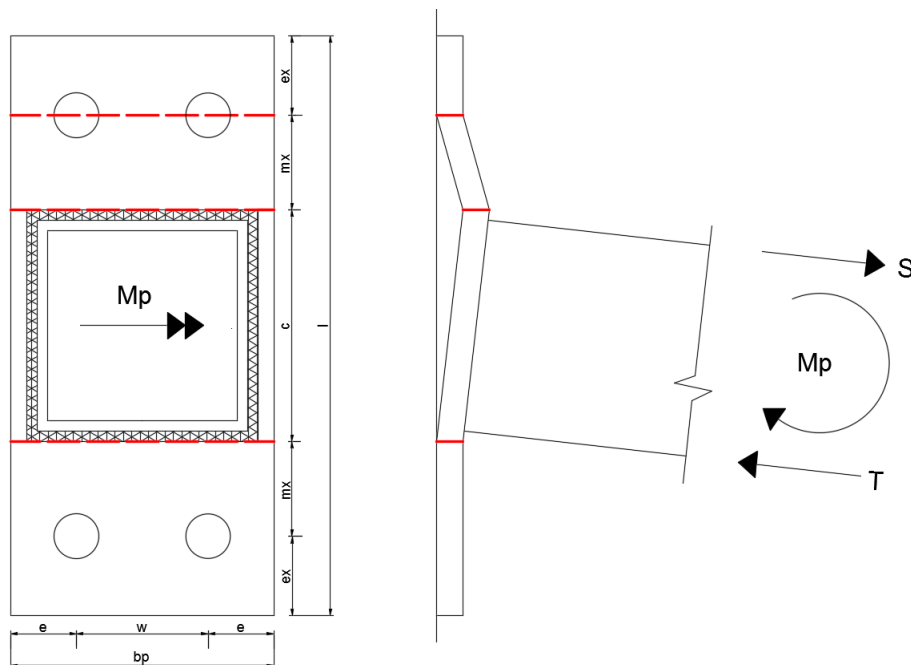
8.2.1 Kapasitet

De analytiske kapasitetsberegningene utført i dette kapitlet er basert på tidligere arbeid av Kirkerud [10]. Beregningsmodellen baseres på flytelinjeteori, hvor det antas en kinematisk flytemekanisme i platen, og den plastiske momentkapasiteten M_p bestemmes. Utledninger av aktuelle, kritiske flytemekanismer finnes i vedlegg B.

8.2.1.1 Sterk akse

For bøyning om sterk akse vil skjøtens momentkapasitet tilsvare kapasiteten som ble funnet for knutepunkt A. Kapasiteten vises i ligning (8.1) og utledes i vedlegg B.1.

$$M_p = 2m_p b_p \left[\frac{c}{m_x} + 1 \right] \quad (8.1)$$



Figur 8.2: Knutepunkt B - flytemønster for bøyning om sterk akse

Tabell 8.1 viser resultater fra kapasitetsberegninger utført ved bruk av både nominelle verdier og reelle verdier oppmålt fra forsøksgeometri vist i vedlegg A. Kapasitetsberegninger for knutepunktet med nominelle verdier finnes i vedlegg C.

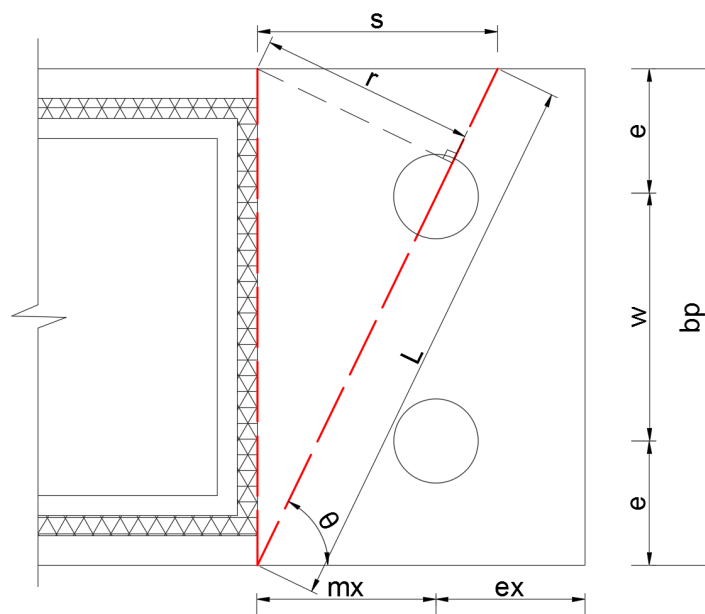
Tabell 8.1: Knutepunkt B - kapasitetsresultater fra bøyning om sterk akse

Beregninger basert på	$M_p [kNm]$	Ekvivalent punktlast [kg]
Nominelle verdier	4,34	177
Reelle verdier	5,25	214

8.2.1.2 Svak akse

Kassim [9] undersøkte tre flytemekanismer for bøyning om svak akse for forbindelsen med geometri B. I denne rapporten benyttes et noe justert flytemønster etter observasjoner fra laboratoriet. Det ble observert flytelinjer som strekker seg gjennom øvre bolthull og opp til kanten av endeplaten, noe som etterlater udeformerte platehjørner. Flytemønsteret illustreres i figur 8.3 med tilhørende plastisk momentkapasitet i ligning (8.2). Utleddning av formel for plastisk momentkapasitet for valgt flytemønster er vist i vedlegg B.3.

$$M_p = \frac{2m_p}{s} [2b_p^2 + s^2] \quad (8.2)$$



Figur 8.3: Knutepunkt B - flytemønster for bøyning om svak akse

Tabell 8.2 gir resultater fra kapasitetsberegninger utført ved bruk av både nominelle og reelle verdier. Beregningene med nominelle verdier finnes i vedlegg C. Den reelle momentarmen settes til $2,35m$, mens den nominelle er på $2,5m$.

Tabell 8.2: Knutepunkt B - kapasitetsresultater fra bøyning om svak akse

Beregninger basert på	$M_p [kNm]$	Ekvivalent punktlast [kg]
Nominelle verdier	5,85	239
Reelle verdier	7,09	308

8.2.2 Stivhet

Beregningene for rotasjonsstivheten til knutepunktet med geometri B baseres på de samme prinsippene forklart i avsnitt 3.6 og 7.2.2. I likhet med knutepunkt A vil stivhetskoeffisientene k_5 og k_{10} , for henholdsvis endeplate og skruer, benyttes.

8.2.2.1 Sterk akse

Som forklart i 7.2.2.1, og utledet i vedlegg D, vil den effektive lengden tilsvare 0,5 ganger bredden på endeplaten:

$$l_{eff} = 0,5b_p \quad (8.3)$$

Stivhetsbidragene fra de to basiskomponentene blir:

$$k_5 = \frac{0,9 \times l_{eff} \times t_p^3}{m_x^3} = 0,208mm \quad (8.4)$$

$$k_{10} = 1,6 \frac{A_s}{L_b} = 4,696mm \quad (8.5)$$

Den totale stivhetskoeffisienten blir:

$$k_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}} = 0,199mm \quad (8.6)$$

Momentarm lik $z = 120\text{mm}$ antas som i 7.2.2.1 og gir en initialrotasjonsstivhet beregnet fra ligning (8.7).

$$S_{j,ini} = k_{tot} \times E \times z^2 = 602\text{kNm/rad} \quad (8.7)$$

Tabell 8.3 viser resultater fra stivhetsberegninger utført ved bruk av både nominelle verdier og reelle verdier oppmålt fra forsøksgeometri vist i vedlegg A. Stivhetsberegningene for knutepunkt B med nominelle verdier er oppsummert i vedlegg D.

Tabell 8.3: Knutepunkt B - stivhetsresultater fra bøyning om sterk akse

Beregninger basert på	$S_{j,ini}[\text{kNm/rad}]$
Nominelle verdier	602
Reelle verdier	633

8.2.2.2 Svak akse

Lengden l_{eff} for bøyning om svak akse må i likhet med knutepunkt A bestemmes ved hjelp av beregnet momentkapasitet fra flytelinjemønster. Dette vises i ligning (8.8)-(8.11). Kirkerud [10] undersøkte forbindelsens trykksenter og konkluderte med en momentarm som går fra den strekkutsatte boltraden til underkant av hulprofilsveisen. Den samme antagelsen benyttes her, og tilsvarende for knutepunkt B en momentarm (z) på 70mm .

Uttrykk for knutepunktets momentkapasitet:

$$M_P = z \times F_P \quad (8.8)$$

Momentkapasitet funnet fra flytelinjeberegninger er vist i vedlegg B.3.

$$M_P = \frac{2m_p}{s} [2b_p^2 + s^2] \quad (8.9)$$

Ved å sette ligning (8.8) inn i ligning (8.9) fås uttrykket for F_P , som er strekkraften i systemet, basert på flytelinjeteori.

$$F_P = \frac{2m_p}{sz} [2b_p^2 + s^2] \quad (8.10)$$

Ved å sette uttrykket for strekkraften i systemet lik den dimensjonerende strekkraften i et ekvivalent T-stykke med bruddform 1, se tabell 3.3, får man et uttrykk for den effektive lengden.

$$l_{eff} = \frac{m_x}{2s_z} [2b_p^2 + s^2] \quad (8.11)$$

Tallverdi:

$$l_{eff} = 120\text{mm} > b_p = 100\text{mm} \quad (8.12)$$

Da den effektive lengden ikke kan være større enn den fysiske lengden, settes l_{eff} lik 100mm . Stivhetsbidraget fra de to basiskomponentene blir:

$$k_5 = \frac{0,9 \times l_{eff} \times t_p^3}{m_x^3} = 0,417\text{mm} \quad (8.13)$$

$$k_{10} = 1,6 \frac{A_s}{L_b} = 4,696\text{mm} \quad (8.14)$$

Den totale stivhetskoeffisienten blir:

$$k_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}} = 0,383\text{mm} \quad (8.15)$$

Initialrotasjonsstivheten kan beregnes fra ligning (3.2), med $z = 70\text{mm}$.

$$S_{j,ini} = k_{tot} \times E \times z^2 = 394\text{kNm/rad} \quad (8.16)$$

Tabell 8.4 gir resultatene av stivhetsberegningene utført ved bruk av både nominelle verdier og reelle verdier oppmålt fra forsøksgeometri vist i vedlegg A. Stivhetsberegninger med nominelle størrelser er oppsummert i vedlegg D.

Tabell 8.4: Knutepunkt B - stivhetsresultater fra bøyning om svak akse

Beregninger basert på	$S_{j,ini}[\text{kNm/rad}]$
Nominelle verdier	357
Reelle verdier	412

8.3 Laboratorieforsøk

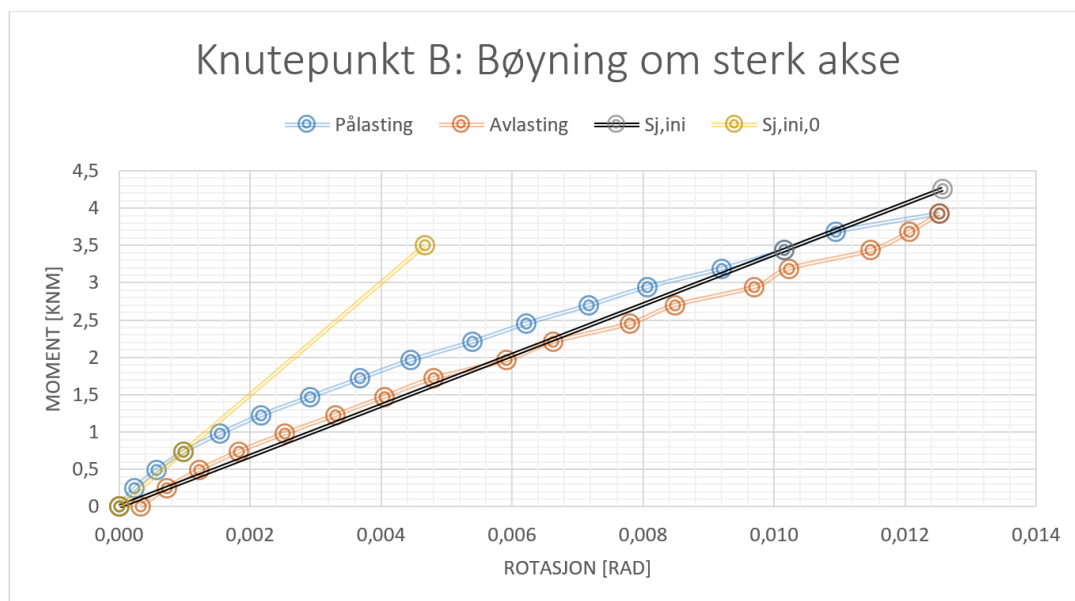
8.3.1 Undersøkelse av elastisk oppførsel

For bøyning av forbindelse med geometri B utføres det fem elastiske forsøksserier per bøyeakse. Den maksimale belastningen for hver serie, med tilhørende moment, vises i tabell 8.5 og 8.7 for henholdsvis sterk og svak akse.

8.3.1.1 Bøyning om sterk akse

Figur 8.4 viser en midlet graf av de elastiske forsøksseriene utført for bøyning om sterk akse. Hver forsøksserie finnes i vedlegg E. Ligning (8.17) gir den initielle stivheten, $S_{j,ini}$, som grafisk fremstilles ved en sort linje i figuren under. Rotasjonsmålingene og nedbøyningsavlesningene viser at en liten, permanent rotasjon inntreffer ved et moment på omtrent $3,8kNm$. Bakgrunnen for at den illustrerte rotasjonsstivheten $S_{j,ini,0} = 749,1kNm/rad$ ikke benyttes videre er diskutert i avsnitt 9.1.2.

$$S_{j,ini,y,B} = 337,9kNm/rad \quad (8.17)$$



Figur 8.4: Stivhetskurve for knutepunkt B bøyd om sterk akse

For hver serie økes den maksimale belastningen med et intervall på 20kg , slik det ble gjort for bøyning av knutepunkt A om sterk akse. Kassim [9] valgte i sitt laboratorieforsøk å begynne med en maksimal belastning på 60kg og avslutte med en maksimal belastning på 140kg . Her velges det å starte på 80kg for å nå et noe høyere moment etter like mange forsøksserier. Dette for lettere å kunne definere et tydelig skille mellom elastisk og plastisk område.

Tabell 8.5: Maksimal belastning for hver forsøksserie - B, sterk akse

Serie	1	2	3	4	5
Belastning [kg]	80	100	120	140	160
Moment [kNm]	1,96	2,45	2,94	3,43	3,92

Kontroll ved måling av nedbøyning

Nedbøyningskontroll utføres som forklart i 7.3.1.1. Første referanse høyde ble målt til 530mm fra bakkenivå til overkant profil ved utkragerenden. I likhet med forsøkene utført på prøvestykker med geometri A, ble referanse høyden nullstilt etter hver serie slik at noterte avvik gjenspeiler enkeltserienes oppførsel, og er i liten grad avhengig av tidligere deformasjon. Kontrollen oppsummeres i tabell 8.6 og indikerer at de fire første seriene ble utført i det elastiske området da avvikene fra referanse høydene anses som små. De siste målepunktene i den femte og siste serien tyder på en liten plastisk deformasjon.

Tabell 8.6: Nedbøyningskontroll - sterk akse

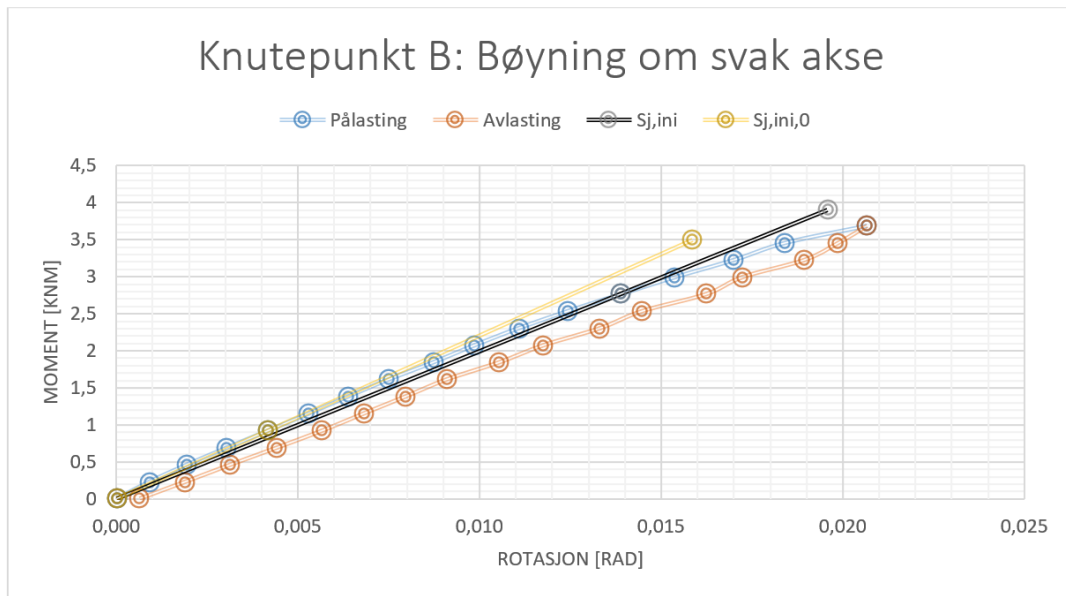
Serie	Elastisk					Plastisk
	1	2	3	4	5	6
Avvik [mm]	0	2	0	2	4	173

8.3.1.2 Bøyning om svak akse

Figur 8.5 viser en midlet graf av de elastiske forsøksseriene utført for bøyning av knutepunkt med geometri B om svak akse. Hver forsøksserie finnes i vedlegg E. Ligning (8.18) gir den initielle stivheten, $S_{j,ini}$, som grafisk fremstilles ved en sort linje i figuren under. Rotasjonsmålingene og nedbøyningsavlesningene viser at en liten, permanent rotasjon inntreffer

ved et moment på omtrent $3,5\text{ kNm}$. Valget med ikke å gå videre med rotasjonsstivheten $S_{j,ini,0} = 220,8\text{ kNm/rad}$, som representerer stivheten fra de første punktene på grafen, begrunnes i 9.1.2.

$$S_{j,ini,z,B} = 199,2\text{ kNm/rad} \quad (8.18)$$



Figur 8.5: Stivhetskurve for knutepunkt B bøyd om svak akse

For hver serie blir den maksimale belastningen på utkrageren økt med 20 kg per serie. Dette gjøres for å synliggjøre knutepunktets elastiske område, og for å oppdage en eventuell plastisk deformasjon.

Tabell 8.7: Maksimal belastning for hver forsøksserie - B, svak akse

Serie	1	2	3	4	5
Belastning [kg]	80	100	120	140	160
Moment [kNm]	1,84	2,31	2,77	3,23	3,69

Kontroll ved måling av nedbøyning

Nedbøyningskontroll utføres som for de øvrige forsøksgeometriene, med en initiell referanse høyde målt til 515 mm før første elastiske serie. Kontrollen oppsummeres i tabell 8.8 og indikerer elastisk oppførsel for de tre første forsøksseriene. For forsøksserie 4 og 5 blir plastisk

deformasjon oppdaget, og gir et samlet avvik på 17mm . Det antas likevel at det relativt store avviket på 5mm fra forsøksserie 1 skyldes svak initiell kontakt i forbindelsen eller feilmåling fremfor plastisk oppførsel.

Tabell 8.8: Nedbøyningskontroll - svak akse

Serie	Elastisk					Plastisk
	1	2	3	4	5	6
Avvik [mm]	5	2	0	6	4	182

8.3.2 Undersøkelse av plastisk oppførsel

Som forklart i 5.5.2 ble den siste forsøksserien for hvert knutepunkt, om begge akser, utført til utkragerenden tok ned i gulvet. Knutepunktets momentkapasitet ved forsøksslutt ($M_{j,u}$), plastiske momentkapasitet ($M_{j,Rd}$), sekantstivhet (S_j) og den initielle rotasjonsstivheten $S_{j,ini}$ vises grafisk i figur 8.6.

8.3.2.1 Bøyning om sterk akse

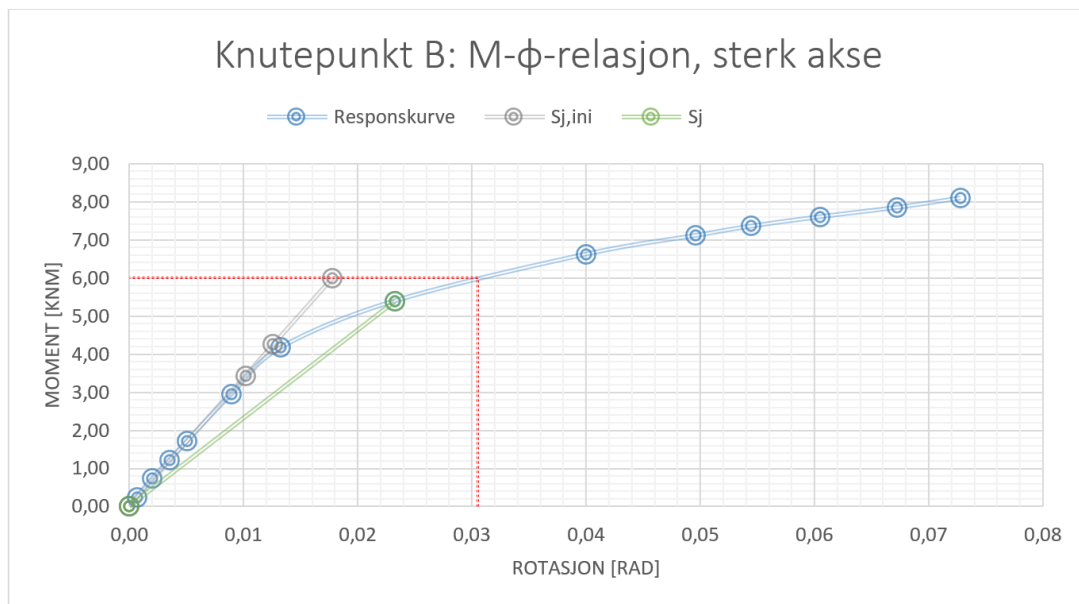
For bøyning av knutepunkt B om sterk akse var maksimal belastning 330kg . Med en momentarm lik $2,5\text{m}$ tilsvarer belastningen et moment uttrykt i (8.19), og ble oppnådd når utkrageren nådde gulvet. Den plastiske momentkapasiteten uttrykkes i (8.20), og illustreres i figur 8.6 som en rød, stiplet linje. Hvordan denne kapasiteten tallfestes diskuteres i 9.1.3.

$$M_{j,u,y,B} = 8,09\text{kNm} \quad (8.19)$$

$$M_{j,Rd,y,B} = 6,00\text{kNm} \quad (8.20)$$

I figur 8.6 er både initialrotasjonsstivheten $S_{j,ini,y,A}$, uttrykt i (8.17), og sekantstivheten $S_{j,y,B}$ fra (8.21), representert grafisk. Det observeres at sekantstivheten (linje fra origo til $\frac{2}{3}M_{j,u,z,B}$ på stivhetskurven) ikke representerer den elastiske helningen like godt som den valgte initielle stivheten.

$$S_{j,y,B} = 231,9 \text{ kNm/rad} \quad (8.21)$$



Figur 8.6: Moment-rotasjon-relasjon for bøyning om sterk akse

8.3.2.2 Bøyning om svak akse

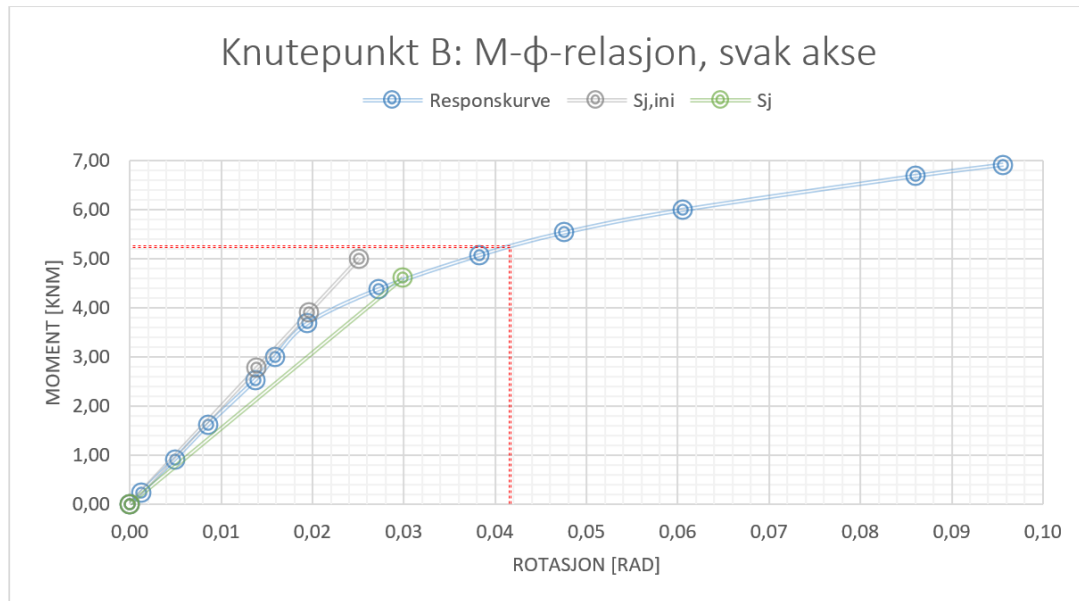
For bøyning av knutepunkt B om svak akse, med en momentarm på $2,35\text{ m}$, når utkrageren gulvet ved en belastning på 300 kg . Det tilhørende momentet ved knutepunktet er vist i uttrykk (8.22). Plastisk momentkapasitet uttrykkes i (8.23), og vises som en rød, stiplet linje i figur 8.7. Se 9.1.3 for begrunnelse av valgt momentkapasitet.

$$M_{j,u,z,B} = 6,92 \text{ kNm} \quad (8.22)$$

$$M_{j,Rd,z,B} = 5,25 \text{ kNm} \quad (8.23)$$

Figur 8.7 viser resultatene fra forsøksserie i det plastiske området, med tilhørende initiell stivhet og sekantstivhet.

$$S_{j,z,B} = 154,4 \text{ kNm/rad} \quad (8.24)$$



Figur 8.7: Moment-rotasjon-relasjon for bøyning om svak akse

8.4 Sammenligning av håndberegninger mot laboratorieresultater

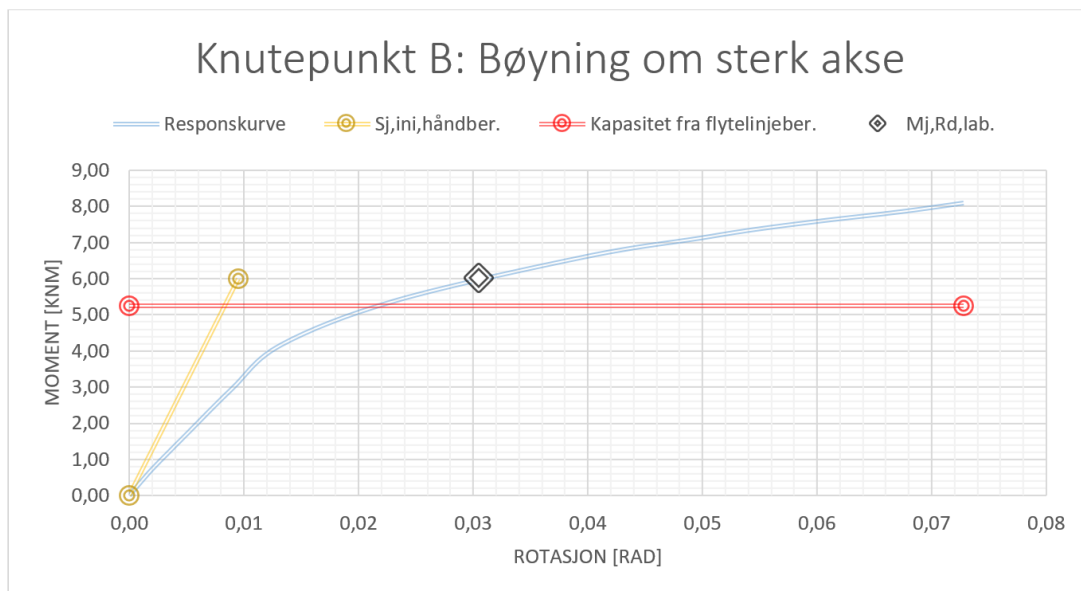
Som i kapittel 7.4 presenteres det i dette kapittelet en sammenligning av håndberegnete resultater og resultater fra laboratorieforsøk. Tabeller og grafer stammer fra beregninger gjort med reelle, oppmålte størrelser, slik at tallverdiene i vedlegg C og D avviker noe. Som nevnt tidligere vil en høyere flytespenning (820 MPa) og en tykkere endeplate ($6,1\text{ mm}$) være hovedårsaken til forskjellene.

8.4.1 Bøyning om sterk akse

Tabell 8.9 gir initialstivhet og kapasitet, beregnet for hånd og tolket fra laboratorieforsøk. Som tabellen viser overestimerer håndberegningene den initielle stivheten med et avvik på 87%, mens kapasiteten underestimeres og gir et konservativt avvik på 12,5%. Figur 8.8 illustrerer resultatene presentert i tabellen under mot responskurven til knutepunkt B bøyd om sterk akse.

Tabell 8.9: Knutepunkt B - sterk akse: Sammenligning

	$S_{j,ini,y,B}$ [kNm/rad]	$M_{j,Rd}$ [kNm]
Håndberegning	632,5	5,25
Forsøksresultater	337,9	6,00



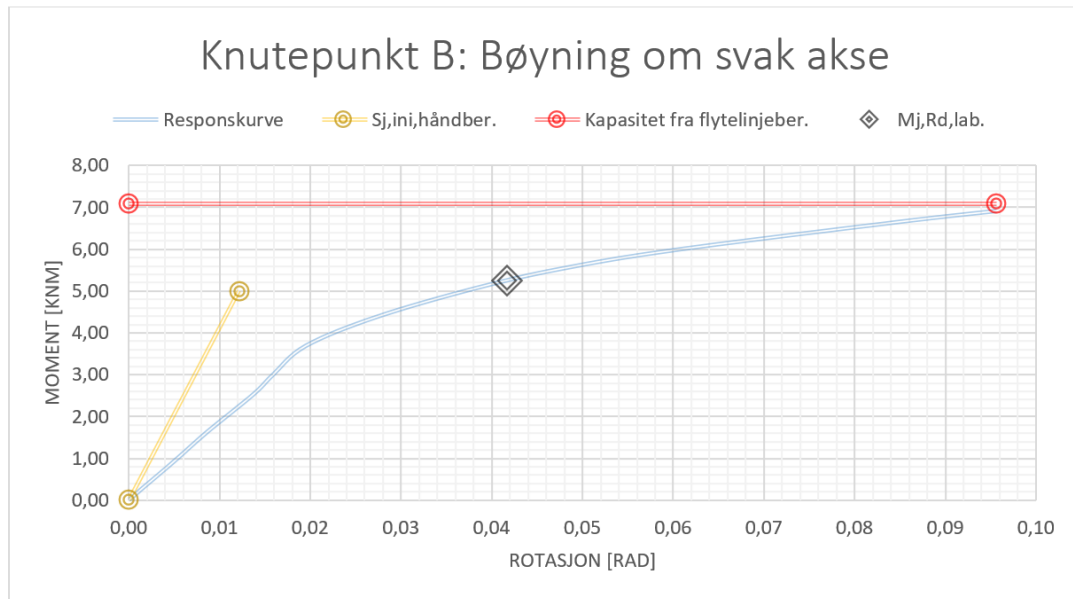
Figur 8.8: Knutepunkt B - sterk akse: Sammenligning av håndberegninger mot responskurve fra forsøk

8.4.2 Bøyning om svak akse

Som det fremgår av tabell 8.10 og figur 8.9, overestimerer håndberegningene både den initielle stivheten og kapasiteten. Som for bøyning om sterk akse er overestimeringen av stivheten betydelig med et avvik på over 100%. For kapasiteten er avviket mellom håndberegning og forsøksresultat på 35%.

Tabell 8.10: Knutepunkt B - svak akse: Sammenligning

	$S_{j,ini,z,B}$ [kNm/rad]	$M_{j,Rd}$ [kNm]
Håndberegning	412,1	7,09
Forsøksresultater	199,2	5,25



Figur 8.9: Knutepunkt B - svak akse: Sammenligning av håndberegninger mot responskurve fra forsøk

9. Sammenligning og diskusjon - knutepunkt A og B

I dette kapitlet diskuteres og kommenteres resultater fra håndberegninger og laboratorieforsøk for knutepunktene med geometri A og B. Resultatene sammenlignes med forsøksresultater fra Kassim [9], som gjennomførte tilsvarende oppgave våren 2016. Sammenligning av liknende forsøk utført med endeplate av S355-stål gjøres også.

9.1 Diskusjon av resultater

9.1.1 Klassifisering av søylefot

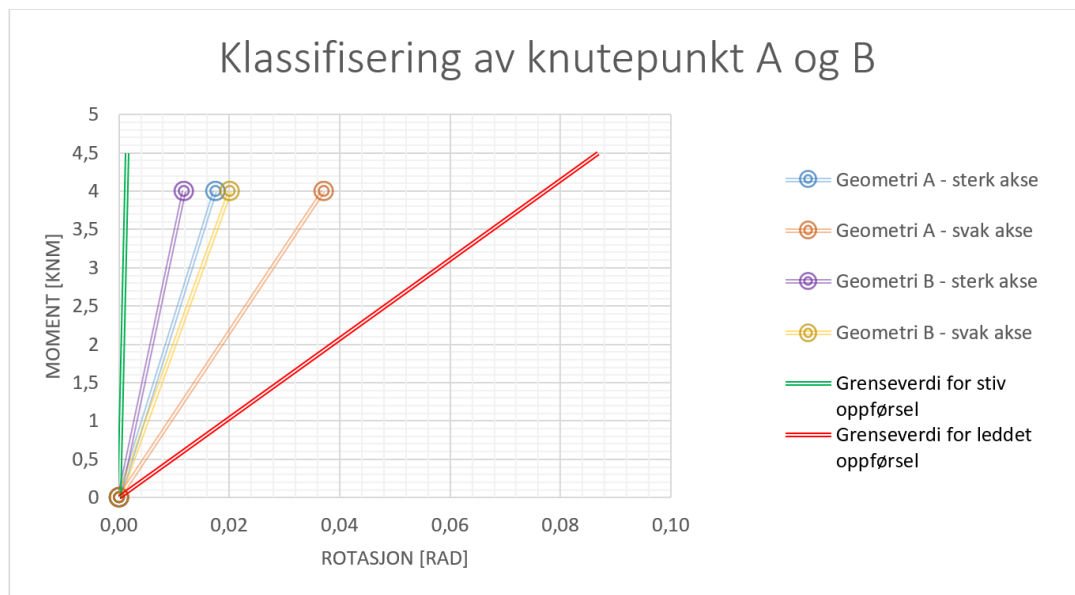
Som nevnt i avsnitt 3.2.1.1 klassifiserer Eurokoden en søylefot med endeplate som enten stiv eller delvis stiv. Det har tidligere blitt utledet en grenseverdi for når søylefoten får en leddet oppførsel, blant annet av Birkeland [2]. Under gjengir ligning (9.1) Eurokodens krav for betraktning av stive søyleføtter, mens ligning (9.2) viser utledet formel for leddet oppførsel. Grenseverdiene beregnes med søylelengde på henholdsvis 2500mm for stiv oppførsel og 2350mm for leddet oppførsel. Dette gjøres for å gjenspeile bøyningforsøkene om både sterk og svak akse, hvor det ble benyttet en momentarm på 2,5m og 2,35m. Det er samtidig verdt å legge merke til at en så liten endring i momentarm ikke ville gitt utslag på klassifiseringen. Arealtreghetsmomentet benyttet i ligningene er hentet fra formelbok [12].

$$S_{j,ini} \geq \frac{30EI_c}{L_c} = 30 \times \frac{210000 \times 1,16 \times 10^6}{2500} = 2923,3 \frac{kNm}{rad} \quad (9.1)$$

$$S_{j,ini} \leq \frac{0,5EI_c}{L_c} = 0,5 \times \frac{210000 \times 1,16 \times 10^6}{2350} = 51,8 \frac{kNm}{rad} \quad (9.2)$$

Figur 9.1 illustrerer klassifiseringen av søyleføttene, og viser initialstivhetene funnet fra forsøk

opp mot beregnede grenseverdier. Det fremgår tydelig at alle knutepunktene har en delvis stiv oppførsel. Resultatet er lite overraskende da studenter med tilsvarende oppgaver har konkludert med lignende resultater. Det har blitt vist at det er vanskelig, og lite hensiktsmessig, å konstruere leddede søyleføtter. Hvis målet er å konstruere et stivt knutepunkt vil det være en idé å velge en tykkere endeplate, da endeplatetykkelsen i stor grad avgjør knutepunktets stivhet. Det kan derimot føre til at endeplaten ikke blir dimensjonerende, som i denne oppgaven er essensielt.



Figur 9.1: Klassifisering av knutepunkt A og B

9.1.2 Bestemmelse av initiell rotasjonsstivhet

Initialrotasjonsstivheten til et knutepunkt er i knutepunktstandarden [5] definert som helningen i det elastiske området av moment-rotasjon-relasjonen. I tilfeller hvor det elastiske området er klart definert, med lineær oppførsel frem til plastisk deformasjon, er denne verdien enkel å bestemme. I tilfeller hvor moment-rotasjon-relasjonen ikke er lineær i det elastiske området, bør initialrotasjonsstivheten defineres på andre måter.

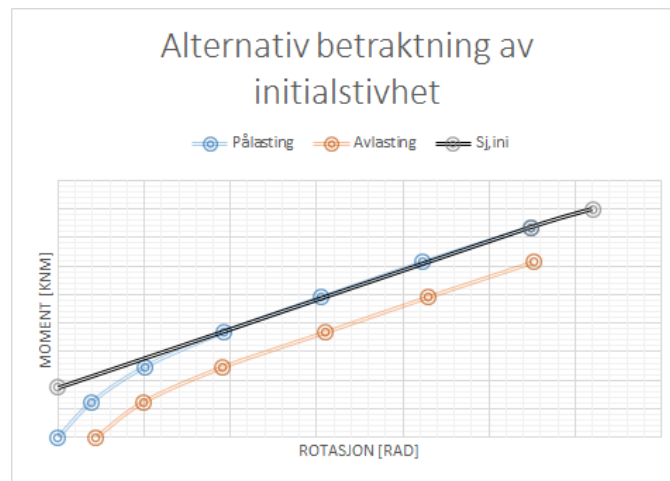
I de elastiske forsøkene utført i denne oppgaven, er stivhetsresponsen ikke-lineær. Grunnen til denne ikke-lineære oppførselen er redegjort for i konferanseforedraget av Aalberg, Uhre og Larsen [1], og skyldes kompleksitet i kontaktsonen mellom endeplate og bakplate. Da endeplaten ikke er helt plan, og med lokalt trykk fra boltene, vil kontaktrykket som oppstår mellom endeplaten og den stive bakplaten være ikke-uniformt i begge retninger. Ved å belaste

hulprofilet og dermed skape rotasjon av knutepunktet, oppstår elastiske bøyingsdeformasjoner i endeplaten, spesielt i forbindelsens strekksone. Dette gir opphav til momentarm og hevarmkrefter som endrer kontaktsonen mellom platene.

Da den elastiske moment-rotasjon-relasjonen for flere av forsøkene varierer mye for liten og stor belastning, kan flere valg av initiell stivhet vurderes. Stivheten for små momenter ($S_{j,ini,0}$) og stivhet for større momenter ($S_{j,ini}$) vurderes her. Gjennomgående viser forsøkene i denne oppgaven at $S_{j,ini,0}$ er vesentlig stivere enn $S_{j,ini}$, særlig for bøyning om sterk akse (se figur 7.6 og 8.4). Momentene som svarer til $S_{j,ini,0}$ er små sammenlignet med momentkapasiteten til forbindelsen, og kan derfor sies ikke å være den gjeldende initielle stivheten til knutepunktet i hele lastområdet. Et bedre valg vil være å velge stivhet basert på helningen fra en større del av moment-rotasjon-relasjonen fra forsøkene. Det er her valgt å basere stivheten på et lastområde som strekker seg til rett før plastisk deformasjon. Denne stivheten, $S_{j,ini}$, representerer knutepunktets stivhet over et større lastområde, og er fortsatt i det elastiske området. Videre vil det være denne definisjonen av initialstivhet som er gjeldene.

Fra figur 7.8, 7.9, 8.6 og 8.7 observeres det at den valgte definisjonen av initialrotasjonsstivhet virker rimelig for momenter opptil 50% av maksimalt moment fra forsøkene. Sekantstivheten, som tilsvarende en linje fra origo til $\frac{2}{3}M_{Rd}$ på stivhetskurven, kan også være en rimelig antakelse for $S_{j,ini}$, dersom momentkapasiteten defineres som i kapittel 9.1.3.

Et annet alternativt valg for bestemmelse av initialrotasjonsstivhet er å ignorere målepunkter i starten av forsøket. Da unngår en bidraget fra målepunktene som gir en meget stiv løsning som kun er gjeldende for lav belastning. Stivheten bestemmes ved å trekke en rett linje mellom målepunktene etter de ignorerte punktene og opp til området hvor plastisk sone begynner. Helningen til denne stivhetslinjen er lavere enn alternativet som er valgt i denne oppgaven, og den ender ikke nødvendigvis i origo. Se figur 9.2 for illustrasjon av et slikt valg av initiell stivhet.



Figur 9.2: Alternativ initialstivhet

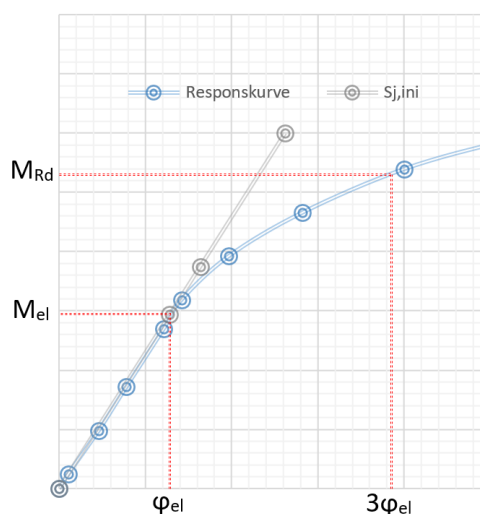
Ulike valg av måter å bestemme den initielle stivheten på er helt avgjørende for resultatet. Dette er altså fordi helningen til moment-rotasjon-kurven kan variere stort for små og store momenter før en tydelig plastifisering av endeplaten inntreffer.

9.1.3 Bestemmelse av momentkapasitet

Da det ikke finnes en generell definisjon på, eller måte å bestemme momentkapasitet basert på en stivhetskurve, må det fastsettes. Grenseverdier for hvor mye bjelken kan rotere ved knutepunktet eller bøyes ned på enden før nytteverdien er oppnådd, kan brukes til å fastsette mål på plastisk kapasitet. I denne rapporten etableres det både en *nedbøyningsgrense* og en *rotasjonsgrense* som vurderes.

Nedbøyningssgrensen settes til det punktet der bjelken tar ned i gulvet. Momentverdien hentes fra den plastiske forsøksserien og leses av i det bjelken opplever så stor nedbøyning at utkragerenden når gulvet. Det tilsvarer en nedbøyning på over 300mm og 350mm på utkragerenden, for henholdsvis sterk og svak akse. Disse verdiene for momentkapasitet kan sammenlignes direkte med verdier funnet av Kassim [9], Bringsvor [3] og Kirkerud [10] som har valgt lignende definisjon. Da dette tilsvarer en momentverdi $M_{j,u}$, som i stor grad er avhengig av opphengshøyde og elastisk deformasjon av hulprofilet, anses nedbøyningssgrensen som lite gunstig for bestemmelse av endeplaten momentkapasitet. Verdien blir fortsatt ansett som relevant da den i senere avsnitt brukes for sammenligning mot de nevnte studenters resultater. Se avsnitt 9.2.1 og 9.2.2.3.

I tilfeller hvor en vurderer søyleføtter eller innspente bjelker, er det like interessant å definere momentkapasiteten ut i fra rotasjonen av knutepunktet. Etter en viss rotasjon vil ikke knutepunktet opprettholde sin integritet, med de egenskaper det var desginet med. Som nevnt i kapittel 5.5.2 leses den plastiske momentkapasiteten av når rotasjonen av knutepunktet er tre ganger den elastiske rotasjonen. Ved en slik rotasjon er knutepunktet godt innenfor plastisk sone, men rotasjonen er fortsatt innenfor en rimelig grense. Definisjonen illustreres i figur 9.3. Denne verdien er brukt i de tidligere kapitlene for sammenligning mot analytiske håndberegninger.



Figur 9.3: Momentkapasitet funnet ved forhåndsdefinert rotasjonsgrense

Med en slik definisjon vil Eurokodens forslag om å bruke sekantstivheten (linje fra origo til $\frac{2}{3}M_{Rd}$ på stivhetskurven) som initialstivhet stemme godt. I tabell 9.1 vises forholdet mellom valgt initialstivhet fra forsøksresultater og sekantstivhet beregnet fra egendefinert momentkapasitet.

Tabell 9.1: Initialstivheter fra forsøk og egendefinert rotasjonsgrense

Knutepunkt	$S_{j,ini,lab.}$ [kNm/rad]	$S_{j,sekant}$ [kNm/rad]	$\frac{S_{j,ini,lab.}}{S_{j,sekant}}$
A sterk	229,3	210,8	1,09
A svak	108,2	100,0	1,08
B sterk	337,9	315,9	1,07
B svak	199,2	189,4	1,05

9.1.4 Kommentarer til momentkapasitetsresultater

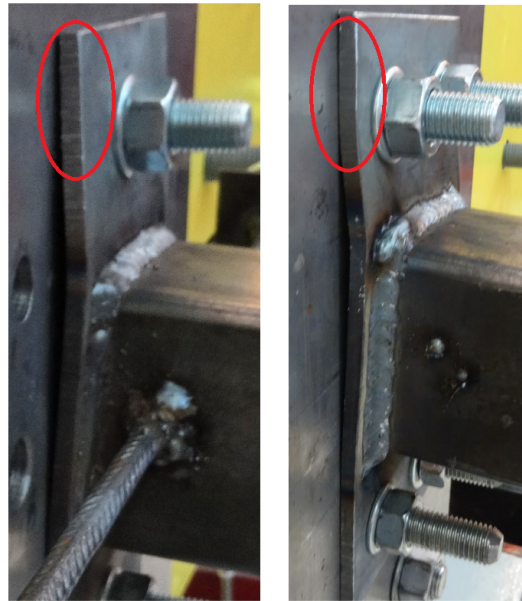
Momentkapasiteten funnet fra forsøk og håndberegning er vist i kapitlene 7.4 og 8.4 og oppsummeres i tabell 9.2.

Tabell 9.2: Kapasitetsresultater fra laboratoriet og håndberegning

Knutepunkt	Laboratoriet	Håndberegning	$\frac{\text{Laboratoriet}}{\text{Håndberegning}}$
	[kNm]	[kNm]	
A sterk	5,30	5,25	1,01
A svak	4,20	5,13	0,82
B sterk	6,00	5,25	1,14
B svak	5,25	7,09	0,74

Tabell 9.2 viser at momentkapasitet funnet fra håndberegning og laboratoriet ser ut til å stemme godt for bøyning av begge knutepunktene om sterk akse. For bøyning om svak akse viser resultatene at håndberegningene overvurderer kapasiteten i forhold til forsøkene i laboratoriet. Håndberegningene heller mot ikke-konservativ side for bøyning om svak akse.

Håndberegningene basert på flytelinjeteori gir i denne rapporten det samme flytelinjemønsteret for bøyning av knutepunkt A og B om sterk akse, og dermed samme kapasitet. Resultatene viser at dette ikke er tilfellet. Bøyning av knutepunkt A om sterk akse utgjør kun 88% av kapasiteten til knutepunkt B. Dette kan forklares ved at de to forbindelsene opplever ulik kontakt med bakplaten når de bøyes. Dette kan ses på figur 9.4. For forbindelsen med geometri B er mesteparten av platen over skruene i kontakt med bakplaten i overkant av forbindelsen. Knutepunkt A opplever at endeplaten bøyes mer og en glipe oppstår på begge sider av endeplaten i overkant av forbindelsen. Dette kan tyde på at flytemønsteret for bøyning av knutepunkt A om sterk akse i praksis avviker noe fra den teoretiske som er beregnet i kapittel 7.2.



Figur 9.4: Kontakt mellom endeplate og bakplate - sterk akse
Knutepunkt A (t.v) og knutepunkt B (t.h.)

Håndberegninger basert på flytleinjeteori er som nevnt tidligere basert på å identifisere et flytelinjemønster og beskrive det ved et sett med rette flytelinjer. I virkeligheten vil en ikke alltid se igjen nøyaktig det samme flytemønsteret, selv om det teoretisk er riktig. Fastning av stål, torsjonseffekter og geometriavvik er mulige årsaker til forskjeller mellom teori og praksis. Som diskutert i avsnitt 9.1.3 knyttes det også usikkerhet til definisjon av plastisk momentkapasitet fra forsøksdata. I listen under er andre mulige kilder til forskjell mellom resultater fra håndberegning og laboratorieforsøk vist.

- Antatt flytemekanisme ikke er identisk med faktisk flytemekanisme
- Elastisk fjæring i boltene er neglisjert. En slik tøyning vil endre endeplatens kontakt med veggen, og dermed dens deformasjonsmønster
- Kontaktsoneproblematikk som nevnt i kapittel 9.1.2
- Uegnet måte å håndberegne momentkapasitet om svak akse. Å sette strekkraften i flensen lik den dimensjonerende strekkraften for et ekvivalent T-stykke kan være en dårlig idealisering. Dette vil gi utslag på den effektive lengden l_{eff}

9.2 Sammenligning mot tidligere arbeid

Da denne delen av oppgaven er en duplisering av forsøkene utført av Kassim [9], vil en sammenligning av resultater foretas i dette kapittelet. Det gjennomføres også en sammenligning av tilsvarende forsøk utført tidligere, hvor vanlig konstruksjonsstål (S355) er brukt. I dette kapittelet benyttes verdier for plastisk momentkapasitet funnet ved forsøkets slutt, altså nedbøyning til gulvet.

9.2.1 Duplisering av arbeid gjort av Kassim

I denne oppgaven er den initielle stivheten basert på helningen av moment-rotasjon-relasjonen over størsteparten av det elastiske området. I kapittel 9.1.2 diskuteres bakgrunn for dette valget. Det skiller seg fra hva Kassim gjorde i sitt arbeid, hvor den initielle stivheten ble valgt fra helningen til moment-rotasjon-relasjonen ved lav belastning.

Tabell 9.3: Sammenligning av initialstivheter [$\frac{kNm}{rad}$]

Knutepunkt	Duplisering		Kassim
	$S_{j,ini}$	$S_{j,ini,0}$	$S_{j,ini}$
A sterk	229,3	491,2	463,7
A svak	108,2	129,9	191,2
B sterk	337,9	749,1	593,8
B svak	199,2	220,8	429,6

Den initielle stivheten, $S_{j,ini}$, funnet i denne oppgaven er mindre med en faktor på omtrent 0,5 sammenlignet med verdiene funnet av Kassim. Dette skyldes som nevnt valg av måte å definere initialrotasjonsstivheten. Ved å sammenligne $S_{j,ini,0}$ fra denne oppgaven med resultatene fra Kassim, er differansen mindre, men tvetydig. Årsaken til denne tvetydigheten kan forklares ut fra kompleksiteten i kontaktsonen mellom endeplaten og bakplaten, som diskutert i kapittel 9.1.2. Ved lav belastning blir store deler av stivheten bestemt på bakgrunn av ujevnheter i endeplaten, og initialstivheten varierer dermed mye fra forsøksobjekt til forsøksobjekt. Dette viser at det kan være problematisk å benytte $S_{j,ini,0}$ som initiell stivhet.

De plastiske momentkapasitetene ved forsøksslutt er vist i tabell 9.4. Verdiene baseres på valgt *nedbøyningsgrense*, som forklart i 9.1.3 er når bjelkeenden når gulvet. Resultatene viser at det er god overensstemmelse mellom resultatene fra Kassim og denne oppgaven. Da prøvestykkene har tilnærmet lik geometri, og endeplaten skåret fra samme WELDOX-plate, er resultatene lite oppsiktsvekkende. Det stilles spørsmål ved endeplatetykkelsen Kassim oppgir på 6,3 mm. Materialprøvene benyttet i strekktestingen av WELDOX-platen hadde en tykkelse på 6,1 mm, og det er med det også grunn til å tro at forsøksobjektene Kassim undersøkte hadde denne tykkelsen.

Tabell 9.4: Sammenligning av knutepunktets kapasitet

Navn	Stålkvalitet	Knutepunkt	Tykkelse [mm]	Håndber. [kNm]	Lab. [kNm]	$\frac{Lab.}{Håndber.}$
Kassim	WELDOX 700	A Sterk	6,3*	5,6	7,1	1,27
		A Svak	6,3*	5,7	5,3	0,93
		B Sterk	6,3*	5,6	8,8	1,57
		B Svak	6,3*	5,7	6,7	1,18
Dyrstad og Kristiansen	WELDOX 700	A Sterk	6,1	5,3	6,9	1,31
		A Svak	6,1	5,1	5,3	1,03
		B Sterk	6,1	5,3	8,1	1,54
		B Svak	6,1	7,1	6,9	0,97

*Endeplatetykkelse lik 6,1 mm er trolig mer reelt

9.2.2 Sammenligning mot endeplate av S355

9.2.2.1 Stivhet til knutepunkt A

Bringsvor [3] utførte forsøk med et prøvestykke tilsvarende knutepunkt A med endeplate av S355. Tabell 9.5 oppsummerer initialstivheter beregnet for hånd etter knutepunktstandarden [5], samt resultater fra laboratorieforsøk. Avvik mellom håndberegninger og forsøksresultatene vises i kolonne fire og sju, for endeplate med henholdsvis S355- og WELDOX 700-stål. Det registreres at samtlige stivheter funnet ved laboratorieforsøk gir en mykere oppførsel enn det håndberegningene tilsier.

Tabell 9.5: Knutepunkt A: Sammenligning av initial rotasjonsstivhet for endeplate av S355 og WELDOX 700

Knutepunkt	S355			WELDOX 700		
	$S_{j,ini,håndber.}$ [kNm/rad]	$S_{j,ini,lab.}$ [kNm/rad]	Avvik [%]	$S_{j,ini,håndber.}$ [kNm/rad]	$S_{j,ini,lab.}$ [kNm/rad]	Avvik [%]
A sterk	765	306	150,0	605,6	229,3	164,1
A svak	257	157	63,7	210,3	108,2	94,4

Bringsvor valgte en initialstivhet ved å trekke en linje fra origo, og frem til punktet på stivhetskurven hvor momentverdien tilsvarer en tredjedel av momentkapasiteten.

Fra $M-\phi$ -kurven ser dette ut som et fornuftig valg og metoden ser ut til å representere det elastiske området på en god måte. Den er dermed sammenlignbar med initialstivheten hentet fra forsøk med WELDOX 700 i denne rapporten. Håndberegningene for begge stålsortene utføres med reelle, oppmålte størrelser, så mindre avvik i geometriske størrelser vil forekomme på tross av at prøvestykkene i teorien er geometrisk identiske.

Som tabell 9.5 viser er prosentvis avvik fra håndberegninger og laboratorieresultater tilnærmet like for bøyning om sterk akse. Likheten kan forklares ved at i begge forsøkene har de første registrerte punktene i de elastiske seriene blitt neglisjert, for å få en initialstivhet som gjelder for et større området (se 9.1.2). Håndberegningene gjøres på tilnærmet lik måte, hvor hovedforskjellen på utregnet stivhet ligger i reelle platetykkelser. Bringsvor gjorde forsøk med en endeplate med tykkelse på 6,3 mm, mens forsøkene presentert i denne rapporten ble gjennomført med en platetykkelse på 6,1 mm. For bøyning om svak akse er avvikene større.

Det ser ut til at den initielle rotasjonsstivheten funnet ved håndberegning og laboratorieforsøk for endeplate av S355 og WELDOX 700 ikke direkte kan sammenlignes. Tendensen er at forbindelsen med WELDOX-plate gir et noe større avvik, som betyr at Eurokoden overestimerer stivheten i noe større grad enn for forbindelser med S355-plate. Det er samtidig verdt å legge merke til at i begge tilfeller gir håndberegningene en stivere oppførsel enn hva praksis viste. Ved kun å betrakte laboratorieresultatene ser en at S355-forbindelsen har en initialstivhet som er ca. 1,4 ganger den som ble registrert for WELDOX-forbindelsen.

9.2.2.2 Stivhet til knutepunkt B

Kirkerud [10] utførte håndberegninger og laboratorieforsøk på et prøvestykke tilsvarende knutepunkt B. Hovedforskjellen mellom resultatene til Kirkerud og de som presenteres i denne rapporten er stålsortene, hvor Kirkerud brukte endeplate med S355-stål. Tabell 9.6 viser initiell rotasjonsstivhet fra forsøk og beregnet etter Eurokoden, med stålsortene S355 og WELDOX 700. Avvikskolonnene viser hvor mye håndberegningene overestimerer stivheten sammenlignet med laboratorieresultatene.

Tabell 9.6: Knutepunkt B: Sammenligning av initiell rotasjonsstivhet for endeplate av S355 og WELDOX 700

Knutepunkt	S355			WELDOX 700		
	$S_{j,ini,håndber.}$ [kNm/rad]	$S_{j,ini,lab.}$ [kNm/rad]	Avvik [%]	$S_{j,ini,håndber.}$ [kNm/rad]	$S_{j,ini,lab.}$ [kNm/rad]	Avvik [%]
B sterk	628,5	470,7	33,5	632,5	337,9	87,2
B svak	341,4	276,3	23,6	412,1	199,2	106,9

For bøyning om sterk akse er T-stykkets effektive lengde for modellering av endeplaten, for både knutepunkt A og B, lik $0,5b_p$. Dette gjenspeiles i de håndberegnete stivhetene. Avvikene mellom håndberegninger og laboratorieresultater er for WELDOX 700 vesentlig større enn avvikene for S355. Forskjellen kan skyldes at Kirkerud ikke registrerte en stivere oppførsel i starten av hver elastiske serie, og dermed unngikk å neglisjere de første målepunktene. Samtidig konkluderer Kirkerud med at sekantstivheten beregnet fra to tredels momentkapasitet gir et godt estimat. Denne ville gitt et avvik på 55% da $S_{j,ini,sekant,S355}$ ble beregnet til $404,6\text{ kNm/rad}$. Til sammenligning gir sekantstivheten til WELDOX-forbindelsen, beregnet i (8.21), et avvik på 173%.

For bøyning om svak akse er det i denne rapporten valgt en modifisert flytemekanisme sammenlignet med hva Kirkerud presenterte. Det resulterte i en endret effektiv lengde for T-stykket, noe som gjør resultatene vanskeligere å sammenligne. Konklusjonen blir like fullt at stivheter fra forsøk, og beregnet fra Eurokode 3, gir betydelig større avvik for endeplate av WELDOX 700 sammenlignet med S355. Som i avsnitt 9.2.2.1 blir det også her registrert at initialstivheten funnet i laboratoriet for S355-forbindelsen er ca. 1,4 ganger større enn WELDOX 700-forbindelsen.

9.2.2.3 Momentkapasitet til knutepunkt A og B

I tabell 9.7 oppsummeres momentkapasiteter funnet av tidligere studenter med lignende motivasjon. Resultater fra forsøk gjort i denne rapporten er også tatt med.

Tabell 9.7: Sammenligning av momentkapasiteter

Navn	Stålkvalitet	Knutepunkt	Tykkelse [mm]	Håndber. [kNm]	Lab. [kNm]	$\frac{\text{Lab.}}{\text{Håndber.}}$
Bringsvor	S355	A Sterk	6,3	3,2	4,6	1,44
		A Svak	6,3	3,2	3,2	1,00
Kirkerud	S355	B Sterk	6,0	2,8	5,8	2,07
		B Svak	6,0	2,8	4,3	1,54
Dyrstad og Kristiansen	WELDOX 700	A Sterk	6,1	5,3	6,9	1,31
		A Svak	6,1	5,1	5,3	1,03
		B Sterk	6,1	5,3	8,1	1,54
		B Svak	6,1	7,1	6,9	0,97

Tabell 9.7 viser en oppsummering av resultatene fra tidligere studenter. Bringsvor [3] og Kirkerud [10] definerte sin plastiske momentkapasitet i det bjelken nådde gulvet. Det er også lagt inn resultater fra kapittel 7 og 8 for å sammenligne S355 mot WELDOX 700. Alle laboratorieresultater er basert på momentverdier fra når bjelken tok ned i gulvet.

Av tabell 9.7 observeres det at håndberegningen gir omtrent lik kapasitet for bøyning om sterk og svak akse. Laboratorieforsøket viser at bøyning om sterk akse har en vesentlig større kapasitet enn bøyning om svak akse. Tabellen viser også at hvis bjelken belastes med nok vekt til at nedbøyningen blir så stor at den treffer gulvet, er det lite forskjell mellom kapasitet funnet fra håndberegning og laboratorieforsøk for bøyning om svak akse.

Tabell 9.8: Forholdstall mellom S355 og WELDOX 700

Knutepunkt	Forhold = $\frac{S355}{WELDOX\ 700}$		
	Platetykkelse	Momentkapasitet	Flytespenning
A Sterk	1,03	0,67	440/820 = 0,54
A Svak	1,03	0,60	0,54
B Sterk	0,98	0,72	420/820 = 0,51
B Svak	0,98	0,62	0,51

Tall fra tabell 9.7 brukes i tabell 9.8 og viser forholdstall mellom forsøk utført med WELDOX- og S355-endeplater. Platetykkelsen og flytespenningen er det som skiller forsøkene fra hverandre og gir utslag på momentkapasiteten. Som tabellen viser, er forholdet mellom flytespenning til S355-stålet og WELDOX-stålet omtrent 0,53. Ved sammenligning av plastisk momentkapasitet fås derimot et forhold på omtrent 0,65. Det er altså ikke en lineær sammenheng mellom økning av plastisk momentkapasitet og økning av flytespenning til stålet, for disse forbindelsene. Ved en dobling av stålets flytespenning, må i tillegg tykkelsen økes noe for å oppnå en dobling i momentkapasitet, i følge disse resultatene.

9.3 Oppsummering

I kapittel 9 er resultater fra dupliseringsforsøket av Kassim oppsummert og diskutert. Det er også hentet inn verdier fra andre tidligere arbeider for å sammenligne resultater mot de som er funnet i denne oppgaven.

Valg av rotasjonsstivhet og definisjon av plastisk momentkapasitet fra forsøk er to viktige faktorer for sammenligning av resultater. I denne oppgaven er initialrotasjonsstivheten valgt på bakgrunn av når prøvestykket tilsynelatende opplever flytning. Dette viste seg samtidig å stemme overens med en helning av moment-rotasjons-kurven for belastning opp til 50% av momentkapasiteten.

Resultatene viser generelt at analytisk beregnet initiell stivhet ved bruk av Eurokoden er mye større enn resultatene fra laboratoriet. Differansen mellom beregnet stivhet og stivhet fra forsøk er så stor at stivhetskoeffisientene fra Eurokoden ikke ser ut til å passe godt. Det betyr

også at Eurokoden ikke er på konservativ side ved beregning av initialrotasjonsstivheten i dette tilfellet. Knutepunkter dimensjonert ved bruk av Eurokoden vil da beregnes til å være stivere enn virkelig knutepunktsoppførsel.

Ved å se på avviket for initialstivhet mellom håndberegning og laboratorieresultat ble det ikke funnet en direkte sammenheng mellom forbindelser utført med WELDOX-plate og S355-plate. Det blir derimot funnet en sammenheng ved kun å studere forsøksstivhetene $S_{j,ini,lab}$. Tendensen er at forbindelsene med S355-plate er omtrent 40% stivere enn WELDOX-forbindelsene.

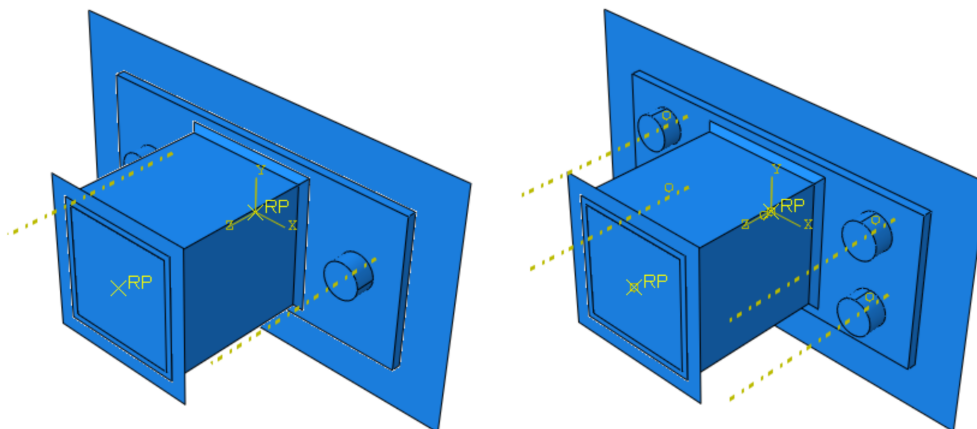
$$S_{j,ini,lab,S355} \approx 1,4 \times S_{j,ini,lab,WELDOX} \quad (9.3)$$

For å si noe om den plastiske momentkapasiteten er det helt avgjørende å velge en tydelig definisjon. En slik definisjon kan variere fra knutepunkt til knutepunkt. Her er den definert som tre ganger den elastiske rotasjonen, sett fra en moment-rotasjon-graf. Med denne definisjonen er forholdet mellom resultater fra laboratoriet og håndberegninger utført i denne oppgaven sammenlignbare. For bøyning om sterk akse er resultatene relativt samstemte, med en helning mot konservativ side. For bøyning om svak akse viser resultatene at håndberegningene overestimerer styrken til knutepunktet med 20-30%, og gir et ikke-konservativt resultat.

Ved å sammenligne resultater fra denne oppgaven, med tidligere studenters resultater hvor det er benyttet S355-stål, er trenden at ved bruk av høyfast stål, øker kapasiteten, men ikke like mye som økning i flytespenningen i stålet. Merk at dette gjelder for momentkapasitet funnet i det bjelken treffer gulvet. Et annet resultat ville funnet sted ved en annen definisjon av momentkapasitet da formen på moment-rotasjons-kurvene til WELDOX 700 og S355 ikke er identiske. Ellers er flytemønstrene og generell oppførsel vurdert som like.

10. Numerisk analyse - knutepunkt A og B

I dette kapitlet presenteres numeriske analyser av knutepunkt A og B. Analysen gjennomføres i Abaqus 6.14-1 og har til hensikt å verifisere prøvestykkenes stivhetskurver og deformasjonsmønstre mot laboratorieresultater. Da lignende analysemodeller har blitt laget av tidligere studenter (Kassim [9], Krikerud [10] og Bringsvor [3]) er det i dette kapitlet ikke lagt vekt på Abaqus-modellens sammensetning og input-data. Materialdata benyttet i analysen er tilsvarende det Kassim presenterte. Modellens oppbygning og sammensetning er i stor grad tilsvarende som for knutepunkt C, som presenteres i detalj i kapittel 14.

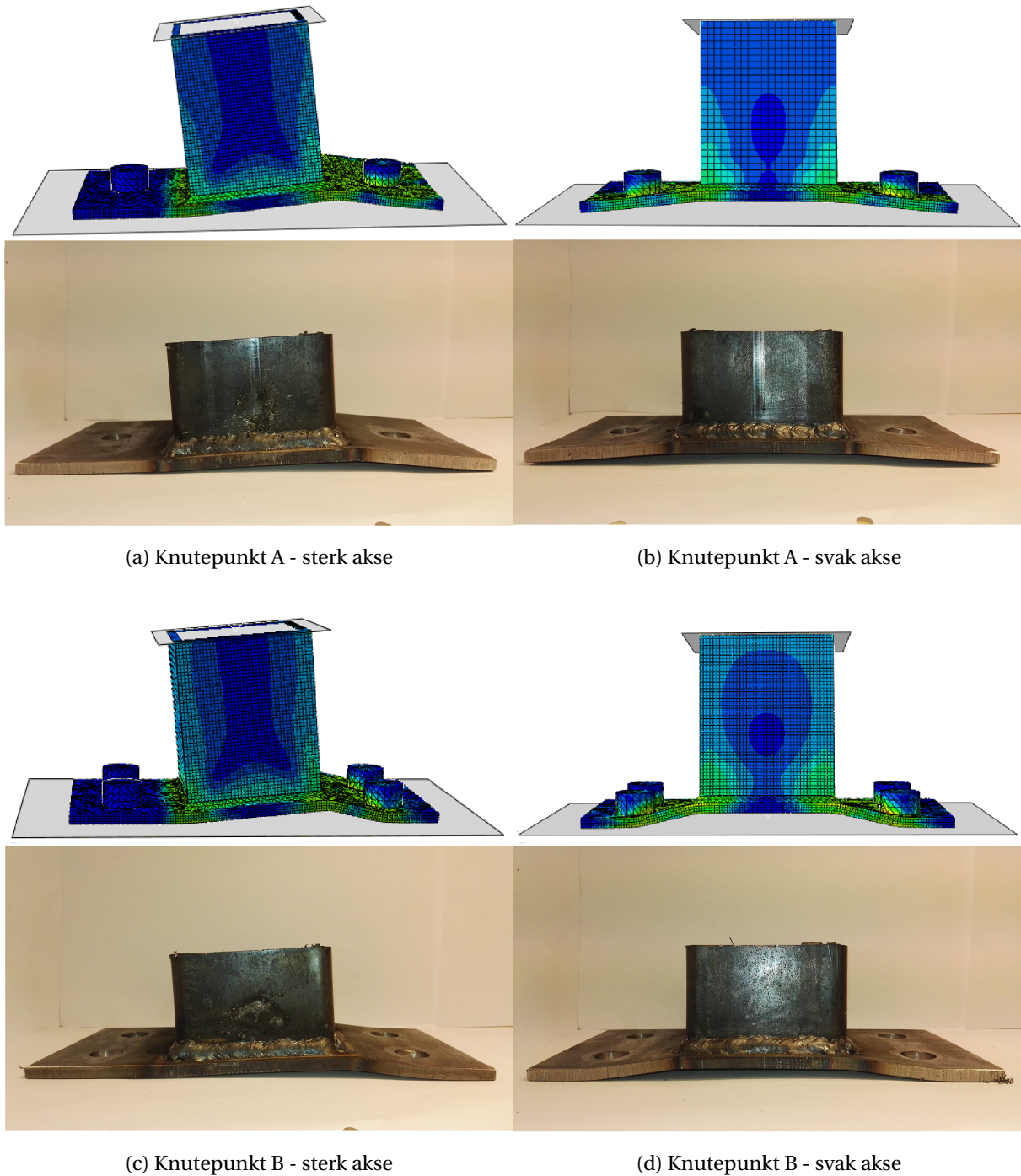


Figur 10.1: Abaqus-modell av knutepunkt A og B

10.1 Deformasjonsmønstre

For at stivhetskurver fra forsøk og simulering skal være sammenlignbare er det avgjørende at det simulerte knutepunktet oppfører seg tilnærmet likt som prøvestykket i laboratoriet. En enkel, visuell kontroll vil være å sammenligne deformasjonsmønstre. I figur 10.2 illustreres prøvestykkenes deformasjon, med tilhørende deformasjonsmønstre fått fra Abaqus-simuleringer.

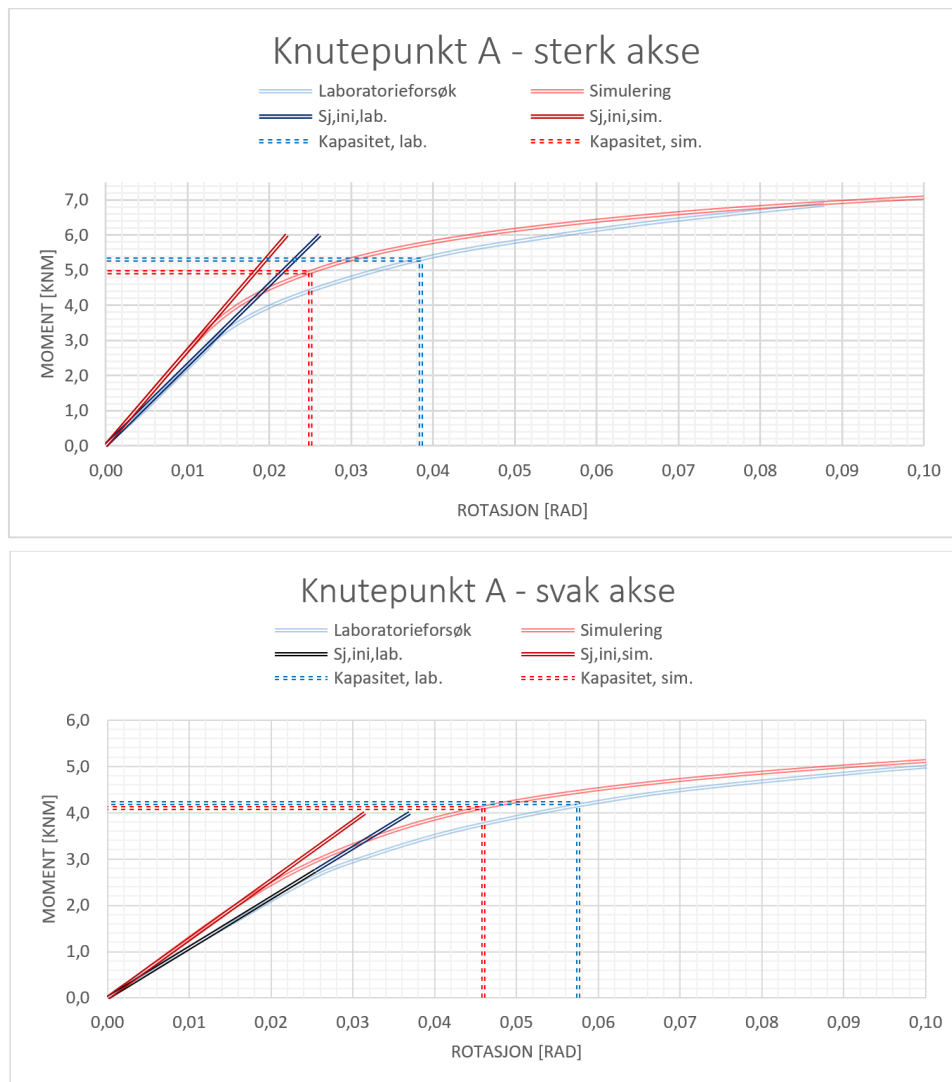
Alle simuleringer gir representative resultater, og er direkte sammenlignbare med prøvestykkenes deformasjon. Det blir også gjort vurderinger av antatte flytemønstre i kapittel 7.2 og 8.2. Disse ble funnet gyldige.



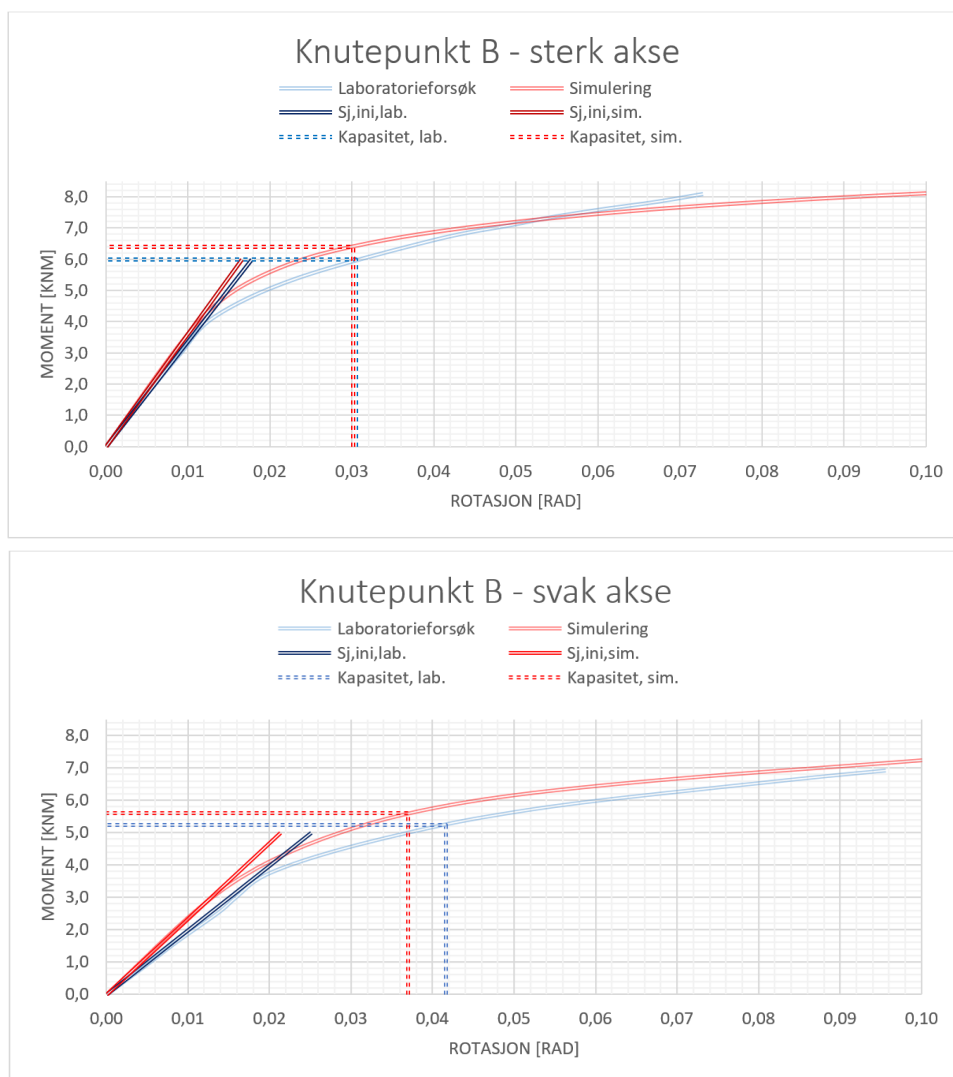
Figur 10.2: Sammenligning av deformasjonsmønstre

10.2 Responskurver

I dette kapittelet vises resultater fra simuleringer gjort i Abaqus, fremstilt med laboratorieresultater. Funnene illustreres grafisk i figur 10.3 og 10.4 og presenteres med tallverdier i tabell 10.1.



Figur 10.3: Stivhetskurer fra Abaqus og forsøk med knutepunkt A



Figur 10.4: Stivhetskurver fra Abaqus og forsøk med knutepunkt B

Tabell 10.1: Resultater fra simulering og forsøk

Geometri - bøyningssakse	Abaqus-simulering		Laboratorieforsøk	
	Initialstivhet [kNm/rad]	Kapasitet [kNm]	Initialstivhet [kNm/rad]	Kapasitet [kNm]
A - sterk	271,1	5,0	229,3	5,3
A - svak	127,3	4,1	108,2	4,2
B - sterk	361,2	6,4	337,9	6,0
B - svak	234,2	5,6	199,2	5,3

Initialstivheten og kapasiteten er bestemt på bakgrunn av konklusjoner i kapittel 9.1.2 og 9.1.3. Det vil si at den plastiske momentkapasiteten bestemmes når rotasjonen av knutepunktet er tre ganger den elastiske rotasjonen, og initialstivheten representerer lastområdet som strekker seg til der plastisk deformasjon tilsynelatende oppstår.

Resultatene viser en trend der simuleringen gir en noe høyere verdi for den initielle stivheten sammenlignet med forsøkene. For bøyning om både sterk og svak akse anses modellen som representativ da avviket fra laboratorieresultatene ligger konstant på ca 18%. Unntaket er for bøyning av knutepunkt med geometri B om sterk akse hvor avviket er i underkant av 7%.

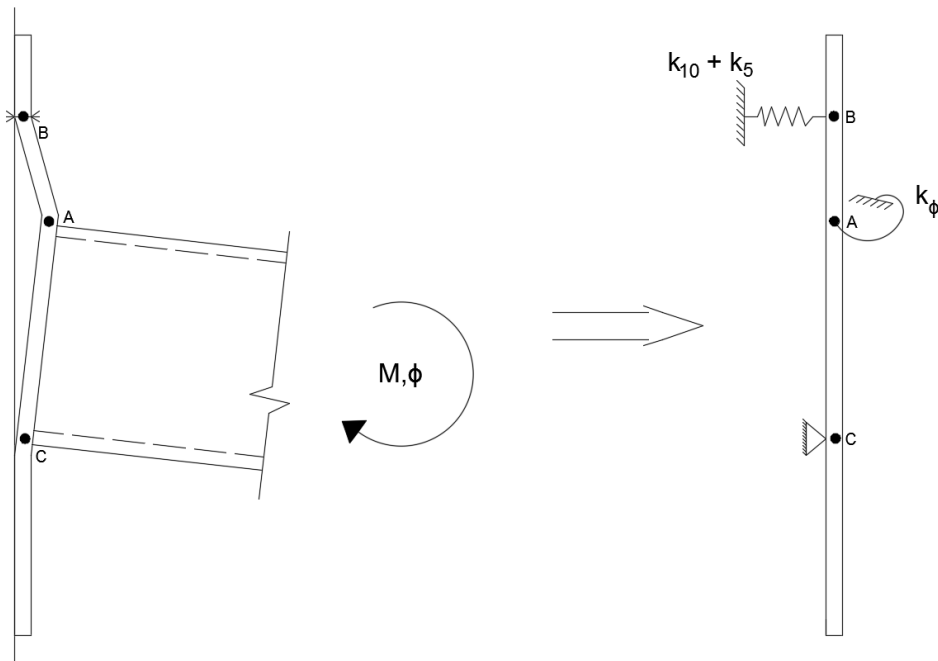
For sammenligning av plastisk momentkapasitet ser en fra tabellen at simuleringene både overestimerer og underestimerer avhengig av prøvestykkets geometri. For bøyning av knutepunkt A gir forsøkene en høyere kapasitet enn Abaqus-modellen, mens det omvendte utfallet viser seg for bøyning av knutepunkt B. Resultatene anses fortsatt som sammenfallende da sammenligning gir et avvik på maks 6,7%.

Med relativt sammenfallende kurver i figur 10.3 og 10.4 vurderes analysemodellene til å være representative for bøyningsforsøkene utført på knutepunkt A og B. Det er samtidig små avvik som skiller $M-\phi$ -kurvene, hvor en rekke feilkilder kan være årsaken til det. I listen under er noen utvalgte feilkilder, og forenklinger i analysemodellen, vist.

- Tykkelse på endeplaten. 6 mm ble brukt i modellen, mens forsøksobjektene hadde en tykkelse på $6,1\text{ mm}$
- Måleravvik
- Initiell spenning i platen neglisjert i analysemodellen
- Modellert bolter uten forspenning
- Innbrenning av sveis i hulprofilet neglisjert i analysemodellen. Hulprofilet ble kun festet i sveisen.

11. Modifisert stivhetsmodell - knutepunkt A og B, sterk akse

Da bruk av Eurokode 1993-1-8 til beregning av rotasjonsstivhet for knutepunkt A og B gir en for stiv oppførsel sammenlignet med forsøk og numeriske analyser, er det ønskelig å utvide stivhetsmodellen. Med stivhetsmodell menes en håndberegningsmodell som her kan inneholde faktorer og bidrag funnet ved numeriske analyser i Abaqus. Stivhetsbidragene fra basiskomponentene platebøyning k_5 , og skruer i strekk k_{10} beholdes, men det legges til et ekstra bidrag grunnet bøyning av endeplaten ved hulprofilets øvre kant. Dette vil være et bidrag til fleksibilitet som ikke dekkes av platebøyningskoeffisienten k_5 . Altså en oppmykning av stivhetsmodellen. Figur 11.1 viser en grafisk fremstilling av stivhetsmodellen og tabell 11.1 oppsummerer stivhetskoeffisientene som inngår. I figuren er koeffisientene k_5 og k_ϕ illustrert hver for seg. I den nye modellen vil disse inkorporeres i hverandre og representere en $k_{5,mod}$. Punkt C på figuren vil også bidra med stivhet og i realiteten gjøre forbindelsen stivere. Dette bidraget ville virket som et parrallelt bidrag, men neglisjeres i modellen da tidligere resultater viser at håndberegninger allerede gir en for stiv løsning sammenlignet med forsøk.



Figur 11.1: Stivhetsmodell for bøyning om sterk akse

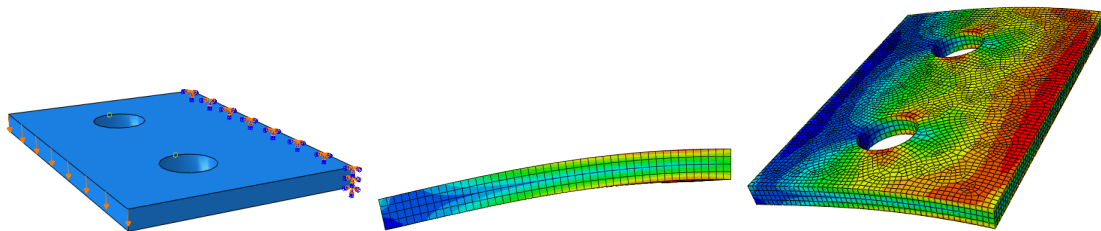
Tabell 11.1: Stivhetskoeffisienter for antatt stivhetsmodell

Koeffisient	Stivhetsbidrag	Se kapittel	Forklaring
k_{10}	Forskyvning	3.6	Basiskomponent fra knutepunktstandarden [5], øvre skruer påkjent av strekk
k_5	Forskyvning og rotasjon	8.2.2.1	Basiskomponent fra knutepunktstandarden [5] endeplate påkjent av bøyning
k_ϕ	Rotasjon	11.1	Bidrag fra endeplatebøyning ved øvre steg som ikke dekkes av k_5

Stivhetsmodellen er laget for bøyning om sterk akse. Den utledes i første omgang for knutepunktet med fire skruer (geometri B), for deretter å gjøre det tilsvarende for forbindelsen med to skruer (geometri A).

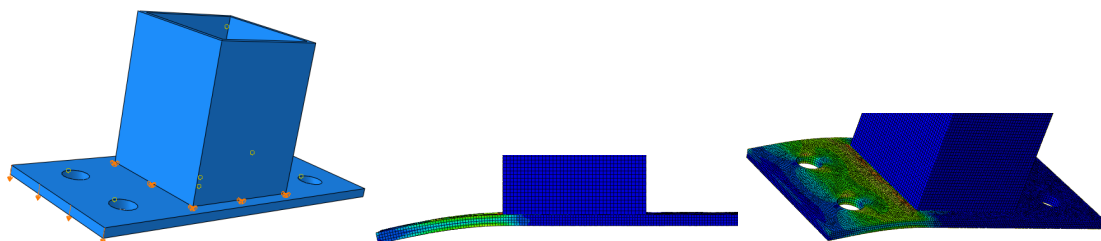
11.1 Modifisering av stivhetsmodell

For å finne ut hvor mye platerotasjonen i overkant av hulprofilet bidrar til reduksjon av stivhet, lages to nye modeller i elementprogrammet Abaqus. Modellene har som mål å tallfeste hvor mye stivhetskoeffisient k_5 kan reduseres grunnet rotasjon av endeplaten. Det lages en utkrager av den utstikkende delen av endeplaten. Denne låses mot forskyvninger og rotasjon ved innspenningen, altså ved overgangen til hulprofilet. Denne utkrageren påføres en forskyvning på enden lik 2 mm . Abaqus kan beregne summen av kreftene i hver node som skal til for å oppnå denne elastiske deformasjonen, tilsvarende 2 mm nedbøyning. Vinkelen ved innspenningpunktet er følgelig null grader.



Figur 11.2: Utkragermodell

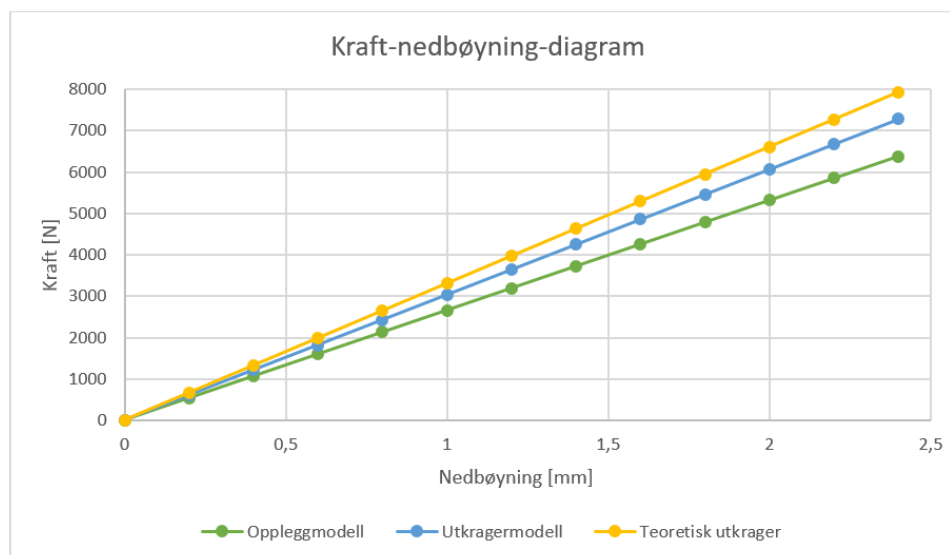
Den neste modellen, videre kalt *oppleggmodellen*, er bygget opp på samme måte som de andre Abaqus-modellene i oppgaven (se kapittel 10 og 14). Forskjellen ligger i randbetingelsene. Den eneste randbetingelsen i modellen, er låsing av frihetsgradene mot forskyvning i hulprofilets tverrsnitt i overgang til endeplaten. En forskyvning på 2 mm påføres på endeplatekanten. Abaqus gir ut hvilken kraft som skal til for å oppnå denne elastiske deformasjonen. Vinkelen ved overgangen mellom hulprofilet og endeplaten er ikke lenger null.



Figur 11.3: Oppleggmodell

Forskjellen mellom de to modellene er den ekstra rotasjonen som tillates inne ved hulprofilveggen i oppleggmodellen. Det er fleksibiliteten knyttet til denne rotasjonen som ønskes inkludert i stivhetsmodellen.

I figurene 11.2 og 11.3 vises lastpåføring, fastholding og visualisering av deformasjonene i endeplaten. I figur 11.4 vises kraft-nedbøyning-relasjonen til utkragermodellen og oppleggmodellen. I tillegg er det lagt på en kurve som viser stivheten til en teoretisk utkrager.



Figur 11.4: Kraft-nedbøyning-diagram for stivhetsmodeller - knutepunkt B

Tabell 11.2: Stivhetsrelasjoner - knutepunkt B

Modell	Uttrykk	$\delta = 1\text{ mm}$	$\delta = 2\text{ mm}$
Teoretisk utkrager	$F = \frac{3EI}{L^3}\delta$	$F = 3306$	$F = 6612$
Utkragermodell	$F = 3035\delta$	$F = 3035$	$F = 6070$
Oppleggmodell	$F = 2660\delta$	$F = 2660$	$F = 5320$

Graf og tabell viser fornuftige resultater. Den teoretiske utkrageren krever størst kraft F , for å oppnå en nedbøyning på 2 mm . Modellen i Abaqus krever mindre kraft. Dette skyldes i hovedsak de to hullene i platen. Oppleggmodellen er den minst stive av dem. Det er rimelig da denne modellen tillater rotasjon av platen ved overgang til hulprofilet, og er dermed mykest.

Ved å bruke Hookes lov for stivhet, lages stivhetsfunksjonene til utkragermodellen og oppleggmodellen. På formen $k = \frac{F}{\delta}$, fås følgende uttrykk for stivhet.

$$k_{utkrager} = 3035 \frac{N}{mm} \quad (11.1)$$

$$k_{opplegg} = 2660 \frac{N}{mm} \quad (11.2)$$

Ved å dividere uttrykkene på E-modulen, lik 210000MPa , fås en ekvivalent fjærstivhet gitt i millimeter som kan summeres med stivhetskoeffisientene k_i fra knutepunktstandarden.

$$k_{utkrager} = 0,0145\text{mm} \quad (11.3)$$

$$k_{opplegg} = 0,0127\text{mm} \quad (11.4)$$

Forholdet mellom disse er en indikasjon på hvor mye rotasjon av endeplaten virker inn på stivheten til knutepunktet. Brøken i uttrykket (11.5) viser forholdet mellom stivheten i utkragermodellen og oppleggmodellen.

$$\frac{k_{utkrager}}{k_{opplegg}} = \frac{0,0145\text{mm}}{0,0127\text{mm}} = 1,14 \quad (11.5)$$

Denne verdien kan inkluderes i stivhetskoeffisienten for platebøyning, k_5 . Ved å ta hensyn til dette forholdstallet, vil man myke opp platens oppførsel. Forholdstallet kan inkluderes på følgende måte:

$$k_{5,mod} = \frac{0,9 \times l_{eff} \times t_p^3}{m_x^3} \times \frac{1}{1,14} \quad (11.6)$$

Med en ny $k_{5,mod}$ -faktor, endres summen av stivhetskoeffisientene som bidrar til stivhet. Under er tallene fra kapittel 8.2.2.1 oppdatert med den nye $k_{5,mod}$.

Stivhetsbidrag fra de to komponentene blir dermed:

$$k_{5,mod} = 0,192\text{mm} \quad (11.7)$$

$$k_{10} = 4,696\text{mm} \quad (11.8)$$

Den totale stivhetskoeffisienten blir:

$$k_{tot,mod} = \frac{1}{\frac{1}{k_{5,mod}} + \frac{1}{k_{10}}} = 0,184\text{mm} \quad (11.9)$$

En momentarm på $z = 120\text{mm}$ antas som i 7.2.2.1 og gir en initialrotasjonsstivheten beregnet i ligning (11.10).

$$S_{j,ini} = k_{tot,mod} \times E \times z^2 = 557,9\text{kNm/rad} \quad (11.10)$$

Sammenlignet med verdien fra laboratorieforsøket på samme forbindelse, gir stivhetsmodellen fortsatt en for stiv løsning. Fra laboratoriet er stivheten beregnet til:

$$S_{j,ini,y,B} = 337,9 \text{ kNm/rad} \quad (11.11)$$

For å beregne avviket benyttes formel for prosentavvik som vist under. Avviket tallfester i prosent hvor stort avviket mellom resultatet fra laboratoriet og forsøket er.

$$\left| \frac{\text{Håndberegning} - \text{Lab.resultat}}{\text{Lab.resultat}} \times 100 \right| \quad (11.12)$$

For knutepunkt B med reelle verdier blir da avviket mellom $S_{j,ini,lab}$ og $S_{j,ini,mod}$:

$$\left| \frac{557,9 - 337,9}{337,9} \times 100 \right| = 65,1\% \quad (11.13)$$

Uten modifisering av stivhetskoeffisienten k_5 er avviket mellom $S_{j,ini,lab}$ og $S_{j,ini}$:

$$\left| \frac{632,5 - 337,9}{337,9} \times 100 \right| = 87,2\% \quad (11.14)$$

Stivhetsmodellen for knutepunkt B bøyd om sterk akse får redusert avviket mellom håndberegning og laboratoriet med omtrent 22%, ved å ta hensyn til tilleggsrotasjonen som ikke tas med i Eurokodens stivhetskoeffisient k_5 .

Den samme fremgangsmåten for å finne $k_{5,mod}$ er benyttet for knutepunkt A. Den eneste forskjellen mellom disse modellene er at det kun er ett hull i endeplaten. Det er å forvente at utkragermodellen samt oppleggmodellen vil oppføre seg noe stivere da det er mer gods som bøyes. Resultater fra Abaqus er vist i tabell 11.3.

Tabell 11.3: Stivhetsrelasjoner - knutepunkt A

Modell	Uttrykk	$\delta = 1 \text{ mm}$	$\delta = 2 \text{ mm}$
Utkragermodell	$F = 2610\delta$	$F = 2610$	$F = 5220$
Oppleggmodell	$F = 3165\delta$	$F = 3165$	$F = 6330$

Dette gir følgende stivhetskoeffisienter for de to modellene:

$$k_{utkrager} = 0,0151 \text{ mm} \quad (11.15)$$

$$k_{opplegg} = 0,0124 \text{ mm} \quad (11.16)$$

$$\frac{k_{utkrager}}{k_{opplegg}} = \frac{0,0151 \text{ mm}}{0,0124 \text{ mm}} = 1,21 \quad (11.17)$$

Dette forholdstallet brukes på samme måte som over i ligning (11.6) til å beregne en modifisert k_5 . Resultatene for disse utregningene med reelle verdier for knutepunkt A og B er vist i tabell 11.4.

Tabell 11.4: Avvik mellom initialstivhet fra laboratoriet og modifisert modell

Knutepunkt	B sterk	A sterk
k_5	0,219	0,219
$k_{5,mod}$	0,192	0,181
k_{tot}	0,209	0,200
$k_{tot,mod}$	0,184	0,168
$S_{j,ini}$	632,5	605,6
$S_{j,ini,mod}$	557,9	508,0
$S_{j,ini,lab}$	337,9	229,3
Avvik fra lab	87,2%	164,1%
Avvik fra lab _{mod}	65,1%	121,5%

11.2 Kommentarer til modifisert stivhetsmodell

Resultatene knyttet til den modifiserte stivhetsmodellen fra kapitlet over, er vist i tabell 11.4. Det å legge til en ny stivhetsfjær i en serie med fjærer, vil føre til en mykere modell for stivhet. Dette skjer da komponentens elastiske stivhet inkluderes i modellen.

Ved å ta hensyn til rotasjonen av platen i overkant av hulprofilet reduseres $S_{j,ini}$ fra $632,5 \frac{kNm}{rad}$ til $557,9 \frac{kNm}{rad}$ for knutepunkt B og fra $605,6 \frac{kNm}{rad}$ til $508,0 \frac{kNm}{rad}$ for knutepunkt A. Dette er

signifikantante reduksjoner i initialstivhet.

Modellene brukt i kapittel 7.2.2 og 8.2.2 til å beregne initialstivheten ga alt for høye verdier for initialstivhet. Den modifiserte modellen senker disse verdiene noe. For knutepunkt B reduseres avviket fra 87,2% til 65,1%. For knutepunkt A reduseres avviket fra 164,1% til 121,5%. Avvikene er fortsatt store, og modellen kan ikke sies å representere det virkelige knutepunktet på en god måte. Den modifiserte stivhetskoeffisienten for platebøyning vil like fullt bidra til en noe mer realistisk oppførsel, og gjengis i ligning (11.18). Den modifiserte stivhetskoeffisienten vises kun for knutepunkt B. For knutepunkt A deles k_5 på faktoren 1,21 fra ligning (11.17).

$$k_{5,mod} = \frac{k_5}{1,14} = \frac{0,79 \times l_{eff} \times t_p^3}{m_x^3} \quad (11.18)$$

Det kan være flere årsaker til at heller ikke den modifiserte stivhetsmodellen er særlig nærme virkeligheten. Å oppnå samme initialstivhet ved håndberegning og laboratorieforsøk forventes ikke, men et estimat som har avvik mindre enn de som vises i tabell 11.4 bør forventes av modeller brukt ved knutepunktsdimensjonering.

Mulige årsaker til store avvik mellom modell og virkelighet kan skyldes:

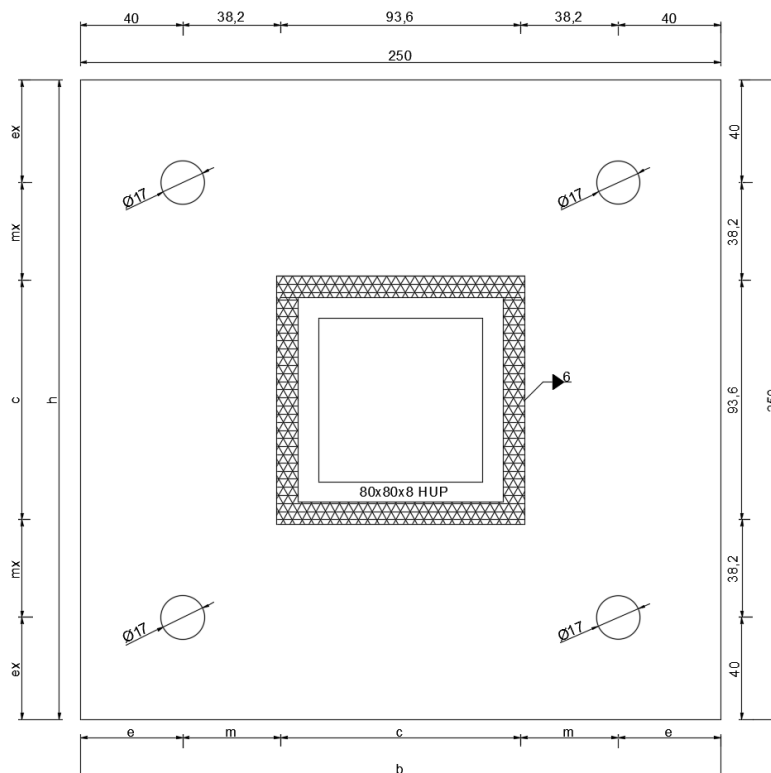
- Kun ett knutepunkt er testet for hver geometri. Ett prøvestykke representerer kun seg selv. Å fastsette en initialstivhet fra ett prøvestykke har vesentlig usikkerhet med tanke på materiale, last og montering.
- En elementmodell fra Abaqus er en komplett mekanisk modell som inkluderer all stivhet i hele knutepunktet. Håndberegningen inkluderer kun bidragene fra platebøyning, k_5 og skruer i strekk, k_{10} . Det vil være deler av knutepunktet som bidrar med stivhet som ikke inkluderes ved håndberegninger da de ikke er enkle å identifisere. Bidrag som kan gjøre knutepunktet både stivere og mykere.
- T-stub er bedre egnet for I- og H-profiler enn for knutepunkter med hulprofiler, i forbindelse med beregning av stivhetskoeffisienter.

Detaljstudie fra Abaqus viser at bidrag fra platebøyning i overkant av hulprofilet er med på å gjøre modellen mykere, men at avvikene mellom initialstivhet fra laboratoriet og beregnet for hånd fortsatt er store.

12. Bøyning av knutepunkt C

12.1 Innledning

I dette kapitlet undersøkes bøyning av knutepunkt med geometri C og endeplate av både WELDOX 700 og S355. Håndberegninger av kapasitet og stivhet baseres på flytelinjeteori og en ny stivhetsmodell. Dette på grunn av Eurokodens manglede gyldighet for momentbelastede hulprofilskjøter. Forbindelsen testes i laboratoriet etter prosedyren presentert i kapittel 5. Figur 12.1 viser geometri C med nominelle mål. Disse nominelle størrelsene er grunnlaget for håndberegninger i 12.2, og blir justert med reelle verdier etter oppmåling av forsøksgeometri for bruk i laboratorieforsøk (se vedlegg A).



Figur 12.1: Geometri C

12.2 Håndberegninger

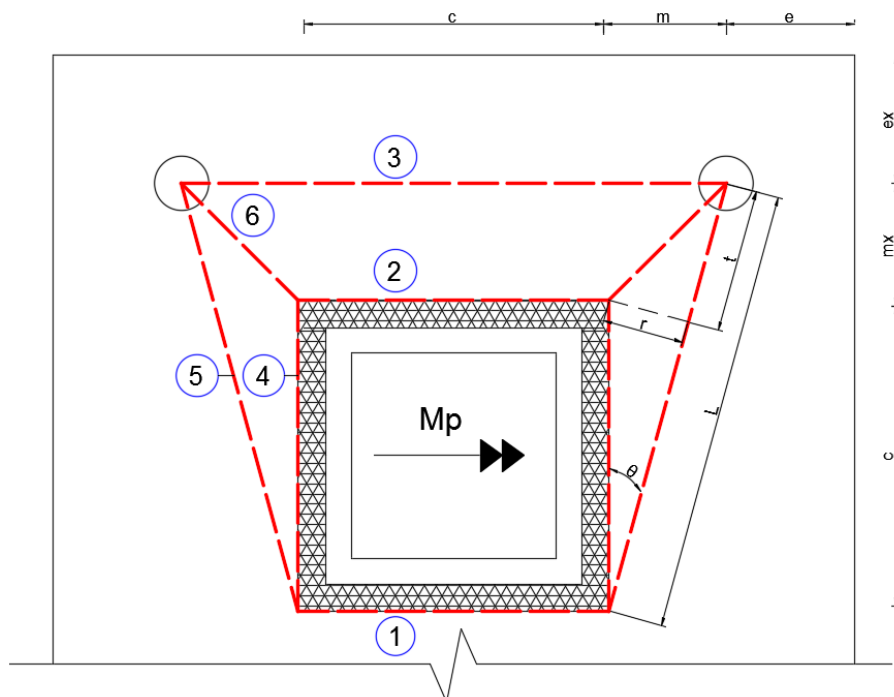
Bøyning av et knutepunkt med utforming som geometri C har ikke blitt utført av tidligere studenter ved NTNU, i motsetning til geometri A og B. Dette kapitlet vil derfor grundig redegjøre for uttrykk benyttet for kapasitet- og stivhetsberegninger.

12.2.1 Kapasitet

For beregning av momentkapasitet, er samme metodikk som for knutepunkt A og B benyttet. En beregningsmodell lages basert på flytelinjeteori, hvor det antas en kinematisk flytemekanisme, og den plastiske momentkapasiteten M_p bestemmes ved likevekt av indre og ytre virtuelt arbeid. For knutepunkt C er det vanskeligere enn for de tidligere forbindelsene å finne den flytemekanismen som vil gjelde. Dette på grunn av store ende- og kantavstander. Tre flytelinjemønstre er her vist og beregnet momentkapasitet for.

12.2.1.1 Flytelinjemønster 1

Flytelinjemønster 1 som er vist i figur 12.2 er en kinematisk mulig flytemekanisme.



Figur 12.2: Flytelinjemønster 1

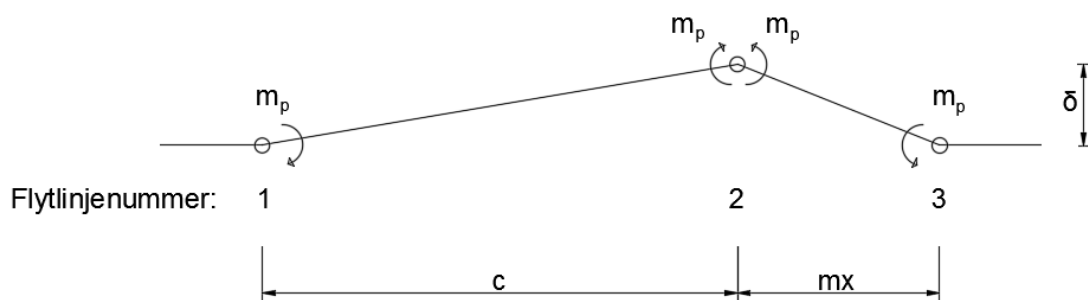
Hjelpstørrelsene til figur 12.2 er vist i tabell 12.1

Tabell 12.1: Hjelpstørrelser til flytelinjemønster 1

Hjelpstørrelse	Uttrykk	Tallverdi
L	$\sqrt{(m)^2 + (c + m_x)^2}$	137,22mm
t	$L - c \times \cos(\theta)$	47,32mm
r	$c \times \sin(\theta)$	26,05mm
θ	$\arctan(\frac{m}{c+m_x})$	16,16°

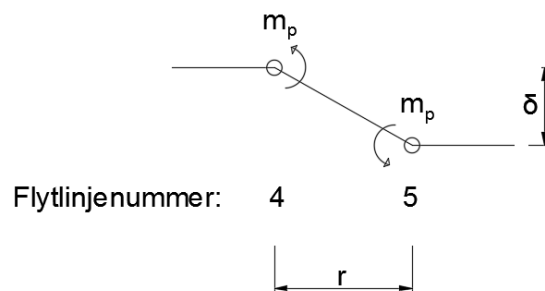
Mekanismen kan deles inn i seks ulike flytelinjer. I det følgende vil bidragene fra disse seks flytelinjene til platens momentkapasitet vises. Ved å kreve likevekt mellom indre og ytre virtuelt arbeid finnes platens kapasitet. Det indre arbeidet uttrykkes ved $\Sigma m_p \times \theta \times l$. Det ytre arbeidet er definert som moment multiplisert med rotasjon. Bidragene fra linje 4, 5 og 6 multipliseres med to da bidragene finnes på begge sider av hulprofilet.

Fra figur 12.3 beregnes bidragene fra flytelinje 1, 2 og 3.



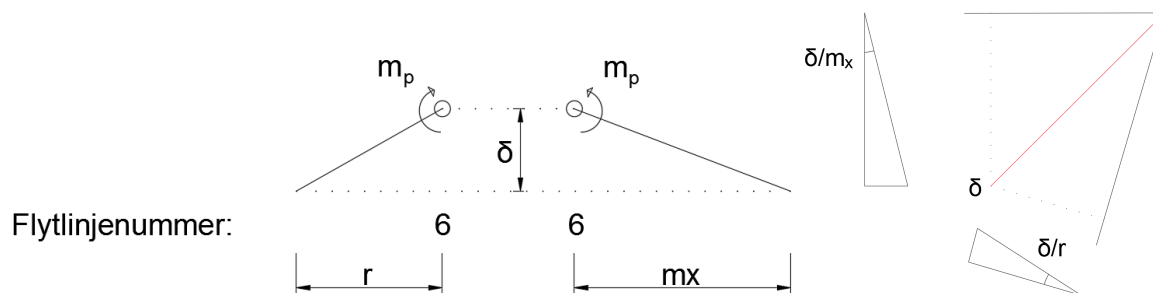
Figur 12.3: Flytelinje 1, 2 og 3 for mekanisme 1

Fra figur 12.4 beregnes bidraget fra flytelinje 4 og 5.



Figur 12.4: Flytelinje 4 og 5 for mekanisme 1

Fra figur 12.5 beregnes bidragene fra flytelinje 6. Figuren viser også hvor den skrå flytelinjen projiseres til de to tilgrensende faste dreieaksene.



Figur 12.5: Flytelinje 6 for mekanisme 1

Bidragene til det indre arbeidet som skjer i platen når den bøyes og plastifiseres, er vist i tabellen under.

Flytelinjennr.	indre arbeid - W_i
1	$m_p \frac{\delta}{c} c$
2	$m_p \left(\frac{\delta}{c} c + \frac{\delta}{m_x} c \right)$
3	$m_p \frac{\delta}{m_x} (c + 2m)$
4	$m_p \frac{\delta}{r} c \times 2$
5	$m_p \frac{\delta}{r} L \times 2$
6	$m_p \left(\frac{\delta}{r} t + \frac{\delta}{m_x} m \right) \times 2$

Tabell 12.2: Birdag til indre arbeid

Ved å addere bidragene fra alle flytelinjene, blir uttrykket for det indre arbeidet:

$$W_i = m_p \left(\frac{\delta}{c} c + \frac{\delta}{m_x} (c + 2m) + \left[\frac{\delta}{r} L \right] \times 2 + \left[\frac{\delta}{r} t + \frac{\delta}{m_x} m \right] \times 2 + \left(\frac{\delta}{c} c + \frac{\delta}{m_x} c \right) + \left[\frac{\delta}{r} c \right] \times 2 \right) \quad (12.1)$$

Trekt sammen, oppnås følgende uttrykk for det indre arbeidet:

$$W_i = 2m_p \delta \left(1 + \frac{c + 2m}{m_x} + \frac{L + c + t}{r} \right) \quad (12.2)$$

Det ytre arbeidet er her gitt som:

$$W_e = M_p \frac{\delta}{c} \quad (12.3)$$

Likevekt mellom indre og ytre arbeid gir platens bruddlast:

$$M_P = 2m_p c \left[1 + \frac{c + 2m}{m_x} + \frac{L + c + t}{r} \right] \quad (12.4)$$

Tabell 12.3 viser momentkapasiteten beregnet ut i fra formel (12.4), både med nominelle og reelle verdier.

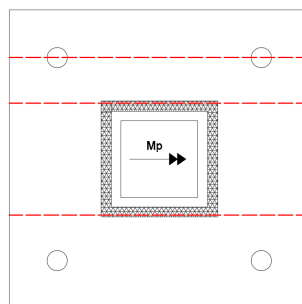
Tabell 12.3: Knutepunkt C - kapasitetsresultater for mekanisme 1

Stålkvalitet	Beregninger basert på	$M_P [kNm]$	Ekvivalent punktlast [kg]
WELDOX 700	Nominelle verdier	19,02	775,34
	Reelle verdier	23,03	938,90
S355	Nominelle verdier	9,64	393,26
	Reelle verdier	11,14	454,18

12.2.1.2 Flytelinjemønster 2

Flytelinjemønster 2 er det samme mønsteret som for bøyning av knutepunkt A og B om sterk akse. Altså flytelinjer som strekker seg over hele platens bredde ved under- og overkant av sveis og ved øvre bolterad. Uttrykket for momentkapasitet er følgelig det samme og gjengis i ligning (12.5).

$$M_P = 2m_p b \left[\frac{c}{m_x} + 1 \right] \quad (12.5)$$



Figur 12.6: Flytelinjemønster 2

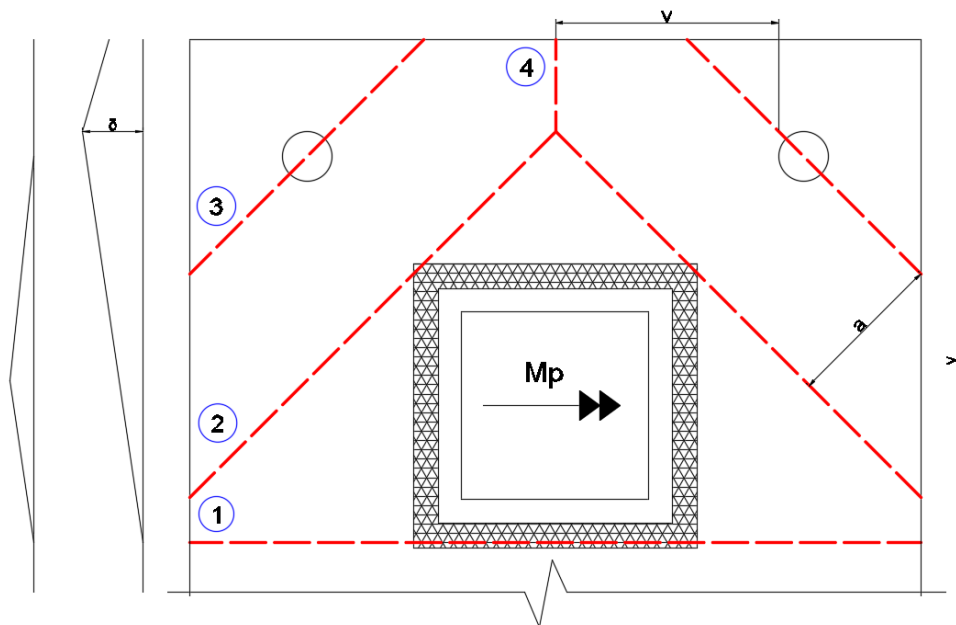
Tabell 12.4 viser momentkapasiteten beregnet ut i fra formel (12.5), både med nominelle og reelle verdier.

Tabell 12.4: Knutepunkt C - kapasitetsresultater for mekanisme 2

Stålkvalitet	Beregninger basert på	$M_p [kNm]$	Ekvivalent punktlast [kg]
WELDOX 700	Nominelle verdier	10,87	443,15
	Reelle verdier	13,16	536,57
S355	Nominelle verdier	5,51	224,74
	Reelle verdier	6,37	259,56

12.2.1.3 Flytelinjemønster 3

Flytlinjemønster 3, som vises i figur 12.7, er basert på en mekanisme funnet i en rapport av A. T. Wheeler [15]. I rapporten beregnes den plastiske momentkapasiteten ved hjelp av virtuelt arbeid, men ved bruk av de ulike rotasjonplanenes normalvektorer. Her beregnes momentkapasiteten direkte, uten bruk av normalvektorer. Metodene er likeverdige og skal gi samme resultat. Endeavstander, platetykkelse, stålkvalitet og vinkler til noen av flytelinjene skiller seg fra rapporten til Wheeler. De skrå linjene er alle 45 grader mot platenes ender. På figuren er det også vist deformasjon for vertikale snitt fra toppen av platen og gjennom skruene, og fra toppen og gjennom midten av platen.



Figur 12.7: Flytlinjemønster 3

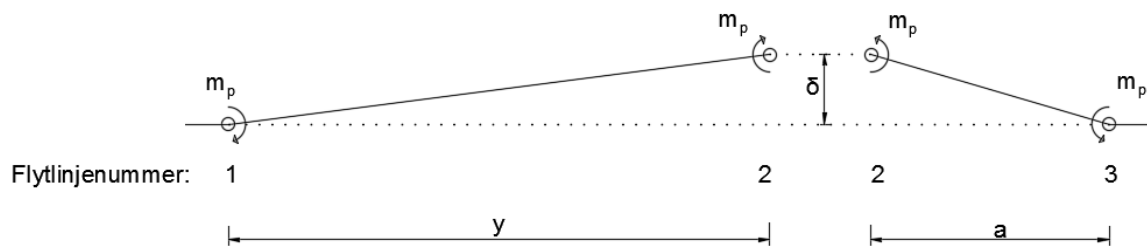
Også her benyttes prinsippet om virtuelt arbeid. Indre og ytre virtuelt arbeid settes lik hverandre og løses for momentkapasiteten til endeplaten. Mekanismen deles inn i fire unike flytelinjer. Bidragene fra linje 2 og 3 multipliseres med to da bidragene finnes på begge sider av hulprofilet.

Hjelpstørrelsene til figur 12.7 er vist i tabell 12.5. L_1 , L_2 og L_3 er lengdene til flytelinjene 1, 2 og 3. Størrelsen v er den vinkelrette avstanden fra nederste punkt på L_4 til flytelinjen gjennom skruen.

Tabell 12.5: Hjelpstørrelser til flytelinjemønster 3

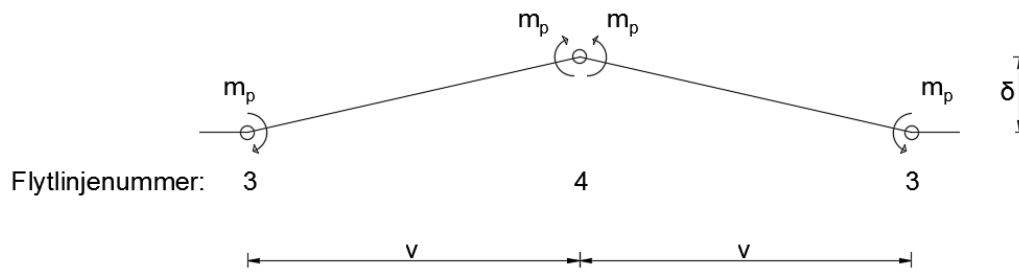
Hjelpstørrelse	Uttrykk	Tallverdi [mm]
L_1	b	250,00
L_2	$\frac{b}{2 \times \cos(45)}$	176,78
L_3	$\sqrt{(m_x + e_x)^2 + (m + e)^2}$	110,59
L_4	$(e_x + m_x) - 0,5c \times \tan(45)$	31,40
y	$\frac{3}{2}c$	140,40
v	$\frac{b}{2} - (e + m) + \frac{L_4}{\tan(45)}$	78,20
a	$\sqrt{m^2 + m_x^2}$	54,02

Fra figur 12.8 beregnes bidragene fra flytelinje 1, 2 og 3.



Figur 12.8: Flytelinje 1, 2 og 3 for mekanisme 3

Fra figur 12.9 beregnes bidraget fra flytelinje 4.



Figur 12.9: Flytelinje 4 for mekanisme 3

Bidragene til det indre arbeidet som skjer i platen når den bøyes og plastifiseres, er vist i tabellen under.

Flytelinjenr.	indre arbeid - W_i
1	$m_p \frac{\delta}{y} L_1$
2	$m_p \left(\frac{\delta}{a} L_2 + \frac{\delta}{y} \frac{L_1}{2} \right) \times 2$
3	$m_p \frac{\delta}{a} L_3 \times 2$
4	$m_p \frac{\delta}{v} L_4 + m_p \frac{\delta}{v} L_4$

Tabell 12.6: Birdag til indre arbeid

Ved å addere bidragene fra alle flytelinjene, blir uttrykket for det indre arbeidet:

$$W_i = m_p \left(\frac{\delta}{y} L_1 + \left[\frac{\delta}{a} L_2 + \frac{\delta}{y} \frac{L_1}{2} \right] \times 2 + \left[\frac{\delta}{a} L_3 \right] \times 2 + \frac{\delta}{v} L_4 + \frac{\delta}{v} L_4 \right) \quad (12.6)$$

Trekt sammen, oppnås følgende uttrykk for det indre arbeidet:

$$W_i = 2m_p \delta \left(\frac{L_1}{y} + \frac{L_2 + L_3}{a} + \frac{L_4}{v} \right) \quad (12.7)$$

Det ytre arbeidet er her gitt som:

$$W_e = M_p \frac{\delta}{c} \quad (12.8)$$

Likevekt mellom indre og ytre arbeid gir platens plastiske momentkapasitet:

$$M_P = 2m_p c \left[\frac{L_1}{y} + \frac{L_2 + L_3}{a} + \frac{L_4}{v} \right] \quad (12.9)$$

Tabell 12.7 viser momentkapasiteten beregnet ut i fra formel (12.9), både med nominelle og

reelle verdier.

Tabell 12.7: Knutepunkt C - kapasitetsresultater for mekanisme 3

Stålkvalitet	Beregninger basert på	$M_p [kNm]$	Ekvivalent punktlast [kg]
WELDOX 700	Nominelle verdier	8,85	360,86
	Reelle verdier	10,71	436,78
S355	Nominelle verdier	4,48	182,94
	Reelle verdier	5,18	211,29

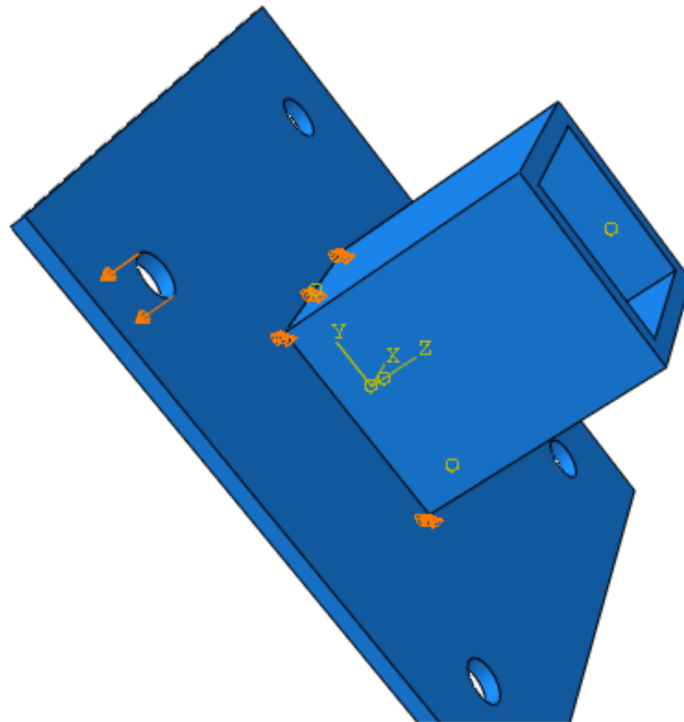
12.2.2 Stivhet

12.2.2.1 Bakgrunn

Med en endeplate som strekker seg utenfor alle sider av hulprofilet, og bolter plassert i hjørnene, er det ikke hensiktsmessig å bruke Eurokoden for stivhetsberegninger av knutepunkt C. Dette skyldes at endeplaten bøyes om to akser i overkant av hulprofilet, og en 2D-bjelkemodell vil være vanskelig å utvikle. Abaqus benyttes for å finne endeplatens stivhetsbidrag, for så å kunne lage en forenklet modell for knutepunkt C. Strekkboltens stivhetsbidrag k_{10} vil som for de øvrige knutepunktsgeometriene tas direkte fra knutepunktstandarden [5].

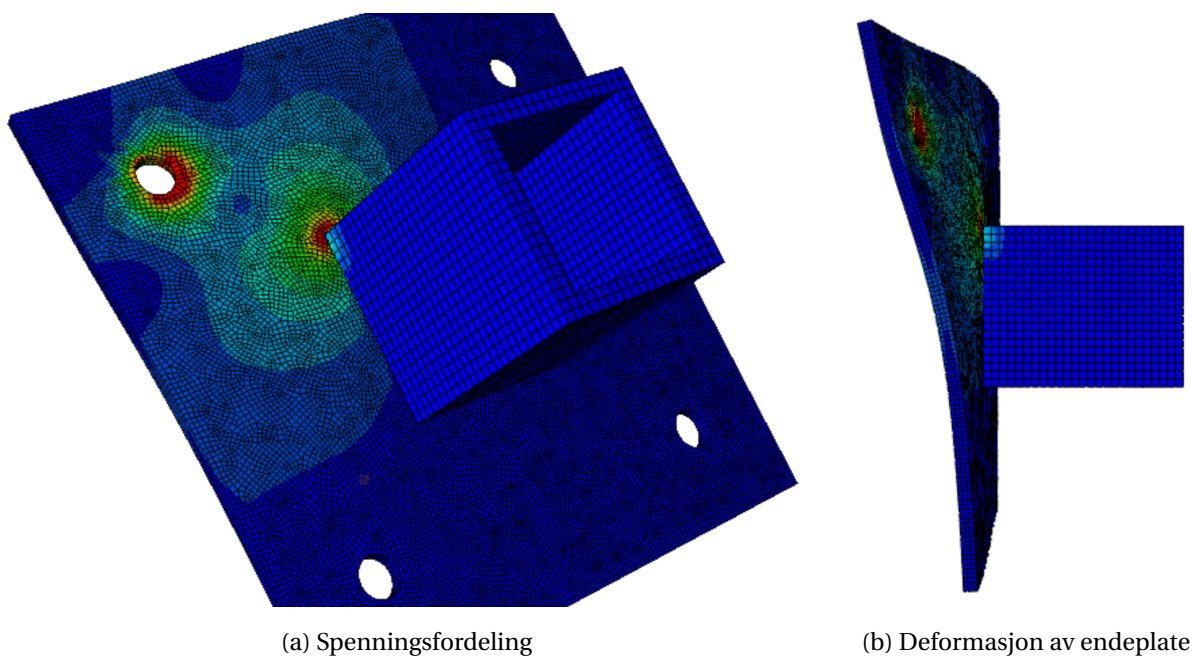
12.2.2.2 Stivetskoeffisient for bøyning av endeplate, k_{plate}

For å finne endeplatens stivhetsbidrag vil Hookes lov for stivhet ($k = \frac{F}{\delta}$) benyttes på en modifisert Abaqus-modell av hva som blir presenteret i kapittel 14. Boltene og den stive vegg fjernes. Hulprofilet fastholdes mot forskyvning i x-, y-, og z-retning langs ytterkanten. Sveisen er også for enkelhets skyld fjernet og hulprofilet festes til endeplaten. En forskyvning rundt boltehullets øvre kant påføres for å kunne finne de nødvendige reaksjonskreftene som tislvarer en slik forskyvning. Figur 12.10 viser Abaqus-modellen. Det antas at de to stivhetsbidragene fra platebøyning mellom hulprofilhjørnene og de strekkutsatte boltene ikke påvirker hverandre. Analysen blir dermed kjørt, og stivhetsmodellen utledet, for kun halve knutepunktet.



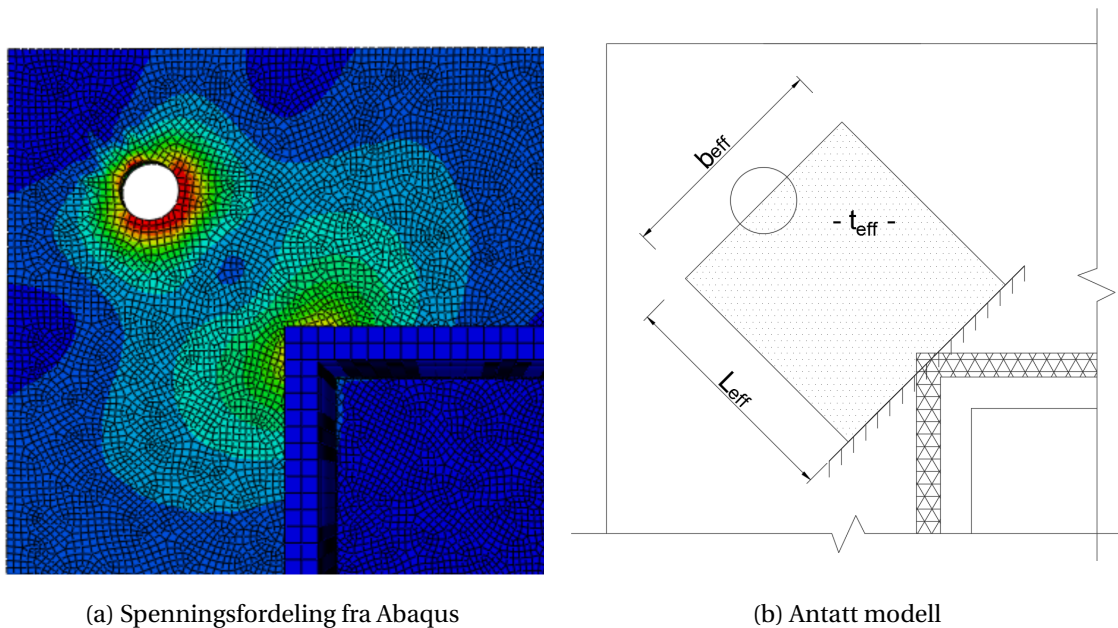
Figur 12.10: Abaqus-modell for undersøkelse av endeplatens stivhetsbidrag

En forskyvning på 2 mm velges for å få resultater som gir en lineær elastisk sammenheng mellom kraft og forskyvning. I analysen blir ikke-linearitet skrudd av da det er de elastiske bidragene som er av interesse. Figur 12.11 viser resultatene av analysen.



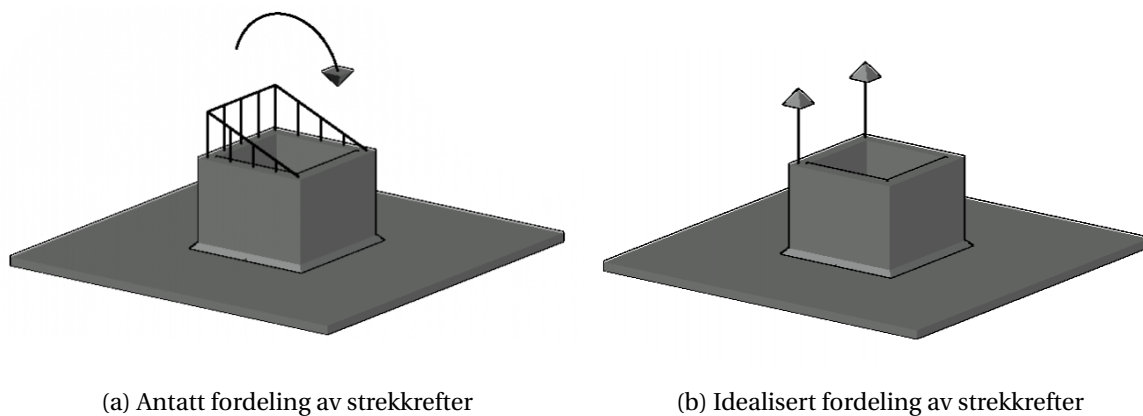
Figur 12.11: Resultater fra Abaqus-analyse med last rundt bolthull

Figur 12.12b viser beregningsmodellen som benyttes for beregning av stivhetskoeffisienten til endeplaten. Det er forutsatt at hevarmskrefter ikke opptrer da boltehullene er plassert nært endeplatens frie rand. Hevarmskrefter ville i teorien gitt en noe stivere løsning. Det antas videre at det effektive platearealet som bøyes er rektangulært, med en ukjent bredde b_{eff} . Størrelsene L_{eff} og t_{eff} er kjente.



Figur 12.12: Beregningsmodell for stivhetsbidraget til endeplaten

Videre antas det at strekkraften fra det ytre momentet i overgangen til endeplaten vil fungere som konsentrerte punktlaster i hjørnet av hulprofilet. Dette illustreres i figur 12.13. Strekkraften antas jevnt fordelt langs en innspent rand med lengde b_{eff} som vist på figur 12.12b.



Figur 12.13: Fordeling av ytre moment ved overgang endeplate-HUP

Med en påsatt forskyvning lik 2 mm beregnet Abaqus en summert, nødvendig reaksjonskraft på $10,9\text{ kN}$.

Tabell 12.8: Resultater fra lastpåføring langs boltehull

Forskyvning Δ [mm]	Nødvendig reaksjonskraft F [kN]
2	10,9

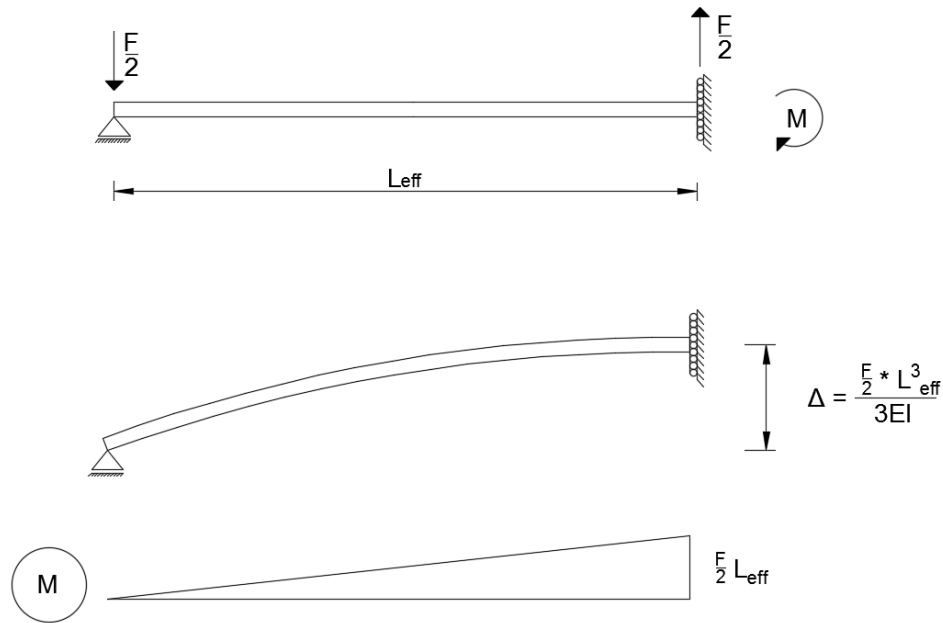
Stivhetsbidraget fra platen blir da som vist i ligning (12.10):

$$k'_{plate} = \frac{F}{\Delta} = 5450\text{ N/mm} \quad (12.10)$$

Platebøyningen bidrar med stivhet sammen med andre komponenter. Ved å se på disse stivhetene som fjærer i serie, må enhetene være like for å kunne summeres. Stivhetskoeffisientene fra Eurokoden er uttrykt i millimeter. Med like enheter kan stivhetsbidrag fra platebøyning og skruer kombineres.

$$k_{plate} = \frac{k'_{plate}}{E} = 0,02595\text{ mm} \quad (12.11)$$

For å kunne utlede det effektive platearealet som er nødvendig for å oppnå den gitte stivheten benyttes bjelkemodellen i figur 12.14. Da hevarmskreftene neglisjeres, representerer modellen et statisk bestemt system, hvor den vertikale forskyvningen er av interesse. Det teoretiske uttrykket for forskyvning som er vist på figuren og i ligning (12.12) er hentet fra formelsamlingen [12].



Figur 12.14: Bjelkemodell for beregning av stivhetskoeffisient

$$\Delta = \frac{PL}{3EI} = \frac{\frac{F}{2} \times L_{eff}^3}{3EI} \quad (12.12)$$

Plateutstikkets 2.arealmoment uttrykkes ved den effektive lengden og den effektive tykkelsen som vist i uttrykk (12.13). Innsatt i ligning (12.12) gir dette forskyvningen Δ , vist i (12.14).

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{b_{eff} \times t_{eff}^3}{12} \quad (12.13)$$

$$\Delta = \frac{2FL_{eff}^3}{Eb_{eff}t_{eff}^3} \quad (12.14)$$

Endeplatens stivhetskoeffisient finnes ved å sette $k = \frac{F}{E\Delta}$ og vises i ligning (12.15).

$$k_{plate} = \frac{b_{eff}t_{eff}^3}{2L_{eff}^3} \quad (12.15)$$

Med de kjente størrelsene L_{eff} og t_{eff} uttrykkes stivhetskoeffisienten ved den effektive bredden. Se ligning (12.16). L_{eff} er her lengden fra hulprofilhjørnet til senter av boltehullet minus $\sqrt{2} \times 0,8$ ganger sveisens a-mål.

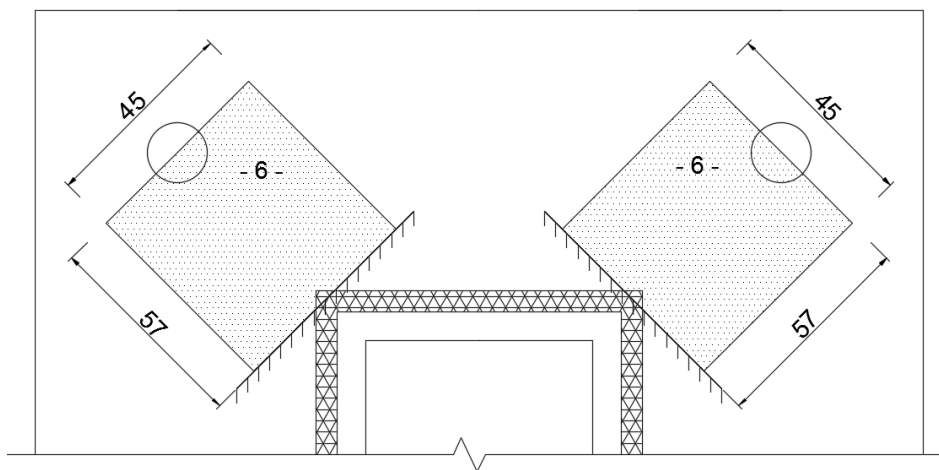
$$L_{eff} = 57\text{mm}, \quad t_{eff} = t_p = 6\text{mm}$$

$$k_{plate} = \frac{b_{eff} \times 6^3}{2 \times 57^3} = \frac{4}{6859} b_{eff} \quad (12.16)$$

Den nødvendige, effektive bredden finnes ved å sette k_{plate} lik stivhetsbidraget funnet ved Abaqus-simulering vist i ligning (12.11).

$$\frac{4}{6859} b_{eff} = 0,02595\text{mm} \Rightarrow b_{eff} \approx 45\text{mm} \quad (12.17)$$

Det ønskes å presisere at denne stivhetsmodellen kun er egnet for knutepunkt med geometri C, og kan ikke brukes som en generell modell. I figur 12.15 illustreres det effektive volumet funnet i dette kapitlet. Stivhetsbidraget fra endeplatebøyning ved hulprofilens nedre steg er ikke tatt med i betraktningen, og vil i realiteten gi en noe stivere løsning. For enkelhets skyld er kun den strekkutsatte platedelen undersøkt, som begrunnes med at dette bidraget trolig er dominerende.

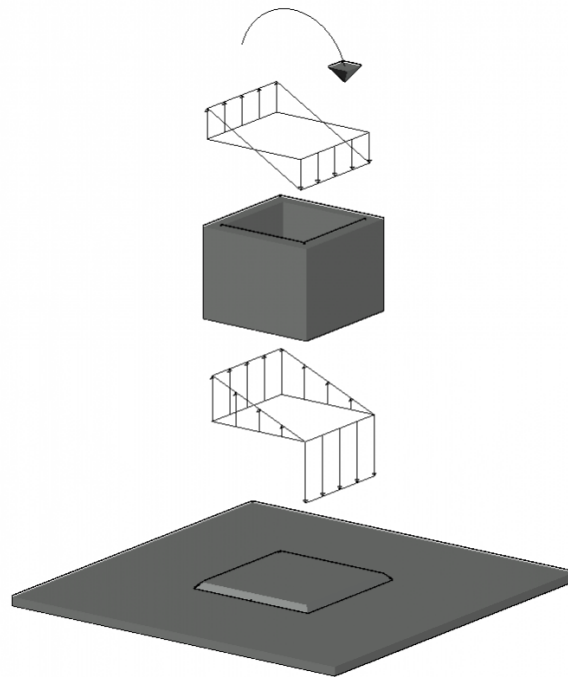


Figur 12.15: Effektive lengder på plateutstikk [mm]

12.2.2.3 Undersøkelse av antatt spenningsfordeling

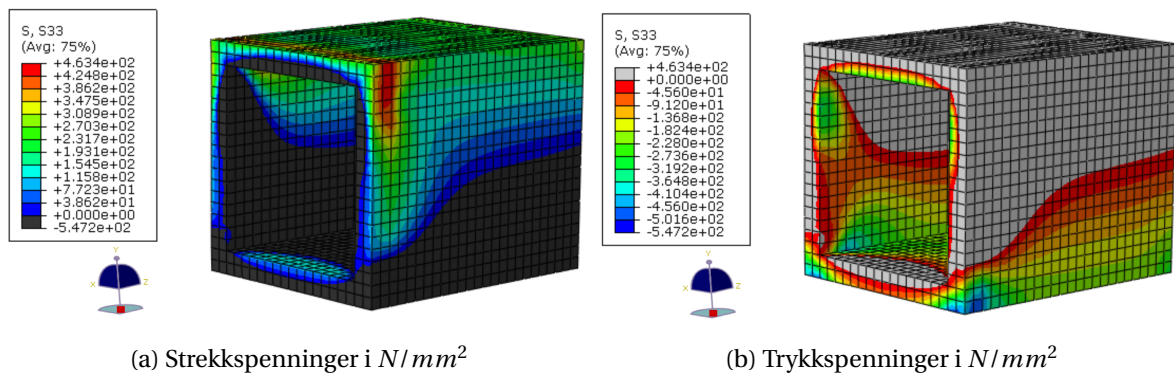
I avsnitt 12.2.2.2 ble det antatt en spenningsfordeling i overgangen mellom endeplate og hulprofil hvor strekkraftene fordeles over hulprofilens steg og øvre flens. Det antas dermed at trykkraftene kun fordeles over nedre flens. Se illustrasjon i figur 12.16. For å underbygge

denne antakelsen ble spenningsfordelingen i simuleringsmodellen fra Abaqus undersøkt. Modellen beskrevet i kapittel 14 ble benyttet.



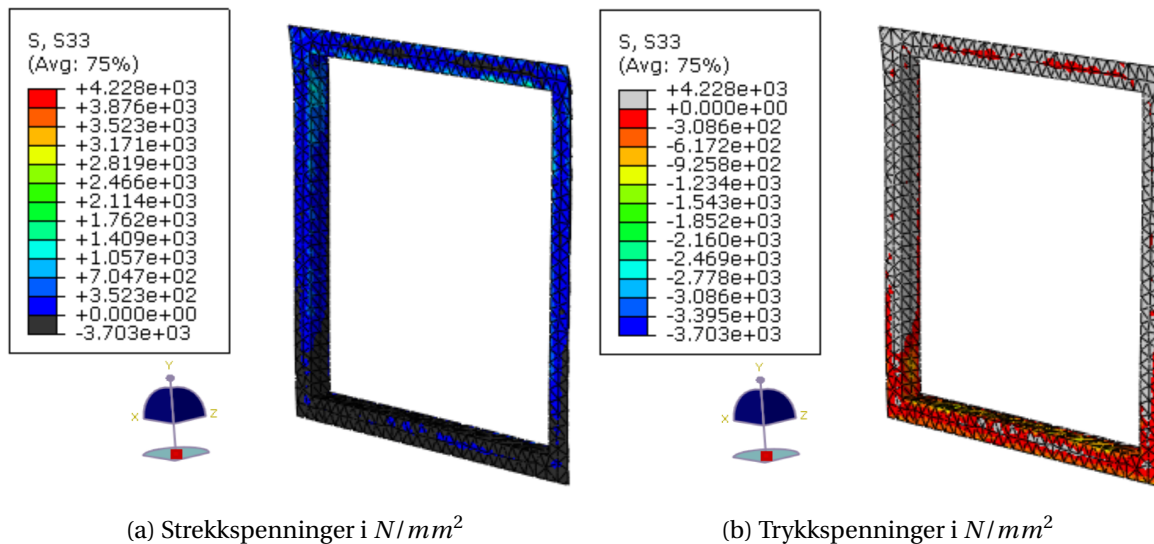
Figur 12.16: Antatt spenningsfordeling ved endeplate

På figur 12.17 ser en hvordan normalspenningene i z-retning fordeles over hulprofilet. I enden hvor ytre moment påføres (høyre side av hulprofilet på figuren) er spenningsene fordelt symmetrisk om profilets bøyningssakse (x-akse). Som forventet blir nøytralaksen forskjøvet nedover jo nærmere endeplaten en kommer. I festet mellom hulprofil og sveis ligger nøytralaksen i overgangen mellom hulprofilets steg og nedre flens.



Figur 12.17: Normalspenninger i z-retning langs hulprofilet

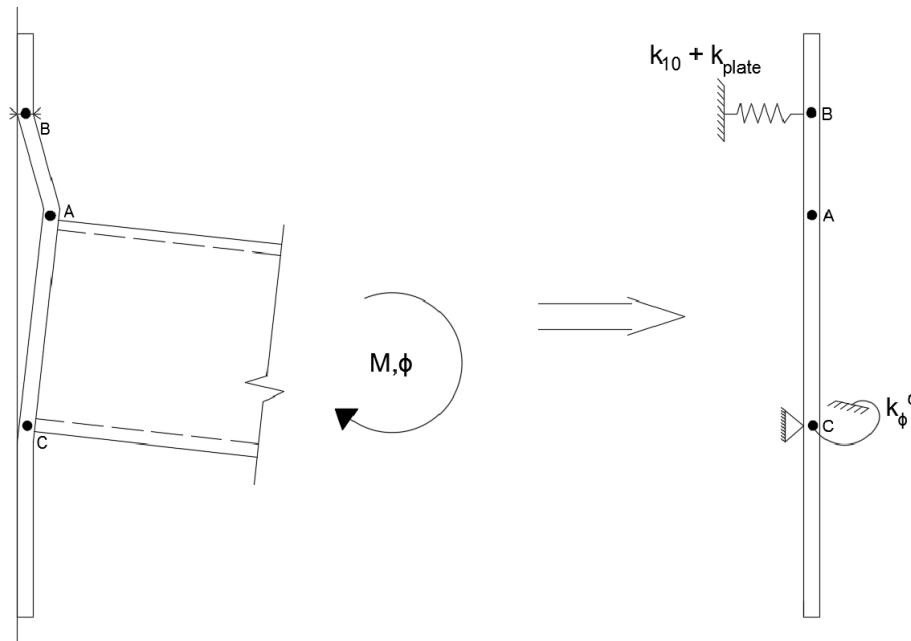
Sveisen er bindeleddet mellom hulprofil og endeplate, og overfører spenningene fra det ytre momentet til knutepunktet. I figur 12.18 ser en normalspenningene i z-retning på sveisens flate som er festet til endeplaten. Det er denne spenningsfordelingen endeplaten vil oppleve i Abaqus-modellen, som antas å være representativ for forsøket. En ser fra figuren at nøytralaksen ligger ved nedre flens, og antakelsen gjort i 12.2.2.2 bekrefte.



Figur 12.18: Normalspenninger i z-retning på underside sveis

12.2.2.4 Stivhetsmodell og initialstivhet $S_{j,ini}$

Stivhetsmodellen til knutepunkt C baseres på bidrag fra platebøyning og bolter i strekk. k_{plate} ble utledet i kapittel 12.2.2.2, mens bidraget fra boltene er forklart i 3.6. Rotasjonsfjæren k_{ϕ}^C illustrert i figur 12.19 blir ikke tatt hensyn til i beregningen av knutepunktets stivhet, men blir her vist for å synliggjøre at et stivhetsbidrag fra platebøyning i underkant av hulprofilen vil opptre. Modellen baseres på antakelsen om at k_{10} og k_{plate} virker sammen som fjærer i serie.



Figur 12.19: Stivhetsmodell

Stivhetsbidraget fra de strekkutsatte boltene hentes direkte fra knutepunktstandarden [5]. Det antas at de to boltene virker uavhengig av hverandre og stivhetskoeffisienten uttrykkes derfor med én skrue. Koeffisienten fra Eurokoden må derfor multipliseres med en faktor på 0,5.

$$k_{10} = 1,6 \frac{A_s}{L_b} \times \frac{1}{2} = 2,348 \text{ mm} \quad (12.18)$$

Som vist i figur 12.15, antas det at det er to bidragsfelt som virker parallelt. Det vil derfor utledes en initialstivhet som gjelder for ett av feltene, for deretter å kunne multiplisere dette med en faktor på to. Den totale stivhetskoeffisienten for ett felt blir:

$$k_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{k_{10}} + \frac{1}{k_{plate}}} = \frac{1}{\frac{1}{2,348} + \frac{1}{0,02595}} = 0,02567 \text{ mm} \quad (12.19)$$

Initialrotasjonsstivheten kan beregnes fra ligning (12.20). Momentarmen er valgt som avstanden fra trykksenteret i hulprofilet (inkludert sveis) og opp til senter av boltene i strekk.

$$E = 210000 \text{ N/mm}^2 \quad z = 132 \text{ mm}$$

$$S'_{j,ini,C} = k_{tot} \times E \times z^2 = 94 \text{ kNm/rad} \quad (12.20)$$

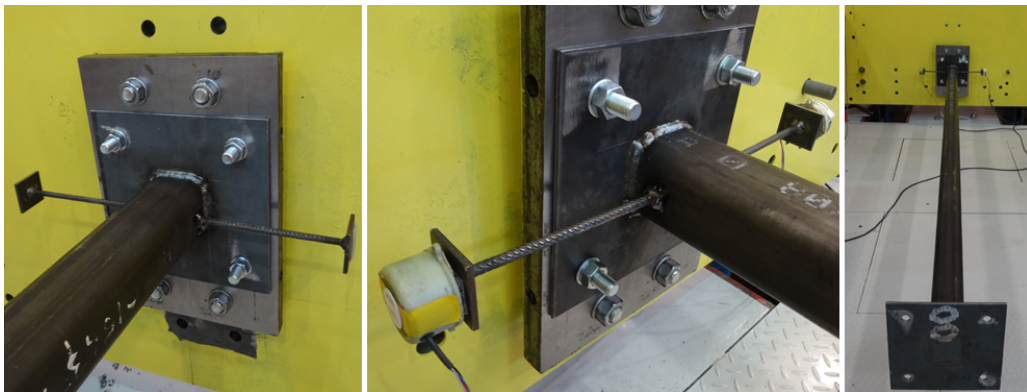
Begge bidragene bidrar med en stivhet lik $S'_{j,ini,C}$. Den totale stivheten blir da summen av disse:

$$S_{j,ini,C} = 2 \times S'_{j,ini,C} = 188 \text{ kNm/rad} \quad (12.21)$$

Initialstivheten beregnet i ligning (12.21) vil videre i rapporten betraktes som den totale initielle stivheten til forbindelsen. Den vil senere sammenlignes med initialstivheten funnet fra forsøk i laboratoriet.

12.3 Laboratorieforsøk

Laboratorieforsøkene for knutepunkt C gjennomføres på samme måte som for knutepunkt A og B. Prøvestykket boltes fast i en 30 mm tykk plate og punktlastes på enden. Rotasjonsmålere festes på og logger rotasjonen av knutepunktet. Underveis måles også nedbøyning av bjelkens ende. Da knutepunkt C er symmetrisk og ikke har en sterk eller en svak akse, bøyes endeplaten kun om én akse. Knutepunkt C undersøkes med endeplate av både WELDOX 700- og S355-stål. For laboratorieoppsett, utstyr og utførelse, se kapittel 5. I figur 12.20 vises knutepunkt C før belastning.



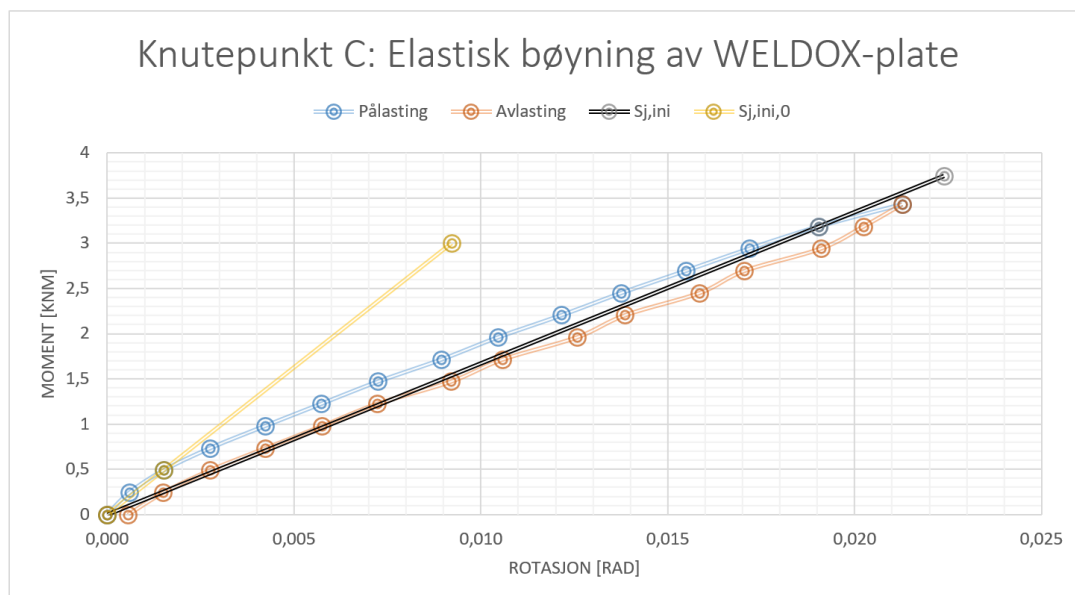
Figur 12.20: Laboratorieoppsett

12.3.1 Knutepunkt med endeplate av WELDOX 700

12.3.1.1 Undersøkelse av elastisk oppførsel

I laboratoriet utføres det fem elastiske forsøksserier. For å være sikker på ikke å påføre knutepunktet plastiske deformasjoner, belastes bjelken maksimalt med en last tilsvarende en tredjedel av den beregnede plastiske kapasiteten ($\approx 140\text{kg}$). Figur 12.21 viser en midlet graf av de elastiske forsøksseriene vist i vedlegg E. Ved å betrakte målepunktene på grafens pålastningsserie, før det tilsynelatende skjer en plastisk deformasjon, finnes et felles stigningstall representert ved en sort linje. Rotasjonsmålingene og nedbøyningsavlesningene viser at plastisk oppførsel inntreffer ved et moment på omtrent $3,4\text{kNm}$. Dette representerer prøvestykkets initielle stivhet og tallfestes i ligning (12.22). I likhet med knutepunkt A og B illustreres $S_{j,ini,0}$ i figuren under. Den tar kun med de første målepunktene og har en verdi på $325,8\text{kNm/rad}$. Som diskutert i 9.1.2 anses ikke denne stivheten som representativ. For sammenligninger av initialstivheter senere i rapporten vil dermed $S_{j,ini}$ benyttes.

$$S_{j,ini,C} = 167,4\text{kNm/rad} \quad (12.22)$$



Figur 12.21: Initialstivhet til knutepunkt C med WELDOX-endeplate

Maksimallasten hver forsøksserie belastes med økes med et intervall på 20kg. Da fem serier var ønsket, med en maksbelastning på 140kg i den avsluttende serien, ble maskbelastning per serie som vist i tabellen under.

Tabell 12.9: Maksimal belastning for hver forsøksserie - C, WELDOX 700

Serie	1	2	3	4	5
Belastning [kg]	60	80	100	120	140
Moment [kNm]	1,47	1,96	2,45	2,94	3,43

Kontroll ved måling av nedbøyning

Nedbøyningskontroll utføres som for knutepunkt A og B, se 7.3.1.1. Første referanseshøyde fra gulvet til toppen av prøvestykket på utkragerenden måles til 686mm. Nedbøyningskontrollen gjenspeiler de enkelte forsøksserienes oppførsel da referanseshøyden justeres mellom hver serie. Kontrollen oppsummeres i tabell 12.10. De fire første forsøksseriene oppførte seg tilnærmet perfekt elastisk, mens noe større avvik ble registrert ved forsøksserie fem. Dette indikerer at en form for plastisk deformasjon skjer ved et moment på omtrent 3,4kNm.

Tabell 12.10: Nedbøyningskontroll - C, WELDOX 700

Serie	Elastisk					Plastisk
	1	2	3	4	5	6
Avvik [mm]	1	0	1	1	5	189

12.3.1.2 Undersøkelse av plastisk oppførsel

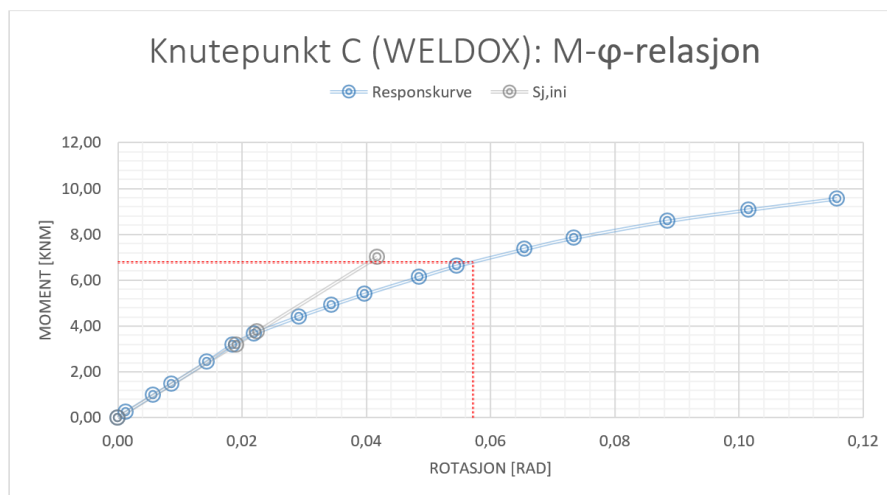
Som utdypet i 5.5.2 utføres én belastningsserie i det plastiske området. Knutepunktets responskurve med plastisk momentkapasitet ($M_{j,Rd}$) og initiell rotasjonsstivhet $S_{j,ini}$ presenteres og fremstilles grafisk i figur 12.22.

For å sikre en representativ responskurve ble prøvestykket festet ca. 12cm høyere enn for de øvrige prøvestykkene. Dette for at utkragerenden ikke skulle nå gulvet før tydelig plastisk deformasjon hadde inntruffet. Forsøksgeometrien blir stegvis belastet opp til en maksimal

punktlast på 390 kg som tilsvarer et moment på $9,6\text{ kNm}$ med en momentarmen på $2,5\text{ m}$. Pålastingen ble her avsluttet da vektene viste tegn til å skli, og stegvis avlastning ble gjennomført.

Responskurven er illustrert i figur 12.22. Momentkapasiteten uttrykkes i (12.23), og er grafisk illustrert ved en rød, stiplet linje. Momentkapaisteten er som for knutepunkt A og B definert som momentet som opptrer når rotasjonen er tre ganger den elastiske rotasjonen. Se kapittel 9.1.3 for diskusjon av dette valget. Uttrykk (12.22) gir $S_{j,ini,C}$ som er illustrert i figuren under. Det observeres at valgt initiell rotasjonsstivhet representerer stigningen i det elastiske området på en god måte.

$$M_{j,Rd,C} = 6,8\text{ kNm} \quad (12.23)$$



Figur 12.22: Moment-rotasjon-relasjon for knutepunkt C med WELDOX-plate

12.3.2 Knutepunkt med endeplate av S355

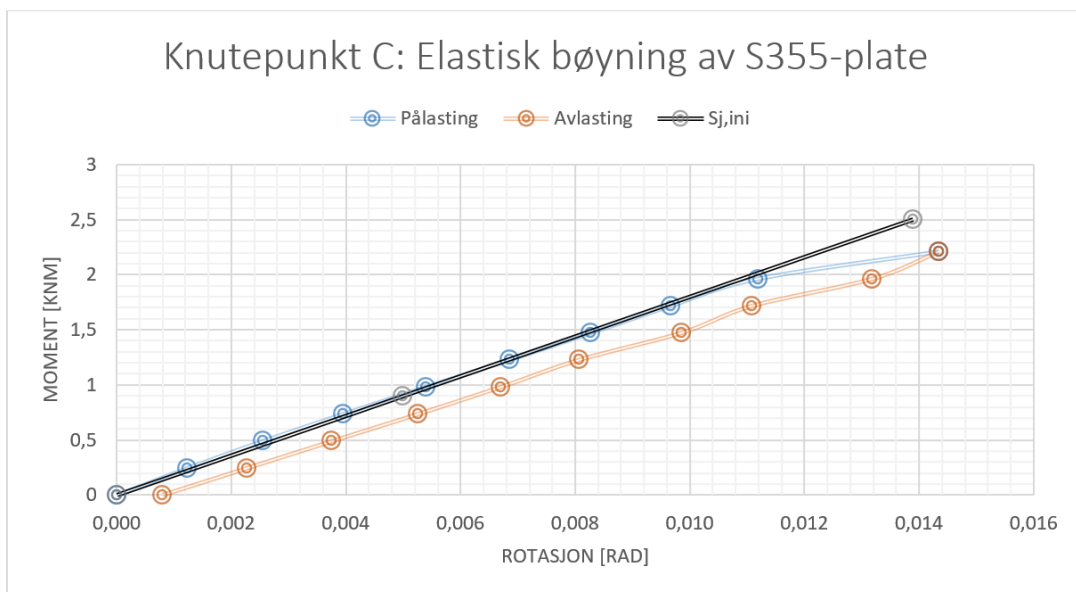
12.3.2.1 Undersøkelse av elastisk oppførsel

Det utføres fem elastiske serier for bøyning av knutepunkt C med endeplate av S355. Den maksimale belastningen for hver serie vises i tabell 12.11. Da de to første forsøksseriene ga resultater som ikke gjenspeilte en lineær oppførsel, se vedlegg E.5, ble de to påfølgende seriene belastet med lik makslast (henholdsvis 60 og 80 kg). Da disse seriene ga lineære moment-rotasjon-kurver ble det konkludert med at de første, ujevne på- og avlastingene ikke representerte den initielle stivheten som er interessant i dette forsøket. Årsaken til den ikke-

lineære oppførselen kan for eksempel skyldes en liten, lokal plastisk deformasjon, knusing av glødeskall og forflytning av kontaktpunkter. De to første seriene anses derfor som to initielle pålastinger for å mosjonere prøvestykket, og blir ikke tatt med i betraktningen av initialstivheten til knutepunktet. Den initielle stivheten i ligning (12.24) og den midlede grafen i figur 12.23 tar dermed kun utgangspunkt i forsøksserie tre til fem.

I motsetning til forsøkene gjort med endeplater av WELDOX 700 blir det ikke observert en signifikant stivere oppførsel i starten av forsøkene. Dette er grunnen til at $S_{j,ini,0}$ ikke vises i dette avsnittet, og kommenteres i kapittel 13.4.

$$S_{j,ini,C} = 180,0 \text{ kNm/rad} \quad (12.24)$$



Figur 12.23: Initialstivhet til knutepunkt C med S355-endeplate

Tabell 12.11: Maksimal belastning for hver forsøksserie - C, S355

Serie	1	2	3	4	5
Belastning [kg]	60	80	60	80	90
Moment [kNm]	1,47	1,96	1,47	1,96	2,21

Kontroll ved måling av nedbøyning

Som tabell 12.12 viser ble det registrert store måleravvik fra referansehøyden i serie 1 og 2. Resultatene gjenspeiler hva som ble observert fra rotasjonsmålingene. Da referansehøyden justeres etter hver serie konkluderes det med at en tilnærmet lineær oppførsel ble observert for serie 3 og 4 da avviket er null. En liten plastisk deformasjon ble registrert i serie 5, ved en belastning på 80 – 90 kg. Hvis en ser bort fra serie 1 og 2 indikerer dette at plastisk oppførsel opptrer ved et moment på omtrent 2,0 kNm.

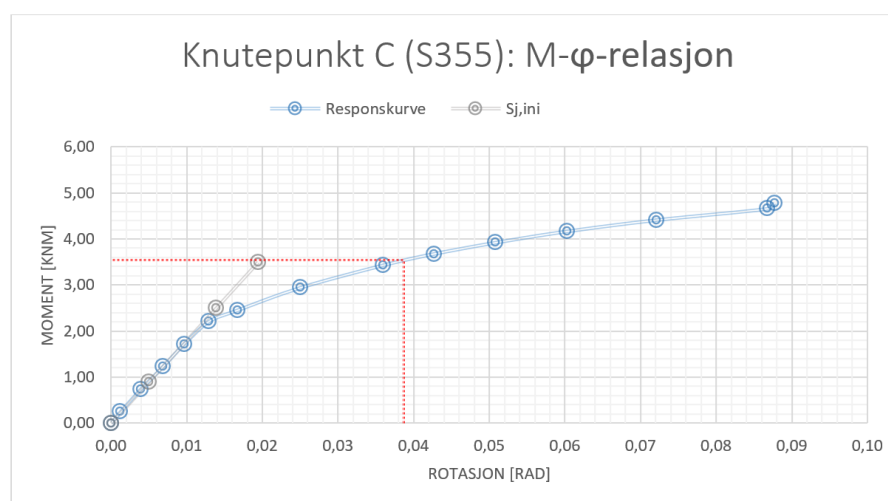
Tabell 12.12: Nedbøyningskontroll - C, S355

Serie	Elastisk					Plastisk
	1	2	3	4	5	6
Avvik [mm]	10	9	0	0	6	176

12.3.2.2 Undersøkelse av plastisk oppførsel

Én plastisk forsøksserie gjennomføres og avsluttes når utkragerenden tar ned i gulvet. Figur 12.24 viser responskurven med tilhørende initialstivhet fra ligning (12.24). Momentkapasiteten presentert i uttrykk (12.25) illustreres på figuren, og finnes på samme måte som for de øvrige prøvestykkene.

$$M_{j,Rd,C} = 3,6 \text{ kNm} \quad (12.25)$$



Figur 12.24: Moment-rotasjon-relasjon for knutepunkt C med S355-plate

12.4 Sammenligning av håndberegninger mot laboratorieresultater

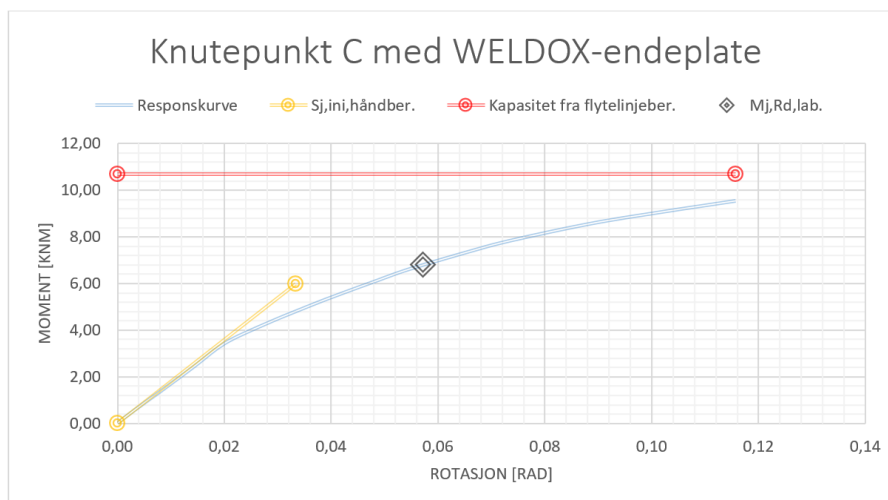
I dette kapitlet sammenlignes de analytiske resultatene beregnet med ny stivhetsmodell og flytelinjeteori med laboratorieresultater. Tabeller og grafer baseres på beregninger gjort med reelle, oppmålte størrelser. Kapasitetsverdiene avviker dermed noe fra nominelle beregninger da endeplatenes flytespenning endres etter resultater fra strekktester.

12.4.1 Endeplate av WELDOX 700

Tabell 12.13 oppsummerer resultatene tolket fra bøyningforsøk av knutepunkt C med WELDOX-plate. Håndberegningsverdiene er også inkludert. Som tabellen viser gir stivhetsmodellen en initialstivhet som stemmer godt overens med forsøksresultatene. Kapasiteten fra forsøket er 64% av beregnet kapasitet fra flytelinjeteori. Figur 12.25 viser responskurve fra forsøksdata mot håndberegnete verdier.

Tabell 12.13: Knutepunkt C - WELDOX 700

	$S_{j,ini,C}$ [kNm/rad]	$M_{j,Rd}$ [kNm]
Håndberegning	188,0	10,7
Forsøksresultater	167,4	6,8



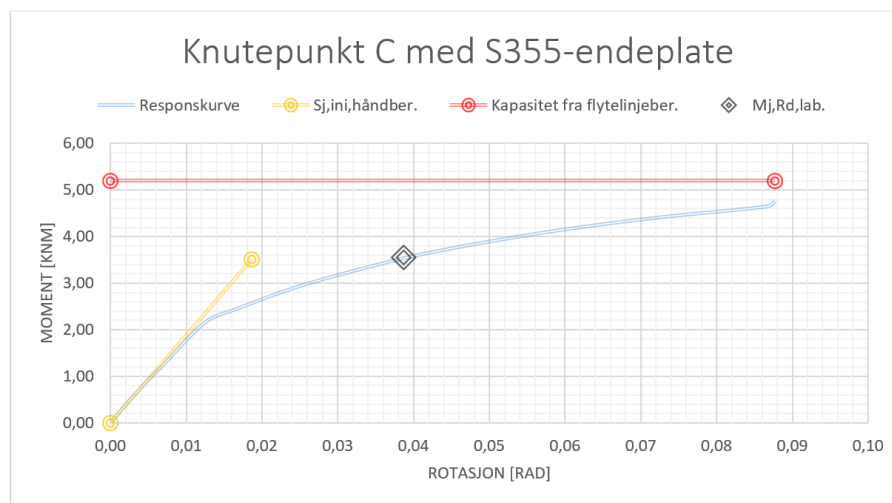
Figur 12.25: Knutepunkt C - WELDOX 700: Sammenligning av håndberegninger mot responskurve fra forsøk

12.4.2 Endeplate av S355

For bøyning av knutepunkt C med endeplate av S355-stål vises resultatene fra forsøk og håndberegning i tabell 12.14. Som for WELDOX-platen ser stivhetsmodellen ut til å stemme bra. Den håndberegnete initialstivheten avviker med bare 4% fra forsøksresultatet. Kapasiteten er derimot beregnet til å være en del høyere enn hva laboratorieforsøket viste. Kapasiteten fra forsøket er 69% av beregnet kapasitet fra flytelinjeteori, noe som betyr at håndberegningen overestimerer knutepunktets kapasitet. Under vises resultatene grafisk i figur 12.26.

Tabell 12.14: Knutepunkt C - S355

	$S_{j,ini,C}$ [kNm/rad]	$M_{j,Rd}$ [kNm]
Håndberegning	188,0	5,2
Forsøksresultater	180,0	3,6



Figur 12.26: Knutepunkt C - S355: Sammenligning av håndberegninger mot responskurve fra forsøk

13. Diskusjon av resultater - knutepunkt C

I dette kapitlet diskuteres resultatene knyttet til bøyning av prøvestykkene med geometri C. Knutepunkt C som søylefot klassifiseres, momentkapasiteter diskuteres og kapitlet avsluttes med en konklusjon om sammenhengen mellom teoretiske beregninger, forsøk i laboratoriet og numerisk analyse. Valg av initiell rotasjonsstivhet og måte å bestemme momentkapasitet på, er gjort som for knutepunkt A og B i henholdsvis kapittel 9.1.2 og 9.1.3 og kommenteres ikke her.

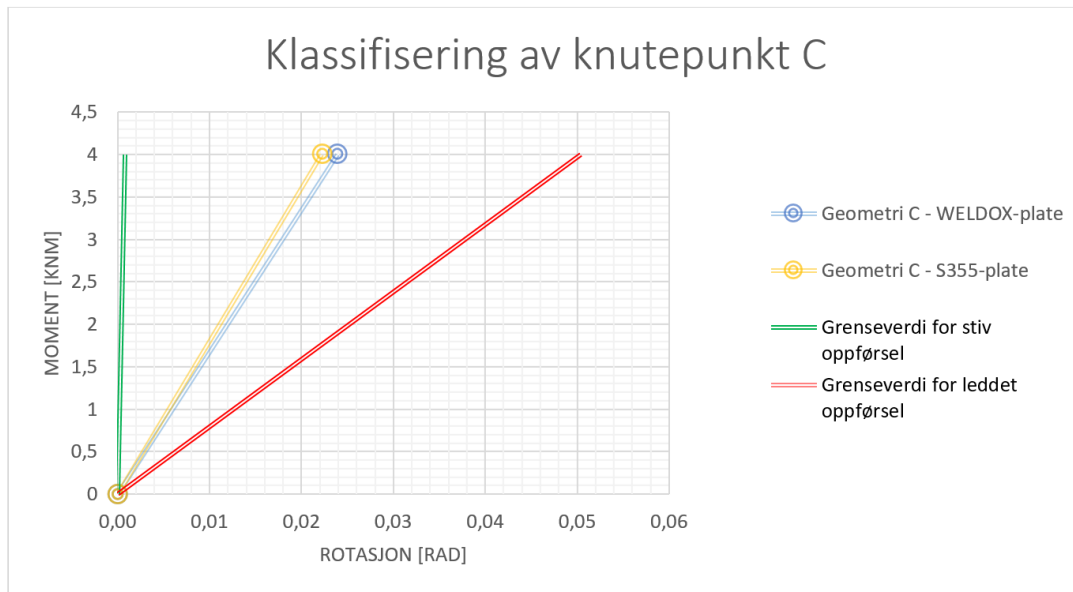
13.1 Klassifisering av søylefot

Som nevnt i avsnitt 3.2.1.1 klassifiserer Eurokoden en søylefot med endeplate som enten stiv eller delvis stiv. Samme fremgangsmåte som i kapittel 9.1.1 brukes til klassifisering. Under gjengir ligning (13.1) Eurokodens krav for betraktning av stive søyleføtter, mens ligning (13.2) viser utledet formel for leddet oppførsel.

$$S_{j,ini} \geq \frac{30EI_c}{L_c} = 30 \times \frac{210000 \times 1,89 \times 10^6}{2500} = 4762,8 \frac{kNm}{rad} \quad (13.1)$$

$$S_{j,ini} \leq \frac{0,5EI_c}{L_c} = 0,5 \times \frac{210000 \times 1,16 \times 10^6}{2500} = 79,4 \frac{kNm}{rad} \quad (13.2)$$

Figur 13.1 illustrerer klassifiseringen av søyleføttene, og viser initialstivhetene funnet fra forsøk opp mot beregnede grenseverdier. Det fremgår tydelig at knutepunkt C har en delvis stiv oppførsel. Dette understøtter påstanden om at søyleføtter enten er stive eller delvis stive, og ikke leddet.



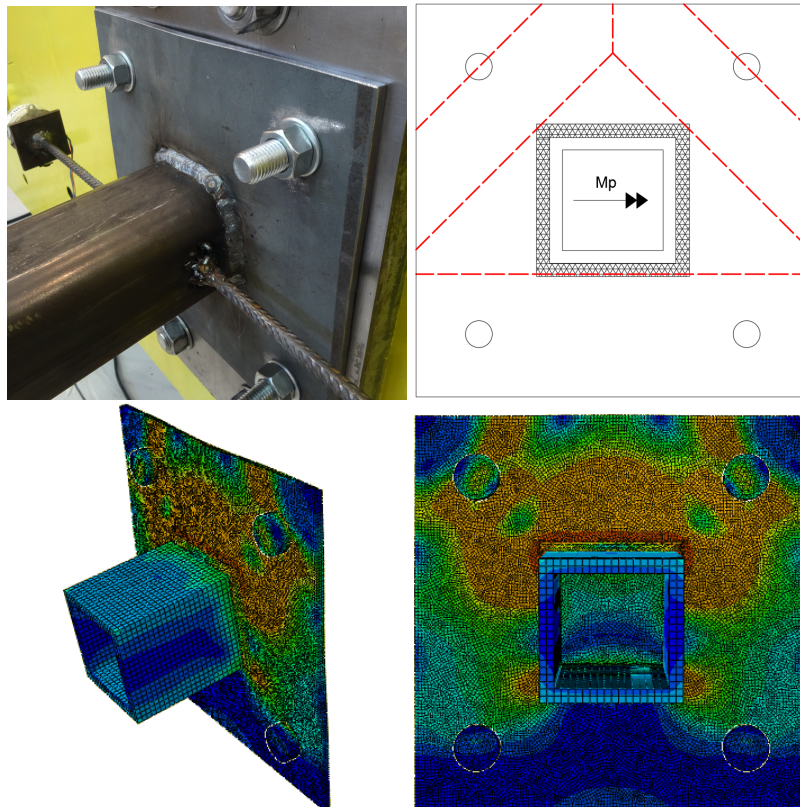
Figur 13.1: Klassifisering av knutepunkt C

13.2 Beregning av momentkapasitet

Momentkapasiteten funnet fra laboratoriet og fra håndberegning har et relativt stort avvik. Dette kan ha flere årsaker. Grunnet store avstander mellom boltene, og mellom bolter og hulprofil, er det ikke sikkert at de antatte flytemekanismene stemmer særlig godt med virkeligheten. Fra Abaqus-simulering og laboratorieforsøk observeres det, særlig i overkant av hulprofilet, at deformasjonene i platen ikke opptrer som rette flytelinjer alene. I tillegg opplever platen store områder med spenninger som ikke ser ut som linjer. I dette området blir endeplaten bøyd om flere akser og en utbuling forekommer. En slik oppførsel gjør det vanskeligere å beskrive flytemønsteret med rette linjer som forsøkt i kapittel 12.

De ulike flytelinjemønstrene gir store forskjeller i beregnet momentkapasitet. Den minste, og dermed den beregningsmessige dimensjonerende mekanismen, forekommer delvis under forsøk i laboratoriet. Enkelte av linjene som er antatt lar seg kjenne igjen, men deler av platen deformeres på en annen måte. Noe av grunnen til dette resultatet, kan være at platen er for tykk og for lite duktil. Flytelinjer opptrer tydeligst i tilfeller hvor man har tynne, duktile plater.

I figur 13.2 vises knutepunktet med WELDOX-plate på fire ulike bilder. Ett fra endt forsøk i laboratoriet, to spenningsplot fra elementprogrammet Abaqus og ett som viser flytelinjer i endeplaten som her gir den laveste kapasiteten.



Figur 13.2: Knutepunkt C vist fra laboratoriet, flytelinjetegning og Abaqus-plot

Bildene avslører at flytelinjemønsteret med den beregningsmessige laveste kapasiteten har enkelte linjer som direkte kjennes igjen fra spenningsplot og fra laboratorieforsøk, men også områder som ikke stemmer overens. Dette kan skyldes at valgt flytelinjemønster ikke er det som gir lavest kapasitet, eller at bruddformen vanskelig lar seg beskrive med flytelinjer. Begge årsaker synes plausible. Selv om ikke alle flytelinjer gjenkjennes fra konturplot og bøyning i laboratoriet, er det likevel sannsynlig at bruddmønsteret som er foreslått inneholder flere av de korrekte flytelinjene, og denne mekanismen brukes som om det er den korrekte i denne oppgaven.

13.3 Stivhetsmodell for håndberegning

I kapittel 12.2.2 ble det utarbeidet en modell for å beregne initialstivheten til knutepunkt C. Platens stivhetsbidrag ble funnet ved bruk av numeriske analyser og utgjorde, sammen med boltebidragene, den initielle stivheten. Det ble gjort flere forenklinger og antakelser som skiller det opprinnelige knutepunktet fra modellen.

Det ble antatt at de øvre plateutstikkene oppføres som utkragerer fra hulprofilhjørnet ut mot strekkboltene (se figur 12.12). Fra spenningsplottet observeres det at denne antakelsen, med et rektangulært effektivt plateareal, er en forenkling. Å velge en innspenningsrand som er rett, er heller ikke helt korrekt da hulprofilet har et hjørne. Hulprofilets hjørne vil bidra med stor stivhet. Hvor stor utstrekning en kan anta fast innspenning ut fra hulprofilhjørnet, kan diskuteres. Her antas det like fullt fast innspenning over den nødvendige bredden.

For å finne platestivhetskoeffisienten fra en utkragermodell som forklart over, kreves det en konsentrert strekkraft i hulprofilhjørnet. Selv om den antatte spenningsfordelingen i overgang HUP-endeplate ble funnet gyldig i kapittel 12.2.2.3 forblir omgjøringen til konsentrerte hjørnekrefter en forenkling som medfører usikkerhet.

Da håndberegnet initialstivhet baseres på en forenklet numerisk modell, er det interessant å se den i sammenheng med initialstivheten til den fullstendige Abaqus-modellen. Den initielle stivheten til knutepunkt C fra en fullstendig numerisk analyse presenteres i kapittel 14.4.2. En oppsummering av resultatene vises i tabell 13.1. Den fullstendige modellen er ikke overraskende en del stivere enn håndberegningssmodellen. Dette skyldes hovedsakelig forenklinger og neglisjerte stivhetsbidrag. Et eksempel på bidrag som ikke tas med i modellen er platebøyning i underkant av hulprofilet.

Tabell 13.1: Sammenligning av antatt stivhetsmodell og fullstendig Abaqus-simulering

Modell	Stålkvalitet	Initialstivhet [kNm/rad]
Håndberegning	-	188,0
Abaqus-simulering	WELDOX 700	243,0
	S355	257,4

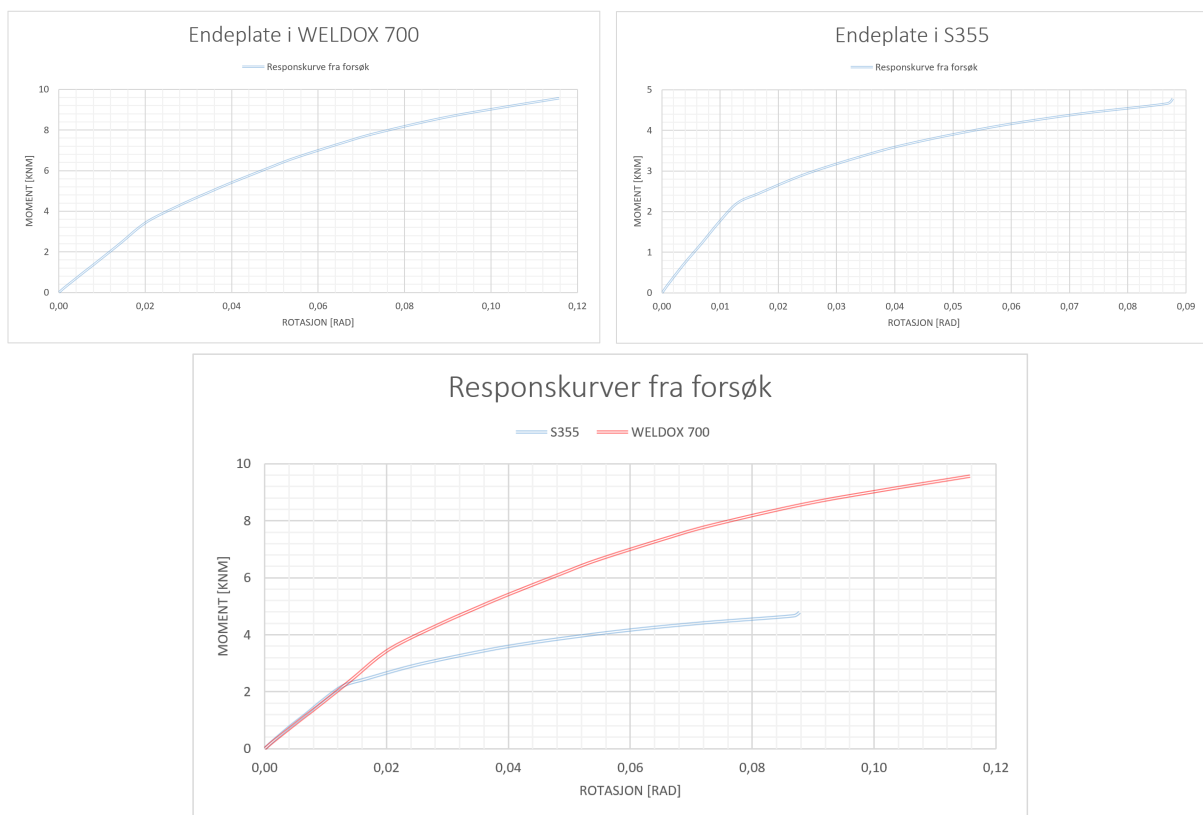
13.4 Sammenligning av resultater for endeplate av WELDOX 700 og S355

Knutepunkt med geometri C ble undersøkt med endeplate i stålkvalitet WELDOX 700 og S355. I dette kapitlet sammenlignes håndberegninger og forsøksresultater for å vise hvordan

stålets strekkfasthet spiller inn på stivheten og kapasiteten til knutepunktet. Hvis en ser bort fra mindre geometriske avvik er det kun endeplatetykkelsen og stålets flytespenning som skiller prøvestykkene. S355-prøvestykket har en $6,0\text{mm}$ tykk endeplate med flytespenning på 410MPa . WELDOX-platen ble målt til $6,1\text{mm}$ med en flytespenning på 820MPa .

13.4.1 Stivhet

Figur 13.3 benyttes for grafisk å sammenligne stivhetskurene fått fra laboratorieforsøk av knutepunkt C.



Figur 13.3: Sammenligning av responskurver

Linjene følger hverandre til et moment på rett over 2kNm hvor S355-endeplaten opplever flytning. Dette betyr at den initielle stivheten er tilnærmet identisk for de to prøvestykkene. Initialstivhetene presentert i kapittel 12.4 er oppsummert i tabell 13.2. Den håndberegnete stivheten baseres på Abaqus-simuleringer hvor endeplatetykkelsen er $6,0\text{mm}$. En forskjell på oppmålt endeplatetykkelse på $0,1\text{mm}$ vil derfor neglisjeres og det antas at begge knutepunktene har lik initiell stivhet.

Tabell 13.2: Sammenligning av stivhet fra antatt stivhetsmodell og forsøk

Modell	Stålkvalitet	Initialstivhet [kNm/rad]
Håndberegning	-	188,0
Forsøk	WELDOX 700	167,4
	S355	180,0

Som figuren antyder har begge endeplatene et merkbart skille mellom elastisk og plastisk oppførsel. Overgangen er tydeligere for platen med S355-stål. Det plastiske området på stivhetskurvene er mer ulikt for de to forbindelsene. Kurven for endeplaten med S355-stål flater raskt ut, mens WELDOX-platen har en brattere helning. Stivheten avtar altså her raskere for vanlig konstruksjonsstål sammenlignet med WELDOX 700 etter at flytning oppstår.

13.4.2 Kapasitet

I tabell 13.3 vises de målte momentkapasiteten fra laboratoriet og tilhørende platetykkelser og flytespenning. Den teoretiske momentkapasiteten til en plate kan regnes ut med formelen under, hentet fra knutepunktstandard [5]. Det kunne vært aktuelt å bruke uttrykkene for momentkapasitet beregnet fra flytelinjer i kapittel 12.2, men resultatet ville blitt det samme.

$$M_p = 0,25 \frac{\sum l_{eff} t_p^2 f_y}{\gamma_{M0}} \quad (13.3)$$

Tabell 13.3: Kapasitetsforskjell mellom WELDOX 700 og S355

Stålkvalitet	Momentkapasitet	Platetykkelse	Flytespenning
WELDOX 700	6,8kNm	6,1mm	820MPa
S355	3,6kNm	6,0mm	410MPa
S355/WELDOX 700	0,529	0,984	0,5

Det teoretiske uttrykket for kapasiteten til de to endeplatene er like. De to variablene som skiller momentkapasitetene fra hverandre er stålets reelle flytespenning og platens tykkelse

kvadrert. Ligning (13.4) viser en måte å finne det teoretiske forholdstallet mellom momentkapasiteten for de to endeplatene. Dersom platetykkelsen hadde vært lik for de to platene ville forholdet mellom kapasitetene kun vært avhengig av flytespenning, og i dette tilfellet vært 0,5.

$$\frac{M_{p,S355}}{M_{p,WELDOX}} = \frac{f_{y,S355}}{f_{y,WELDOX}} \times \frac{t_{p,S355}^2}{t_{p,WELDOX}^2} = 0,5 \times 0,984^2 = 0,484 \quad (13.4)$$

Teoretisk sett skulle kapasiteten til endeplaten med S355-stål være 48,4% av momentkapasiteten til endeplaten med WELDOX 700-stål. Forholdet mellom kapasiteten beregnet ut fra flytelinjer med reelle verdier gir samme verdi. Realiteten viser at forholdet er 52,9%. Selv med det lille avviket, vurderes forholdet til å være omtrent 1 : 1 mellom momentkapasitet og flytespenning. Altså en tilnærmet lineær sammenheng for dette knutepunktet.

13.5 Oppsummering

Ved bruk av klassifiseringsregler fra knutepunktstandarden [5], bestemmes knutepunkt C til å være delvis stiv. Avstanden til grenesene for *stiv* og *leddet* er relativt stor. Dette resultatet bygger opp under argumentet om at det ikke er behov for en grenseverdi for leddete søyleføtter.

Da det er relativt stort avvik mellom håndberegnet momentkapasitet og momentkapasitet funnet fra laboratorieforsøk, er det forsøkt å forklare mulige årsaker til dette.

- Feil flytelinjemekanisme er valgt. Det er her regnet kapasitet ut i fra tre ulike flytelinjemekanismer. Det er usikkert om det er den valgte mekanismen som gir lavest momentkapasitet. Flere mekanismer som ikke er omtalt her kan kanskje forekomme.
- Vanskelig å finne den nøyaktige flytelinjemodellen. Visuell kontroll av laboratorieresultater og spenningsplot fra elementprogrammet Abaqus avslører platens oppførsel etter pålasting. Store felter med spenninger og få enkle identifiserbare flytelinjer gjør det vanskelig å finne en korrekt flytelinjemodell. Flytelinjer fremtrer tydeligst i tynne, duktile plater. Med en tynnere og mer duktil endeplate ville det kanskje vært enklere å identifisere rette flytelinjer.

En egen håndberegningsmodell er laget for å beregne initialstivheten til knutepunkt C. Denne modellen består av to stivhetsbidrag, ett fra boltene og ett fra endeplaten. Platens stivhetsbi-

drag finnes ved å lage en forenklet utkragermodell av delene av platen som bidrar med mest stivhet og å sammenligne dette med den totale modellens oppførsel.

Håndberegningssmodellen gir en mykere knutepunktsoppførsel enn simuleringer ved element-analyser. Analysen i programmet Abaqus gir en fullstendig representasjon av knutepunktet og tar med alle stivhetsbidrag. Håndberegningssmodellen tar kun med to bidrag, og inneholder flere forenklinger. At håndberegningssmodellen gir en mykere løsning enn den fullstendige Abaqus-modellen, er derfor ikke uventet. Forholdet mellom Abaqus-simulering og håndberegning er 1,37 og 1,29 for henholdsvis S355 og WELDOX 700. Ved å sammenligne initiell stivhet fra håndberegninger og initiell stivhet funnet fra laboratorieforsøk, synes resultatene gode, både for WELDOX 700 og S355. Forholdet mellom forsøk og håndberegning er 0,96 og 0,89 for henholdsvis S355 og WELDOX 700.

De to prøvestykkene med geometri C, har identisk oppførsel ved liten belastning. Ved større belastning skifter stivhetskurene karakter og viker fra hverandre. Kurvene for stivhet er overlappende for rotasjon opp til omtrent $0,016 \text{ rad}$. Etter dette punktet avtar stivheten til knutepunktet med endeplate av S355 raskt. Knutepunktet med endeplate i WELDOX 700 har et litt større område hvor initialstivheten er gjeldene, omtrent til rotasjonen er $0,020 \text{ rad}$. Etter dette punktet avtar stivheten, men med en lavere rate enn for S355-endeplaten. At stivheten avtar raskere for endeplaten med S355-stål enn for WELDOX 700 er rimelig da belastningen mye raskere nærmer seg momentkapasiteten til endeplaten. For denne geometrien er altså initialstivheten for de to ståltypene lik, men stivheten ved større belastninger er ulik.

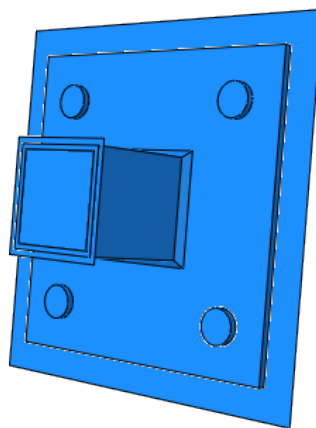
Teoretisk sett vil en økning i flytespenning resultere i en like stor økning i kapasitet. De to endeplatene testet her har ulik flytespenning og følgelig ulik kapasitet. Ved å ta hensyn til ulik platetykkelse og flytespenning kontrolleres det om knutepunktet kan følge denne teoretiske sammenhengen. Forholdet mellom endeplaten i S355 og i WELDOX 700 fra laboratoriet er 52,9%, men det teoretiske forholdet er beregnet til å være 48,4%. Dette avslører at dette knutepunktet har en tilnærmet lineær sammenheng mellom endeplaten momentkapasitet og flytespenning.

14. Numerisk analyse - knutepunkt C

I dette kapittelet presenteres numeriske analyser av knutepunkt C. Det redegjøres for hvordan modellen er bygget opp, valg av elementer, elementinndeling og andre valg som er gjort underveis. Resultatene fra analysene presenteres mot slutten av kapittelet.

14.1 Modellen

Modellen som utarbeides i Abaqus, lages på samme måte som for modellene brukt i de numeriske analysene av knutepunkt A og B. Som nevnt i kapittel 10 er det tidligere laget lignende modeller, og disse er brukt som utgangspunkt for modellene i denne analysen. Modellen laget av Bringsvor [3] er særlig benyttet som inspirasjon.



Figur 14.1: Modell for knutepunkt C

Modellen vist i figur 14.1 representerer knutepunkt med geometri C med nominelle verdier, som betyr endeplatedimensjon $250 \times 250 \times 6\text{mm}$, hulprofilens dimensjon $80 \times 80 \times 8\text{mm}$ og sveis med a-mål 6mm . Resterende dimensjoner og avstander finnes i figur 12.1. Analysemetoden benyttet i Abaqus er *static, general* og ikke-lineær geometri er skrudd på.

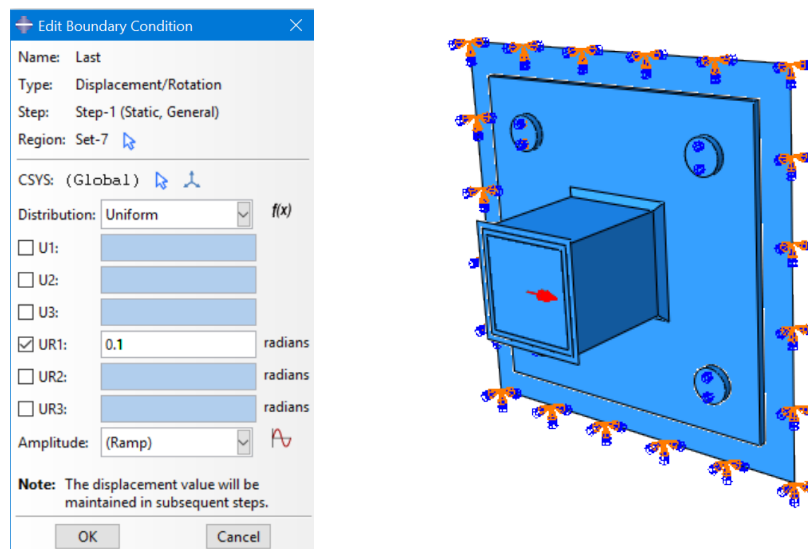
Da boltene har diameter lik 16mm og hullene i endeplate diameter lik 17mm plasseres boltene inntil øvre del av hullet. Dette gjøres da tidligere modeller har hatt problemer med å kjøre analysen grunnet manglende initiell kontakt mellom bolter og endeplate.

Til å modellere den stive bakplaten benyttes en *discrete rigid*-plate av typen *shell element*. Denne platen låses mot translasjon og rotasjon i alle retninger og tilsvarer en uendelig stiv plate. Boltene gis også en randbetingelse ved at de låses mot translasjon og rotasjon ved den stive bakplaten.

Boltene i modellen lages med form som en sylinder både for skaftet og for hodet, altså uten normalt bolthode og gjenger. Det tas ikke hensyn til forspenningskraft i boltene, selv om boltene festes med tiltrekningsmoment på 80Nm . Boltene modelleres med skaftlengde lik endeplaten og festes mot den stive bakplaten. Boltenes lengde er da en del kortere enn i virkeligheten. Hulprofilet modelleres forenklet som et kvadratisk profil. Hulprofilene som testes i laboratorieforsøkene har avrunde hjørner.

14.1.1 Lastpåføring

For å belaste hulprofilet festes en *discrete rigid*-plate på enden av hulprofilet. Denne platen gis et referansepunkt som ved hjelp av randbetingelse påføres en rotasjon. Alle andre frihetsgrader settes lik null. Figur 14.2 viser hvordan dette gjøres. Rød pil viser momentets plassering og retning. Etter å ha kjørt analyser med varierende rotasjoner (fra $0,01 - 0,1\text{rad}$) ble det konkludert med at en vinkel på $0,1\text{rad}$ ga realistiske resultater i form av oppredende spenninger i endeplaten.



Figur 14.2: Lastpåføring og låsing av frihetsgrader ved *boundary conditions*

14.1.2 Interaksjon mellom komponenter

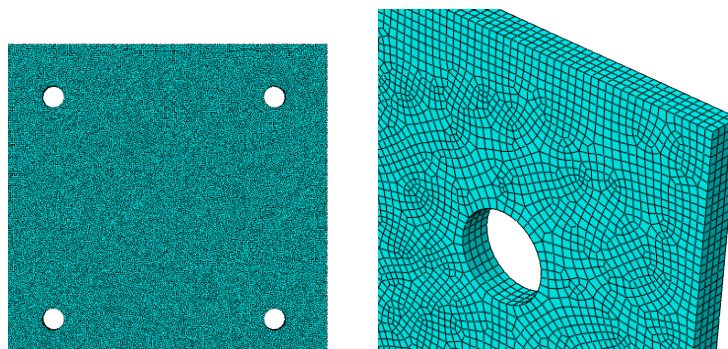
I Abaqus må det defineres hva slags interaksjoner som forekommer mellom de ulike komponentene. De to interaksjonsegenskapene som spesifiseres i denne modellen er kontakt som opptrer normalt på og tangentielt mellom komponenter. For *normal behaviour* antas det "*Hard*" *contact*. For *tangential behaviour* velges en friksjonskoeffisient på 0,3 da Krikerud [10] og Bringsvor [3] velger tilsvarende etter å ha gjennomført parameterstudier. Det ble valgt en *general contact*-interaksjon som virker mellom alle overflater (*All* with self*). Dette gjør at det ikke er behov for å definere kontakt mellom hver enkelt komponent. Dette er også hovedgrunnen til at den stive bakplaten ikke er modellert som en *analytical rigid plate* da *All* with self*-kommandoen i den generelle kontaktinteraksjonen ikke tillater slike flater.

For å sikre at sveisen henger sammen med hulprofilet og endeplaten, låses sveisen til de tilgrensende komponentene ved *tie*-funksjonen. Sveisen fungerer som *master surface* og hulprofilet og endeplaten som *slave surface*. Den stive platen som overfører den påsatte rotasjonen festes også med *tie*-funksjonen til hulprofilets snittflate.

14.2 Komponentene

Modellen i Abaqus er satt sammen av flere unike deler med ulik elementinndeling og ulike elementtyper. Hovedkomponentene som inngår i modellen er endeplate, hulprofil, sveis og bolter. Disse er beskrevet i kapittel 14.2.1 til kapittel 14.2.4.

14.2.1 Endeplate



Figur 14.3: Modellert endeplate

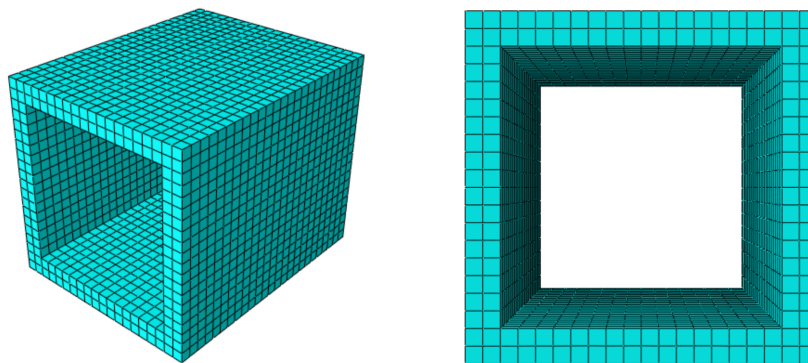
Endeplaten er laget som et deformerbart *3D solid*-element. I modellen er de plastiske egenskapene til materialet definert på bakgrunn av strekktestene presentert i kapittel 6.1 og 6.2. Tabell 14.1 viser input-dataen som ble brukt i Abaqus. De modellerte endeplatene har dermed materialegenskaper som stemmer overens med prøvestykkene som ble utprøvd i laboratoriet.

Tabell 14.1: Endeplatenes plastiske egenskaper

WELDOX 700		S355	
Sann spenning [<i>MPa</i>]	Sann tøyning	Sann spenning [<i>MPa</i>]	Sann tøyning
810	0	410	0
820	0.005	413	0.0061
823	0.01	421	0.0156
825	0.02	470	0.0376
850	0.03	520	0.0736
890	0.06	540	0.0956
910	0.075	556	0.1156
		579	0.1539

Endeplaten er delt opp i elementer av typen $C3D8R$, som er et kubisk *solid element* med noder i alle hjørner. Det velges redusert integrasjon for å minke programmets beregningstid. Redusert integrasjon har også en oppmykende effekt som medfører et mer korrekt resultat da elementprogram normalt gir for stive løsninger. Timeglasskontroll er skrudd på for å unngå *shear locking*, altså falske forskyvninger langs rendene. For å oppnå nøyaktig fordeling av spenning i endeplaten, er det valgt å ha fire elementer over tykkelsen (se kapittel 14.3).

14.2.2 Hulprofil



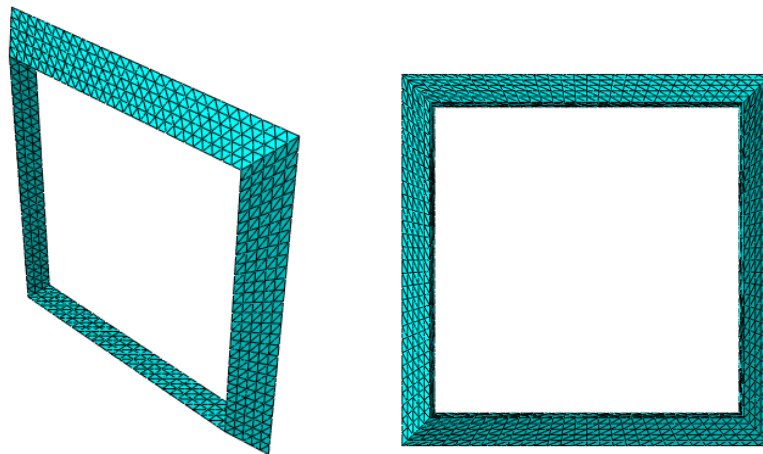
Figur 14.4: Modellert hulprofil

Hulprofilet er laget som et deformerbart $3D$ *solid*-element. Hulprofilet er delt opp i elementer av typen $C3D8R$, som er det samme som for endeplaten. Det er valgt å ha to elementer over tykkelsen da ett element gir en stor utbuling i trykksonen av hulprofilet. I teorien skal en slik utbuling finne sted, men fra laboratoriet registreres den som neglisjerbar. Det er laget et eget materiale som svarer til det virkelige hulprofilets egenskaper basert på strekktesting beskrevet i kapittel 6.3. Tabell 14.2 gjengir de plastiske egenskapene som ble brukt i modellen. Bringsvor [3] gjennomførte en parameterstudie av hulprofilet og konkluderte med at en profillengde på 100mm ville være tilstrekkelig.

Tabell 14.2: Hulprofilets plastiske egenskaper

80x80x8mm Hulprofil	
Sann spenning [MPa]	Sann tøyning
510	0
536	0.0028
558	0.013
592	0.053
608	0.075
636	0.1374

14.2.3 Sveis



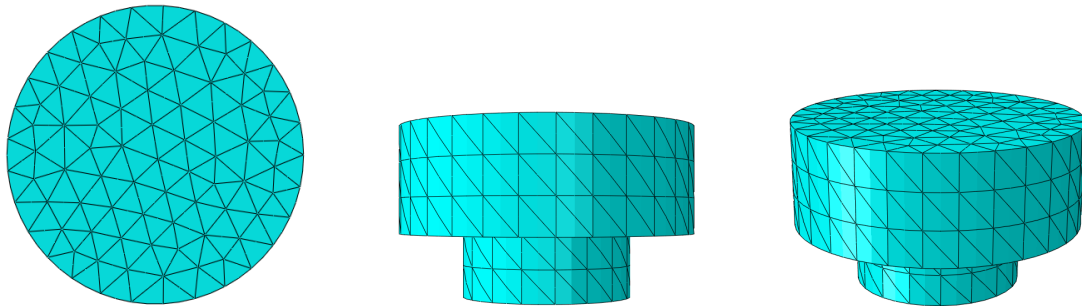
Figur 14.5: Modellert sveis

Sveisen er laget som et deformerbart $3D$ *solid*-element. Sveisen er delt opp i elementer av typen $C3D10R$, som er et tetraedrisk element med 10 integrasjonspunkter. Det er valgt en fin inndeling grunnet geometriens kompleksitet og for nøyaktig overføring av spenninger mellom hulprofil og endeplate. Materialdata benyttet for sveisen vil være likt som for knutepunkt A og B, og tilsvarer de verdier Kassim [9] presenterte. Tabell 14.3 gjengir de plastiske egenskapene.

Tabell 14.3: Sveisens plastiske egenskaper

Sveis	
Sann spenning [MPa]	Sann tøyning
600	0
700	0,02
800	0,06

14.2.4 Bolt



Figur 14.6: Modellert bolt

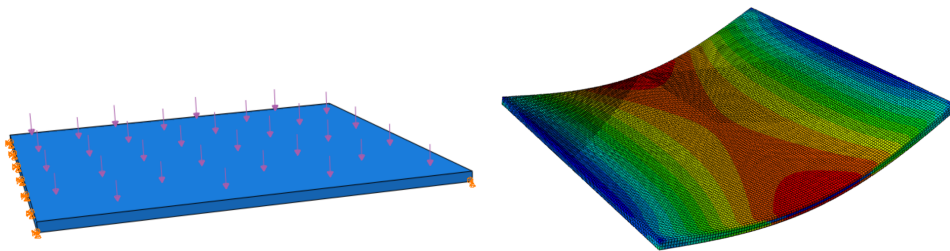
Bolten er laget som et deformerbart *3D solid*-element. Bolten er i likhet med sveisen delt opp i elementer av typen *C3D10R*. Tabell 14.4 gjengir de plastiske egenskapene til boltene presentert av Kassim [9].

Tabell 14.4: Boltens plastiske egenskaper

Bolt	
Sann spenning [MPa]	Sann tøyning
640	0
896	0,1091

14.3 Parameterstudie av endeplate

Det utføres et parameterstudie av endeplaten for å bestemme et optimalt antall elementer over tykkelsen. Avgjørende faktorer er beregningstid og treffsikkerhet sammenlignet med teori. Parameterstudien baseres på metoden Bringsvor [3] presenterte. En fritt opplagt plate blir påsatt en jevnt fordelt last for så å kunne sammenligne nedbøyningen mot den teoretiske nedbøyningen hentet fra formelsamlingen [12]. Figur 14.7 viser den benyttede Abaqus-modellen med tilhørende spenningsplot for en endeplate med tre elementer over tykkelsen.



Figur 14.7: Modell og spenningsplot for parameterstudie

Input-dataen benyttet i den numeriske modellen og i uttrykket for den teoretiske nedbøyningen vises i tabell 14.5. Ligning (14.1) viser teoretisk nedbøyning hvor $q = q'b$ og $I = \frac{bt^3}{12}$.

$$w_{teori} = \frac{5}{384} \frac{qL^4}{EI} \quad (14.1)$$

Tabell 14.5: Verdier benyttet for nedbøyningsberegninger

q'	0,5Mpa
E	210000Mpa
l	250mm
b	250mm
t	6mm
q	125N/mm
I	4500mm ⁴

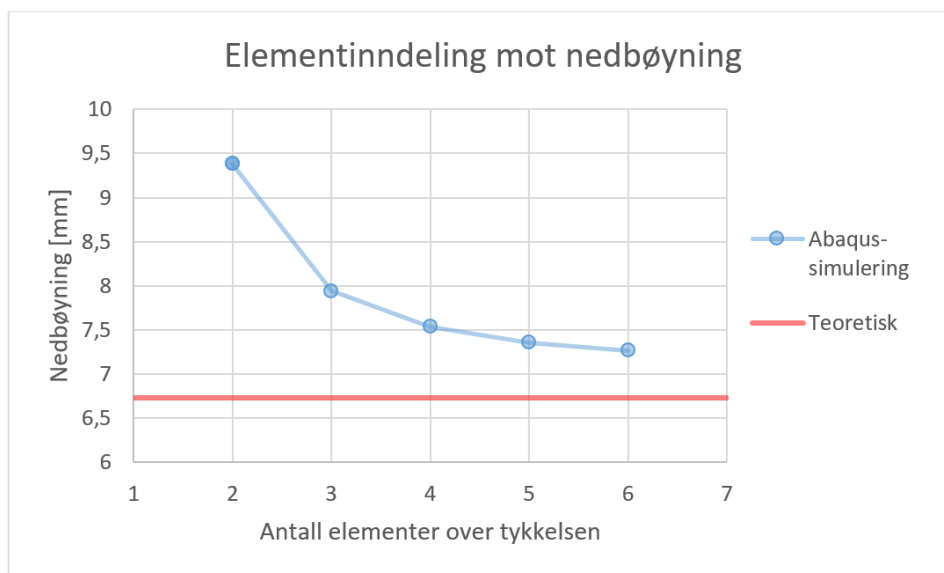
For å unngå plastiske effekter blir endeplaten belastet med en lav, jevnt fordelt last på 0,5N/mm² for ikke å overskride flytespenningen, og ikke-linearitet ble slått av. For å sammen-

ligne resultater blir nedbøyningen hentet fra en definert node på undersiden av endeplatens midtsnitt. På bakgrunn av parameterstudiet til Kassim [9] forble analyser med C3D20R-elementer uprøvd da det ga ugunstig resultat sammenlignet med beregningstid. Det ble valgt å bruke elementer av typen C3D8R, som forklart i 14.2.1.

Det utføres fem analyser med to til seks elementer over platetykkelsen. Av interesse er nedbøyningsavviket fra den teoretiske nedbøyningen w_{teori} og analysetiden. Resultatene vises i tabell 14.6 og i figur 14.8.

Tabell 14.6: Resultat fra parameterstudie

Antall elementer	Nedbøyning [mm]	Avvik [%]	Analysetid [s]
2	9,38	39,4	37
3	7,94	18,0	216
4	7,54	12,0	464
5	7,36	9,4	960
6	7,27	8,0	1851
w_{teori}	6,73	-	-



Figur 14.8: Resultat fra parameterstudie

Det konkluderes med at et avvik fra teoretisk nedbøyning på 12% er tilstrekkelig, og fire elementer over platetykkelsen velges. Analysetiden vektlegges da endeplatens elementinndeling har stor innvirkning på den totale analysetiden for modellen.

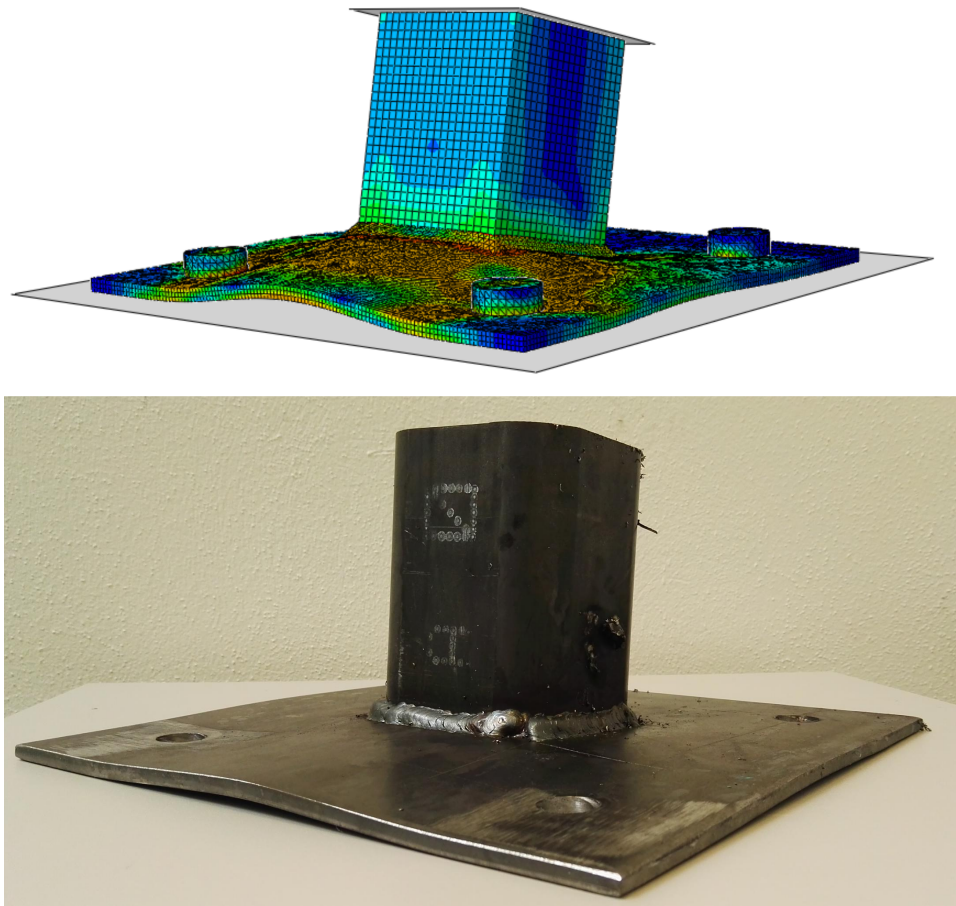
14.4 Sammenligning av numerisk analyse og forsøk

I dette kapitlet sammenlignes resultatene fra de numeriske analysene i Abaqus med resultatene fra laboratorieforsøk. Først sammenlignes deformasjonsmønstrene for å kontrollere at endeplaten bøyes likt i Abaqus som i laboratoriet. Det vil samtidig være til nytte for å avgjøre om valgt flytemønster stemmer overens med virkeligheten. Dette på grunn av at flytelinjer kan være vanskelig å lokalisere på et bøyd prøvestykke fra laboratoriet grunnet små deformasjoner (se 13.2). Deretter ses prøvestykkenes responskurve fra laboratoriet i sammenheng med analyseresultatene.

14.4.1 Deformasjonsmønster

Deformasjonen til et forsøksobjekt og analysemodellen vises i figur 14.9. Selv med små deformasjoner på prøvestykkene er det mulig å se tydelige likhetstrekk mellom deformasjonsmønstrene. Udeformerte hjørner, flytelinje langs nedre sveis og utbuling i overkant og på sidene av hulprofilet er de mest utpregede likhetene. Neglisjerbar platebøyning inne i profilet ble også observert.

Det ble observert at begge knutepunktene (med S355- og WELDOX-plate) deformerte seg likt, noe som Abaqus-modellen verifiserer. På bakgrunn av denne observasjonen vises kun ett deformasjonsmønster på bildet i figur 14.9. Avbildet er knutepunktet med WELDOX-plate som skyldes tydeligst endeplatedeformasjon. Før den plastiske forsøksserien med WELDOX-platen ble gjennomført, ble knutepunktets innfestingspunktet hevet for å kunne oppnå en større rotasjon før utkragerenden nådde gulvet. Dette resulterte i 25% større rotasjon ved endeplaten for knutepunktet med WELDOX-plate sammenlignet med S355.

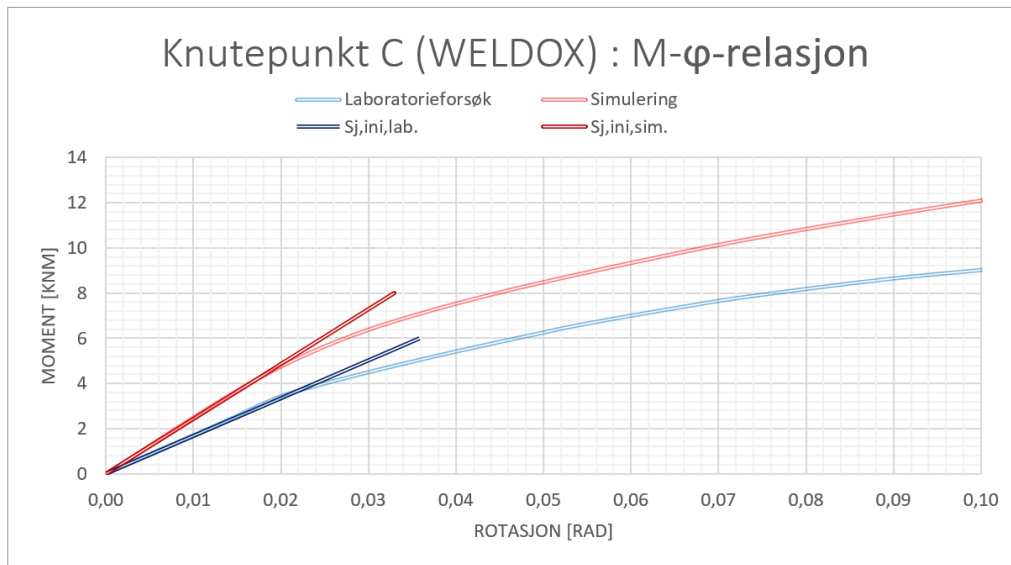


Figur 14.9: Sammenligning av deformasjonsmønster

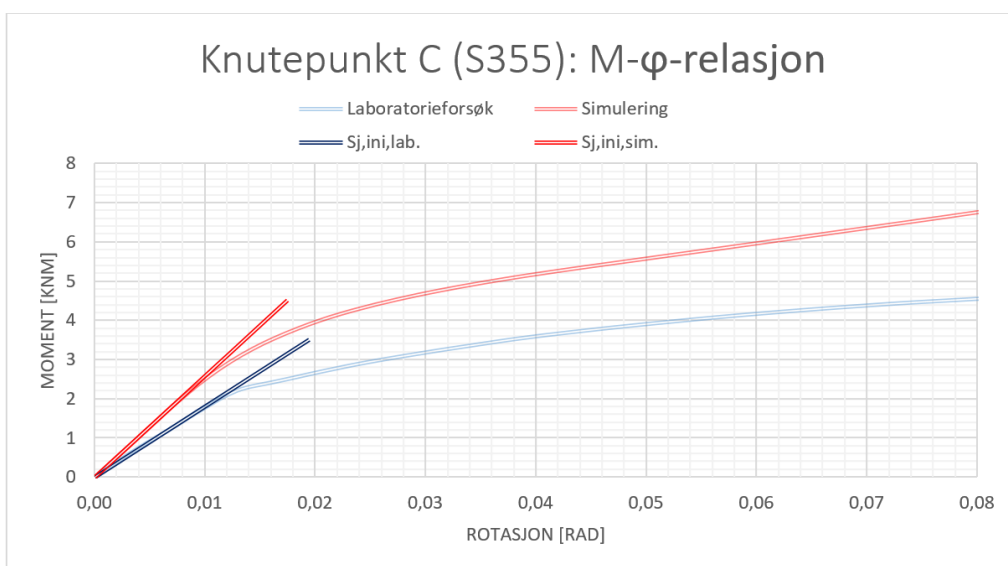
14.4.2 Responskurver

Figur 14.10 og 14.11 illustrerer responskurvene fra forsøk og simulering for de to knutepunktene. Det registreres at formen på simuleringskurven og forsøkskurven er like, med unntak av i starten der Abaqus gir en noe høyere stivhet. Likheten tyder på godt samsvar mellom simulering og forsøk etter plastifisering har inntruffet. Abaqus-simuleringene gjenspeiler også forskjellen ved overgangen fra elastisk til plastisk området for de to endeplatene. Som diskutert i 13.4.1 har prøvestykket med S355-endeplate et tydeligere skille.

For begge endeplatene gir simuleringen en stivere løsning. Det er som forventet da knutepunktene i Abaqus-modellene er perfekte, og ingen formfeil eller ujevnheter fra virkeligheten er inkludert. Abaqus-modellen vurderes som representativ. Den kan med fordel videreutvikles ved å gjøres mykere, og med det fremstille forsøket på en bedre måte.

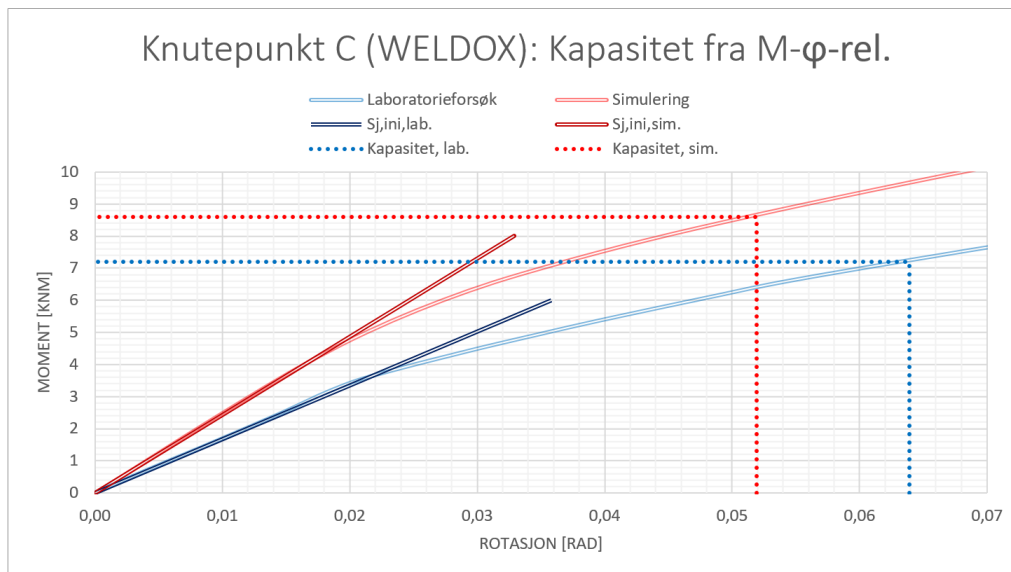


Figur 14.10: Responskurve og initialstivhet fra numerisk analyse og forsøk - WELDOX-endeplate

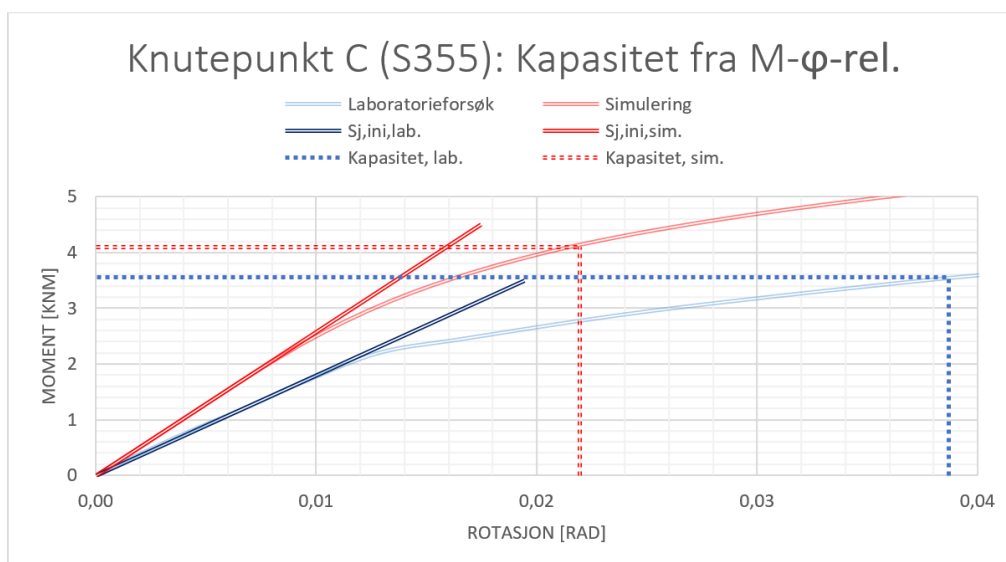


Figur 14.11: Responskurve og initialstivhet fra numerisk analyse og forsøk - S355-endeplate

Da kapasitetsbetraktningene baseres på en rotasjonsgrense, gir et avvik i stivheten utslag på kapasiteten. Dette illustreres i figur 14.12 og 14.13. Som nevnt tidligere er det satt en rotasjonsgrense på tre ganger den elastiske rotasjonen. Kapasiteten funnet fra Abaqus blir med denne grensen høyere enn kapasiteten fra laboratorieforsøk. Altså overestimerer Abaqus momentkapasiteten til knutepunkt C.



Figur 14.12: Kapasitet fra rotasjonsgrense - WELDOX-endeplate



Figur 14.13: Kapasitet fra rotasjonsgrense - S355-endeplate

I tabell 14.7 oppsummeres resultatene fra simuleringer og forsøk. For WELDOX-endeplaten er initialstivheten fra simuleringen i Abaqus 45% større enn fra forsøkesresultatet, og kapasiteten er 19% høyere enn forsøkesresultatet. For S355-platen ligger initialstivheten og kapasiteten fra Abaqus henholdsvis 43% og 14% over forsøksverdien.

Tabell 14.7: Resultater fra simulering og forsøk

Geometri - stålsort	Abaqus-simulering		Laboratorieforsøk	
	Initialstivhet [kNm/rad]	Kapasitet [kNm]	Initialstivhet [kNm/rad]	Kapasitet [kNm]
C - WELDOX 700	243,0	8,6	167,4	7,2
C - S355	257,4	4,1	180,0	3,6

15. Konklusjon

15.1 Kapasitetsberegninger

Resultatene for knutepunkt A og B viser at analytisk og reell kapasitet stemmer godt overens for bøyning om sterk akse. For bøyning om svak akse overestimeres de håndberegnete kapasitetene, og avvikene fra laboratorieresultatene er 20% og 35% for henholdsvis knutepunkt A og B. Årsaker til dette avviket kan være ujevn kontaktsone mellom endeplate og platen bak eller bruk av T-stykkemodell ved kapasitetsberegning.

For knutepunkt C overestimeres håndberegnet kapasitet, og avvikene fra laboratorieresultatene er 44% og 57% for knutepunktene med endeplate av henholdsvis S355- og WELDOX 700-stål. Disse avvikene kan skyldes feil valg av flytelinjemønster. Grunnet store avstander mellom skruene og skruer plassert i hjørnene av endeplaten, opplever endeplaten biaksial bøyning i overkant av hulprofilet. En slik deformasjon er vanskelig å beskrive med rette flytelinjer.

Knutepunkt	$M_{Rd,lab.} [kNm]$	$M_{Rd,håndber.} [kNm]$	$\frac{M_{Rd,lab.}}{M_{Rd,håndber.}}$
A - sterk	5,30	5,25	1,01
A - svak	4,20	5,13	0,82
B - sterk	6,00	5,25	1,14
B - svak	5,25	7,09	0,74
C - WELDOX 700	6,8	10,7	0,64
C - S355	3,6	5,2	0,69

Det konkluderes med at den plastiske momentkapasiteten kan defineres i punktet på stivhetskurven hvor rotasjonen er lik tre ganger den elastiske rotasjonen for bøyning om sterk akse for knutepunkt A og B. Når boltene er plassert på siden av hulprofilets strekkflens blir denne antakelsen unøyaktig. Dette gjelder for bøyning av knutepunkt A og B om svak akse, samt for

bøyning av knutepunkt C. Den analytiske momentkapasiteten for disse nås når rotasjonen av knutepunktet er lik 6-7 ganger den elastiske rotasjonen. Å bestemme momentkapasiteten til knutepunkt A og B bøynd om svak akse og knutepunkt C, kun ved å betrakte de antatte flytemønstrene alene, vurderes her til å være en unøyaktig metode.

15.2 Stivhetsberegninger

Det er konkludert med at den initielle stivheten best bestemmes ved å anta at de første punktlastene på bjelken fungerer som en mosjonering av prøvestykket. Et større lastområde inkluderes og initialstivheten blir noe lavere. Håndberegningene basert på Eurokode 1993-1-8 gir en alt for stiv knutepunktsoppførsel. Avvikene utgjør 85-165% av initialstivhetene funnet i laboratoriet, for knutepunkt A og B bøynd om sterk og svak akse. En ny stivhetsmodell for bøyning om sterk akse er laget, hvor stivhetskoeffisienten for platebøyning fra Eurokoden modifiseres. I modellen er det forsøkt å inkludere bidrag fra platerotasjon i overkant av hulprofilen, for å gjøre knutepunktet mykere. Den nye modellen reduserte initialstivheten vesentlig for begge prøvestykkene. Avviket mellom forsøksresultater og beregnede initialstivheter er fortsatt store. Ved bruk av Eurokodens beregningsmåte, med og uten modifisering, overestimeres altså stivhet til disse knutepunktene vesentlig, og det konkluderes med at den ikke er godt egnet for hulprofilskjøter.

Initialstivheten til knutepunktet med geometri C finnes ikke direkte ved bruk av Eurokoden, da bruk av T-stykkemodell ikke er en gunstig representasjon av denne geometrien. Håndberegningssmodellen i denne rapporten er basert på en platestivhet funnet ved bruk av Abaqus, og brukes sammen med stivhetsbidrag fra boltene. Forholdet mellom resultater fra forsøk og håndberegning er 0,96 og 0,89 for henholdsvis ståltypene S355 og WELDOX 700. Stivhetsmodellen for knutepunkt C treffer godt. Abaqus-modellen for knutepunkt C oppfører seg for stivt i forhold til laboratorieresultatene, noe som påvirker platestivheten brukt i håndberegningssmodellen. Det er dermed litt tilfeldig at resultatene treffer så godt som de gjør. Det konkluderes like fullt med at metoden brukt for å finne og inkludere stivhetsbidraget fra platebøyning ved numerisk analyse er anvendbar.

Knutepunkt	$S_{j,ini,lab.} [kNm/rad]$	$S_{j,ini,håndber.} [kNm/rad]$	$\frac{S_{j,ini,lab.}}{S_{j,ini,håndber.}}$
A - sterk	229,3	508,0*	0,45
A - svak	108,2	210,3	0,51
B - sterk	337,9	557,9*	0,61
B - svak	199,2	412,1	0,48
C - WELDOX 700	167,4	188,0	0,89
C - S355	180,0	188,0	0,96

*Modifisert stivhetskoeffisient inkludert

Ved bruk av regler i Eurokode 1993-1-8 skal beregning av initialstivhet gi samme resultat, uavhengig av flytespenningen til endeplaten. Dette er ikke tilfellet når knutepunkt A og B testes i laboratoriet, hvor forholdet mellom $S_{j,ini,S355}$ og $S_{j,ini,WELDOX700}$ er omtrent 1,4. Knutepunkt C har tilsvarende forholdstall lik 1,1 og er i liten grad avhengig av flytespenningen i endeplaten. Tendensen for knutepunkt A og B, bøyning om begge akser, er at initialstivheten er større for endeplater med S355-stål. Men stivheten i forbindelsen med endeplate av S355-stål avtar med en raskere rate, når belastningen foregår i plastisk sone, enn for forbindelsen med WELDOX 700-stål.

15.3 Forslag til videreføring av oppgave

Det bør gjennomføres flere tester med like eller lignende geometrier som i denne oppgaven. Dette for å få et godt grunnlag for å sammenligne oppførselen mellom momentbelastede endeplateforbindelser med høyfast og vanlig konstruksjonsstål.

Arbeide videre med stivhetsmodellen for knutepunkt A og B for bøyning om sterk akse. Undersøke muligheten for å legge til komponenter som kan bidra med økt fleksibilitet til modellen. Etablere en stivhetsmodell for bøyning om svak akse for knutepunkt A og B.

Videreføring av stivhetsmodellen for knutepunkt C ved å lage en mer generell modell som gjelder for denne type geometri.

Bibliografi

- [1] A. Aalberg, A. M. Uhre, and P. K. Larsen. End plate connection for rectangular hollow section in bending. In *Nordic Steel Construction Conference 2015*. NTNU.
- [2] I. Birkeland. Knutepunkter i bygninger. Masteroppgave, NTNU, Juni 2011.
- [3] T. V. Bringsvor. Oppførsel til momentbelastede knutepunkter for hulprofiler. Masteroppgave, NTNU, Juni 2015.
- [4] CEN. *Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner - Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger*. Standard Norge, 2005.
- [5] CEN. *Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner - Del 1-8: Knutepunkter og forbindelser*. Standard Norge, 2005.
- [6] CEN. *Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner - Del 1-12: Konstruksjoner med høyfast stål*. Standard Norge, 2007.
- [7] A. G. Coelho and F. Bijlaard. Behaviour of high strength steel moment joints. 2006.
- [8] E. Gogou. *Use of high strength steel grades for economical bridge design*. Delft university of technology, Delft, 2012.
- [9] F. F. Kassim. Behaviour of end plate connections of high strength steel subjected to bending moment. Masteroppgave, NTNU, Juni 2016.
- [10] E. E. Kirkerud. Endeplateforbindelser for rektangulære hulprofil. Masteroppgave, NTNU, Juni 2015.
- [11] P. K. Larsen. *Dimensjonering av stålkonstruksjoner*. Akademisk forlag, Trondheim, 2. edition, 2010.
- [12] P. K. Larsen, A. H. Clausen, and A. Aalberg. *Stålkonstruksjoner - Profiler og formler*. tapir akademisk forlag, Trondheim, 3. edition, 2003.

- [13] K. Lauknes. Beregning av endeplate i høyfast stål. Masteroppgave, NTNU, Juni 2013.
- [14] A. M. Uhre. Hulprofil med endeplateforbindelse. Masteroppgave, NTNU, Juni 2014.
- [15] A. Wheeler, M. J. Clarke, G. J. Hancock, and T. M. Murray. *Design Model for Bolted Moment End Plate Connections using Rectangular Hollow Sections*. University of Sydney, Sydney, 1997.

Vedlegg

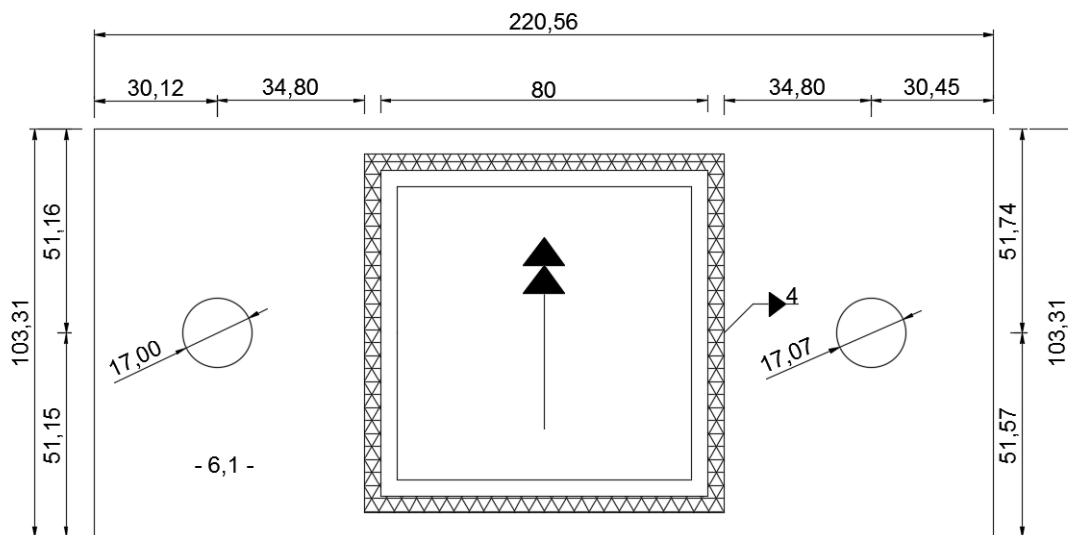
A. Forsøksgeometrier

Dette vedlegget inneholder detaljtegninger av forsøksgeometriene med oppmålte størrelser. Tabellene inneholder størrelser som brukes for håndberegning av reell kapasitet og stivhet.

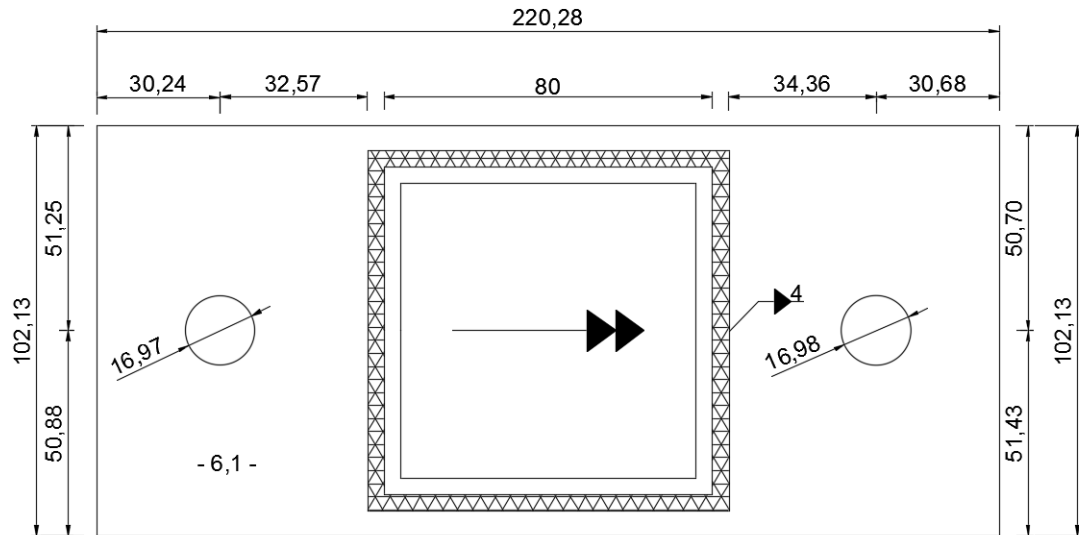
Tabell A.1: Nominell og reell flytespenning etter strekktest utført av Kassim [9], presentert i avsnitt 6.1

Nominell [N/mm^2]	Reell [N/mm^2]
700	820

A.1 Forsøksgeometri A



Figur A.1: Detaljtegning av knutepunkt A bøyd om sterk akse

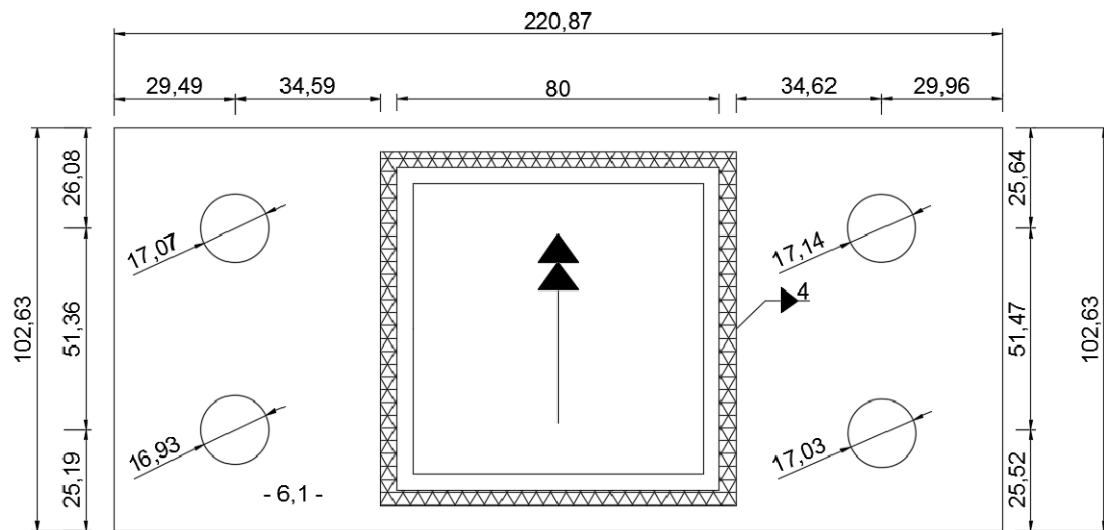


Figur A.2: Detaljtegning av knutepunkt A bøyd om svak akse

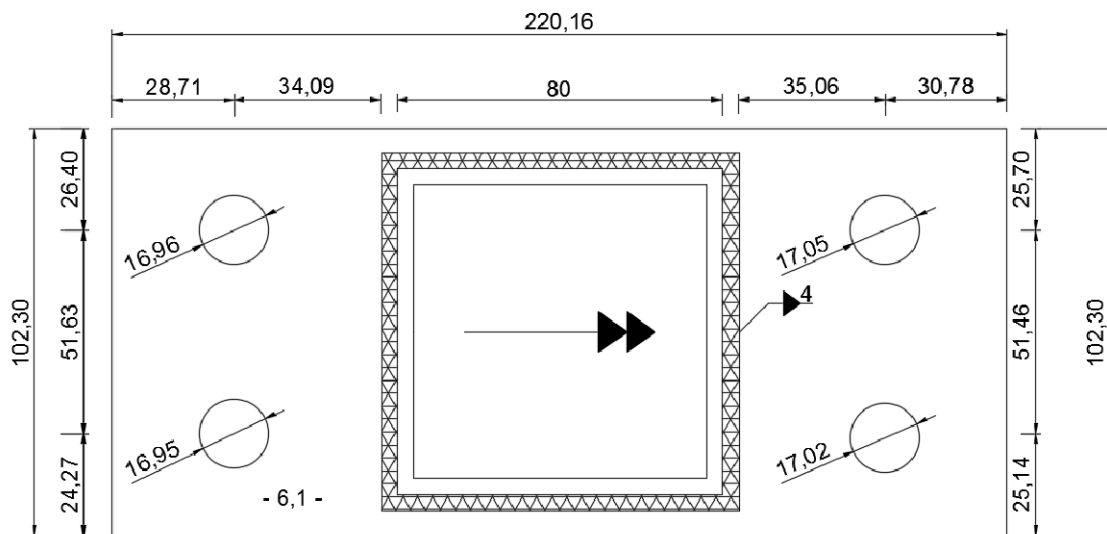
Tabell A.2: Størrelser brukt for reelle utregninger etter oppmåling av knutepunkt A [mm]

b_p	100	l	220
e	50	e_x	30
\emptyset	17	m_x	36
t_p	6,1	c	88
a-mål	4		
$L_{c,sterk}$	2500	$L_{c,svak}$	2350

A.2 Forsøksgeometri B



Figur A.3: Detaljtegning av knutepunkt B bøyd om sterk akse

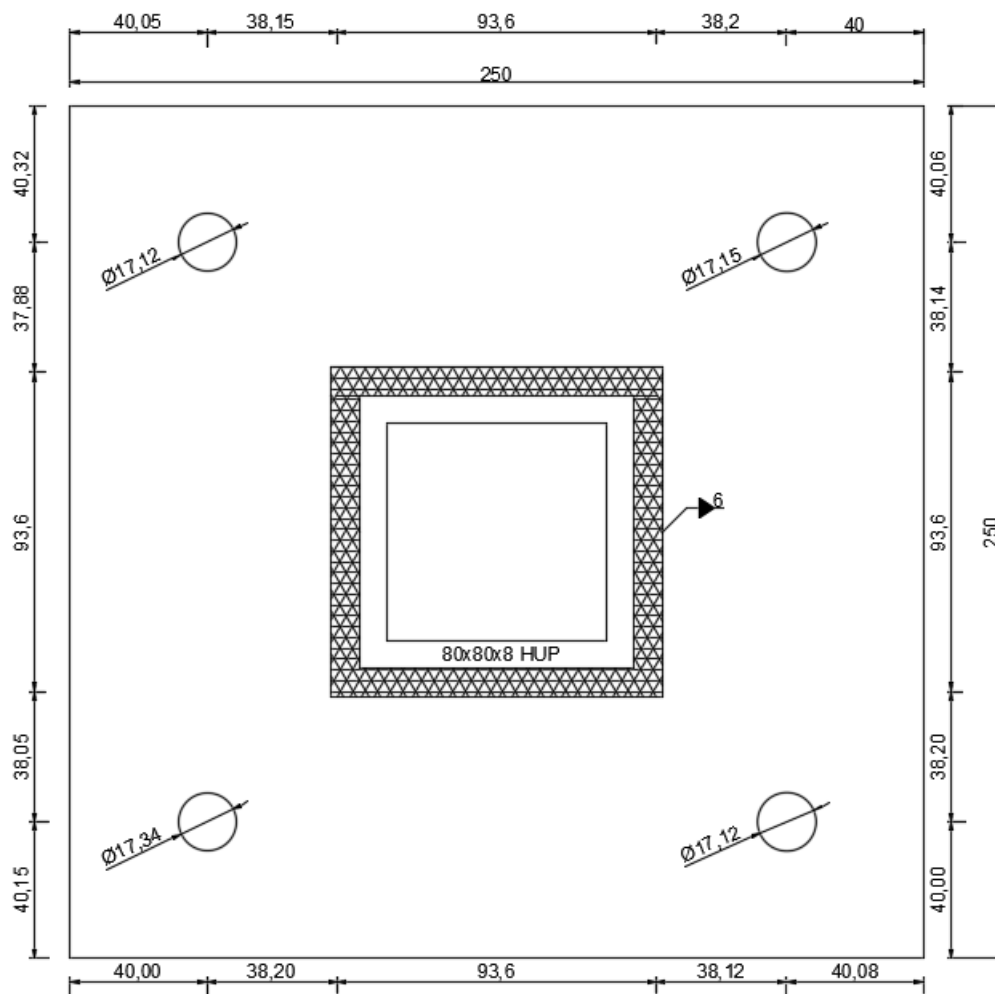


Figur A.4: Detaljtegning av knutepunkt B bøyd om svak akse

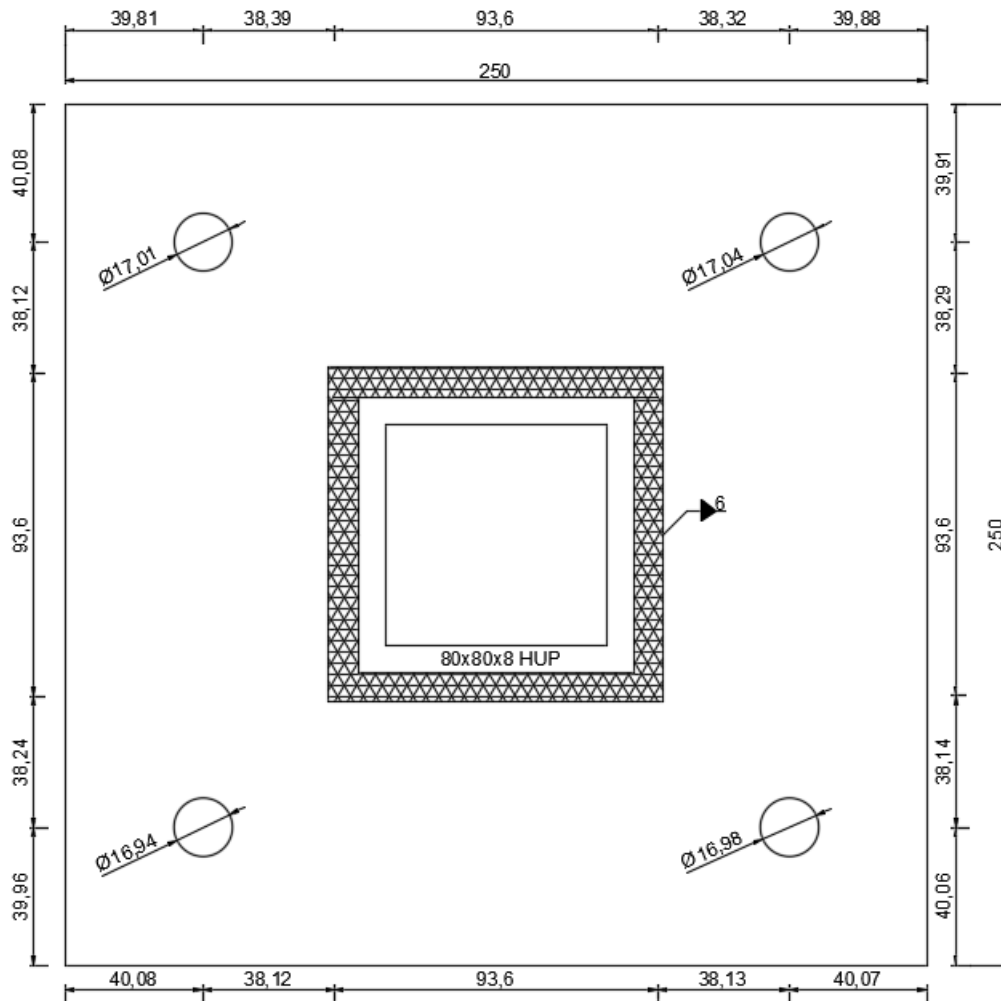
Tabell A.3: Størrelser brukt for reelle utregninger etter oppmåling av knutepunkt B [mm]

b_p	100	l	220
e	25	e_x	30
w	50	m_x	36
\emptyset	17	c	88
t_p	6,1	a-mål	4
$L_{c,sterk}$	2500	$L_{c,svak}$	2350

A.3 Forsøksgeometri C



Figur A.5: Detaljtegning av knutepunkt C med endeplate av S355



Figur A.6: Detaljtegning av knutepunkt C med endeplate av WELDOX 700

Tabell A.4: Reelle verdier etter oppmåling av knutepunkt C med WELDOX 700 [mm]

b_p	250	l	250
e	40	e_x	40
m_x	38,2	a-mål	4-6
\emptyset	17	c	93,6
t_p	6,1	L_c	2500

Tabell A.5: Reelle verdier etter oppmåling av knutepunkt C med S355 [mm]

b_p	250	l	250
e	40	e_x	40
m_x	38,2	a-mål	6
\emptyset	17	c	93,6
t_p	6,0	L_c	2500

Det ble bestilt a-mål på 6mm, men oppmåling gir en variasjon på 4-6 mm for knutepunkt med plate av WELDOX 700. Det er for enkelthetskyld valgt å regne kapasitet med a-mål på 6mm, da dette ble gjort på forhånd av. A-mål lik 6mm er valgt som gjeldende dimensjon også på figur A.6. Sveisen er beregnet til å ha nok kapasitet i begge tilfeller. For numeriske analyser er a-mål valgt å holdes konstant lik 4mm.

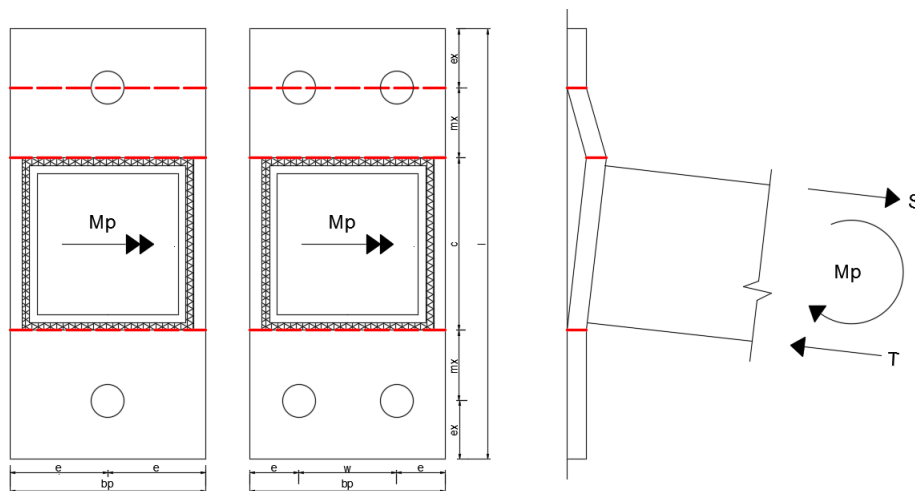
B. Utledning av kapasitetsformler for knutepunkt A og B

Ved bruk av virtuelle krefters prinsipp (VKP) utledes kapasitetsformlene for de kritiske bruddmønstrene. VKP innebærer å sette på en ytre virtuell kraft og kreve likevekt mellom indre og ytre arbeid. Ytre arbeid er definert som kraft ganger forskyvning, eller moment ganger rotasjon. Det indre plastiske arbeidet er gitt som $\Sigma m_p \times l \times \theta$, hvor:

- $m_p = \frac{f_y t^2}{4}$ = platens flytemoment per lengdeenhet
- θ = platedelens rotasjon om fast dreieakse
- l = projeksjonen av flytelinjen på fast dreieakse

Likevekt mellom indre arbeid W_i , og ytre arbeid W_e , gir bruddlasten [11].

B.1 Knutepunkt A og B - sterk akse



Figur B.1: Knutepunkt A og B - flytemønster for bøyning om sterk akse

For knutepunkt A og B er uttrykket for momentkapasiteten om sterk akse det samme.

Ytre arbeid:

$$W_e = M_p \frac{\delta}{c} \quad (\text{B.1})$$

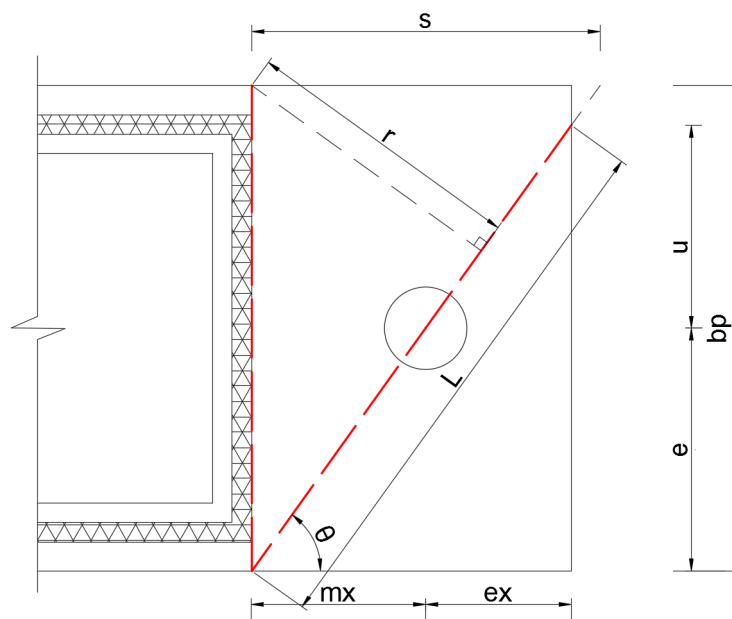
Indre arbeid:

$$W_i = m_p \frac{\delta}{m_x} b_p + m_p b_p \left(\frac{\delta}{m_x} + \frac{\delta}{c} \right) + m_p \frac{\delta}{c} b_p \quad (\text{B.2})$$

Likevekt mellom indre og ytre arbeid gir platens bruddlast:

$$M_p = 2m_p b_p \left[\frac{c}{m_x} + 1 \right] \quad (\text{B.3})$$

B.2 Knutepunkt A - svak akse



Figur B.2: Knutepunkt A - flytemønster for bøyning om svak akse

Beregningene er basert på observert flytelinjemønster av Uhre [14] og observasjoner fra egne forsøk.

Tabell B.1: Hjelpstørrelser knutepunkt A - svak akse

Hjelpstørrelse	Uttrykk	Tallverdi
s	$\frac{b_p m_x}{e}$	71,0 mm
u	$\frac{e_x e}{m_x}$	42,3 mm
L	$\sqrt{(u + e)^2 + (m_x + e_x)^2}$	113,2 mm
θ	$\tan^{-1}\left(\frac{e}{m_x}\right)$	54,6°
r	$b_p \sin(90 - \theta)$	57,9 mm

Ytre arbeid:

$$W_e = M_p \frac{\delta}{b_p} \quad (\text{B.4})$$

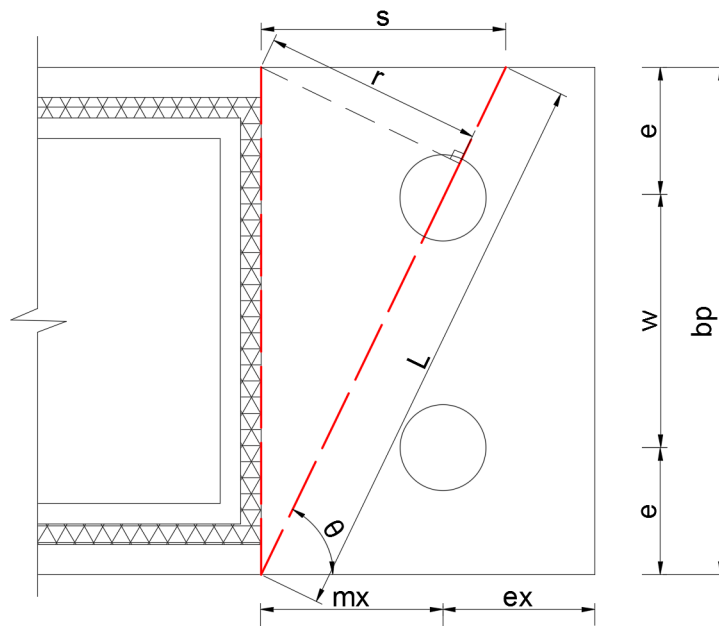
Indre arbeid:

$$W_i = 2m_p \left(\frac{\delta}{s} b_p + \frac{\delta}{r} L \right) \quad (\text{B.5})$$

Likevekt mellom indre og ytre arbeid gir platens bruddlast:

$$M_p = 2m_p b_p \left[\frac{b_p}{s} + \frac{L}{r} \right] \quad (\text{B.6})$$

B.3 Knutepunkt B - svak akse



Figur B.3: Knutepunkt B - flytemønster for bøyning om svak akse

Tabell B.2: Hjelpstørrelser knutepunkt B - svak akse

Hjelpstørrelse	Uttrykk	Tallverdi
s	$\frac{m_x}{1 - \frac{e}{b_p}}$	48,0 mm
L	$\sqrt{s^2 + b_p^2}$	110,9 mm
r	$\frac{s b_p}{L}$	43,3 mm

Ytre arbeid:

$$W_e = M_p \frac{\delta}{b_p} \quad (\text{B.7})$$

Indre arbeid:

$$W_i = 2m_p \left(\frac{\delta}{s} b_p + \frac{\delta}{r} L \right) \quad (\text{B.8})$$

Substituerer for L og r, og får uttrykket:

$$W_i = \frac{2m_p}{s b_p} (2b_p^2 + s^2) \delta \quad (\text{B.9})$$

Likevekt mellom indre og ytre arbeid gir platens bruddlast:

$$M_P = \frac{2m_p}{s} [2b_p^2 + s^2] \quad (\text{B.10})$$

C. Kapasitetsberegninger

Her vil kapasitetsberegninger for knutepunkt A, B og C utføres med nominelle verdier hentet fra figurer i kapittel 7/8/12. Aktuelle kapasitetskontroller utført vil være av:

- T-stykke
- Endeplate
- Bolter
- Sveis
- Hulprofil

Endeplatens kapasitet bestemmes ut fra antatte flytemønstre presentert i kapittel 7/8/12. T-stykke, bolter, sveis og hulprofil kontrolleres etter *Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger* [4].

C.1 Generelt for knutepunkt A og B

Fellesnevneren for beregningene vil være at endeplaten flyter først, og dermed er dimensjonerende for den betraktede hulprofilskjøten. Tabellen under viser en sammenfatning av kritiske verdier for beregningene gjort for knutepunkt A og B i dette vedlegget. Avstand fra punktlast til knutepunkt er satt til $2,5\text{ m}$ for enkelt å sammenligne verdier. Reelt er avstanden $2,5\text{ m}$ for bøyning om sterk akse, og $2,35\text{ m}$ for bøyning svak akse. P_{maks} er punktlasten påført bjelken.

Tabell C.1: Dimensjonerende punktlast på utkrager for de ulike komponentene (Momentarm $L_c = 2,5\text{ m}$)

Knutepunkt	Bøyning om [akse]	Kritiske kapasitetsverdier				
		T-stykke $P_{maks}[kN]$	Endeplate $P_{maks}[kN]$	Bolt $P_{maks}[kN]$	Sveis $P_{maks}[kN]$	Hulprofil $P_{maks}[kN]$
A	Sterk	1,7	1,7	4,5	3,0	4,6
A	Svak	-	1,7	-	3,0	4,6
B	Sterk	1,7	1,7	9,0	3,0	4,6
B	Svak	-	2,3	-	3,0	4,6

Kontroll av hulprofil

Hulprofilets beregnede kapasitet gjelder for begge knutepunkter om både sterk og svak akse

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl}}{\gamma_{m0}} f_y = \frac{34,3 \times 10^3}{1,05} \times 355 = 11,6 \text{ kNm}$$

$$P_{maks} = \frac{M_{pl,Rd}}{L_c} = \frac{11,6 \times 10^6}{2500} = 4,6 \text{ kN} \quad (\text{C.1})$$

Kontroll av sveis

Sveisens beregnede kapasitet er utført ved bruk av knutepunktstandarden [5] og gjelder for begge knutepunktene om både sterk og svak akse.

Tabell C.2: Data for beregning av sveiskapasitet

Strekkfasthet profil	f_u	490 MPa	A-mål	a_c	4 mm
Partialfaktor	γ_{M2}	1,25	Korrelasjonsfaktor	β_w	0,9
Bredde profil	b	80 mm			

Strekkapasitet:

$$A_{w,t} = a_c \times l_{sveis,t,eff} = 4 \times 80 = 320 \text{ mm}^2$$

$$F_{w,t,Rd} = \frac{f_u A_{w,t}}{\sqrt{2} \beta_w \gamma_{M2}} = \frac{490 \times 320}{\sqrt{2} \times 0,9 \times 1,25} = 98,6 \text{ kN}$$

$$P_{maks} = \frac{1}{L_c} F_{w,t,Rd} h_v = \frac{1}{2500} \times 98,6 \times 76 = 3,0 \text{ kN} \quad (\text{C.2})$$

Skjærkapasitet:

$$A_{w,t} = a_c \times l_{sveis,s,eff} = 4 \times (2 \times 80) = 640 \text{ mm}^2$$

$$F_{w,s,Rd} = \frac{f_u A_{w,s}}{\sqrt{3} \beta_w \gamma_{M2}} = \frac{490 \times 640}{\sqrt{3} \times 0,9 \times 1,25} = 161 \text{ kN}$$

$$P_{maks} = F_{w,s,Rd} = 161 \text{ kN} \quad (\text{C.3})$$

Kapasitet av bolter

I forsøkene er det benyttet bolter av 8.8 kvalitet og størrelse M16. I tabell C.3 er verdier for beregningene oppsummert. De ulike kapasitetsberegningene for boltene er gitt i knutepunktstandarden [5].

Tabell C.3: Data for beregning av boltkapasitet

Flytegrense bolt	$f_{y,b}$	640MPa	Boltdiameter d	16mm
Strekfasthet bolt	$f_{u,b}$	800MPa	Boltareal A_s	157mm ²
Flytegrense endeplate	$f_{y,p}$	700MPa	k_2	0,9
Strekfasthet endeplate	$f_{u,p}$	820MPa	α_v	0,6

Auskjæringskapasitet:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \times 800 \times 157}{1,25} = 60,3kN \quad (C.4)$$

Strekkapasitet:

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \times 800 \times 157}{1,25} = 90,4kN \quad (C.5)$$

C.2 Knutepunkt A

C.2.1 Sterk akse

Kontroll av T-stykkemodell

$$m_x = 36mm, \quad e_x = 30mm, \quad e = 50mm, \quad f_y = 700MPa$$

$$l_{eff,cp} = \min \left\{ \frac{2\pi m_x}{2}, \frac{\pi m_x + 2e}{2} \right\} = \min \left\{ \frac{36\pi}{2}, \frac{36\pi + 2 \times 50}{2} \right\} = \min \left\{ 113mm, 107mm \right\}$$

$$l_{eff,nc} = \min \left\{ \frac{4m_x + 1,25e_x}{2}, \frac{e + 2m_x + 0,625e_x}{2}, 0,5b_p \right\} = \min \left\{ \frac{4 \times 36 + 1,25 \times 30}{2}, \frac{50 + 2 \times 36 + 0,625 \times 30}{2}, 0,5 \times 100 \right\} = \min \left\{ 91mm, 70mm, 50mm \right\}$$

$$l_{eff} = \min \left\{ l_{eff,cp}, l_{eff,nc} \right\} = 50mm$$

$$t_p = 6mm, \quad \gamma_{m0} = 1,00$$

$$M_{pl,1\&2} = 0,25l_{eff}t_p^2 \frac{f_y}{\gamma_{m0}} = 0,25 \times 50 \times 6^2 \times \frac{700}{1,00} = 315000Nmm$$

$$m = m_x = 36, \quad n = e_{min} = e_x = 30$$

$$F_{T,Rd} = \min \begin{Bmatrix} F_{T,1,Rd} \\ F_{T,2,Rd} \\ F_{T,3,Rd} \end{Bmatrix} = \min \begin{Bmatrix} \frac{4M_{pl,1}}{m_x} \\ \frac{2M_{pl,2} + e_x \sum F_{t,Rd}}{m_x + e_x} \\ \sum F_{t,Rd} \end{Bmatrix} = \min \begin{Bmatrix} \frac{4 \times 315000}{36} \\ \frac{2 \times 315000 + 30 \times 90432}{36 + 30} \\ 1 \times \frac{0,9 \times 800 \times 157}{1,25} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} 35kN \\ 50,7kN \\ 90,4kN \end{Bmatrix} = 35kN$$

$$\text{Momentarm: } H = c + m_x = 88 + 36 = 124mm$$

$$M_P = F_{T,Rd} \times H = 35 \times 124 = 4,34kNm$$

$$P_{maks} = \frac{1}{L_c} M_P = \frac{4,34 \times 10^6}{2500} = 1,7kN \quad (C.6)$$

Kontroll av endeplate

$$m_p = 0,25t_p^2 f_y = 0,25 \times 6^2 \times 700 = 6300Nmm/mm$$

$$M_P = 2m_p b_p \left[\frac{c}{m_x} + 1 \right] = 2 \times 6300 \times 100 \left[\frac{88}{36} + 1 \right] = 4,34kNm$$

$$P_{maks} = \frac{1}{L_c} M_P = \frac{1}{2500} \times 4,34 = 1,7kN \quad (C.7)$$

Kontroll av bolter

Boltenes kapasitet utregnes etter ligning (C.4) og (C.5).

Auskjæring:

$$P_{maks} = F_{v,Rd} \times 2skruer = 60,3 \times 2 = 120,6kN \quad (C.8)$$

Strekk:

$$\text{Momentarm: } H = c + m_x = 88 + 36 = 124 \text{ mm}$$

$$P_{maks} = \frac{1}{L_c} F_{t,Rd} \times H \times 1 \text{ skruer} = \frac{1}{2500} \times 90,4 \times 124 = 4,5 \text{ kN} \quad (\text{C.9})$$

Krav for å unngå skruebrudd, hentet fra konferanseforedrag av Aalberg et al [1]:

$$F_{t,Rd} = 90,4 \text{ kN} \geq F_{t,Ed} = 1,3 \frac{M_p}{b_p} = 1,3 \times \frac{4,34 \times 10^6}{100} = 56,4 \text{ kN} \rightarrow \text{OK} \quad (\text{C.10})$$

C.2.2 Svak akse

Kontroll av endeplate

$$m_p = 0,25 t_p^2 f_y = 0,25 \times 6^2 \times 700 = 6300 \text{ Nmm/mm}$$

$$M_p = 2 m_p b_p \left[\frac{b_p}{s} + \frac{L}{r} \right] = 2 \times 6300 \times 100 \left[\frac{100}{71} + \frac{113,2}{57,9} \right] = 4,24 \text{ kNm}$$

$$P_{maks} = \frac{1}{L_c} M_p = \frac{1}{2500} \times 4,24 = 1,7 \text{ kN} \quad (\text{C.11})$$

Kontroll av bolter

Antas OK da forsøk viser flytning i endeplate og boltkapasitet om sterk akse ikke er dimensjonerende.

C.3 Knutepunkt B

C.3.1 Sterk akse

Kontroll av T-stykkemodell

Utrekning gjøres som for knutepunkt A i C.2.1, men med to skruer.

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

$$P_{maks} = \frac{1}{L_c} M_p = \frac{1}{2500} \times 4,34 = 1,7 \text{ kN} \quad (\text{C.12})$$

Kontroll av endeplate

$$\begin{aligned}
 m_p &= 0,25t_p^2 f_y = 0,25 \times 6^2 \times 700 = 6300 \text{ Nmm/mm} \\
 M_P &= 2m_p b_p \left[\frac{c}{m_x} + 1 \right] = 2 \times 6300 \times 100 \left[\frac{88}{36} + 1 \right] = 4,34 \text{ kNm} \\
 P_{maks} &= \frac{1}{L_c} M_P = \frac{1}{2500} \times 4,34 = 1,7 \text{ kN}
 \end{aligned} \tag{C.13}$$

Kontroll av bolter

Boltenes kapasitet utregnes etter ligning (C.4) og (C.5).

Avskjæring:

$$P_{maks} = F_{v,Rd} = 60,3 \times 4 \text{ skruer} = 241,2 \text{ kN} \tag{C.14}$$

Strek:

$$\begin{aligned}
 \text{Momentarm: } H &= c + m_x = 88 + 36 = 124 \text{ mm} \\
 P_{maks} &= \frac{1}{L_c} F_{t,Rd} H \times 2 \text{ skruer} = \frac{1}{2500} \times 90,4 \times 124 \times 2 = 9,0 \text{ kN}
 \end{aligned} \tag{C.15}$$

Krav for å unngå skruebrudd, hentet fra konferanseforedrag av Aalberg et al [1]:

$$F_{t,Rd} = 90,4 \text{ kN} \geq F_{t,Ed} = 1,3 \frac{M_P}{b_p} = 1,3 \times \frac{4,34 \times 10^6}{100} = 56,4 \text{ kN} - > \text{OK} \tag{C.16}$$

C.3.2 Svak akse**Kontroll av endeplate**

$$\begin{aligned}
 m_p &= 0,25t_p^2 f_y = 0,25 \times 6^2 \times 700 = 6300 \text{ Nmm/mm} \\
 M_P &= \frac{2m_p}{s} [2b_p^2 + s^2] = \frac{2 \times 6300}{48} [2 \times 100^2 + 48^2] = 5,85 \text{ kNm} \\
 P_{maks} &= \frac{1}{L_c} M_P = \frac{1}{2500} \times 5,85 = 2,3 \text{ kN}
 \end{aligned} \tag{C.17}$$

Kontroll av bolter

Antas OK da forsøk viser at boltkapasitet for sterk akse ikke er dimensjonerende.

C.4 Knutepunkt C

Det gjøres tilsvarende kapasitetsberegninger for knutepunkt C som for knutepunkt A og B. Da knutepunkt C er symmetrisk, beregnes kun kapasitet om en akse. Det gjøres forsøk med endeplate med stålqualität av både WELDOX 700 og S355.

Tabell C.4: Dimensjonerende punktlast på utkrager for de ulike komponentene (Momentarm $L_c = 2,5m$)

Knutepunkt	Stålqualität i endeplate	Kritiske kapasitetsverdier				
		T-stykke $P_{maks}[kN]$	Endeplate $P_{maks}[kN]$	Bolt $P_{maks}[kN]$	Sveis $P_{maks}[kN]$	Hulprofil $P_{maks}[kN]$
C	WELDOX 700	-	3,5	9,5	6,4	8,0
C	S355	-	1,8	9,5	6,4	8,0

Kontroll av hulprofil

Hulprofilets beregnede kapasitet gjelder for profil med dimensjoner $80 \times 80 \times 8mm$.

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl}}{\gamma_{m0}} f_y = \frac{59,5 \times 10^3}{1,05} \times 355 = 20,1 kNm$$

$$P_{maks} = \frac{M_{pl,Rd}}{L_c} = \frac{20,1 \times 10^6}{2500} = 8,0 kN \quad (C.18)$$

Kontroll av sveis

Sveisens beregnede kapasitet er gjort etter knutepunktstandarden [5]. To verdier endres fra beregning av sveiskapasitet for knutepunkt A og B. A-mål økes fra $4mm$ til $6mm$ og lengden av sveisen som utsettes for strekk settes lik $120mm$. Å sette den strekkbelastede delen av sveisen lik $80mm$ er konservativt, og økes derfor med en rimelige størrelse. $120mm$ anses fortsatt som et konservativt valg for lengden av profilet som utsettes for strekk.

Strekkapasitet:

$$A_{w,t} = a_c \times l_{sveis,t,eff} = 6 \times 120 = 720 mm^2$$

$$F_{w,t,Rd} = \frac{f_u A_{w,t}}{\sqrt{2} \beta_w \gamma_{M2}} = \frac{490 \times 720}{\sqrt{2} \times 0,9 \times 1,25} = 221,7 kN$$

$$P_{maks} = \frac{1}{L_c} F_{w,t,Rd} h_v = \frac{1}{2500} \times 221,7 \times 72 = 6,4 \text{ kN} \quad (\text{C.19})$$

Utrekning av skjærkapasitet er uendret fra beregning gjort for knutepunkt A og B med unntak av økt a-mål fra 4 mm til 6 mm. Her vises kun tallstørrelsen.

Skjærkapasitet:

$$P_{maks} = F_{w,s,Rd} = 241,4 \text{ kN} \quad (\text{C.20})$$

Kapasitet av bolter

Avskjæringskapasitet:

$$F_{v,Rd} = 60,3 \text{ kN}$$

$$P_{maks} = F_{v,Rd} \times 4 \text{ skruer} = 60,3 \times 4 = 241,2 \text{ kN} \quad (\text{C.21})$$

Strekkapasitet:

$$F_{t,Rd} = 90,4 \text{ kN}$$

$$\text{Momentarm : } H = c + m_x = 93,6 + 38,2 = 132 \text{ mm}$$

$$P_{maks} = \frac{1}{L_c} F_{t,Rd} \times H \times 2 \text{ skruer} = \frac{1}{2500} \times 90,4 \times 132 \times 2 = 9,5 \text{ kN} \quad (\text{C.22})$$

Krav for å unngå skruebrudd, hentet fra konferanseforedrag av Aalberg et al [1]:

$$F_{t,Rd} = 90,4 \text{ kN} \geq F_{t,Ed} = 1,3 \frac{M_p}{b_p} = 1,3 \times \frac{8,85 \times 10^6}{250} = 46 \text{ kN} - > \text{OK} \quad (\text{C.23})$$

Kontroll av endeplate

Platens flytemoment per lengdeenhet (WELDOX 700):

$$m_p = 0,25 t_p^2 f_y = 0,25 \times 6^2 \times 700 = 6300 \text{ Nmm/mm}$$

Bruddmønster 1:

$$\begin{aligned}
 M_P &= 2m_p c \left[1 + \frac{c + 2m_x}{m_x} + \frac{L + c + t}{r} \right] \\
 &= 2 \times 6300 \times 93,60 \left[1 + \frac{93,60 + 2 \times 38,20}{38,20} + \frac{137,22 + 93,6 + 47,32}{26,06} \right] \\
 &= 19,02 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$P_{maks} = \frac{1}{L_c} M_P = \frac{1}{2,5} \times 19,02 = 7,61 \text{ kN} \quad (\text{C.24})$$

Bruddmønster 2:

$$\begin{aligned}
 M_P &= 2m_p b \left[\frac{c}{m_x} + 1 \right] \\
 &= 2 \times 6300 \times 250 \left[\frac{93,6}{38,2} + 1 \right] \\
 &= 10,87 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$P_{maks} = \frac{1}{L_c} M_P = \frac{1}{2,5} \times 10,87 = 4,35 \text{ kN} \quad (\text{C.25})$$

Bruddmønster 3:

$$\begin{aligned}
 M_P &= 2m_p c \left[\frac{L_1}{y} + \frac{L_2 + L_3}{a} + \frac{L_4}{v} \right] \\
 &= 2 \times 6300 \times 93,60 \left[\frac{250}{140,40} + \frac{176,78 + 110,59}{54,02} + \frac{31,40}{78,20} \right] \\
 &= 8,85 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

$$P_{maks} = \frac{1}{L_c} M_P = \frac{1}{2,5} \times 8,85 = 3,54 \text{ kN} \quad (\text{C.26})$$

D. Beregning av rotasjonsstivhet for knutepunkt A og B

Her vil stivhetsberegning for knutepunkt A og B utføres med nominelle verdier hentet fra figurer i kapittel 7/8.

Stivhetskoeffisienter

Endeplate påkjent av bøyning:

$$k_5 = \frac{0,9l_{eff}t_p^3}{m^3} \quad (D.1)$$

Skruer påkjent av strekk:

$$k_{10} = \frac{1,6A_s}{L_b} \quad (D.2)$$

$$t_p = 6mm, \quad A_s = 157mm^2$$

Boltens tøyningsslengde beregnes etter verdier i 3.5:

$$L_b = \frac{t_h + t_n}{2} + 2t_w + t_p + t_b = \frac{10 + 13}{2} + 2 \times 3 + 6 + 30 = 53,5mm \quad (D.3)$$

D.1 Knutepunkt A

D.1.1 Sterk akse

$$l_{eff} = \frac{b_p}{2} = 50mm \quad (D.4)$$

$$k_5 = \frac{0,9 \times 50 \times 6^3}{36^3} = 0,208mm \quad (D.5)$$

$$k_{10} = \frac{1,6 \times 157}{53,5} \times \frac{1}{2} = 2,348 \text{ mm} \quad (\text{D.6})$$

$$k_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}} = 0,191 \text{ mm} \quad (\text{D.7})$$

$$S_{j,ini} = k_{tot} E Z^2 = 0,191 \times 210000 \times 120^2 = 578 \frac{\text{kNm}}{\text{rad}} \quad (\text{D.8})$$

D.1.2 Svak akse

$$l_{eff} = m_x \left[\frac{b_p}{s} + \frac{L}{r} \right] = 36 \times \left[\frac{100}{71} + \frac{113,2}{57,9} \right] = 121,1 \text{ mm} > 100 \text{ mm} \quad (\text{D.9})$$

$$k_5 = \frac{0,9 \times 100 \times 6^3}{36^3} = 0,417 \text{ mm} \quad (\text{D.10})$$

$$k_{10} = \frac{1,6 \times 157}{53,5} = 4,695 \text{ mm} \quad (\text{D.11})$$

$$k_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}} = 0,383 \text{ mm} \quad (\text{D.12})$$

$$S_{j,ini} = k_{tot} E Z^2 = 0,383 \times 210000 \times \left(\frac{1}{2} \times 100 \right)^2 = 201 \frac{\text{kNm}}{\text{rad}} \quad (\text{D.13})$$

D.2 Knutepunkt B

D.2.1 Sterk akse

$$l_{eff} = \frac{b_p}{2} = 50 \text{ mm} \quad (\text{D.14})$$

$$k_5 = \frac{0,9 \times 50 \times 6^3}{36^3} = 0,208 \text{ mm} \quad (\text{D.15})$$

$$k_{10} = \frac{1,6 \times 157}{53,5} = 4,695 \text{ mm} \quad (\text{D.16})$$

$$k_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}} = 0,199 \text{ mm} \quad (\text{D.17})$$

$$S_{j,ini} = k_{tot} E Z^2 = 0,199 \times 210000 \times 120^2 = 602 \frac{\text{kNm}}{\text{rad}} \quad (\text{D.18})$$

D.2.2 Svak akse

$$l_{eff} = \frac{m_x}{2z_s}(2b_p^2 + s^2) = \frac{36}{2 \times 70 \times 48}(2 \times 100^2 + 48^2) = 119,5 \text{ mm} > 100 \text{ mm} \quad (\text{D.19})$$

$$k_5 = \frac{0,9 \times 100 \times 6^3}{36^3} = 0,417 \text{ mm} \quad (\text{D.20})$$

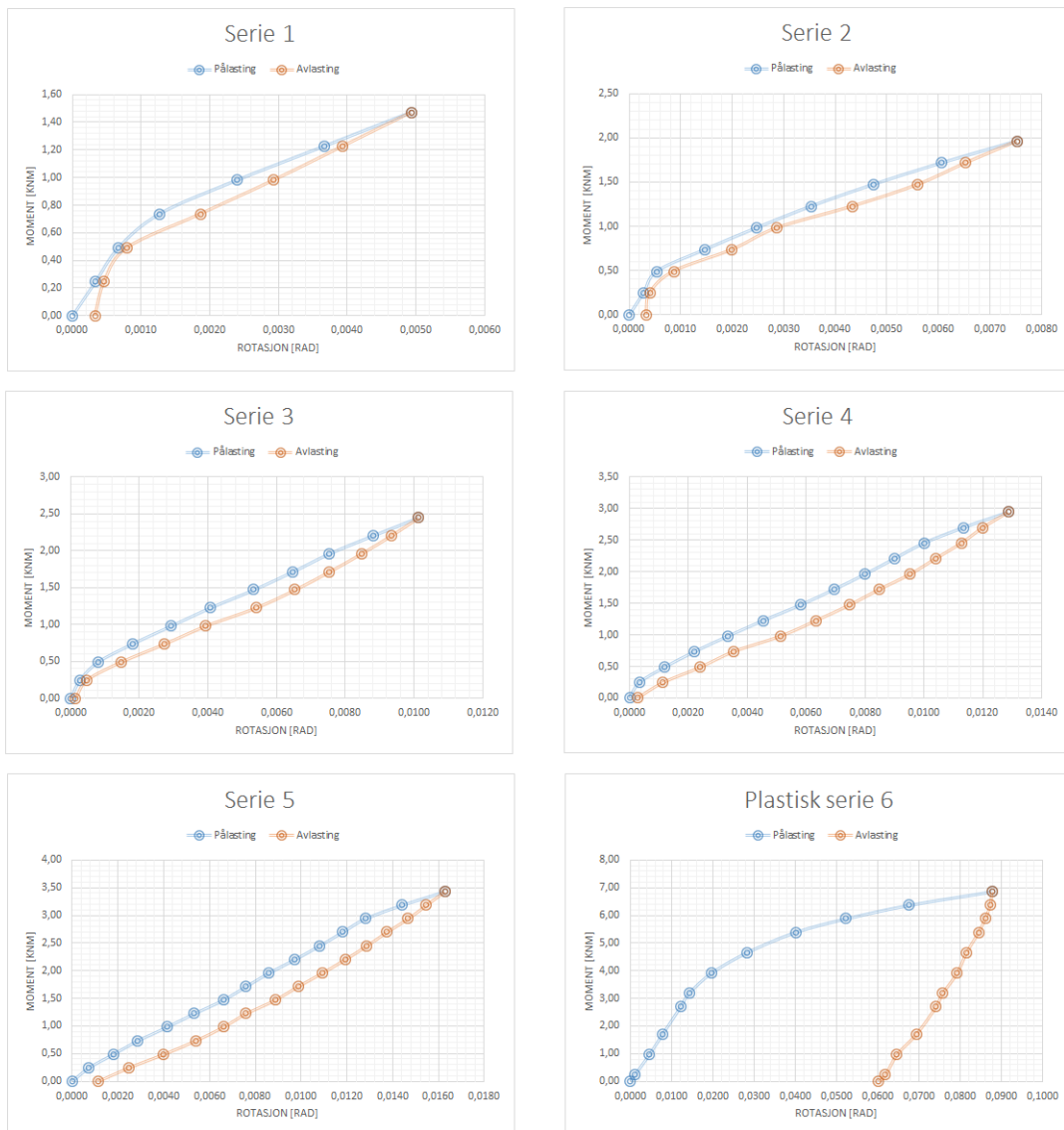
$$k_{10} = \frac{1,6 \times 157}{53,5} = 4,695 \text{ mm} \quad (\text{D.21})$$

$$k_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}} = 0,383 \text{ mm} \quad (\text{D.22})$$

$$S_{j,ini} = k_{tot} E z^2 = 0,383 \times 210000 \times 70^2 = 394 \frac{\text{kNm}}{\text{rad}} \quad (\text{D.23})$$

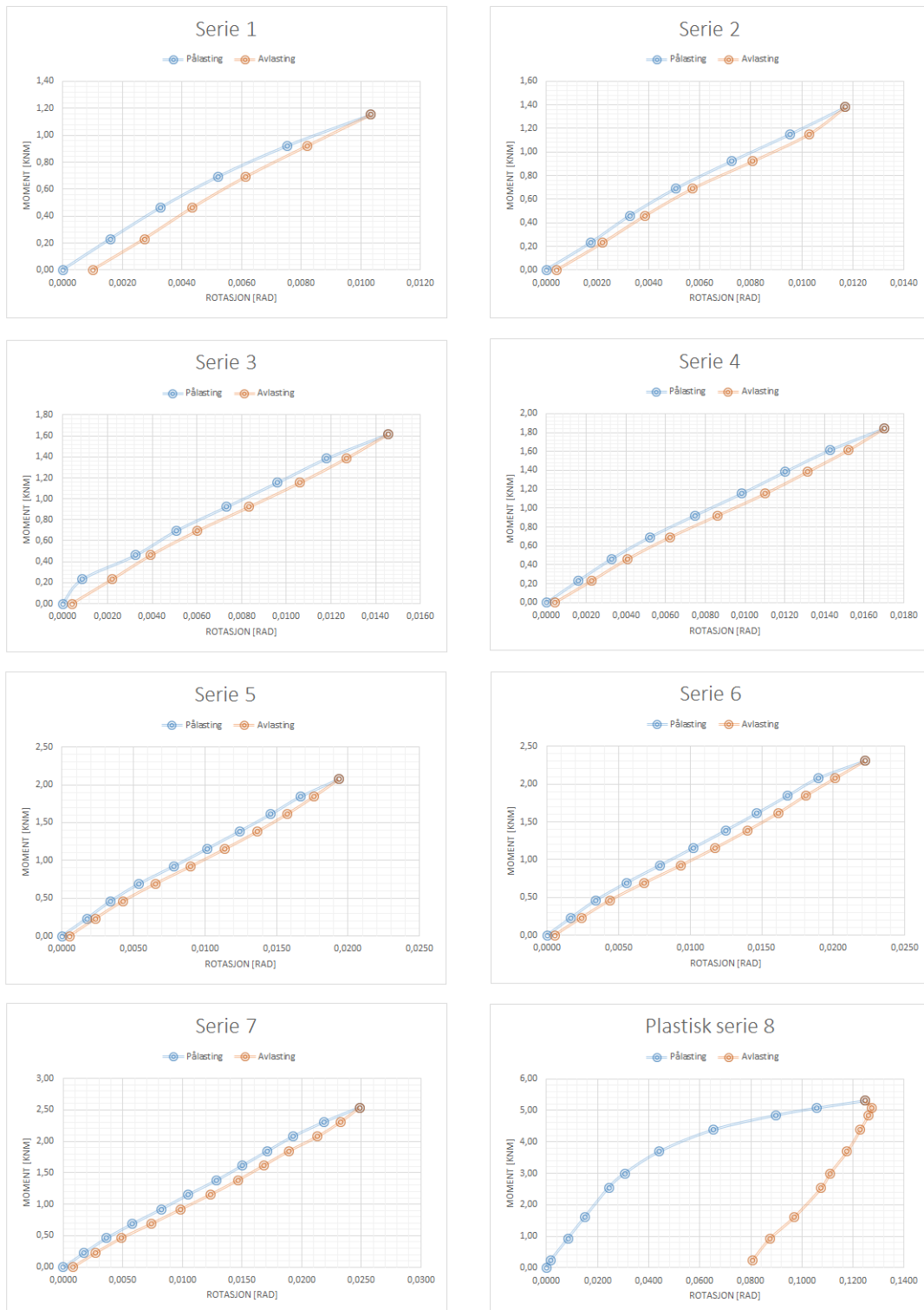
E. Moment-rotasjon-kurver fra laboratorieforsøk

E.1 Knutepunkt A - sterk akse



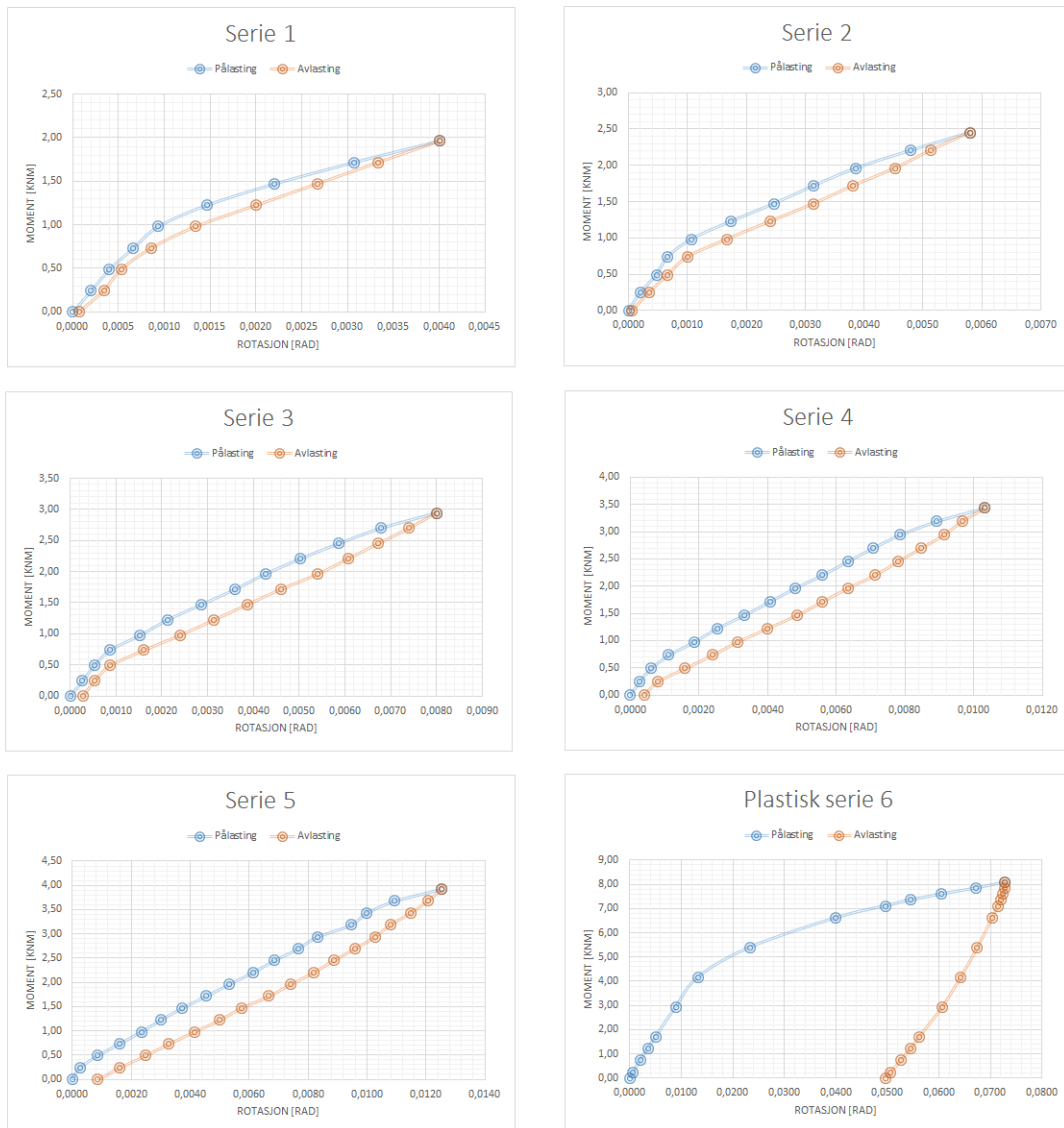
Figur E.1: Forsøksserier - Knutepunkt A, sterk akse

E.2 Knutepunkt A - svak akse



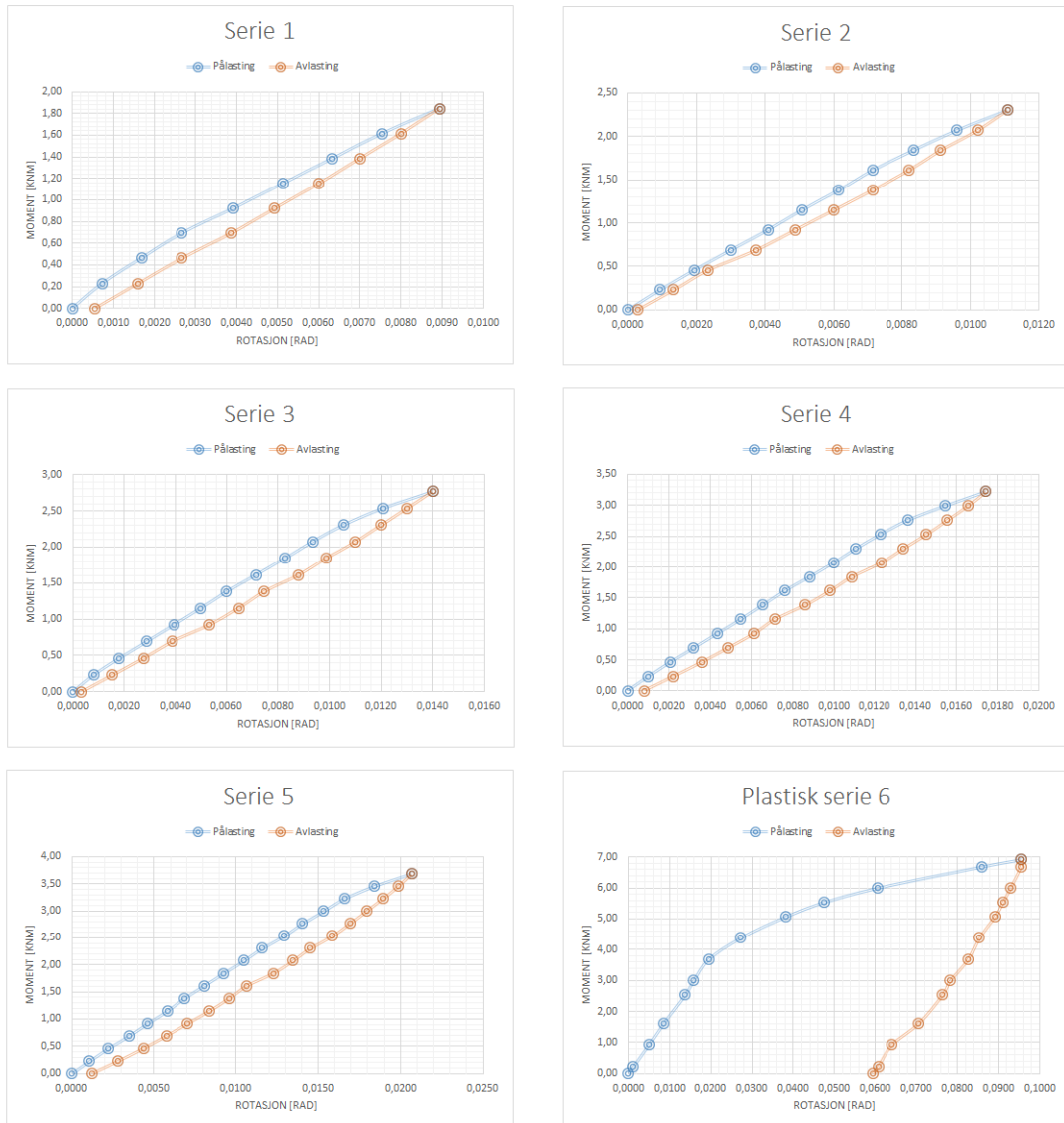
Figur E.2: Forsøksserier - Knutepunkt A, svak akse

E.3 Knutepunkt B - sterk akse



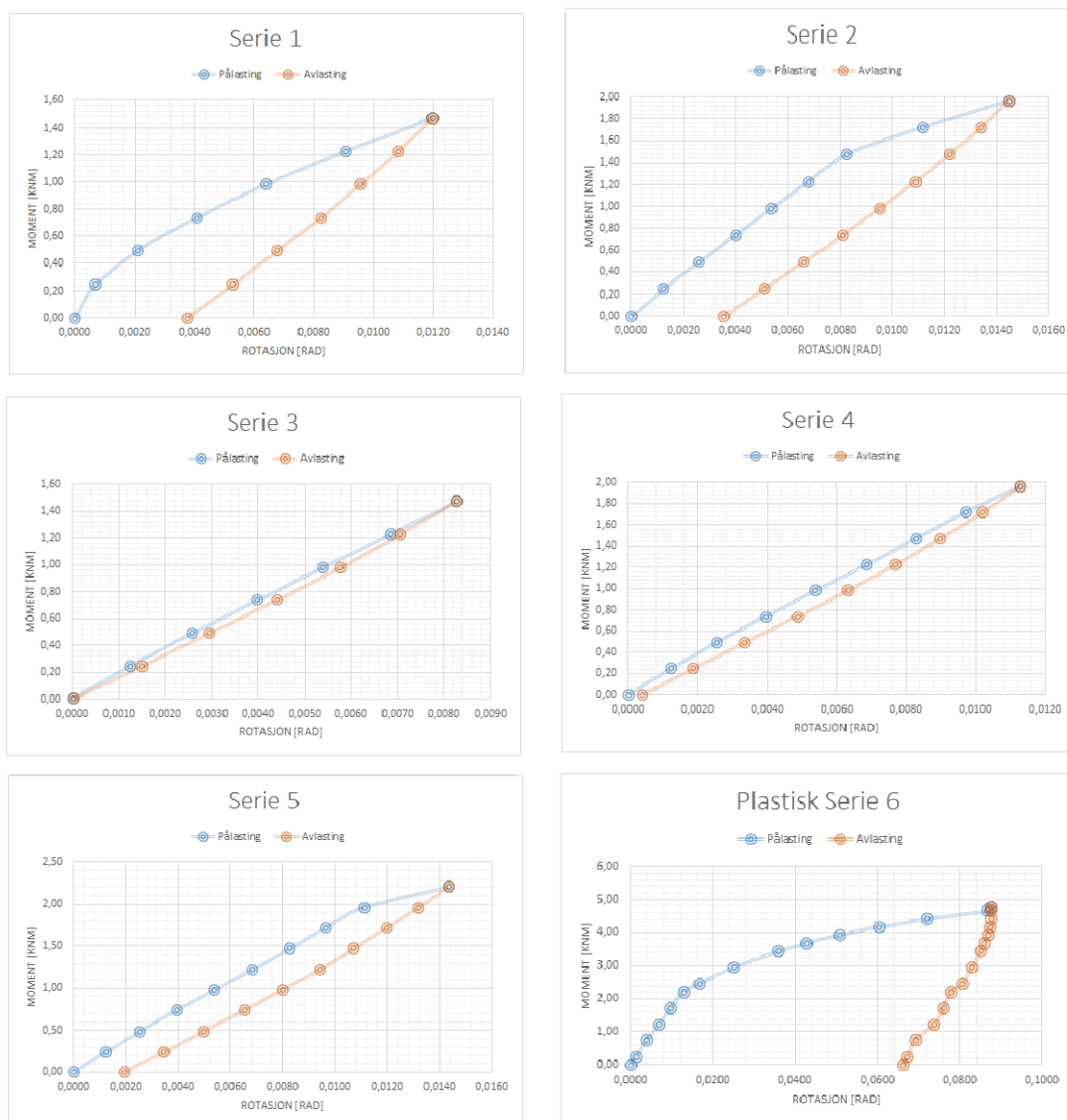
Figur E.3: Forsøksserier - Knutepunkt B, sterk akse

E.4 Knutepunkt B - svak akse



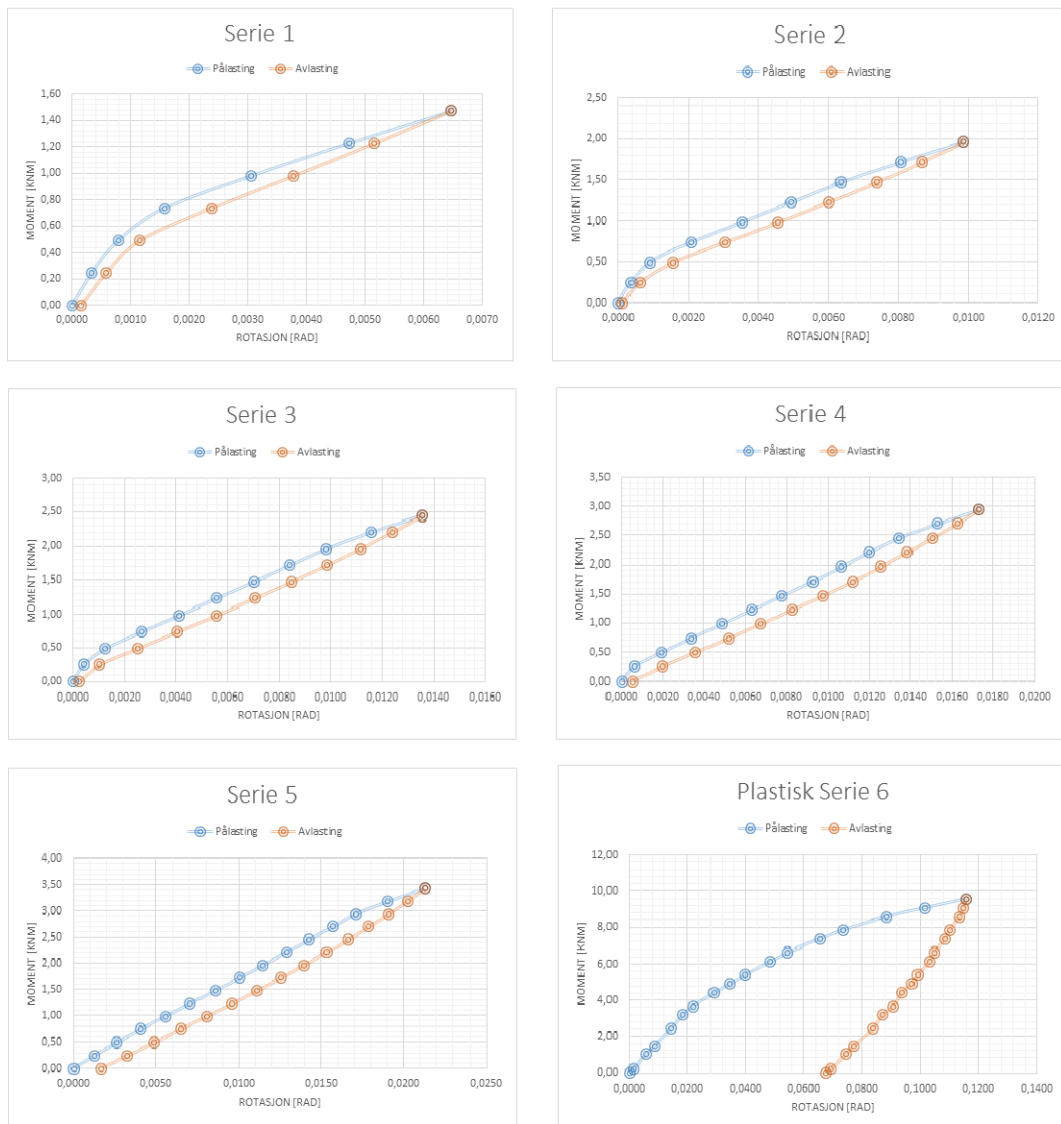
Figur E.4: Forsøksserier - Knutepunkt B, svak akse

E.5 Knutepunkt C - Endeplate av S355



Figur E.5: Forsøksserier - Knutepunkt C, S355

E.6 Knutepunkt C - Endeplate av WELDOX 700



Figur E.6: Forsøksserier - Knutepunkt C, WELDOX 700