

Stivhet til endeplateforbindelser i hulprofil

Bjørg Edvardsen Egeland
Inger-Marie Torstvedt

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2013

Hovedveileder: Arne Aalberg, KT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for konstruksjonsteknikk



MASTEROPPGAVE 2013

FAGOMRÅDE: Stålkonstruksjoner	DATO: 7. juni 2013	ANTALL SIDER: 145 + 50
----------------------------------	-----------------------	---------------------------

TITTEL:

Stivhet til endeplateforbindelser i hulprofil

Stiffness of end plate joints in hollow sections

UTFØRT AV:

Inger-Marie Torstvedt og Bjørg Edvardsen Egeland



SAMMENDRAG:

Eurokode 3 del 1-8 (NS-EN 1993-1-8) gir beregningsregler for stivheten til knutepunkt med H- og I-profiler. Beregningen baserer seg på en komponentmetode der knutepunktet deles inn i basiskomponenter med kjent oppførsel. Basiskomponentene kombineres så for å beskrive oppførselen til hele knutepunktet. Beregningsreglene i Eurokoden dekker ikke knutepunkt med hulprofil direkte og en alternativ stivhetsmodell ble derfor utviklet av Fredrik Torp Karlsen i hans studentarbeid. Modellen tar hensyn til den delen av endeplaten som ligger innenfor hulprofilen. Det tas i denne oppgaven utgangspunkt i Karlsens modell for vurdering av stivheten til strekkskjøter med hulprofil.

Det er gjennomført laboratorieforsøk for seks knutepunkter med ulik geometri. Forsøkene er gjennomført både med og uten forspente bolter. Dette er gjort for å kunne vurdere betydningen av forspenning for stivheten. Forsøkene er deretter simulert numerisk i elementmetodeprogrammet Abaqus. De numeriske simuleringene er sammenlignet med laboratorieforsøkene og håndberegninger etter Eurokoden og Karlsens stivhetsmodell.

Sammenligningen viser at Karlsens stivhetsmodell estimerer stivheten bedre enn Eurokoden. Samtidig viser den at stivhetsmodellen overestimerer stivheten i forhold til stivheter funnet i laboratorieforsøk og numeriske simuleringer. Ved å gjennomføre en parameterstudie med ulike knutepunktsgeometrier justeres den opprinnelige stivhetsmodellen. Den justerte modellen gir mindre gjennomsnittlige avvik i forhold til laboratorieforsøkene og de numeriske simuleringene enn den opprinnelige modellen.

Det er også utviklet en korreksjonsfaktor for Eurokoden med mål om å kunne benytte det eksisterende formelverket for H- og I-profiler for knutepunkt med hulprofil. Eurokoden med korreksjonsfaktor gir høyere gjennomsnittlige avvik, men mindre spredning i resultatene enn den justerte stivhetsmodellen. Likevel, det kreves store korreksjoner for de fleste knutepunktsgeometriene for at Eurokoden skal gi et godt estimat av stivheten. Det betyr at modellen som inkluderer endeplaten innenfor hulprofilen estimerer stivheten til strekkskjøter med hulprofil best.

FAGLÆRER: Førsteamanuensis Arne Aalberg

UTFØRT VED: Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU

MASTEROPPGAVE 2013

for

Inger-Marie Torstvedt og Bjørg Edvardsen Egeland

Stivhet til endeplateforbindelser i hulprofil

Stiffness of end plate joints in hollow sections

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

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

Oppgaven består av følgende aktiviteter:

- Det skal gjøres rede for beregningsmetoder og konstruksjonsregler (NS EN 1993-1-8) for skrudde endeplateskjøter for rektangulære hulprofiler. Det skal sees spesielt på firkantprofiler med påsveiset endeplate, men det kan med fordel også sees på skjøter for sirkulære profiler (rør).
- Det skal gis en kort oppsummering av tidligere studentarbeider og litteratur (artikler) på området.
- Det skal utføres numerisk beregning av utvalgte geometrier av hulprofil knutepunkter og skjøter, og stivhet og kapasitet skal diskuteres og sammenlignes med tidligere

forsøk og analytiske modeller. Videre bør simuleringene belyse hvordan skjøtene påvirkes av endeplatens utforming og boltene plassering, og hva som er vesentlig for utvikling av hevarmkrefter og deformasjoner, og for utvikling av stivhet gjennom belastningsforløpet.

- Det skal sees på stivhetsmodeller (håndregnemodeller) for endeplateskjøtene, og forsøkes å etablere modeller og stivhetsparametere som passer til data fra forsøk. Spesielt er det av interesse å vurdere hvilken effekt oppspenning av bolter og skjevheter i platene (fra sveisingen) gir for initialstivheten og oppførselen til skjøtene.
- Det skal gjennomføres egne forsøk med kompletterende forsøksgeometrier, rapporteres og sammenlignes med tidligere forsøk og dimensjoneringsregler.
- Det kan foreslås forbedringer til eksisterende modeller/regler, eller alternative modeller.

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

Besvarelsen organiseres i henhold til gjeldende retningslinjer.

Besvarelsen skal leveres til Institutt for konstruksjonsteknikk innen 10. juni 2013.

Faglærer og veileder er førsteamanuensis Arne Aalberg.

Arne Aalberg, Trondheim, 20/5-2013

Forord

Denne rapporten er en masteroppgave utarbeidet ved Institutt for konstruksjonsteknikk ved Norges teknisk- naturvitenskapelige universitet (NTNU) våren 2013. Masteroppgaven utgjør 20 ukers arbeid og tilsvarer 30 studiepoeng.

Rapporten tar for seg stivhet til strekkbelastede endeplateforbindelser i kvadratiske hulprofil, og er en videreføring av tidligere studentarbeider ved Institutt for konstruksjonsteknikk. Det er utført studie av gjeldende regelverk og eksisterende teori samt laboratorieforsøk og numeriske simuleringer i elementmetodeprogrammet Abaqus.

Oppgaven er i hovedsak skrevet for andre med bakgrunn innen konstruksjonsteknikk.

Vi ønsker å rette en stor takk til vår veileder førsteamanuensis Arne Aalberg ved Institutt for konstruksjonsteknikk for god faglig oppfølging gjennom arbeidet med oppgaven. I tillegg vil vi også takke overingeniør ved Institutt for konstruksjonsteknikk Trond Auestad for hjelp med utførelse av laboratorieforskene.

Trondheim, juni 2013

Inger-Marie Torstvedt

Bjørg Edvardsen Egeland

Sammen drag

Eurokode 3 del 1-8 (NS-EN 1993-1-8) gir beregningsregler for stivheten til knutepunkt med H- og I-profiler. Beregningen baserer seg på en komponentmetode der knutepunktet deles inn i basiskomponenter med kjent oppførsel. Basiskomponentene kombineres så for å beskrive oppførselen til hele knutepunktet. Beregningsreglene i Eurokoden dekker ikke knutepunkt med hulprofil direkte og en alternativ stivhetsmodell ble derfor utviklet av Fredrik Torp Karlsen i hans studentarbeid. Modellen tar hensyn til den delen av endeplaten som ligger innenfor hulprofilet. Det tas i denne oppgaven utgangspunkt i Karlsens modell for vurdering av stivheten til strekkskjøter med hulprofil.

Det er gjennomført laboratorieforsøk for seks knutepunkter med ulike geometri. Forsøkene er gjennomført både med og uten forspente bolter. Dette er gjort for å kunne vurdere betydningen av forspenning for stivheten. Forsøkene er deretter simulert numerisk i elementmetodeprogrammet Abaqus. De numeriske simuleringene er sammenlignet med laboratorieforsøkene og håndberegninger etter Eurokoden og Karlsens stivhetsmodell.

Sammenligningen viser at Karlsens stivhetsmodell estimerer stivheten bedre enn Eurokoden. Samtidig viser den at stivhetsmodellen overestimerer stivheten i forhold til stivheter funnet i laboratorieforsøk og numeriske simuleringer. Ved å gjennomføre en parameterstudie med ulike knutepunktsgeometrier justeres den opprinnelige stivhetsmodellen. Den justerte modellen gir mindre gjennomsnittlige avvik i forhold til laboratorieforsøkene og de numeriske simuleringene enn den opprinnelige modellen.

Det er også utviklet en korreksjonsfaktor for Eurokoden med mål om å kunne benytte det eksisterende formelverket for H- og I-profiler for knutepunkt med hulprofil. Eurokoden med korreksjonsfaktor gir høyere gjennomsnittlige avvik, men mindre spredning i resultatene enn den justerte stivhetsmodellen. Likevel, det kreves store korreksjoner for de fleste knutepunktsgeometriene for at Eurokoden skal gi et godt estimat av stivheten. Det betyr at modellen som inkluderer endeplaten innenfor hulprofilet estimerer stivheten til strekkskjøter med hulprofil best.

Abstract

Eurocode 3 part 1-8 (NS-EN 1993-1-8) dictates rules of calculation for the stiffness of joints in H- and I-sections. The calculation is based on a component method where the joint is divided into basic components with a known behaviour. The basic components are combined to describe the behaviour of the whole joint. The rules of calculation in the Eurocode do not directly apply to joints in hollow sections and an alternative stiffness model was therefore developed by Fredrik Torp Karlsen in his master's thesis. The model takes into consideration the part of the end plate inside the hollow section. In this master's thesis, Karlsen's model is used as a base for assessment of the stiffness of joints in tension with hollow sections.

Laboratory tests of six joints with different geometries have been completed. The tests are done both with and without pre-tensioned bolts. This is to assess the significance of pretension for the stiffness. The tests are then numerically simulated in the finite element method program Abaqus. The numeric simulations are compared to the laboratory tests and hand calculations according to the Eurocode and Karlsen's stiffness model.

The comparison shows that Karlsen's stiffness model estimates the stiffness better than the Eurocode. However, it shows that the stiffness model overestimates the stiffness in relation to stiffnesses found in laboratory tests and numeric simulations. By completing a parameter study with different joint geometries, the original stiffness model is adjusted. The adjusted model gives lower average deviations than the original model, when compared to the laboratory tests and the numeric simulations.

A correction factor for the Eurocode has been developed, with the goal of being able to use the existing rules of calculation for H- and I-sections for joints in hollow sections. The Eurocode with the correction factor gives a higher average deviation, but with less of a spread in results than the adjusted stiffness model. Still, large corrections are required for most joint geometries if the Eurocode is to give a good estimation of the stiffness. This indicates that the model which includes the end plate inside the hollow section gives the best estimation of the stiffness of joints in hollow sections.

Innhold

1 Innledning	1
2 Konstruksjonsanalyse og klassifisering	3
2.1 Innledning	3
2.2 Klassifisering av knutepunkt	3
2.3 Globale analysemetoder	4
2.3.1 Elastisk global analyse	4
2.3.2 Stiv-plastisk global analyse	5
2.3.3 Elastisk-plastisk global analyse	6
3 Beregningsregler i Eurokoden	7
3.1 Innledning	7
3.2 Komponentmetoden	7
3.2.1 T-stykke	7
3.2.2 Bruddformer	9
3.3 Hevarkraft	10
3.4 Stivhetskoeffisienter fra Eurokoden	12
3.5 Utledning av stivhetskoeffisienter for plate og bolt i Eurokoden	12
3.5.1 Stivhetskoeffisient for endeplate, k_5	12
3.5.2 Stivhetskoeffisient for bolt, k_{10}	16
3.5.3 Total stivhetskoeffisient	17
4 Stivhetsmodell	19
4.1 Innledning	19
4.2 Statisk grunnsystem	19
4.3 Utledning av boltekraft	20
4.4 Utledning av platens stivhetskoeffisient	21
4.5 Utledning av boltenes stivhetskoeffisient	23
4.6 Tosidig knutepunkt	24
5 Laboratorieforsøk	25
5.1 Innledning	25
5.2 Prøvegeometrier	25
5.2.1 Oppmåling av prøvene	26

5.3	Strekforsøk av endeplate- og hulprofilmaterialet	27
5.4	Om laboratorieforsøket	31
5.4.1	Prøveutstyr	31
5.4.2	Utførelse	32
5.5	Resultater fra laboratorieforsøkene	33
5.5.1	Bildebehandling av kameramålingen	33
5.5.2	Prøve A1	36
5.5.3	Prøve B1	39
5.5.4	Prøve A2	41
5.5.5	Prøve B2	43
5.5.6	Prøve C	46
5.5.7	Prøve D	48
5.6	Sammenligning av stivheter	50
5.6.1	Stivhet beregnet med utkragermodell	50
5.6.2	Stivhetsdiagrammer	55
6	Håndberegninger	61
6.1	Innledning	61
6.2	Prøve A1	61
6.2.1	Beregning etter Eurokoden	63
6.2.2	Beregning etter Karlsens stivhetsmodell	64
6.3	Øvrige prøver	65
7	Numeriske simuleringer	67
7.1	Innledning	67
7.2	Delkomponenter	67
7.3	Materialdata	68
7.3.1	Sveis	69
7.3.2	Bolt	69
7.3.3	Hulprofil	70
7.3.4	Endeplate 8 mm	71
7.3.5	Endeplate 10 mm	72
7.4	Elementtype og elementinndeling	73
7.5	Sammenstilling	74
7.6	Steg- og inkrementstørrelse	74

7.7	Opplager- og randbetingelser.....	75
7.7.1	Stiv plate og bolt.....	75
7.7.2	Utnyttelse av symmetri	76
7.8	Modellering av delenes samvirke.....	76
7.9	Modelleringsvalg	77
7.9.1	Avlesningspunkt for forskyvning	77
7.9.2	Friksjonskoeffisient	80
7.9.3	Hulprofilform.....	81
7.10	Resultater.....	83
7.10.1	Prøve A1 og B1	83
7.10.2	Prøve A2 og B2	84
7.10.3	Prøve C.....	85
7.10.4	Prøve D	86
8	Sammenligning av stivheter	87
8.1	Innledning.....	87
8.2	Vurdering av stivheter	87
9	Forspenning av bolter	91
9.1	Innledning.....	91
9.2	Strekk i forspente forbindelser	91
9.3	Modellering av forspenning i Abaqus.....	93
9.4	Modelleringseksempel	96
9.5	Vurdering av forspenning i numeriske simuleringer	97
10	Analyse av stivhetsmodell.....	99
10.1	Innledning.....	99
10.2	Aktuelle parametere.....	99
10.3	Valg av tilpasningsmetoder	102
10.3.1	Aritmetisk middel	102
10.3.2	Minste kvadraters metode.....	102
10.4	Forklaring av konservativ stivhet.....	103
10.5	Parameterstudie	104
10.5.1	Varierte parametere.....	104
10.5.2	Resultater fra Karlsens stivhetsmodell.....	105
10.5.3	Resultater fra Abaqus.....	106

10.5.4	Valg av $I_{eff,ini}$	114
10.5.5	Justert stivhetsmodell og resultater fra Abaqus.	116
10.5.6	Sammenligning av stivhetsmodeller med ulik $I_{eff,ini}$	120
10.6	Korreksjonsfaktor for Eurokoden	123
10.6.1	Lineær korreksjonsfaktor	123
10.6.2	Kontroll av konturdiagram	127
10.6.3	Sammenligning av Abaqus og Eurokode med korreksjon.....	128
10.6.4	2. grads korreksjonsfaktor.....	129
10.7	Sammenligning av justert stivhetsmodell og korrigert Eurokode.....	131
10.7.1	Gjennomsnittlige avvik for parametere i stivhetsmodellene	132
10.7.2	Geometrier med store avvik	133
10.7.3	Grunnlag for korreksjonsfaktor	137
10.7.4	Ytterligere geometrier.....	137
11	Endeplate i høyfaststål	139
11.1	Innledning.....	139
11.2	Regler i Eurokoden	139
11.3	Sammenligning av knutepunkt med endeplater med ulik stivhet	139
12	Konklusjon.....	141
13	Indekser.....	143
	Referanser	147
	Bibliografi	149
	Vedlegg.....	1
A	Beregningsregler fra Eurokoden	1
A.1	Hevarmkraft.....	1
A.2	Platestivhetskoeffisient	2
B	Stivhetsmodell	3
B.1	Beregning med Maple	3
B.1.1	Utrekning av plate- og boltestivhetskoeffisient.....	3
C	Laboratoriet	5
C.1	Nøyaktig geometri for endeplateforbindelsene.....	5
C.1.1	Prøve A1	5
C.1.2	Prøve B1	6

C.1.3	Prøve A2	7
C.1.4	Prøve B2	8
C.1.5	Prøve C.....	9
C.1.6	Prøve D	10
C.2	Teoretisk geometri for endeplateforbindelsene	11
C.2.1	Prøvetype A og B	11
C.2.2	Prøvetype C og D.....	12
C.3	Nøyaktig geometri for strekkprøvene	13
C.3.1	Hulprofil 4mm	13
C.3.2	Endeplate 8mm, lengderetning.....	13
C.3.3	Endeplate 8mm, tverretning	13
C.3.4	Endeplate 10mm, lengderetning, prøve 1	14
C.3.5	Endeplate 10mm, lengderetning, prøve 2	14
D	Håndberegninger.....	15
D.1	Prøve B1.....	15
D.1.1	Stivhetsberegning etter Eurokoden	16
D.1.2	Stivhetsberegning etter Karlsens modell	16
D.2	Prøve A2.....	17
D.2.1	Stivhetsberegning etter Eurokoden	18
D.2.2	Stivhetsberegning etter Karlsens modell	18
D.3	Prøve B2.....	19
D.3.1	Stivhetsberegning etter Eurokoden	20
D.3.2	Stivhetsberegning etter Karlsens modell	20
D.4	Prøve C.....	21
D.4.1	Stivhetsberegning etter Eurokoden	22
D.4.2	Stivhetsberegning etter Karlsens modell	22
D.5	Prøve D	23
D.5.1	Stivhetsberegning etter Eurokoden	24
D.5.2	Stivhetsberegning etter Karlsens modell	24
E	Numerisk simulering.....	27
E.1	Materialer	27
E.1.1	Bolt	27

E.1.2	Hulprofil.....	28
F	Analyse av stivhetsmodell	31
F.1	Valg av justert stivhetsmodell	31
F.2	Korreksjonsfaktor for Eurokode	43
F.2.1	Sammenligning av stivhet beregnet med Eurokode med lineær korreksjonsfaktor og Abaqus	43
F.2.2	Sammenligning av stivhet beregnet med Eurokode med 2. grads korreksjonsfaktor og Abaqus	48

Figurer

Figur 2.3.1: Klassifisering av knutepunkt etter stivhet.....	5
Figur 2.3.2: Forenklet bilineær dimensjonerende moment-rotasjon-relasjon.....	6
Figur 3.2.1: Geometri for ekvivalent T-stykke.....	8
Figur 3.2.2: Modell for utstikkende endeplate	8
Figur 3.2.3: Bruddformer for ekvivalent T-stykke	10
Figur 3.3.1: Beregningsmodell for hevarmeffekten i strekkpåkjent forbindelse.....	10
Figur 3.3.2: Statisk system og momentdiagram for ytre last.....	11
Figur 3.3.3: Statisk system og momentdiagram for virtuell enhetslast.....	11
Figur 3.5.1: Krefter på T-stykke fra elastisk deformasjon	13
Figur 3.5.2: Statisk system og momentdiagram for ytre last.....	13
Figur 3.5.3: Statisk system og momentdiagram for virtuell enhetslast.....	13
Figur 3.5.4: Sammenhengen mellom aksialkraft og tøyning	16
Figur 4.2.1: Endeplateforbindelse i hulprofil	19
Figur 4.2.2: Statisk system for ny stivhetsmodell	20
Figur 4.3.1: Statisk system og momentforløp for ytre last	20
Figur 4.3.2: Statisk system og momentforløp for virtuell enhetslast	20
Figur 4.4.1: Statisk system og momentforløp for ytre last	21
Figur 4.4.2: Statisk system og momentforløp for virtuell enhetslast	22
Figur 5.2.1: Spredning av spenning i hulprofilet	27
Figur 5.3.1: Geometri til en standard strekkprøve.....	28
Figur 5.3.2: Strekkprøver etter forsøk.....	28
Figur 5.3.3: Spenning-tøyningskurver, hulprofiltykkelse 4 mm	29
Figur 5.3.4: Spenning-tøyningskurve, endeplatetykkelse 8 mm i lengderetning	29
Figur 5.3.5: Spenning-tøyningskurver, endeplatetykkelse 8 mm i tverretning	30
Figur 5.3.6: Spenning-tøyningskurver, endeplatetykkelse 10 mm i lengderetning (prøve 1) .	30
Figur 5.3.7: Spenning-tøyningskurver, endeplatetykkelse 10 mm i lengderetning (prøve 2) .	31
Figur 5.4.1: Innslisset plate og festemekanisme for nedre del av prøven.....	31
Figur 5.4.2: Prøveutstyr.....	32
Figur 5.4.3: Spraylakkert prøvestykke	33
Figur 5.5.1: Rutenett med påsatte referansepunkt før forsøket.....	34
Figur 5.5.2: Rutenett med påsatte referansepunkt etter forsøk	34
Figur 5.5.3: Kameramålinger fra referansepunkter på hulprofil og endeplate	35
Figur 5.5.4: Kraft-forskyvningskurver for prøve A1 uten forspenning.....	36
Figur 5.5.5: Måling av glipe, A1	36
Figur 5.5.6: Kraftmålinger og forskyvninger fra prøvingsmaskinen.....	37

Figur 5.5.7: Kraft-forskyvningskurver for prøve A1 med forspenning	37
Figur 5.5.8: Kraft-forskyvningskurver for prøve A1 belastet til maksimal kraft.....	38
Figur 5.5.9: Prøve A1 etter forsøk	38
Figur 5.5.10: Kraft-forskyvningskurver for prøve B1 uten forspenning	39
Figur 5.5.11: Måling av glippe, B1	39
Figur 5.5.12: Kraft-forskyvningskurver for prøve B1 med forspenning	40
Figur 5.5.13: Kraft-forskyvningskurver for prøve B1 belastet til maksimal kraft.....	40
Figur 5.5.14: Prøve B1 etter forsøk	41
Figur 5.5.15: Kraft-forskyvningskurver for prøve A2 uten forspenning.....	41
Figur 5.5.16: Måling av glippe, A2	42
Figur 5.5.17: Kraft-forskyvningskurver for prøve A2 med forspenning	42
Figur 5.5.18: Kraft-forskyvningsdiagram for prøve A2 belastet til maksimal kraft.....	42
Figur 5.5.19: Prøve A2 etter forsøk	43
Figur 5.5.20: Kraft-forskyvningskurver for prøve B2 uten forspenning.....	43
Figur 5.5.21: Måling av glippe, B2	44
Figur 5.5.22: Kraft-forskyvningskurver for prøve B2 med forspenning	44
Figur 5.5.23: Kraft-forskyvningskurver for prøve B2 belastet til maksimal kraft.....	45
Figur 5.5.24: Prøve B2 etter forsøk	45
Figur 5.5.25: Kraft-forskyvningskurver for prøve C uten forspenning	46
Figur 5.5.26: Måling av glippe, C	46
Figur 5.5.27: Kraft-forskyvningskurver for prøve C med forspenning	47
Figur 5.5.28: Kraft-forskyvningskurver for prøve C belastet til maksimal kraft	47
Figur 5.5.29: Prøve C etter forsøk.	47
Figur 5.5.30: Kraft-forskyvningskurver for prøve D	48
Figur 5.5.31: Måling av glippe, D	48
Figur 5.5.32: Kraft-forskyvningskurver for prøve D med forspenning.....	49
Figur 5.5.33: Kraft-forskyvningskurver for prøve D belastet til maksimal kraft	49
Figur 5.5.34 Prøve D etter forsøk	49
Figur 5.6.1: Deformasjon av endeplate uten forspenning	51
Figur 5.6.2: Endeplate i bøyning og bolter i strekk	51
Figur 5.6.3: Kraft og deformasjon av utkrager	52
Figur 5.6.4: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve A1 uten forspenning	55
Figur 5.6.5: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve A1 med forspenning	55
Figur 5.6.6: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve B1 uten forspenning	56
Figur 5.6.7: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve B1 med forspenning	56
Figur 5.6.8: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve A2 uten forspenning	57
Figur 5.6.9: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve A2 med forspenning	57
Figur 5.6.10: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve B2 uten forspenning	57
Figur 5.6.11: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve B2 med forspenning	58
Figur 5.6.12: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve C uten forspenning	58
Figur 5.6.13: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve C med forspenning	58

Figur 5.6.14: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve D uten forspenning	59
Figur 5.6.15: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve D med forspenning	59
Figur 6.2.1: Geometriske mål	61
Figur 6.2.2: Beskrivelse av knutepunktet	62
Figur 6.2.3: Flytelinjer langs hulprofil, prøve A1	63
Figur 7.2.1: Ulike forbindelser	68
Figur 7.2.2: Utnyttelse av symmetri i modellering	68
Figur 7.3.1: Materialkurve for sveis	69
Figur 7.3.2: Materialkurve for bolt	70
Figur 7.3.3: Materialkurver for hulprofil	71
Figur 7.3.4: Materialkurve for endeplate 8mm	71
Figur 7.3.5: Materialkurve for endeplate 10mm	72
Figur 7.4.1: Volumelement C3D8R med frihetsgrader	73
Figur 7.4.2: Skjærlåsing og redusert integrasjon	73
Figur 7.5.1: Delkomponenter og elementmodell	74
Figur 7.7.1: Randbetingelser	75
Figur 7.7.2: Randbetingelser på grunn av symmetri	76
Figur 7.8.1: Tie-interaksjon for sveis, endeplate og hulprofil	77
Figur 7.9.1: Målepunkter for avlesning av forskyvning på endeplate og hulprofil	78
Figur 7.9.2: Kraft-forskyvningskurver for ulike avlesningspunkter for forskyvning	78
Figur 7.9.3: Målepunkter for avlesning av forskyvning for endeplate	79
Figur 7.9.4: Kraft-forskyvningskurver for avlesningspunktene på endeplaten	79
Figur 7.9.5: Kraft-forskyvningskurver for friksjonskoeffisienter	80
Figur 7.9.6: Modellering av hulprofilform	81
Figur 7.9.7: Kraft-forskyvningskurver for hulprofilform	82
Figur 7.10.1: Kraft-forskyvningskurver for prøve A1 og B1	83
Figur 7.10.2: Prøve A1 og B1 ved belastning på henholdsvis 201.5 kN og 160.7 kN	83
Figur 7.10.3: Kraft-forskyvningskurver for prøve A2 og B2	84
Figur 7.10.4: Prøve A2 og B2 ved belastning på henholdsvis 313 kN og 270.4 kN	84
Figur 7.10.5: Kraft-forskyvningskurve for prøve C	85
Figur 7.10.6: Prøve C ved en belastning på 303.3kN	85
Figur 7.10.7: Kraft-forskyvningskurve for prøve D	86
Figur 7.10.8: Prøve D ved en belastning på 161.6 kN	86
Figur 8.2.1: Sammenligning av stivheter for prøve A1	87
Figur 8.2.2: Sammenligning av stivheter for prøve B1	88
Figur 8.2.3: Sammenligning av stivheter for prøve A2	88
Figur 8.2.4: Sammenligning av stivheter for prøve B2	89
Figur 8.2.5: Sammenligning av stivheter for prøve C	89
Figur 8.2.6: Sammenligning av stivheter for prøve D	89
Figur 9.2.1: Kraftfordeling i strekkbelastet forspent forbindelse	92

Figur 9.3.1: Statisk system med påsatt boltekraft	93
Figur 9.3.2: Statisk system med ytre last og tilhørende momentdiagram	93
Figur 9.3.3: Statisk system påkjent av enhetslast og tilhørende momentdiagram	94
Figur 9.3.4: Definisjon av avstandene m og n	95
Figur 9.3.5: Bredden som F_{bolt} virker over for to bolter og fire bolter	95
Figur 9.3.6: Forspent bolt i Abaqus	95
Figur 9.4.1: Gliper før forspenning i laboratoriet for A2	96
Figur 9.4.2: Kraft-forskyvningskurver for prøve A2 med og uten forspenning.....	97
Figur 10.2.1: Deformert endeplate	100
Figur 10.2.2: Stiv plate inne i hulprofilet.....	101
Figur 10.4.1: Momentstiv ramme	103
Figur 10.4.2: Ramme med leddede hjørner	103
Figur 10.5.1: Kraft-forskyvning for 100x180 mm endeplate, 2 bolter og t_{HUP} 5 mm.....	107
Figur 10.5.2: Stivheter for 80x80x5 mm hulprofil	107
Figur 10.5.3: Sammenheng mellom α , $l_{\text{eff,ini}}$ og K_{el} for prøve A1	114
Figur 10.5.4: Sammenheng mellom K_{el} og $l_{\text{eff,ini}}$ for $\alpha = 1.0$ for prøve A1	115
Figur 10.5.5: Sammenheng mellom K_{el} og $l_{\text{eff,ini}}$ for $\alpha = 1.0$ for A2.....	115
Figur 10.5.6: Sammenheng mellom α , $l_{\text{eff,ini}}$ og K_{el} for de ulike prøvene.....	116
Figur 10.5.7: Gjennomsnittlig avvik.....	121
Figur 10.6.1: Sammenheng mellom $K_{\text{aba}}/K_{\text{EK}}$ og b_p/t_p	123
Figur 10.6.2: Lineær sammenheng for de to koeffisientene	124
Figur 10.6.3: Korreksjonsfaktor med lineær tilpasning, flate i rommet	126
Figur 10.6.4: Korreksjonsfaktor med lineær tilpasning, projisert	126
Figur 10.6.5: Avlesning av korreksjonsfaktor i konturdiagram	127
Figur 10.7.1: Skisse av delen av knutepunktet som studeres	134
Figur 10.7.2: Avlesningspunkter for forskyvning i Abaqus.....	134
Figur 10.7.3: Geometrier brukt til utledning av korreksjonsfaktorer	137
Figur 10.7.4: Ytterligere geometrier i forhold til opprinnelige geometrier	137
Figur 11.3.1: Kraft-forskyvningskurver for endeplate med stål kvalitet S355 og S700	140

Tabeller

Tabell 2.2.1: Type knutepunktmodell, (CEN, 2005)	4
Tabell 3.2.1: Effektive lengder for en endeplate (CEN, 2005).....	9
Tabell 3.4.1 Stivhetskoeffisienter for basiskomponentene	12
Tabell 5.2.1: Prøveprogram våren 2013.....	25
Tabell 5.6.1: Stivhetstall for forsøk uten forspenning.....	59
Tabell 5.6.2: Stivhetstall for forsøk med forspenning til maksimal belastning.....	60
Tabell 6.2.1: Mål for ekvivalent T-stykke, prøve A1.....	62
Tabell 6.2.2: Utregning av l_{eff} , prøve A1	62
Tabell 6.3.1: Beregnet stivhet etter Eurokoden (CEN, 2005).....	65
Tabell 6.3.2: Beregnet stivhet etter stivhetsmodell fra kapittel 4	65
Tabell 7.3.1: Materialdata for sveis (Karlsen, 2011)	69
Tabell 7.3.2: Materialdata for bolt (Karlsen, 2011).....	70
Tabell 7.3.3: Materialdata for hulprofil (Karlsen, 2011)	70
Tabell 7.9.1: Ulike avlesningspunkter for forskyvning, stivheter	78
Tabell 7.9.2: Avlesningspunkter på endeplaten, stivheter	80
Tabell 7.9.3: Stivheter, friksjonskoeffisienter	81
Tabell 7.9.4:Stivheter, hulprofilform.....	82
Tabell 8.2.1: Oppsummering av stivheter for alle geometrier.....	90
Tabell 9.4.1: Parametere for prøve A2.....	96
Tabell 9.4.2: Stivhet fra simulering med og uten forspente bolter	97
Tabell 10.2.1: Stivheter med α lik 1 og ∞ for utvalgte geometrier	101
Tabell 10.5.1: Varierte parametere.....	104
Tabell 10.5.2: Stivhet beregnet med Karlsens stivhetsmodell.....	106
Tabell 10.5.3: Knutepunktstivheter fra Abaqus og Karlsens stivhetsmodell	108
Tabell 10.5.4: Prosentvis avvik sortert etter endeplate og tykkelse på hulprofil	112
Tabell 10.5.5: Gjennomsnittlig avvik fordelt på antall bolter i forbindelsen	113
Tabell 10.5.6: Gjennomsnittlig avvik fordelt på platetykkelsen.....	113
Tabell 10.5.7: Gjennomsnittlig avvik fordelt på platebredde	113
Tabell 10.5.8: Gjennomsnittlig avvik fordelt på platelengde	114
Tabell 10.5.9: Prosentvis avvik for $\alpha = 1.0$ og $l_{eff,ini} = 0.7 l_{eff}$	117
Tabell 10.5.10: Prosentvis avvik for $\alpha = 1.0$ og $l_{eff,ini} = 0.6 l_{eff}$	118
Tabell 10.5.11: Prosentvis avvik for $\alpha = 1.0$ og $l_{eff,ini} = 0.5 l_{eff}$	119
Tabell 10.5.12: Oversikt over kombinasjonstilfeller	120
Tabell 10.5.13: Totalt gjennomsnitt, standardavvik og maksimalverdier.....	120

Tabell 10.5.14: Gjennomsnittlige avvik	121
Tabell 10.5.15: Valg av $I_{eff,ini}$ og α	122
Tabell 10.6.1: Gjennomsnittlig A- og B-koeffisienter sortert etter b_p/I_p	124
Tabell 10.6.2: Koeffisienter for korreksjonsfaktor	125
Tabell 10.6.3: Prosentvis avvik for korrigert stivhet fra Eurokoden	128
Tabell 10.6.4: Koeffisienter for 2. grads korreksjonsfaktor	129
Tabell 10.7.1: Alternative metoder for beregning av stivhet for forbindelser med hulprofil	131
Tabell 10.7.2: Gjennomsnittlig prosentvis avvik fordelt på hulprofiltykkelse	132
Tabell 10.7.3: Gjennomsnittlig prosentvis avvik fordelt på antall bolter	132
Tabell 10.7.4: Gjennomsnittlig prosentvis avvik fordelt på platetykkelse	132
Tabell 10.7.5: Gjennomsnittlig prosentvis avvik fordelt på platebredde	133
Tabell 10.7.6: Gjennomsnittlig prosentvis avvik fordelt på platelengde	133
Tabell 10.7.7: Stivhetsbidrag fra bolt og plate for geometrier med store avvik.....	135
Tabell 10.7.8: Bidrag fra endeplate og bolter til total stivhetskoeffisient	136
Tabell 10.7.9: Avvik for ytterligere geometrier	138

Kapittel 1

Innledning

I knutepunktstandarden NS-EN 1993-1-8 *Dimensjonering av knutepunkter*, er det gitt omfattende beregningsregler for forbindelser i stålrammer og fagverk. Reglene dekker forbindelselementer som skruer, sveiser og plater, samt enkelte komplette knutepunksgeometrier. Reglene dekker i all hovedsak kapasitets- og stivhetsberegning av knutepunkt med I- og H-tverrsnitt. Standarden benytter en komponentmetode, der knutepunktet modelleres som en samling enkle basiskomponenter med kjent oppførsel. For knutepunkter med hulprofil er standardens anvisninger begrenset til typiske fagverkselementer og da kun med hensyn på kapasitet. Denne oppgaven tar for seg stivhet til strekkbelastede endeplateforbindelser i hulprofil.

Oppgaven innledes i kapittel 2 med en gjennomgang av gjeldende regelverk gitt i NS-EN 1993-1-8. Her presenteres sammenhengen mellom klassifisering av knutepunkt og den globale konstruksjonsanalysen. I kapittel 3 gjennomgås beregningsregler for stivhet til knutepunkter slik de er gitt i Eurokoden før stivhetskoeffisientene for endeplate og bolt utledes.

I kapittel 4 presenteres en stivhetsmodell utviklet av Fredrik Torp Karlsen i hans masteroppgave. Stivhetsmodellen gjelder for endeplateforbindelser i hulprofil. Først gjennomgås bakgrunnen for modellen før stivhetskoeffisientene som inngår i modellen utledes.

Det er utført laboratorieforsøk for seks knutepunkter med ulik geometri i forbindelse med oppgaven. Kapittel 5 innledes med å beskrive hvordan forsøkene er utført, og deretter presenteres resultatene. Virkningen av forspente bolter i laboratorieforsøkene studeres til slutt i kapittelet.

I kapittel 6 utføres håndberegninger for knutepunksgeometriene som ble prøvd i laboratorieforsøkene. Det utføres håndberegninger både i henhold til beregningsreglene i Eurokoden og i henhold til stivhetsmodellen som ble utledet i kapittel 4.

For å etterprøve laboratorieforsøkene ble det gjennomført numeriske simuleringer for knutepunkt med tilsvarende geometrier. Kapittel 7 innledes med en beskrivelse av hvordan modelleringen utføres. Videre gjennomgås modelleringsvalg før resultatene fra de numeriske simuleringene presenteres.

I kapittel 8 sammenlignes stivheter funnet fra de numeriske simuleringene med stivheter fra laboratorieforsøkene og håndberegningene etter Eurokoden og stivhetsmodellen fra kapittel 4. Kapittel 9 gir en innføring av hvordan forspenning av boltene virker i et knutepunkt og det beskrives hvordan forspenningen kan modelleres i numeriske simuleringer.

Sammenligningen mellom stivheter i kapittel 8 gir motivasjon for å justere stivhetsmodellen presentert i kapittel 4. Ved å gjennomføre en parameterstudie med ulike knutepunksgeometrier justeres den opprinnelige stivhetsmodellen. Parameterstudien og resultatene presenteres i kapittel 10. I tillegg utvikles det en korreksjonsfaktor for Eurokoden med mål om å kunne benytte det eksisterende formelverket for H- og I-profiler for knutepunkt med hulprofil.

Oppgaven avsluttes med en vurdering av hvordan stivheten til knutepunktet påvirkes av å utføre endeplaten i høyfast stål i stedet for vanlig konstruksjonsstål.

Kapittel 2

Konstruksjonsanalyse og klassifisering

2.1 Innledning

I dette kapitlet blir klassifiserings- og konstruksjonsregler fra *Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner – Del 1-8: Knutepunkter og forbindelser* (CEN, 2005) presentert. Denne delen av Eurokoden vil heretter bli omtalt som knutepunktstandarden. For å oppnå nødvendig presisjon vil setningsoppbygging og ordlyd være tilnærmet lik det som benyttes i knutepunktstandarden.

2.2 Klassifisering av knutepunkt

Ved fordeling av lastvirkningene i en konstruksjon er det nødvendig å kjenne til knutepunktens moment-rotasjon-relasjon. Knutepunkter ble tidligere definert som enten bøyingsstive eller leddet. Den virkelige stivheten til knutepunktet vil vanligvis ligge et sted mellom disse ytterpunktene og har fått betegnelsen delvis bøyingsstivt. For å avgjøre om det i konstruksjonsanalysen er nødvendig å ta hensyn til knutepunktets moment-rotasjon-relasjon, skiller knutepunktstandarden mellom tre forenklede modeller for knutepunktets globale oppførsel:

Nominelt leddet: Det forutsettes at knutepunktet ikke overfører bøyingsmomenter.

Bøyingsstivt: Det forutsettes stivt knutepunkt som betyr at det ikke oppstår vinkelendring mellom komponentene ved overføring av momenter. Det antas dermed at knutepunktets moment-rotasjon-relasjon ikke har betydning for analysen.

Delvis bøyingsstivt: Det er nødvendig å ta hensyn til knutepunktets moment-rotasjon-relasjon i analysen.

Hvilken knutepunktmodell som bør benyttes er avhengig av klassifisering av knutepunktet og valg av analysemetode. I knutepunktstandarden skiller det mellom elastisk analyse, stiv-plastisk analyse og elastisk-plastisk analyse. Sammenhengen mellom klassifisering og analysemetode er vist i Tabell 2.2.1.

Tabell 2.2.1: Type knutepunktmodell, (CEN, 2005)

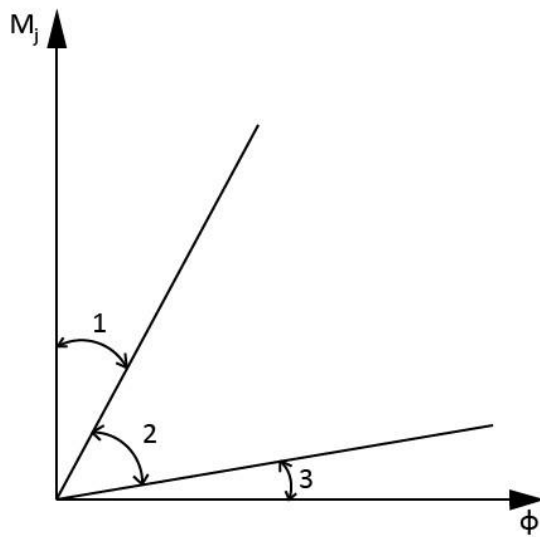
Global analysemetode	Klassifisering av knutepunkt		
	Elastisk	Nominelt leddet	Bøyingsstivt
Stiv-plastisk	Nominelt leddet	Full styrke	Delvis styrke
Elastisk-plastisk	Nominelt leddet	Bøyingsstivt og full styrke	Delvis bøyingsstivt og delvis styrke Delvis bøyingsstivt og full styrke Bøyingsstivt og delvis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

2.3 Globale analysemetoder

I en lastvirkningsanalyse må det velges hvilken global analysemetode som skal benyttes. I dette delkapittelet blir det gjennomgått hvordan knutepunkt klassifiseres for hver av de tre analysemetodene fra knutepunktstandarden.

2.3.1 Elastisk global analyse

I lastvirkningsanalyser der det benyttes en elastisk global analyse bør knutepunktene klassifiseres etter sin rotasjonsstivhet. Et knutepunkt kan klassifiseres som enten stivt, leddet eller delvis stivt ved at initialrotasjonsstivheten, $S_{j,ini}$, sammenlignes med gitte klassifiseringsgrenser. Disse klassifiseringsgrensene er gitt ved at sammenhengen mellom moment og relativ rotasjon deles inn i tre soner, se Figur 2.3.1.



Sone 1: Stivt hvis $S_{j,ini} \geq \frac{k_b EI_b}{L_b}$

der

$k_b = 8$ for rammer med et avstivningssystem som reduserer den horisontale forskyvningen med minst 80 %.

$k_b = 25$ for andre rammer forutsatt at $K_b/K_c \geq 0.1^*$) i hver etasje.

Sone 2: Delvis stivt

Alle knutepunkt i sone 2 bør klassifiseres som delvis stive. Knutepunkt i sone 1 eller 3 kan alternativt også behandles som delvis stive.

Sone 3: Leddet hvis $S_{j,ini} \leq \frac{0.5EI_b}{L_b}$

*) For rammer der $K_b/K_c < 0.1$ bør knutepunktene klassifiseres som delvis stive

K_b er middelverdien av I_b/L_b for alle bjelker i toppen av den aktuelle etasjen;

K_c er middelverdien av I_c/L_c for alle søyler i den aktuelle etasjen;

I_b er bjelkens 2. arealmoment;

I_c er søylens 2. arealmoment;

L_b er bjelkens spennvidde (fra sentrum til sentrum av søylene);

L_c er en søyles etasjehøyde.

Figur 2.3.1: Klassifisering av knutepunkt etter stivhet

Punkt 6 i knutepunktstandarden (CEN, 2005) gir regler for bestemmelse av $S_{j,ini}$ for knutepunkt som forbinder I- eller H-profiler. Regler for knutepunkt med hulprofil dekkes ikke av denne standarden. Likevel presiseres det at et knutepunkt kan klassifiseres på grunnlag av prøving, erfaring fra tilsvarende tilfeller der oppførselen har vært tilfredsstillende eller ved beregninger basert på prøvingsresultater.

2.3.2 Stiv-plastisk global analyse

I en stiv-plastisk global analyse antas materialet å oppføre seg stiv-plastisk som betyr at de elastiske deformasjonene neglisjeres. Knutepunktet klassifiseres etter styrke og betegnes som leddet, full-styrke-forbindelse eller delvis-styrke-forbindelse. Klassifiseringen utføres ved at knutepunktets dimensjonerende momentkapasitet, $M_{j,Rd}$, sammenlignes med den plastiske momentkapasiteten til den svakeste konstruksjonsdelen i knutepunktet, $M_{full-styrke}$.

På samme måte som for den elastisk globale analysen er det gitt klassifiseringsgrenser. Disse grensene er som følger:

- Full styrke-forbindelse:

$$M_{j,Rd} \geq M_{full-styrke}$$

- Delvis styrke-forbindelse:

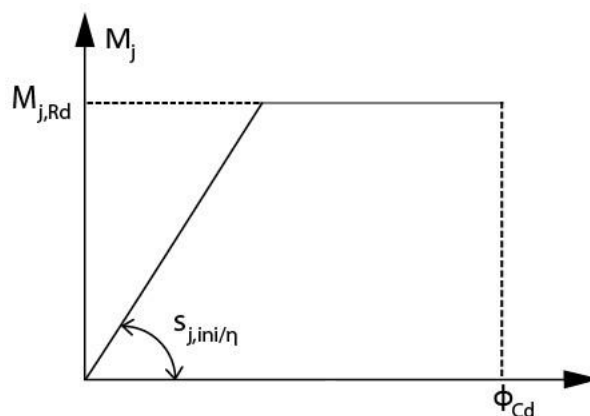
$$0.25M_{j,Rd} < M_{j,Rd} < M_{full-styrke}$$

- Leddet forbindelse:

$$M_{j,Rd} \leq 0.25M_{j,Rd}$$

2.3.3 Elastisk-plastisk global analyse

I en elastisk-plastiske global analyse bør knutepunktene klassifiseres etter både stivhet og styrke. Knutepunktens moment-rotasjon-relasjon bør benyttes for å bestemme lastvirkningene, og som en forenkling kan den bilineære moment-rotasjon-relasjonen fra knutepunktstandard benyttes, se Figur 2.3.2. Figuren viser en lineær sammenheng mellom moment og rotasjon. Det vil gi en lineær stivhet opp til knutepunktets elastiske kapasitet er nådd. Etter dette antas det at momentet er konstant.



Figur 2.3.2: Forenklet bilineær dimensjonerende moment-rotasjon-relasjon

For forbindelser med hulprofil kan, i følge knutepunktstandard, metodene i punkt 7 benyttes for stiv-plastisk analyse og elastisk-plastisk analyse. Disse vil ikke bli presentert her da punkt 7 omhandler et stort antall knutepunktsutforminger.

Kapittel 3

Beregningsregler i Eurokoden

3.1 Innledning

I dette kapitlet presenteres beregningsregler for å bestemme stivhetskoeffisientene til et knutepunkt i følge NS-EN 1993-1-8 (CEN, 2005). I tillegg blir stivhetskoeffisientene for plate og bolt fra Eurokoden utledet. Tilsvarende som for kapittel 2 vil setningsoppbygging og ordlyd ligge nært opptil det som brukes i knutepunktstandarden.

3.2 Komponentmetoden

Beregningsmetoder for å bestemme stivheten til knutepunkter med I- eller H-profil er gitt i punkt 6 i knutepunktstandarden. Konstruksjonsegenskapene til et knutepunkt finnes ved at knutepunktet deles inn i basiskomponenter. Basiskomponentene er kjennetegnet med hver sin elastiske stivhetskoeffisient og komponentene bidrar til én eller flere av knutepunktets konstruksjonsegenskaper. De angitte beregningsreglene for basiskomponentene gjelder ikke spesifikt for knutepunkter med hulprofiler. Likevel gis det i knutepunktstandarden punkt 6.1.1 tillatelse til å benytte beregningsreglene for lignende basiskomponenter i andre knutepunktsutforminger.

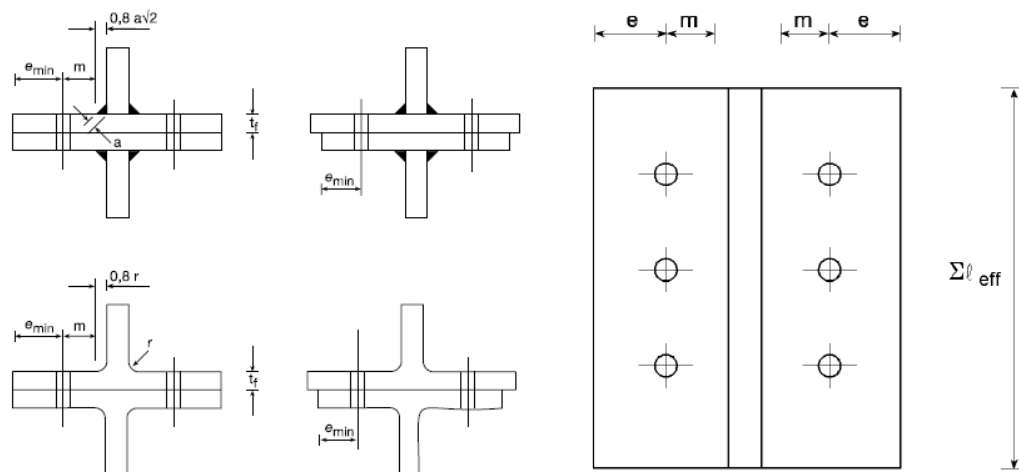
3.2.1 T-stykke

I henhold til knutepunktstandarden kan noen av basiskomponentene i skrueforbindelser dimensjoneres med et ekvivalent T-stykke. Retningslinjer for modellering av disse basiskomponentene er gitt i knutepunktstandarden punkt 6.2.6. Følgende basiskomponenter kan dimensjoneres på denne måten:

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

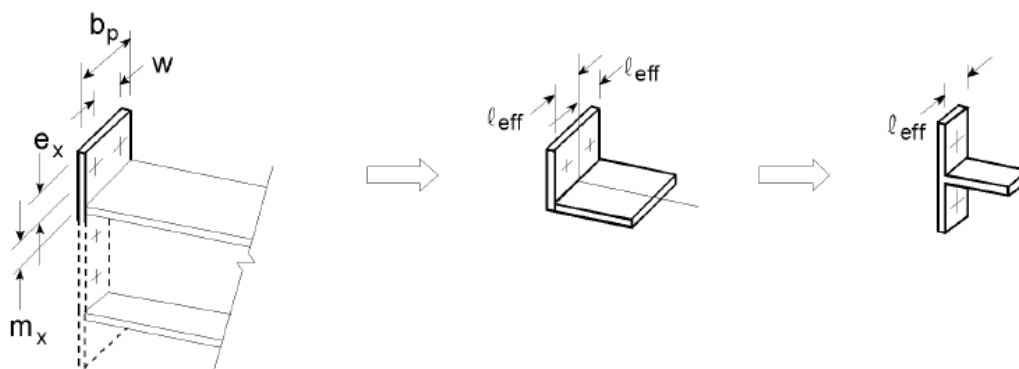
I T-stykkemodellen bestemmes en effektiv lengde, l_{eff} , for den aktuelle basiskomponenten. Den effektive lengden er en teoretisk lengde og tilsvarer ikke nødvendigvis en fysisk lengde i

basiskomponenten. I følge knutepunktstandarden kan mulige bruddformer i flensen i et ekvivalent T-stykke forutsettes å være lik dem som forventes å oppstå i de basiskomponentene T-stykket er modell for. Den effektive lengden Σl_{eff} bestemmes slik at kapasiteten til basiskomponenten i knutepunktet er lik kapasiteten til flensen i T-stykket. Geometrien for et ekvivalent T-stykke er vist i Figur 3.2.1.



Figur 3.2.1: Geometri for ekvivalent T-stykke

I NS-EN 1993-1-8 (CEN, 2005) er det gitt tabeller med effektivlengder for uavstivet søyleflens, avstivet søyleflens og for endeplate. For endeplateforbindelser med hulprofil vil de effektive lengdene for endeplate til en viss grad være overførbare. De effektive lengdene i knutepunktstandarden baserer seg på et T-stykke med en bolt på hver siden av steget. Ettersom flere knutepunktsgemetrier inneholder en utstikkende endeplate gir knutepunktstandarden også en modell for beregning av slike tilfeller. For den utstikkende delen brukes som vist i Figur 3.2.2, m_x og e_x i stedet for m og e fra Figur 3.2.1.



Figur 3.2.2: Modell for utstikkende endeplate

Denne rapporten omhandler boltede endeplateforbindelser i hulprofil. Det er derfor valgt og kun presentere de effektive lengdene som er aktuelle for endeplater. Disse er vist i Tabell 3.2.1.

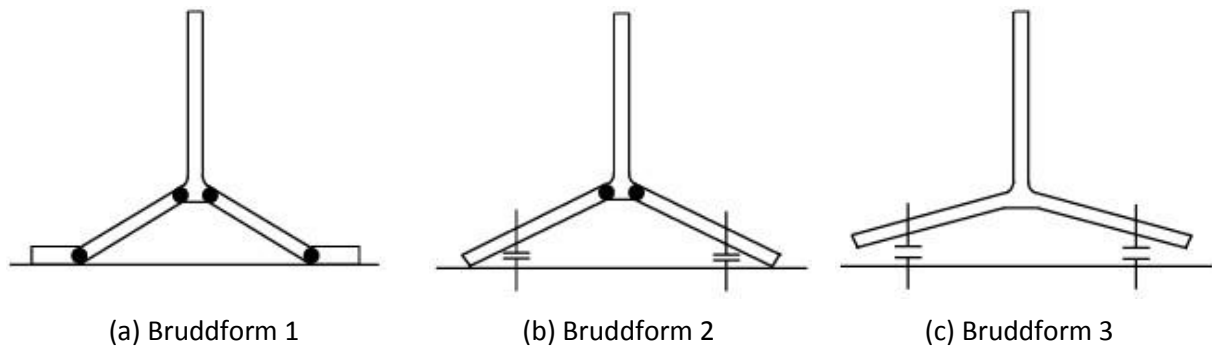
Tabell 3.2.1: Effektive lengder for en endeplate (CEN, 2005)

Plassering av skruerad	Skruerad betraktet som en enkeltstående rad		Skruerad betraktet som en del av en gruppe av skruerader	
	Sirkulært mønster $l_{eff,cp}$	Ikke- sirkulært mønster $l_{eff,nc}$	Sirkulært mønster $l_{eff,cp}$	Ikke- sirkulært mønster $l_{eff,nc}$
Ytre skruerad ved siden av bjelkens strekkflens	Den minste av: $2\pi m_x$ $\pi m_x + w$ $\pi m_x + 2e$	Den minste av: $4m_x + 1.25e_x$ $e + 2m_x + 0.625e_x$ $0.5b_p$ $0.5w + 2m_x + 0.625e_x$	-	-
Indre skruerad ved siden av bjelkens strekkflens	$2\pi m$	am	$\pi m + p$	$0.5p + am - (2m + 0.625e)$
Øvrige indre skruerader	$2\pi m$	$4m + 1.25e$	$2p$	p
Øvrige ytre skruerader	$2\pi m$	$4m + 1.25e$	$\pi m + p$	$2m + 0.625e + 0.5p$
Bruddform 1	$l_{eff,1} = l_{eff,nc}$ men $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$		$\sum l_{eff,1} = \sum l_{eff,nc}$ men $\sum l_{eff,1} \leq \sum l_{eff,cp}$	
Bruddform 2	$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$		$\sum l_{eff,1} = \sum l_{eff,nc}$	

3.2.2 Bruddformer

Flytelinjemetoden ble i utgangspunktet utviklet for beregning av bruddlast for armerte betongplater, og er en generalisering av flyteleddmetoden for bjelker og rammer. I flyteleddmetoden antas det at den plastiske deformasjonen er lokalisert i såkalte flyteledd. Resten av konstruksjonen forblir elastisk og udeformert under en virtuell deformasjon i en kinematisk mulig mekanisme. Tilsvarende antas det for en tverrbelastet plate at all plastisk deformasjon konsentreres til et antall flytelinjer. Flytelinjene danner en kinematisk mekanisme i platen. Resten av platen forblir elastisk og udeformert (Larsen, 2010).

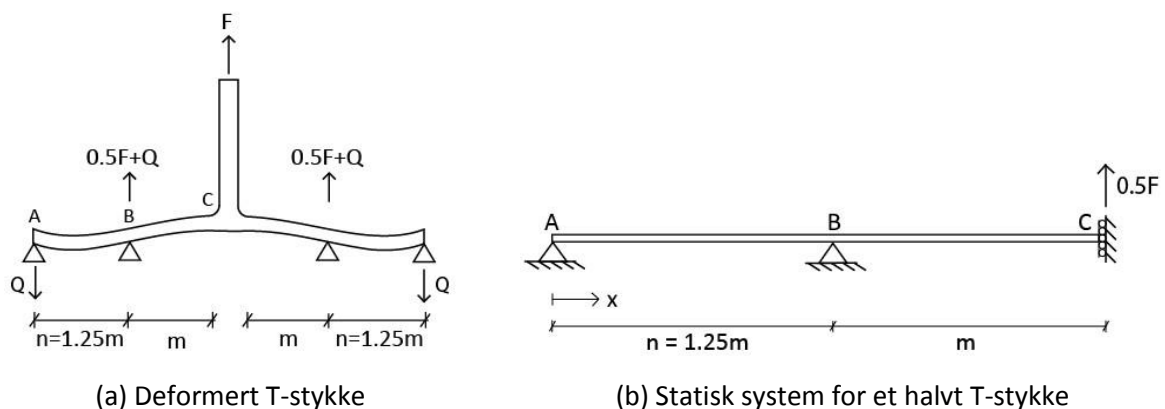
Begge metodene gir en ikke-konservativ løsning med mindre den korrekte mekanismen er funnet, men i motsetning til flyteleddmetoden må man i flytelinjemetoden undersøke et uendelig antall mekanismer. Dette kan være svært arbeidskrevende og løses ved å benytte T-stykkemodellen. Den effektive lengden $\sum l_{eff}$ til T-stykket sikrer at kapasiteten bestemmes av den svakeste mekanismen. Figur 3.2.3 viser de tre mulige bruddformene for beregning av kapasiteten; fullstendig flytning i flensen (1), skruebrudd og flytning i flensen (2) og skruebrudd (3). Disse bruddformene brukes i laboratorieforsøkene til å beskrive bruddmekanismen til prøvene.



Figur 3.2.3: Bruddformer for ekvivalent T-stykke

3.3 Hevarmkraft

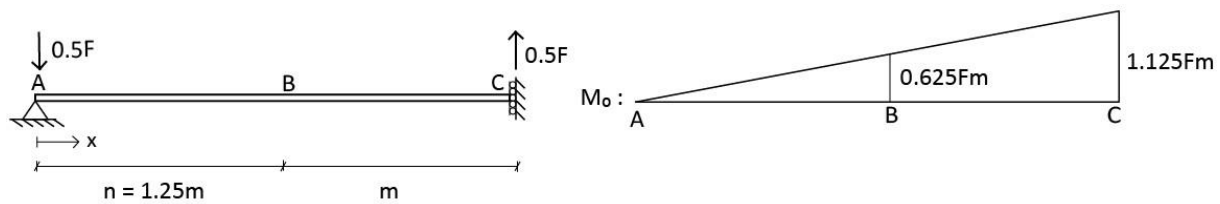
Når et T-stykke belastes med en strekkraft F vil det dannes et kontaktrykk mellom flens og underlag. Dette kontaktrykket modelleres som en konsentrert kraft Q som virker som en tilleggskraft i boltene. Boltene må derfor dimensjoneres for både den ytre kraften samt eventuelle hevarmkrefter. Figur 3.3.1 viser en beregningsmodell for hevarmeffekten som følge av bøyedeformasjoner i flensen.



Figur 3.3.1: Beregningsmodell for hevarmeffekten i strekkpåkjent forbindelse

Uttrykket for hevarmkraften Q bestemmes med utgangspunkt i det statiske systemet i Figur 3.3.1(b). Hevarmkraften og boltene modelleres som glidelager fastholdt i vertikal retning. Avstanden n settes lik 1.25m, som er maksimalverdien i henhold til NS-EN 1993-1-8 (CEN, 2005). Innspenningen i C modelleres i en avstand $0.8av_2$ eller $0.8r$ fra steget, som vist i Figur 3.2.1. Ettersom systemet er statisk ubestemt benyttes enhetslastmetoden (Irgens, 2006) for å utlede uttrykket for Q .

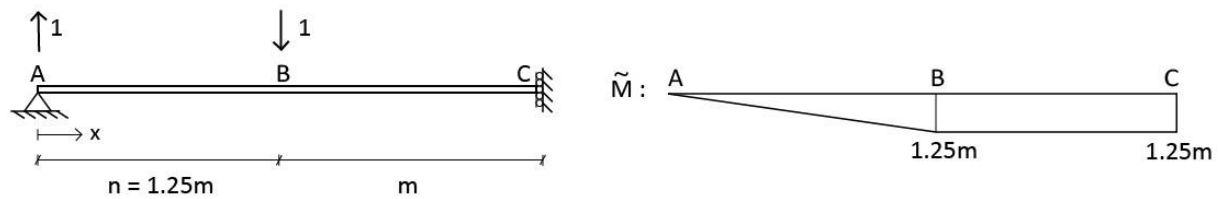
For å gjøre systemet statisk bestemt fjernes opplageren i punkt B i Figur 3.3.1(b). Systemet med ytre last og tilhørende momentforløp blir som vist i Figur 3.3.2. Momentforløpet er gitt i ligning 3.1.



Figur 3.3.2: Statisk system og momentdiagram for ytre last

$$M_0 = 0.5Fx \quad (3.1)$$

Deretter fjernes den ytre lasten og en virtuell enhetslast påføres i punkt B, som vist i Figur 3.3.3. Dette gir et momentforløp som vist i Figur 3.3.3 og ligning 3.2.



Figur 3.3.3: Statisk system og momentdiagram for virtuell enhetslast

$$\begin{aligned} \tilde{M} &= -x & \text{når } x \leq n \\ \tilde{M} &= -1.25m & \text{når } n < x \leq m \end{aligned} \quad (3.2)$$

Den vertikale forskyvningen ved bolten på grunn av ytre last (Δ_0) og enhetslast ($\tilde{\Delta}$) kan bestemmes når momentdiagrammene er kjent. Det gjøres ved å kombinere momentdiagrammene og integrere over lengden. Resultatene er vist i ligning 3.3 og 3.4. Detaljert utregning er vist i vedlegg A.1.

$$\Delta_0 = \int_L M_0 \tilde{M} \frac{1}{EI} dx = -\frac{545 Fm^3}{384 EI} \quad (3.3)$$

$$\tilde{\Delta} = \int_L \tilde{M} \tilde{M} \frac{1}{EI} dx = \frac{425 m^3}{192 EI} \quad (3.4)$$

Boltekraften finnes ved å kreve null forskyvning i opplageret i punkt B. Dette er vist i ligning 3.5, der X er den ukjente boltekraften.

$$\Delta_1 + X\Delta_2 = 0 \Rightarrow X = \frac{\Delta_1}{\Delta_2} = \frac{545 Fm^3}{384 EI} \cdot \frac{192 m^3}{425 EI} = 0.64F \quad (3.5)$$

Boltekraften på 0.64F gir en hevarmkraft på 0.14F. Weynand, Jaspert og Steenhuis (Weynand, Jaspert & Steenhuis, 1995) får en boltekraft på 0.63F for samme statiske system. For å ivareta statikken som ligger til grunn for beregningen av boltekraften, vil det videre i rapporten brukes boltekraft lik 0.64F.

3.4 Stivhetskoeffisienter fra Eurokoden

For strekkbelastede endeplateforbindelser i hulprofil antas det at kun to av basiskomponentene bidrar til stivheten. Disse er endeplate påkjent av bøyning og skruer i strekk, og er gitt i Tabell 3.4.1.

Tabell 3.4.1 Stivhetskoeffisienter for basiskomponentene

Basiskomponent	Stivhetskoeffisient k_i
Endeplate påkjent av bøyning (for én enkelt skruerad under skrekk)	$k_5 = \frac{0.9l_{eff}t_p^3}{m^3}$ <p>l_{eff} er den minste av de effektive lengdene (individuellt eller som del av en gruppe av skruerader) som er gitt for denne skrueraden i Tabell 3.2.1.</p> <p>m er som definert i Figur 3.2.1. For plateutstikk er $m = m_x$</p>
Skruer påkjent av strekk (for en enkelt skruerad)	$k_{10} = \frac{1.6A_s}{L_b}$ <p>L_b er skruens tøyningsslengde som settes lik klemlengden (den totale godstykkelsen med underlagsskivene), pluss halve summen av skruhodets høyde og mutterhøyden.</p>

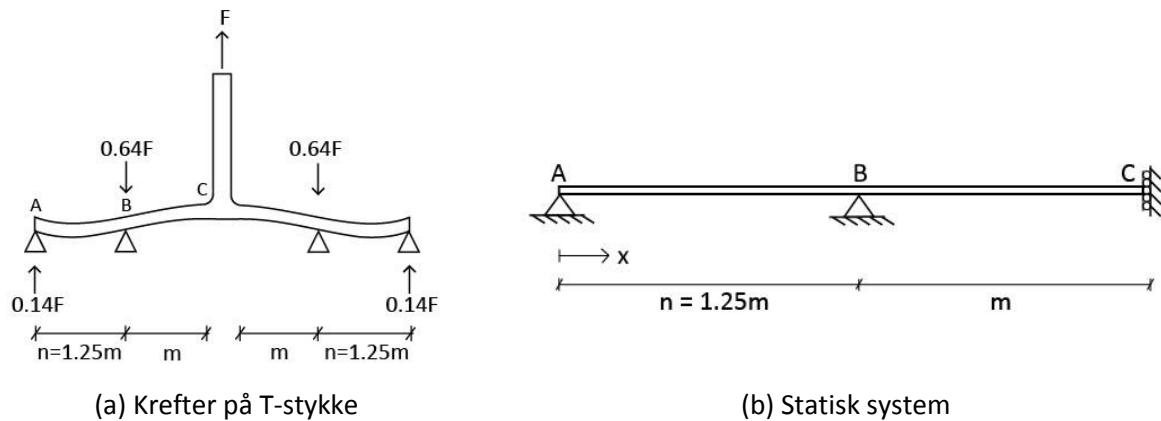
3.5 Utledning av stivhetskoeffisienter for plate og bolt i Eurokoden

I dette delkapittelet utledes uttrykkene for stivhetskoeffisientene k_5 og k_{10} gitt i Eurokoden. Utledningene av stivhetskoeffisientene vil ta utgangspunkt i hevarmskraften på $0.14F$ og boltekraften på $0.64F$ utledet i delkapittel 3.3, se Figur 3.5.1(a).

3.5.1 Stivhetskoeffisient for endeplate, k_5

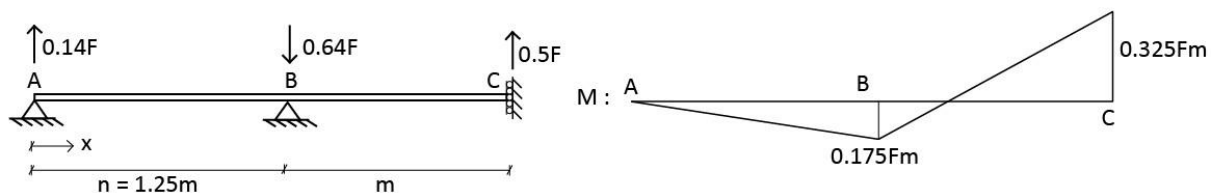
I utledningen av stivhetskoeffisienten for endeplate i bøyning er det tatt utgangspunkt i et ekvivalent T-stykke. Tilsvarende som i utledningen av hevarmskraften i delkapittel 3.3 settes n lik 1.25m.

Det statiske systemet som benyttes i utledningen er vist i Figur 3.5.1(b). Hevarmskraften og boltens modelleres som tidligere som glidelager fastholdt i vertikal retning. Innspenningen i punkt C er satt i avstanden $0.8av/2$ eller $0.8r$ fra steget i T-stykket avhengig av om profilet er sveiset eller valset.



Figur 3.5.1: Krefter på T-stykke fra elastisk deformasjon

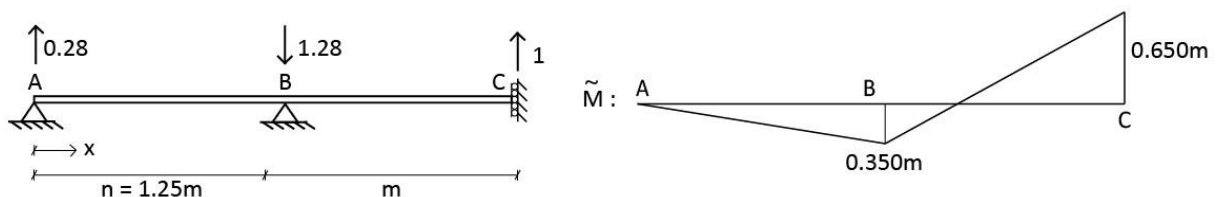
For å finne stivhetskoeffisienten til endeplaten må forskyvningen i punkt C i Figur 3.5.1 bestemmes. Det gjøres ved å benytte enhetslastmetoden (Irgens, 2006). Første bestemmes momentdiagrammet for den ytre lasten. Det statiske systemet med ytre last er vist i Figur 3.5.2 sammen med tilhørende momentforløp. Momentforløpet er gitt i ligning 3.6.



Figur 3.5.2: Statisk system og momentdiagram for ytre last

$$\begin{aligned}
 M(x) &= -0.14Fx && \text{når } x \leq 1.25m \\
 M &= -0.8Fm + 0.5Fx && \text{når } 1.25m < x \leq 2.25m
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

Deretter påføres en virtuell enhetslast i punkt C, som vist i Figur 3.5.3. Kraftfordelingen i Figur 3.5.1(a) gjør det mulig å beregne boltekraften og hevarmskraften. Det gir et momentforløp som vist i Figur 3.5.3 og ligning 3.7.



Figur 3.5.3: Statisk system og momentdiagram for virtuell enhetslast

$$\begin{aligned}
 \tilde{M}(x) &= -0.28x && \text{når } x \leq 1.25m \\
 \tilde{M}(x) &= -1.6m + x && \text{når } 1.25m < x \leq 2.25m
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

Den vertikale forskyvningen i punkt C, Δ , finnes ved å kombinere momentene $M(x)$ og $\tilde{M}(x)$ og integrere over lengden. Resultatet er vist i ligning 3.8. Detaljert beregning er vist i vedlegg A.2.

$$\Delta = \int_L M \frac{\tilde{M}}{EI} dx = \frac{251}{3200} \cdot \frac{Fm^3}{EI} \quad (3.8)$$

Ved å løse for F i ligning 3.8 fås uttrykket vist i ligning 3.9.

$$F = \frac{3200}{251} \cdot \frac{EI}{m^3} \quad (3.9)$$

I uttrykket for platens 2. arealmoment erstattes bredden til T-stykket med en ekvivalent elastisk lengde, $l_{eff,ini}$. Det er vist i ligning 3.10.

$$I = \frac{1}{12} bt^3 \rightarrow I = \frac{1}{12} l_{eff,ini} t_p^3 \quad (3.10)$$

Det er ønskelig å finne en sammenheng mellom den plastiske effektivlengden, l_{eff} , og den ekvivalente elastiske lengden. Weynand, Jaspert og Steenhuis (1995) benytter en metode der tas det utgangspunkt i det maksimale momentet i platen som opptrer i punkt C i Figur 3.5.1. Momentet er gitt i ligning 3.11.

$$M_{maks} = 0.325 Fm \quad (3.11)$$

Strekraften i T-stykket kan uttrykkes som i ligning 3.12 ved å løse for F i ligning 3.11.

$$F = \frac{M_{maks}}{0.325m} \quad (3.12)$$

Det antas at tverrsnittet har en elastisk oppførsel frem til det plastifiseres. Den elastiske momentkapasiteten kan da settes lik den plastiske momentkapasiteten til et T-stykke med en bredde lik den ekvivalente elastiske lengden, $l_{eff,ini}$. Uttrykket for maksimalt moment er vist i ligning 3.13.

$$M_{Maks} = W_{pl} \cdot f_y = \frac{1}{4} l_{eff,ini} t_p^2 \cdot f_y \quad (3.13)$$

Ved å sette ligning 3.11 inn i ligning 3.13 kan den elastiske kapasiteten til endeplaten uttrykkes som i ligning 3.14.

$$0.325 F_{Rd,el} m = W_{pl} \cdot f_y = \frac{1}{4} l_{eff,ini} t_p^2 \cdot f_y \rightarrow F_{Rd,el} = \frac{1}{1.3} \cdot \frac{l_{eff,ini} t_p^2}{m} f_y \quad (3.14)$$

Det forutsettes at platen flyter i en linje inntil steget og ved bolten, som tilsvarer bruddform 1 i knutepunktstandarden. Kapasiteten til et T-stykke beregnes da som vist i ligning 3.15.

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{Rd,pl}}{m} \quad (3.15)$$

Den plastiske momentkapasiteten til endeplaten er gitt i ligning 3.16.

$$M_{Rd,pl} = W_{pl} \cdot f_y = \frac{1}{4} l_{eff} t_p^2 \cdot f_y \quad (3.16)$$

Den plastiske kapasiteten til endeplaten finnes deretter ved å sette ligning 3.16 inn i ligning 3.15. Resultatet er vist i ligning 3.17.

$$F_{Rd,pl} = \frac{l_{eff} t_p^2}{m} \cdot f_y \quad (3.17)$$

Forholdet mellom det plastiske motstandsmomentet og det elastiske motstandsmomentet er som vist i ligning 3.18.

$$\frac{W_{pl}}{W_{el}} = \frac{bh^2}{\frac{bh^2}{6}} = \frac{3}{2} \quad (3.18)$$

Ligning 3.11 viser at det største momentet i endeplaten er lineært avhengig av strekkraften påført T-stykket. Forholdet mellom plastisk og elastisk momentkapasitet kan dermed overføres til T-stykkets strekkapasitet. Forholdet mellom den elastiske og plastiske kapasiteten kan da uttrykkes som i ligning 3.19.

$$F_{Rd,pl} = \frac{3}{2} F_{Rd,el} \quad (3.19)$$

Ved å sette inn uttrykkene for $F_{Rd,pl}$ og $F_{Rd,el}$ fra henholdsvis ligning 3.17 og ligning 3.14 i ligning 3.19 finnes sammenhengen mellom l_{eff} og $l_{eff,ini}$. Det er vist i ligning 3.20.

$$\frac{l_{eff} t_p^2}{m} \cdot f_y = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{1.3} \cdot \frac{l_{eff,ini} t_p^2}{m} f_y \rightarrow l_{eff,ini} = \frac{13}{15} l_{eff} \approx 0.8667 l_{eff} \quad (3.20)$$

Ved å sette inn uttrykket for 2. arealmoment fra ligning 3.10 i ligning 3.9 kan kraften F uttrykkes som i ligning 3.21.

$$F = \frac{3200}{251} \cdot \frac{l_{eff,ini} t_p^3}{12m^3} \cdot E\Delta = \frac{800}{753} \cdot \frac{l_{eff,ini} t_p^3}{m^3} \cdot E\Delta \quad (3.21)$$

Sammenhengen mellom kraft, stivhet og forskyvning kan uttrykkes som vist i ligning 3.22.

$$F = k \cdot E \cdot \Delta \quad (3.22)$$

Ved bruk av denne sammenhengen blir stivhetskoeffisienten til endeplaten, k_5 , som vist i ligning 3.23.

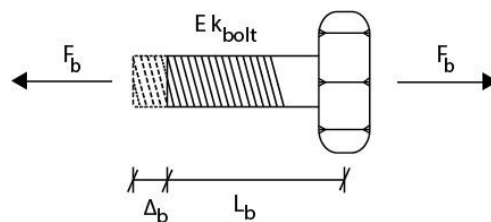
$$k_5 = k_p = \frac{800}{753} \cdot \frac{l_{eff,ini} t_p^3}{m^3} \quad (3.23)$$

Når sammenhengen mellom l_{eff} og $l_{eff,ini}$ er kjent kan stivhetskoeffisienten til endeplaten uttrykkes som vist i ligning 3.24.

$$k_5 = 0.92 \frac{l_{eff} t_p^3}{m^3} \quad (3.24)$$

3.5.2 Stivhetskoeffisient for bolt, k_{10}

Stivhetskoeffisienten til boltene kan utledes ved å ta utgangspunkt i sammenhengen mellom spenning og tøyning (Hookes lov), og Figur 3.5.4.



Figur 3.5.4: Sammenhengen mellom aksialkraft og tøyning

Den generelle sammenhengen mellom aksialkraft og forskyvning er gitt i ligning 3.25.

$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{\Delta}{L} = \frac{P}{A} \Rightarrow P = \frac{EA}{L} \Delta \quad (3.25)$$

Boltekraften F_b hentes fra delkapittel 3.3 og uttrykket for strekkraften F i T-stykket blir som vist i ligning 3.26.

$$F_b = 0.64F = \frac{EA_s}{L_b} \Delta_b \Rightarrow F = 1.56 \cdot \frac{EA_s}{L_b} \Delta_b \quad (3.26)$$

I ligning 3.26 er L_b boltens tøyningsslengde og A_s er boltens tverrsnittsareal.

Ved å benytte kraft-deformasjonsforholdet i ligning 3.22 kan boltstivhetskoeffisienten uttrykkes som i ligning 3.27.

$$k_{10} = 1.56 \cdot \frac{A_s}{L_b} \quad (3.27)$$

3.5.3 Total stivhetskoeffisient

Ved å betrakte stivhetskomentene til endeplate og bolt som fjærer koblet i serie finnes den totale stivhetskoeffisienten. Denne er vist i ligning 3.28.

$$\frac{1}{k_{total}} = \frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_p} \rightarrow k_{total} = \frac{1}{\frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_p}} \quad (3.28)$$

Kapittel 4

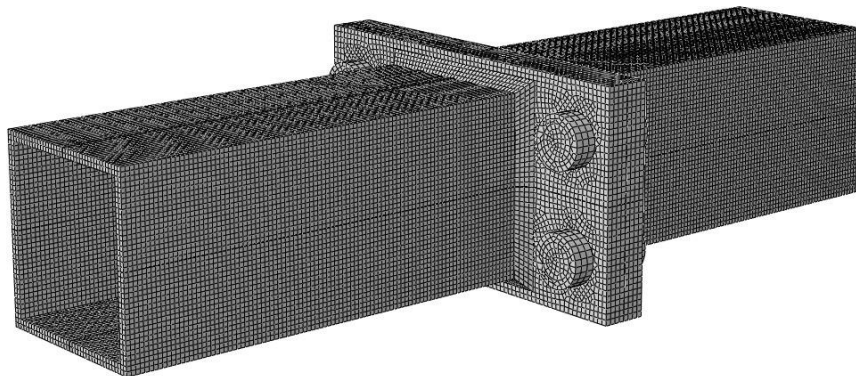
Stivhetsmodell

4.1 Innledning

I dette kapitlet presenteres en beregningsmodell for stivheten til strekkbelastede endeplateforbindelser i hulprofil. Modellen er utarbeidet av Fredrik Torp Karlsen i sammenheng med hans masteroppgave *Knutepunkter for staver med hulprofilverrsnitt* (Karlsen, 2011). Oppgaven er skrevet ved Institutt for konstruksjonsteknikk, NTNU.

4.2 Statisk grunnsystem

Karlsens stivhetsmodell er utledet for skjøter av hulprofiler med rektangulære endeplater og bolter plassert langs to av sidene av hulprofilet, se Figur 4.2.1.

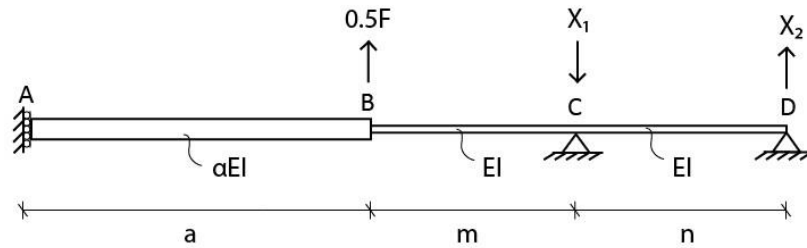


Figur 4.2.1: Endeplateforbindelse i hulprofil

Platens stivhetskoeffisient fra NS-EN 1993-1-8 (CEN, 2005) tar ikke hensyn til den delen av endeplaten som ligger innenfor hulprofilet. Karlsen antar at denne delen vil bøyes opp når knutepunktet belastes og utvikler derfor et statisk grunnsystem som tar hensyn til dette. Ved å sette innspenningen midt i hulprofilet vil endeplaten innenfor hulprofilet også inngå i modellen. Dette er vist i Figur 4.2.2.

Lengden a i figuren vil være avstanden fra midt i hulprofilet til punktet der den ytre kraften virker. Det er i tillegg valgt å gjøre det mulig å tilegne platen innenfor hulprofilet en annen teoretisk stivhet enn platen utenfor. Karlsen begrunner dette med at hulprofilet her vil kunne påvirke platens stivhet. Som vist i Figur 4.2.2 uttrykkes den økte stivheten med

variabelen α . Dersom α settes lik 1 vil det bety at stivheten er den samme i hele stivhetsmodellen.

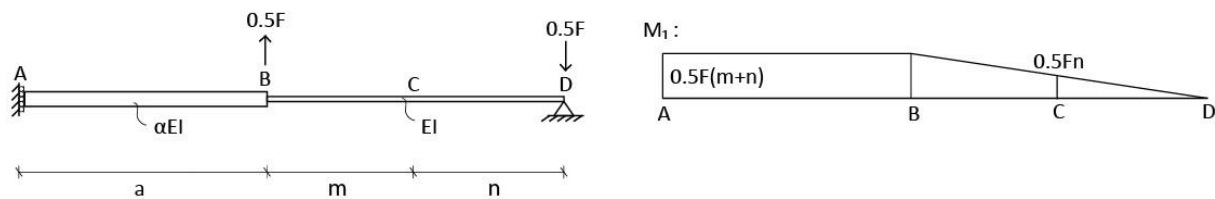


Figur 4.2.2: Statisk system for ny stivhetsmodell

4.3 Utledning av boltekræft

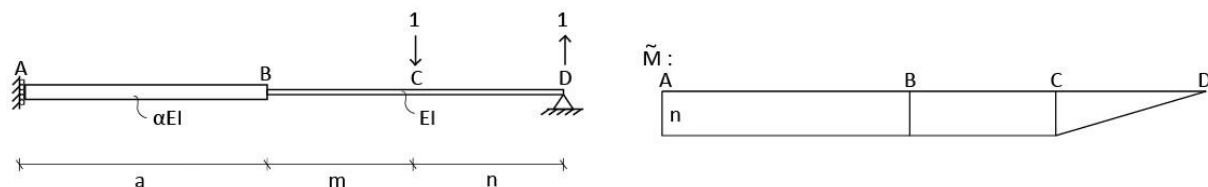
Det statiske systemet vist i Figur 4.2.2 har fire opplagerbetingelser og tre frihetsgrader, og er dermed én gang statisk ubestemt. Tilsvarende som i kapittel 3 brukes enhetslastmetoden (Irgens, 2006) for å utlede uttrykket for boltekræften.

For å finne boltekræften må systemet først gjøres statisk bestemt. Det gjøres ved at opplageret i punkt C i Figur 4.2.2 fjernes. Det statiske systemet og momentforløpet for den ytre lasten er vist i Figur 4.3.1.



Figur 4.3.1: Statisk system og momentforløp for ytre last

Deretter fjernes den ytre lasten og en virtuell enhetslast påføres i punkt C, som vist i Figur 4.3.2. Tilhørende momentfordeling er også vist i figuren.



Figur 4.3.2: Statisk system og momentforløp for virtuell enhetslast

Den vertikale forskyvningen i punkt C på grunn av ytre last (Δ_1) og enhetslasten ($\tilde{\Delta}$) kan bestemmes når momentdiagrammene er kjent. Det gjøres ved å kombinere momentdiagrammene og integrere over lengden. I dette tilfellet kan hurtigintegrasjon benyttes. Resultatene er vist i ligning 4.1 og 4.2.

$$\Delta_1 = \int_L M_1 \frac{\tilde{M}}{EI} dx = -\frac{1}{\alpha EI} 0.5(F(m+n) \cdot n \cdot a - \frac{1}{2EI} (0.5F(m+n) + 0.5Fn) \cdot n \cdot m - \frac{1}{3EI} 0.5Fn \cdot n \cdot n) \quad (4.1)$$

$$\tilde{\Delta} = \int_L \tilde{M} \frac{\tilde{M}}{EI} dx = \frac{1}{\alpha EI} \cdot n \cdot n \cdot a + \frac{1}{EI} \cdot n \cdot n \cdot m + \frac{1}{3EI} \cdot n \cdot n \cdot n \quad (4.2)$$

Den ukjente boltekraften X_1 kan deretter finnes ved å kreve null vertikal forskyvning i opplageret i punkt C. Dette er vist i ligning 4.3.

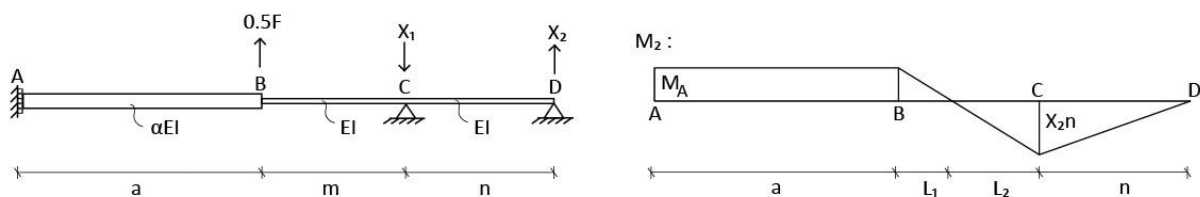
$$\Delta_1 + X_1 \tilde{\Delta} = 0 \rightarrow X_1 = \frac{F \left(\frac{(m+n)a}{2\alpha} + \frac{m^2 + 2nm}{4} + \frac{n^2}{6} \right)}{n \left(\frac{a}{\alpha} + m + \frac{n}{3} \right)} \quad (4.3)$$

Ved å benytte vertikal likevekt i Figur 4.2.2 kan hevarmskraften X_2 finnes som vist i ligning 4.4.

$$X_2 = X_1 - 0.5F \quad (4.4)$$

4.4 Utledning av platens stivhetskoeffisient

Etter at fordelingen av krefter er kjent kan enhetslastmetoden (Irgens, 2006) benyttes for å utlede stivhetskoeffisienten til platen. Med enhetslastmetoden finnes forskyvningen i punkt B i Figur 4.4.1 som så brukes til å beregne stivhetskoeffisienten. Først påføres den ytre lasten og tilhørende momentforløp bestemmes som vist i Figur 4.4.1.



Figur 4.4.1: Statisk system og momentforløp for ytre last

Momentlikevekt i punkt A i Figur 4.4.1 gir momentet i ligning 4.5.

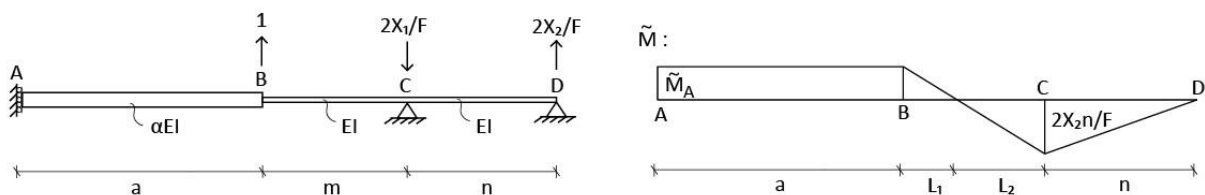
$$M_A = X_1(a+m) - 0.5Fa - X_2(a+m+n) \quad (4.5)$$

Momentet er lineært over lengden m og gir oppdeling som vist i ligning 4.6 og 4.7.

$$L_1 = \frac{M_A}{M_A + X_2 n} \cdot m \quad (4.6)$$

$$L_2 = m - L_1 \quad (4.7)$$

Deretter fjernes den ytre lasten og en virtuell enhetslast påføres i punkt B. Fordelingen av krefter og tilhørende momentdiagram er vist i Figur 4.4.2.



Figur 4.4.2: Statisk system og momentforløp for virtuell enhetslast

Momentlikevekt i punkt A i Figur 4.4.2 gir momentet i ligning 4.8.

$$\tilde{M}_A = \frac{2X_1}{F}(a + m) - a - \frac{2X_2}{F}(a + m + n) \quad (4.8)$$

Momentforløpet i Figur 4.4.2 har samme form som i Figur 4.4.1, og lengdene L_1 og L_2 vil derfor være tilsvarende som i ligning 4.6 og 4.7.

$$L_1 = \frac{\tilde{M}_A}{\tilde{M}_A + X_2 n} \cdot m \quad (4.9)$$

$$L_2 = m - L_1 \quad (4.10)$$

Som i delkapittel 4.3 finnes forskyvningen i punkt B ved å kombinere momentdiagrammene og bruke hurtigintegrasjon. Resultatet er vist i ligning 4.11.

$$\Delta = \int_L M_2 \frac{\tilde{M}}{EI} dx = \frac{1}{\alpha EI} \cdot M_A \cdot \tilde{M}_A \cdot a + \frac{1}{3EI} \cdot M_A \cdot \tilde{M}_A \cdot L_1 + \frac{1}{3EI} \cdot X_2 n \cdot \frac{2X_2 n}{F} \cdot L_2 + \frac{1}{3EI} \cdot X_2 n \cdot \frac{2X_2 n}{F} \cdot n \quad (4.11)$$

Det velges å løse uttrykket i ligning 4.11 med programmet Maple da flere av faktorene er beskrevet ved hjelp av hverandre samt at uttrykkene for X_1 og X_2 ikke er pene. Detaljene finnes i vedlegg B.1 og resultatet er vist i ligning 4.12.

$$\Delta = \frac{1}{24} \frac{m^2(3m^2\alpha + 4nma + 12am + 12an) F}{3a + 3m\alpha + n\alpha} \frac{F}{EI} \quad (4.12)$$

Stivhetskoeffisienten til endeplaten finnes ved å bruke sammenhengen mellom kraft, stivhet og forskyvning. Dette er vist i ligning 4.13.

$$k_p = \frac{F}{E\Delta} = \frac{24(3a + 3m\alpha + n\alpha)I}{m^2(3m^2\alpha + 4nm\alpha + 12am + 12an)} \quad (4.13)$$

Uttrykket for 2. arealmoment er gitt i ligning 3.10 og gjengitt under.

$$I = \frac{1}{12} l_{eff,ini} t^3$$

Den initielle effektive lengden som inngår i uttrykket for 2. arealmoment vil ikke nødvendigvis være den samme som den utledet i kapittel 3, men er i denne stivhetsmodellen antatt å være det.

Det endelige uttrykket for stivhetskoeffisienten til endeplaten er gitt i ligning 4.14.

$$k_p = \frac{2(3a + 3m\alpha + n\alpha)l_{eff,ini}t^3}{m^2(3m^2\alpha + 4nm\alpha + 12am + 12an)} \quad (4.14)$$

4.5 Utledning av boltenes stivhetskoeffisient

Når boltekraften er kjent kan boltens stivhetskoeffisient bestemmes. Sammenhengen mellom boltekraft og forskyvning er kjent fra kapittel 3.5, og vist under.

$$F_b = X_1 = \frac{EA_s}{L_b} \Delta_b = k_b E \Delta_b$$

Uttrykket for boltekraften X_1 i ligning 4.3 settes inn i sammenhengen over. Det gir uttrykket for strekkraften F , som vist i ligning 4.15.

$$F = \frac{n\left(\frac{a}{\alpha} + m + \frac{n}{3}\right)}{\frac{(m+n)a}{2\alpha} + \frac{m^2 + 2nm}{4} + \frac{n^2}{6}} \cdot \frac{EA_s}{L_b} \Delta_b \quad (4.15)$$

Uttrykket for stivhetskoeffisienten til boltene løses i Maple og blir som vist i ligning 4.16.

$$k_b = \frac{4n(3a + 3mX + nX)}{(6am + 6an + 3m^2X + 6nmX)} \frac{A_s}{L_b} \quad (4.16)$$

4.6 Tosidig knutepunkt

Tilsvarende som i kapittel 3.5.3 kombineres stivhetskoeffisientene til bolt og endeplate ved å betrakte dem som fjærer koblet i serie. Dette er vist under.

$$\frac{1}{k_{tot}} = \frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_p} \rightarrow k_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_p}}$$

Forutsatt at endeplate og bolt har samme E-modul vil den elastiske stivheten til knutepunktet bli som vist i ligning 4.18.

$$K_{tot} = \frac{E \cdot k_{tot}}{2} \quad (4.18)$$

Årsaken til at det multipliseres med faktoren $\frac{1}{2}$ er at det er tosidige knutepunkt som betraktes. Forskyvningen til knutepunktet blir dermed dobbelt så stor for samme kraft og stivheten må halveres.

Kapittel 5

Laboratorieforsøk



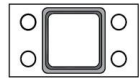

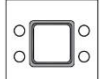

5.1 Innledning

Det ble i sammenheng med denne oppgaven gjennomført laboratorieforsøk med endeplateforbindelser i hulprofil. Gjennom laboratorieforsøk oppnås forsøksresultater som brukes til å finne stivheten til forbindelsene samtidig som det etableres et datagrunnlag for å verifisere simuleringer utført i FEA-programmet Abaqus. Forsøkene ble gjennomført med og uten forspenning i boltene for å vurdere hvordan det påvirker stivheten.

5.2 Prøvegeometrier

Prøveprogrammet for laboratorieforsøket er vist i Tabell 5.2.1. Nøyaktige mål av prøvene finnes i vedlegg C.1. Det ble brukt varmformet hulprofil HUP80x80x4 med en endeplate sveist til den ene enden av hulprofilen. Endeplatene ble boltet sammen med M16 bolter av kvalitet 8.8. Boltehullene ble boret med 17 mm bor og det ble benyttet underlagsskiver både under skruer og muttere. Knutepunktene har to eller fire bolter.

Tabell 5.2.1: Prøveprogram våren 2013

Prøvestykke	Endeplatemål [mm]	Antall bolter	Bolteplassering
A1	180x100x10.2	2	
B1	180x100x8.1	2	
A2	180x100x10.2	4	
B2	180x100x8.1	4	
C	180x180x8.1	4	
D	250x100x8.1	4	

Prøve A2 og B2 har tilsvarende knutepunksgeometri som hos tidligere studenter. Ved å prøve samme knutepunksgeometri flere ganger blir resultatene kvalitetssikret og beregningsmodeller foreslått i tidligere arbeid kan etterprøves. Tilfellene med kun en bolt på to av sidene av hulprofilet (A1 og B1) er ikke prøvd tidligere og det finnes derfor ingen sammenligningsgrunnlag for disse knutepunktene.

Knutepunksgeometrien til prøve C og D var heller ikke testet tidligere. Prøve C tilsvarte prøve B2 bortsett fra at platebredden ble økt fra 100 mm til 180 mm. Prøve D var også lik prøve B2, men lengden på endeplatene ble økt fra 180 mm til 250 mm. Disse geometriene ble prøvd fordi det var av interesse å se hvordan størrelsen på endeplaten virker inn på stivheten til forbindelsene.

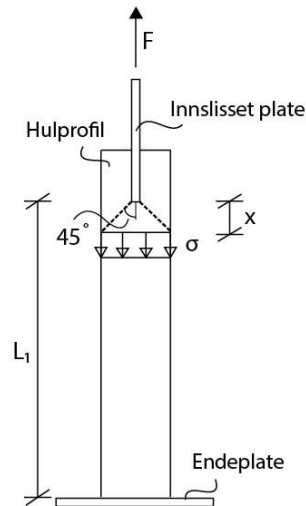
I alle forbindelsene var det en synlig glipe mellom endeplatene etter at boltene ble strammet for hånd. Glipen oppstår fordi varmen under sveising av hulprofil til endeplate fører til at endeplatene krummes. Glipen var størst ytterst på endeplatene og ble mindre inn mot hulprofilet. Dette beskrives nærmere i delkapittel 5.5.

Prøvene i denne oppgaven er laget av de eksakt samme hulprofilene som dem som ble brukt av tidligere studenter. Prøvene ble planfrest og endeplatene ble sveist til hulprofilet med et tiltenkt a-mål på 4 mm, men som etter målinger viste seg å variere mellom 3.5 mm og 5 mm. Endeplatene som er brukt i denne oppgaven er også av det samme materialet som ble benyttet i forsøk tidligere år.

5.2.1 Oppmåling av prøvene

Før forsøkene ble prøvene skrudd fra hverandre og de to delene ble målt med skyvelær og målebånd. De nøyaktige målingene finnes i vedlegg C.1. Tykkelsen på endeplatene ble målt fire steder på hver plate og ble avrundet slik at tykkelsen for prøve B1, B2, C og D ble satt til 8.1 mm og tykkelsen for prøve A1 og A2 ble satt til 10.2 mm. Disse tykkelsene blir også benyttet i håndberegninger og i de numeriske simuleringene.

Det var særlig viktig å måle lengden av hulprofilet fra endeplaten til en innslisset plate i motsatt ende av hulprofilet. Den innslissede platen brukes for å feste prøvene i maskinen. Som vist i Figur 5.2.1 er denne lengden kalt L_1 . Kraften som påføres den innslissede platen antas å spres med en vinkel på 45 grader nedover i hulprofilet. For å få et jevnt fordelt spenningsfelt i hulprofilet i området ved endeplaten, må lengden L_1 være større enn den vertikale spredningskomponenten av kraften, x . For at forsøket skal gi riktig lastsituasjon for knutepunktet må spenningen være jevnt fordelt i hulprofilet. Hvis lengden L_1 er mindre enn x vil ikke spenningsfeltet være jevnt fordelt.



Figur 5.2.1: Spredning av spenning i hulprofilet

For hulprofilene brukt i forsøkene i denne rapporten vil lengden x være 40 mm. Lengden L_1 ble målt til 200 mm for alle prøvene, som betyr at spenningen vil være jevnt fordelt i hulprofilet.

5.3 Strekkforsøk av endeplate- og hulprofilmaterialet

Det ble gjennomført strekkforsøk av endeplatematerialet (8 mm og 10 mm) og materialet fra hulprofilet (4 mm). Målet med strekkforsøkene var å anskaffe materialdata som kunne brukes i de numeriske simuleringene. For endeplatene var det interessant å se om materialdataene fra forsøkene gjort i denne oppgaven stemte overens med resultatene fra forsøk utført tidligere år.

Strekkforsøkene ga verdier for forskyvning og kraft, og disse ble brukt til å beregne nominell spenning og nominell tøyning. I en numerisk simulering må det tas hensyn til at tverrsnittsarealet endrer seg ved ulike spenninger. Ved å forutsette konstant volum kan de nominelle verdiene beregnes om til sann spenning og sann tøyning, som vist i ligning 5.1 til 5.5. De nominelle verdiene kan kun brukes frem til diffus innsnevring oppstår, som vil si når et vilkårlig tverrsnittsareal i prøven endrer seg raskere enn materialet fastner.

Ingeniørspenning:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (5.1)$$

Ingeniørtøyning:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (5.2)$$

Sann spenning:

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (5.3)$$

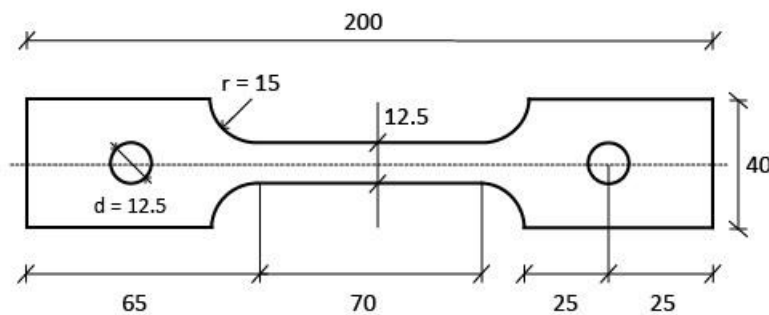
Sann tøyning:

$$\varepsilon_{true} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (5.4)$$

Sann plastisk tøyning:

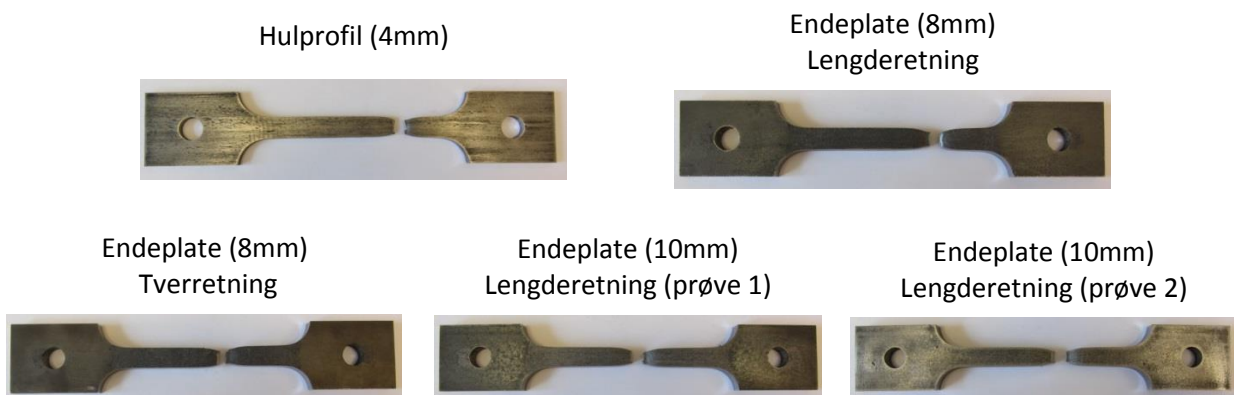
$$\varepsilon_{true}^{pl} = \varepsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E} \quad (5.5)$$

Figur 5.3.1 viser geometrien til en standard strekkprøve. Nøyaktige mål av de ulike strekkprøvene finnes i vedlegg C.3.



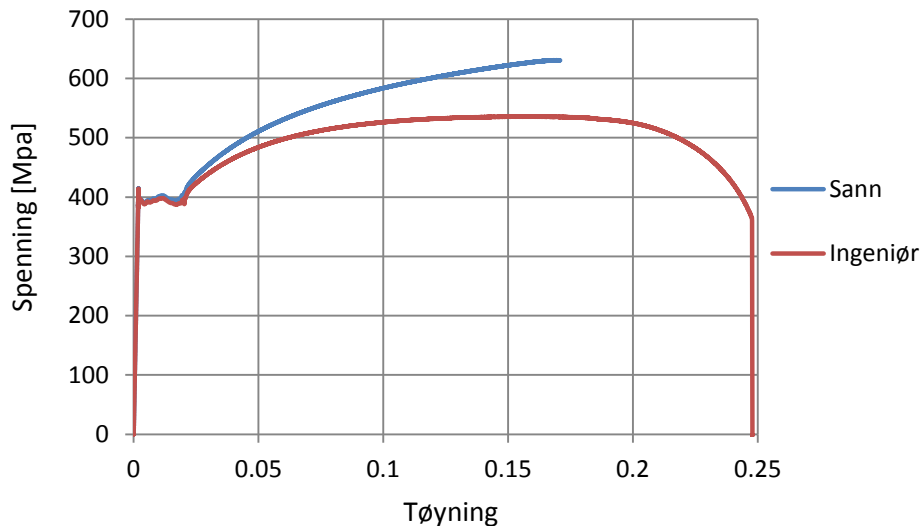
Figur 5.3.1: Geometri til en standard strekkprøve

I Figur 5.3.2 er de ulike strekkprøvene etter forsøk vist.



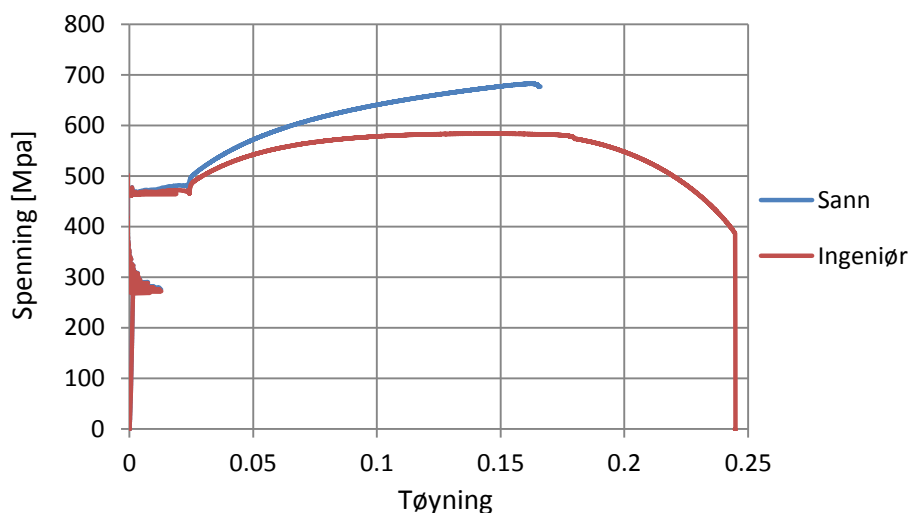
Figur 5.3.2: Strekkprøver etter forsøk

I Figur 5.3.3 vises spenning-tøyningskurver for strekkforsøket utført med 4 mm tykk hulprofil. Både kurver for ingeniørspenning og sann spenning er vist. Materialet flyter ved en spenning på cirka 395 MPa, som er høyere enn den oppgitte flytespenningen fra produsenten på 355 MPa. Bruddspenningen avleses til 631 MPa.



Figur 5.3.3: Spenning-tøyningskurver, hulprofiltykkelse 4 mm

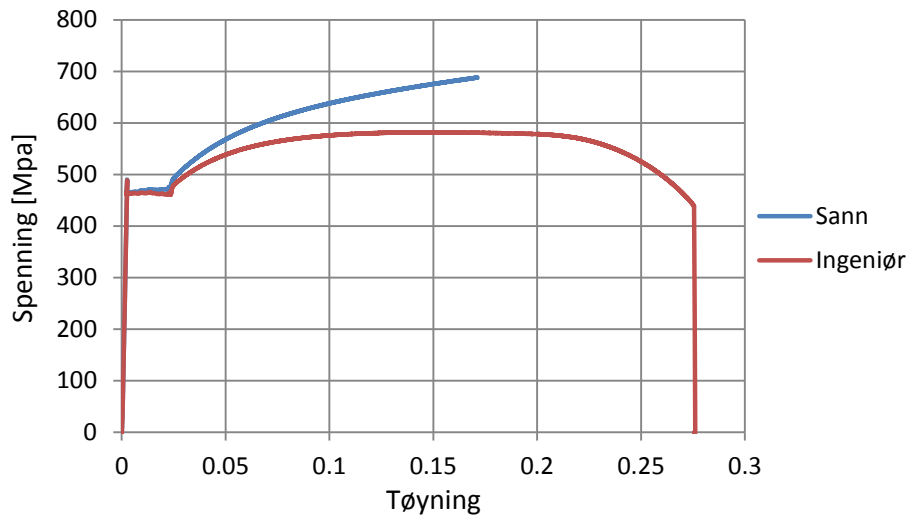
For endeplatematerialet med tykkelse 8 mm ble det utført strekkforsøk både i lengderetning og i tverretning. Figur 5.3.4 viser spenning-tøyningskurver (ingeniør og sann) for strekkforsøket utført i lengderetning.



Figur 5.3.4: Spenning-tøyningskurve, endeplatetykkelse 8 mm i lengderetning

Figuren viser at grafene før flytning er ujevne. Det kommer av at strekkforsøket stoppet flere ganger i starten på grunn av problemer med maskinen. Materialet flyter ved cirka 468 MPa og bruddspenningen er omlag 683 MPa.

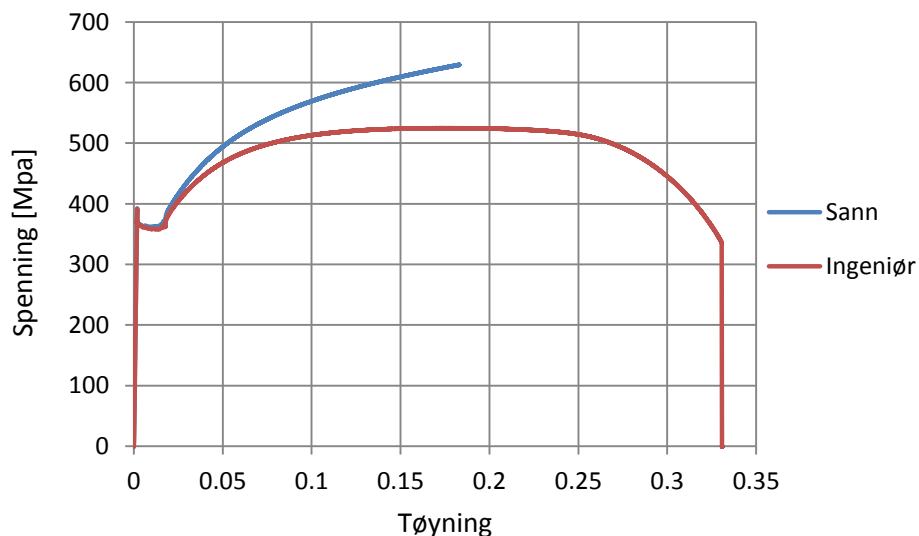
Figur 5.3.5 viser spenning-tøyningskurver for strekkforsøket utført med 8 mm plate i tverretning. Flytespenningen avleses til 461 MPa og bruddspenningen til 694 MPa.



Figur 5.3.5: Spenning-tøyningskurver, endeplatetykkelse 8 mm i tverretning

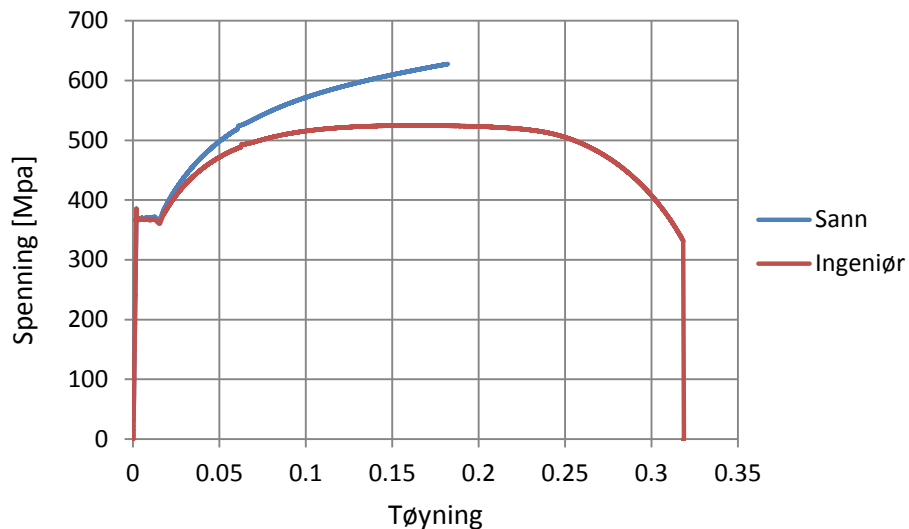
Spennings-tøyningskurvene i Figur 5.3.4 og Figur 5.3.5 viser at endeplatematerialet har tilnærmet like egenskaper i lengderetning og tverretning. Avvikene mellom de avleste verdiene for flytespenning og bruddspenning ligger på rundt 10 MPa. Dette er relativt lite og kan skyldes usikkerhet ved avlesning.

For endeplatematerialet med tykkelse 10 mm var det ikke mulig å lage en strekkprøve i tverretning, og det ble i stedet utført to forsøk i lengderetning. Spenning-tøyningskurver for prøve 1 er vist i Figur 5.3.6. Flytespenningen til prøven er omtrent 361 MPa og bruddspenningen cirka 629 MPa.



Figur 5.3.6: Spenning-tøyningskurver, endeplatetykkelse 10 mm i lengderetning (prøve 1)

Spenning-tøyningskurver for prøve 2 er vist i Figur 5.3.7. Flytespenningen avleses til 365 MPa, og bruddspenning til 627 MPa.



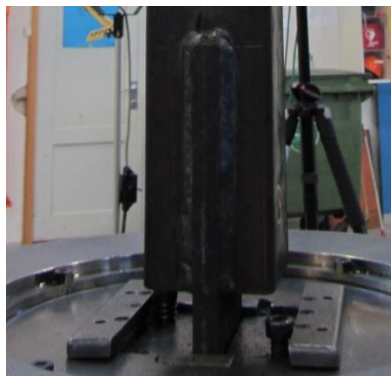
Figur 5.3.7: Spenning-tøyningskurver, endeplatetykkelse 10 mm i lengderetning (prøve 2)

For de to prøvene i lengderetning ble, som ventet, både flytespenningen og bruddspenningen tilnærmet like. De små avvikene kan også her skyldes usikkerhet ved avlesning av kurvene.

5.4 Om laboratorieforsøket

5.4.1 Prøveutstyr

Forsøkene for endeplateforbindelsene ble utført i en universal prøvemaskin (Schenck) med kapasitet 1000 kN og hydrauliske gripebakker. I hver ende av hulprofilene ble det slisset inn og sveist fast en plate, som under forsøket ble festet i gripebakkene til prøvemaskinen. Figur 5.4.1 viser festemekanismen for nedre del av prøvestykket. Tilsvarende gjelder for øvre del.



Figur 5.4.1: Innslisset plate og festemekanisme for nedre del av prøven

Som vist i Figur 5.4.2(a) holdes nedre del av prøvestykket fast mens den øvre delen av prøvemaskinen beveges oppover med konstant hastighet på 4 mm/min. For logging av kraft og forskyvning ble det brukt kamera og datamaskin, se Figur 5.4.2(b).



(a) Prøvemaskin



(b) Oppsett av kamera og PC

Figur 5.4.2: Prøveutstyr

5.4.2 Utførelse

Da prøvene ble plassert i prøvemaskinen var det tydelig at den øvre og nedre delen var vridd i forhold til hverandre. Det kom trolig av klaringen på 1 mm mellom bolt og boltehull. Boltene ble derfor fjernet og en tilpasset sylindere som eksakt fylte boltehullet ble brukt for å tvinge delene tilbake i riktig posisjon.

På bakgrunn av overslagsberegninger ble det valgt å kjøre prøvene til en kraft på cirka 30 kN. Denne verdien ble valgt slik at spenningene i forbindelsene lå godt innenfor det elastiske området. På denne måten var det mulig å gjøre flere forsøk på samme prøvestykke. Prøvene ble belastet med en kraft til omlag 30 kN og deretter avlastet for følgende to tilfeller:

- Ingen forspenning av boltene (håndstramming)
- Forspenning av boltene (momentnøkkel innstilt på 100 Nm)

Etter den siste avlastningen ble forsøkene avsluttet med å belaste prøvene til maksimal kraft var oppnådd. Ved å belaste prøvene med og uten forspenning kan kraft-forskyvningskurvene sammenlignes.

5.4.2.1 Jekkforskyvning og kameramåling

Stempelet i den hydrauliske jekken i prøvemaskinens øvre del registrerte kraft og forskyvning under hele forsøket. Forskyvningen bestod av både deformasjonen til prøvestykket og maskinens egen deformasjon.

Ettersom det var det ønskelig å bestemme deformasjonen til prøvestykket ble det i tillegg til registrering av jekkforskyvning også utført kameramåling. Kameramålingen baseres på bilder tatt av et digitalt kamera underveis i forsøket. Knutepunktene ble først sprayet med hvit lakk og deretter lett med svart lakk. Dette ga et tilfeldig mønster av svarte prikker på prøven, som vist i Figur 5.4.3. Det ble tatt bilder av knutepunktet for hvert andre sekund. Kraftnivået og jekkforskyvningen fra stampelet i prøvingsmaskinen ble registrert for hvert bilde.



Figur 5.4.3: Spraylakkert prøve

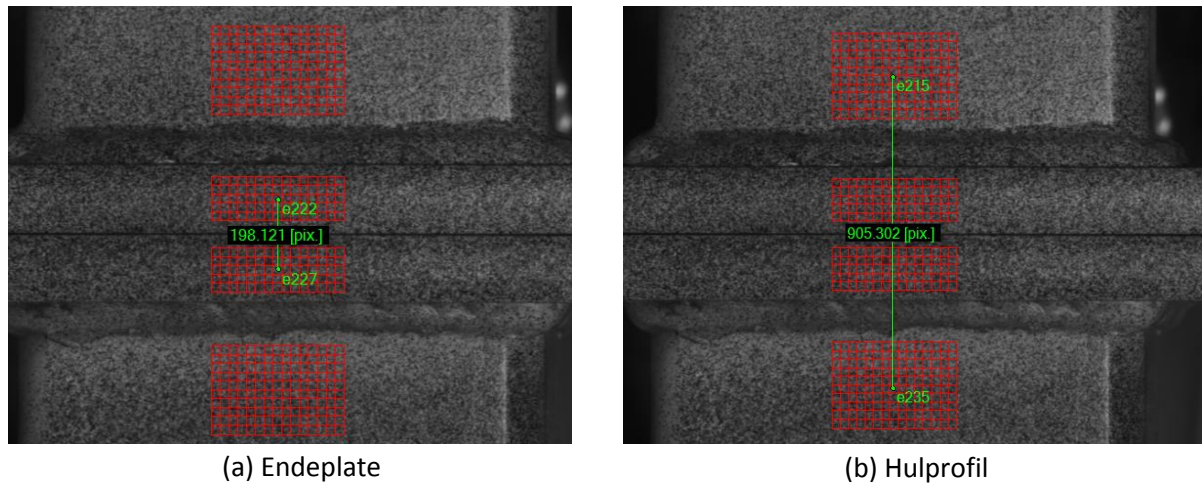
5.5 Resultater fra laboratorieforsøkene

Resultatene fra laboratorieforsøkene blir i dette delkapittelet presentert som kraft-forskyvningskurver. Ettersom kraften i maskinen ble registrert for hvert bilde kan både jekkforskyvningen og forskyvningen funnet fra kameramålingene plottes mot denne. Disse forskyvningene representerer knutepunktets totale forskyvning. For lettere å kunne sammenligne resultater fra tidligere år brukes notasjonen maskin for jekkforskyvningen og kamera for kameramålingen i diagrammene.

Alle forsøkene ble stoppet da det hørtes lyder som kunne skyldes oppsprekking i sveisen, noe som betyr at maksimal kraft er oppnådd.

5.5.1 Bildebehandling av kameramålingen

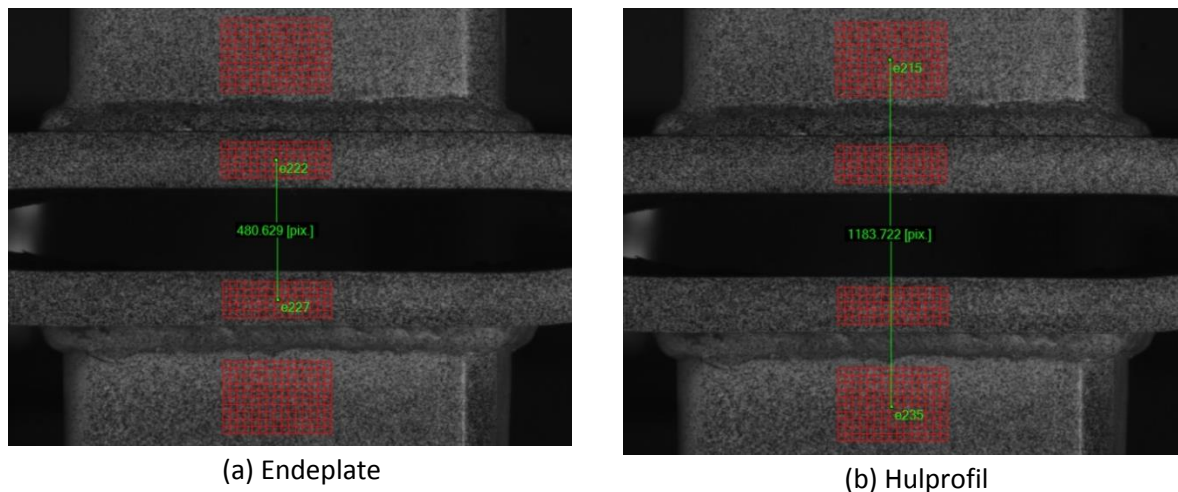
Bildene fra kameramålingen ble behandlet i programmet eCorr v2.0 for å finne forskyvningen til knutepunktet. I tidligere arbeid ble programmet 7D brukt for å hente resultater fra kameramålingen. Likt for programmene er at det på det første bildet i serien markeres et område på hvert hulprofil og et område på hver av endeplatene. Disse områdene deles deretter inn i rutenett. I rutenettene defineres det så referansepunkter, som vist i Figur 5.5.1.



Figur 5.5.1: Rutenett med påsatte referansepunkt før forsøket

Begge programmene registrerer mønsteret av svarte prikker og forsøker å finne igjen det samme mønsteret på neste bilde. Dette gjentas for hele bildeserien. I motsetning til 7D der det beregnes en relativ forskyvning mellom to referansepunkter, brukes det i eCorr en vektor mellom referansepunktene for å beregne forskyvningen. Figur 5.5.2 viser hvordan referansepunktene har fulgt deformasjonen til knutepunkt ved slutten av forsøket.

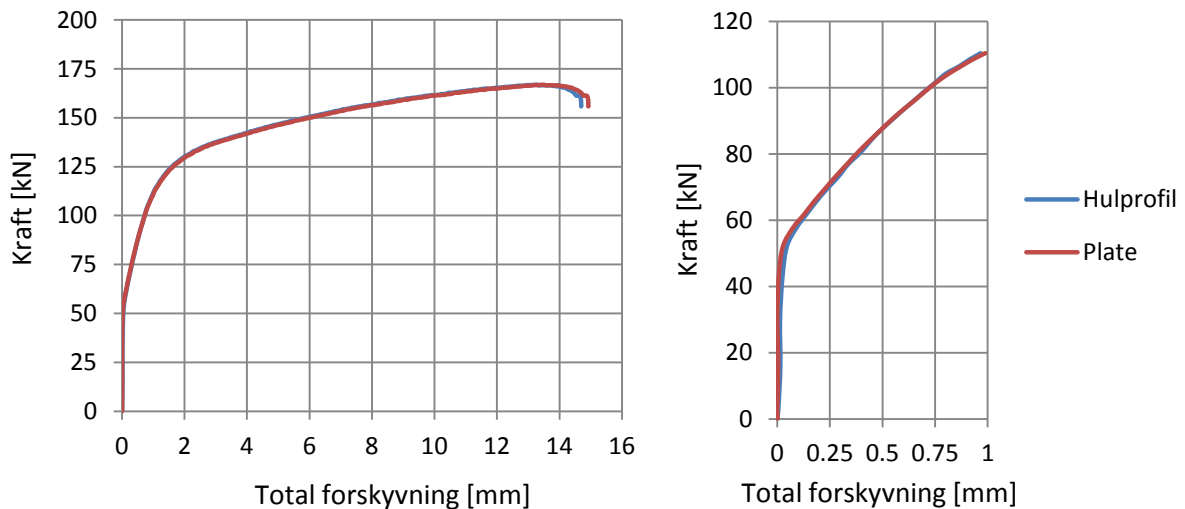
Ved å bruke eCorr vil forskyvningen som registreres på hvert bilde være den totale forskyvningen til knutepunktet. 7D vil i stedet registrere en relativ forskyvning i hvert referansepunkt slik at disse må summeres for å finne total forskyvning.



Figur 5.5.2: Rutenett med påsatte referansepunkt etter forsøk

Forskyvningen registreres som piksler og omregnes til millimeter ved at forholdet mellom piksler og millimeter er kjent. Ved å holde et metermål opp mot prøven på det ene bildet kan dette brukes som en kjent lengde. Deretter telles antall piksler denne lengden utgjør og forholdet beregnes.

Forskyvningen fra kameramålingen ble beregnet både ved å bruke referansepunkter på endeplatene og på hulprofilene. Noe av forskyvningen som hentes fra punktene på hulprofilene vil skyldes hulprofilets aksialdeformasjon. Det er derfor interessant å sammenligne forskyvningene hentet fra endeplatene og hulprofilene for å undersøke avviket mellom disse. For prøve A1, A2, B1, B2 og D ble de to forskyvningene praktisk identiske. Figur 5.5.3 viser dette for prøve A1. Årsaken til det er at aksialdeformasjonen i hulprofilet er liten i forhold til deformasjonen av endeplatene.



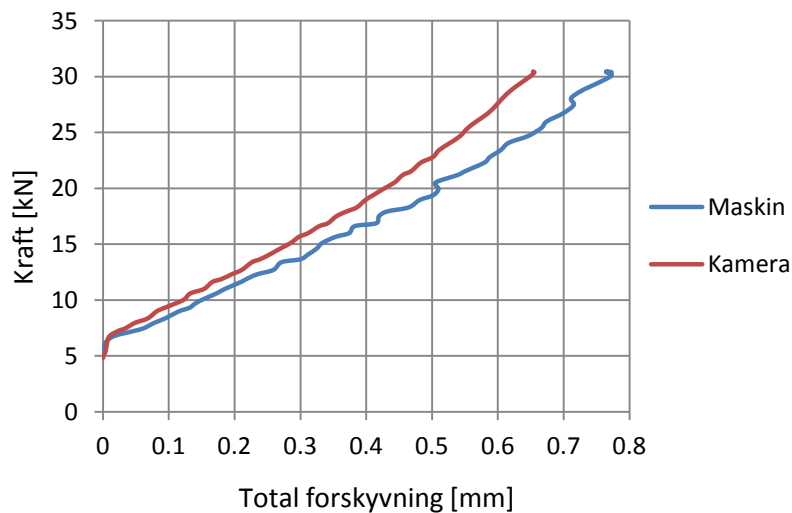
Figur 5.5.3: Kameramålinger fra referansepunkter på hulprofil og endeplate

Prøve C hadde en bredere endeplate enn de andre prøvene. Det var derfor u hensiktsmessig å bruke endeplatene som referansepunkt for forskyvning da det i gjennomføringen av forsøket ble registrert at endeplatene fikk en betydelig deformasjon i tverretning. Det er derfor valgt å kun benytte referansepunkter på hulprofilet for prøve C. Det er valgt og ikke trekke aksialdeformasjonen i hulprofilet fra kraft-forskyvningskurvene. Årsaken til det er som nevnt at aksialdeformasjonen i hulprofilet er liten i forhold til den totale forskyvningen.

5.5.2 Prøve A1

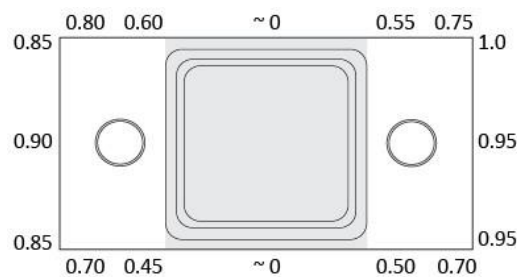
Forsøk med og uten forspente bolter kjørt til ca. 30 kN

Prøven ble først belastet til om lag 30 kN uten forspenning. Deretter ble boltene forspent og prøven ble belastet på nytt til 30 kN. Figur 5.5.4 viser kraft-forskyvningskurver for forsøket uten forspenning.



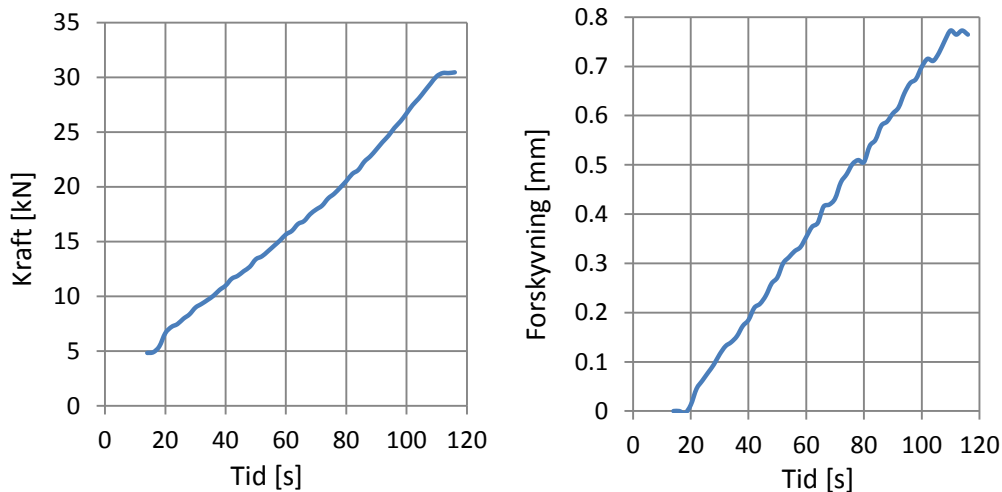
Figur 5.5.4: Kraft-forskyvningskurver for prøve A1 uten forspenning

Før forsøket startet ble glipene mellom endeplatene målt med en bladføler. En skisse av disse er vist i Figur 5.5.5. Skravert markering indikerer kontakt mellom platene. Ved en kraft på ca. 25 kN var det ingen kontakt, men en synlig glippe mellom platene.



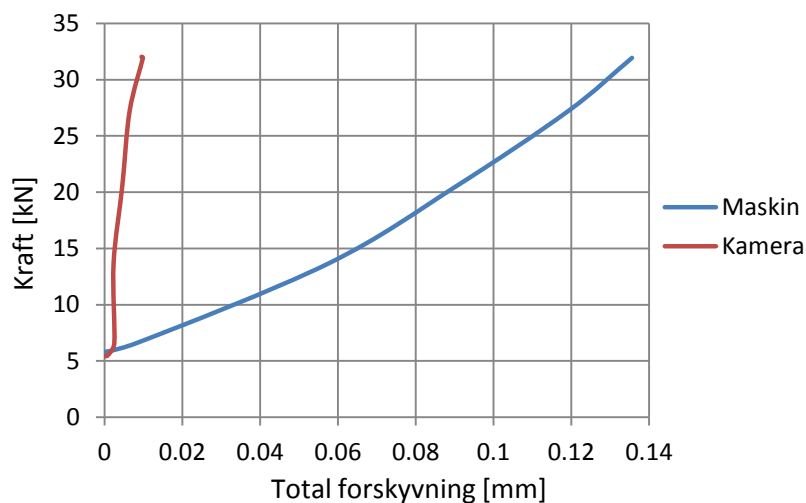
Figur 5.5.5: Måling av glippe, A1

Figur 5.5.4 viser tydelige forstyrrelser på kurven fra jekkforskyvningen. For å finne ut om forstyrrelsene kommer fra kraftmålingene eller forskyvningene hentet fra prøvemaskinen plottes kraften og forskyvningene mot tid. Det er vist i Figur 5.5.6. Begge kurvene er ujevne, noe som betyr at forstyrrelsene på kraft-forskyvningskurven til prøve A1 kan skyldes både feil ved logging av kraft eller fra selve prøvemaskinen.



Figur 5.5.6: Kraftmålinger og forskyvninger fra prøvingsmaskinen

Figur 5.5.7 viser kraft-forskyvningskurver for prøve A1 med forspenning. Før belastning var det gliper i platehjørnene som varierte mellom 0.05 og 0.1 mm. Under hulprofilet var det kontaktrykk mellom platene. Belastning til cirka 32 kN ga ingen endring i de målte glipene.



Figur 5.5.7: Kraft-forskyvningskurver for prøve A1 med forspenning

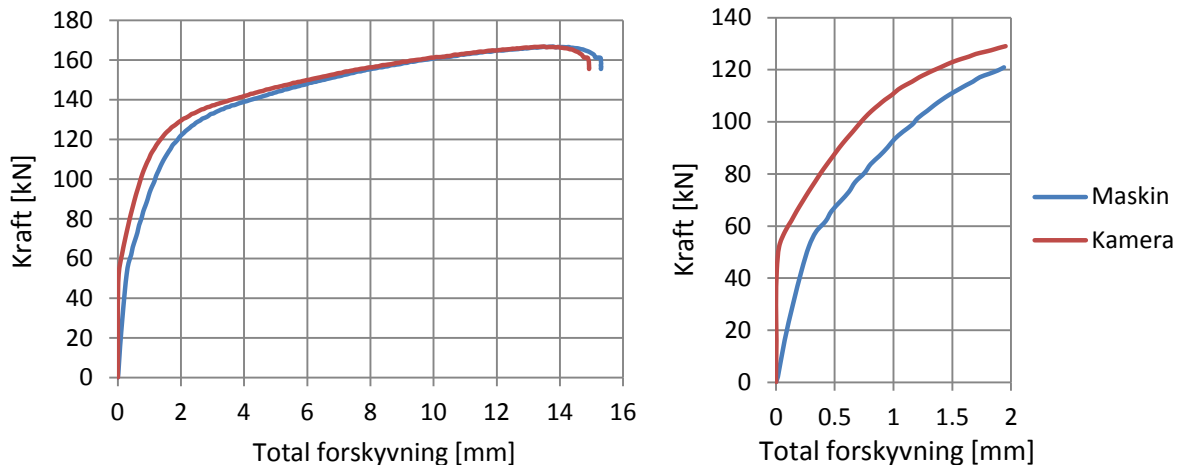
Figur 5.5.7 viser tydelig at forskyvningen registrert i kameramålingen er minimal i forhold til jekkforskyvningen registrert i maskinen. Årsaken til forskjellen er at jekkforskyvningen inkluderer både deformasjonen i maskinen og aksialdeformasjonen av hulprofilet i tillegg til deformasjonen av endeplatene. Ettersom det ikke har oppstått bøyedeformasjoner på dette tidspunktet vil forskyvningen fra kameramålingen være svært liten.

Forsøk med forspenning kjørt til maksimal belastning

Til slutt ble prøven belastet til maksimal kraft. Kraft-forskyvningskurvene viser en knekk i begynnelsen som oppstår fordi strekkraften først må motvirke effekten av forspenningen i boltene før selve knutepunktet belastes. Dette vil i det følgende refereres til som avlastning

av forspenningen. Stigningstallet til kraft-forskyvningskurvene vil dermed være høyere i starten av forsøket enn i området etter avlastningen.

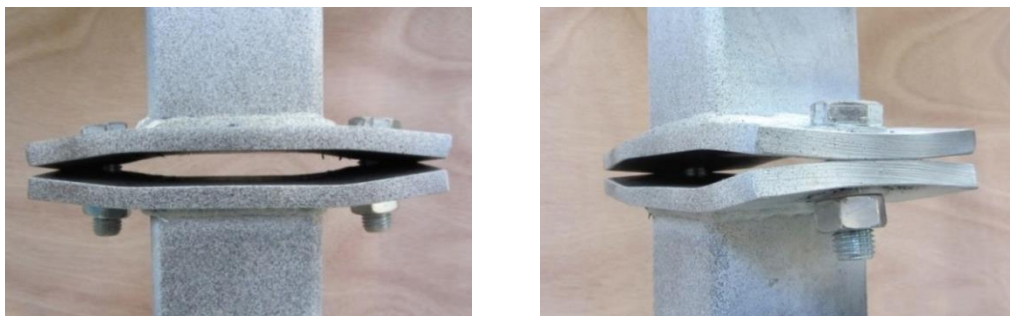
I Figur 5.5.8 vises kraft-forskyvningskurver for prøven med forspente bolter der prøven er belastet til maksimal kraft. Med en belastning på ca. 80 kN var det en synlig glippe under hulprofilet og ut til boltene. Ved 100 kN var denne glipen omtrent 1 mm. Den maksimale kraften ble målt til 166.83 kN. Figuren viser at jekkforskyvingen er større enn forskyvningen funnet fra kameramålingen.



Figur 5.5.8: Kraft-forskyvningskurver for prøve A1 belastet til maksimal kraft

Til høyre i Figur 5.5.8 er det elastiske området vist i detalj. Kurvene viser at avlastningen av forspenningen skjedde i området mellom 50-60 kN.

Figur 5.5.9 viser prøve A1 etter forsøket. Platene bøyes langs en linje inntil hulprofilet, som indikerer at det har oppstått flytning. I tillegg viser figuren at platene deformeres i to retninger og at det kun er kontakt mellom platene ved endekantene utenfor boltene. Det er også vist hvordan hjørnene løftes og at boltene bøyes.



Figur 5.5.9: Prøve A1 etter forsøk

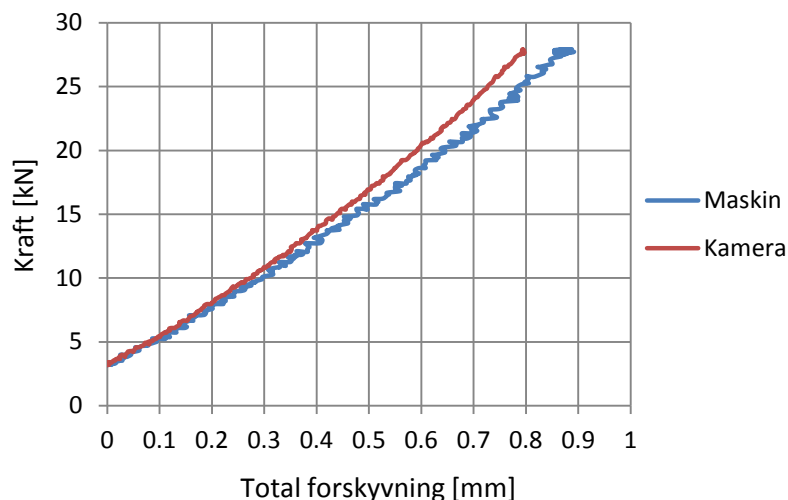
Ved maksimal kraft ble jekkforskyvning avlest til 13.79 mm og forskyvning fra kameramålingen til 13.51 mm. Prøven ble deretter tatt ut av maskinen og forskyvningen av endeplatene ble målt til 12.36 mm. Denne forskyvningen er mindre enn det som ble

registrert i den siste delen av forsøket. Det er et resultat av at avlastningen av prøven fører til at den elastiske deformasjonen reverseres.

5.5.3 Prøve B1

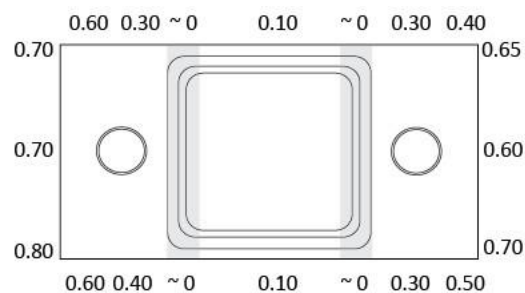
Forsøk med og uten forspente bolter kjørt til ca. 30 kN

Tilsvarende som for prøve A1 ble prøve B1 kjørt til omtrent 30 kN med og uten forspente bolter. Kraft-forskyvningskurver for forsøket uten forspenning er vist i Figur 5.5.10. Figuren viser tydelig de samme forstyrrelsene på kurven fra jekkforskyvningen som for prøve A1.



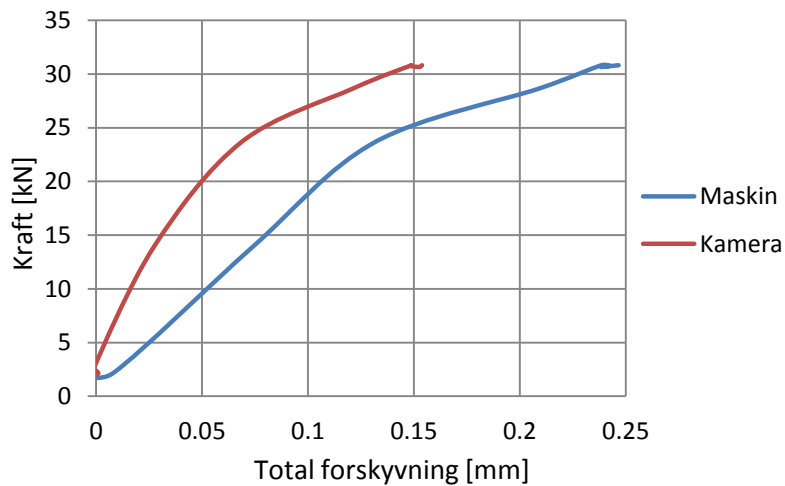
Figur 5.5.10: Kraft-forskyvningskurver for prøve B1 uten forspenning

Før belastning ble glipene mellom endeplatene målt på samme måte som for prøve A1, se Figur 5.5.11. Tilsvarende som for A1 var det ved ca. 25 kN ingen kontakt mellom endeplatene.



Figur 5.5.11: Måling av glipe, B1

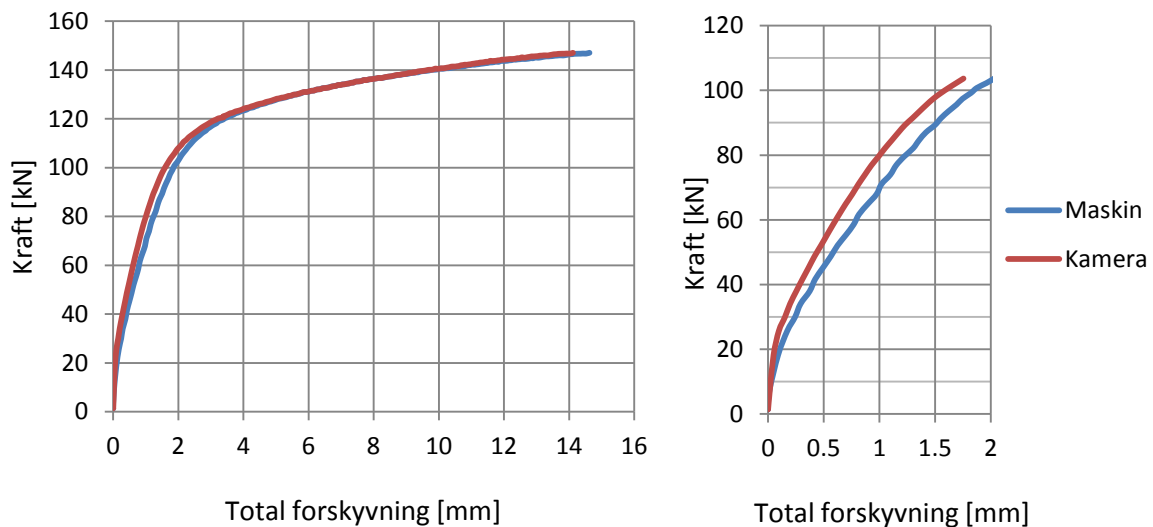
Figur 5.5.12 viser kraft-forskyvningskurver for prøve B1 med forspenning. Før belastning var det en glipe i platehjørnene på 0.20 mm. Midt under hulprofilveggen var glipen 0.15 mm, og kontaktpunktet lå ca. 5 mm innenfor hulprofilveggen. Ved omtrent 30 kN hadde kontaktpunktet flyttet seg til 10 mm utenfor hulprofilveggen.



Figur 5.5.12: Kraft-forskyvningskurver for prøve B1 med forspenning

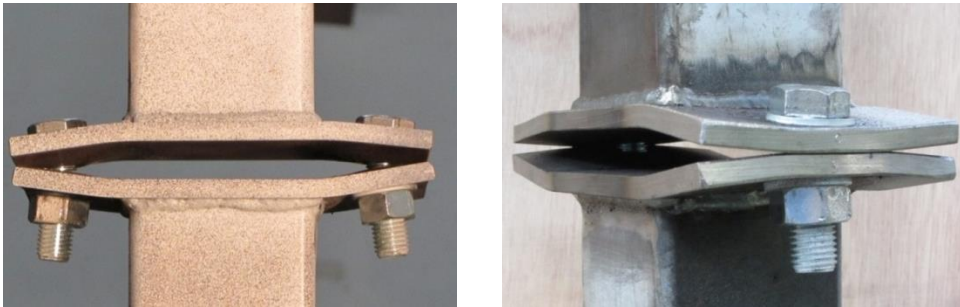
Forsøk med forspenning kjørt til maksimal belastning

Kraft-forskyvningskurver for prøven belastet til maksimal kraft er vist i Figur 5.5.13. Ved 50 kN belastning hadde kontaktpunktene flyttet seg fra innenfor hulprofilet til boltene. Ved 80 kN og 105 kN var glipen under hulprofilet henholdsvis 1.2 mm og 2.5 mm. Maksimal kraft ble målt til 147.07 kN. Avlastningen av forspenningen skjer ved omtrent 20 kN, som er lavere enn for prøve A1.



Figur 5.5.13: Kraft-forskyvningskurver for prøve B1 belastet til maksimal kraft

Figur 5.5.14 viser prøve B1 etter forsøk, og man kan se de samme tendensene i deformasjonen som for prøve A1.



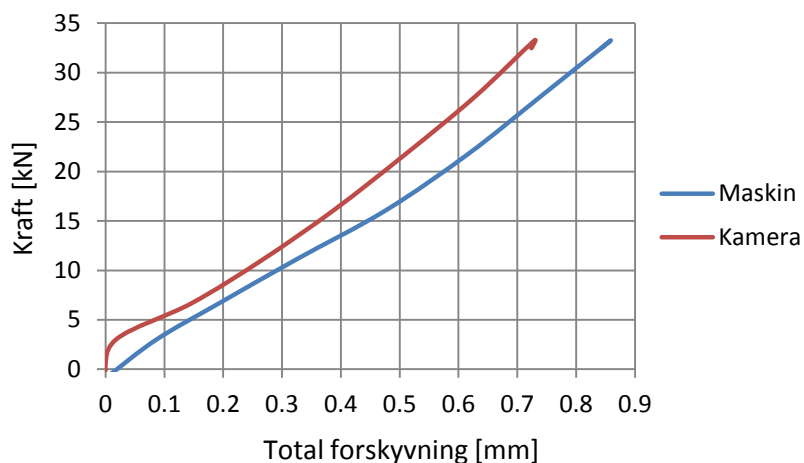
Figur 5.5.14: Prøve B1 etter forsøk

Ved maksimal kraft var jekkforskyvning og forskyvning fra kameramålingen henholdsvis 14.62 mm og 14.11 mm. Etter at prøven var tatt ut av maskinen ble avstanden mellom endeplatene målt til 13.87 mm, noe som også her er lavere enn i siste del av forsøket på grunn av avlastning av prøven.

5.5.4 Prøve A2

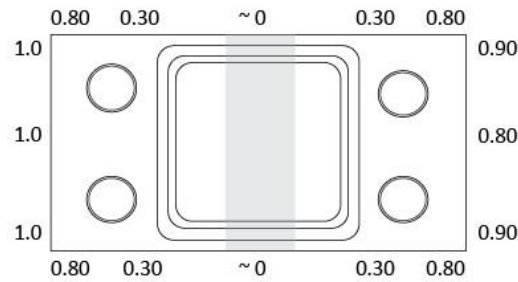
Forsøk med og uten forspente bolter kjørt til ca. 30 kN

Kraft-forskyvningskurver for prøve A2 uten forspente bolter er vist i Figur 5.5.15.



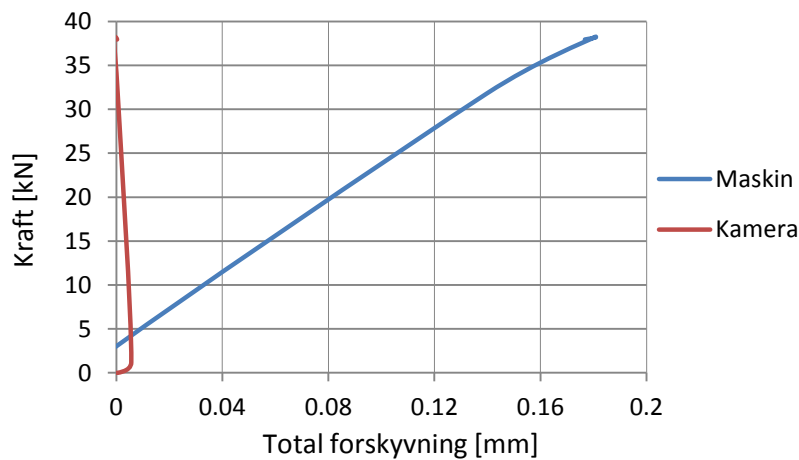
Figur 5.5.15: Kraft-forskyvningskurver for prøve A2 uten forspenning

Glipene før belastning ble også for denne prøven målt og er vist i Figur 5.5.16. Ved omtrent 30 kN var det ingen kontakt mellom endeplatene og glipen under hulprofilet ble målt til 0.8 mm.



Figur 5.5.16: Måling av glipe, A2

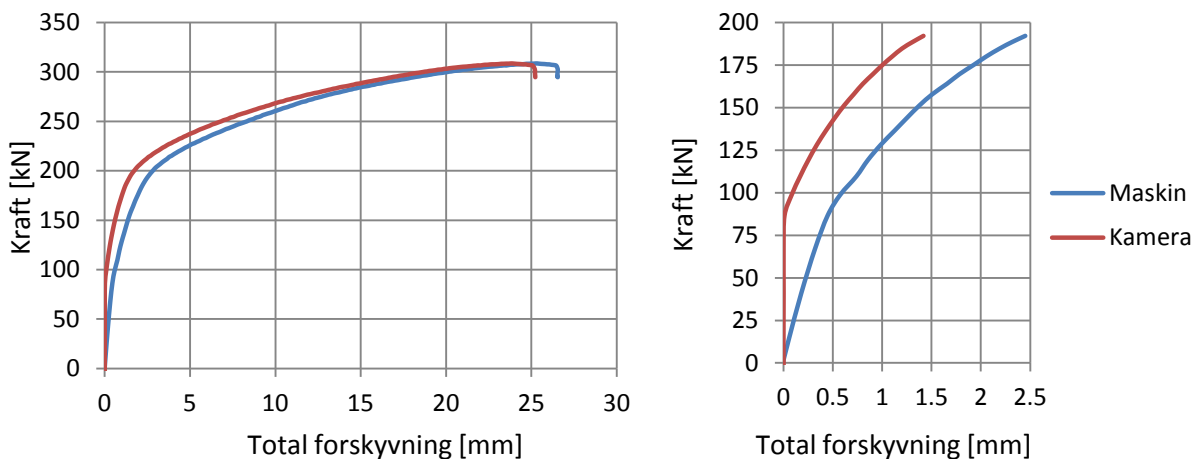
Kraft-forskyvningskurver for prøve A2 med forspente bolter er vist i Figur 5.5.17. Etter forspenning var det ingen glipe mellom endeplatene hverken før eller etter belastning.



Figur 5.5.17: Kraft-forskyvningskurver for prøve A2 med forspenning

Forsøk med forspenning kjørt til maksimal belastning

I Figur 5.5.18 vises kraft-forskyvningskurver for prøve A2 belastet til maksimal kraft. Ved ca. 140 kN var det en synlig glipe under hulprofilet og ved omtrent 170 kN gikk glipen ut til boltene. Maksimal kraft ble målt til 308.5 kN. Forspenningen avlastes i området 85-90 kN.



Figur 5.5.18: Kraft-forskyvningsdiagram for prøve A2 belastet til maksimal kraft

Prøve A2 etter forsøk er vist Figur 5.5.19. I motsetning til de to forrige prøvene bøyes platene både langs en linje inntil hulprofilet og ved boltene, noe som tyder på at platene flyter langs fire linjer. Figuren viser også at endeplatene er i kontakt langs endekantene, og at boltene bøyes.



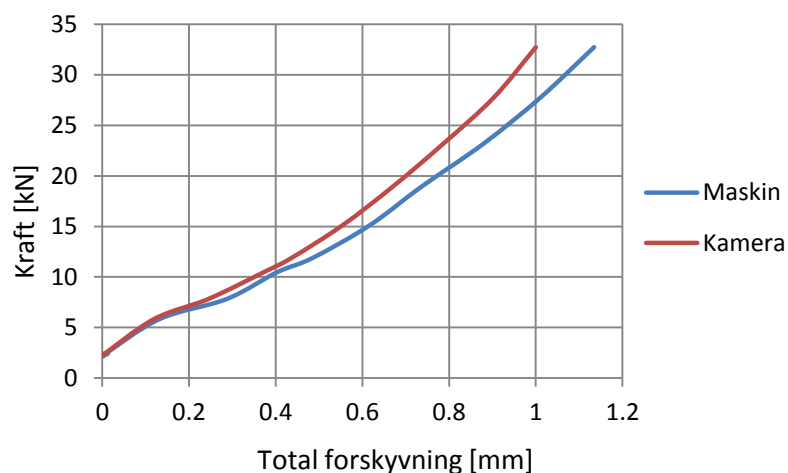
Figur 5.5.19: Prøve A2 etter forsøk

Ved maksimal kraft ble jekkforskyvningen målt til 26.54 mm og forskyvningen fra kameramålingen til 25.48 mm. Måling av prøven etter at den ble tatt ut av maskinen viste en forskyvning av platene på 23.08 mm, som igjen er lavere enn i siste del av forsøket på grunn av avlastning av prøven.

5.5.5 Prøve B2

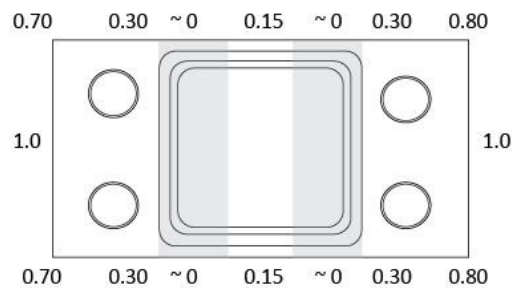
Forsøk med og uten forspente bolter kjørt til ca. 30 kN

Kraft-forskyvningskurver for prøve B2 uten forspenning er vist i Figur 5.5.20.



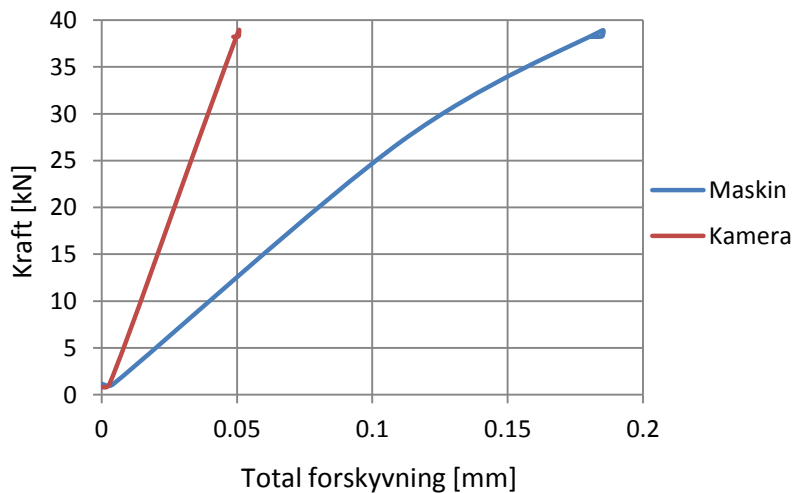
Figur 5.5.20: Kraft-forskyvningskurver for prøve B2 uten forspenning

Figur 5.5.21 viser de målte glipene mellom endeplatene før belastning. Tilsvarende som for prøve A2 var det heller ikke for B2 kontakt mellom endeplatene ved ca. 30 kN. Glipen under hulprofilet ble da målt til 1.1 mm.



Figur 5.5.21: Måling av glippe, B2

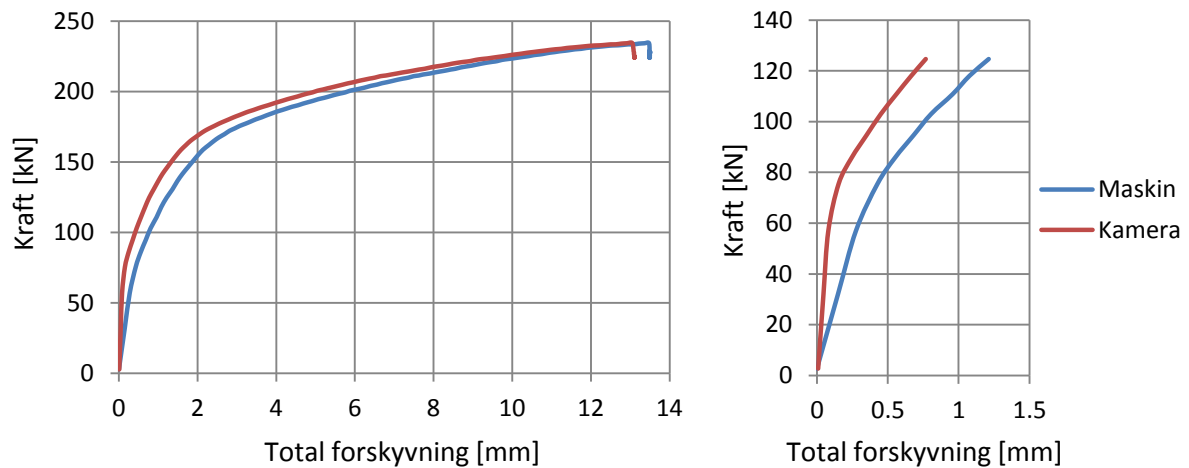
Etter forspenning var det i likhet med A2 ingen glippe hverken før eller etter belastning. Figur 5.5.22 viser kraft-forskyvningskurver for prøve B2 med forspente bolter.



Figur 5.5.22: Kraft-forskyvningskurver for prøve B2 med forspenning

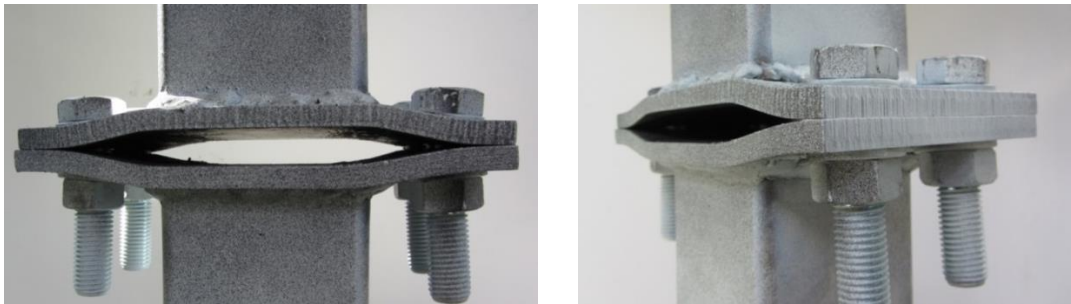
Forsøk med forspenning kjørt til maksimal belastning

Kraft-forskyvningskurver for prøve B2 kjørt til maksimal belastning er vist i Figur 5.5.23. Ved omtrent 100 kN var det en synlig glippe mellom platene under hulprofilet. Maksimal kraft ble avlest til 234.67 kN. Kurvene knekker i området 70-80 kN, som er noe lavere enn for prøve A2.



Figur 5.5.23: Kraft-forskyvningskurver for prøve B2 belastet til maksimal kraft

Figur 5.5.24 viser prøve B2 etter forsøk, og man kan se de samme tendensene i deformasjonen som for prøve A2.



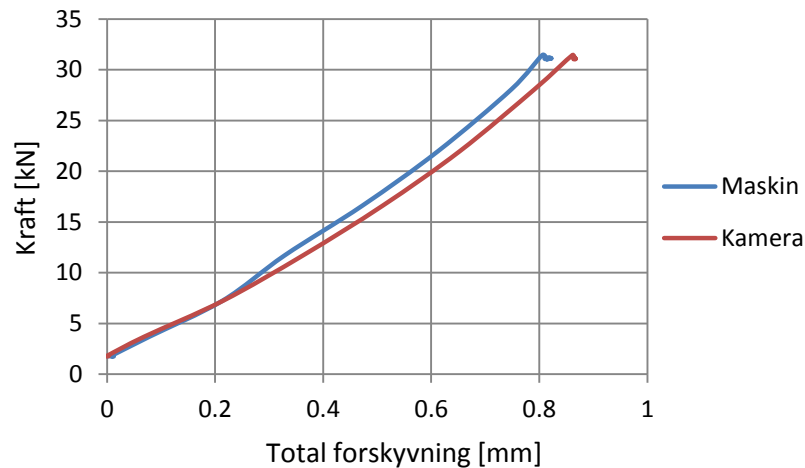
Figur 5.5.24: Prøve B2 etter forsøk

Ved maksimal kraft var jekkforskyvningen og forskyvningen fra kameramålingen henholdsvis 13.47 mm og 13.04 mm. Etter at prøven var tatt ut av maskinen førte avlastning av prøven til at avstanden mellom platene ble redusert til 10.94 mm.

5.5.6 Prøve C

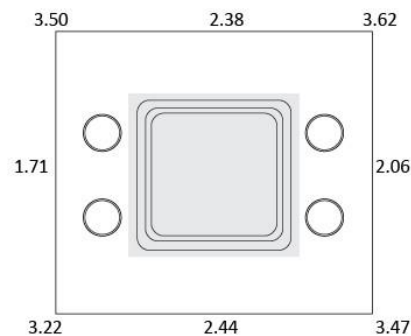
Forsøk med og uten forspente bolter kjørt til ca. 30 kN

Figur 5.5.25 viser kraft-forskyvningskurver for prøve C uten forspente bolter kjørt til omtrent 30 kN.



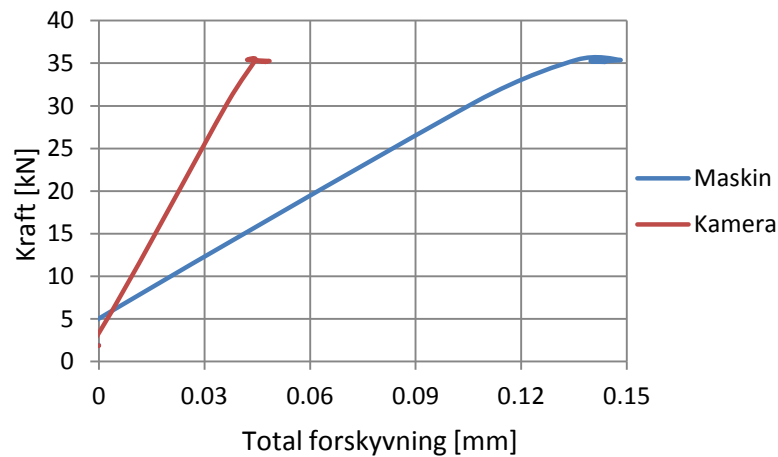
Figur 5.5.25: Kraft-forskyvningskurver for prøve C uten forspenning

Glipene ble som for de andre prøvene målt med bladføler før belastning, og disse er vist i Figur 5.5.26. Som figuren viser var glipene i hjørnene store og varierte mellom 3.22 mm og 3.62 mm. Det skraverte området indikerer kontakttrykk mellom platene og ingen synlig glippe.



Figur 5.5.26: Måling av glippe, C

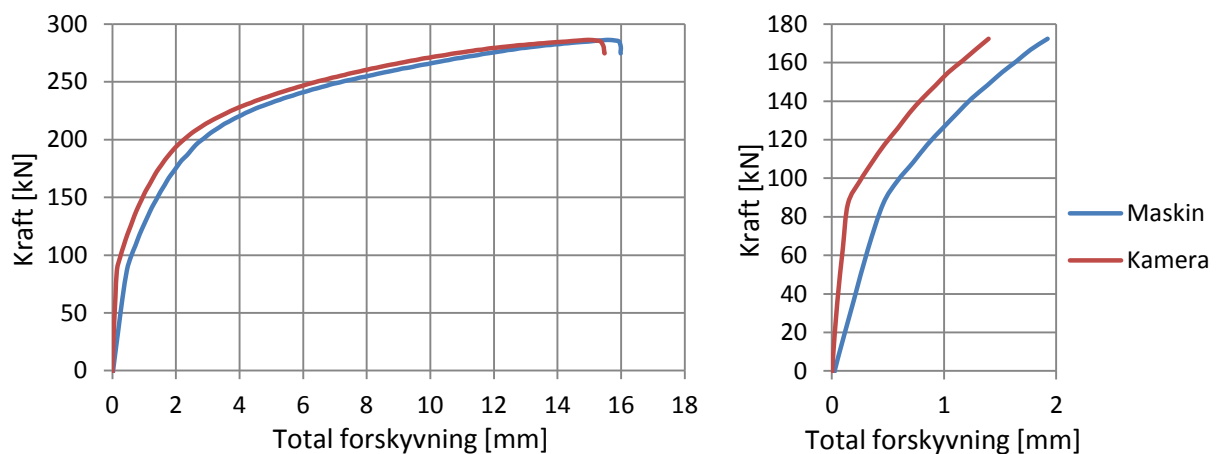
Etter forspenning av boltene var det fremdeles betydelige gliper i hjørnene. Disse varierte mellom 2.26 mm og 2.58 mm. I området mellom boltene og endekantene var det ingen synlig glippe. Det var heller ingen synlig glippe under hulprofilet. Belastningen på 30 kN ga en synlig glippe under hulprofilet, men det var fortsatt kontakt mellom endeplatene ved boltene. Kraft-forskyvningskurver er vist i Figur 5.5.27.



Figur 5.5.27: Kraft-forskyvningskurver for prøve C med forspenning

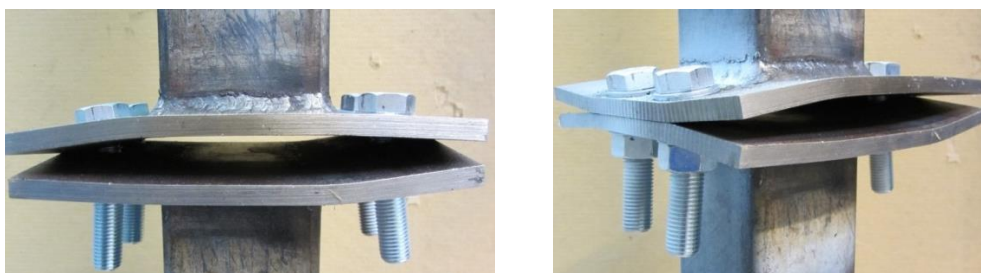
Forsøk med forspenning kjørt til maksimal belastning

Ved 120 kN belastning var det synlig glippe under hele hulprofilet og ut til boltene. Maksimal belastning ble målt til 286.27 kN. Kraft-forskyvningskurver er vist i Figur 5.5.28. Som vist er forspenningen avlastet i området 85-90 kN.



Figur 5.5.28: Kraft-forskyvningskurver for prøve C belastet til maksimal kraft

Prøve C etter forsøk er vist i Figur 5.5.29. Deformasjonen av endeplatene skiller seg fra prøve A2 og B2 på grunn av at platene er brede. Dette fører til at hjørnene løftes og at det kun er kontakt mellom platene ved endekanten mellom boltene. Likevel er det antydning til at platene bøyes både ved boltene og i en linje langs hulprofilet.



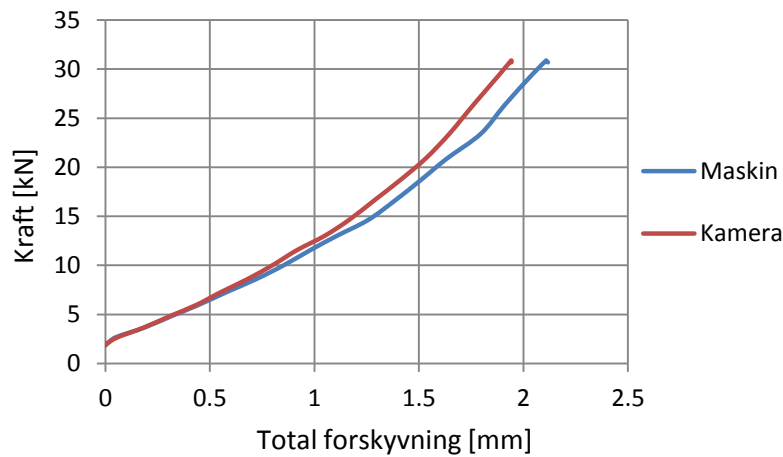
Figur 5.5.29: Prøve C etter forsøk.

Jekkforskyvning og forskyvning fra kameramåling var ved maksimal belastning henholdsvis 15.64 mm og 15.05 mm. Etter at prøven var tatt ut av maskinen ble forskyvningen målt ved å måle avstanden mellom et punkt over sveisen på hver av hulprofilene. Forskyvningen ble da målt til om lag 14 mm.

5.5.7 Prøve D

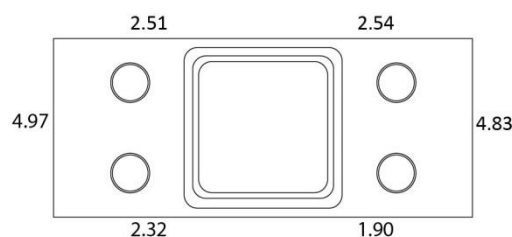
Forsøk med og uten forspenning kjørt til ca. 30 kN

Figur 5.5.30 viser kraft-forskyvningskurver for prøve D uten forspenning.



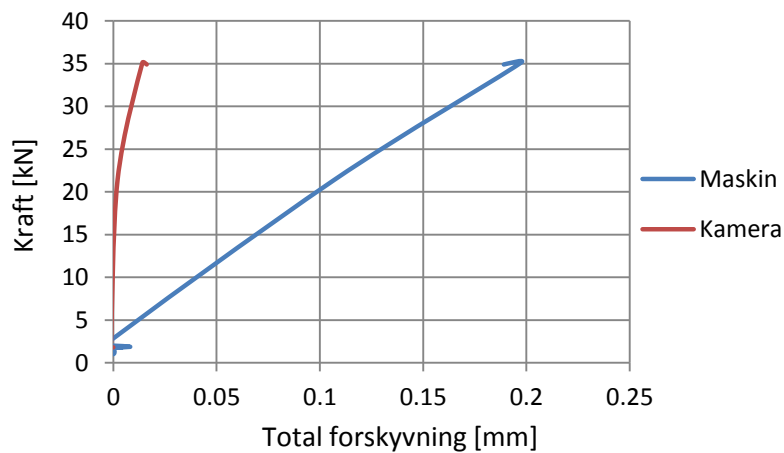
Figur 5.5.30: Kraft-forskyvningskurver for prøve D

De målte glipene mellom endeplatene før belastning er vist i Figur 5.5.31. Uten forspenning ble glipene mellom endekantene målt til 4.83 mm og 4.97 mm, noe som er nesten fem ganger så mye som for prøve A2 og B2. Det var også en synlig glippe gjennom hele knutepunktet. Ved om lag 30 kN var glipen blitt noe større på midten og redusert ved endekantene.



Figur 5.5.31: Måling av glippe, D

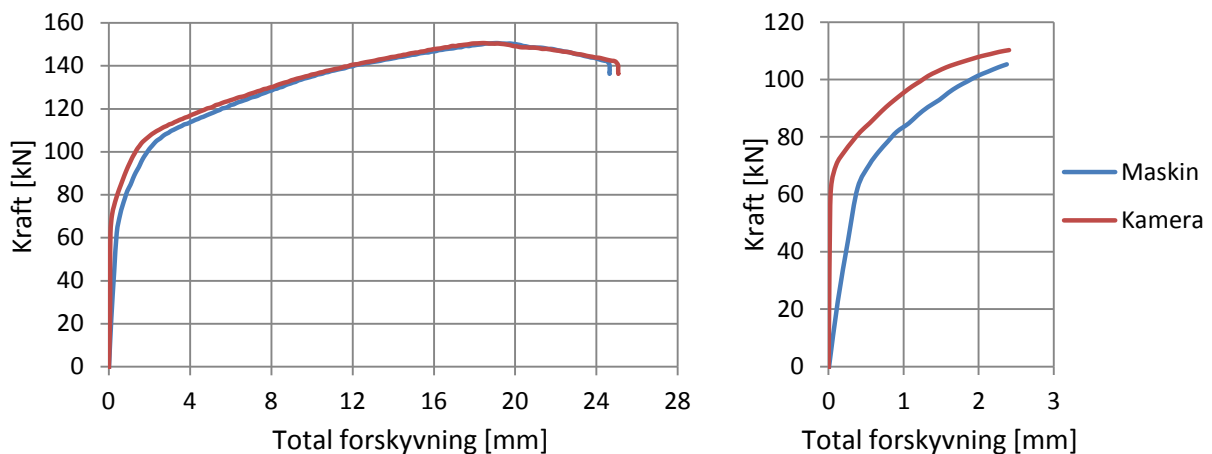
Etter at boltene ble strammet forsvant glipen ytterst mellom platene, og glipen under hulprofilet ble målt til 0.30 mm. Ved ca. 30 kN var det fremdeles ingen glippe mellom endekantene, men glipen under hulprofilet hadde økt til 0.35 mm. Kraft-forskyvningskurver for forsøket med forspenning er vist i Figur 5.5.32.



Figur 5.5.32: Kraft-forskyvningskurver for prøve D med forspenning

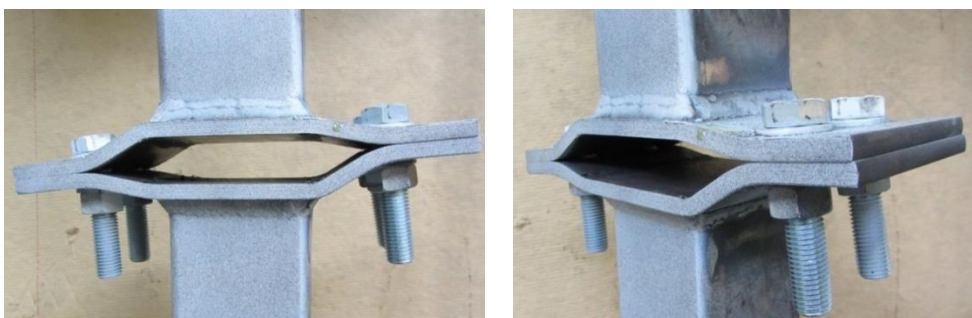
Forsøk med forspenning kjørt til maksimal belastning

Prøve D ble deretter belastet til maksimal kraft. Ved 82 kN var det en synlig glippe mellom endeplatene under hulprofilet og ut til boltene. Kraft-forskyvningskurver er vist i Figur 5.5.33. Maksimal belastning ble registrert ved 150.62 kN.



Figur 5.5.33: Kraft-forskyvningskurver for prøve D belastet til maksimal kraft

Figur 5.5.34 viser prøve D etter at forsøket var avsluttet. Endeplatene bøyes som for prøve A2 og B2, både langs en linje inntil hulprofilet og ved boltene. Figuren viser også at boltene er mindre bøyd enn i prøve A2 og B2.



Figur 5.5.34 Prøve D etter forsøk

Jekkforskyvning og forskyvning fra kameramålingen var henholdsvis 19.06 mm og 18.62 mm ved maksimal belastning. Den maksimale jekkforskyvningen var 24.64 mm og den maksimale forskyvningen fra kameramålingen var 25.08 mm. Uten last ble forskyvningen målt til 22.90 mm, noe som betyr at den elastiske deformasjonen hadde blitt reversert.

5.6 Sammenligning av stivheter

For prøvene presentert i foregående delkapitler beregnes det i dette kapittelet stivheter for de ulike forsøkene som ble utført for hver prøve. Stivheten beregnes som stigningstallet til kraft-forskyvningskurvene.

For forsøkene uten forspenning plottes kraft-forskyvningskurvene sammen med kurvens beregnede stigningstall. Dette stigningstallet kalles «start». Som beskrevet i delkapittel 5.5 var det tydelige gliper mellom endeplatene før belastning og det kan antas at det ikke oppstod hevarmskrefter. Uten hevarmskrefter vil den teoretiske elastiske stivheten kunne beregnes ved hjelp av en statisk modell for utkrager. Det er vist i delkapittel 5.6.1. Denne stivheten kalles utkragermodell og plottes også i diagrammene.

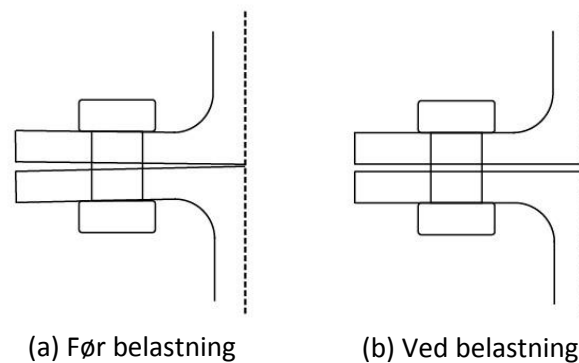
Kraft-forskyvningskurvene for forsøkene med forspenning opp til 30 kN belastning viser at forskyvningen er minimal. Det gjør at stigningstallene til disse grafene blir svært store. Kraft-forskyvningskurvene til flere av forsøkene ga store variasjoner i stigningstallene som gjør det vanskelig å finne et stigningstall som beskriver hele kurven. Det velges derfor å ikke inkludere disse i sammenligningen.

For forsøkene som ble belastet til maksimal kraft er forskyvningen fra kameramålingene brukt i kraft-forskyvningskurvene. Det beregnes stigningstall til grafen i områdene både før og etter avlastning av forspenningskraften. Dette gjøres for å kunne vurdere forskjellen mellom stivheten i det forspente området og etter avspenning. Disse plottes sammen med kraft-forskyvningskurvene til prøvene.

5.6.1 Stivhet beregnet med utkragermodell

Uten forspente bolter vil ikke endeplatene presses sammen, og det vil derfor ikke oppstå hevarmskrefter. Knutepunktstandarden (CEN, 2005) forutsetter at hevarmskrefter opptrer i hele deformasjonsforløpet for at beregningsreglene skal kunne brukes. Det betyr at stivhetsmodellen som presenteres i knutepunktstandarden ikke vil kunne brukes for å beregne stivheten til knutepunkt med håndstrammede bolter.

Figur 5.6.1 viser hvordan endeplaten deformeres når det ikke er forspenning i boltene. Uten kontakt mellom endeplatene antas det at deformasjonen hovedsakelig består av bøyning av endeplaten inne ved steget.



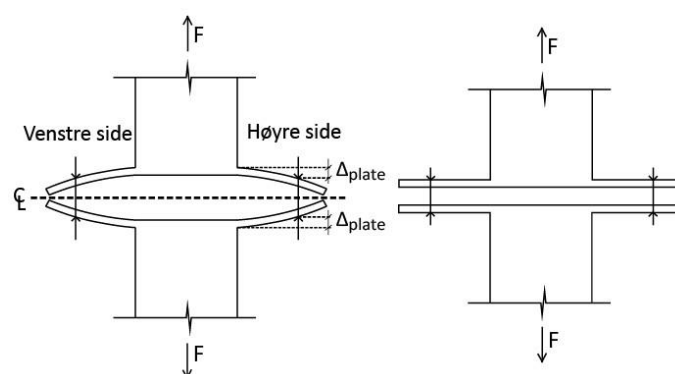
Figur 5.6.1: Deformasjon av endeplate uten forspenning

For knutepunkt uten forspenning vil den teoretiske elastiske stivheten dermed kunne beregnes ved å benytte en utkragermodell. Det er rimelig å anta at stivheten beregnet med en slik modell vil være lavere enn beregnet med knutepunktstandarden. Årsaken til det er at kontakt mellom endeplatene gir en deformasjon av platen som krever mer kraft enn tilfellet uten kontakt.

I det følgende utvikles de stivhetskoeffisienter for beregning av stivhet til knutepunkt uten forspenning. Dette gjøres for å kunne vurdere hvor godt en utkragermodell estimerer stivheten. Det er to bidrag til deformasjonen av knutepunktet og det antas at disse virker uavhengig av hverandre. Bidragene er som følger:

1. Platene bøyes
2. Boltene strekkes

Bidragene er illustrert i Figur 5.6.2.

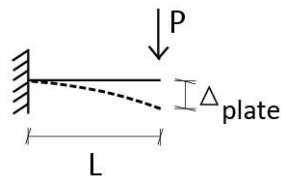


Figur 5.6.2: Endeplate i bøyning og bolter i strekk

Figuren viser også hvordan knutepunktet deles inn i to deler, en på hver side av senterlinjen. Hver del består av en høyre og en venstre side.

5.6.1.1 Stivhetskoeffisient for bøyning av platen

Kraften F vil føre til bøyning av to utstikkende plater, en på venstre side av hulprofilet og en på høyre side av hulprofilet. Sammenhengen mellom kraft og stivhet for bøyning av en utkrager antas å være kjent og er vist i Figur 5.6.3. Ligning 5.6 viser sammenhengen.



Figur 5.6.3: Kraft og deformasjon av utkrager

$$\Delta = \frac{PL^3}{3EI} \quad (5.6)$$

Kraften F fordeles på venstre og høyre side av hulprofilet, noe som vil si at kraften som virker på hver utstikkende plate er $F/2$. Lengden L vil tilsvare avstanden m som er avstanden fra senter bolt til hulprofilveggen minus $0.8a\sqrt{2}$. Dette settes inn i ligning 5.6 og resultatet er vist i ligning 5.7.

$$\Delta = \frac{\left(\frac{F}{2}\right)m^3}{3EI} = \frac{Fm^3}{6EI} \quad (5.7)$$

Dette representerer det som skjer av platedeformasjon for én side av halve skjøten. Ligning 5.7 løses for kraften og resultatet er vist i ligning 5.8.

$$F = \frac{6EI}{m^3}\Delta \quad (5.8)$$

2. arealmoment for den utstikkende platen er gitt i ligning 5.9.

$$I = \frac{1}{12}b_p t_p^3 \quad (5.9)$$

Hvorvidt uttrykket i ligning 5.9 bør brukes kan diskuteres ettersom denne beskriver bjelkestivhet. Da det i dette tilfellet er en plate som bøyes kan platestivhet brukes. Den er gitt i ligning 5.10.

$$I = \frac{1}{12(1-\nu^2)}b_p t_p^3 = \frac{1}{12(1-0.3^2)}b_p t_p^3 = 1.1 \cdot \frac{1}{12}b_p t_p^3 \quad (5.10)$$

NS-EN 1993-1-8 benytter bjelkestivheten i ligning 5.9 i utledningen av stivhetskoeffisienten for plate. Det er derfor valgt å benytte bjelkestivhet også i denne utledningen.

Uttrykket for stivhetskoeffisienten for platen beskrives som i knutepunktstandarden ved å holde E-modulen utenfor. Sammenhengen mellom kraft, stivhet og deformasjon for en aksialbelastet fjær ble introdusert i kapittel 3.5 og gjengis under.

$$F = E \cdot k \cdot \Delta$$

Ved å sammenligne denne med ligning 5.8 blir stivhetskoeffisienten til endeplaten for halve skjøyten som vist i ligning 5.11.

$$k_p = \frac{6I}{m^3} = \frac{6}{m^3} \cdot \frac{1}{12} b_p t_p^3 = \frac{1}{2} \frac{b_p t_p^3}{m^3} \quad (5.11)$$

I ligning 5.11 antas det at hele bredden av endeplaten b_p bøyes. Knutepunktstandarden benytter på sin side $0.8667l_{\text{eff}}$ som den bredden av platen som bøyes. Når stivhetskoeffisienten til endeplaten skal beregnes må det derfor vurderes hvilken bredde som bøyes.

5.6.1.2 Stivhetskoeffisient for bolt

Den generelle sammenhengen mellom aksiallast og forskyvning er som vist under.

$$P = \frac{EA}{L} \Delta$$

På den ene siden av halve skjøyten virker kraften $F/2$, se Figur 5.6.2. For knutepunkt med fire bolter vil to bolter bære lasten $F/2$, og boltene strekkes like mye. Boltkraften F_b i hver bolt kan dermed uttrykkes som vist i ligning 5.12.

$$F_b = \frac{\left(\frac{F}{2}\right)}{2} = \frac{EA_s}{L_b} \Delta_b \quad (5.12)$$

Løst for kraften F blir det som vist i ligning 5.13.

$$F = 4 \frac{EA_s}{L_b} \Delta_b \quad (5.13)$$

Ved å sammenligne ligning 5.13 med den generelle sammenhengen mellom aksiallast og forskyvning, blir uttrykket for stivhetskoeffisienten til knutepunktets fire bolter som vist i ligning 5.15.

$$k_b = 4.0 \frac{A_s}{L_b} \quad (5.14)$$

Ligning 5.14 gir stivhetskoeffisienten når boltene tøyres over hele skjøyten i hele sin tøyningsslengde L_b . For å få et uttrykk for stivhetskoeffisienten for halve skjøyten må boltens halve tøyningsslengde benyttes.

Boltens stivhetskoeffisient for halve skjøten blir da som vist i ligning 5.15.

$$k_b = 4.0 \frac{A_s}{L_b/2} = 8 \frac{A_s}{L_b} \quad (5.15)$$

A_s er boltens tverrsnittsareal, og boltens tøyningsslengde L_b regnes fra midt i hodet til midt i mutter.

5.6.1.3 Total stivhet for knutepunktet

Stivheten til halve skjøten beregnes ved å koble stivhetskoeffisientene i serie. Det gjøres tilsvarende som i kapittel 3.5 og er vist nedenfor.

$$\frac{1}{k_{halv\ skj\otet}} = \frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_p} \rightarrow k_{halv\ skj\otet} = \frac{1}{\frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_p}}$$

Ved å sette inn uttrykkene for k_b og k_p fås den totale stivhetskoeffisienten til halve skjøten. Denne er gitt i ligning 5.16.

$$k_{halv\ skj\otet} = \frac{1}{\frac{1}{8 \frac{A_s}{L_b}} + \frac{1}{\frac{1}{2} \frac{b_p t_p^3}{m^3}}} \quad (5.16)$$

Stivheten til hele knutepunktet finnes ved å multiplisere uttrykket i ligning 5.16 med $\frac{1}{2}$, som vist i ligning 5.17.

$$k_{total} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\frac{1}{8 \frac{A_s}{L_b}} + \frac{1}{\frac{1}{2} \frac{b_p t_p^3}{m^3}}} = \frac{1}{\frac{1}{4 \frac{A_s}{L_b}} + \frac{1}{\frac{1}{4} \frac{b_p t_p^3}{m^3}}} = \frac{1}{\frac{L_b}{4A_s} + \frac{4m^3}{b_p t_p^3}} \quad (5.17)$$

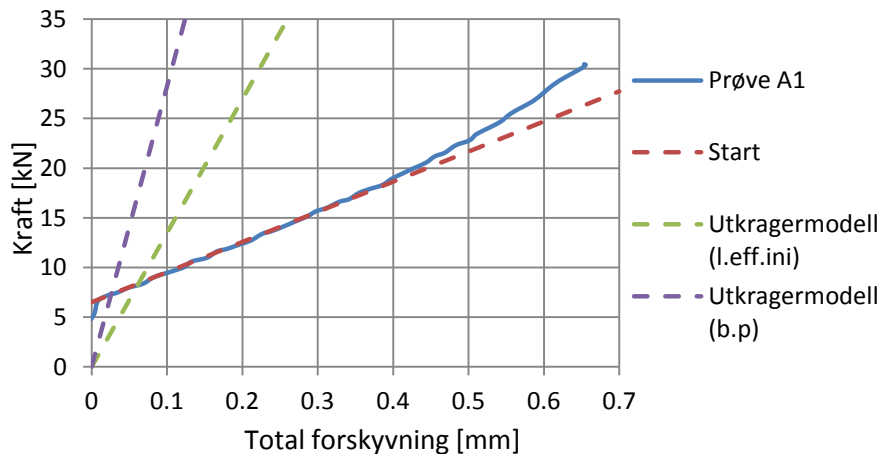
Den elastiske stivheten til hele knutepunktet finnes ved å multiplisere k_{total} med elastisitetensmodulen.

$$K_{el} = k_{total} \cdot E$$

5.6.2 Stivhetsdiagrammer

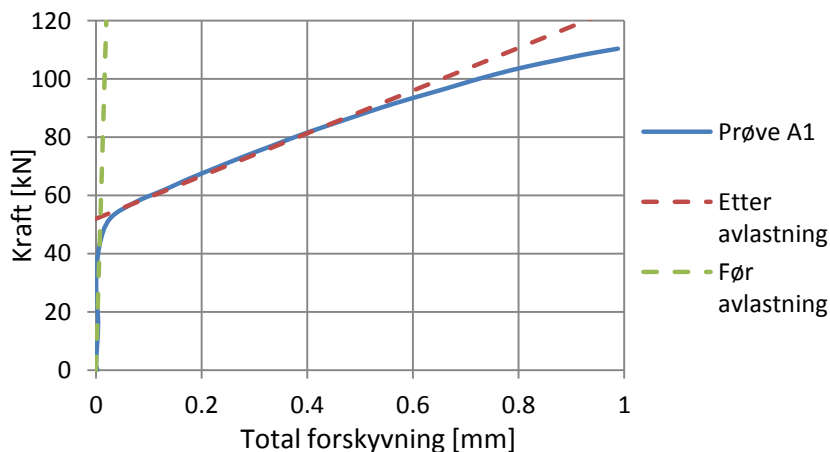
I diagrammene for forsøkene uten forspenning plottes stigningstallet til kurven (start) sammen med stivheten beregnet ved å bruke uttrykket for stivhet for en utkrager utledet i delkapittel 5.6.1. Utkragerstivheten beregnes både ved å anta at hele bredden av endeplaten bøyes og ved å anta at bredden som bøyes er $0.8667l_{\text{eff}}$. Disse stivhetene er kalt henholdsvis utkragermodell (b_p) og utkragermodell ($l_{\text{eff,ini}}$) i diagrammene.

Figur 5.6.4 viser resultater for prøve A1 uten forspenning.



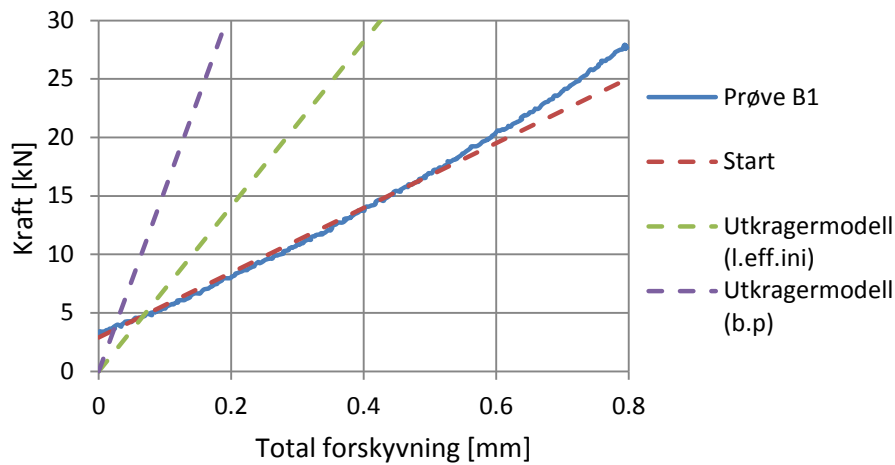
Figur 5.6.4: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve A1 uten forspenning

Figur 5.6.5 viser resultatet for prøve A1 med forspenning kjørt til maksimal belastning. Stigningstall før og etter avlastning av forspenningen er vist som stiplede linjer i diagrammet.

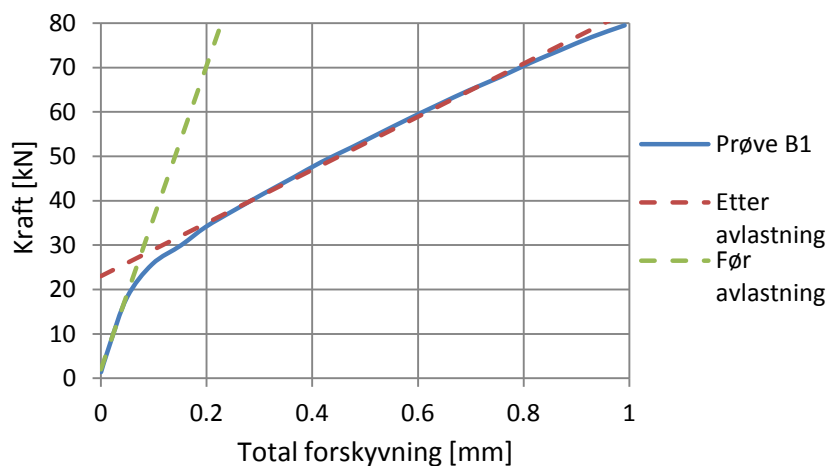


Figur 5.6.5: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve A1 med forspenning

Figur 5.6.6 viser resultater for prøve B1 uten forspenning bolter. I Figur 5.6.7 er forsøket med forspenning kjørt til maksimal belastning vist.



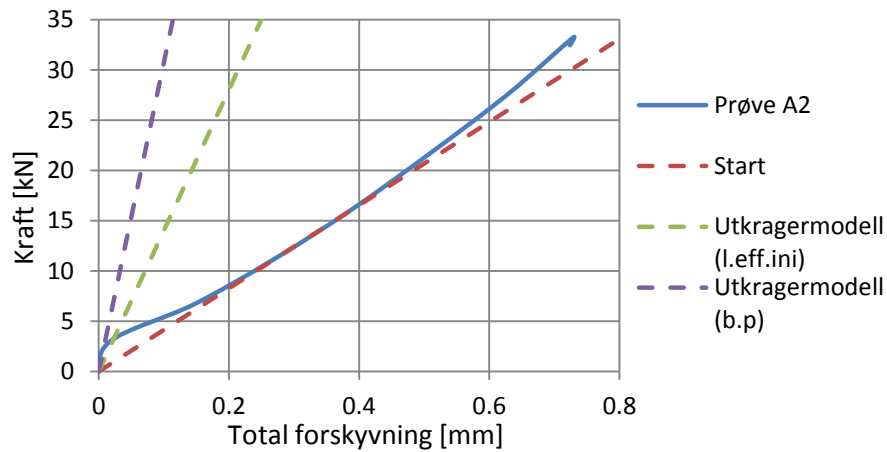
Figur 5.6.6: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve B1 uten forspenning



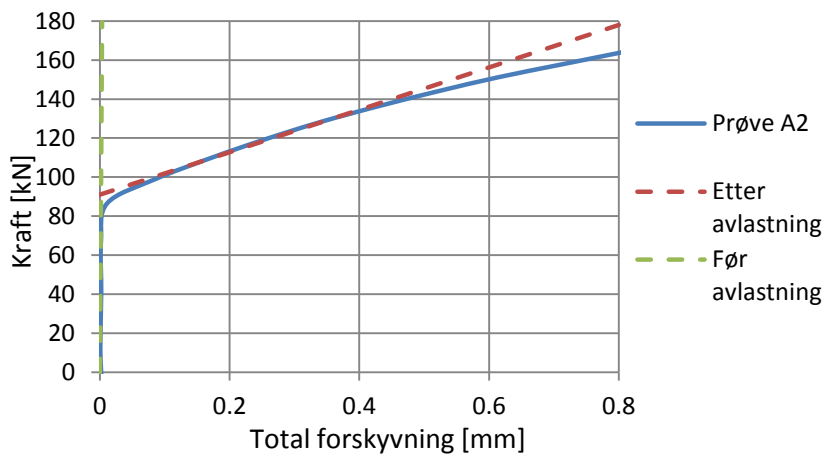
Figur 5.6.7: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve B1 med forspenning

Som for prøve A1 er stigningstallet til kraft-forskyvningskurven før og etter avlastning av forspenningen vist for prøve B1 som stiplede linjer i Figur 5.6.7.

Figur 5.6.8 viser resultater for prøve A2 uten forspenning. Resultater for prøve A2 med forspenning kjørt til maksimal belastning er vist i Figur 5.6.9. Stigningstallet til de stiplede linjene representerer beregnede stivheter.

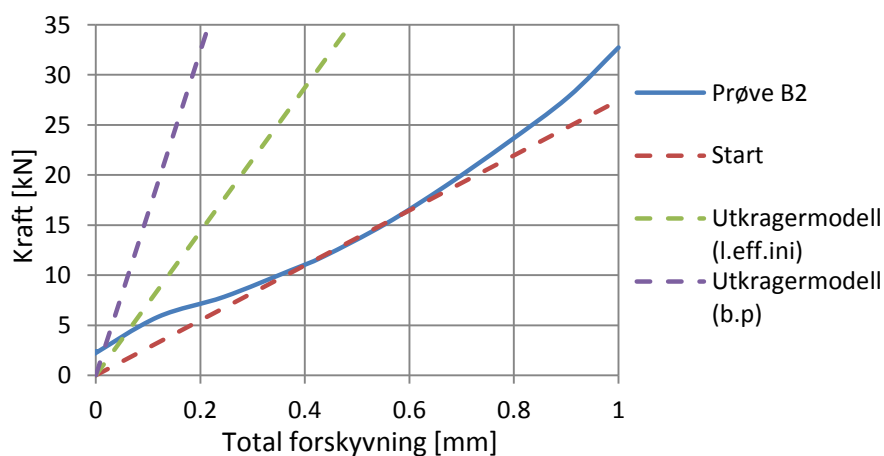


Figur 5.6.8: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve A2 uten forspenning

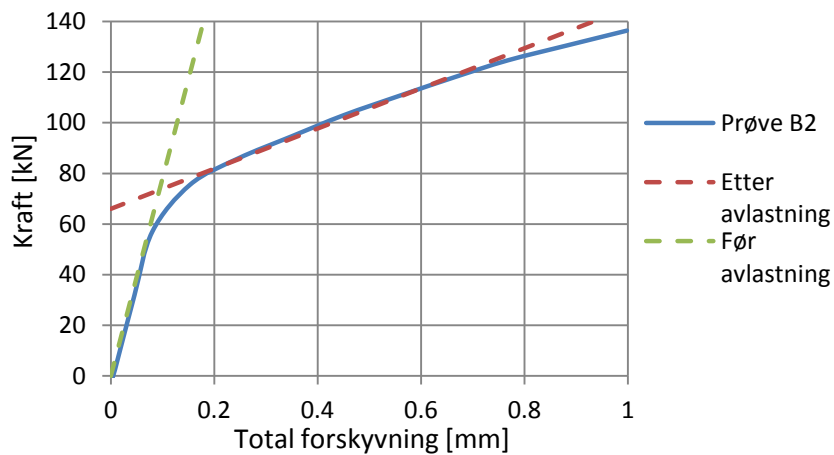


Figur 5.6.9: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve A2 med forspenning

Figur 5.6.10 viser resultater for forsøket med prøve B2 uten forspente bolter. Resultater fra forsøket med forspenning til maksimal belastning er vist i Figur 5.6.11.

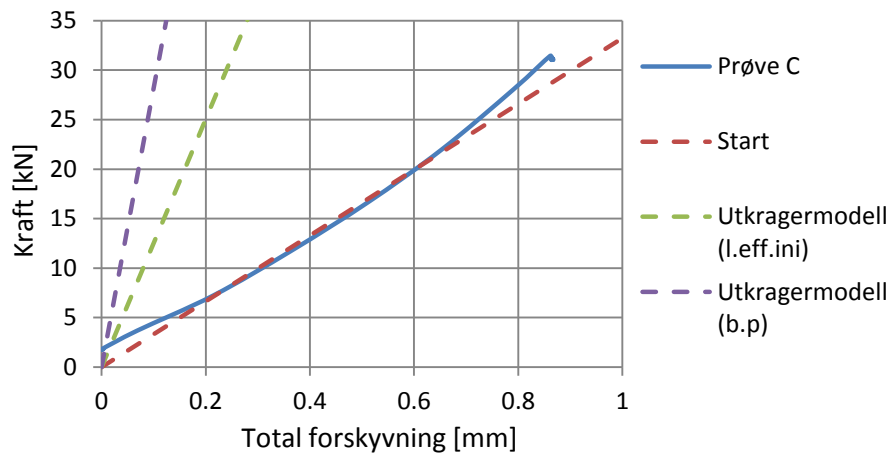


Figur 5.6.10: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve B2 uten forspenning

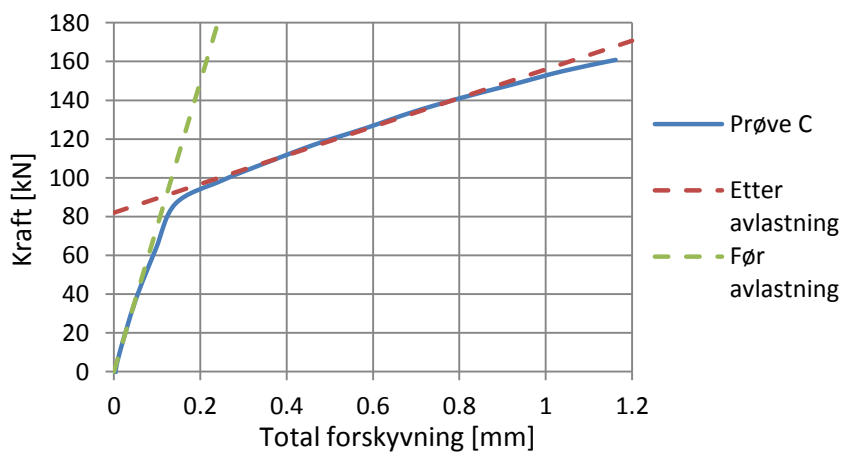


Figur 5.6.11: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve B2 med forspenning

I Figur 5.6.12 vises resultater for prøve C for forsøket uten forspenning. Figur 5.6.13 viser resultater for forsøket med forspenning kjørt til maksimal belastning.

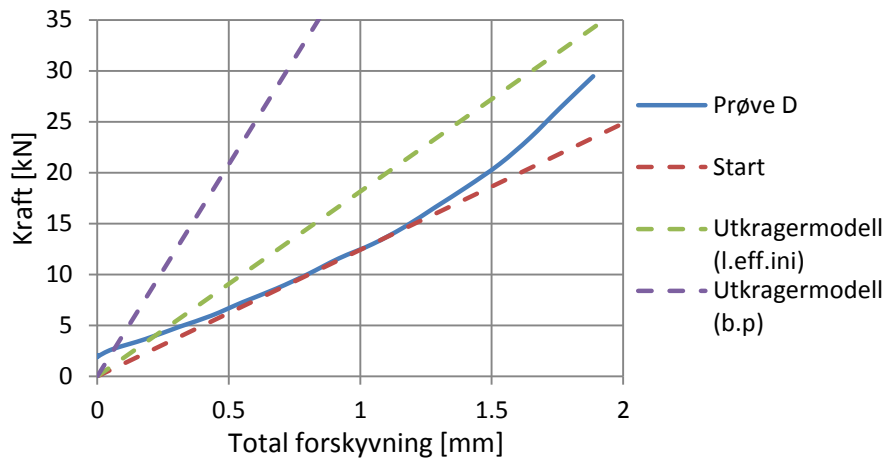


Figur 5.6.12: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve C uten forspenning

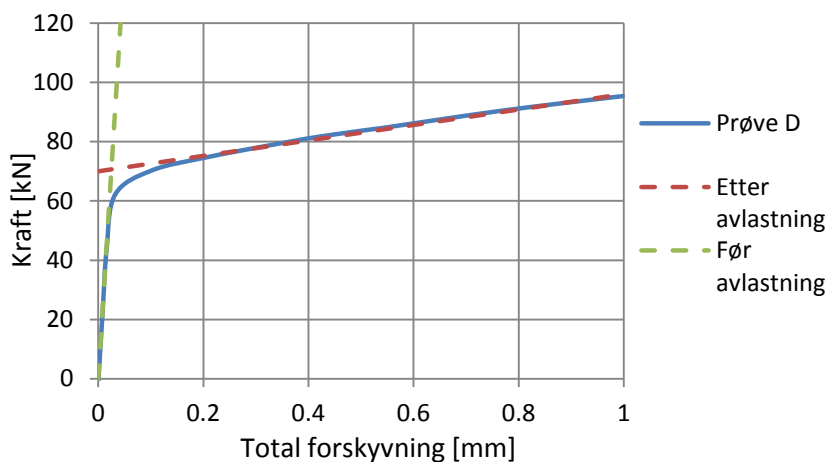


Figur 5.6.13: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve C med forspenning

Figur 5.6.14 og Figur 5.6.15 viser resultatene for prøve D tilsvarende som for de andre prøvene.



Figur 5.6.14: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve D uten forspenning



Figur 5.6.15: Kraft-forskyvningskurve og stigningstall for prøve D med forspenning

I Tabell 5.6.1 er stivhetstall fra kurvene i Figur 5.6.4, Figur 5.6.6, Figur 5.6.8, Figur 5.6.10, Figur 5.6.12 og Figur 5.6.14 presentert.

Tabell 5.6.1: Stivhetstall for forsøk uten forspenning

Stivhet Prøve	Start [kN/mm]	Utkragermodell ($l_{eff,ini}$) [kN/mm]	Utkragermodell (b_p) [kN/mm]
A1	30.33	134.73	282.32
B1	27.69	70.50	155.37
A2	41.37	140.16	307.25
B2	27.44	71.79	161.79
C	33.24	125.23	281.90
D	12.42	18.15	41.63

Tabell 5.6.1 viser at stivhetene beregnet med utkragermodellen presentert i delkapittel 5.6.1 ikke stemmer overens med stivheten fra kraft-forskyvningskurvene til de ikke-forspente prøvene. Det er tilfellet både når hele bredden b_p og når $l_{eff,ini}$ antas å inngå i bøyestivheten til de utkragede platene i modellen. Det gjennomsnittlige avviket mellom stivhetene kalt start og stivhetene fra utkragermodellen med $l_{eff,ini}$ for prøvene er om lag 200 %. Utkragermodellen med b_p gir i tillegg over dobbelt så stor stivhet enn den samme modellen med $l_{eff,ini}$ for samtlige prøver.

Prøve D skiller seg fra de andre prøvene ved at stivheten beregnet med utkragermodellen med $l_{eff,ini}$ kun er 46 % høyere enn startstivheten. Årsaken til det kan være at lengden m i uttrykket for platens stivhetskoeffisient blir større på grunn av den lange endeplaten. Det fører til at den beregnede stivheten til knutepunktet blir mindre.

Basert på sammenligningen av startstivheten og stivhetene beregnet med utkragermodellen er det tydelig at den sistnevnte overestimerer stivheten til knutepunkt uten forspente bolter.

I Tabell 5.6.2 er stivhetstallene for kurvene i Figur 5.6.5, Figur 5.6.7, Figur 5.6.9, Figur 5.6.11, Figur 5.6.13 og Figur 5.6.15 presentert.

Tabell 5.6.2: Stivhetstall for forsøk med forspenning til maksimal belastning

Stivhet Prøve	Før avlastning [kN/mm]	Etter avlastning [kN/mm]
A1	6076.31	73.32
B1	342.09	59.84
A2	52000	108.74
B2	780.67	79.29
C	747.53	73.91
D	2830.17	26.06

Tabell 5.6.2 viser at stigningstallene til kurvene i området før avlastning av forspenningen er svært mye høyere enn stigningstallene i området etter avlastning. For å finne den mest realistiske stivheten til knutepunktene bør områdene etter avlastning derfor benyttes.

Kapittel 6

Håndberegninger

6.1 Innledning

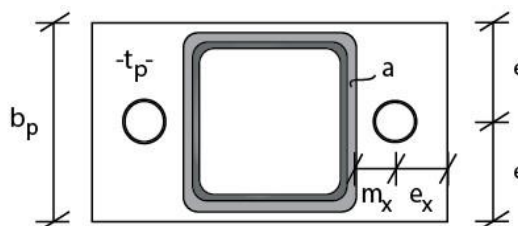
I dette kapittelet presenteres håndberegninger for stivheten til knutepunktene fra laboratorieforsøket. Stivhetsberegningene er utført etter beregningsreglene fra NS-EN 1993-1-8 (CEN, 2005) gjennomgått i kapittel 3, og stivhetsmodellen utviklet av Fredrik Torp Karlsen (Karlsen, 2011) presentert i kapittel 4.

For å oppnå best mulig sammenligningsgrunnlag mot laboratoriet og de numeriske simuleringene er material- og sikkerhetsfaktorer satt lik 1.0 i håndberegningene. Flytespenningen til hulprofilet er antatt å være 355 MPa. Flytespenningen til endeplatene er hentet fra studentarbeidet til Karlsen (Karlsen, 2011) og satt til 464 MPa og 360 MPa for henholdsvis 8 mm og 10 mm platetykkelse.

Stivhetsberegningen er vist i sin helhet for prøve A1. Beregningene for de resterende prøvene er lagt i vedlegg D, og kun resultatene er presentert i dette kapittelet. Det er valgt å bruke teoretiske geometriske mål for alle prøvene, se vedlegg C.2. Unntaket er endeplatetykkelsene, der verdiene 10.2 mm og 8.1 mm brukes. Dette er valgt på bakgrunn av at målingene viste at tykkelsen lå stabilt rundt disse verdiene.

6.2 Prøve A1

Både stivhetsberegning etter knutepunktstandard (CEN, 2005) og stivhetsmodellen utledet i kapittel 4 forutsetter at den effektive lengden, l_{eff} , til knutepunktets ekvivalente T-stykke er kjent. De geometriske målene som er nødvendig for å beregne effektivlengden til T-stykket etter Tabell 3.2.1 er vist i Figur 6.2.1.



Figur 6.2.1: Geometriske mål

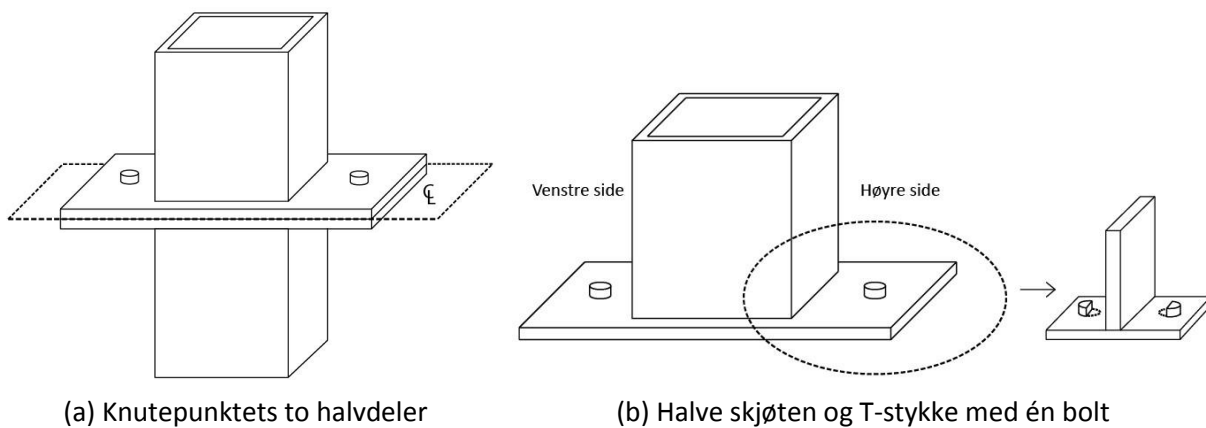
Verdiene for målene i Figur 6.2.1 er gitt i Tabell 6.2.1. Avstanden w er satt lik 0 for å presisere at den utstikkende platedelen i denne knutepunktsgeometrien kun har én bolt. Avstanden m_x er beregnet fra senter bolt til ytterside av hulprofil minus $0.8a\sqrt{2}$, der a er sveisens rotmål.

Tabell 6.2.1: Mål for ekvivalent T-stykke, prøve A1

b_p	e_x	e	w	m_x	t_p	a
100	20	50	0	25.47	10.2	4

Alle tall i tabellen er i mm.

Hver halvdel av knutepunktet består av to T-stykker. For prøve A har hvert T-stykke kun én bolt. Dette er vist i Figur 6.2.2.



Figur 6.2.2: Beskrivelse av knutepunktet

Formelverket i Eurokoden (CEN, 2005) er utledet for tilfellet med to bolter per T-stykke. De effektive lengdene må derfor divideres med to ettersom det kun er en halv bolt på hver side av steget i T-stykket. Det er vist i Figur 6.2.2(b). Dette gjelder alle effektivlengdene unntatt for den globale bruddmekanismen gitt ved $0.5b_p$.

Resultatene fra utregningen av effektive lengder ved sirkulært og ikke-sirkulært mønster er gitt i Tabell 6.2.2.

Tabell 6.2.2: Utregning av l_{eff} , prøve A1

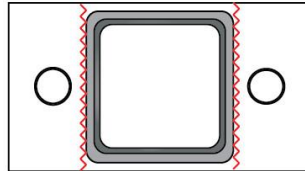
Effektiv lengde $l_{eff,cp}$ ved sirkulært mønster		Effektiv lengde $l_{eff,nc}$ ved ikke-sirkulært mønster		
$\frac{2\pi m_x}{2}$	$\frac{\pi m_x + 2e}{2}$	$\frac{4m_x + 1.25e_x}{2}$	$\frac{e + 2m_x + 0.625e_x}{2}$	$0.5b_p$
80.03	90.02	63.45	56.72	50.00

Alle tall i tabellen er i mm.

Den minste av effektivlengdene i Tabell 6.2.2 er den globale bruddmekanismen $0.5b_p$, vist i ligning 6.1.

$$l_{eff} = 50 \text{ mm} \quad (6.1)$$

Med denne effektivlengden vil kapasiteten til prøve A1 styres av flytning i flens sammenfallende med boltebrudd, som tilsvarende bruddform 2 i kapittel 3.2. Figur 6.2.3 viser flytning i flens i linjer langs hulprofilet.



Figur 6.2.3: Flytelinjer langs hulprofil, prøve A1

Det benyttes M16-8.8 bolter som tilsvarende de som ble benyttet i laboratorieforsøkene. Spenningsarealet, A_s , til denne type bolter er 157 mm^2 (Larsen, Clausen og Aalberg, 2003). Boltens tøyningsslengde, L_b , settes lik 37.9 mm , og er beregnet som lengden av den totale godstykkelsen med underlagsskiver, pluss halve summen av skruehodets høyde og mutterhøyden.

6.2.1 Beregning etter Eurokoden

Platestivhetskoeffisienten for det ene T-stykket i halve skjøten, se Figur 6.2.2(b), er gitt i ligning 6.2.

$$k_p = \frac{0.9l_{eff}t_p^3}{m^3} = \frac{0.9 \cdot 50 \cdot 10.2^3}{25.47^3} = 2.889 \text{ mm} \quad (6.2)$$

I beregning av stivhetskoeffisientene er det valgt å se på de to halvdelene av skjøten hver for seg, som vist i Figur 6.2.2. For den ene halvdel vil bolten tøyes over sin halve lengde, som gjør at boltens tøyningsslengde, L_b , må halveres. Som nevnt er formelverket i Eurokoden utledet for et T-stykke med 2 bolter. For prøve A1 vil T-stykket kun ha én bolt, og stivhetskoeffisienten må derfor divideres med to. Boltstivhetskoeffisienten for det ene T-stykket i halve skjøten er dermed gitt som i ligning 6.3.

$$k_b = \frac{1.6A_s}{L_b/2} \cdot \frac{1}{2} = 1.6 \cdot \frac{157}{37.9/2} \cdot \frac{1}{2} = 6.628 \text{ mm} \quad (6.3)$$

Stivhetskoeffisienten til halve skjøten beregnes som vist i ligning 6.4.

$$k_{venstre} = k_{høyre} = \frac{1}{\frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_b}} = 2.012 \text{ mm} \rightarrow k_{halv skjøt} = 2 \cdot k_{høyre} = 4.024 \text{ mm} \quad (6.4)$$

Den elastiske initielle stivheten til hele skjøten finnes som vist i ligning 6.5. Årsaken til at det multipliseres med faktoren $\frac{1}{2}$ er at knutepunktet består av to like halvdelers. Forskyvningen blir dermed dobbelt så stor for samme kraft og stivheten må halveres.

$$K_{EK} = \frac{k_{halv\ skj\otet}}{2} \cdot E = \frac{4.024}{2} \cdot 210\,000 = 422\,485.8 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (6.5)$$

6.2.2 Beregning etter Karlsens stivhetsmodell

Avstanden, a , i Karlsens stivhetsmodell beregnes som halve lengden av hulprofilet pluss $0.8a\sqrt{2}$. Parameteren a som inngår i $0.8a\sqrt{2}$ er sveisens rotmål. Dette er vist i ligning 6.6.

$$a = \frac{b_{HUP}}{2} + 0.8\sqrt{2}a_{rotm\grave{a}l} = \frac{40}{2} + 0.8\sqrt{2} \cdot 4 = 44.53 \text{ mm} \quad (6.6)$$

Som i kapittel 3 antas det at sammenhengen mellom den effektive lengden og den initielle effektive lengden kan uttrykkes som:

$$l_{eff,ini} = \frac{13}{15} l_{eff} \approx 0.8667 l_{eff}$$

Karlsen antar i sitt arbeid (Karlsen, 2011) at α er lik 1.0. Stivhetskoeffisientene beregnes også for denne modellen for halve skjøten. Det betyr til at boltens tøyningsslengde må halveres. Tilsvarende som for Eurokoden er denne stivhetsmodellen utledet for to bolter per T-stykke og stivhetskoeffisienten til boltene må derfor halveres. De beregnede stivhetskoeffisientene til endeplate og bolt med mål fra Tabell 6.2.1 er gitt i henholdsvis ligning 6.7 og 6.8.

$$k_p = \frac{2(3a + 3m\alpha + n\alpha) \cdot l_{eff,ini} \cdot t^3}{m^2(3m^2\alpha + 4nm\alpha + 12am + 12an)} = 1.153 \text{ mm} \quad (6.7)$$

$$k_b = \frac{1}{2} \frac{4n(3a + 3m\alpha + n\alpha)}{(6am + 6an + 3m^2\alpha + 2n^2\alpha + 6nm\alpha)} \frac{A_s}{L_b/2} = 4.444 \text{ mm} \quad (6.8)$$

Stivhetskoeffisienten til halve skjøten beregnes som vist i ligning 6.9.

$$k_{venstre} = k_{h\o{y}re} = \frac{1}{\frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_b}} = 0.915 \text{ mm} \rightarrow k_{halv\ skj\otet} = 2 \cdot k_{h\o{y}re} = 1.830 \text{ mm} \quad (6.9)$$

Tilsvarende som for Eurokoden beregnes den elastiske initielle stivheten til hele skjøten som vist i ligning 6.10.

$$K_{el} = \frac{k_{halv\ skj\otet}}{2} \cdot E = \frac{1.830}{2} \cdot 210\,000 = 192\,187.8 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (6.10)$$

6.3 Øvrige prøver

I Tabell 6.3.1 er stivheten til de resterende prøvene beregnet etter Eurokoden (CEN, 2005) presentert. Resultatene fra prøve A1 er tatt med for å gi en komplett oversikt.

Tabell 6.3.1: Beregnet stivhet etter Eurokoden (CEN, 2005)

Prøve	Stivhetskoeffisienter			Elastisk stivhet
	Endeplate [mm] k_p	Bolter [mm] k_b	Halve skjøten [mm] $k_{halv\ skj\ot}$	Hele knutepunktet [kN/mm] K_{EK}
A1	2.889	6.628	4.024	422.49
B1	1.447	7.454	2.423	254.41
A2	2.889	13.256	4.744	498.08
B2	1.447	14.908	2.637	276.92
C	2.559	14.908	4.368	458.66
D	0.361	14.908	0.704	73.95

I Tabell 6.3.2 er stivheten til de samme prøvene beregnet etter Karlsens stivhetsmodellen presentert. Resultatene fra prøve A1 er tatt med for å gi en komplett oversikt.

Tabell 6.3.2: Beregnet stivhet etter stivhetsmodell fra kapittel 4

Prøve	Stivhetskoeffisienter			Elastisk stivhet
	Endeplate [mm] k_p	Bolter [mm] k_b	Halve skjøten [mm] $k_{halv\ skj\ot}$	Hele knutepunktet [kN/mm] K_{el}
A1	1.153	4.444	1.830	192.19
B1	0.577	4.998	1.035	108.66
A2	1.153	8.888	2.040	214.25
B2	0.577	9.995	1.091	114.59
C	1.021	9.995	1.853	195.54
D	0.152	12.173	0.301	31.63

Tabell 6.3.2 viser at stivhetene beregnet med Karlsens modell er lavere enn stivhetene beregnet etter Eurokoden. Forskjellen mellom stivhetene ligger i området 120-140 %.

Kapittel 7

Numeriske simuleringer

7.1 Innledning

Det er gjennomført numeriske simuleringer av laboratorieforsøkene. De numeriske simuleringene ble utført i elementmetodeprogrammet Abaqus, versjon 6.11-1. Elementmodellen settes sammen av delkomponenter som modelleres med sine materialegenskaper. De ulike delkomponentene festes så sammen og modellen påføres randbetingelser og last. Resultatene av simuleringen presenteres etter brukerens eget ønske for eksempel i form av farger på den deformerte figuren eller som kurver.

I dette kapitlet beskrives den generelle modelleringsprosessen av endeplateforbindelsene. Først presenteres oppbygging av modellen og deretter ses det nærmere på noen av valgene som er tatt underveis i modelleringen. Til slutt presenteres resultatene fra simuleringene i form av kraft-forskyvningskurver. Formålet med de numeriske simuleringene er å etterprøve forsøkene som ble utført i laboratoriet.

7.2 Delkomponenter

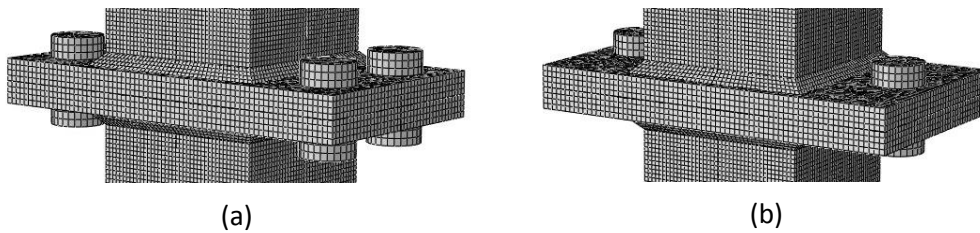
De ulike delkomponentene i elementmodellen ble modellert hver for seg og den komplette modellen av forbindelsen ble satt sammen av følgende delkomponenter:

- Hulprofil
- Endeplate
- Sveis
- Bolt

Det ble i tillegg valgt å modellere stive plater i hver ende av forbindelsen. Platene gjorde det enklere å påføre randbetingelser og last. Dette beskrives nærmere i delkapittel 7.7.

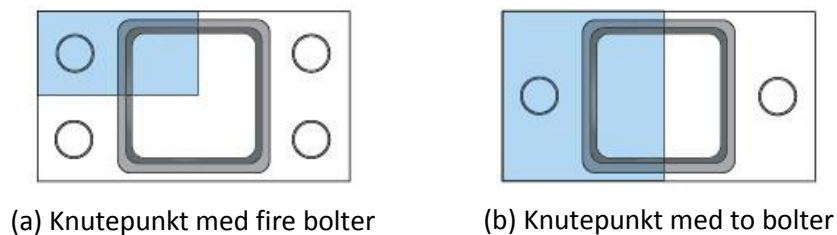
Boltene modelleres med sirkulært hode med diameter lik 24 mm og høyde lik 10 mm. Skaftet modelleres med ytre diameter lik 16 mm, som vil si at gjengene inkluderes. Mutterhøyden er 13 mm. Boltehullene modelleres med diameter 17 mm tilsvarende som i laboratorieforsøket.

Som i forsøkene ble det sett på forbindelser med både en og to bolter på to av sidene av hulprofilet, som vist i Figur 7.2.1.



Figur 7.2.1: Ulike forbindelser

For å redusere simuleringstiden ble symmetrien i endeplateforbindelsene utnyttet i modelleringen. Forbindelsen i Figur 7.2.1(a) ble derfor modellert som en åttendedel. Forbindelsen i Figur 7.2.1(b) ble modellert med en fjerdedel, ettersom bolten var plassert i den ene symmetriaksen. Figur 7.2.2 viser hvordan symmetrien ble utnyttet for de to forbindelsene.



Figur 7.2.2: Utnyttelse av symmetri i modellering

7.3 Materialdata

Materialeegenskapene i det elastiske og plastiske området defineres for hver enkel delkomponent. For at de numeriske simuleringene skal kunne etterligne laboratorieforsøkene på best mulig måte er viktig at materialeegenskapene samsvarer med materialene benyttet i forsøkene.

De elastiske egenskapene til delkomponentene er beskrevet ved elastisitetmodulen til stål, 210 000 MPa, og ved tverrkontraksjon lik 0.3. De plastiske materialdataene defineres som sann spenning og sann tøyning, og bestemmes enten ved strekkforsøk eller beregnes som vist i ligning 5.1-5.5 i delkapittel 5.3.

For sveis og bolter ble det benyttet oppkonstruerte materialeegenskaper, basert på nominelle verdier. Det ble valgt å bruke de samme verdiene som Karlsen presenterer i sitt arbeid (Karlsen, 2011). Karlsen brukte i sine simuleringer også oppkonstruerte materialdata for hulprofilet. I hans arbeid ble altså kun materialeegenskapene til endeplatene bestemt ved strekkforsøk. Tilsvarende som for Karlsen ble det i sammenheng med denne oppgaven utført

strekkforsøk av endeplatematerialet. I tillegg ble det også utført strekkforsøk av hulprofilmaterialet. De numeriske simuleringene i denne rapporten er likevel basert på materialeegenskapene presentert i arbeidet til Karlsen. Dette fordi simuleringene ble utført på et tidligere tidspunkt enn strekkforsøkene. Strekkforsøkene gjennomført i denne oppgaven brukes derfor som en kontroll av Karlsens materialdata.

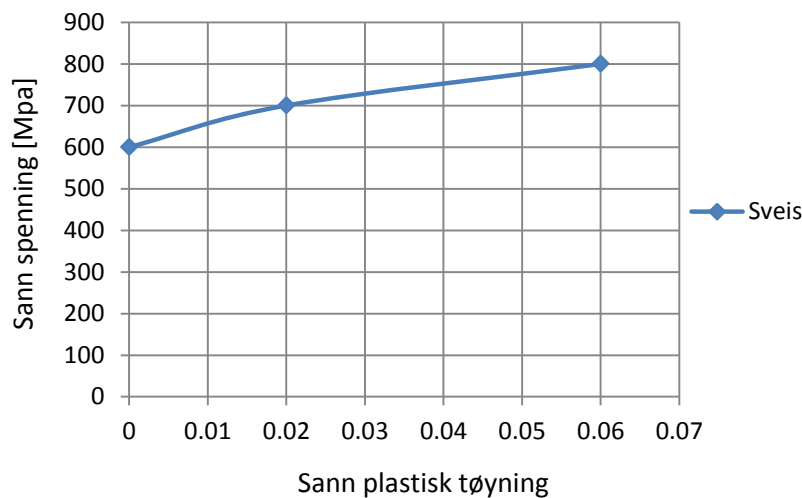
7.3.1 Sveis

I Tabell 7.3.1 er oppkonstruerte verdier for sann spenning og sann tøyning for sveisematerialet presentert.

Tabell 7.3.1: Materialdata for sveis (Karlsen, 2011)

Sann spenning σ_{true} [MPa]	Sann plastisk tøyning ϵ_{true}^{pl}
600	0
700	0.02
800	0.06

Verdiene fra Tabell 7.3.1 er presentert grafisk i Figur 7.3.1.



Figur 7.3.1: Materialkurve for sveis

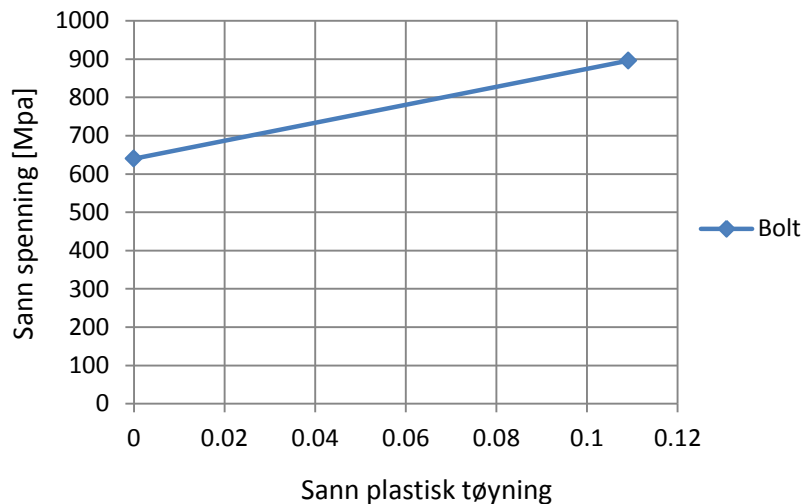
7.3.2 Bolt

Boltene som ble benyttet i forsøkene var av kvalitet 8.8 med flytespenning 640 MPa og bruddspenning på 800 MPa. Disse verdiene ble benyttet som nominelle verdier ved beregning av sann spenning og sann tøyning. Materialdata for boltene er gitt i Tabell 7.3.2. For detaljerte beregninger av verdiene i tabellen henvises det til vedlegg E.1.1.

Tabell 7.3.2: Materialdata for bolt (Karlsen, 2011)

Kvalitet	Ingeniørspenning σ [MPa]	Ingeniørtøyning ε	Sann spenning σ_{true} [MPa]	Sann plastisk tøyning ε_{true}^{pl}
8.8	640	0.003048	642	0
	800	0.12	896	0.1091

Tabellverdiene er presentert grafisk i Figur 7.3.2.



Figur 7.3.2: Materialkurve for bolt

7.3.3 Hulprofil

Oppkonstruerte verdier for sann spenning og sann tøyning for hulprofilmaterialiet er presentert i Tabell 7.3.3. For detaljerte beregninger av verdiene i tabellen henvises det til vedlegg E.1.2.

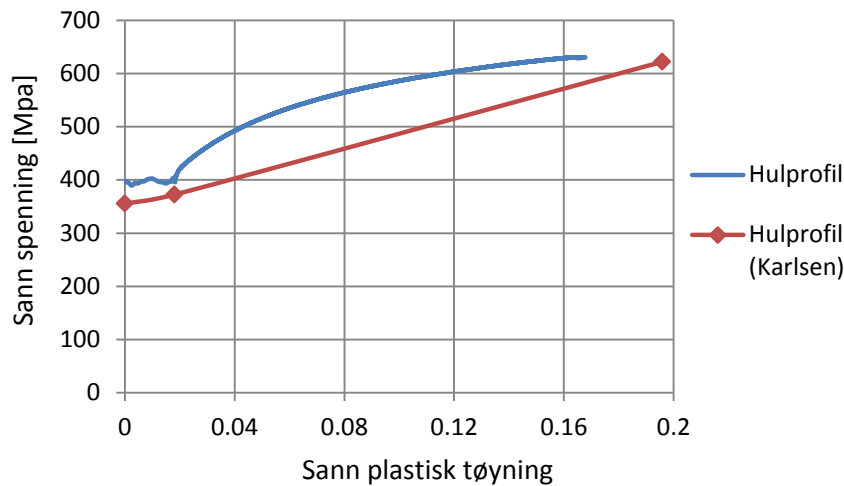
Tabell 7.3.3: Materialdata for hulprofil (Karlsen, 2011)

Ingeniørspenning σ [MPa]	Ingeniørtøyning ε	Sann spenning σ_{true} [MPa]	Sann plastisk tøyning ε_{true}^{pl}
355	0.00169	355.6 ¹	0
365	0.02	372.3	0.01803 ²
510	0.22	622.2	0.1959

¹ Karlsen bruker i sitt arbeid 355 MPa. Det er valgt å benytte verdien 355.6 MPa i simuleringene utført i denne oppgaven.

² Karlsen bruker i sitt arbeid verdien 0.01976. Den korrekte verdien er 0.01803 og det er valgt å benytte denne i simuleringene utført i denne oppgaven.

Tabellverdiene er plottet i Figur 7.3.3 sammen med resultatene fra strekkforsøkene utført i denne oppgaven.

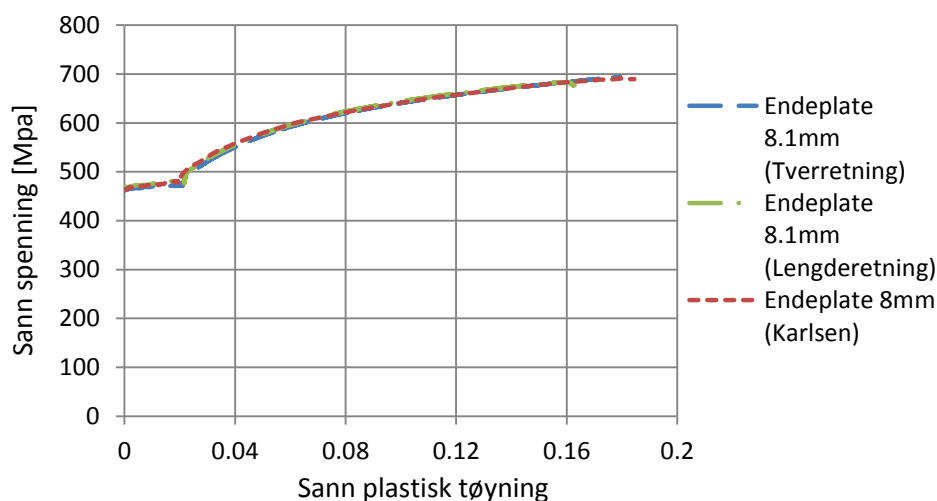


Figur 7.3.3: Materialkurver for hulprofil

Figur 7.3.3 viser at de oppkonstruerte verdiene (Karlsen, 2011) ligger noe lavere enn dem som ble funnet fra strekkforsøket. I strekkforsøket flyter hulprofilet ved omtrent 394 MPa, som er noe høyere enn flytespenningen fra produsenten på 355 MPa. Initialstivhet påvirkes kun av E-modul og knutepunktets geometri. Det betyr at avviket mellom kurvene i Figur 7.3.3 ikke vil ha betydning for stivheten. Derimot kan det påvirke kapasiteten.

7.3.4 Endeplate 8 mm

Resultatene fra strekkforsøkene utført av Karlsen og i denne oppgaven for endeplaten med tykkelse 8 mm er vist i Figur 7.3.4. I denne rapporten ble endeplaten prøvd både i lengderetning og tverretning. Som det fremkommer av figuren var materialegenskapene så godt som identiske de to retningene.

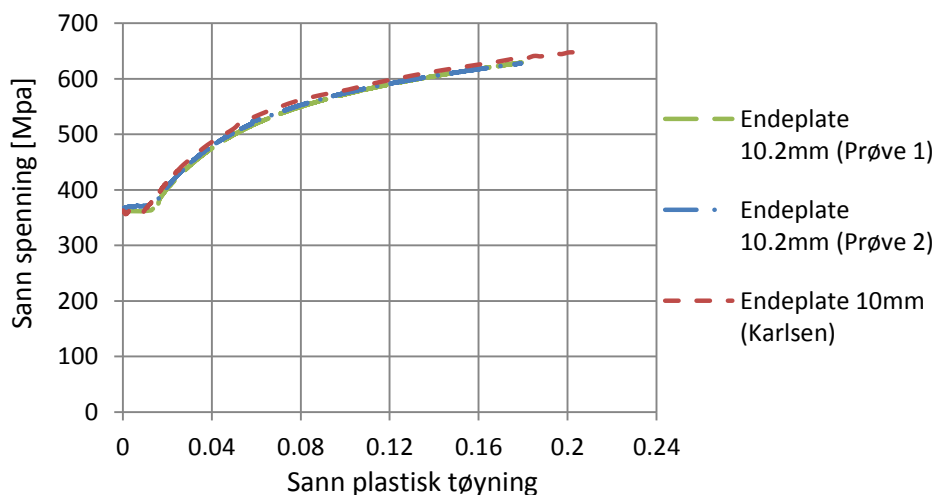


Figur 7.3.4: Materialkurve for endeplate 8mm

Resultatene fra strekkforsøkene utført i denne oppgaven samsvarer godt med resultatet fra forsøket til Karlsen. Flytespenningen i lengderetningen leses av til omtrent 468 MPa og i tverretningen til omtrent 461 MPa. Til sammenligning fant Karlsen i sitt forsøk flytespenningen til å være 464 MPa. Bruddspenningen i lengderetningen er 679 MPa og i tverretning 692 MPa. Bruddspenningen i Karlsens forsøk ble avlest til 690 MPa. Det vil si at de ulike forsøkene gir i praksis identiske materialegenskaper for endeplaten.

7.3.5 Endeplate 10 mm

Resultatene fra strekkforsøkene utført av Karlsen og i denne oppgaven for endeplaten med tykkelse 10 mm, er gitt i Figur 7.3.5. Det ble gjennomført to forsøk i lengderetning fordi dimensjonene på platen prøvestykkene ble skåret fra ikke tillot prøvestykker i tverretning. Figuren viser at de to forsøkene i lengderetning samsvarer godt.

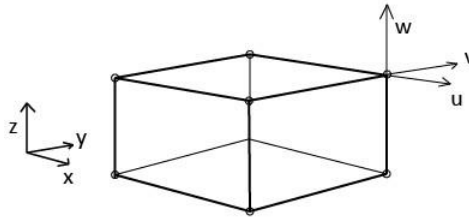


Figur 7.3.5: Materialkurve for endeplate 10mm

Figuren viser små forskjeller mellom de ulike forsøkene. Flytespenningen og bruddspenningen var henholdsvis 360 MPa og 651 MPa i Karlsens forsøk. Flytespenningene i denne oppgaven ble funnet til 361 MPa for prøve 1 og 365 MPa for prøve 2. Bruddspenningene var henholdsvis 629 MPa og 627 MPa.

7.4 Elementtype og elementinndeling

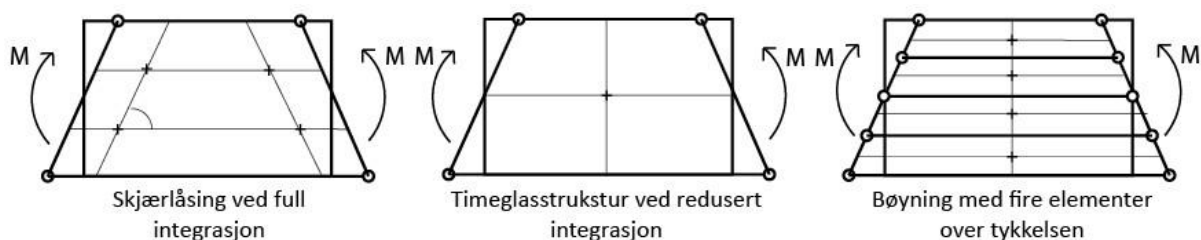
I modelleringen deles komponentene i modellen opp i elementer. Det er valgt å bruke elementtypen C3D8R for alle delkomponentene. Bokstaven C står for kontinuum (volumelementer), 3D forteller at det er et tredimensjonalt element, tallet 8 angir antall noder og bokstaven R står for redusert integrasjon. Hver av nodene i elementet har tre frihetsgrader. Figur 7.4.1 viser C3D8R med frihetsgradene til en av nodene.



Figur 7.4.1: Volumelement C3D8R med frihetsgrader

Ved å benytte elementer med redusert integrasjon i de numeriske analysene vil det føre til at simuleringstiden reduseres. Redusert integrasjon betyr at det kun brukes ett integrasjonspunkt i senter av elementet. Ved bøyning av et slikt element vil ikke integrasjonspunktet få tøyning og bidrar dermed ikke til energioptak (Cook et.al, 2002). Elementet får da det som kalles timeglasstruktur. Det er derfor nødvendig å benytte flere elementer over tykkelsen for å kunne modellere bøyning.

I tillegg til å redusere simuleringstiden vil redusert integrasjon også bidra til å unngå skjærlåsing i elementet. C3D8 er et lineært element og kan derfor ikke modellere den eksakte kurvaturen til det bøyde materialet. En skjærtøyning vil oppstå og føre til at elementet når likevekt ved lavere deformasjon og elementet får for stiv oppførsel. Figur 7.4.2 illustrerer skjærlåsing og redusert integrasjon.



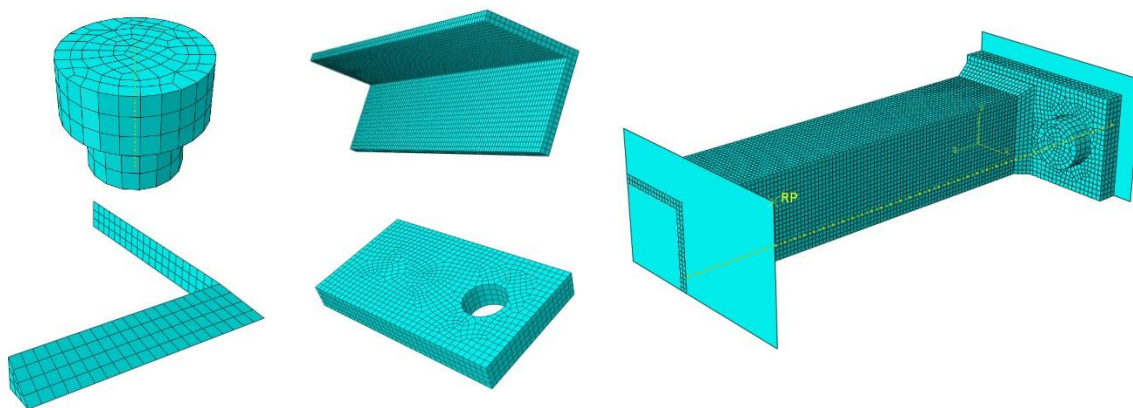
Figur 7.4.2: Skjærlåsing og redusert integrasjon

For å kunne modellere bøyning må det som forklart over benyttes flere elementer over tykkelsen. Etersom bøyningen av endeplatene er av stor interesse er denne delt inn i tre eller flere elementer over tykkelsen. På grunn av boltehullet vil elementinndelingen til endeplaten ikke bli helt perfekt, men Abaqus vil likevel alltid tilstrebe prismeformet elementer. Hulprofilen utsettes i hovedsak for aksialkraft og modelleres derfor med to eller

tre elementer over tykkelsen. Sveisen modelleres med tre eller fire elementer langs diagonalen.

7.5 Sammenstilling

Figur 7.5.1 viser sammenstillingen av delkomponentene med elementinndeling til en fullstendig geometri. Figuren viser også de stive platene som plasseres i hver ende av modellen.



Figur 7.5.1: Delkomponenter og elementmodell

7.6 Steg- og inkrementstørrelse

Når simuleringen kjøres vil Abaqus justere størrelsen på inkrementene. Likevel er det opp til brukeren å sette begrensninger for maksimalt antall inkrementer og størrelsen på inkrementene. I modellen defineres det et initial steg der randbetingelser i symmetriaksene blir lagt til, og et steg der resten av egenskapene og last påføres.

I denne rapporten er det for alle modellene satt en begrensning på maksimalt 200 inkrementer. Det betyr at simuleringen automatisk stoppes hvis antall inkrementer overskrider 200. Initial inkrementstørrelse relateres til den tidsperioden lasten har til å oppnå maksimal størrelse, og er satt til 0.02. Den totale tidsperioden er i modellene satt lik 1. Det vil si at den totale forskyvningen tilsvarer 1 og forskyvningen i det første inkrementet dermed vil utgjøre 0.02 av denne. Det må også settes begrensninger for størrelsen til største og minste tillatte inkrement. Disse er satt til henholdsvis 0.02 og 10^{-5} . Programmet vil også avbryte simuleringen hvis nødvendig inkrementstørrelse er mindre enn minste tillatte inkrementstørrelse. Disse begrensningene sørger for at simuleringene ikke kjører i lang tid uten særlig fremgang og begrenser også størrelsen på resultatfilene.

7.7 Opplager- og randbetingelser

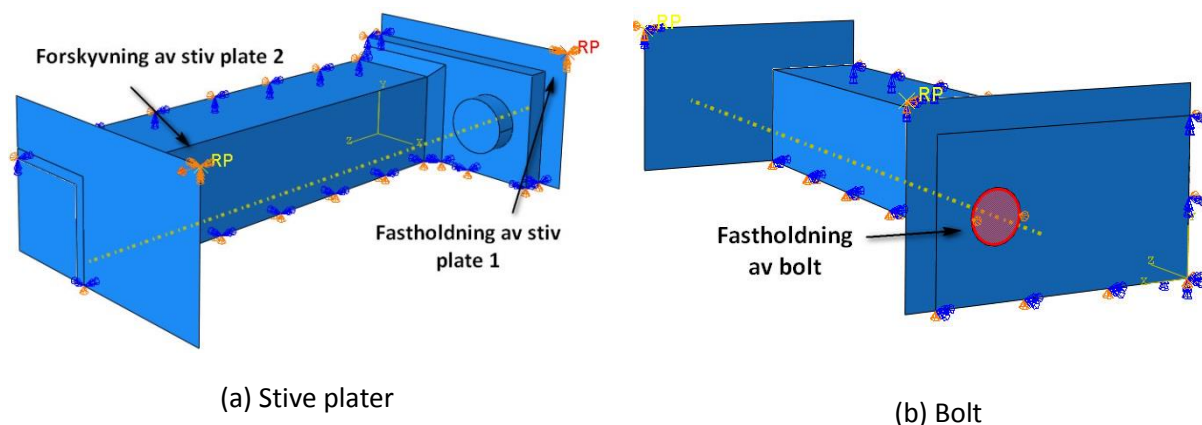
7.7.1 Stiv plate og bolt

For å tilegne knutepunktet de egenskapene som er ønskelig er det som nevnt valgt å bruke en stiv plate i hver ende av modellen. De stive platene gis et referansepunkt slik at randbetingelsene som påføres i disse punktene gjelder for hele platen.

Stiv plate 1 plasseres som vist i Figur 7.7.1(a) bak endeplaten, og referansepunktet fastholdes mot translasjon og rotasjon om alle akser. Platen vil holde fast modellen samtidig som den gir mulighet for hevarmskrefter.

Stiv plate 2 er plassert i enden av hulprofilet, se Figur 7.7.1(a). For å påføre knutepunktet last er det valgt å gi referansepunktet til stiv plate 2 en forskyvning i knutepunktets lengderetning, z-retning. Platen holdes fast mot rotasjon om alle akser og translasjon i x- og y-retning. Ved å benytte en stiv plate med referansepunkt i stedet for å gi alle nodene i enden av hulprofilet en forskyvning, vil behandlingen av resultatene gå raskere. Forsøkene i laboratoriet ga en indikasjon på hvor stor denne forskyvningen burde være for de ulike knutepunktene. Det ble valgt å kjøre simuleringene noe lengre enn laboratorieforskene. For knutepunktene med fire bolter ble det satt på en forskyvning lik 10 mm, mens for knutepunktene med to bolter ble forskyvningen satt lik 8 mm.

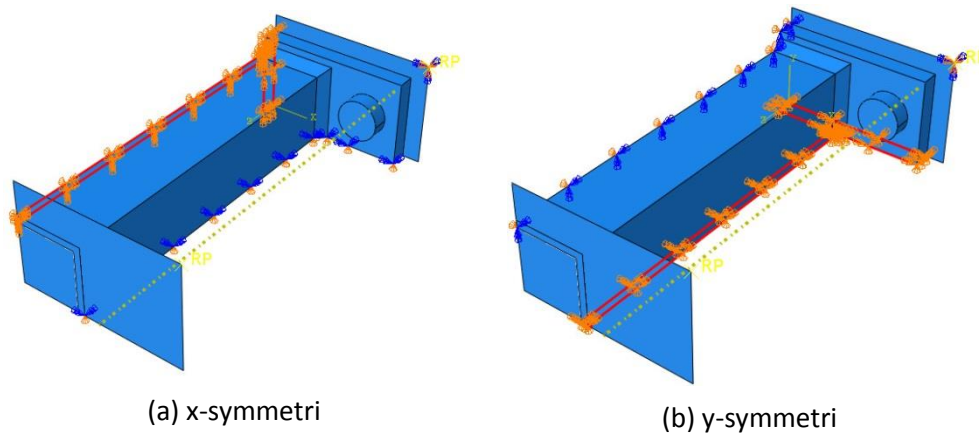
Ettersom symmetrien i forbindelsen ble utnyttet ved modellering ble kun halve lengden av boltene modellert. Det betyr at undersiden av boltene må fastholdes mot forskyvning i lengderetning (z-retning), som vist i Figur 7.7.1(b).



Figur 7.7.1: Randbetingelser

7.7.2 Utnyttelse av symmetri

For å utnytte symmetrien i forbindelsene måtte det påføres randbetingelser i symmetriaksene. Hulprofilet, sveisen og endeplaten fastholdes mot rotasjon og translasjon i x- og y-retning, som vist i Figur 7.7.2.



Figur 7.7.2: Randbetingelser på grunn av symmetri

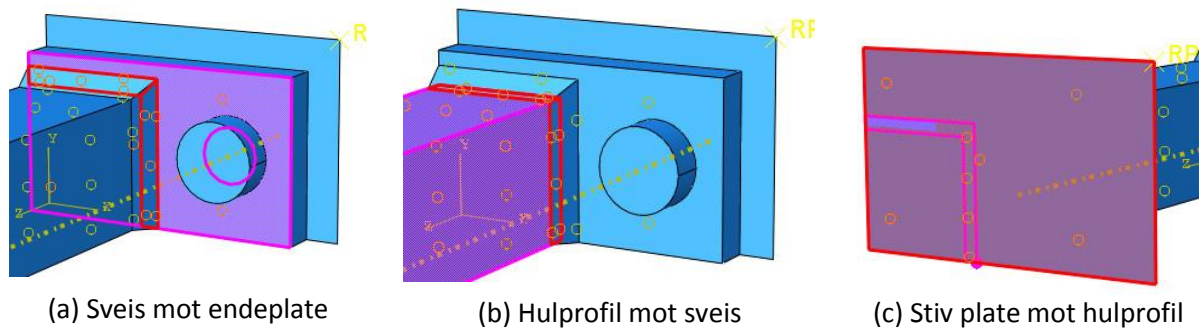
7.8 Modellering av delenes samvirke

Abaqus gjenkjenner ikke mekanisk kontakt mellom to delkomponenter med mindre denne kontakten er spesifisert i det som kalles «interaksjoner». Dette er nødvendig for å hindre at komponentene overlapper. For kontaktinteraksjonen er det brukt «General contact» med «All* with self». Denne kontakten definerer kontakt mellom alle ytre overflater i modellen med en eneste interaksjon og er i følge brukermanualen til Abaqus (Simulia, 2011) den enkleste måten å definere kontakt i modellen.

I modelleringen av kontakt defineres det også en friksjonskoeffisient mellom komponentene som er i kontakt. Denne blir aktuell for kontakt mellom sveis og hulprofil, sveis og endeplate, hulprofil og endeplate og mellom bolt og endeplate. Friksjon gjelder ikke for overflater mot stive plate slik at null friksjon mellom endeplate og stiv plate ivaretas automatisk av Abaqus. NS-EN 1993-1-8 (CEN, 2005) og NS-EN 1090-2 (CEN, 2008b) angir koeffisienter mellom 0.5 og 0.2 avhengig av overflatebehandlingen. Denne deles inn i fire klasser, fra A til D. Det antas i denne oppgaven at overflatebehandlingen tilsvarer klasse C som krever at overflaten er rensert slik at løs rust er fjernet. Denne klassen gir en friksjonsfaktor på 0.3. I delkapittel 7.9.2 er det vist hvordan friksjonskoeffisienten påvirker stivheten.

I tillegg til generell kontakt må det innføres interaksjoner mellom delkomponentene som skal festes sammen. Innsiden og undersiden til sveisen må festes til henholdsvis hulprofilet og endeplaten. I tillegg må hulprofilet festes til den stive platen. Overflatene festes sammen ved å opprette en TIE-interaksjon som gjør at overflatene som knyttes sammen vil følge hverandre for alle typer deformasjon. I tillegg er det også med denne interaksjonstypen

mulig å feste sammen to områder med ulik elementinndeling (Simulia, 2011). Figur 7.8.1 viser overflatene som er festet sammen i modellen.



Figur 7.8.1: Tie-interaksjon for sveis, endeplate og hulprofil

7.9 Modelleringsvalg

I modelleringsprosessen i Abaqus er det gjort flere valg og forenklinger. I dette delkapitlet presenteres noen av valgene som er tatt og alternativer til disse. Det er ønskelig å vurdere hvordan de alternative valgene vil påvirke stivheten. For å sammenligne stivheten for de ulike valgene tas det utgangspunkt i den kjente knutepunktsgeometrien med fire M16 bolter, HUP 80x80x4 mm, 180x100x10.2 mm endeplate og sveis med $a=4$ mm der ikke annet er oppgitt. Stivhetstallet for denne geometrien er funnet fra resultatene av simuleringen til 184.92 kN/mm. Denne stivheten kalles i de neste delkapitlene for «benyttet stivhet».

Formelen som brukes for å beregne det prosentvise avviket mellom den benyttede stivheten og den alternative stivheten er som vist under. Her regnes avviket i forhold til den benyttede verdien.

$$\text{Avvik i \%} = \frac{\text{Alternativ stivhet} - \text{Benyttet stivhet}}{\text{Benyttet stivhet}} \cdot 100 \%$$

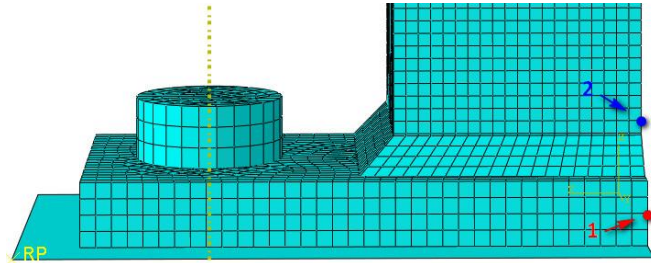
Det er viktig å merke seg at avvikene ikke nødvendigvis er representative for alle geometriene som er analysert i sammenheng med denne oppgaven.

7.9.1 Avlesningspunkt for forskyvning

For å kunne lage kraft-forskyvningsdiagrammer må det i Abaqus velges et punkt på elementmodellen der forskyvningen hentes ut fra programmet. Tilsvarende som for laboratorieforsøket ble forskyvningen funnet ved å bruke punkter både på endeplatene og på hulprofilene nærme sveisen.

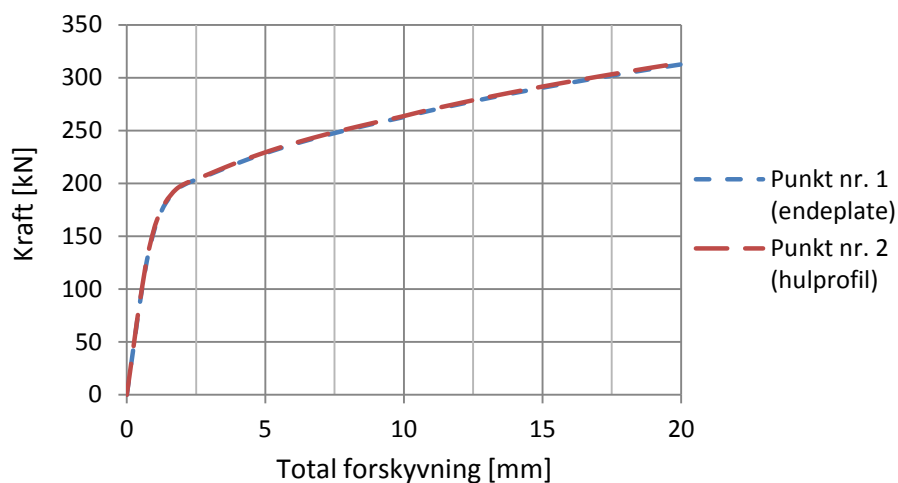
Det ble i de numeriske simuleringene valgt å hente ut forskyvning i et punkt på endeplaten. Det er vist som punkt nr. 1 i Figur 7.9.1. Et alternativ til dette vil være å hente forskyvning fra et punkt på hulprofilet, som vist som punkt 2 i figuren.

I punkt nr. 1 vil forskyvningene som skyldes endeplate og bolt inkluderes, mens bidragene fra sveis og hulprofil utelates. Dette stemmer godt overens med antagelsene gjort i stivhetsmodellen utviklet av Karlsen (Karlsen, 2011) og med det statiske systemet for T-stykkemodellen i knutepunktstandarden. Ved å lese av forskyvningen i punkt nr. 2 i vil det som for laboratorieforsøket ikke være nødvendig å trekke fra forskyvningen som skyldes aksialtøyning i hulprofilet.



Figur 7.9.1: Målepunkter for avlesning av forskyvning på endeplate og hulprofil

Figur 7.9.2 viser kraft-forskyvningskurvene for avlesningspunktene som er vurdert.



Figur 7.9.2: Kraft-forskyvningskurver for ulike avlesningspunkter for forskyvning

Stivhetstallene for de vurderte punktene er beregnet ut fra kraft-forskyvningskurvene i Figur 7.9.2 og er vist i Tabell 7.9.1.

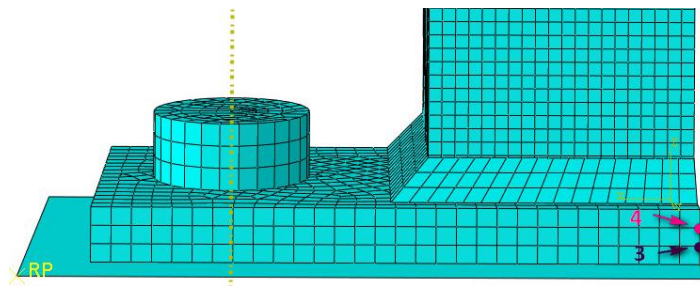
Tabell 7.9.1: Ulike avlesningspunkter for forskyvning, stivheter

Avlesningspunkt	Alternativ stivhet [kN/mm]	Benyttet stivhet [kN/mm]	Avvik i %
Hulprofil (Punkt nr. 2)	184.92	187.91	1.62 %

Tabell 7.9.1 viser at avviket i stivhet ved å bruke punktet på hulprofilet som avlesningspunkt for forskyvning i forhold til å bruke punktet på endeplaten vil være 1.62 %. Dette anses som et lite avvik og de to avlesningspunktene vil dermed gi omtrent identisk forskyvning. Avviket

bekrefter også at kameramålingen i laboratorieforsøket som ga omtrent lik forskyvning for målepunkter på endeplate og hulprofil, stemmer bra. Unntaket i avlesningspunkt vil være for knutepunktet med endeplatedimensjon 180x180 (prøve C). For dette knutepunktet ble det valgt å hente ut forskyvningen fra et punkt på hulprofilet.

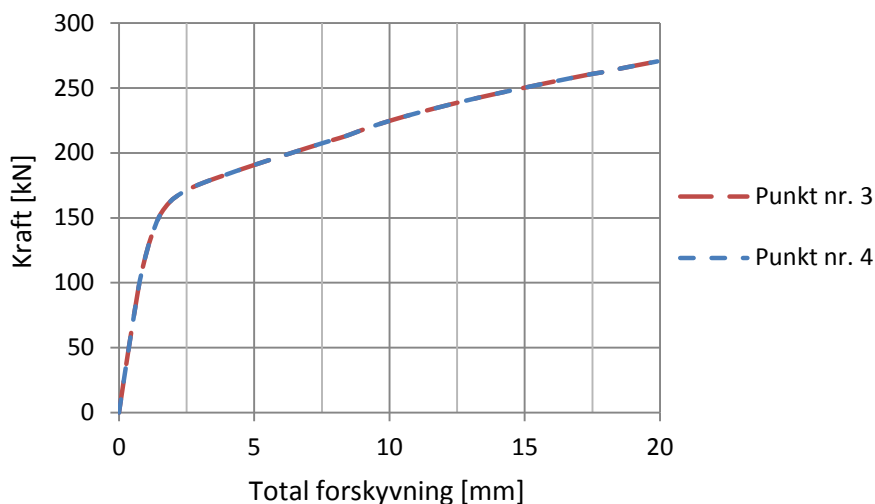
For knutepunktene med endeplatetykkelse lik 8.1 mm ble det modellert 3 elementer over tykkelsen. Dette ble først og fremst valgt fordi Abaqus avbrøt simuleringene med 4 elementer over tykkelsen på grunn av for liten inkrementstørrelse. Det førte til at avlesningspunktet ikke kunne settes midt på platen. I simuleringene ble det valgt å hente forskyvningen fra punkt nr. 3 i Figur 7.9.3. Punkt nr. 4 i figuren vil være et naturlig alternativ til punkt nr. 3.



Figur 7.9.3: Målepunkter for avlesning av forskyvning for endeplate

I denne sammenligningen er det brukt samme knutepunksgeometri som oppgitt innledningsvis i delkapittel 7.9, men med endeplatetykkelse lik 8.1 mm.

Figur 7.9.4 viser kraft-forskyvningskurvene for de to avlesningspunktene på endeplaten.



Figur 7.9.4: Kraft-forskyvningskurver for avlesningspunktene på endeplaten

Stivhetstallene beregnet for avlesningspunktene på endeplaten er vist i Tabell 7.9.2.

Tabell 7.9.2: Avlesningspunkter på endeplaten, stivheter

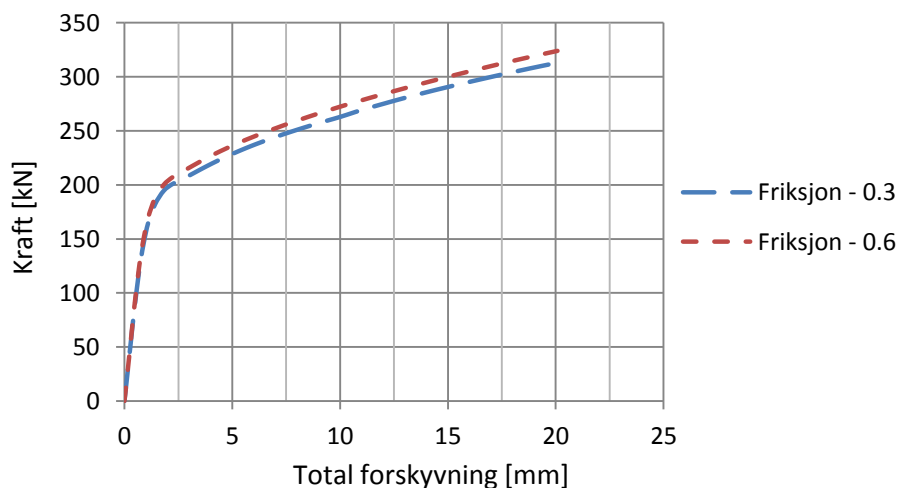
Avlesningspunkt	Alternativ stivhet [kN/mm]	Benyttet stivhet [kN/mm]	Avvik i %
Endeplate (Punkt nr. 4)	137.78	137.87	-0.065 %

Avviket i initialstivheten på -0.065 % fra Tabell 7.9.2 viser at forskyvningene hentet fra punkt nr. 3 og 4 i Figur 7.9.3 er så å si identiske. Det betyr at valget som er tatt i forbindelse med avlesningspunkt på endeplaten vil ha liten innvirkning på initialstivheten til elementmodellene som benyttes i rapporten.

7.9.2 Friksjonskoeffisient

Tilsvarende som i studentarbeidet til Hilde Erslund (Erslund, 2011) og Fredrik Torp Karlsen (Karlsen, 2011) ble 0.3 brukt som friksjonsfaktor i den generelle kontakten mellom delkomponentene. I motsetning brukte Anders Ostad og Martin Grinstad (Ostad & Grinstad, 2012) i sitt studentarbeid 0.6 som friksjonsfaktor. De valgte denne faktoren fordi den lå mellom kinetisk (0.57) og statisk (0.74) friksjonskoeffisient for kontakt mellom to ståloverflater.

Figur 7.9.5 viser hvordan kraft-forskyvningskurven endres når friksjonsfaktoren settes til 0.6.



Figur 7.9.5: Kraft-forskyvningskurver for friksjonskoeffisienter

Tabell 7.9.3 viser forskjellen i stivhetstallene ved å benytte de to forskjellige friksjonskoeffisientene.

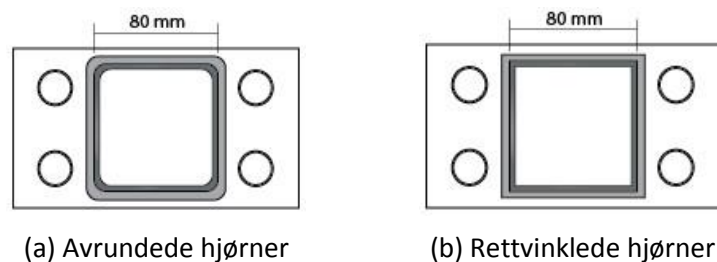
Tabell 7.9.3: Stivheter, friksjonskoeffisienter

Friksjonsfaktor	Alternativ stivhet [kN/mm]	Benyttet stivhet [kN/mm]	Avvik i %
0.6	189.30	184.92	2.37 %

Avviket i initialstivheten på 2.37 % fra Tabell 7.9.3 indikerer at valg av friksjonskoeffisient trolig vil ha liten betydning for initialstivheten til modellene som benyttes videre i rapporten.

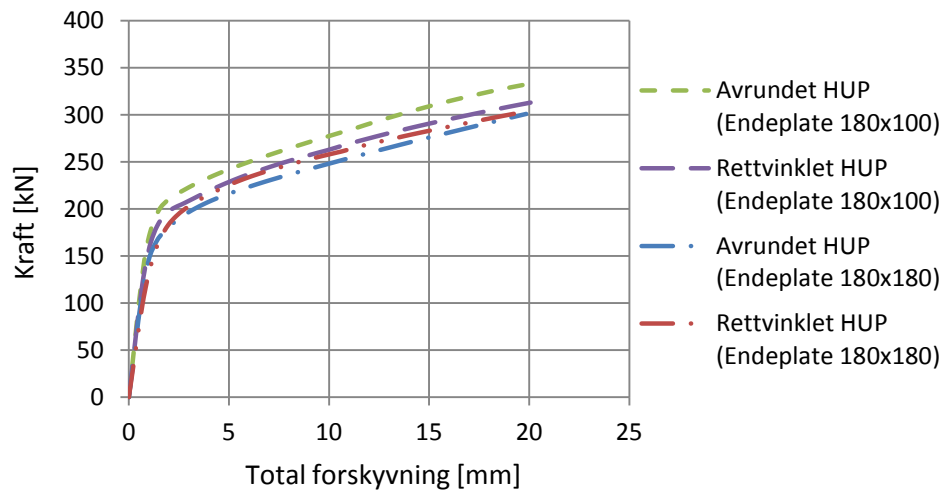
7.9.3 Hulprofilform

Tilsvarende som i tidligere arbeider er det i modelleringen ikke tatt hensyn at et ekstrudert hulprofil har avrundede hjørner. Å modellere et hulprofil med avrundede hjørner ville tatt betraktelig lengre tid enn å modellere et rettvisklet profil. Figur 7.9.6 viser forenklingen som er gjort i modelleringen av hulprofilet. Det ble antatt at avrundingen har en indre radius på 5 mm.



Figur 7.9.6: Modelling av hulprofilform

Det er valgt å se på forskjellen i stivhet for knutepunktet med endeplatemål 180x180x8.1 mm i tillegg til knutepunktet med endeplatemål 180x100x10.2 mm. Kraft-forskyvningskurver for modellering med avrundet og rettvisklet hulprofil er vist i Figur 7.9.7 for de to ulike knutepunktsgemetriene.



Figur 7.9.7: Kraft-forskyvningskurver for hulprofilform

Tabell 7.9.4 viser at stivheten til knutepunktet med endeplate 180x100x10.2 mm blir 7.11 % høyere ved å modellere hulprofilen og sveisen med avrundede hjørner. For knutepunktet med endeplate 180x180 mm blir stivheten tilsvarende 13.89 % høyere.

Tabell 7.9.4: Stivheter, hulprofilform

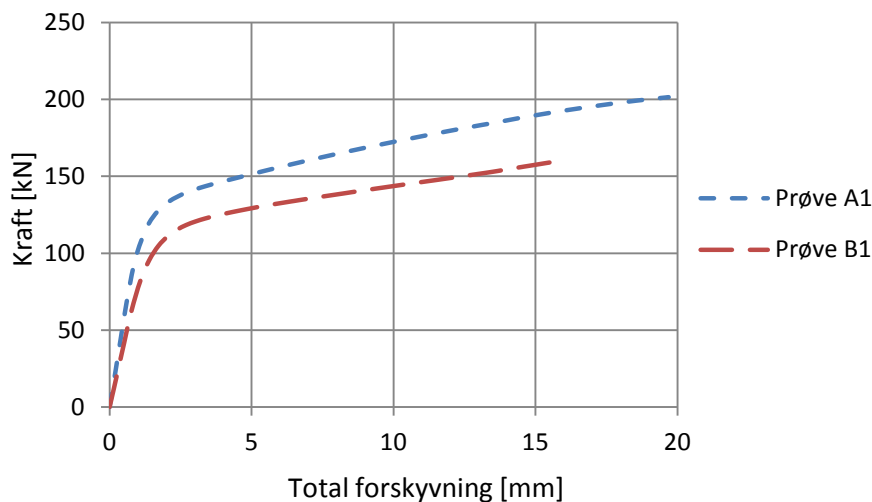
	Alternativ stivhet [kN/mm]	Benyttet stivhet [kN/mm]	Avvik i %
180x100x10.2 mm endeplate	198.07	184.92	7.11 %
180x180x8.1 mm endeplate	148.00	168.55	13.89 %

7.10 Resultater

I dette delkapittelet presenteres resultatene fra simuleringene av laboratorieforsøket som kraft-forskyvningskurver. Symmetrimodelleringen gjør at forskyvningen som hentes ut av programmet må multipliseres med to. For forbindelsene modellert som en åttendel må kraften multipliseres med fire, og for forbindelsene modellert som en fjerdedel må kraften multipliseres med to. Som nevnt i delkapittel 7.7 er det valgt å kjøre simuleringene noe lengre enn laboratorieforskene. Forbindelsene med fire og to bolter ble påsatt en forskyvning på henholdsvis 10 mm og 8 mm.

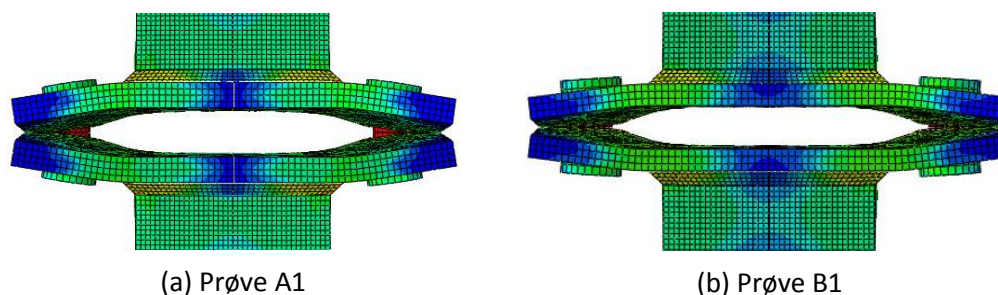
7.10.1 Prøve A1 og B1

Figur 7.10.1 viser kraft-forskyvningskurver for prøve A1 og B1.



Figur 7.10.1: Kraft-forskyvningskurver for prøve A1 og B1

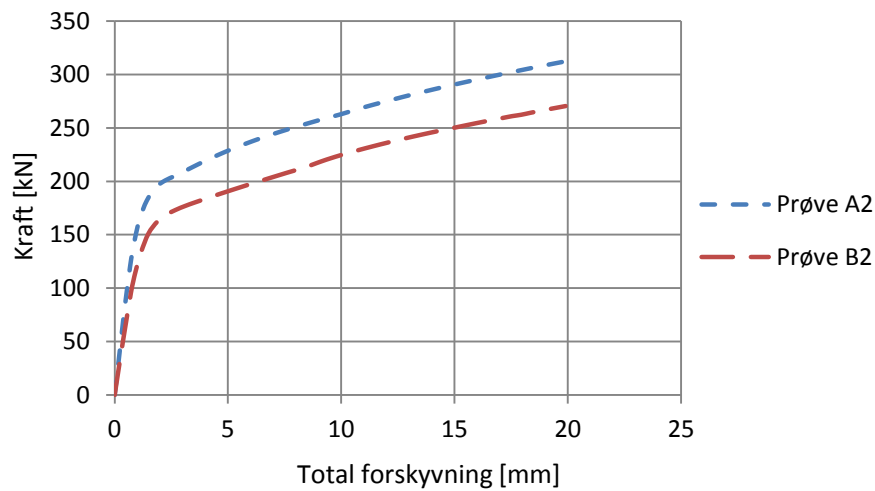
Figur 7.10.2 viser prøve A1 og prøve B1 ved en ved belastning på henholdsvis 201.5 kN og 160.7 kN. Simuleringene viser de samme tendensene i deformasjonen som i laboratoriet. Endeplatene bøyes i en linje langs hulprofilet og er i kontakt ved endekantene. Figuren viser også at hjørnene løftes og hvordan boltene bøyes tilsvarende som i laboratoriet.



Figur 7.10.2: Prøve A1 og B1 ved belastning på henholdsvis 201.5 kN og 160.7 kN

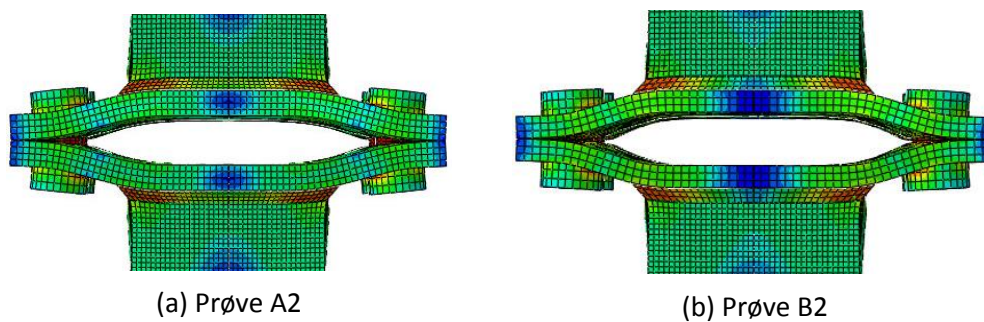
7.10.2 Prøve A2 og B2

Figur 7.10.3 viser kraft-forskyvningskurver for prøve A2 og B2.



Figur 7.10.3: Kraft-forskyvningskurver for prøve A2 og B2

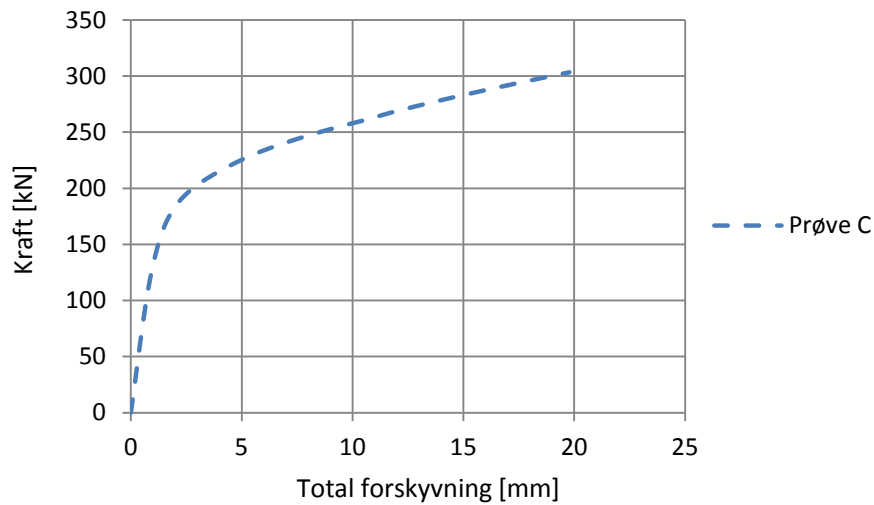
Figur 7.10.4 viser prøve A2 og prøve B2 ved en ved belastning på henholdsvis 313 kN og 270.5 kN. Simuleringene viser også for disse prøvene samme tendenser i deformasjonen som i laboratoriet. Endeplatene bøyes i en linje langs hulprofilet og ved boltene. Endeplatene er i kontakt langs endekantene. Figuren viser også at boltene bøyes tilsvarende som i laboratoriet.



Figur 7.10.4: Prøve A2 og B2 ved belastning på henholdsvis 313 kN og 270.4 kN

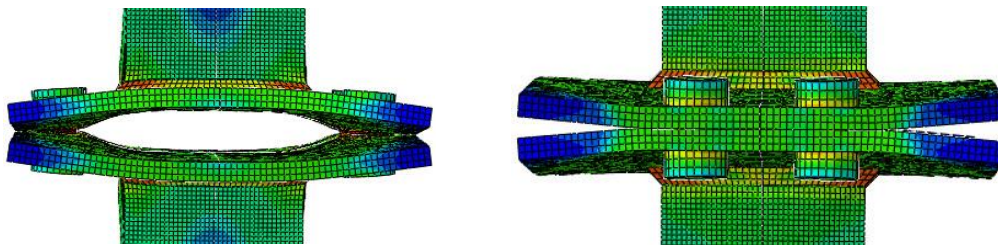
7.10.3 Prøve C

Figur 7.10.5 viser kraft-forskyvningskurve for prøve C.



Figur 7.10.5: Kraft-forskyvningskurve for prøve C

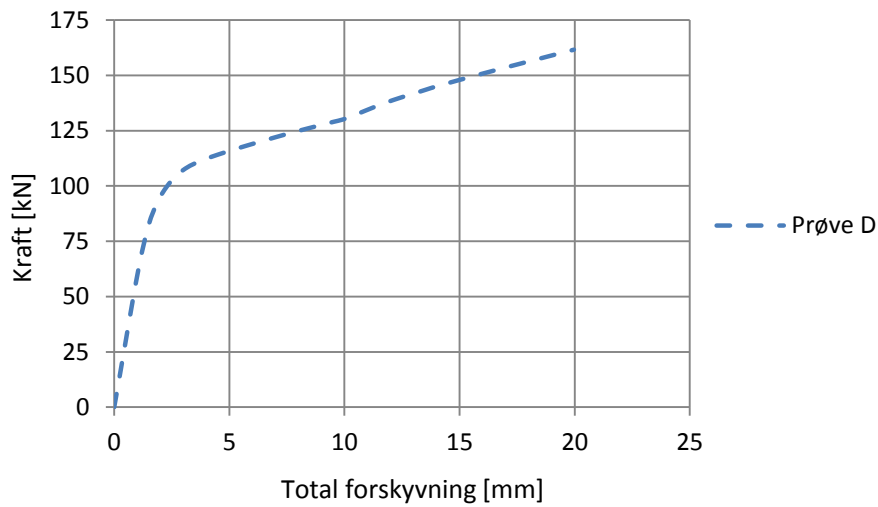
Figur 7.10.6 viser prøve C ved en ved belastning på 303.3 kN. Simuleringene viser de samme tendensene i deformasjon som i laboratoriet. Endeplatene bøyes ved boltene og i en linje langs hulprofilen. Figuren viser også hvordan hjørnene løftes på grunn av de brede endeplatene.



Figur 7.10.6: Prøve C ved en belastning på 303.3kN

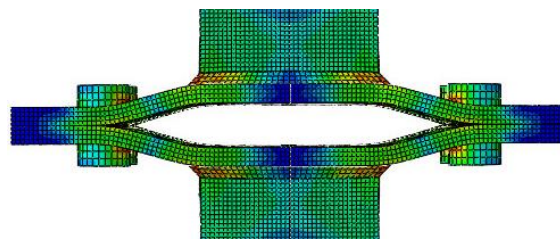
7.10.4 Prøve D

Kraft-forskyvningskurve for prøve D er vist i Figur 7.10.7.



Figur 7.10.7: Kraft-forskyvningskurve for prøve D

Figur 7.10.8 viser prøve C ved en belastning på 161.6 kN. Som for simuleringene av A2 og B2 bøyes endeplatene i en linje langs hulprofilet og ved boltene, noe som også stemmer med deformasjonen observert i laboratoriet. Boltene i simuleringen av prøve D bøyes mindre enn for prøve A2 og B2. Dette samsvarer også med observasjonene gjort i laboratoriet.



Figur 7.10.8: Prøve D ved en belastning på 161.6 kN

Kapittel 8

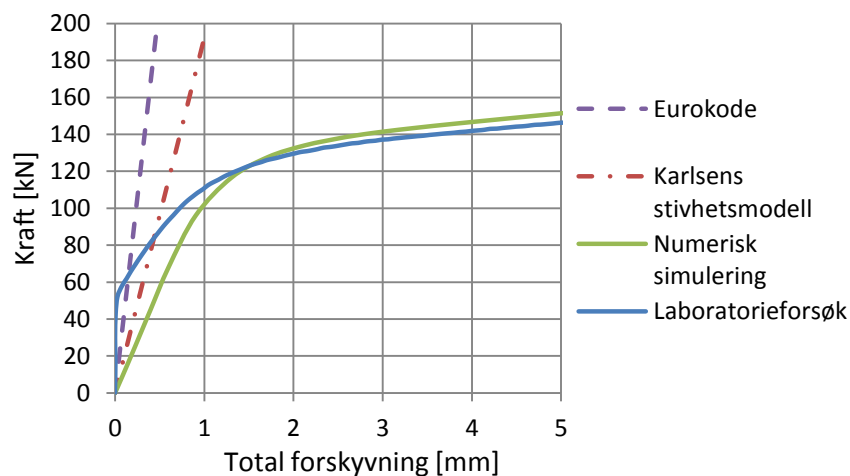
Sammenligning av stivheter

8.1 Innledning

For å få en oversikt over hvor godt stivheten fra laboratorieforsøket, numeriske simuleringer og fra håndberegningene samsvarer, sammenlignes resultatene. I det følgende presenteres kraft-forskyvningsdiagrammer for prøvene fra laboratorieforsøket og de numeriske simuleringene. De initielle elastiske stivhetene beregnet med Eurokoden og Karlsens stivhetsmodell er lagt inn i diagrammene. Stivhetstallene for kurvene er oppgitt til slutt i kapittelet.

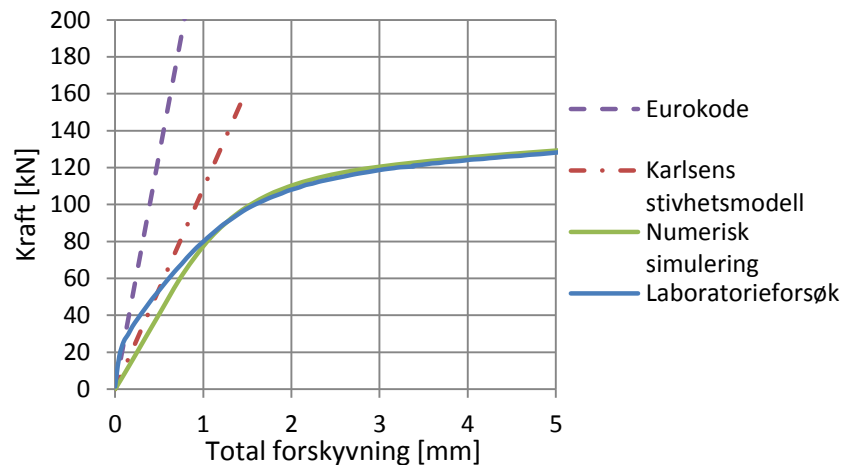
8.2 Vurdering av stivheter

Figur 8.2.1 viser sammenligningen av stivhetene for prøve A1. Figuren viser at stivheten beregnet med Eurokoden gir et stort avvik i forhold til resultatet fra laboratorieforsøket. Stivheten til laboratorieforsøket er beregnet etter avlastning av forspenningen slik det er forklart i kapittel 5.6. Avviket mellom disse er på 476 %. Karlsens stivhetsmodell gir også for høy stivhet, men avviket er redusert til 162 %. Den numeriske simuleringen gir en stivhet som er 54 % høyere enn stivheten funnet fra resultatene i laboratorieforsøket.



Figur 8.2.1: Sammenligning av stivheter for prøve A1

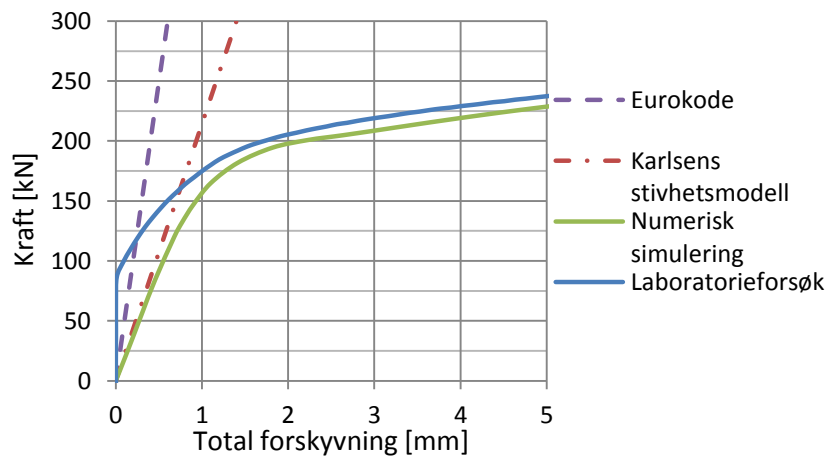
I Figur 8.2.2 vises sammenligning av stivheter for prøve B1.



Figur 8.2.2: Sammenligning av stivheter for prøve B1

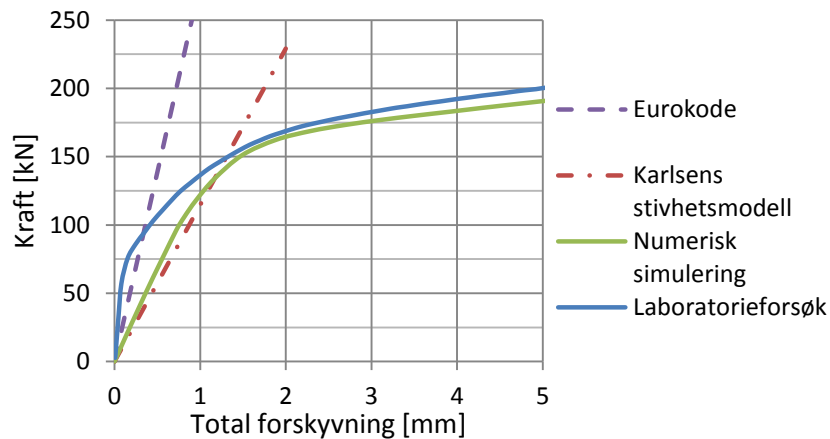
Tilsvarende som for prøve A1 gir Eurokoden for stor initialstivhet i forhold til resultatene i laboratoriet. Avviket mellom stivhetene er på 325 %. Karlsens stivhetsmodell reduserer dette avviket til 82 %. Også den numeriske simuleringen gir for høy stivhet. Den er 36 % høyere i forhold til resultat fra laboratorieforsøket.

Sammenligning av stivheter for prøve A2 vises i Figur 8.2.3. Tendensene fra prøve A1 og B1 gjelder også for denne sammenligningen. Eurokoden gir en stivhet som er 358 % for høy i forhold til laboratorieforsøket. Stivheten beregnet med Karlsens modell er 97 % for høy og den numeriske simuleringen gir en stivhet som er 70 % for høy.



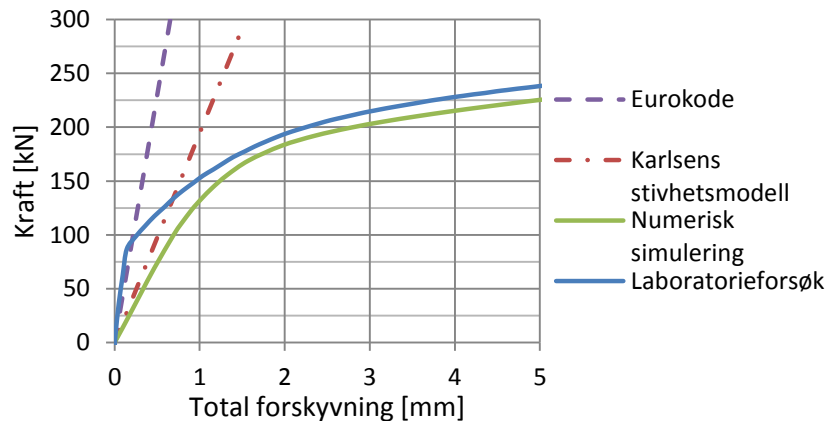
Figur 8.2.3: Sammenligning av stivheter for prøve A2

Prøve B2 skiller seg fra de foregående sammenligningene ved at stivheten beregnet med Karlsens stivhetsmodell avviker mindre fra laboratorieforsøket enn det stivheten fra den numeriske simuleringen gjør. Avvikene er henholdsvis 45 % og 74 %. Eurokoden gir det største avviket på 249 %. Sammenligningen vises i Figur 8.2.4.



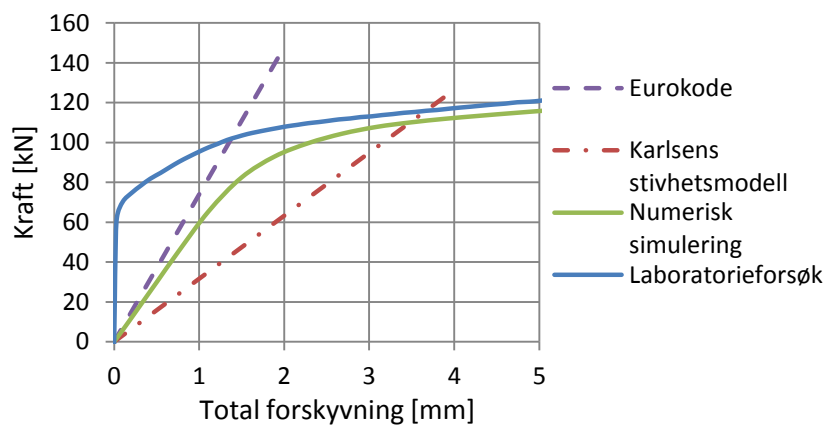
Figur 8.2.4: Sammenligning av stivheter for prøve B2

Figur 8.2.5 viser sammenligningen av stivhetene for prøve C. Stivheten beregnet med Eurokoden er 521 % større enn den fra laboratorieforsøket. Tilsvarende er avviket for Karlsens stivhetsmodell og numerisk simulering henholdsvis 163 % og 100 %.



Figur 8.2.5: Sammenligning av stivheter for prøve C

Til slutt vises sammenligningen for prøve D, se Figur 8.2.6.



Figur 8.2.6: Sammenligning av stivheter for prøve D

I likhet med prøve B2 gir den numeriske simuleringen for prøve D et større avvik i forhold til laboratorieforsøket enn det Karlsens stivhetsmodell gjør. Avvikene er henholdsvis 21 % og 130 %. Avviket mellom Eurokoden og forsøket i laboratoriet er på 184 %, noe som er lite i forhold til de andre prøvene.

Tabell 8.2.1 oppsummerer stivhetstall for de ulike prøvene.

Tabell 8.2.1: Oppsummering av stivheter for alle geometrier

Prøve	K_{EK} [kN/mm]	K_{el} [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	K_{lab} [kN/mm]
A1	422.92	192.19	113.20	73.32
B1	254.41	108.66	81.24	59.84
A2	498.08	214.25	184.92	108.74
B2	276.92	114.59	137.86	79.29
C	458.66	194.54	148.10	73.91
D	73.95	31.63	59.90	26.06

Stivhetstallene brukes til å beregne totale gjennomsnittlige avvik for alle prøvene. Avvikene beregnes ved å sammenligne stivheten fra laboratorieforsøk (K_{lab}) med stivhet beregnet med Eurokoden (K_{EK}), Karlsens stivhetsmodell (K_{el}) og numeriske simuleringer (K_{aba}).

Generelt er det store avvik mellom stivhetene beregnet fra regelverket i Eurokoden og dem funnet i laboratoriet, noe som gir et gjennomsnittlig avvik på 352 %. Det betyr at stivhetene beregnet fra Eurokoden vanskelig kan gjenskapes i praksis. Små unøyaktigheter i sammenstillingen av knutepunktene kan føre til at betingelsene som Eurokoden legger til grunn, ikke oppfylles. Eksempelvis vil ikke endeplatene nødvendigvis være helt flate i begge retninger etter at de er sveiset sammen med hulprofilet. Eurokoden forutsetter likevel flate endeplater med full kontakt mellom dem. I tillegg tas ikke delen av endeplaten innenfor hulprofilet med i stivhetsberegningene. På grunn av dette gir beregningene fra Eurokoden store avvik.

De små unøyaktighetene i sammenstillingen av knutepunktet kan også forklare at det blir avvik mellom de numeriske simuleringene og laboratoriet. I Abaqus modelleres alle komponenter som perfekte mens de i virkeligheten avviker fra dette.

Karlsens stivhetsmodell reduserer gjennomsnittlig avviket i forhold til Eurokoden med 257 %. Denne beregningsmodellen gir dermed betydelig bedre resultat enn det eksisterende formelverket. Samtidig gir den et gjennomsnittlig avvik på 95 % i forhold til forsøkene i laboratoriet. Det betyr at Karlsens stivhetsmodell i snitt gir en teoretisk stivhet som er nesten dobbel så stor som knutepunktets faktiske stivhet.

Kapittel 9

Forspenning av bolter

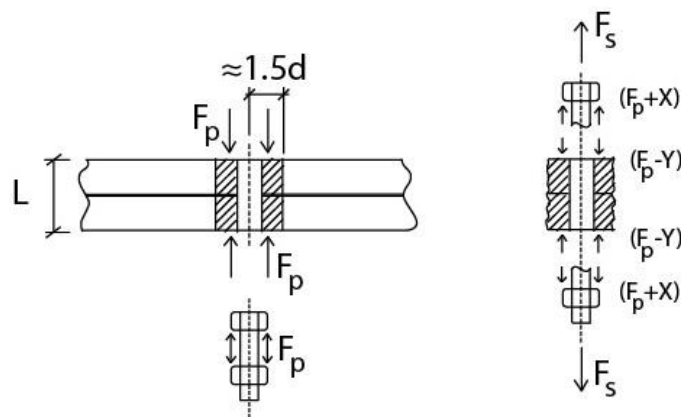
9.1 Innledning

I kapittel 5 ble det undersøkt hvordan forspenning av boltene i laboratorieforsøkene påvirket initialstivheten til knutepunktet. Det viste seg at stivheten økte dersom boltene ble forspent slik at det var kontakt mellom endeplatene. Videre ble det undersøkt hvordan tilfellet uten forspenning av boltene kunne modelleres med en utkragermodell. I dette kapitlet gis det en kort innføring i virkningen av forspenning i strekkpåkjennte forbindelser. Deretter utvikles det et uttrykk for forlengelsen av forspente bolter som brukes til modellering av forspenning i Abaqus. Uttrykket utvikles tilsvarende som i studentarbeidet til Hilde Erslund (Erslund, 2011). Til slutt gjennomføres et modelleringseksempel for å vurdere hvorvidt forspenningen bør tas med i videre numeriske simuleringer.

9.2 Strekk i forspente forbindelser

NS-EN 1090 del 2 *Tekniske krav til stålkonstruksjoner* (CEN, 2008b) gir regler for hvordan forspenning av festemidler skal utføres. Den presenterer fire tiltrekkingsmetoder der *Kombinert metode* er den metoden som anbefales (Larsen, 2010). Metoden består av to deler. Først tiltrekkes skruen med en momentnøkkel innstilt på $0.75M_{r,i}$, der $M_{r,i}$ er en referanseverdi for tiltrekkingsmomentet for å oppnå ønsket forspenningskraft. Den bestemmes basert på skruesettets k-klasse. K-klasse defineres av Eurokoden som skruesettets kalibrerte tilstand som levert (CEN, 2008b). Deretter gis den roterende delen av skruesettet en dreievinkel som varierer mellom 60° og 120° . Fordelen med denne tiltrekkingsmetoden i forhold til de andre som er presentert er at man har god kontroll på spenningen i boltene slik at man unngår at skruen går til brudd (Larsen, 2010).

Arbeidet som kreves for å forspenne en skrue går delvis til å forspenne skruen og delvis til å gi en elastisk sammentrykking av platene i forbindelsen. Når skruen strekkbelastes vil det oppstå trykk i platene. Dette er en lokal effekt og det antas at trykket begrenser seg til en sylinder rundt skruen med diameter $3d$, der d er diameteren til skruen (Larsen, 2010). Trykksylinderen i endeplatene er vist i Figur 9.2.1.



Figur 9.2.1: Kraftfordeling i strekkbelastet forspent forbindelse

I Figur 9.2.1 er L skruens klemlengde, altså godstykkelsen. Etter forspenningen virker kraften F_b i skruen og $-F_b$ i trykksylinderen. Forbindelsen belastes deretter med en strekkraft lik F_s . Strekkraften vil gi en økt kraft i skruen, X , samtidig som kraften i trykksylinderen reduseres (Y). Så lenge det er kontakt mellom endeplatene vil forlengelsen av skruen og trykksylinderen være like, se ligning 9.1.

$$\Delta L_{skru} = \frac{XL}{EA_{skru}} = \frac{YL}{EA_{syl}} = \Delta L_{syl} \quad (9.1)$$

$$F_s = X + Y \quad (9.2)$$

Ligning 9.1 og 9.2 gir to ligninger med to ukjente. Ligningssystemet løses og uttrykkene for X og Y er vist i ligning 9.3 og 9.4.

$$X = F_s \frac{A_{skru}}{A_{skru} + A_{syl}} = F_s \frac{1}{1 + A_{syl}/A_{skru}} \quad (9.3)$$

$$Y = F_s \frac{A_{syl}}{A_{syl} + A_{skru}} = F_s \frac{1}{1 + A_{skru}/A_{syl}} \quad (9.4)$$

Diameteren til trykksylinderen ble antatt å være $3d$. Det gir forholdet mellom tverrsnittene vist i ligning 9.5.

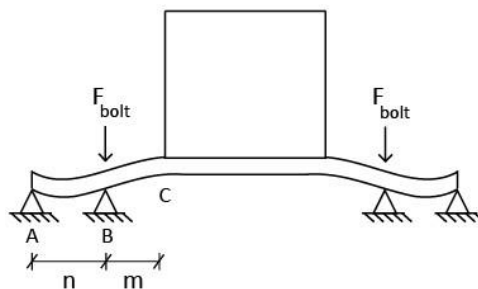
$$A_{syl} = (3^2 - 1^2)A_{skru} = 8A_{skru} \quad (9.5)$$

Ved å sette ligning 9.5 inn i ligning 9.3 og 9.4 kommer det fram at om lag 10 % av skrekraften gir økt strekk i skruen mens 90 % gir avlastning i trykksylinderen. For forbindelser med forspente bolter betyr det at strekkraften først må motvirke forspenningen før den kan belaste selve knutepunktet. Det bekrefter «knekkene» i begynnelsen av kraft-forskyvningskurvene presentert i kapittel 5, der stigningstallet til kraft-forskyvningskurvene i området før avlastning var svært høyt.

9.3 Modellering av forspenning i Abaqus

Forspenning av bolter modelleres i Abaqus ved å legge inn en forlengelse av boltene. For å bestemme forlengelsen av bolten må boltekraften først beregnes. Boltekraften er kraften som skal til for å lukke en eventuell glippe mellom endeplatene.

Det defineres først et statisk system der kun boltekraften F_{bolt} virker i boltene. Dette er vist i Figur 9.3.1. På figuren antas det kontakt mellom endeplatene, representert med opplageren i punkt A.

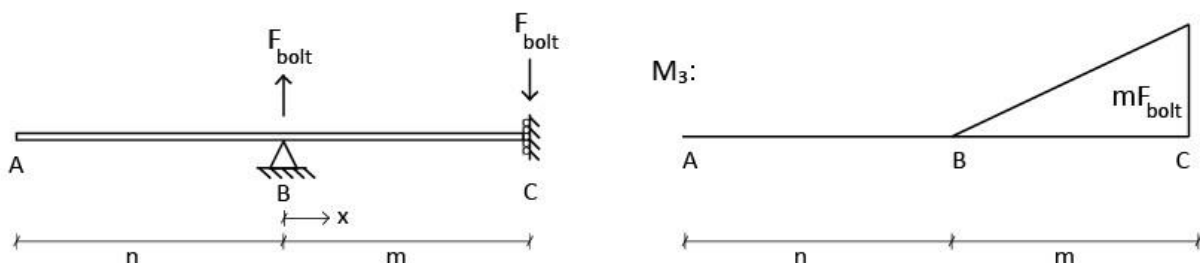


Figur 9.3.1: Statisk system med påsatt boltekraft

Dersom glipen mellom endeplatene er kjent, kan boltekraften utvikles ved hjelp av enhetslastmetoden (Irgens, 2006).

Basert på det statiske systemet i Figur 9.3.1 etableres det en bjelkemodell der boltekraften er den påkjente kraften. For å gjøre systemet statisk bestemt fjernes opplageren i punkt A. Den vertikale forskyvningen i punkt A skal tilsvare halve glipen mellom endeplatene. Figur 9.3.2 viser det statiske systemet med påsatt boltekraft og tilhørende momentforløp. Uttrykket for momentforløpet er vist i ligning 9.6.

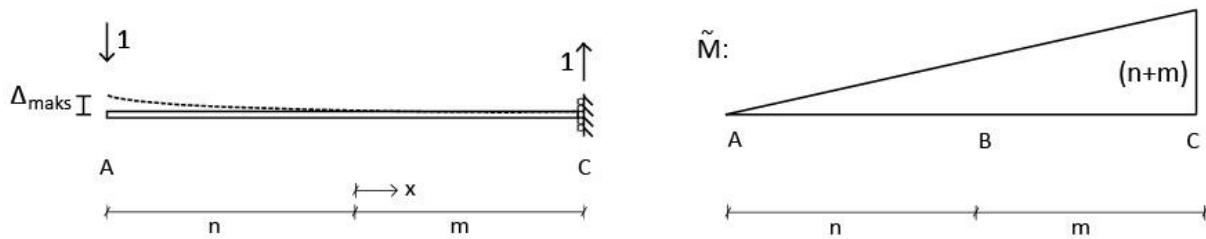
Variabelen x settes til å gå fra opplageren i B til punkt C. Dette for å gjøre integrasjon i enhetslastmetoden så enkel som mulig.



Figur 9.3.2: Statisk system med ytre last og tilhørende momentdiagram

$$M_3(x) = F_{\text{bolt}} \cdot x \quad \text{for } 0 \leq x \leq m \quad (9.6)$$

Når momentdiagrammet for den ytre lasten er kjent påføres en virtuell enhetslast i punkt A. Det statiske systemet med den virtuelle lasten er vist i Figur 9.3.3 sammen med det tilhørende momentdiagrammet. Uttrykket for momentforløpet er vist i ligning 9.7.



Figur 9.3.3: Statisk system påkjent av enhetslast og tilhørende momentdiagram

$$\tilde{M}(x) = 1(n + x) \quad (9.7)$$

Ved å kombinere de to momentforløpene og integrere over bjelkens lengde fås uttrykket for forskyvningen i punkt A på grunn av boltekraften, se ligning 9.8. Det integreres kun over lengden m ettersom momentforløpet til den ytre lasten gir null moment i den venstre delen av systemet.

$$\Delta_{maks} = \int_L \frac{M_0(x) \cdot \tilde{M}(x)}{EI} dx = \int_0^m \frac{F_{bolt} x(n + x)}{EI} dx = \frac{F_{bolt}}{EI} \left(\frac{1}{2} m^2 n + \frac{1}{3} m^3 \right) \quad (9.8)$$

Ligning 9.8 løses deretter for boltekraften. Da fås et uttrykk som varierer med den kjente forskyvningen Δ_{maks} og knutepunktets geometri. Uttrykket er vist i ligning 9.9.

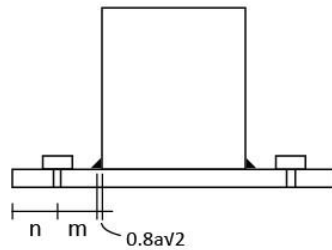
$$F_{bolt} = \frac{EI}{\left(\frac{1}{2} m^2 n + \frac{1}{3} m^3 \right)} \Delta_{maks} = \frac{E b t_p^3}{12 \left(\frac{1}{2} m^2 n + \frac{1}{3} m^3 \right)} \Delta_{maks} \quad (9.9)$$

Kraften F_{bolt} vil gi en tøyning i bolten. For å finne tøyningen brukes Hookes lov. Tøyningen brukes deretter for å finne forlengelsen av bolten som skal modelleres i Abaqus. Uttrykket for forlengelsen er gitt i ligning 9.10.

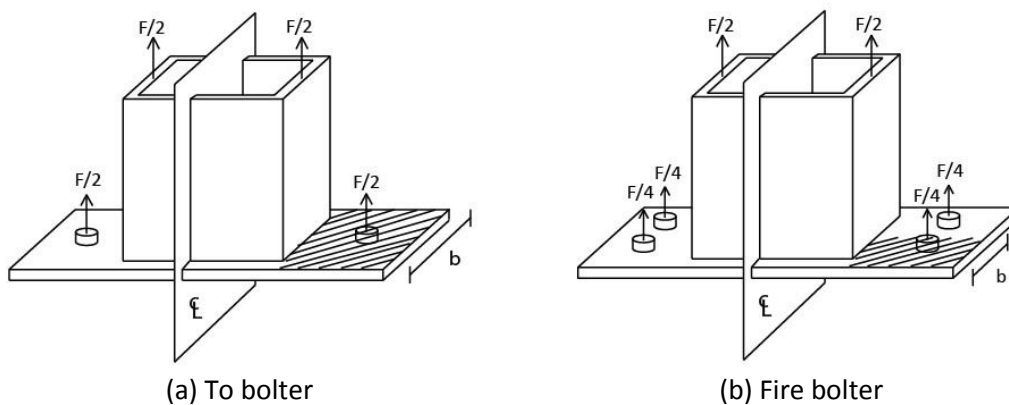
$$\sigma = \frac{F_{bolt}}{A_s} = E \varepsilon \rightarrow \varepsilon = \frac{F_{bolt}}{A_s E} = \frac{\Delta L}{L_b} \rightarrow \Delta L = \frac{F_{bolt} L_b}{A_s E} \quad (9.10)$$

Ligning 9.11 gir et fullstendig uttrykk for bolteforlengelsen der boltekraften fra ligning 9.9 er satt inn. A_s er tverrsnittsarealet til bolten, L_b er boltens tøyningenslengde og avstandene m og n er som definert i Figur 9.3.4 for et sveist profil. Platetykkelsen er representert med parameteren t_p .

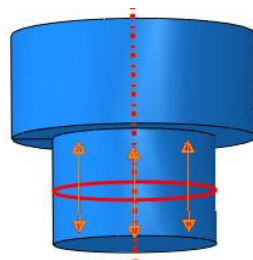
$$\Delta L = \frac{b t_p^3 L_b}{12 \left(\frac{1}{2} m^2 n + \frac{1}{3} m^3 \right) A_s} \Delta_{maks} \quad (9.11)$$

Figur 9.3.4: Definisjon av avstandene m og n

Bredden b i ligning 9.11 er avhengig av antall bolter i forbindelsen. Figur 9.3.5 viser hvordan denne bredden endres når det benyttes forskjellige antall bolter i forbindelsen.

Figur 9.3.5: Bredden som F_{bolt} virker over for to bolter og fire bolter

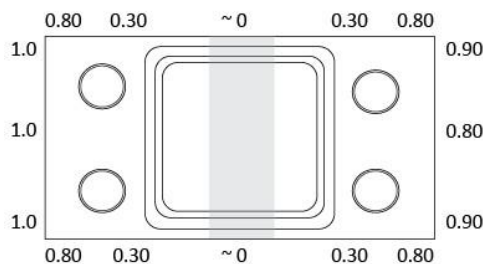
Bolteforlengelsen legges inn i Abaqus ved hjelp av lastfunksjonen «Bolt load». Bolteforlengelsen legges inn som et eget steg før den ytre belastningen settes på. Det sikrer at forspenningen virker før simuleringen starter og at simuleringen dermed blir så lik forsøkene som mulig. Figur 9.3.6 viser hvordan forspenningen virker i bolten i Abaqus.



Figur 9.3.6: Forspent bolt i Abaqus

9.4 Modelleringsseksempel

I det følgende vises et modelleringsseksempel for forspenning i Abaqus for prøve A2 fra laboratorieforsøket. Prøve A2 har platetykkelse 10.2 mm, fire bolter og endeplatemål 180x100 mm. Platebredden som virker per bolt blir da $100/2 = 50$ mm. I kapittel 5.5 ble en oversikt over glipene mellom endeplatene før forspenning vist. Denne er gjengitt i Figur 9.4.1 for prøve A2.



Figur 9.4.1: Gliper før forspenning i laboratoriet for A2

Verdiene i Figur 9.4.1 gjelder for glipene for hele knutepunktet, altså mellom endeplatene. Forskyvningen Δ_{maks} i ligning 9.11 er avstanden for hver endeplate i forhold til symmetriplanet mellom de to endeplatene. For den ene siden av skjøten blir den største forskyvningen for prøve A2 dermed 0.50 mm.

Tabell 9.4.1 gir verdier for de andre parameterne som inngår i beregningen av bolteforlengelsen. Boltens tøyningsslengde L_b defineres i knutepunktstandarden (CEN, 2005) som godstykkelsen og halve summen av mutteren og boltehodet. På grunn av symmetri modelleres halve knutepunktet i Abaqus og boltens tøyningsslengde må dermed halveres.

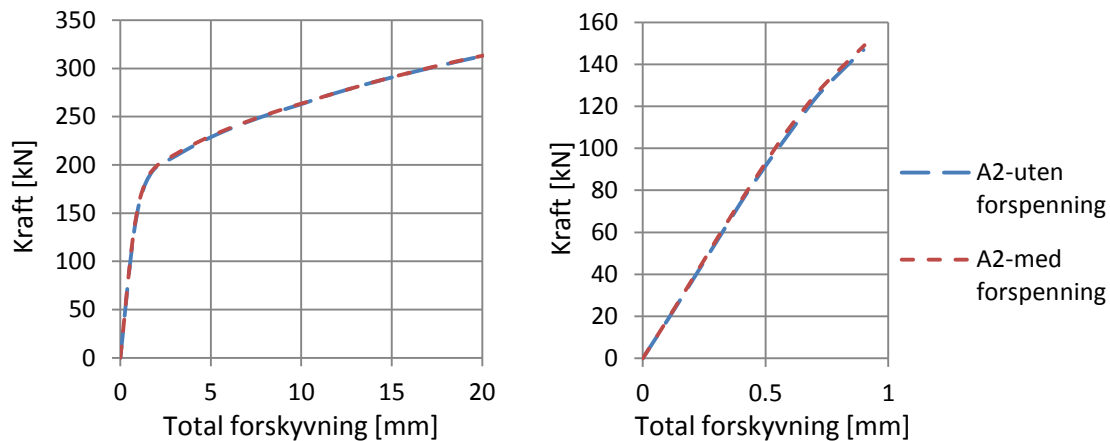
Tabell 9.4.1: Parametere for prøve A2

A_s [mm ²]	t_p [mm]	L_b [mm]	m [mm]	n [mm]
157	10.2	37.9	25.47	20

Bolteforlengelsen for prøve A2 blir dermed:

$$\Delta L = \frac{50 \cdot 10.2^3 \cdot 37.9/2}{12 \left(\frac{1}{2} 25.47^2 \cdot 20 + \frac{1}{3} 25.47^3 \right) 157} \cdot 0.50 = 0.02225 \text{ mm}$$

Denne forlengelsen legges inn i Abaqus for alle boltene. Figur 9.4.2 viser kraft-forskyvningsdiagram for prøve A2 for simuleringer utført med og uten forspenning av boltene.



Figur 9.4.2: Kraft-forskyvningskurver for prøve A2 med og uten forspenning

Figur 9.4.2 viser at simuleringen med forspenning i boltene gir omtrent samme stivhet som for simuleringen uten. Tabell 9.4.2 gir stivhetene til de to simuleringene, og viser at økningen er på kun 2.0 %.

Tabell 9.4.2: Stivhet fra simulering med og uten forspente bolter

Simulering uten forspenning [kN/mm]	Simulering med forspenning [kN/mm]
184.92	188.23

9.5 Vurdering av forspenning i numeriske simuleringer

Ideelt sett burde boltene modelleres med forspenning i de numeriske simuleringene ettersom boltene ble forspent i laboratoriet. Likevel, modelleringseksempelet i kapittel 9.4 viser at stivheten kun økte med 2.0 % ved å inkludere forspenningen i Abaqus for prøve A2. I tillegg må bolteforlengelsen beregnes for alle geometrier og deretter legges inn i Abaqus. Det vil i beregningen være stor usikkerhet rundt maksimalforskyvningen Δ_{maks} for geometrier som ikke er prøvd i laboratorieforsøk. Det må i så fall antas en forskyvning som kan representere glipen mellom endeplatene.

Basert på dette velges det å ikke inkludere forspenning av boltene i numeriske simuleringer i det videre arbeidet.

Kapittel 10

Analyse av stivhetsmodell

10.1 Innledning

I kapittel 8 sammenlignes stivhet beregnet med Karlsens stivhetsmodell med stivhet fra Eurokoden, fra laboratorieforsøk og fra simuleringer i Abaqus. Sammenligningen ble gjort for knutepunktene som ble prøvd i laboratoriet og viser at Karlsens stivhetsmodell gir for høye verdier for stivheten i forhold til simuleringer og laboratorieforsøk. Det er derfor ønskelig å justere Karlsens stivhetsmodell med mål om reduseres avviket. I dette kapittelet undersøkes hvilke parametere som kan justeres og hva verdiene for disse bør være.

10.2 Aktuelle parametere

De to parameterne som det er mest aktuelle å justere i Karlsens modell er stivheten til den delen av platen som ligger innenfor hulprofilet, representert med α , og den initielle effektive lengden $l_{eff,ini}$. De andre parameterne er gitt av det statiske systemet som er lagt til grunn for modellen og kan vanskelig endres uten å endre hele modellen.

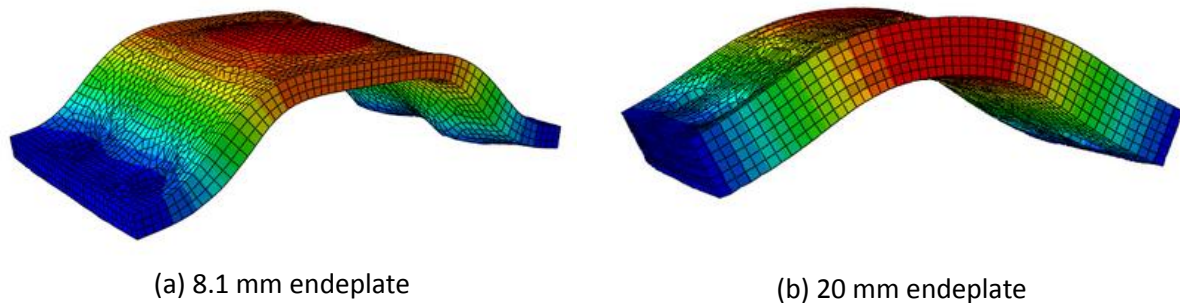
I kapittel 3 ble sammenhengen mellom initiell effektiv lengde ($l_{eff,ini}$) og effektiv lengde (l_{eff}) utledet. Sammenhengen er gitt i ligning 3.20 og vist under.

$$l_{eff,ini} = \frac{13}{15} l_{eff} \approx 0.8667 l_{eff}$$

Sammenhengen forstås som at 86.67 % av den effektive lengden til det ekvivalente T-stykke vil bidra til den initielle stivheten til knutepunktet. Fredrik Torp Karlsen introduserer denne sammenhengen i sin beregningsmodell for stivheten til strekkskjøter med hulprofil. Det vil derfor være av interesse å studere hvorvidt faktoren 0.8667 bør endres for at beregningsmodellen skal estimere en riktigere stivhet for knutepunktene.

Stivheten til den delen av platen som ligger innenfor hulprofilet, representert med α , er også aktuell å justere. Karlsens stivhetsmodell baserer seg på et endimensjonalt statisk system der α ivaretar platens oppførsel innenfor hulprofilet. Figur 10.2.1(a) viser den deformerte endeplaten til prøve B2 fra simuleringen i Abaqus. Deformasjonen er oppskalert med en

faktor på 200. Ut fra figuren kan det se ut som om platen innenfor hulprofilet bøyes i to retninger med et toppunkt på midten.



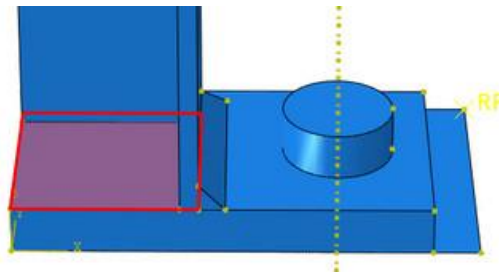
Figur 10.2.1: Deformert endeplate

Figur 10.2.1(b) viser samme knutepunksgeometri som Figur 10.2.1(a), men platetykkelsen er økt til 20 mm. Skaleringsfaktoren er 250. Når endeplaten blir såpass tykk vil den delen som ligger innenfor hulprofilet bøyes noe annerledes. Midtpunktet blir et sadelpunkt i stedet for et toppunkt. Begge tilfellene i Figur 10.2.1 indikerer at stivheten til knutepunktet påvirkes av bøyningen av den delen av endeplaten som ligger innenfor hulprofilet.

I sammenligningen av stivheter i kapittel 8 kom det fram at platen innenfor hulprofilet påvirker stivheten til knutepunktet. Sammenligningen viste at Eurokoden overestimerer stivheten med om lag 350 %. Til sammenligning ga Karlsens modell en stivhet som i snitt var 95 % for høy. Det indikerer at delen innenfor hulprofilet bør være med i beregningsmodellen.

Karlsen innfører α for å kunne øke stivheten til endeplaten innenfor hulprofilet. I arbeidet med å finne justerte verdier for $I_{\text{eff,ini}}$ og α er det interessant å se på hvor stor betydning en økning av α har på stivheten. I det følgende vises stivheten til noen utvalgte geometrier fra simuleringer i Abaqus. Det ble gjennomført to simuleringer med ulike randbetingelser for hver av geometriene. Først ble analysene kjørt slik som forklart i kapittel 7, altså med lik bøyestivhet over hele endeplaten og mulighet for bøyning av endeplaten innenfor hulprofilet. Det tilfellet tilsvarer Karlsens beregningsmodell med α lik 1.

Deretter ble delen av endeplaten innenfor hulprofilet modellert som uendelig stiv, se Figur 10.2.2. Det ble gjort ved at oversiden av endeplaten fastholdes mot forskyvning i x- og y-retning. Platen kan bevege seg fritt i z-retning. For dette tilfellet er α lik uendelig. Tilfellet er dermed tilnærmet likt beregningsmodellen fra Eurokoden (CEN, 2005) som forutsetter at endeplaten er fast innspent ved sveisen.



Figur 10.2.2: Stiv plate inne i hulprofilet

I Tabell 10.2.1 vises stivhetstallene for de utvalgte geometriene modellert med og uten stiv plate innenfor hulprofilet. Alle knutepunktene har fire bolter.

Tabell 10.2.1: Stivheter med α lik 1 og ∞ for utvalgte geometrier

t_{HUP} [mm]	$b_p \times l_p$ [mm]	t_p [mm]	$K_{aba,\alpha=1}$ [kN/mm]	$K_{aba,\alpha=\infty}$ [kN/mm]	Forskjell [%]
4	100x180	8.1	137.87	143.48	4.07
		10.2	184.92	196.49	6.26
		15	267.89	308.03	14.98
		20	335.98	427.02	27.09
5	100x250	8.1	62.65	65.63	4.76
		20	241.52	292.71	21.20
4	100x250	8.1	148.49	177.66	19.65
		20	229.17	289.12	26.16

Tabell 10.2.1 viser at forskjellene i stivheten mellom de to ulike modelleringene ligger i området 4-28 %. Geometrier med tynne endeplater gir liten forskjell i stivhetene modellert med og uten stiv plate. For geometrier med tykke endeplater blir forskjellen større. Likevel, geometrier med veldig tykk endeplate i forhold til tykkelsen på hulprofilet brukes sjeldent i konstruksjoner. Det betyr at forskjellen mellom de to ulike modelleringene nok ligger nærmere 4 enn 28 %.

I tillegg er sammenligningen gjort mellom helt stiv plate innenfor hulprofilet og endeplate med lik stivhet over hele. Parameteren α i Karlsens modell er nok tenkt å ligge nærmere 1.0 enn uendelig. Det gjør at forskjellene i Tabell 10.2.1 er noe overdrevet.

Vi vurderer derfor at det for de knutepunktsgemetriene som inngår i denne oppgaven ikke er nødvendig å sette α til en høyere verdi enn 1.0. I det videre arbeidet med å finne en justert stivhetsmodell vil α derfor settes lik 1.0.

10.3 Valg av tilpasningsmetoder

I arbeidet med å analysere resultatene fra parameterstudien benyttes det to kjente metoder for behandling av observasjonsmaterialet. Den ene er aritmetisk middel (gjennomsnitt) og den andre er minste kvadraters metode. I det følgende beskrives de to metodene og i hvilken sammenheng de blir brukt.

10.3.1 Aritmetisk middel

Det benyttes aritmetisk middel, heretter kalt gjennomsnitt, for å bestemme den optimale kombinasjonen av α lik 1.0 og $I_{\text{eff,ini}}$. Gjennomsnittet angir den «mest typiske» verdien for en samling av tall (SNL, 2011a). Dette blir brukt til å sammenligne det gjennomsnittlige prosentvise avviket mellom stivheter fra ulike justerte stivhetsmodeller og fra numeriske simuleringer i Abaqus. Sammenligningen av gjennomsnittet vil vise hvilken kombinasjon av α lik 1.0 og $I_{\text{eff,ini}}$ som gir best tilpasning til de numeriske simuleringene.

For å få et mål på spredning av observasjonsmaterialet blir det brukt standardavvik. Stort standardavvik betyr at spredningen i materialet er stort, mens et lite betyr at spredningen er liten. Standardavviket blir beregnet med funksjonen STDAVVIKA i Excel Office. Denne funksjonen forutsetter at observasjonsmaterialet er et utvalg fra hele populasjonen. Da beregnes standardavviket ved hjelp av (n-1)-metoden (Office, 2010a).

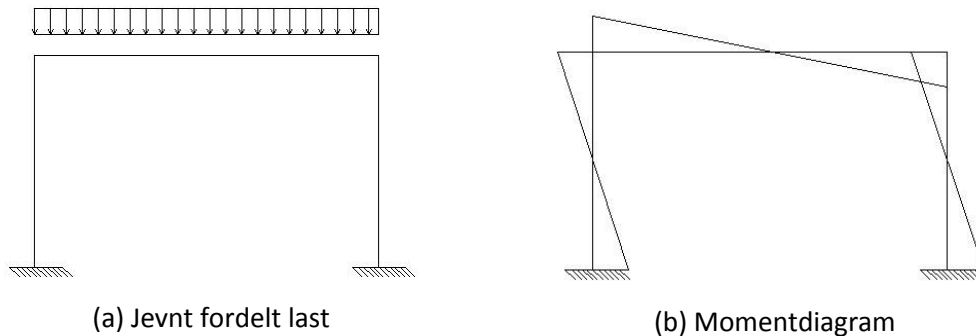
10.3.2 Minste kvadraters metode

I tilpasningen av datapunktene for utvikling av korreksjonsfaktorer blir det brukt minste kvadraters metode i Excel Office (Office, 2010b). Minste kvadraters metode brukes når man ønsker å finne en teoretisk sammenheng ut fra observerte verdier. Metoden går ut på å velge en sammenheng slik at avviket mellom observasjoner og løsning er minst mulig. Ved minste kvadraters metode velges den løsningen som gir at summen av kvadratene av avvikene fra de gitte betingelsene er et minimum. Om man for eksempel vil bestemme en rett linje ut fra en rekke punkter som er observert, velges den linjen hvor summen av de kvadrerte avstander fra observerte punkter til linjen er så liten som mulig (SNL, 2011b).

I Excel Office angis treffsikkerheten med en R-verdi. R-verdien ligger mellom 0 og 1 der en R-verdi nærme 1 betyr at tilpasningen treffer godt i forhold til de observerte verdiene (Office, 2010b).

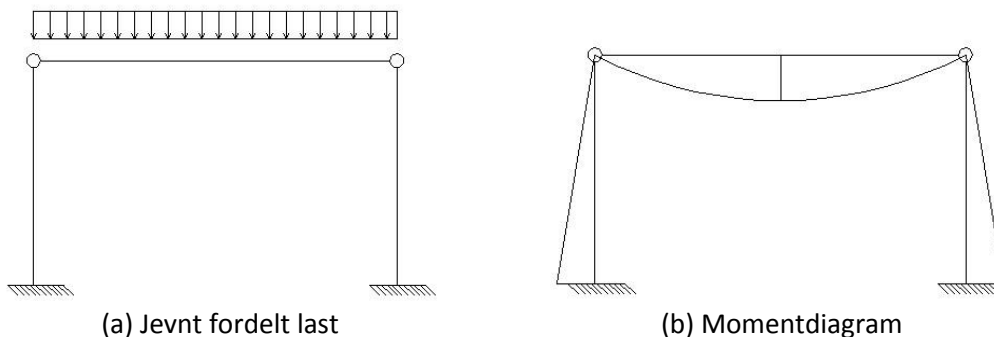
10.4 Forklaring av konservativ stivhet

For stivhetsberegninger er det ikke selvsagt om for lav eller for høy beregnet stivhet i forhold til virkeligheten er konservativt. For å illustrere dette tas det utgangspunkt i den enkle rammen i Figur 10.4.1. Rammen antas å være momentstiv i hjørnene og ved innspenningene.



Figur 10.4.1: Momentstiv ramme

Jevnt fordelt belastning som vist i Figur 10.4.1(a) vil gi et momentforløp i rammen som vist i Figur 10.4.1(b). Forutsetningen for et slikt momentforløp er at hjørnene er helt stive. Dersom det ikke er tilfellet vil den horisontale bjelken være fritt opplagt i endene. Figur 10.4.2 viser dette.



Figur 10.4.2: Ramme med leddede hjørner

Med belastning som er vist i Figur 10.4.2(a) vil momentforløpet bli som vist i Figur 10.4.2(b). Momentet i hjørnene er redusert til null mens momentet midt på den horisontale bjelken har økt fra null til M_p . Det vil si at dersom en stivhetsberegning gir for lav stivhet i forhold til virkeligheten vil det bety at momentet midt på bjelken vil være mindre enn M_p . I motsatt fall vil det samme momentet økes, men da reduseres momentet i hjørnene. I begge tilfellene vil noen deler av konstruksjonen få større momentbelastning samtidig som andre deler får mindre belastning.

Basert på det enkle rammeeksempelet betyr det at for stivhetsberegninger er det ønskelig å ha et formelverk som gir så lite avvik som mulig. Om avviket er negativt eller positivt er ikke avgjørende for vurderingen av formelverket.

10.5 Parameterstudie

For å bestemme verdien av $l_{\text{eff,ini}}$ i Karlsens beregningsmodell utføres det i det følgende en parameterstudie. I delkapittel 10.2 ble betydningen av α anslått til å være liten slik at den i det følgende blir satt til å være lik 1.0. Det er derfor den optimale kombinasjonen av $l_{\text{eff,ini}}$ og α lik 1.0 som er av interesse. I tillegg er det ønskelig å vurdere hvilke parametere som er mest avgjørende for stivheten til knutepunkt med hulprofil.

10.5.1 Varierte parametere

I uttrykkene for bolte- og platestivhetskoeffisienten i beregningsmodellen inngår det flere parametere. Platetykkelsen er representert med t_p , boltedimensjonen gjennom A_s og boltens tøyningsslengde bestemmes av boltedimensjon og platetykkelsen. Plasseringen av boltene kan også variere med parameteren n . Med så mange variable i modellen må noen faktorer holdes konstant for og kunne vurdere virkningen av parametere som endres. Samtidig vil ikke virkningen av faktorene som holdes konstant kunne kartlegges. For å få en grundig parameterstudie blir det derfor valgt og kun holde boltedimensjonen og bredden og lengden på hulprofilet konstant. Det benyttes M16 bolter og HUP med størrelse 80x80 mm. I tillegg holdes boltenes innbyrdes avstand konstant lik 50 mm og avstanden fra platens endekant til senter bolt (n) settes lik 20 mm, tilsvarende laboratorieforsøket.

Tabell 10.5.1 viser hvilke parametere som ble variert i studien og verdien av disse. Platetykkelsen ble valgt som for prøvene i laboratorieforsøket. I tillegg ble to andre tykkelser inkludert i studien, 15 og 20 mm. Alle kombinasjoner av parametere ble undersøkt bortsett fra tilfellet med platelengde 250 mm. Den ble kun kombinert med platebredde 100 mm for å kunne vurdere hvilken betydning lang plate vil ha for stivheten. For denne geometrien ble boltene også flyttet. Avstanden n ble da satt til 40 mm. Totalt ble det analysert 128 forskjellige knutepunksgeometrier.

Tabell 10.5.1: Varierte parametere

Parameter	Verdi
Platetykkelse – t_p	8.1 mm – 10.2 mm – 15 mm – 20 mm
Tykkelse hulprofil – t_{HUP}	3.6 mm – 4 mm – 5 mm – 6.3 mm
Platebredde – b_p	80 mm – 100 mm – 180mm
Platelengde – l_p	180 mm – 250 mm
Antall bolter	2 – 4 stk.

10.5.2 Resultater fra Karlsens stivhetsmodell

I kapittel 4 ble Karlsens stivhetsmodell utledet. Uttrykkene for plate- og boltestivhetskoeffisientene er gjengitt under.

$$k_p = \frac{2(3a + 3m\alpha + n\alpha)l_{eff,ini}t_p^3}{m^2(3m^2\alpha + 4nma + 12am + 12an)}$$
$$k_b = \frac{4n(3a + 3m\alpha + n\alpha)}{(6am + 6an + 3m^2\alpha + 6nma)} \frac{A_s}{L_b}$$

I Tabell 10.5.2 oppsummeres stivhetstallene for de ulike geometriene beregnet med denne stivhetsmodellen (K_{el}). I kapittel 6 ble det vist hvordan beregningen utføres for knutepunktene fra laboratorieforsøket. Ettersom uttrykkene over ikke inkluderer tykkelsen av hulprofilet vil identiske geometrier med ulik t_{HUP} gi samme stivhetstall.

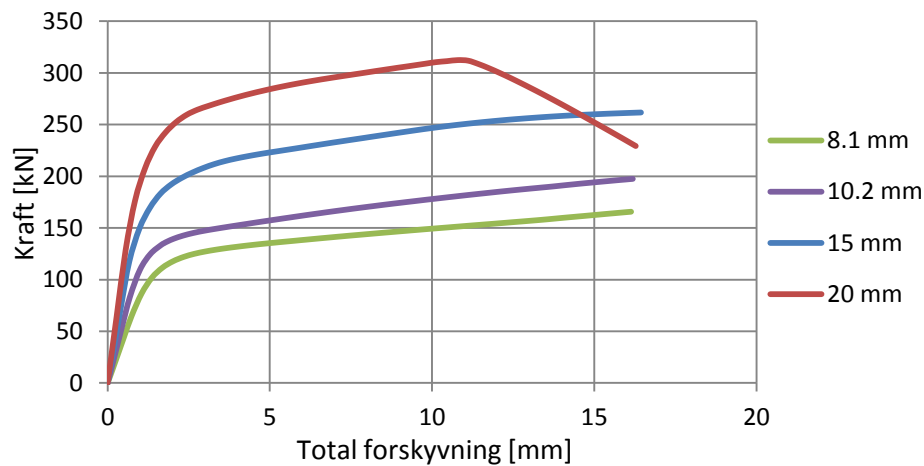
Tabell 10.5.2: Stivhet beregnet med Karlsens stivhetsmodell

$b_p \times l_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	k_p [mm]	k_b [mm]	k_{total} [mm]	K_{el} [kN/mm]
80x180	2	8.1	0.46	5.00	0.85	88.76
		10.2	0.92	4.44	1.53	160.35
		15	2.93	3.55	3.21	337.05
		20	6.95	2.93	4.12	432.73
80x180	4	8.1	0.46	10.00	0.88	92.68
		10.2	0.92	8.89	1.67	175.42
		15	2.93	7.09	4.15	435.64
		20	6.95	5.86	6.36	667.56
100x180	2	8.1	0.58	5.00	1.04	108.70
		10.2	1.15	4.44	1.83	192.25
		15	3.67	3.55	3.61	378.57
		20	8.69	2.93	4.38	460.09
100x180	4	8.1	0.58	10.00	1.09	114.63
		10.2	1.15	8.89	2.04	214.33
		15	3.67	7.09	4.83	507.60
		20	8.69	5.86	7.00	734.93
180x180	2	8.1	0.73	5.00	1.28	134.15
		10.2	1.46	4.44	2.20	231.08
		15	4.65	3.55	4.02	422.52
		20	11.03	2.93	4.63	485.98
180x180	4	8.1	1.02	10.00	1.85	194.54
		10.2	2.04	8.89	3.32	348.25
		15	6.48	7.09	6.77	711.27
		20	15.37	5.86	8.48	890.69
100x250	2	8.1	0.15	6.09	0.30	31.24
		10.2	0.30	5.41	0.58	60.54
		15	0.97	4.32	1.58	166.12
		20	2.30	3.57	2.79	293.31
100x250	4	8.1	0.15	12.17	0.30	31.63
		10.2	0.30	10.82	0.59	62.20
		15	0.97	8.64	1.74	182.86
		20	2.30	7.13	3.47	364.71

10.5.3 Resultater fra Abaqus.

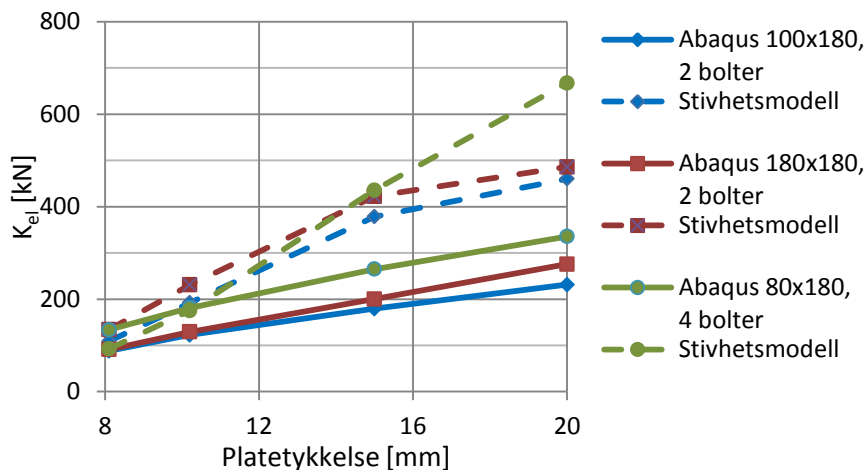
Samtlige av geometriene i parameterstudien ble simulert i Abaqus. Ettersom materialdata for det plastiske området ikke var tilgjengelig for platetykkelsene 15 og 20 mm, ble dataene for endeplate 10 mm brukt. Da det er initialstivheten som undersøkes i parameterstudien vil ikke oppførselen i det plastiske området være vesentlig. Av samme grunn vil det ikke være nødvendig å plote kraft-forskyvningsdiagram for alle geometriene og disse er derfor utelatt

fra rapporten. Likevel, for å illustrere hvordan kraft-forskyvningskurvene ble, vises diagrammet for knutepunktet med endeplatemål 100x180 mm, 2 bolter og hulprofiltykkelse 5 mm i Figur 10.5.1. Diagrammet er representativt for resultatene fra alle simuleringene.



Figur 10.5.1: Kraft-forskyvning for 100x180 mm endeplate, 2 bolter og t_{HUP} 5 mm

De forskjellige platetykkelsene gir ulik elastisk stivhet. Ved å plote stivhetstall for tilfellene i Figur 10.5.1 og utvalgte andre geometrier, mot tilsvarende stivhetstall beregnet med Karlsens stivhetsmodell er det tydelig at Karlsens modell gir for høy stivhet i de fleste tilfellene. Dette er vist i Figur 10.5.2.



Figur 10.5.2: Stivheter for 80x80x5 mm hulprofil

For å få en mer detaljert oversikt over hvor godt Karlsens stivhetsmodell stemmer overens med stivheten fra analysene i Abaqus sammenlignes de to stivhetene i tabeller på de neste sidene, se Tabell 10.5.3. Det beregnes et prosentvis avvik som vist under. Positivt avvik indikerer at Karlsens stivhetsmodell gir for høy stivhet.

$$\text{Avvik i \%} = \left(\frac{K_{el} - K_{aba}}{K_{aba}} \right) \times 100$$

Tabell 10.5.3: Knutepunktstivheter fra Abaqus og Karlsens stivhetsmodell

t_{HUP} [mm]	$b_p \times l_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{el} [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	180x80	2	8.1	88.76	75.02	18.33
			10.2	160.35	107.21	49.57
			15	347.58	163.40	112.72
			20	432.73	210.59	105.49
4	180x80	2	8.1	88.76	78.22	13.48
			10.2	160.35	110.25	45.44
			15	347.58	168.10	106.77
			20	432.73	214.49	101.75
5	180x80	2	8.1	88.76	86.39	2.75
			10.2	160.35	120.77	32.77
			15	347.58	160.26	116.88
			20	432.73	229.77	88.33
6.3	180x80	2	8.1	88.76	93.73	-5.30
			10.2	160.35	130.78	22.61
			15	347.58	194.85	78.38
			20	432.73	244.48	77.00
3.6	180x80	4	8.1	92.68	115.82	-19.97
			10.2	175.42	157.19	11.60
			15	435.64	235.00	85.38
			20	667.56	301.14	121.68
4	180x80	4	8.1	92.68	120.65	-23.18
			10.2	175.42	164.35	6.74
			15	435.64	243.90	78.62
			20	667.56	311.08	114.60
5	180x80	4	8.1	92.68	133.84	-30.75
			10.2	175.42	181.13	-3.15
			15	435.64	264.78	64.53
			20	667.56	335.60	98.92
6.3	180x80	4	8.1	92.68	145.29	-36.21
			10.2	175.42	196.56	-10.75
			15	435.64	288.48	51.01
			20	667.56	357.53	86.71

t_{HUP} [mm]	$b_p \times l_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{el} [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	180x100	2	8.1	108.70	79.00	37.59
			10.2	192.25	110.29	74.31
			15	378.57	164.12	130.67
			20	460.09	218.27	110.79
4	180x100	2	8.1	108.70	81.24	33.79
			10.2	192.25	113.20	69.83
			15	378.57	169.51	123.34
			20	460.09	222.85	106.46
5	180x100	2	8.1	108.70	88.07	23.42
			10.2	192.25	122.65	56.74
			15	378.57	179.41	111.01
			20	460.09	231.43	98.80
6.3	180x100	2	8.1	108.70	94.06	15.56
			10.2	192.25	132.71	44.87
			15	378.57	195.39	93.75
			20	460.09	248.25	85.33
3.6	180x100	4	8.1	114.63	133.69	-14.26
			10.2	214.33	179.36	19.49
			15	507.59	262.31	93.51
			20	734.93	326.84	124.86
4	180x100	4	8.1	114.63	137.87	-16.85
			10.2	214.33	184.92	15.90
			15	507.59	267.89	89.48
			20	734.93	335.98	118.74
5	180x100	4	8.1	114.63	146.10	-21.54
			10.2	214.33	200.91	6.68
			15	507.59	284.16	78.63
			20	734.93	349.39	110.34
6.3	180x100	4	8.1	114.63	-	-
			10.2	214.33	212.01	1.09
			15	507.59	308.50	64.53
			20	734.93	374.63	96.18

t_{HUP} [mm]	$b_p \times l_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{el} [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	180x180	2	8.1	134.15	81.43	64.74
			10.2	231.08	116.92	97.64
			15	405.10	186.98	116.66
			20	485.98	261.64	85.75
4	180x180	2	8.1	134.15	83.87	59.95
			10.2	231.08	119.88	92.76
			15	405.10	189.79	113.45
			20	485.98	266.59	82.30
5	180x180	2	8.1	134.15	91.20	47.09
			10.2	231.08	129.37	78.62
			15	405.10	200.02	102.53
			20	485.98	275.58	76.35
6.3	180x180	2	8.1	134.15	97.48	37.62
			10.2	231.08	139.86	65.22
			15	405.10	214.92	88.49
			20	485.98	291.01	67.00
3.6	180x180	4	8.1	194.54	143.39	35.67
			10.2	348.25	197.03	76.75
			15	711.27	297.95	138.72
			20	890.69	396.65	124.55
4	180x180	4	8.1	194.54	148.10	31.35
			10.2	348.25	203.14	71.44
			15	711.27	313.49	126.89
			20	890.69	415.91	114.15
5	180x180	4	8.1	194.54	160.61	21.12
			10.2	348.25	219.21	58.87
			15	711.27	326.79	117.65
			20	890.69	430.19	107.05
6.3	180x180	4	8.1	194.54	178.32	9.09
			10.2	348.25	233.60	49.08
			15	711.27	350.51	102.92
			20	890.69	452.35	96.90

t_{HUP} [mm]	$b_p \times l_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{el} [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	250x100	2	8.1	31.24	39.66	-21.24
			10.2	60.54	61.98	-2.33
			15	166.12	114.18	45.48
			20	293.31	170.39	72.14
4	250x100	2	8.1	31.24	40.57	-23.00
			10.2	60.54	63.41	-4.53
			15	166.12	117.00	41.98
			20	293.31	173.29	69.26
5	250x100	2	8.1	31.24	42.99	-27.33
			10.2	60.54	67.39	-10.16
			15	166.12	122.25	35.89
			20	293.31	178.14	64.65
6.3	250x100	2	8.1	31.24	46.58	-32.93
			10.2	60.54	71.23	-15.01
			15	166.12	130.27	27.52
			20	293.31	188.38	55.70
3.6	250x100	4	8.1	31.63	56.01	-43.53
			10.2	62.20	84.64	-26.51
			15	182.86	149.18	22.58
			20	364.71	228.76	59.43
4	250x100	4	8.1	31.63	59.90	-47.20
			10.2	62.20	86.83	-28.37
			15	182.86	150.68	21.36
			20	364.71	229.17	59.14
5	250x100	4	8.1	31.63	62.51	-49.41
			10.2	62.20	92.73	-32.93
			15	182.86	161.29	13.38
			20	364.71	242.36	50.48
6.3	250x100	4	8.1	31.63	66.37	-52.35
			10.2	62.20	99.37	-37.41
			15	182.86	173.74	5.25
			20	364.71	257.50	41.64

Det prosentvise avviket fra Tabell 10.5.3 oppsummeres i Tabell 10.5.4. Det gjøres for å få en bedre oversikt over hvordan de ulike parameterne påvirker nøyaktigheten til Karlsens stivhetsmodell i forhold til simuleringene i Abaqus.

Gjennomsnittlig prosentvis avvik fordelt på tykkelsen til hulprofilet er vist nederst i tabellen. Basert på dette er det tydelig at Karlsens stivhetsmodell gir best resultater for knutepunkt med tykke hulprofil.

Tabell 10.5.4: Prosentvis avvik sortert etter endeplate og tykkelse på hulprofil

$b_p \times l_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	b_p/t_p	Avvik %			
				80x80x3.6	80x80x4	80x80x5	80x80x6.3
80x180	2	8.1	9.88	18.33	13.48	2.75	-5.30
		10.2	7.84	49.57	45.44	32.77	22.61
		15	5.33	112.72	106.77	116.88	78.38
		20	4	105.49	101.75	88.33	77.00
80x180	4	8.1	9.88	-19.97	-23.18	-30.75	-36.21
		10.2	7.84	11.60	6.74	-3.15	-10.75
		15	5.33	85.38	78.62	64.53	51.01
		20	4	121.68	114.60	98.92	86.71
100x180	2	8.1	12.3	37.59	33.79	23.42	15.56
		10.2	9.8	74.31	69.83	56.74	44.87
		15	6.7	130.67	123.34	111.01	93.75
		20	5	110.79	106.46	98.80	85.33
100x180	4	8.1	12.3	-14.26	-16.85	-21.54	-
		10.2	9.8	19.49	15.90	6.68	1.09
		15	6.7	93.51	89.48	78.63	64.53
		20	5	124.86	118.74	110.34	96.18
180x180	2	8.1	22.2	64.74	59.95	47.09	37.62
		10.2	17.6	97.64	92.76	78.62	65.22
		15	12	116.66	113.45	102.53	88.49
		20	9	85.75	82.30	76.35	67.00
180x180	4	8.1	22.2	35.67	31.35	21.12	9.09
		10.2	17.6	76.75	71.44	58.87	49.08
		15	12	138.72	126.89	117.65	102.92
		20	9	124.55	114.15	107.05	96.90
100x250	2	8.1	12.3	-21.24	-23.00	-27.33	-32.93
		10.2	9.8	-2.33	-4.53	-10.16	-15.01
		15	6.7	45.48	41.98	35.89	27.52
		20	5	72.14	69.26	64.65	55.70
100x250	4	8.1	12.3	-43.53	-47.20	-49.41	-52.35
		10.2	9.8	-26.51	-28.37	-32.93	-37.41
		15	6.7	22.58	21.36	13.38	5.25
		20	5	59.43	59.14	50.48	41.64
Gjennomsnitt				59.63	55.18	46.51	37.85

For å kunne vurdere hvor godt modellen estimerer stivheten til knutepunktene, ses det på andre parametere i tillegg til tykkelsen på hulprofilet. I det følgende presenteres derfor gjennomsnittlige avvik for parametere som virker inn på stivheten. Alle geometriene i studien inngår i tabellene. Det vil si at alle kombinasjoner med ulik tykkelse på hulprofilet, størrelsen på endeplaten og antall bolter er tatt med.

Tabell 10.5.5 viser gjennomsnittlig prosentvis avvik fordelt på antall bolter i forbindelsen. Tallene viser at Karlsens modell gir best resultat for forbindelser med fire bolter.

Tabell 10.5.5: Gjennomsnittlig avvik fordelt på antall bolter i forbindelsen

Antall bolter	Gjennomsnittlig avvik [%]
2	58.37
4	41.28

Tabell 10.5.6 viser gjennomsnittlig prosentvis avvik fordelt på tykkelsen til endeplaten. Basert på tabellen er det tydelig at Karlsens beregningsmodell estimerer stivheten til forbindelser med tynne endeplater best.

Tabell 10.5.6: Gjennomsnittlig avvik fordelt på platetykkelsen

Platetykkelse [mm]	Gjennomsnittlig avvik [%]
8.1	-0.44
10.2	27.40
15	81.25
20	87.52

Tallene i Tabell 10.5.7 er gjennomsnittlig prosentvis avvik fordelt på platebredden. Tabellen viser at forbindelser med smale endeplater gir bedre resultater enn for brede endeplater. Årsaken til at 100 mm brede plater gir bedre resultater enn 80 mm kan være at noen av geometriene med 100 mm har lange endeplater. Det indikerer at forholdet mellom platebredden og -lengden har innvirkning på stivheten til knutepunktet.

Tabell 10.5.7: Gjennomsnittlig avvik fordelt på platebredde

Platebredde [mm]	Gjennomsnittlig avvik [%]
80	48.84
100	35.15
180	79.95

Ettersom platelengden har indirekte påvirkning på verdiene i Tabell 10.5.7, er det også av interesse å undersøke hvordan den virker inn på treffsikkerheten til stivhetsmodellen. Som Tabell 10.5.8 viser, vil forbindelser med lange endeplater gi bedre resultater enn forbindelser

med kortere plate. Samtidig er det verdt å nevne at datagrunnlaget for geometrier med lang endeplate er mindre enn det for geometrier med kort plate.

Tabell 10.5.8: Gjennomsnittlig avvik fordelt på platelengde

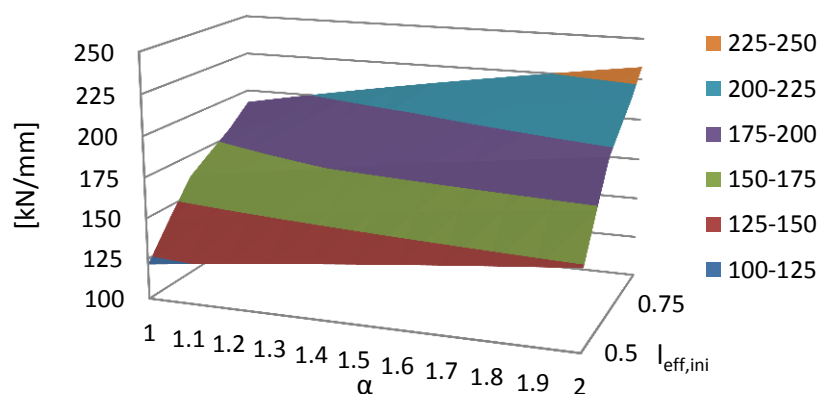
Platelengde [mm]	Gjennomsnittlig avvik [%]
180	64.25
250	7.24

Tabellene viser at det prosentvise aviket mellom stivhetsmodellen og resultatene fra Abaqus er relativt stort også for andre geometrier enn dem sammenlignet i kapittel 8. Det forsterker ønsket om å finne en justert stivhetsmodell som gir bedre resultater.

10.5.4 Valg av $l_{\text{eff,ini}}$

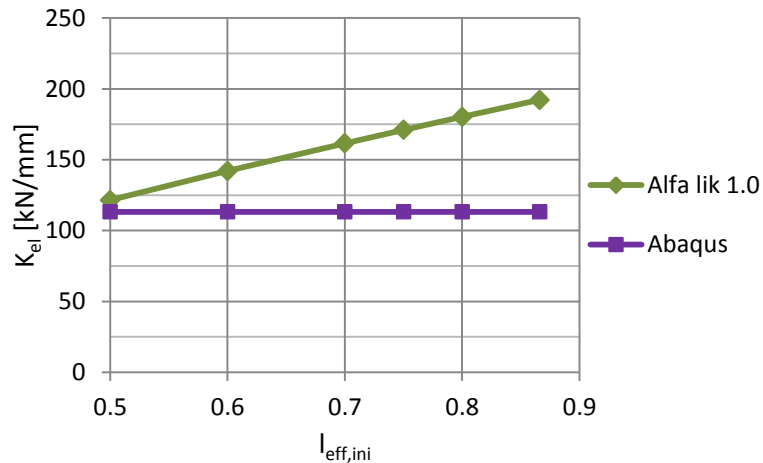
Som nevnt innledningsvis er det den optimale kombinasjonen av $l_{\text{eff,ini}}$ og α lik 1 som er av interesse. For å begrense datamengden studeres først geometriene som ble prøvd i laboratoriet for å finne en stivhetsmodell med justerte parametere. Deretter vurderes den justerte modellen ved å undersøke hvor godt den samsvarer med stivheten fra Abaqus for de øvrige geometriene i parameterstudien.

I Figur 10.5.3 vises sammenhengen mellom α , $l_{\text{eff,ini}}$ og K_{el} for prøve A1. Figuren illustrerer hvordan stivheten reduseres med redusert α og $l_{\text{eff,ini}}$. Tilsvarende figurer for de andre prøvene er utelatt fra oppgaven da de viser samme tendenser for sammenhengen mellom α , $l_{\text{eff,ini}}$ og K_{el} .



Figur 10.5.3: Sammenheng mellom α , $l_{\text{eff,ini}}$ og K_{el} for prøve A1

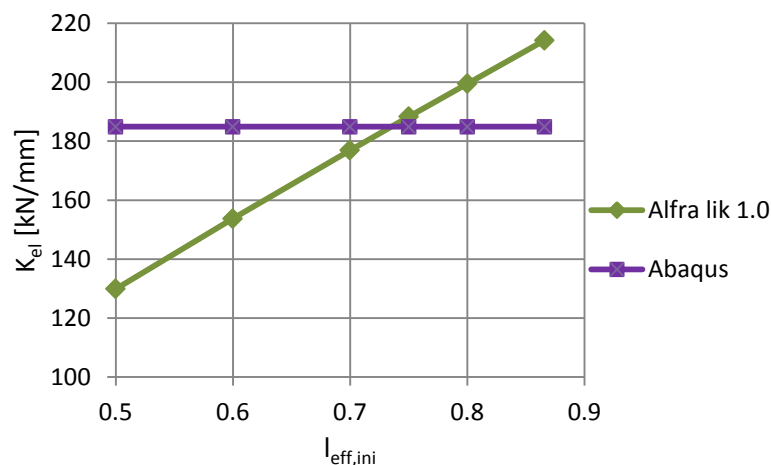
Stivheten funnet fra simuleringen i Abaqus var 113.20 kN/mm for prøve A1. Figur 10.5.4 viser sammenhengen mellom K_{el} og $l_{eff,ini}$ for α lik 1.0. For å få en tilnærmet lik verdi for stivheten beregnet med modellen til Karlsten må den initielle effektive lengden $l_{eff,ini}$ reduseres til omtrent 0.5 ganger den plastiske effektivlengden.



Figur 10.5.4: Sammenheng mellom K_{el} og $l_{eff,ini}$ for $\alpha = 1.0$ for prøve A1

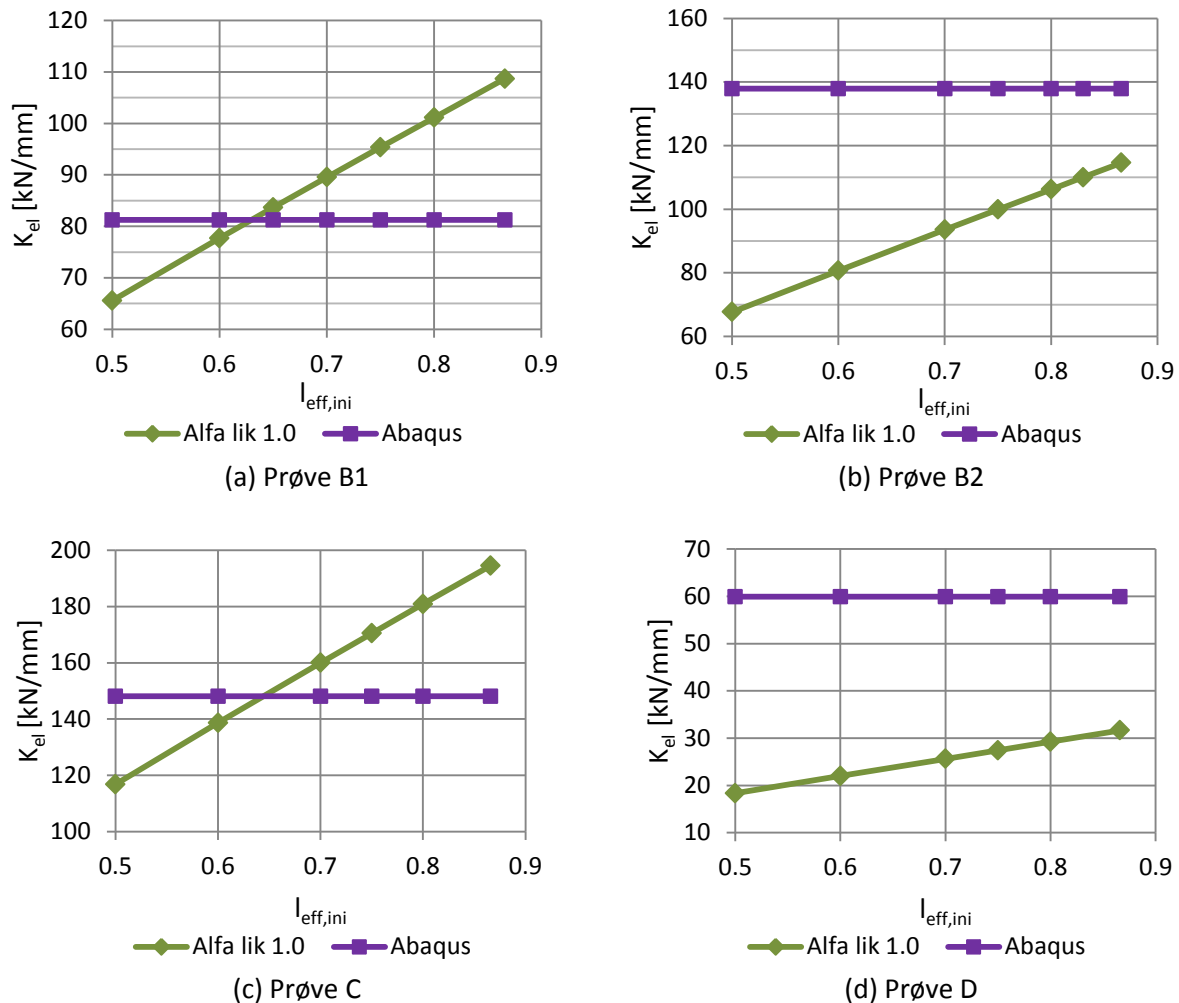
Ved å studere Figur 10.5.4 er det tydelig at kombinasjonen av $l_{eff,ini}$ lik $0.5l_{eff}$ og α lik 1.0 ikke gir eksakt samme verdi som simuleringene i Abaqus. Det ser ut til at en ytterligere reduksjon av $l_{eff,ini}$ vil gi bedre resultat, men en så stor reduksjon betyr at det heller bør utvikles en ny stivhetsmodell. Det velges derfor kun å studere stivhetene for $l_{eff,ini}$ i området $0.5-0.8667 l_{eff}$.

Figur 10.5.5 viser sammenhengen mellom K_{el} og $l_{eff,ini}$ for α lik 1.0 for prøve A2. Stivheten fra Abaqus ble funnet til å være 184.92 kN/mm. Basert på figuren bør $l_{eff,ini}$ være mellom 0.7 og 0.8 ganger l_{eff} .



Figur 10.5.5: Sammenheng mellom K_{el} og $l_{eff,ini}$ for $\alpha = 1.0$ for A2

Tilsvarende sammenligning gjøres for prøve B1, B2, C og D for å finne den optimale verdien av $l_{eff,ini}$. Figur 10.5.6 viser sammenhengen mellom K_{el} og $l_{eff,ini}$ for α lik 1.0 for de resterende prøvestykkene.



Figur 10.5.6: Sammenheng mellom α , $l_{\text{eff,ini}}$ og K_{el} for de ulike prøvene

Basert på sammenligningene i Figur 10.5.4 til Figur 10.5.6 er det vanskelig å trekke en konklusjon for den optimale kombinasjonen av $l_{\text{eff,ini}}$ og α lik 1.0. Likevel kan det pekes på noen fellestrekk. For prøve B2 og D gir ingen kombinasjon lik stivhet som fra simuleringene i Abaqus. Det tyder på at stivhetsmodellen gir et dårlig estimat for disse prøvene. For prøvetypene A1, A2, B1 og C vil en reduksjon i effektivlengden gi bedre resultat. Basert på figurene bør $l_{\text{eff,ini}}$ være omtrent 0.5-0.7 av effektivlengden.

10.5.5 Justert stivhetsmodell og resultater fra Abaqus.

For å få et bedre grunnlag for valg av $l_{\text{eff,ini}}$ beregnes stivheten til de ulike knutepunksgeometriene i parameterstudien med $l_{\text{eff,ini}}$ lik 0.5, 0.6 og 0.7 ganger l_{eff} . Stivheten til geometriene beregnes med de aktuelle verdiene for $l_{\text{eff,ini}}$ og avviket i forhold til stivhetene fra Abaqus beregnes. I det følgende oppgis kun avviket mens detaljerte tabeller er gitt i vedlegg F.1.

I Tabell 10.5.9 vises det prosentvise avviket for kombinasjonen $\alpha = 1.0$ og $l_{\text{eff,ini}} = 0.7 l_{\text{eff}}$. Nederst i tabellen er gjennomsnittet for de ulike hulprofiltykkelsene gitt. Gjennomsnittet viser at tykkere hulprofil gir bedre resultat.

Tabell 10.5.9: Prosentvis avvik for $\alpha = 1.0$ og $l_{\text{eff,ini}} = 0.7 l_{\text{eff}}$

$b_p \times l_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	b_p/t_p	Avvik [%]			
				80x80x3.6	80x80x4	80x80x5	80x80x6.3
80x180	2	8.1	9.88	-2.85	-6.83	-15.64	-22.24
		10.2	7.84	24.93	21.48	10.90	2.41
		15	5.33	82.49	77.39	86.06	53.03
		20	4	91.94	88.45	75.92	65.33
80x180	4	8.1	9.88	-34.81	-37.42	-43.59	-48.04
		10.2	7.84	-8.20	-12.20	-20.33	-26.59
		15	5.33	58.66	52.87	40.81	29.24
		20	4	99.91	93.53	79.38	68.38
100x180	2	8.1	12.3	13.39	10.26	1.71	-4.76
		10.2	9.8	46.59	42.83	31.82	21.83
		15	6.7	106.50	99.94	88.90	73.45
		20	5	98.85	94.77	87.55	74.84
100x180	4	8.1	12.3	-30.01	-32.13	-35.95	-
		10.2	9.8	-1.30	-4.27	-11.89	-16.50
		15	6.7	67.26	63.78	54.40	42.22
		20	5	105.19	99.61	91.94	79.02
180x180	2	8.1	22.2	36.41	32.44	21.80	13.96
		10.2	17.6	67.61	63.47	51.48	40.12
		15	12	104.87	101.84	91.51	78.24
		20	9	76.91	73.62	67.95	59.05
180x180	4	8.1	22.2	11.57	8.02	-0.39	-10.28
		10.2	17.6	48.07	43.62	33.09	24.89
		15	12	112.32	101.79	93.58	80.48
		20	9	110.71	100.95	94.28	84.76
100x250	2	8.1	12.3	-36.09	-37.52	-41.03	-45.58
		10.2	9.8	-20.30	-22.10	-26.69	-30.65
		15	6.7	21.80	18.86	13.76	6.76
		20	5	50.36	47.84	43.82	36.00
100x250	4	8.1	12.3	-54.28	-57.25	-59.03	-61.41
		10.2	9.8	-40.33	-41.84	-45.54	-49.18
		15	6.7	0.96	-0.04	-6.61	-13.31
		20	5	35.10	34.85	27.51	20.02
Gjennomsnitt				38.88	35.02	27.55	20.18

Tabell 10.5.10 viser avviket for kombinasjonen $\alpha = 1.0$ og $l_{\text{eff,ini}} = 0.6 l_{\text{eff}}$. Også for denne kombinasjonen er gjennomsnittet for de ulike hulprofiltykkelsene gitt nederst i tabellen. Tykkere hulprofil gir bedre resultat.

Tabell 10.5.10: Prosentvis avvik for $\alpha = 1.0$ og $l_{\text{eff,ini}} = 0.6 l_{\text{eff}}$

$b_p \times l_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	b_p/t_p	Avvik [%]			
				80x80x3.6	80x80x4	80x80x5	80x80x6.3
80x180	2	8.1	9.88	-15.90	-19.34	-26.97	-32.69
		10.2	7.84	9.33	6.31	-2.95	-10.38
		15	5.33	65.91	61.27	69.16	39.13
		20	4	81.57	78.26	66.41	56.39
80x180	4	8.1	9.88	-43.83	-46.08	-51.40	-55.23
		10.2	7.84	-20.44	-23.91	-30.95	-36.37
		15	5.33	41.04	35.89	25.17	14.89
		20	4	84.23	78.35	65.31	55.17
100x180	2	8.1	12.3	-1.61	-4.33	-11.74	-17.36
		10.2	9.8	28.84	25.53	15.86	7.08
		15	6.7	89.30	83.29	73.17	59.01
		20	5	89.55	85.66	78.78	66.66
100x180	4	8.1	12.3	-39.62	-41.45	-44.75	-
		10.2	9.8	-14.24	-16.82	-23.44	-27.45
		15	6.7	49.66	46.54	38.15	27.25
		20	5	90.73	85.54	78.42	66.40
180x180	2	8.1	22.2	18.72	15.26	6.00	-0.83
		10.2	17.6	48.11	44.45	33.86	23.81
		15	12	89.54	86.73	77.18	64.90
		20	9	69.90	66.74	61.30	52.75
180x180	4	8.1	22.2	-3.32	-6.39	-13.69	-22.26
		10.2	17.6	29.82	25.92	16.68	9.49
		15	12	93.75	84.14	76.64	64.69
		20	9	100.02	90.76	84.43	75.39
100x250	2	8.1	12.3	-45.06	-46.29	-49.31	-53.22
		10.2	9.8	-31.26	-32.81	-36.77	-40.18
		15	6.7	6.73	4.16	-0.31	-6.44
		20	5	35.50	33.23	29.61	22.56
100x250	4	8.1	12.3	-60.76	-63.31	-64.84	-66.88
		10.2	9.8	-48.70	-49.99	-53.17	-56.30
		15	6.7	-12.42	-13.29	-18.99	-24.80
		20	5	19.32	19.10	12.62	6.00
Gjennomsnitt				25.14	21.66	14.98	8.42

Tabell 10.5.11 viser det prosentvise avviket for kombinasjonen $\alpha = 1.0$ og $l_{\text{eff,ini}} = 0.5 l_{\text{eff}}$. Som tidligere er gjennomsnittet for de ulike hulprofiltykkelsene gitt nederst i tabellen. Tilsvarende som for de to andre kombinasjonene gir tykkere hulprofil gir bedre resultat ifølge det prosentvise avviket.

Tabell 10.5.11: Prosentvis avvik for $\alpha = 1.0$ og $l_{\text{eff,ini}} = 0.5 l_{\text{eff}}$

$b_p \times l_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	b_p/t_p	Avvik [%]			
				80x80x3.6	80x80x4	80x80x5	80x80x6.3
80x180	2	8.1	9.88	-29.20	-32.10	-38.52	-43.34
		10.2	7.84	-6.95	-9.52	-17.40	-23.72
		15	5.33	47.19	43.08	50.07	23.43
		20	4	68.80	65.73	54.70	45.39
80x180	4	8.1	9.88	-52.95	-54.84	-59.29	-62.50
		10.2	7.84	-32.95	-35.87	-41.81	-46.38
		15	5.33	22.06	17.60	8.33	-0.57
		20	4	66.01	60.70	48.96	39.82
100x180	2	8.1	12.3	-16.99	-19.28	-25.54	-30.28
		10.2	9.8	10.16	7.33	-0.94	-8.44
		15	6.7	69.54	64.15	55.09	42.41
		20	5	77.90	74.25	67.79	56.42
100x180	4	8.1	12.3	-49.36	-50.89	-53.66	-
		10.2	9.8	-27.54	-29.72	-35.31	-38.70
		15	6.7	30.45	27.73	20.42	10.92
		20	5	73.60	68.88	62.40	51.46
180x180	2	8.1	22.2	0.48	-2.44	-10.29	-16.06
		10.2	17.6	27.36	24.22	15.11	6.47
		15	12	71.55	69.02	60.37	49.25
		20	9	60.97	57.98	52.83	44.72
180x180	4	8.1	22.2	-18.50	-21.09	-27.24	-34.47
		10.2	17.6	10.71	7.39	-0.49	-6.62
		15	12	72.60	64.04	57.37	46.72
		20	9	86.76	78.11	72.20	63.76
100x250	2	8.1	12.3	-54.09	-55.11	-57.64	-60.91
		10.2	9.8	-42.36	-43.66	-46.98	-49.84
		15	6.7	-9.01	-11.21	-15.02	-20.25
		20	5	19.03	17.04	13.85	7.66
100x250	4	8.1	12.3	-67.26	-69.38	-70.66	-72.37
		10.2	9.8	-57.11	-58.19	-60.85	-63.47
		15	6.7	-26.13	-26.86	-31.67	-36.57
		20	5	2.54	2.35	-3.21	-8.90
Gjennomsnitt				10.23	7.17	1.34	-4.35

10.5.6 Sammenligning av stivhetsmodeller med ulik $l_{\text{eff,ini}}$.

For å kunne velge den mest gunstige verdien for $l_{\text{eff,ini}}$ sammenlignes resultatene fra delkapittel 10.5.5. For å forenkle tabellene og diagrammene innføres fire tilfeller som tilsvarer ulike kombinasjoner av $l_{\text{eff,ini}}$ og α lik 1.0. Tilfellene er oppsummert i Tabell 10.5.12.

Tabell 10.5.12: Oversikt over kombinasjonstilfeller

Tilfelle	Kombinasjon
1	$\alpha = 1.0, l_{\text{eff,ini}} = 0.8667 l_{\text{eff}}$
2	$\alpha = 1.2, l_{\text{eff,ini}} = 0.70 l_{\text{eff}}$
3	$\alpha = 1.2, l_{\text{eff,ini}} = 0.60 l_{\text{eff}}$
4	$\alpha = 1.2, l_{\text{eff,ini}} = 0.50 l_{\text{eff}}$

En optimal kombinasjon av $l_{\text{eff,ini}}$ og α lik 1.0 vil gi et gjennomsnittlig prosentvis avvik mellom stivhet fra Abaqus og justert modell lik null. Det tilfellet som gir gjennomsnittlig avvik nærmest denne referanseverdien vil være det beste. I tillegg er det ønskelig med et lite standardavvik for å sikre liten spredning i resultatene. Avhengig av stivhetene beregnet med den justerte modellen og fra Abaqus, vil det prosentvise avviket kunne være positivt eller negativt. Som forklart i delkapittel 10.4 er det ikke opplagt om for høy eller for lav stivhet er konservativt. På grunn av det vil det beste tilfellet være det som gir et absolutt avvik nærme null.

Tabell 10.5.13 viser det totale gjennomsnittet for alle knutepunksgeometriene for de ulike tilfellene. Standardavviket for resultatene er oppgitt sammen med største positive og negative avvik som et mål på hvor stor spredning resultatene har. Sammenligningen viser at tilfelle 4 er det beste alternativet.

Tabell 10.5.13: Totalt gjennomsnitt, standardavvik og maksimalverdier

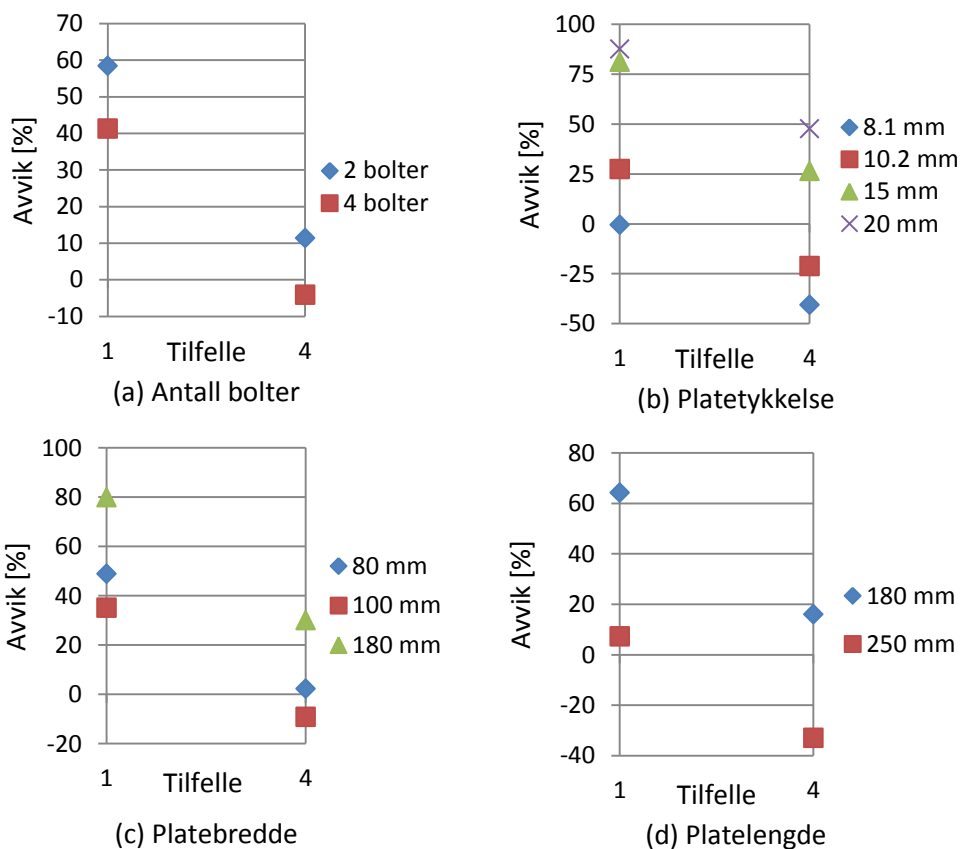
Tilfelle	Totalt gjennomsnitt [%]	Standardavvik [%]	Største positive avvik [%]	Største negative avvik [%]
1	49.89	50.53	138.72	-52.35
2	30.49	48.88	112.32	-61.41
3	17.62	47.24	100.02	-66.88
4	3.66	44.94	86.76	-72.37

For Karlsens stivhetsmodell (tilfelle 1) ble det i delkapittel 10.5.3 undersøkt hvordan de ulike parameterne påvirker stivheten. I det følgende vil tilsvarende undersøkelser for tilfelle 4 gjennomføres. Avvikene for Karlsens stivhetsmodell er inkludert for å gi et sammenligningsgrunnlag.

I Tabell 10.5.14 og Figur 10.5.7 vises sammenligningen av det gjennomsnittlige avviket fordelt på de ulike parameterne for de to tilfellene.

Tabell 10.5.14: Gjennomsnittlige avvik

Parametere		Avvik [%]	
		Tilfelle 1	Tilfelle 4
Antall bolter	2	58.37	11.32
	4	41.28	-4.12
Plate-tykkelse	8.1 mm	-0.44	-40.51
	10.2 mm	27.70	-21.13
	15 mm	81.25	26.44
	20 mm	87.52	47.68
Plate-bredde	80 mm	48.84	2.31
	100 mm	35.15	-9.08
	180 mm	79.95	30.09
Plate-lengde	180 mm	64.254	16.01
	250 mm	-7.24	-33.01



Figur 10.5.7: Gjennomsnittlig avvik

Sammenligningen viser at tilfelle 4 gir lavere avvik enn tilfelle 1 for alle parameterne som inngår i stivhetsmodellen. I tillegg er avvikene for tilfelle 4 godt fordelt om null.

Både Karlsens stivhetsmodell (tilfelle 1) og tilfelle 4 gir lavest avvik for forbindelser med 4 bolter. For de andre parameterne gir tilfelle 4 noe annerledes resultater enn Karlsens modell. Tilfelle 4 stemmer best for platetykkelser lik 10.2 og 15 mm, mens Karlsens modell gir minst avvik for platetykkelse 8.1 mm. Videre gir tilfelle 4 minst avvik for platebredder lik 80 mm mens Karlsens modell passer best for platebredder lik 100 mm. For platelengden gir tilfelle 4 minst avvik for korte plater mens Karlsens modell gir minst avvik for lengre plater.

Basert på parameterstudien og sammenligning av resultatene velges tilfelle 4 med $l_{eff,ini}$ lik $0.5 l_{eff}$. Tabell 10.5.15 oppsummerer verdiene til parameterne i den justerte stivhetsmodellen.

Tabell 10.5.15: Valg av $l_{eff,ini}$ og α

$l_{eff,ini}$	α
$0.5l_{eff}$	1.0

Stivhetskomponentene i den justerte stivhetsmodellen blir med de nye verdiene for α og $l_{eff,ini}$ som vist under.

$$k_p = \frac{2(3a + 3m + n)0.5l_{eff}t_p^3}{m^2(3m^2 + 4nm + 12am + 12an)}$$

$$k_b = \frac{4n(3a + 3m + n)}{(6am + 6an + 3m^2 + 6nm)} \frac{A_b}{L_b}$$

10.6 Korreksjonsfaktor for Eurokoden

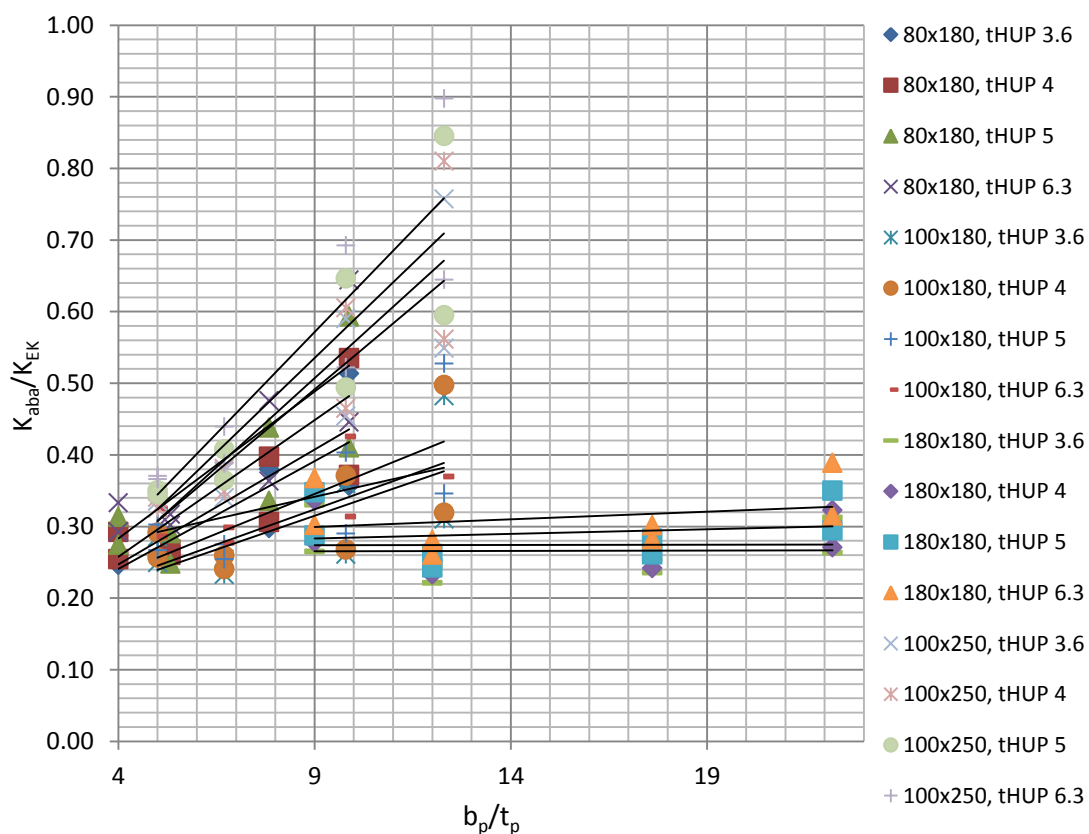
Med de justerte verdiene for $l_{\text{eff,ini}}$ og α ble avviket mellom simuleringene i Abaqus og stivhetsmodellen mindre enn med Karlsens opprinnelige valg av $l_{\text{eff,ini}}$ og α . Som et alternativ til den justerte stivhetsmodellen undersøkes det om det er mulig å finne en korreksjonsfaktor for det eksisterende formelverket i Eurokoden for I- og H- profiler. Målet er å finne en korreksjonsfaktor som gjør det mulig å bruke det samme formelverket for knutepunkt med hulprofil. Dette vil i så fall enkelt kunne implementeres i Eurokoden.

Den korrigerste stivheten kan uttrykkes ved:

$$K_{EK,korr} = C \times K_{EK} \quad \text{der } C = C(l_p, t_p, b_p)$$

10.6.1 Lineær korreksjonsfaktor

For at korreksjonsfaktoren skal være gjeldende for flest mulige knutepunktsgemetrier må den baseres på alle geometriene som inngår i parameterstudien. Ved å plote forholdet mellom stivheten fra Abaqus (K_{aba}) og fra Eurokoden (K_{EK}) mot forholdet mellom platebredden og -tykkelsen blir sammenhengen som vist i Figur 10.6.1. Tabeller for beregning av K_{EK} finnes i vedlegg F.2.1.



Figur 10.6.1: Sammenheng mellom $K_{\text{aba}}/K_{\text{EK}}$ og b_p/t_p

Det antas en rettlinjert sammenheng mellom punktene i hver dataserie. Den generelle lineære funksjonen er vist i ligning 10.1, med forholdet b_p/t_p erstattet av variabelen x .

$$C_i(x) = A_i x + B_i \quad (10.1)$$

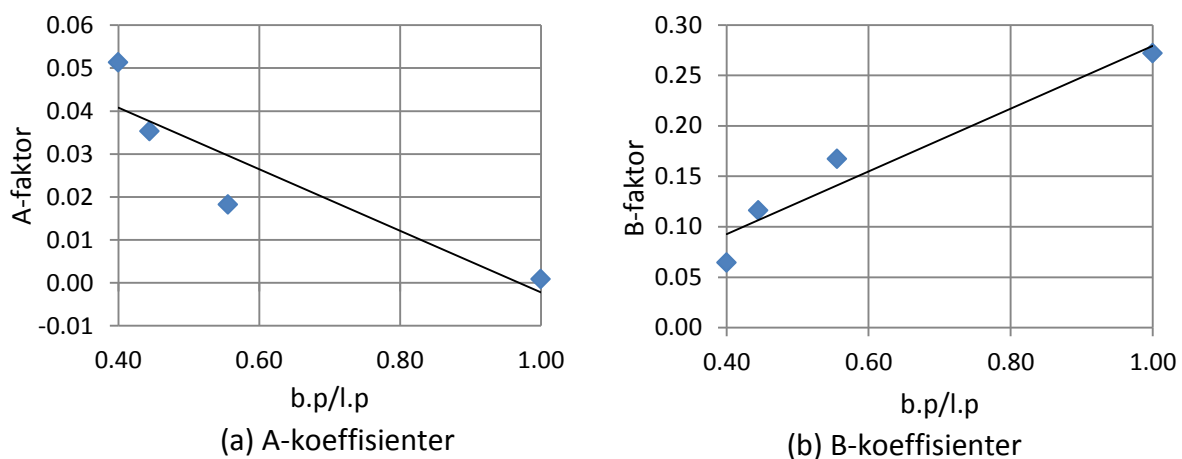
Hver dataserie vil gi en A-koeffisient og en B-koeffisient. Ettersom knutepunksgeometriene varierer både i platelengde, platebredde og hulprofiltykkelse beregnes et gjennomsnitt for hver av de to koeffisientene basert på forholdet mellom platebredden og -lengden. Det gjøres for å finne et uttrykk med kun én variabel. Årsaken til at forholdet mellom platebredden og -lengden brukes er at det i delkapittel 10.5.3 ble vist at stivheten avhenger av dette forholdet.

I Tabell 10.6.1 vises de gjennomsnittlige A- og B-koeffisientene for de ulike forholdene mellom platebredden og platelengden.

Tabell 10.6.1: Gjennomsnittlig A- og B-koeffisienter sortert etter b_p/l_p

$b_p \times l_p$	b_p/l_p	A_i	B_i
80x180	0.44	0.0353	0.1161
100x180	0.56	0.0183	0.1671
180x180	1.00	0.0009	0.2718
100x250	0.40	0.0513	0.0644

Basert på tallene i Tabell 10.6.1 plottes hver av koeffisientene mot forholdet b_p/l_p , se Figur 10.6.2. Igjen antas det en rettlinjert sammenheng mellom punktene i hver dataserie.



Figur 10.6.2: Lineær sammenheng for de to koeffisientene

De generelle ligningene for A- og B-koeffisientene er gitt i ligning 10.2 og 10.3. Forholdet b_p/l_p er erstattet med variabelen y i ligningene. De tilhørende verdiene for koeffisientene D_1 og D_2 er gitt i Tabell 10.6.2

$$A(y) = D_1 y + D_2 \quad (10.2)$$

$$B(y) = D_1 y + D_2 \quad (10.3)$$

Tabell 10.6.2: Koeffisienter for korreksjonsfaktor

Koeffisient	D_1	D_2
A	-0.0717	0.0694
B	0.3111	-0.0318

Med verdiene i Tabell 10.6.2 og forholdet b_p/l_p satt inn for variabelen y blir ligningene for A- og B-koeffisientene som gitt i ligning 10.3 og 10.4.

$$A(b_p, l_p) = -0.0717 \left(\frac{b_p}{l_p} \right) + 0.0694 \quad (10.3)$$

$$B(b_p, l_p) = 0.3111 \left(\frac{b_p}{l_p} \right) - 0.0318 \quad (10.4)$$

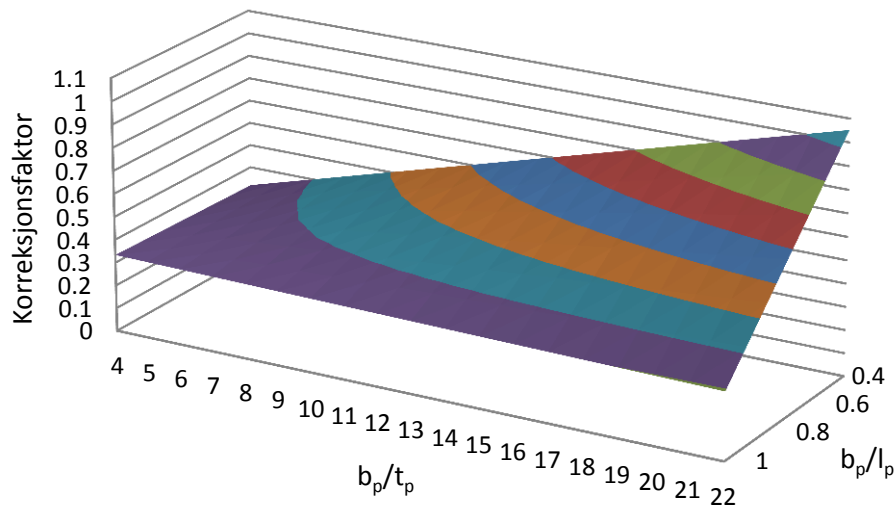
Korreksjonsfaktoren for stivhet beregnet med Eurokoden blir dermed som gitt i ligning 10.5.

$$C(b_p, l_p, t_p) = \left(-0.0717 \left(\frac{b_p}{l_p} \right) + 0.0694 \right) \left(\frac{b_p}{t_p} \right) + \left(0.3111 \left(\frac{b_p}{l_p} \right) - 0.0318 \right) \quad (10.5)$$

Korreksjonsfaktoren til Eurokoden vil legge begrensninger på gyldighetsområdet til det korrigerede formelverket. Begrensningen skyldes at korreksjonsfaktoren er utviklet på bakgrunn av geometriene i parameterstudien og vil ikke nødvendigvis være gyldig for geometrier som skiller seg mye fra disse. Hulprofilet som ble brukt i studien var HUP 80x80 med tykkelser som varierte mellom 3.6 mm og 6.3 mm. Forholdet mellom platebredden og platetykkelsen må ligge mellom 4.0 og 22.2, og forholdet mellom platebredden og platelengden må ligge mellom 0.4 og 1.0.

Selv om korreksjonsfaktoren er begrenset vil knutepunksgeometrier som har realistiske endeplatemål i forhold til dimensjonen på hulprofilet være dekket av begrensningene.

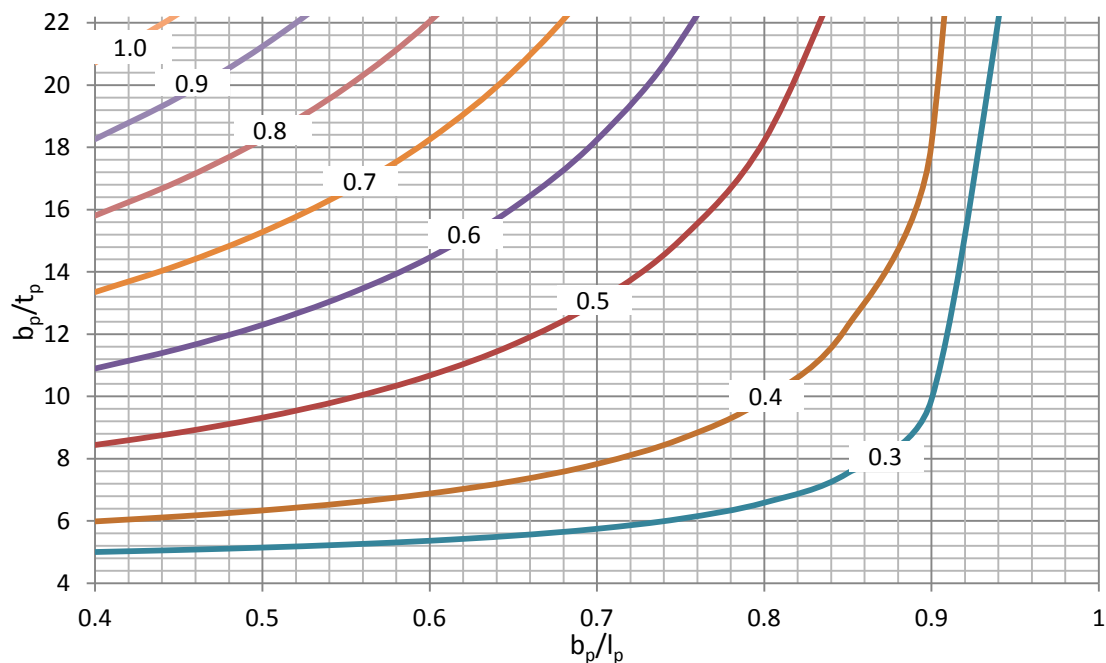
Uttrykket for korreksjonsfaktoren gir en flate i rommet. Figur 10.6.3 viser hvordan flaten gir sammenhengen mellom korreksjonsfaktoren og forholdene b_p/t_p og b_p/l_p .



Figur 10.6.3: Korreksjonsfaktor med lineær tilpassning, flate i rommet

I Figur 10.6.4 projiseres flaten i Figur 10.6.3 ned i $b_p/t_p - b_p/l_p$ -planet. Konturdiagrammet som oppstår kan brukes som en forenkling i stedet for korreksjonsfaktoren i ligning 10.5. Innen de gitte grenseverdiene for b_p/t_p og b_p/l_p kan korreksjonsfaktoren finnes ved hjelp av Figur 10.6.4.

Hver av linjene i Figur 10.6.4 representerer en korreksjonsfaktor og det er en lineær sammenheng mellom linjene.



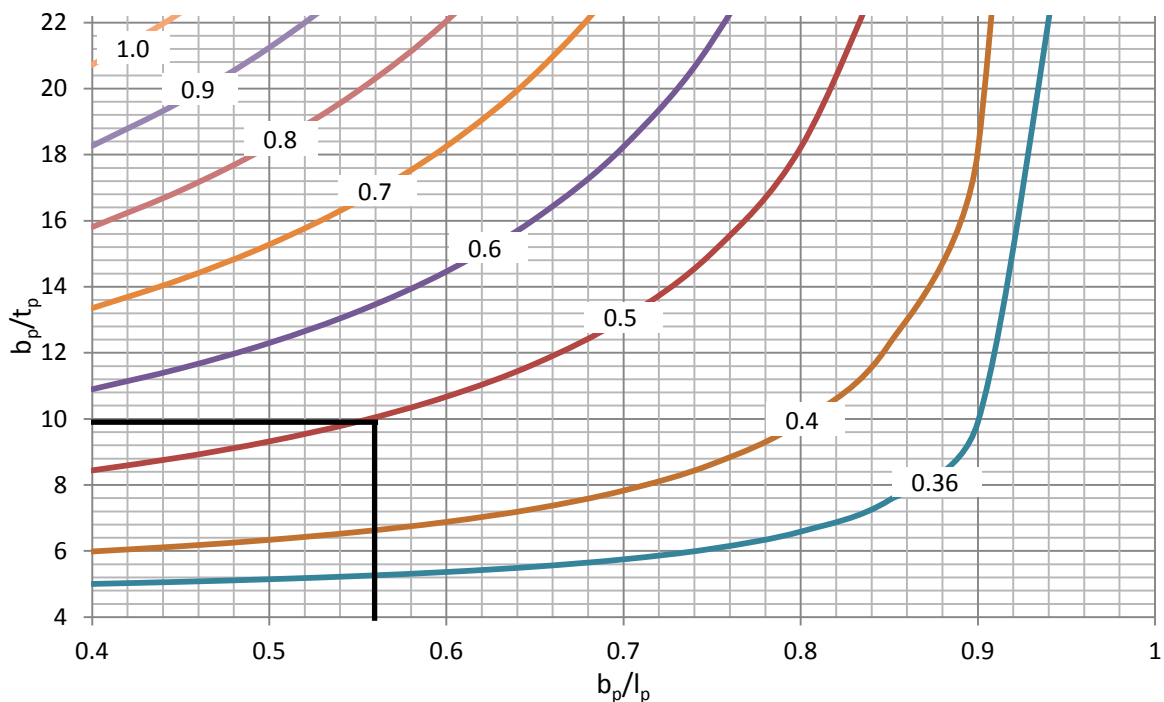
Figur 10.6.4: Korreksjonsfaktor med lineær tilpassning, projisert

10.6.2 Kontroll av konturdiagram

For å kontrollere at konturdiagrammet gir samme korreksjonsfaktor som uttrykket i ligning 10.5 gjøres det en sjekk for en knutepunktsgeometri. Knutepunktet har endeplatemål 180x100x10.2 mm. Det gir forholdene $b_p/t_p = 100/10.2 = 9.80$ og $b_p/l_p = 100/180 = 0.56$. Tykkelsen på hulprofilet er 4 mm. Korreksjonsfaktoren beregnes ved ligning 10.5 til å være:

$$C = \left(-0.0717 \left(\frac{100}{180}\right) + 0.0694\right) \left(\frac{100}{10.2}\right) + \left(0.3111 \left(\frac{100}{180}\right) + 0.0318\right) = 0.495$$

Figur 10.6.5 viser hvordan konturdiagrammet brukes for å finne en tilsvarende korreksjonsfaktor. Forholdstallene vil ikke nødvendigvis gi et punkt som treffer nøyaktig på en av konturlinjene i diagrammet. I slike tilfeller brukes lineær interpolasjon for å finne den korrekte korreksjonsfaktoren.



Figur 10.6.5: Avlesning av korreksjonsfaktor i konturdiagram

Forholdstallene gir et punkt som ligger rett under linjen 0.5. Ved bruk av lineær interpolasjon fås en korreksjonsfaktor på 0.494. Verdien som leses av vil alltid være noe usikker på grunn av unøyaktighet i avlesning. Den avleste verdien vil i dette tilfellet være 0.20 % lavere enn den beregnede verdien.

Beregningen viser at forskjellen mellom avlest og beregnet korreksjonsfaktor er liten og konturdiagrammet i Figur 10.6.4 kan brukes som en forenkling av det mer kompliserte uttrykket i ligning 10.5.

10.6.3 Sammenligning av Abaqus og Eurokode med korreksjon

For å vurdere hvor god korreksjonsfaktoren er, sammenlignes den korrigerte stivheten fra Eurokoden med stivheten fra simuleringene i Abaqus. Sammenligningen gjøres for alle geometriene som inngår i parameterstudien. Beregning av korrigerstivhet er vist i vedlegg F.2.1. I Tabell 10.6.3 vises det prosentvise avviket mellom den korrigerte stivheten og stivhet fra resultatene i Abaqus. Avviket beregnes på samme måte som i kapittel 10.5.3.

Tabell 10.6.3: Prosentvis avvik for korrigerstivhet fra Eurokoden

$b_p \times l_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	b_p/t_p	Avvik [%]			
				80x80x3.6	80x80x4	80x80x5	80x80x6.3
80x180	2	8.1	9.88	51.65	45.43	31.68	21.37
		10.2	7.84	55.89	51.58	38.38	27.79
		15	5.33	46.34	42.25	49.20	22.72
		20	4	11.53	9.50	2.22	-3.94
80x180	4	8.1	9.88	5.30	1.08	-8.88	-16.06
		10.2	7.84	22.10	16.78	5.97	-2.35
		15	5.33	43.47	38.24	27.34	16.87
		20	4	29.93	25.78	16.59	9.44
100x180	2	8.1	12.3	83.53	78.46	64.62	54.14
		10.2	9.8	89.49	84.63	70.40	57.49
		15	6.7	72.57	67.08	57.86	44.95
		20	5	23.40	20.87	16.39	8.50
100x180	4	8.1	12.3	18.05	14.48	8.02	-
		10.2	9.8	37.38	33.25	22.65	16.23
		15	6.7	58.18	54.88	46.01	34.49
		20	5	41.24	37.39	32.12	23.22
180x180	2	8.1	22.2	10.84	7.62	-1.04	-7.41
		10.2	17.6	28.16	25.00	15.83	7.14
		15	12	28.83	26.93	20.43	12.08
		20	9	-2.44	-4.26	-7.38	-12.29
180x180	4	8.1	22.2	-6.67	-9.63	-16.67	-24.95
		10.2	17.6	18.84	15.27	6.82	0.23
		15	12	42.38	35.32	29.82	21.03
		20	9	21.49	15.86	12.02	6.53
100x250	2	8.1	12.3	20.03	17.35	10.75	2.21
		10.2	9.8	22.25	19.50	12.45	6.38
		15	6.7	25.72	22.70	17.43	10.20
		20	5	7.36	5.56	2.69	-2.89
100x250	4	8.1	12.3	-12.99	-18.65	-22.04	-26.58
		10.2	9.8	-5.85	-8.23	-14.07	-19.81
		15	6.7	13.36	12.23	4.85	-2.66
		20	5	10.62	10.42	4.41	-1.73

Det totale gjennomsnittlige avviket for alle geometriene er på 20.05 %. Det største positive avviket er 89.49 % og det største negative er -26.58 %. Standardavviket er på 24.20 %.

Til sammenligning er det totale gjennomsnittlige avviket mellom Abaqus og stivhet fra Eurokoden uten korreksjon på 201.61 % for de samme geometriene. De største og minste avvikene er på henholdsvis 351.58 % og 11.42 %. Sammenligningen ga kun positive avvik og standardavviket var 80.63 %.

10.6.4 2. grads korreksjonsfaktor

Som et alternativ til den lineære korreksjonsfaktoren i delkapittel 10.6.1, utvikles det i det følgende en korreksjonsfaktor med 2. grads tilpasning. Det antas at sammenhengen mellom punktene i hver dataserie kan beskrives med et 2.grads polynom og uttrykket blir som vist i ligning 10.6.

$$C_i(x) = A_i x^2 + B_i x + C_i \quad (10.6)$$

Det antas også at sammenhengen mellom dataene for A-, B- og C-koeffisientene som inngår i korreksjonsfaktoren kan beskrives med et 2. grads polynom. Det gir koeffisienter som gitt i Tabell 10.6.4.

Tabell 10.6.4: Koeffisienter for 2. grads korreksjonsfaktor

Koeffisient	D_1	D_2	D_3
A	-0.0036	$-8 \cdot 10^{-6}$	0.0051
B	0.2931	-0.4552	0.1158
C	-0.2475	0.8367	0.0140

Korreksjonsfaktoren med 2. grads tilpasning for Eurokoden blir dermed som gitt i ligning 10.7.

$$C(b_p, l_p, t_p) = \left(-0.0036 \left(\frac{b_p}{l_p} \right)^2 - 0.000008 \left(\frac{b_p}{l_p} \right) + 0.0051 \right) \left(\frac{b_p}{t_p} \right)^2 + \left(0.2931 \left(\frac{b_p}{l_p} \right)^2 - 0.4552 \left(\frac{b_p}{l_p} \right) + 0.1158 \right) \left(\frac{b_p}{t_p} \right) + \left(-0.2575 \left(\frac{b_p}{l_p} \right)^2 + 0.8367 \left(\frac{b_p}{l_p} \right) + 0.0140 \right) \quad (10.7)$$

I vedlegg F.2.2 presenteres tabeller for avvik mellom stivhet beregnet med 2. grads korreksjonsfaktor og fra Abaqus. Det totale gjennomsnittlige avviket er på 1.20 % og standardavviket er 14.48 %. Største positive avvik er 38.86 % og det største negative avvik er -25.47 %. Sammenlignet med den lineære korreksjonsfaktoren gir denne dermed et bedre resultat.

Likevel, ettersom uttrykket for 2. grads korreksjonsfaktor gir en krum flate i rommet er det ugunstig å lage et konturdiagram for denne. Det betyr at korreksjonsfaktoren må beregnes for hvert knutepunkt, i stedet for å leses av.

Reduksjonen av det gjennomsnittlige avviket ved å bruke 2. grads korreksjonsfaktor i forhold til den lineære faktoren er på omtrent 19 %. Til sammenligning ble avviket ved å bruke den lineære faktoren i forhold til ingen korreksjonsfaktor redusert med 180 %. Den ytterlige reduksjonen i avviket ved å bruke 2. grads korreksjonsfaktor er dermed relativt liten. Samtidig er uttrykket i ligning 10.7 mer komplisert enn det lineære uttrykket i kapittel 10.6.1 som gjør beregningen mer omfattende. På grunn av det vil den videre sammenligningen utføres mellom den justerte stivhetsmodellen og Eurokoden med lineær korreksjonsfaktor.

10.7 Sammenligning av justert stivhetsmodell og korrigert Eurokode

I kapittel 10.5 ble stivhetsmodellen fra kapittel 4 justert for å redusere avviket mellom stivhet fra den opprinnelige modellen og fra simuleringresultater fra Abaqus. Deretter ble det utviklet en lineær korreksjonsfaktor for det eksisterende formelverket i Eurokoden. Tabell 10.7.1 oppsummerer de to alternative beregningsmetodene for knutepunkter med hulprofil.

Tabell 10.7.1: Alternative metoder for beregning av stivhet for forbindelser med hulprofil

Alternativ 1	
Justert stivhetsmodell	$k_b = \frac{4n(3a + 3.6m + n)}{(6am + 6an + 3m^2 + 6nm)} \frac{A_b}{L_b}$
	$k_p = \frac{2(3a + 3m + n)0.5l_{eff}t_p^3}{m^2(3m^2 + 4nm + 12am + 12an)}$
Alternativ 2	
Eurokode med korreksjon	$k_b = \frac{1.6A_s}{L_b}$
	$k_p = \frac{0.9l_{eff}t_p^3}{m^3}$
	$C(b_p, l_p, t_p) = \left(-0.0717 \left(\frac{b_p}{l_p}\right) + 0.0694\right) \left(\frac{b_p}{t_p}\right) + \left(0.3111 \left(\frac{b_p}{l_p}\right) - 0.0318\right)$

I kapittel 10.5.6 og 10.6.3 ble det funnet at det gjennomsnittlige prosentvise avviket for de to alternative metodene er henholdsvis 3.66 % og 20.05 %. De tilhørende standardavvikene er på 44.94 % og 24.20 %. Det betyr at selv om alternativ 1 gir et bedre gjennomsnitt enn alternativ 2, vil det ha en større spredning i resultatene.

Det er vanskelig å vurdere forskjellen mellom de to alternativene basert på de gitte resultatene. Derfor er det nødvendig å studere hvordan avvikene blir for ulike parametere i de to beregningsmodellene.

10.7.1 Gjennomsnittlige avvik for parametere i stivhetsmodellene

Alle geometrier fra parameterstudien er tatt med i sammenligningene. Tabell 10.7.2 viser gjennomsnittlig prosentvis avvik fordelt på hulprofiltykkelse for de to alternative metodene.

Tabell 10.7.2: Gjennomsnittlig prosentvis avvik fordelt på hulprofiltykkelse

Hulprofiltykkelse	Justert stivhetsmodell	Eurokode med korreksjon
3.6	10.23	28.50
4	7.17	24.83
5	1.34	17.40
6.3	-4.35	9.11

Tabellen viser at kun den justerte stivhetsmodellen gir både positive og negative avvik. Avviket spenner også over et mindre intervall for den justerte modellen enn for Eurokoden med korreksjon. Det tyder på at den førstnevnte gir best resultat for denne parameteren. I Tabell 10.7.3 vises det gjennomsnittlige prosentvise avviket fordelt på antall bolter for de to beregningsalternativene. Også for denne parameteren gir kun den justerte stivhetsmodellen både positive og negative avvik.

Tabell 10.7.3: Gjennomsnittlig prosentvis avvik fordelt på antall bolter

Antall bolter	Justert stivhetsmodell	Eurokode med korreksjon
2	11.32	27.28
4	-4.12	12.70

Tabell 10.7.4 viser tilsvarende gjennomsnitt for ulike platetykkelser. Igjen er det kun den justerte modellen som gir avvik fordelt om null. Avvikene for Eurokoden spenner likevel over et mindre intervall enn den justerte modellen, noe som betyr mindre spredning i resultatene.

Tabell 10.7.4: Gjennomsnittlig prosentvis avvik fordelt på platetykkelse

Platetykkelse	Justert stivhetsmodell	Eurokode med korreksjon
8.1	-40.51	12.10
10.2	-21.13	23.67
15	26.44	32.60
20	47.68	11.57

Det gjennomsnittlige prosentvise avviket fordelt på platebredden er vist i Tabell 10.7.5. De samme tendensene som beskrevet for de andre parameterne gjelder også for platebredden.

Tabell 10.7.5: Gjennomsnittlig prosentvis avvik fordelt på platebredde

Platebredde	Justert stivhetsmodell	Eurokode med korreksjon
80	2.31	22.97
100	-9.08	23.73
180	30.09	9.87

Til slutt sammenlignes det gjennomsnittlige avviket fordelt på platelengden, se Tabell 10.7.6. Den justerte stivhetsmodellen gir både positive og negative avvik mens korrigeret Eurokode gir mindre spredning i resultatene.

Tabell 10.7.6: Gjennomsnittlig prosentvis avvik fordelt på platelengde

Platelengde	Justert stivhetsmodell	Eurokode med korreksjon
180	16.01	25.50
250	-33.01	3.84

Avviket for platelengde 250 mm er større enn for platelengde 180 mm for den justerte modellen mens det motsatte gjelder for Eurokoden med korreksjon. Det samme er tilfellet for platebredden og platetykkelsen. De geometriene som gir best resultater for den justerte modellen gir dårligst resultater for Eurokoden med korreksjon. Nærmere studier av resultatene viser at for den justerte stivhetsmodellen vil geometriene med de laveste gjennomsnittene ha størst tilhørende standardavvik. For den korrigerete Eurokoden vil de laveste gjennomsnittene derimot ha de laveste standardavvikene.

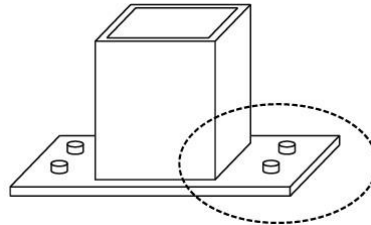
10.7.2 Geometrier med store avvik

De geometriene i parameterstudien som gir størst avvik for den justerte stivhetsmodellen er endeplate 250x100 mm med fire bolter og 180x180 mm endeplate med to bolter. Disse gir et gjennomsnittlig avvik på henholdsvis -40.48 % og 31.97 %. For Eurokoden med korreksjon gir knutepunkt med 180x100 mm endeplate med to og fire bolter størst avvik. Det gjennomsnittlige avviket er da på henholdsvis 55.90 % og 25.99 %.

De nevnte geometriene gir store avvik, men samtidig er noen av dem i grenseland hva gjelder realistiske geometriske mål. I de fleste forbindelser brukes mer enn to bolter og kvadratiske endeplater brukes i all hovedsak med bolter på alle fire sidene av hulprofilet. Likevel, begge beregningsmetodene gir store avvik for den mer vanlige geometrien endeplate 250/180x100 mm med fire bolter. I det følgende undersøkes det derfor hvorvidt stivheten fra simuleringene i Abaqus, fra den justerte stivhetsmodellen og fra Eurokoden med korreksjon gir like forhold mellom stivhetsbidragene fra bolt og plate. Dersom forholdene ikke er like vil det kunne bidra til å forklare de store avvikene.

10.7.2.1 Forhold mellom stivhetsbidrag fra plate og bolt.

Tilsvarende som i kapittel 5 ses det på den ene siden av halve skjøten. Dette er vist i Figur 10.7.1.



Figur 10.7.1: Skisse av delen av knutepunktet som studeres

Som kjent er det to bidrag til stivheten, forlengelse av boltene og bøyning av endeplaten. Disse bidragene antas å virke i serie og uttrykket for den totale stivhetskoeffisienten fra kapittel 3.5 er vist under.

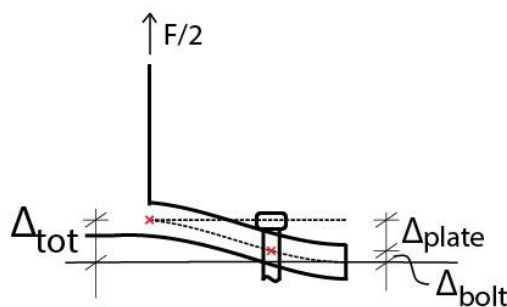
$$\frac{1}{k_{tot}} = \frac{1}{k_{plate}} + \frac{1}{k_{bolt}}$$

For å finne bidraget fra hver av de to stivhetskoeffisientene til den totale stivhetskoeffisienten beregnes forholdene vist i ligning 10.8.

$$\begin{aligned} \text{Andel bolt} = \beta_{bolt} &= \frac{1}{k_{bolt}} / \frac{1}{k_{tot}} \\ \text{Andel plate} = \beta_{plate} &= \frac{1}{k_{plate}} / \frac{1}{k_{tot}} \end{aligned} \quad (10.8)$$

For geometriene med store avvik beregnes stivhetskoeffisientene for plate og bolter med Eurokoden med korreksjonsfaktor og med den justerte stivhetsmodellen. Deretter beregnes bidraget til de to koeffisientene med uttrykkene i ligning 10.8.

I Abaqus hentes det ut forskyvning midt i platen ved boltene og midt i platen ved hulprofilet, som vist i Figur 10.7.2.



Figur 10.7.2: Avlesningspunkter for forskyvning i Abaqus

De stiplede linjene i figuren angir senterlinjen for platen før og etter deformasjon. Det er forskyvningen av senterlinjen som brukes i beregningene av stivhetskoeffisientene.

Basert på deformasjonen i de to punktene kan stivhetskoeffisienten til henholdsvis boltene og platen beregnes. Deretter beregnes hvor stor andel hver av disse koeffisientene utgjør av den totale stivhetskoeffisienten ved hjelp av ligning 10.8. Stivhetskoeffisientene for platen og boltene beregnes som vist i ligning 10.9.

$$k_{bolt} = \frac{\left(\frac{F}{2}\right)}{E\Delta_{bolt}} \text{ og } k_{plate} = \frac{\left(\frac{F}{2}\right)}{E\Delta_{plate}} \quad (10.9)$$

Δ_{bolt} er som vist i Figur 10.7.2, altså aksialdeformasjonen til halve boltelengden. Kun halve kraften skal tas med i beregningen ettersom det er stivhetskoeffisienten til én side som beregnes.

Tabell 10.7.7 viser stivhetskoeffisientene til bolt og plate beregnet med de tre nevnte metodene for geometriene med størst avvik. De totale stivhetskoeffisientene er også gitt i tabellen. Plate- og hulprofiltykkelsen til geometriene i tabellen er valgt på bakgrunn av hvilken kombinasjon av disse som ga det største avviket.

Tabell 10.7.7: Stivhetsbidrag fra bolt og plate for geometrier med store avvik

Geometri [mm]	Abaqus [mm]			Justert modell [mm]			Eurokode m/korreksjon [mm]		
	k_b	k_p	k_{tot}	k_b	k_p	k_{tot}	k_b	k_p	k_{tot}
180x100x10.2 t_{HUP} 3.6 2 bolter	7.872	0.581	0.541	4.444	0.665	0.578	3.281	1.431	0.996
180x100x10.2 t_{HUP} 3.6 4 bolter	19.657	1.100	1.041	8.888	0.665	0.619	6.562	1.431	1.175
180x180x20 t_{HUP} 3.6 2 bolter	6.935	2.089	1.606	2.929	6.3607	2.005	1.407	8.898	1.215
250x100x8.1 t_{HUP} 6.3 4 bolter	52.493	0.342	0.340	12.173	0.088	0.087	9.824	0.238	0.232

Bidraget fra endeplaten og boltene til den totale stivhetskoeffisienten beregnes deretter for geometriene. Tabell 10.7.8 viser den beregnede andelen fra endeplaten og boltene for de tre ulike metodene.

Tabell 10.7.8: Bidrag fra endeplate og bolter til total stivhetskoeffisient

Geometri [mm]	Abaqus		Justert modell		Eurokode m/korreksjon	
	β_{bolt}	β_{plate}	β_{bolt}	β_{plate}	β_{bolt}	β_{plate}
180x100x10.2 t_{HUP} 3.6 2 bolter	0.07	0.93	0.13	0.87	0.30	0.70
180x100x10.2 t_{HUP} 3.6 4 bolter	0.05	0.95	0.07	0.93	0.18	0.82
180x180x20 t_{HUP} 3.6 2 bolter	0.23	0.77	0.68	0.32	0.86	0.14
250x100x8.1 t_{HUP} 6.3 4 bolter	0.01	0.99	0.01	0.99	0.02	0.98

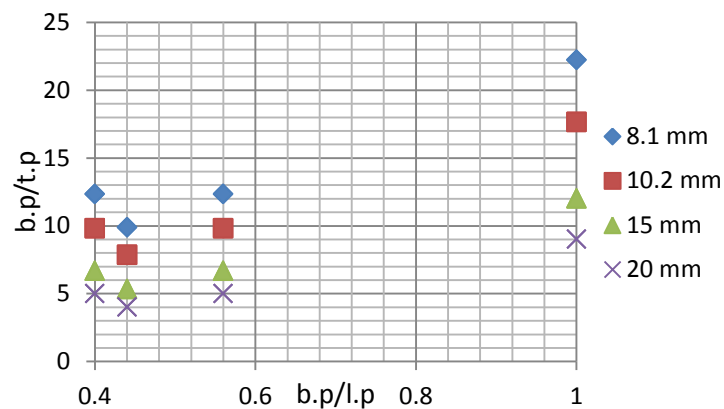
For geometriene med 180x100 mm endeplate og to og fire bolter viser tabellen at forholdene mellom bidraget fra boltene og endeplaten er forholdsvis like for de tre beregningsmetodene. Bøyning av endeplaten har som ventet mest å si for den totale stivhetskoeffisienten. Det samme gjelder for tilfellet med endeplatemål 250x100 mm.

For tilfellet med den kvadratiske endeplaten gir simuleringen i Abaqus et annet forhold mellom bidragene fra endeplaten og boltene enn de to andre beregningsmetodene. Simuleringen i Abaqus resulterer i at endeplaten gir et større bidrag til stivhetskoeffisienten enn boltene. For Eurokoden med korreksjon og den justerte stivhetsmodellen er det motsatt. Det kan bidra til å forklare det store avviket for denne geometrien i parameterstudien.

Ettersom den kvadratiske endeplaten med to bolter får stor deformasjon i tverretning er det vanskelig å finne gode avlesningspunkter for deformasjonen til endeplaten og boltene i Abaqus. Eksempelvis ble deformasjonen til endeplaten lest av under sveisen, og ikke i midten av endeplaten. Det kan gjør at forholdet mellom bidraget fra endeplaten og boltene i Tabell 10.7.8 er noe usikkert. Det legges derfor ikke stor vekt på avviket fra denne geometrien i vurderingen av beregningsmetodene.

10.7.3 Grunnlag for korreksjonsfaktor

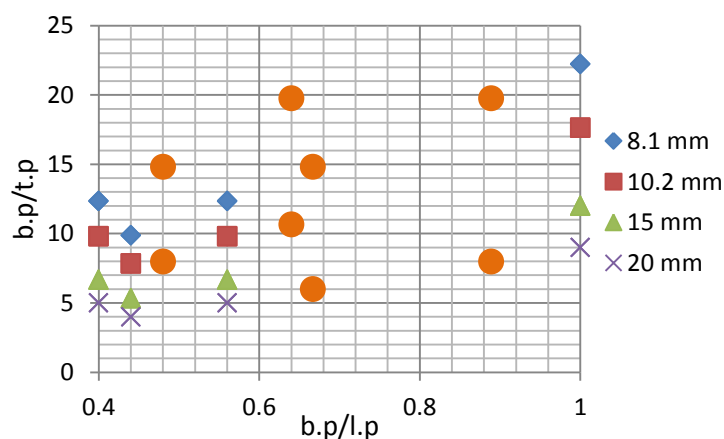
Det er ønskelig å få en indikasjon på hvor godt grunnlaget for utviklingen av korreksjonsfaktoren for Eurokoden er for å kunne vurdere de to beregningsmetodene. I Figur 10.7.3 er geometriene som inngår i parameterstudiet plottet. Aksene er de samme som i konturdiagrammene i delkapittel 10.6. For hvert punkt i figuren er det gjennomført åtte simuleringer med ulik hulprofiltykkelse og med to og fire bolter. Det betyr at for kombinasjonene av b_p/l_p og b_p/t_p som punktene dekker, er grunnlaget godt. For geometriene med kvadratiske endeplater (b_p/l_p lik 1) er punktene bedre spredt langs b_p/t_p -aksen enn for geometriene med rektangulære plater. Området mellom 0.6 og 1.0 på b_p/l_p -aksen er også dårlig dekket. Det betyr at det ikke er sikkert at korreksjonsfaktorene treffer godt for geometrier som ligger i de nevnte områdene.



Figur 10.7.3: Geometrier brukt til utledning av korreksjonsfaktorer

10.7.4 Ytterligere geometrier

Det er ønskelig å vurdere stivhetsmodellene for geometrier som ikke inngår i parameterstudien. De runde markørene i Figur 10.7.4 viser plasseringen av de ytterligere geometriene som studeres.



Figur 10.7.4: Ytterligere geometrier i forhold til opprinnelige geometrier

For hver runde markør er det gjort to forsøk, et med to bolter og et med fire. Alle forsøkene ble gjort med hulprofiltykkelse lik 4 mm.

I Tabell 10.7.9 vises resultatene for de ytterligere geometriene. Stivhet er beregnet for alle geometriene med justert stivhetsmodell (K_{el^*}) og Eurokode med korreksjonsfaktor ($K_{EK,korr}$). Avviket mellom disse og resultatene fra numeriske simuleringer i Abaqus vises i tabellen.

Tabell 10.7.9: Avvik for ytterligere geometrier

$b_p \times l_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{aba} [kN/mm]	K_{el^*} [kN/mm]	Avvik [%]	$K_{EK,korr}$ [kN/mm]	Avvik [%]
120 x 180	2	8.1	82.68	77.7	-6.02	110.58	33.75
		20	244.11	413.67	69.46	187.67	-23.12
	4	8.1	143.85	80.69	-43.91	122.12	-15.11
		20	370.8	623.23	68.08	328.32	-11.46
160 x 180	2	8.1	83.79	101.11	20.67	111.63	33.22
		20	260.02	450.55	73.28	195.88	-24.67
	4	8.1	146.55	106.22	-27.52	126.63	-13.59
		20	401.87	701.92	74.66	352.49	-12.29
120 x 250	2	8.1	43.27	21.79	-49.64	66.29	53.21
		15	123.98	121.89	-1.69	132.19	6.62
	4	8.1	61.91	21.98	-64.50	68.17	10.11
		15	169.77	130.66	-23.04	159.45	-6.08
160 x 250	2	8.1	43.16	28.89	-33.06	85.58	98.28
		15	130.91	155.53	18.81	120.10	-8.25
	4	8.1	68.25	29.22	-57.19	88.76	30.06
		15	183.93	170.12	-7.51	151.01	-17.90

For stivhet beregnet med justert stivhetsmodell ble det gjennomsnittlige avviket for de ytterligere geometriene 0.68 % med standardavvik lik 48.63 %. For stivhet beregnet med Eurokode med korreksjonsfaktor ble det gjennomsnittlige avviket lik 8.30 % og standardavviket 33.61 %.

Studien av ytterligere geometrier underbygger tendensen i sammenligningen av de to alternative beregningsmetodene i delkapittel 10.7.1. Den justerte stivhetsmodellen gir gjennomsnittlig avvik nærmest null, men med spredning i resultatene. Eurokoden med korreksjonsfaktor gir mindre spredning i resultatene, men et noe dårligere gjennomsnittlig avvik.

Kapittel 11

Endeplate i høyfaststål

11.1 Innledning

I dette kapitlet ses det nærmere på virkningen av å benytte endeplate i høyfast stål for knutepunkters stivhet.

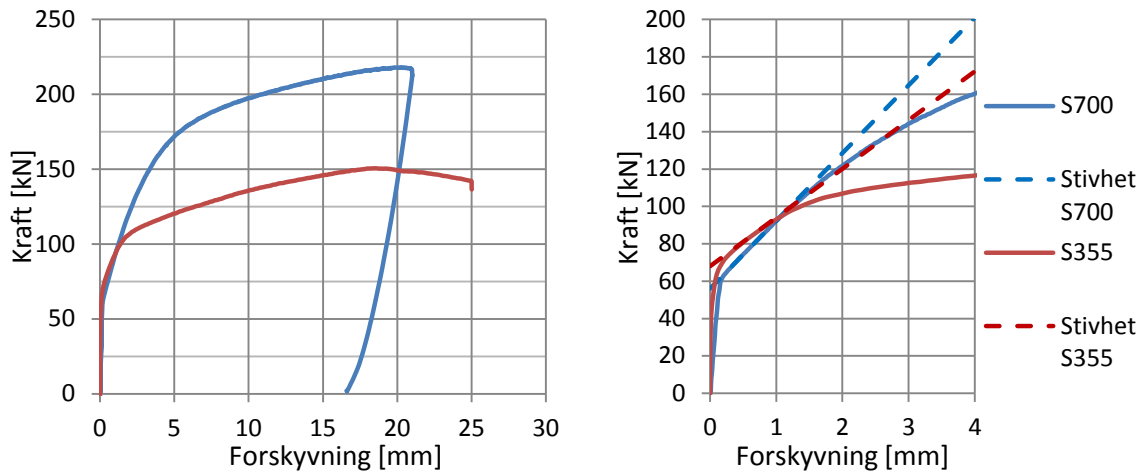
11.2 Regler i Eurokoden

I NS-EN 1993-1-1 (CEN, 2008a) settes det begrensninger til materialegenskapene til stålet for at formelverket skal være gjeldende. Den sier at NS-EN 1993 kun gjelder for stålqualiteter mellom S235 og S460 for ståltykkelser under 40 mm. Stål med høyere kvalitet (S460-700) dekkes ikke direkte av regelverket. Likevel, NS-EN 1993-1-12 *Konstruksjoner med høyfast stål* gir tilleggsregler til de øvrige delene av Eurokode 3. Det betyr at konstruksjoner må oppfylle tilleggskravene for at de andre delene av Eurokode 3 skal være gjeldende. For knutepunktstandarden skal det ifølge NS-EN 1993-1-12 kun gjennomføres en elastisk global analyse for knutepunkter utført i høyfast stål (CEN, 2007). Det betyr at knutepunktet skal klassifiseres etter stivhet.

11.3 Sammenligning av knutepunkt med endeplater med ulik stivhet

Stivheten til knutepunkt med endeplate i høyfast stål sammenlignes med knutepunkt utført i vanlig konstruksjonsstål. Det gjøres ved å sammenligne prøve D fra laboratorieforsøket med et tilsvarende forsøk utført i høyfast stål. Forsøket med høyfast stål ble utført i sammenheng med studentarbeidet til Kristian Lauknes (Lauknes, 2013). Det ble i begge forsøkene brukt fire M16 bolter, hulprofil 80x80x4 mm og endeplate 250x100x8 mm. Endeplaten i forsøket til Lauknes ble utført i materialet Weldox 700, og Lauknes oppgir flytespenningen til å være 789 MPa for denne. Til sammenligning ble flytespenningen i lengderetning for 8 mm endeplate utført i vanlig konstruksjonsstål funnet til å være 461 MPa i kapittel 5.

I Figur 11.3.1 vises kraft-forskyvningskurver for de to forsøkene. Boltene ble forspent med 100 Nm i begge forsøkene.



Figur 11.3.1: Kraft-forskyvningskurver for endeplate med stål kvalitet S355 og S700

Figuren viser en knekk i kurvene til begge forsøkene ved om lag 60 kN. Det betyr at boltene ble avlastet ved samme kraft, noe som bekrefter at de var forspent med omtrent samme moment.

Stivheten til knutepunktet med endeplate i høyfast stål blir funnet til å være 36.26 kN/mm. Til sammenligning ble stivheten til prøve D i kapittel 5 funnet til å være 26.06 kN/mm. Det betyr at knutepunktet med endeplate i høyfast stål har en initiell stivhet som er nesten 40 % større enn knutepunktet med stål kvalitet S355.

Det er to bidrag til stivheten til knutepunktet, bolter i strekk og endeplate i bøyning. Ettersom det ble brukt like bolter i forsøkene vil bidraget til stivheten fra disse være den samme i begge forsøkene. Det betyr at den økte stivheten skyldes endringen i materialegenskapene til endeplaten.

Kapittel 13

Konklusjon

Målet med oppgaven var å vurdere hvor godt Karlsens stivhetsmodell estimerer stivheten til boltede strekkskjøter med kvadratiske hulprofil. Sammenligning av beregningsmodellen og stivheter funnet i laboratorieforsøk og numeriske simuleringer viste at Karlsens modell overestimerer stivheten. Gjennom en parameterstudie med 128 ulike knutepunksgeometrier ble den opprinnelige stivhetsmodellen justert ved å endre parameterne α og $l_{eff,ini}$. Parameteren α ble tidlig vurdert til å ha liten betydning for stivheten og ble derfor satt lik 1.0. $l_{eff,ini}$ ble gjennom parameterstudien funnet til å være $0.5l_{eff}$. Stivhetskoeffisientene i den justerte beregningsmodellen ble dermed som vist under.

$$k_p = \frac{2(3a + 3m + n)0.5l_{eff}t_p^3}{m^2(3m^2 + 4nm + 12am + 12an)} \quad k_b = \frac{4n(3a + 3m + n)}{(6am + 6an + 3m^2 + 6nm)} \frac{A_s}{L_b}$$

Sammenligning av stivhet fra simuleringer i Abaqus og beregninger med den justerte stivhetsmodellen for geometriene i parameterstudien viste at stivhetsmodellen ga et gjennomsnittlig avvik på 3.66 % med tilhørende standardavvik på 44.94 %. Til sammenligning ga Karlsens opprinnelige stivhetsmodell et gjennomsnittlig avvik på 49.94 % for de samme geometriene, og standardavviket var 50.53 %. Den justerte modellen gir dermed både en forbedring av gjennomsnittlig avvik og mindre spredning i resultatene i forhold til Karlsens opprinnelige stivhetsmodell.

Videre ble det utviklet en lineær korreksjonsfaktor for Eurokoden for å vurdere om beregningsreglene som gjelder for H- og I-profil, også kan brukes for hulprofil. Korreksjonsfaktoren ble som vist under.

$$C(b_p, l_p, t_p) = \left(-0.0717 \left(\frac{b_p}{l_p}\right) + 0.0694\right) \left(\frac{b_p}{t_p}\right) + \left(0.3111 \left(\frac{b_p}{l_p}\right) - 0.0318\right)$$

Stivhet beregnet med korrigert Eurokode og fra numeriske simuleringer ble sammenlignet for alle knutepunksgeometriene i parameterstudien. Sammenligningen ga et gjennomsnittlig avvik på 20.05 % og standardavvik 24.20 %.

Sammenligningen mellom den justerte stivhetsmodellen og Eurokoden med korreksjonsfaktor viste at den justerte modellen ga lavere gjennomsnittlig avvik. Samtidig ga Eurokoden med korreksjon mindre spredning i avvikene. Det kreves store korreksjoner for

de fleste knutepunksgeometriene for at Eurokoden skal gi et godt estimat av stivheten. Det tyder derfor på at den justerte modellen som inkluderer endeplaten innenfor hulprofilet estimerer stivheten til strekkskjøter med hulprofil best.

I laboratorieforskene ble betydningen av forspente bolter studert. Forsøk med og uten forspenning i boltene ga svært ulike stigningstall i begynnelsen av kraft-forskyvningskurvene. Stigningstallet ble betraktelig høyere for forsøkene med forspenning enn uten. Det betyr at stivheten til knutepunkt med forspente bolter bør beregnes etter at forspenning er avlastet.

Videreføring av oppgaven

I videre arbeid bør den justerte stivhetsmodellen vurderes for andre knutepunksgeometrier enn de som inngår i parameterstudien i denne oppgaven. I den sammenhengen bør det også utføres laboratorieforsk for de aktuelle geometriene.

Bolteplasseringen ble holdt konstant i parameterstudien i denne oppgaven for å redusere antall varierte parametere. Det kan derfor være av interesse å studere hvordan plassering av boltene påvirker stivheten.

Det ble kun sett på virkningen av forspenning i numeriske simuleringer for én prøve. Dette gir et for lite grunnlag for å vurdere den generelle betydningen av forspenning i simuleringene. I en videreføring av oppgaven vil derfor være naturlig å gjennomføre flere simuleringer der forspenningen er inkludert.

Kapittel 13

Indekser

A_S	Boltens spenningsareal
a_{rot}	Sveisens rotmål (a-mål)
a	Avstanden fra midt i hulprofilet til punktet der den ytre kraften virker
b_p	Endeplatens bredde
E	Elastisitetsmodul
e	Avstand senter bolt til ytterkant av endeplate, retning endeplatens bredde
e_x	Avstand senter bolt til ytterkant av endeplate, retning endeplatens lengde
F_b	Boltekraft
$F_{Rd,el}$	Elastisk kapasitet for et T-stykke
$F_{Rd,pl}$	Plastisk kapasitet for et T-stykke
$F_{T,1,Rd}$	Dimensjonerende kapasitet for bruddform 1 i et T-stykke påkjent strekk
$F_{T,2,Rd}$	Dimensjonerende kapasitet for bruddform 2 i et T-stykke påkjent strekk
$F_{T,3,Rd}$	Dimensjonerende kapasitet for bruddform 3 i et T-stykke påkjent strekk
f_u	Bruddspenning
f_y	Flytespenning
I	2. arealmoment
K	Elastisk stivhet for knutepunkt
K_{aba}	Elastisk stivhet beregnet fra Abaqus
K_{EK}	Elastisk stivhet beregnet med Eurokode
K_{el}	Elastisk stivhet beregnet med Karlsens stivhetsmodell
K_{lab}	Elastisk stivhet funnet i laboratorieforsøk

K_{tot}	Total elastisk stivhet for knutepunktet
k	Stivhetskoeffisient
k_5	Stivhetskoeffisient for plate i henhold til knutepunktstandarden
k_{10}	Stivhetskoeffisient for bolt i henhold til knutepunktstandarden
k_p	Stivhetskoeffisient for plate
k_b	Stivhetskoeffisient for bolt
L_b	Boltens tøyningsslengde
l_{eff}	Effektivlengde til flytelinje
$l_{eff,1}$	Effektivlengde til flytelinje for bruddform 1
$l_{eff,2}$	Effektivlengde til flytelinje for bruddform 2
$l_{eff,cp}$	Effektivlengde til flytelinje for sirkulært mønster
$l_{eff,nc}$	Effektivlengde til flytelinje for ikke sirkulært mønster
$l_{eff,ini}$	Initiell effektiv lengde
Σl_{eff}	Sum av effektivlengder i basiskomponent
$M_{b,pI,Rd}$	Dimensjonerende plastisk momentkapasitet i en bjelke
$M_{c,pI,Rd}$	Dimensjonerende plastisk momentkapasitet i en søyle
M_j	Moment i knutepunkt
$M_{j,Rd}$	Dimensjonerende moment i knutepunkt
M_{maks}	Maksimalt moment (plastisk)
$M_{pI,1,Rd}$	Dimensjonerende plastisk momentkapasitet i T-stykke for bruddform 1
$M_{pI,2,Rd}$	Dimensjonerende plastisk momentkapasitet i T-stykke for bruddform 2
$M_i(x)$	Momentforløp
$\tilde{M}(x)$	Virtuelt momentforløp
m	Avstand fra steg til senter bolt fratrukket $0.8\sqrt{2}a$, retning endeplatens bredde
m_x	Avstand fra steg til senter bolt fratrukket $0.8\sqrt{2}a$, retning endeplatens lengde
n	Tilsvarende e_x men $\leq 1.25m$
p	Senter avstand mellom indre bolter

Q	Hevarkraft
$S_{j,ini}$	Initiell rotasjonsstivhet
t_{HUP}	Tykkelse hulprofilvegg
t_p	Tykkelse endeplate
w	Senter avstand mellom ytre bolter
W_{el}	Elastisk motstandsmoment
W_{pl}	Plastisk motstandsmoment
α	Korreksjonsfaktor i uttrykk for stivhet
Δ_i	Forskyvning
$\tilde{\Delta}_i$	Virtuell forskyvning
ε	Tøyning
ε^e	Elastisk tøyning
ε_{true}	Sann tøyning
ε_{true}^{pl}	Sann plastisk tøyning
σ	Spenning
σ_{true}	Sann spenning

Referanser

CEN. (2005) *Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner – Del 1-8: Knutepunkter og forbindelser*. Standard Norge.

CEN. (2008a) *Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner – Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger*. Standard Norge.

CEN. (2008b) *Utførelse av stålkonstruksjoner – Del 2: Tekniske krav til stålkonstruksjoner*. Standard Norge.

CEN. (2009) *Eurokode 3: Prosjektering av stålkonstruksjoner – Del 1-12: Konstruksjoner med høyfast stål*. Standard Norge.

Cook, R. D., Malkus, D. S., Plesha, M. E. and Witt, R. J (2002) *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. 4.th edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Ersland, H. (2011) *Endeplateskjøt for hulprofiler*. Masteroppgave, NTNU, Trondheim.

Ostad, A. og Grinstad, M. K. (2012) *Stivhet til endeplateforbindelser i hulprofil*. Masteroppgave, NTNU, Trondheim.

Irgens, F. (2006) *Fasthetslære*. 7. utgave. Trondheim: Tapir Akademiske Forlag.

Karlsen, F. T. (2011) *Knutepunkter for staver med hulprofiltverrsnitt*. Masteroppgave. NTNU, Trondheim.

Larsen, P. K. (2010) *Dimensjonering av stålkonstruksjoner*. 2. utgave. Trondheim: Tapir Akademiske forlag.

Larsen P. K., Clausen, A. H. og Aalberg, A. (2003) *Stålkonstruksjoner, profiler og formler*. 3. utgave. Trondheim: Tapir Akademiske forlag.

Lauknes, K. (2013) *Beregning av endeplateforbindelser i høyfast stål*. Masteroppgave, NTNU, Trondheim.

Office (2010a) *STDAVVIKA – funksjon*. Tilgjengelig fra: <http://office.microsoft.com/nb-no/excel-help/stdavvika-funksjon-HP010342922.aspx> (Hentet: 12. mai 2013)

Office (2010b) *Legge til, endre eller fjerne trendlinjer i et diagram*. Tilgjengelig fra: <http://office.microsoft.com/nb-no/excel-help/legge-til-endre-eller-fjerne-trendlinjer-i-et-diagram-HP010007461.aspx?CTT=1> (Hentet: 12. mai 2013)

Simulia, Dessault Systèmes Simulia Corp. (2011) *Abaqus 6.11 Online Documentation*.

Tilgjengelig fra: <http://abaqus.ethz.ch:2080/v6.11/books/usi/default.htm> (Hentet: 2. februar 2013)

Store Norske Leksikon, SNL (2011a) *Gjennomsnitt*. Tilgjengelig fra:

<http://snl.no/gjennomsnitt/matematikk> (Hentet: 12. mai 2013)

Store Norske Leksikon, SNL (2011b) *Minste kvadraters metode*. Tilgjengelig fra:

http://snl.no/minste_kvadraters_metode (Hentet: 13. mai 2013)

Waynand, K., Jaspart, J-P. & Steenhuis, M. (1995) *The Stiffness Model Of revised Annex J of Eurocode 3. Proceedings of the Third International Workshop on Connections in Steel Structures, 441-452*.

Bibliografi

Dalen, E. og Wåsjør, K. (2010) *Søylefotpunkter*. Masteroppgave, NTNU, Trondheim.

Kolstrøm, A. Ø. og Lervik, A. (2009) *Kapasitet og stivhet til bjelke/søyleknutepunkter*. Masteroppgave, NTNU, Trondheim.

Thrane, E. J. (1975) *Plasskrav – skrueforbindelser, Atlas for stålkonstruksjoner*. Trondheim: Tapir Akademiske Forlag

Wang, Y. Q., Zong, L., and Shi, Y. J. (2013) 'Bending behaviour and design model of bolted flange-plate connection.', *Journal of Constructional Research*, 84, s. 1-16.

Vedlegg

Vedlegg A

Beregningsregler fra Eurokoden

A.1 Hevarkraft

Beregning av de vertikale forskyvningene på grunn av ytre last (Δ_0) og enhetslast ($\tilde{\Delta}$) som brukes i utledning av hevarkraften i et ekvivalent T-stykke i delkapittel 3.3 er vist nedenfor.

$$\begin{aligned}\Delta_0 &= \int_0^{1.25m} 0.5Fx(-x) \frac{1}{EI} dx + \int_{1.25m}^{2.25m} 0.5Fx(-1.25m) \frac{1}{EI} dx \\ \Delta_0 &= \int_0^{1.25m} -0.5Fx^2 \frac{1}{EI} dx + \int_{1.25m}^{2.25m} -\frac{5}{8}Fmx \frac{1}{EI} dx \\ \Delta_0 &= \frac{1}{EI} \left\{ \left[-\frac{1}{6}Fx^3 \right]_0^{1.25m} + \left[-\frac{5}{16}Fmx^2 \right]_{1.25m}^{2.25m} \right\} \\ \Delta_0 &= \frac{1}{EI} \left\{ \left(-\frac{1}{6} 1.25^3 Fm^3 \right) + \left(\left(-\frac{5}{16} 2.25^2 Fm^3 \right) - \left(-\frac{5}{16} 1.25^2 Fm^3 \right) \right) \right\} = -\frac{545 Fm^3}{384 EI}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\tilde{\Delta} &= \int_0^{1.25m} (-x)(-x) \frac{1}{EI} dx + \int_{1.25m}^{2.25m} (-1.25m)(-1.25m) \frac{1}{EI} dx = \\ \tilde{\Delta} &= \int_0^{1.25m} x^2 \frac{1}{EI} dx + \int_{1.25m}^{2.25m} (-1.25m)^2 \frac{1}{EI} dx \\ \tilde{\Delta} &= \frac{1}{EI} \left\{ \left[\frac{1}{3}x^3 \right]_0^{1.25m} + \left[\frac{25}{16}m^2x \right]_{1.25m}^{2.25m} \right\} \\ \tilde{\Delta} &= \frac{1}{EI} \left\{ \left(\frac{1}{3} 1.25^3 m^3 \right) + \left(\left(\frac{25}{16} 2.25m^3 \right) - \left(\frac{25}{16} 1.25m^3 \right) \right) \right\} = \frac{425 m^3}{192 EI}\end{aligned}$$

A.2 Platestivhetskoeffisient

Beregning av den vertikale forskyvningen som brukes i utledningen av platestivhetskoeffisienten gitt i Eurokoden er vist nedenfor

$$\Delta = \int_0^{1.25} -0.14Fx \cdot (-0.28x) \cdot \frac{1}{EI} dx + \int_{1.25}^{2.25} (-0.8Fm + 0.5Fx)(-1.6m + x) \cdot \frac{1}{EI} dx$$

$$\Delta = \int_0^{1.25} \frac{49}{1250} x^2 \cdot \frac{F}{EI} dx + \int_{1.25}^{2.25} \left(\frac{32}{25} m^2 - \frac{8}{5} mx + \frac{1}{2} x^2 \right) \cdot \frac{F}{EI} dx$$

$$\Delta = \int_0^{1.25} \frac{49}{1250} x^2 \cdot \frac{F}{EI} dx + \int_{1.25}^{2.25} \left(\frac{32}{25} m^2 - \frac{8}{5} mx + \frac{1}{2} x^2 \right) \cdot \frac{F}{EI} dx$$

$$\Delta = \left[\frac{49}{3750} x^3 \cdot \frac{F}{EI} \right]_0^{1.25} + \left[\left(\frac{32}{25} m^2 x - \frac{4}{5} mx^2 + \frac{1}{6} x^3 \right) \frac{F}{EI} \right]_{1.25}^{2.25}$$

$$\Delta = \frac{49}{3750} 1.25^3 \cdot \frac{Fm^3}{EI} + \frac{32}{25} \cdot \frac{Fm^3}{EI} - \frac{4}{5} (2.25^2 - 1.25^2) \cdot \frac{Fm^3}{EI} + \frac{1}{6} (2.25^3 - 1.25^3) \cdot \frac{Fm^3}{EI}$$

$$\Delta = \frac{251}{3200} \cdot \frac{Fm^3}{EI}$$

Vedlegg B

Stivhetsmodell

B.1 Beregning med Maple

B.1.1 Utregning av plate- og boltestivhetskoeffisient

$$X1 := \text{simplify} \left(\frac{F \cdot \left(\frac{(m+n) \cdot a}{2\alpha} + \frac{m^2 + 2 \cdot n \cdot m}{4} + \frac{n^2}{6} \right)}{n \cdot \left(\frac{a}{\alpha} + m + \frac{n}{3} \right)} \right)$$

$$\frac{1}{4} \frac{F(6am + 6an + 3m^2\alpha + 6mn\alpha + 2n^2\alpha)}{n(3a + 3m\alpha + n\alpha)}$$

$$X2 := \text{simplify} \left(-\frac{F}{2} + X1 \right)$$

$$\frac{3}{4} \frac{Fm(2a + m\alpha)}{n(3a + 3m\alpha + n\alpha)}$$

$$MA := \text{simplify} \left(X1 \cdot (a + m) - \frac{F \cdot a}{2} - X2 \cdot (a + m + n) \right)$$

$$\frac{1}{4} \frac{Fm\alpha(3m + 2n)}{3a + 3m\alpha + n\alpha}$$

$$MA_{\text{virtuell}} := \text{simplify} \left(\frac{2 \cdot X1}{F} \cdot (a + m) - a - \frac{2 \cdot X2}{F} \cdot (a + m + n) \right)$$

$$\frac{1}{2} \frac{m\alpha(3m + 2n)}{3a + 3m\alpha + n\alpha}$$

$$L1 := \text{simplify} \left(\left(\frac{MA}{MA + X2 \cdot n} \right) \cdot m \right)$$

$$\frac{1}{2} \frac{m\alpha(3m + 2n)}{3a + 3m\alpha + n\alpha}$$

$$L2 := \text{simplify}(m - L1)$$

$$\frac{3}{2} \frac{m(2a + m\alpha)}{3a + 3m\alpha + n\alpha}$$

$$\Delta := \text{simplify} \left(\frac{1}{(E \cdot I_{plate})} \cdot \left(\frac{MA \cdot MA_{virtuell} \cdot a}{\alpha} + \frac{X2 \cdot n \cdot 2 \cdot X2 \cdot n}{3 \cdot F} \cdot L2 \right) + \frac{1}{3} \cdot MA \cdot MA_{virtuell} \cdot L1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{X2 \cdot n \cdot 2 \cdot X2 \cdot n}{F} \cdot n \right)$$

$$\frac{1}{24} \frac{m^2 F (12 a m + 12 a n + 4 m n \alpha + 3 m^2 \alpha)}{I_{plate} (3 a + 3 m \alpha + n \alpha) E}$$

$$I_{plate} := \frac{1}{12} \cdot I_{effini} \cdot t^3$$

$$\frac{1}{12} I_{effini} t^3$$

$$\Delta := \text{simplify} \left(\frac{1}{(E \cdot I_{plate})} \cdot \left(\frac{MA \cdot MA_{virtuell} \cdot a}{\alpha} + \frac{X2 \cdot n \cdot 2 \cdot X2 \cdot n}{3 \cdot F} \cdot L2 \right) + \frac{1}{3} \cdot MA \cdot MA_{virtuell} \cdot L1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{X2 \cdot n \cdot 2 \cdot X2 \cdot n}{F} \cdot n \right)$$

$$\frac{1}{2} \frac{m^2 F (12 a m + 12 a n + 4 m n \alpha + 3 m^2 \alpha)}{I_{effini} t^3 (3 a + 3 m \alpha + n \alpha) E}$$

$$k_p := \frac{F}{E \cdot \Delta}$$

$$\frac{2 I_{effini} t^3 (3 a + 3 m \alpha + n \alpha)}{m^2 (12 a m + 12 a n + 4 m n \alpha + 3 m^2 \alpha)}$$

$$k_b := \frac{1}{\frac{X1}{F}} \cdot \frac{A_{bolt}}{L_{bolt}}$$

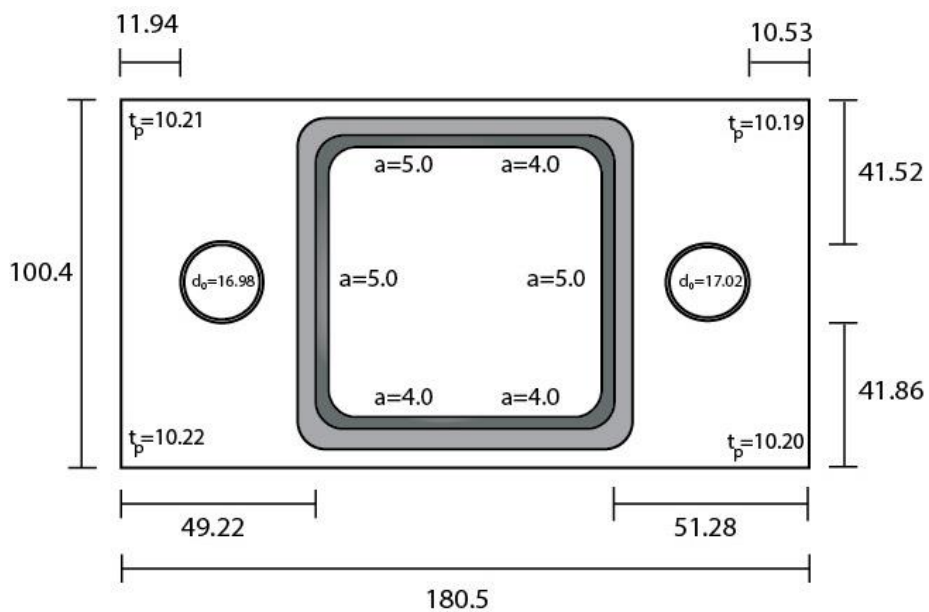
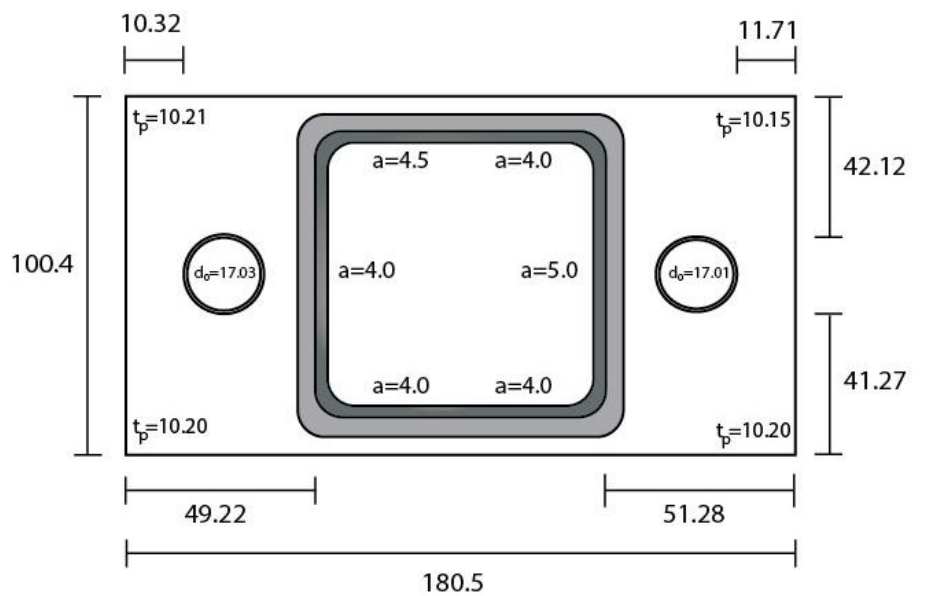
$$\frac{4 n (3 a + 3 m \alpha + n \alpha) A_{bolt}}{(6 a m + 6 a n + 3 m^2 \alpha + 6 m n \alpha + 2 n^2 \alpha) L_{bolt}}$$

Vedlegg C

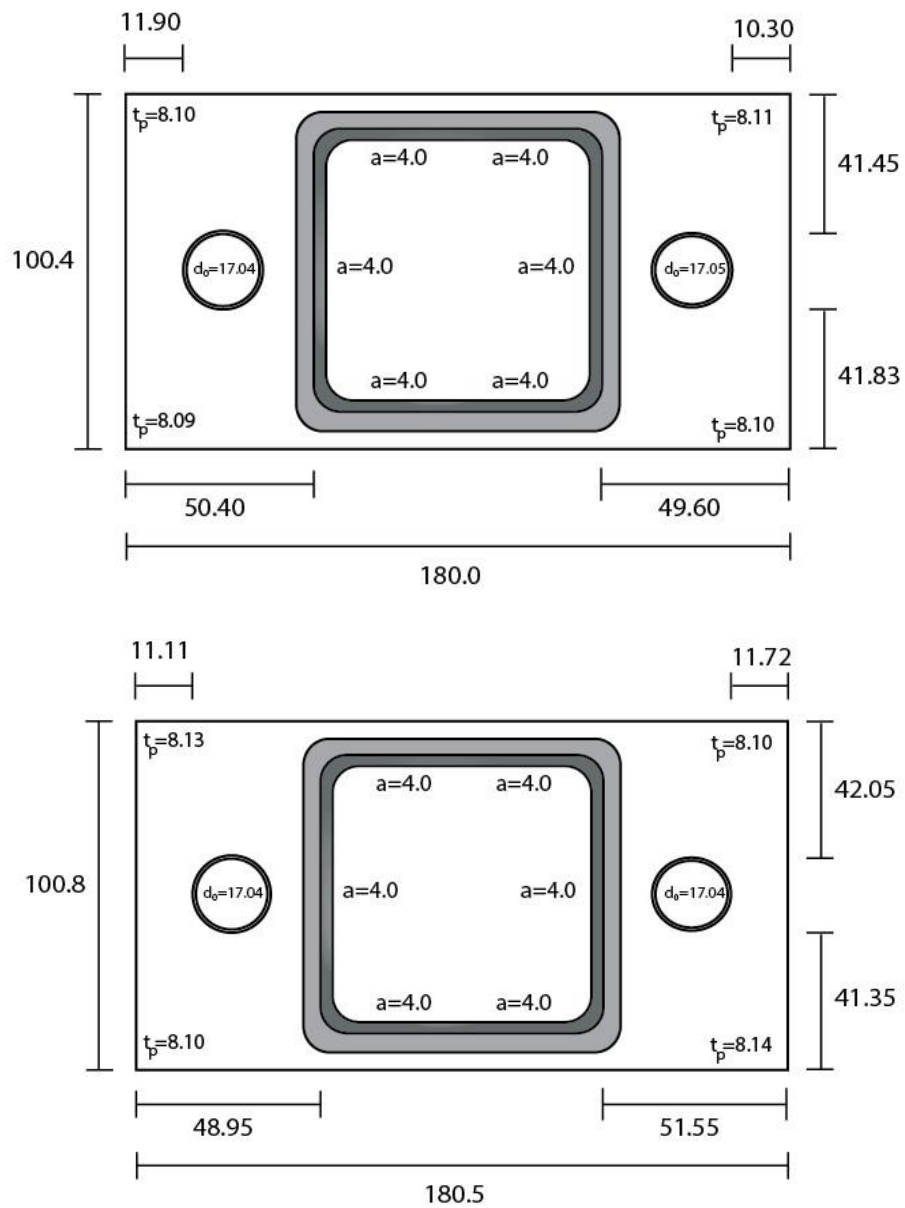
Laboratoriet

C.1 Nøyaktig geometri for endeplateforbindelsene

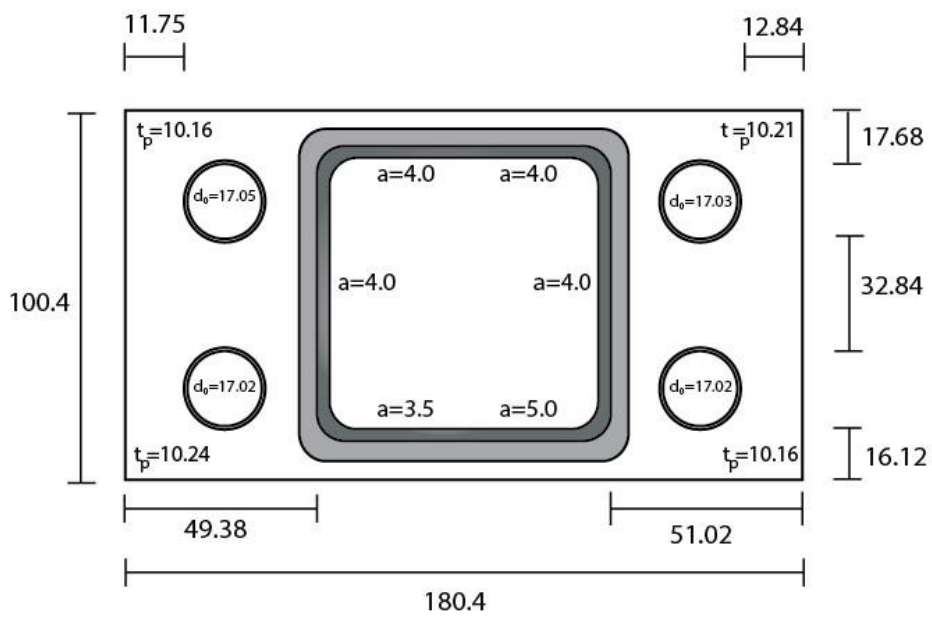
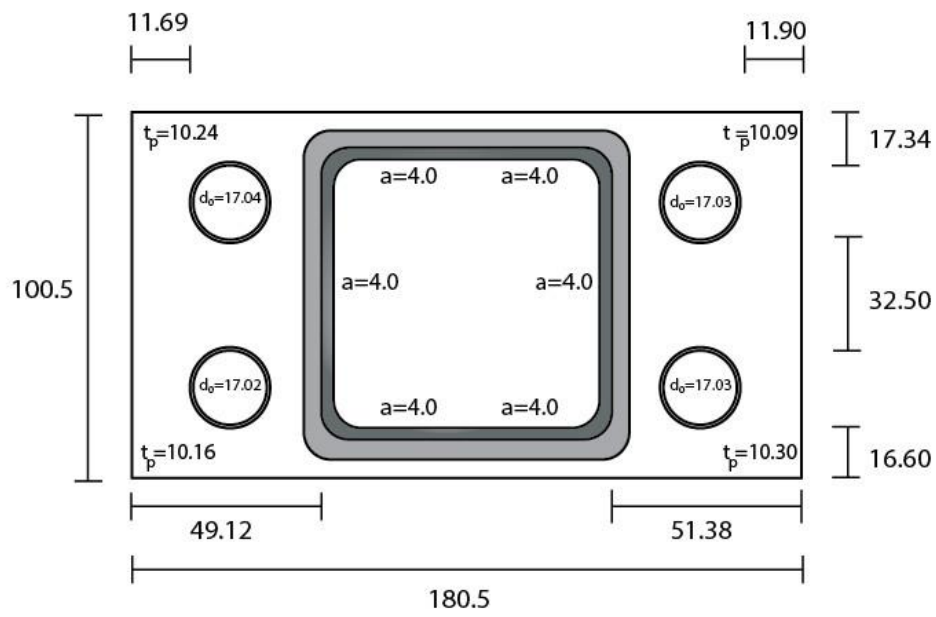
C.1.1 Prøve A1



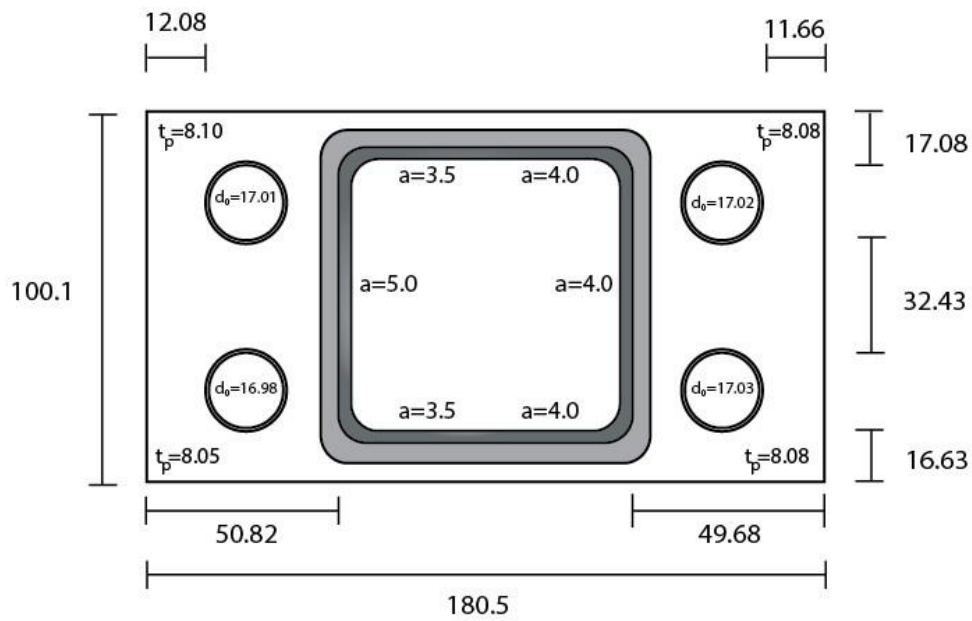
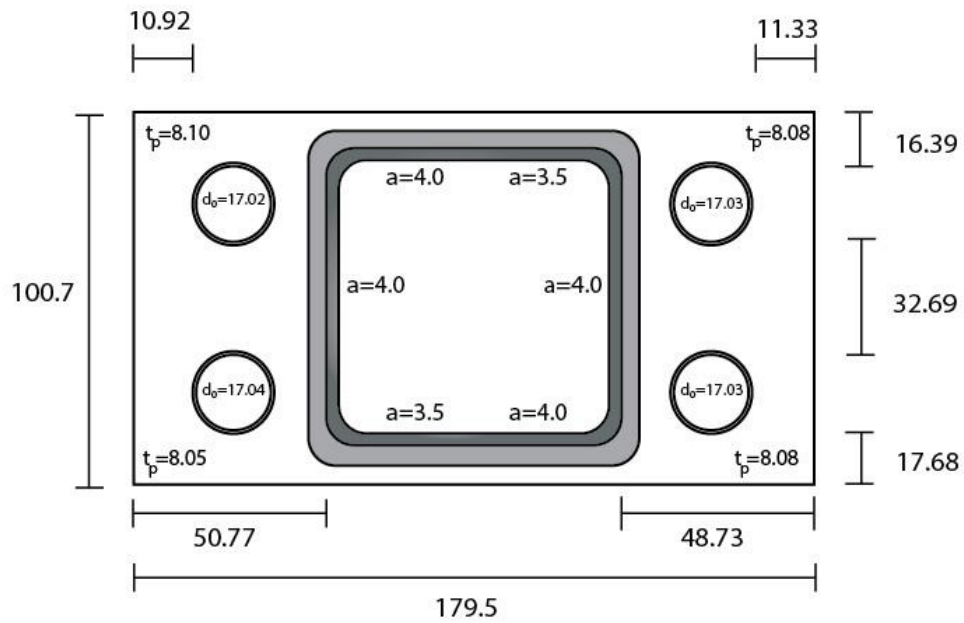
C.1.2 Prøve B1



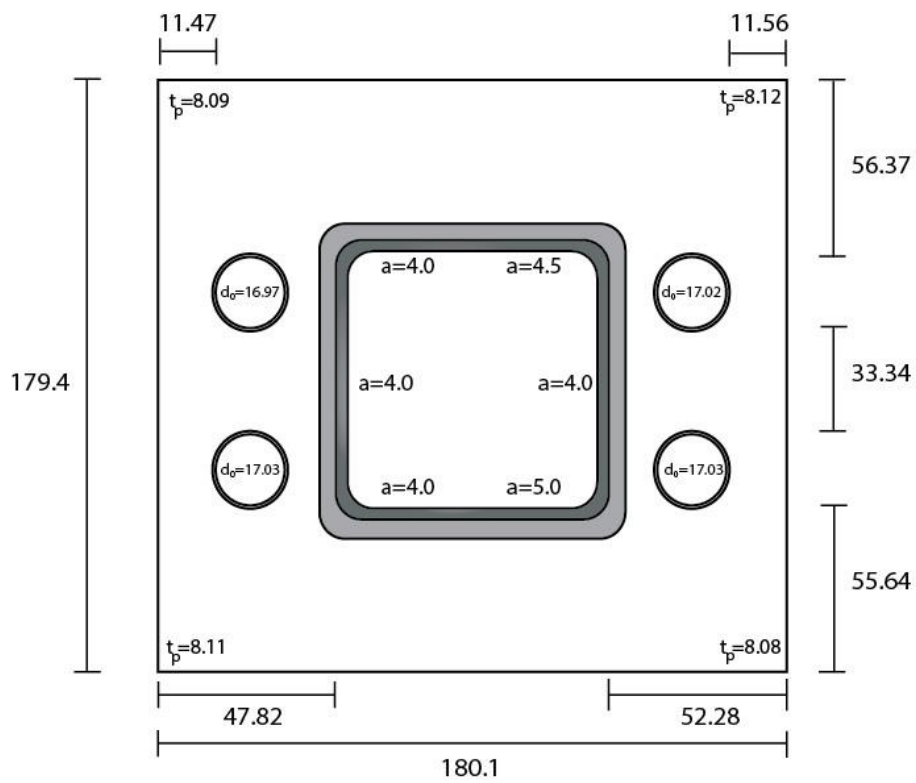
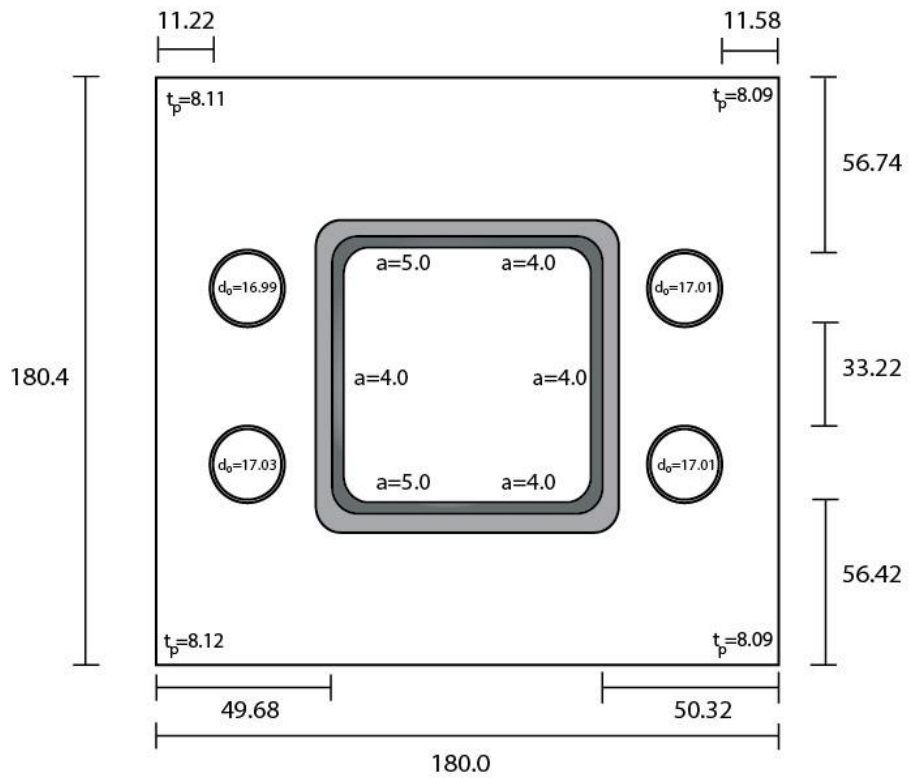
C.1.3 Prøve A2



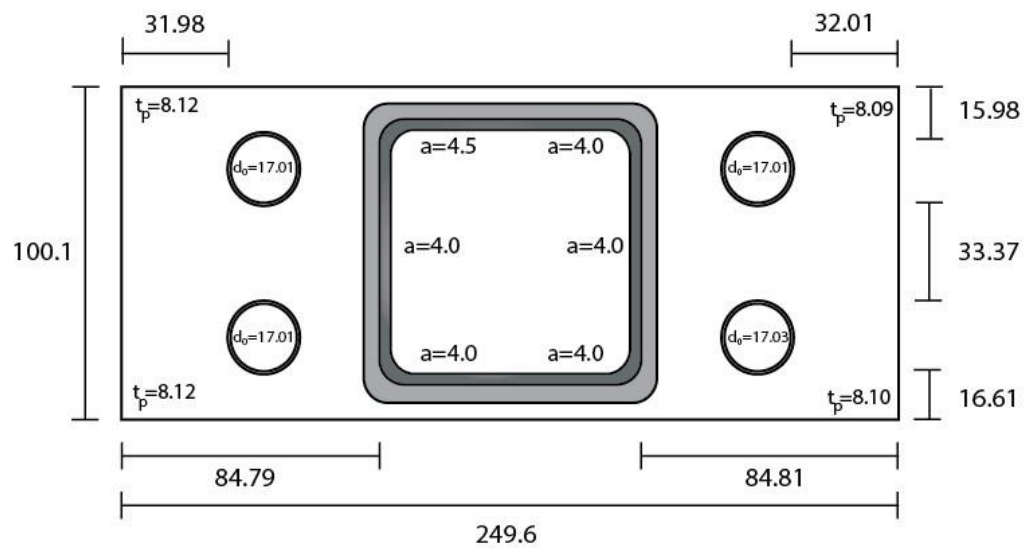
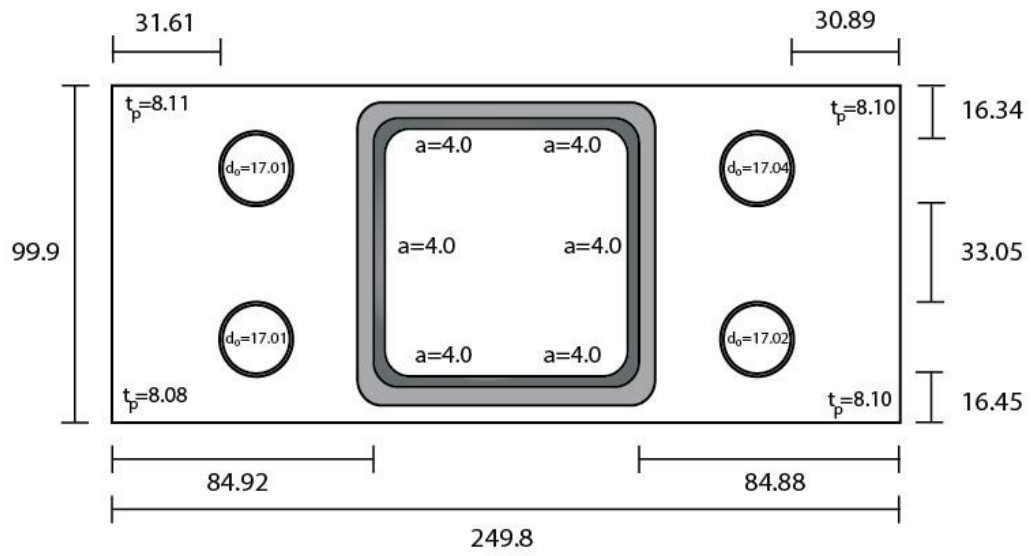
C.1.4 Prøve B2



C.1.5 Prøve C

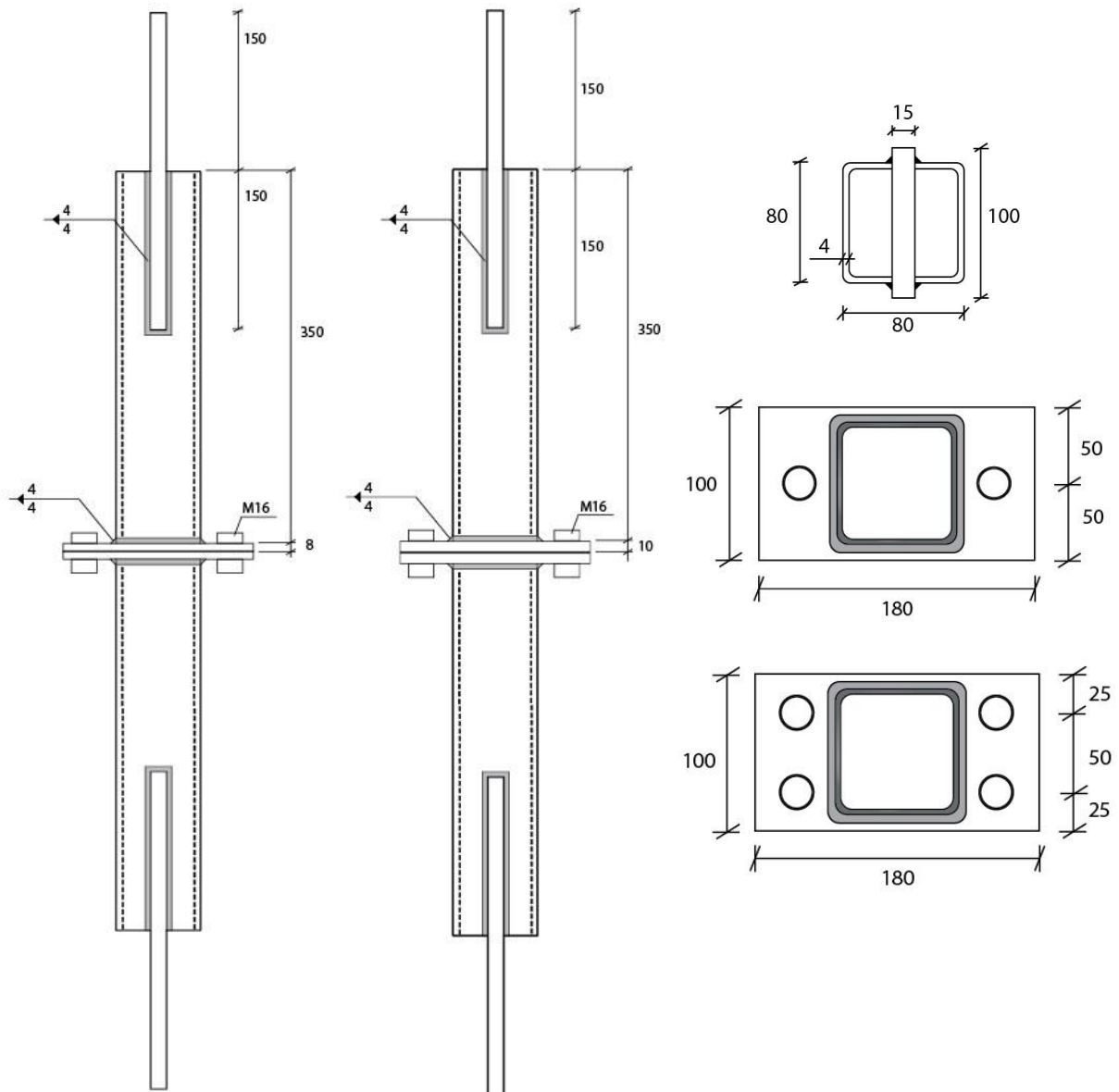


C.1.6 Prøve D

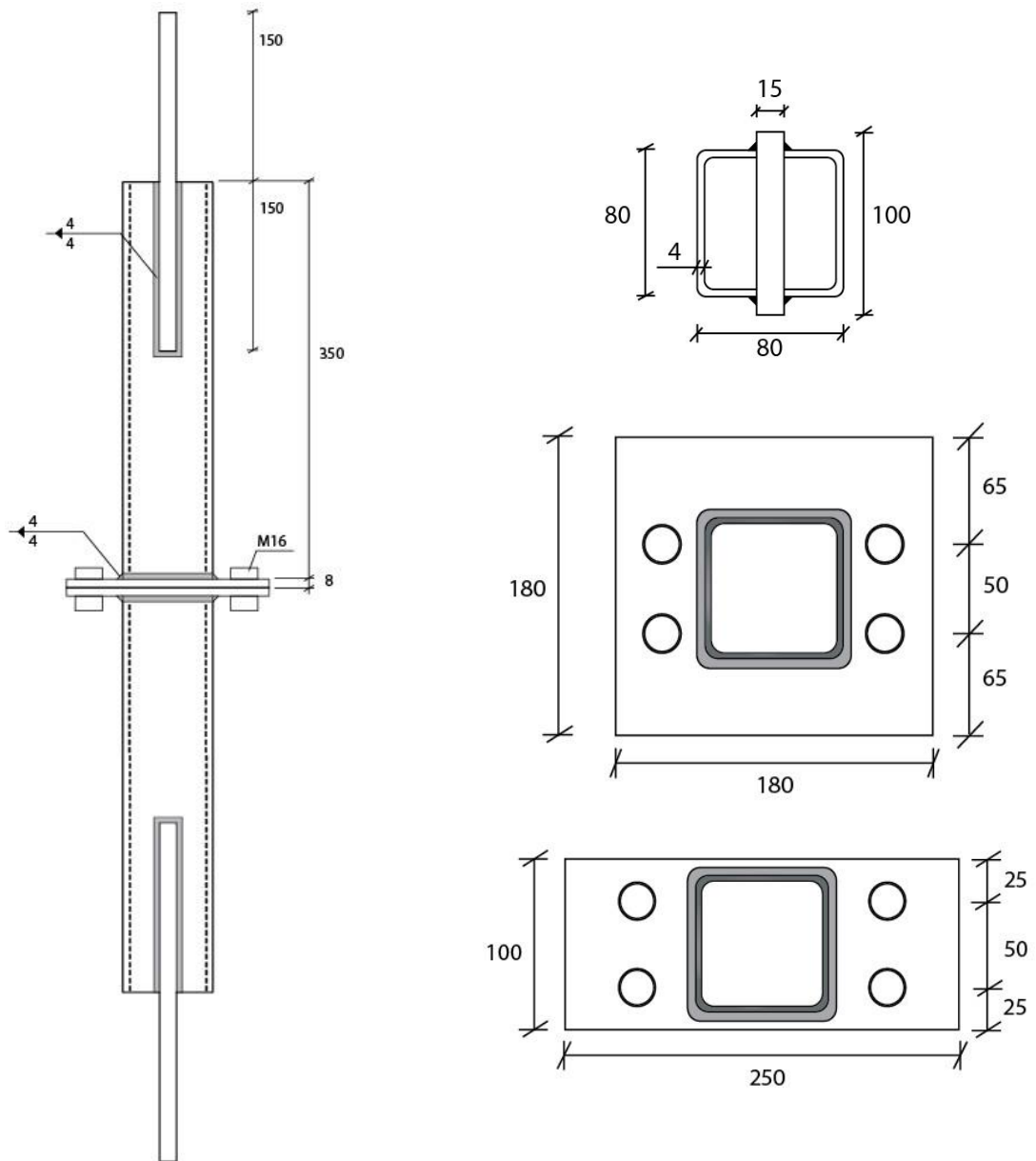


C.2 Teoretisk geometri for endeplateforbindelsene

C.2.1 Prøvetype A og B

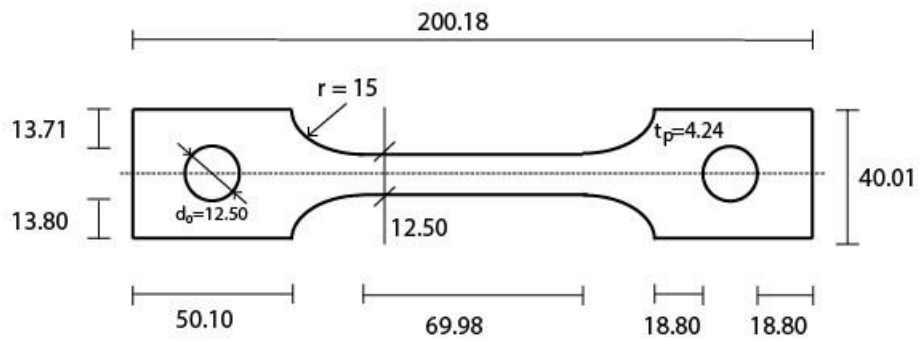


C.2.2 Prøvetype C og D

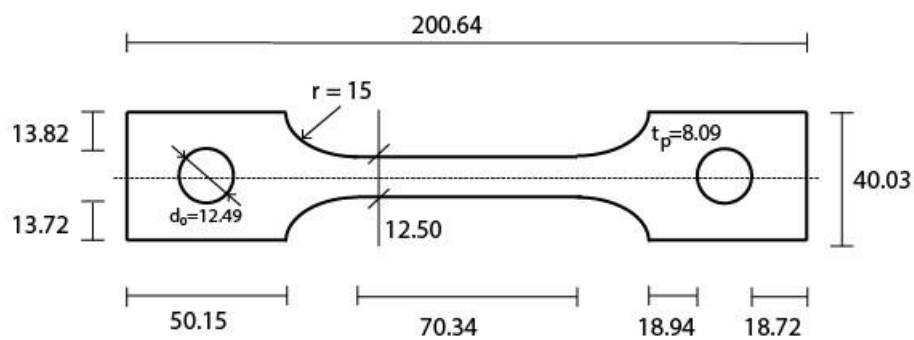


C.3 Nøyaktig geometri for strekkprøvene

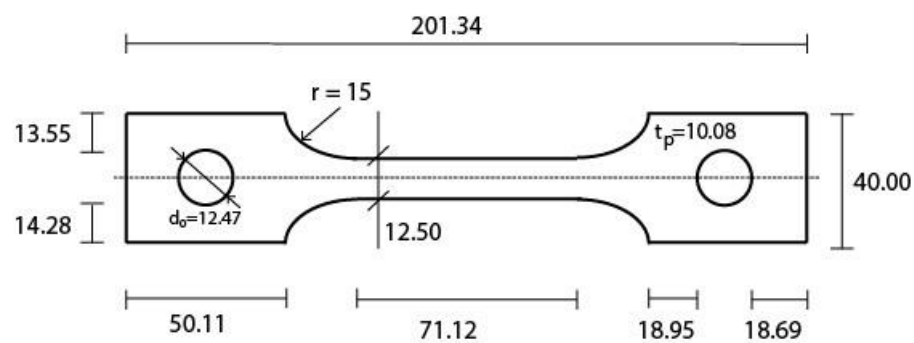
C.3.1 Hulprofil 4mm



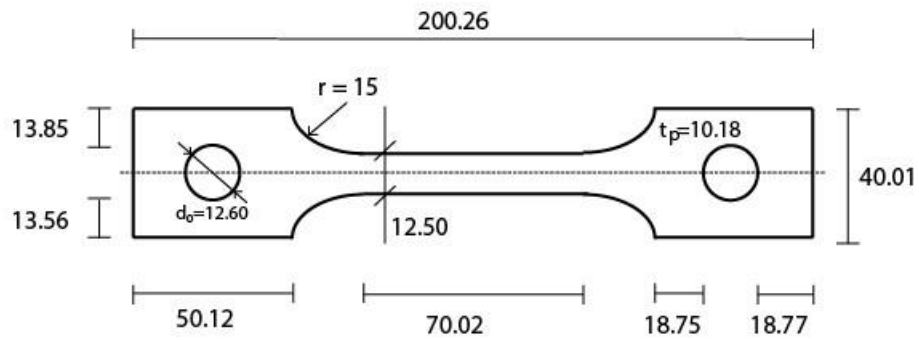
C.3.2 Endeplate 8mm, lengderetning



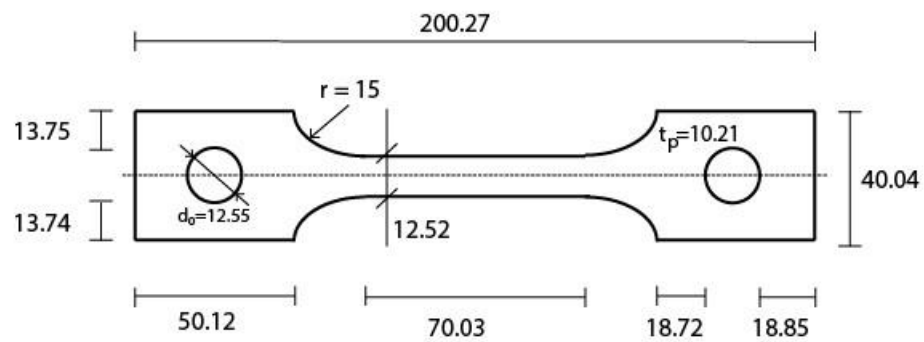
C.3.3 Endeplate 8mm, tverretning



C.3.4 Endeplate 10mm, lengderetning, prøve 1



C.3.5 Endeplate 10mm, lengderetning, prøve 2



Vedlegg D

Håndberegninger

D.1 Prøve B1

De geometriske målene som er nødvendig for å beregne effektivlengden til T-stykket etter tabell 3.3.1 er presentert i Tabell D.1.

Tabell D.1: Mål for ekvivalent T-stykke, prøve B1

b_p	e_x	e	w	m_x	t_p	a
100	20	50	0	25.47	8.1	4

Alle tall i tabellen er i mm.

Effektivlengdene beregnes tilsvarende som for prøve A1. Resultatene er gitt i Tabell D.2.

Tabell D.2: Utregning av l_{eff} , prøve B1

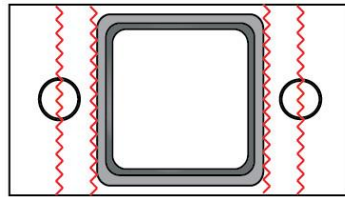
Effektiv lengde $l_{eff,cp}$ ved sirkulært mønster		Effektiv lengde $l_{eff,nc}$ ved ikke-sirkulært mønster		
$\frac{2\pi m_x}{2}$	$\frac{\pi m_x + 2e}{2}$	$\frac{4m_x + 1.25e_x}{2}$	$\frac{e + 2m_x + 0.625e_x}{2}$	$0.5b_p$
80.03	90.02	63.45	56.72	50.00

Alle tall i tabellen er i mm.

Den minste av effektivlengdene i Tabell D.2 er gitt av den globale mekanismen $0.5b_p$, og er gitt i ligning D.1.

$$l_{eff} = 50 \text{ mm} \quad (\text{D.1})$$

Med denne effektivlengden vil kapasiteten til prøve B1 styres av fullstendig flytning i flens, som tilsvarer bruddform 1 i kapittel 3.2. Figur D.1 viser flytelinjer langs hulprofilet og ved boltene.



Figur D.1: Flytelinjer i en linje langs hulprofil og bolt, B1

D.1.1 Stivhetsberegning etter Eurokoden

Stivhetskoeffisientene beregnes på samme måte som for prøve A1. Platestivhetskoeffisienten for det ene T-stykket i halve skjøten er gitt i ligning D.2.

$$k_p = \frac{0.9 l_{eff} t_p^3}{m^3} = \frac{0.9 \cdot 50 \cdot 8.1^3}{25.47^3} = 1.447 \text{ mm} \quad (\text{D.2})$$

Boltens tøyningsslengde, L_b , beregnes til 33.7 mm. Boltstivhetskoeffisienten for det ene T-stykket i halve skjøten er gitt i ligning D.3.

$$k_b = 1.6 \frac{A_s}{L_b/2} \cdot \frac{1}{2} = 1.6 \cdot \frac{157}{33.7/2} \cdot \frac{1}{2} = 7.454 \text{ mm} \quad (\text{D.3})$$

Stivhetskoeffisienten til halve skjøten beregnes som vist i ligning D.4.

$$k_{venstre} = k_{høyre} = \frac{1}{\frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_b}} = 1.211 \text{ mm} \Rightarrow k_{halv skjøt} = 2.423 \text{ mm} \quad (\text{D.4})$$

Den elastiske initielle stivheten til hele knutepunktet beregnes tilsvarende som for prøve A1 og er vist i ligning D.5.

$$K_{el} = \frac{k_{halv skjøt}}{2} \cdot E = \frac{2.423}{2} \cdot 210\,000 = 254\,413 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (\text{D.5})$$

D.1.2 Stivhetsberegning etter Karlsens modell

Stivhetskoeffisientene beregnes som for prøve A1. De beregnede stivhetskoeffisientene til endeplate og bolt er gitt i henholdsvis ligning D.6 og D.7.

$$k_p = \frac{2(3a + 3m\alpha + n\alpha) \cdot l_{eff,ini} \cdot t^3}{m^2(3m^2\alpha + 4nma + 12am + 12an)} = 0.577 \text{ mm} \quad (\text{D.6})$$

$$k_b = \frac{1}{2} \frac{4n(3a + 3m\alpha + n\alpha)}{(6am + 6an + 3m^2\alpha + 2n^2\alpha + 6nma)} \frac{A_s}{L_b/2} = 4.998 \text{ mm} \quad (\text{D.7})$$

Stivhetskoeffisienten til halve skjøten beregnes som vist i ligning D.8.

$$k_{venstre} = k_{høyre} = \frac{1}{\frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_b}} = 0.517 \text{ mm} \rightarrow k_{halv skjøt} = 1.035 \text{ mm} \quad (\text{D.8})$$

Den elastiske initielle stivheten til hele knutepunktet beregnes som vist i ligning D.9.

$$K_{el} = \frac{k_{halv skjøt}}{2} \cdot E = \frac{1.035}{2} \cdot 210\,000 = 108\,659 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (\text{D.9})$$

D.2 Prøve A2

De geometriske målene som er nødvendig for å beregne effektivlengden til T-stykket etter tabell 3.3.1 er presentert i Tabell D.3.

Tabell D.3: Mål for ekvivalent T-stykke, prøve A2

b_p	e_x	e	w	m_x	t_p	a
100	20	25	50	25.47	10.2	4

Alle tall i tabellen er i mm.

Prøve A2 har to bolter per T-stykke og de effektive lengdene beregnes uten å dividere med to, som vist i Tabell D.4.

Tabell D.4: Utregning av l_{eff} , prøve A2

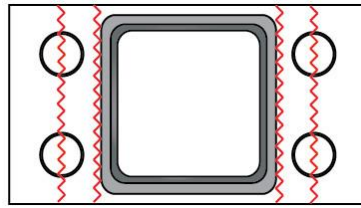
Effektiv lengde $l_{eff,cp}$ ved sirkulært mønster			Effektiv lengde $l_{eff,nc}$ ved ikke-sirkulært mønster			
$2\pi m_x$	$\pi m_x + w$	$\pi m_x + 2e$	$4m_x + 1.25e_x$	$e + 2m_x + 0.625e_x$	$0.5b_p$	$0.5w + 2m_x + 0.625e_x$
160.06	130.03	130.03	126.90	88.45	50.00	88.45

Alle tall i tabellen er i mm.

Den minste av effektivlengdene i Tabell D.4 er den globale mekanismen $0.5b_p$, og er gitt i ligning D.10.

$$l_{eff} = 50 \text{ mm} \quad (\text{D.10})$$

Tilsvarende som for prøve B1 vil kapasiteten til prøve A2 styres av fullstendig flytning i flens, som tilsvarer bruddform 1 i kapittel 3.2. Figur D.2 viser flytelinjer langs hulprofilen og ved boltene.



Figur D.2: Flytelinjer i en linje langs hulprofil og bolt, A2

D.2.1 Stivhetsberegning etter Eurokoden

Platestivhetskoeffisienten for det ene T-stykket i halve skjøten er gitt i ligning D.11.

$$k_p = \frac{0.9 l_{eff} t_p^3}{m^3} = \frac{0.9 \cdot 50 \cdot 10.2^3}{25.47^3} = 2.889 \text{ mm} \quad (\text{D.11})$$

Boltens tøyingslengde, L_b , beregnes til 37.9 mm. Boltstivhetskoeffisienten for det ene T-stykket i halve skjøten er gitt i ligning D.12. Det er tilsvarende som for effektivlengden er ikke koeffisienten dividert på to fordi T-stykket har to bolter.

$$k_b = 1.6 \frac{A_s}{L_b/2} = 1.6 \cdot \frac{157}{37.9/2} = 13.256 \text{ mm} \quad (\text{D.12})$$

Stivhetskoeffisienten til halve skjøten beregnes som vist i ligning D.13.

$$k_{venstre} = k_{høyre} = \frac{1}{\frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_b}} = 2.372 \text{ mm} \Rightarrow k_{halv skjøt} = 4.774 \text{ mm} \quad (\text{D.13})$$

Den elastiske initielle stivheten til hele knutepunktet beregnes tilsvarende som for prøve A1 og er vist i ligning D.14.

$$K_{el} = \frac{k_{halv skjøt}}{2} \cdot E = \frac{4.744}{2} \cdot 210\,000 = 498\,079 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (\text{D.14})$$

D.2.2 Stivhetsberegning etter Karlsens modell

Avstanden, a , beregnes som tidligere til 44.53 mm, og sammenhengen mellom den effektive lengden og den initielle effektive lengden er som tidligere $l_{eff,ini} = 0.8667 l_{eff}$.

T-stykket har to bolter og stivhetskoeffisienten til boltene divideres derfor ikke med to. De beregnede stivhetskoeffisientene til endeplate og bolt er gitt i henholdsvis ligning D.15 og D.16.

$$k_p = \frac{2(3a + 3m\alpha + n\alpha) \cdot l_{eff,ini} \cdot t^3}{m^2(3m^2\alpha + 4nm\alpha + 12am + 12an)} = 1.153 \text{ mm} \quad (\text{D.15})$$

$$k_b = \frac{4n(3a + 3m\alpha + n\alpha)}{(6am + 6an + 3m^2\alpha + 2n^2\alpha + 6nm\alpha)} \frac{A_s}{L_b/2} = 8.888 \text{ mm} \quad (\text{D.16})$$

Stivhetskoeffisienten til halve skjøten beregnes som vist i ligning D.17.

$$k_{venstre} = k_{høyre} = \frac{1}{\frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_b}} = 1.020 \text{ mm} \rightarrow k_{halv\ skj\ot} = 2.040 \text{ mm} \quad (\text{D.17})$$

Den elastiske initielle stivheten til hele knutepunktet beregnes som vist i ligning D.18.

$$K_{el} = \frac{k_{halv\ skj\ot}}{2} \cdot E = \frac{2.040}{2} \cdot 210\,000 = 214\,250 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (\text{D.18})$$

D.3 Prøve B2

De geometriske målene som er nødvendig for å beregne effektivlengden til T-stykket etter tabell 3.3.1 er presentert i Tabell D.5.

Tabell D.5: Mål for ekvivalent T-stykke, prøve B2

b_p	e_x	e	w	m_x	t_p	a
100	20	25	50	25.47	8.1	4

Alle tall i tabellen er i mm.

I Tabell D.6 er effektivlengdene beregnet tilsvarende som for prøve A2, presentert.

Tabell D.6: Utregning av l_{eff} , prøve B2

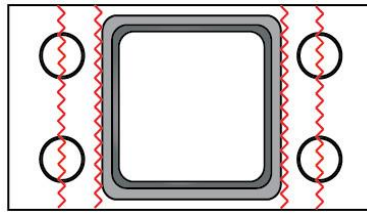
Effektiv lengde $l_{eff,cp}$ ved sirkulært mønster			Effektiv lengde $l_{eff,nc}$ ved ikke-sirkulært mønster			
$2\pi m_x$	$\pi m_x + w$	$\pi m_x + 2e$	$4m_x + 1.25e_x$	$e + 2m_x + 0.625e_x$	$0.5b_p$	$0.5w + 2m_x + 0.625e_x$
160.06	130.03	130.03	126.90	88.45	50.00	88.45

Alle tall i tabellen er i mm.

Den minste av effektivlengdene i Tabell D.6 er den globale mekanismen $0.5b_p$, og gitt i ligning D.19.

$$l_{eff} = 50 \text{ mm} \quad (\text{D.19})$$

Tilsvarende som for de to forrige prøvene vil kapasiteten til prøve B2 styres av fullstendig flytning i flens, som tilsvarer bruddform 1 i kapittel 3.2. Figur D.3 viser flytelinjer langs hulprofilen og ved boltene.



Figur D.3: Flytelinjer i en linje langs hulprofil og bolt, B2

D.3.1 Stivhetsberegning etter Eurokoden

Stivhetskoeffisientene beregnes på samme måte som for B2. Platestivhetskoeffisienten for det ene T-stykket i halve skjøten er gitt i ligning D.20.

$$k_p = \frac{0.9l_{eff}t_p^3}{m^3} = \frac{0.9 \cdot 50 \cdot 8.1^3}{25.47^3} = 1.447 \text{ mm} \quad (\text{D.20})$$

Boltens tøyingslengde, L_b , beregnes til 33.7 mm. Boltstivheten for det ene T-stykket i halve skjøten er gitt i ligning D.21.

$$k_b = 1.6 \frac{A_s}{L_b/2} = 1.6 \cdot \frac{157}{33.7/2} = 14.908 \text{ mm} \quad (\text{D.21})$$

Stivhetskoeffisienten til halve skjøten beregnes som vist i ligning D.22.

$$k_{venstre} = k_{høyre} = \frac{1}{\frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_b}} = 1.3185 \text{ mm} \rightarrow k_{halv skjøt} = 2.637 \text{ mm} \quad (\text{D.22})$$

Den elastiske initielle stivheten til hele knutepunktet beregnes tilsvarende som for prøve A1 og er vist i ligning D.23.

$$K_{el} = \frac{k_{halv skjøt}}{2} \cdot E = \frac{2.637}{2} \cdot 210\,000 = 276\,916 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (\text{D.23})$$

D.3.2 Stivhetsberegning etter Karlsens modell

Stivhetskoeffisientene beregnes som for prøve A2. De beregnede stivhetskoeffisientene til endeplate og bolt er gitt i henholdsvis ligning D.24 og D.25.

$$k_p = \frac{2(3a + 3m\alpha + n\alpha) \cdot l_{eff,ini} \cdot t^3}{m^2(3m^2\alpha + 4nm\alpha + 12am + 12an)} = 0.577 \text{ mm} \quad (\text{D.24})$$

$$k_b = \frac{4n(3a + 3m\alpha + n\alpha)}{(6am + 6an + 3m^2\alpha + 2n^2\alpha + 6nm\alpha)} \frac{A_s}{L_b/2} = 9.995 \text{ mm} \quad (\text{D.25})$$

Stivhetskoeffisienten til halve skjøten beregnes som vist i ligning D.26.

$$k_{venstre} = k_{høyre} = \frac{1}{\frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_b}} = 0.546 \text{ mm} \rightarrow k_{halv skjøt} = 1.091 \text{ mm} \quad (\text{D.26})$$

Den elastiske initielle stivheten til hele knutepunktet beregnes som vist i ligning D.27.

$$K_{el} = \frac{k_{halv skjøt}}{2} \cdot E = \frac{1.091}{2} \cdot 210\,000 = 114\,591 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (\text{D.27})$$

D.4 Prøve C

De geometriske målene som er nødvendig for å beregne effektivlengden til T-stykket etter tabell 3.3.1 er presentert i Tabell D.7.

Tabell D.7: Mål for ekvivalent T-stykke, prøve C

b_p	e_x	e	w	m_x	t_p	a
180	20	25	50	25.47	8.1	4

Alle tall i tabellen er i mm.

I Tabell D.8 er de beregnede effektivlengdene presentert.

Tabell D.8: Utregning av l_{eff} , prøve C

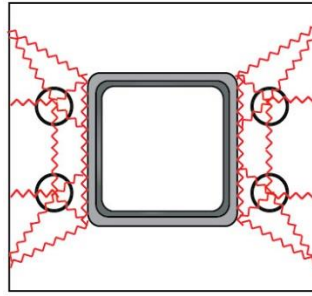
Effektiv lengde $l_{eff,cp}$ ved sirkulært mønster			Effektiv lengde $l_{eff,nc}$ ved ikke-sirkulært mønster			
$2\pi m_x$	$\pi m_x + w$	$\pi m_x + 2e$	$4m_x + 1.25e_x$	$e + 2m_x + 0.625e_x$	$0.5b_p$	$0.5w + 2m_x + 0.625e_x$
160.06	130.03	210.03	126.90	128.45	90.00	88.45

Alle tall i tabellen er i mm.

Den minste av effektivlengdene i Tabell D.8 er som vist i ligning D.28.

$$l_{eff} = 88.45 \text{ mm} \quad (\text{D.28})$$

Med denne effektivlengden vil kapasiteten til prøve C styres av fullstendig flytning i flens, som tilsvarer bruddform 1 i kapittel 3.2. Figur D.4 viser flytelinjemønsteret.



Figur D.4: Flytemønster, C

D.4.1 Stivhetsberegning etter Eurokoden

Stivhetskoeffisientene beregnes som tidligere for knutepunktene med 4 bolter. Platestivhetskoeffisienten for det ene T-stykket i halve skjøten er gitt i ligning D.29.

$$k_p = \frac{0.9 l_{eff} t_p^3}{m^3} = \frac{0.9 \cdot 88.45 \cdot 8.1^3}{25.47^3} = 2.559 \text{ mm} \quad (\text{D.29})$$

Boltens tøyningsslengde, L_b , beregnes til 33.7 mm. Boltstivheten for det ene T-stykket i halve skjøten er gitt i ligning D.30.

$$k_b = 1.6 \frac{A_s}{L_b/2} = 1.6 \cdot \frac{157}{33.7/2} = 14.908 \text{ mm} \quad (\text{D.30})$$

Stivhetskoeffisienten til halve skjøten beregnes som vist i ligning D.31.

$$k_{venstre} = k_{høyre} = \frac{1}{\frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_b}} = 2.184 \text{ mm} \rightarrow k_{halv skjøt} = 4.368 \text{ mm} \quad (\text{D.31})$$

Den elastiske initielle stivheten til hele knutepunktet beregnes tilsvarende som for prøve A1 og er vist i ligning D.32.

$$K_{el} = \frac{k_{halv skjøt}}{2} \cdot E = \frac{4.368}{2} \cdot 210\,000 = 458\,662 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (\text{D.32})$$

D.4.2 Stivhetsberegning etter Karlsens modell

De beregnede stivhetskoeffisientene til endeplate og bolt er gitt i henholdsvis ligning D.33 og D.34.

$$k_p = \frac{2(3a + 3m\alpha + n\alpha) \cdot l_{eff,ini} \cdot t^3}{m^2(3m^2\alpha + 4nm\alpha + 12am + 12an)} = 1.021 \text{ mm} \quad (\text{D.33})$$

$$k_b = \frac{4n(3a + 3m\alpha + n\alpha)}{(6am + 6an + 3m^2\alpha + 2n^2\alpha + 6nm\alpha)} \frac{A_s}{L_b/2} = 9.995 \text{ mm} \quad (\text{D.34})$$

Stivhetskoeffisienten til halve skjøten beregnes som vist i ligning D.35.

$$k_{venstre} = k_{høyre} = \frac{1}{\frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_b}} = 0.9265 \text{ mm} \rightarrow k_{halv skjøt} = 1.853 \text{ mm} \quad (\text{D.35})$$

Den elastiske initielle stivheten til hele knutepunktet beregnes som vist i ligning D.36.

$$K_{el} = \frac{k_{halv skjøt}}{2} \cdot E = \frac{1.853}{2} \cdot 210\,000 = 194\,452 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (\text{D.36})$$

D.5 Prøve D

De geometriske målene som er nødvendig for å beregne effektivlengden til T-stykket etter tabell 3.3.1 er presentert i Tabell D.9.

Tabell D.9: Mål for ekvivalent T-stykke, prøve D

b_p	e_x	e	w	m_x	t_p	a
100	40	25	50	40.47	8.1	4

Alle tall i tabellen er i mm.

I Tabell D.8 er beregnede effektivlengdene presentert.

Tabell C.10: Utregning av l_{eff} , prøve D

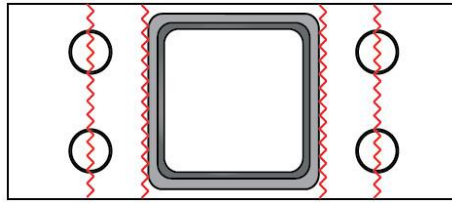
Effektiv lengde $l_{eff,cp}$ ved sirkulært mønster			Effektiv lengde $l_{eff,nc}$ ved ikke-sirkulært mønster			
$2\pi m_x$	$\pi m_x + w$	$\pi m_x + 2e$	$4m_x + 1.25e_x$	$e + 2m_x + 0.625e_x$	$0.5b_p$	$0.5w + 2m_x + 0.625e_x$
254.31	177.15	177.15	211.90	130.95	50	130.95

Alle tall i tabellen er i mm.

Den minste av effektivlengdene i Tabell D.10 er gitt av den globale mekanismen $0.5b_p$, og er gitt i ligning D.37.

$$l_{eff} = 50 \text{ mm} \quad (\text{D.37})$$

Med denne effektivlengden vil kapasiteten til prøve D styres av fullstendig flytning i flens, som tilsvarer bruddform 1 i kapittel 3.2. Figur D.5 viser flytelinjer langs hulprofilet og ved boltene.



Figur D.5: Flytelinjer i en linje langs hulprofil og bolt, D

D.5.1 Stivhetsberegning etter Eurokoden

Stivhetskoeffisientene beregnes som tidligere for knutepunktene med 4 bolter. Platestivhetskoeffisienten for det ene T-stykket i halve skjøten er gitt i ligning D.38.

$$k_p = \frac{0.9 l_{eff} t_p^3}{m^3} = \frac{0.9 \cdot 50 \cdot 8.1^3}{40.47^3} = 0.361 \text{ mm} \quad (\text{D.38})$$

Boltens tøyningsslengde, L_b , beregnes til 33.7 mm. Boltstivheten for det ene T-stykket i halve skjøten er gitt i ligning D.39.

$$k_b = 1.6 \frac{A_s}{L_b/2} = 1.6 \cdot \frac{157}{33.7/2} = 14.908 \text{ mm} \quad (\text{D.39})$$

Stivhetskoeffisienten til halve skjøten beregnes som vist i ligning D.40.

$$k_{venstre} = k_{høyre} = \frac{1}{\frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_b}} = 0.352 \text{ mm} \rightarrow k_{halv skjøt} = 0.704 \text{ mm} \quad (\text{D.40})$$

Den elastiske initielle stivheten til hele knutepunktet beregnes tilsvarende som for prøve A1 og er vist i ligning D.41.

$$K_{el} = \frac{k_{halv skjøt}}{2} \cdot E = \frac{0.704}{2} \cdot 210\,000 = 73\,954 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (\text{D.41})$$

D.5.2 Stivhetsberegning etter Karlsens modell

De beregnede stivhetskoeffisientene til endeplate og bolt er gitt i henholdsvis ligning D.42 og D.43.

$$k_p = \frac{2(3a + 3m\alpha + n\alpha) \cdot l_{eff,ini} \cdot t^3}{m^2(3m^2\alpha + 4nm\alpha + 12am + 12an)} = 0.152 \text{ mm} \quad (\text{D.42})$$

$$k_b = \frac{4n(3a + 3m\alpha + n\alpha)}{(6am + 6an + 3m^2\alpha + 2n^2\alpha + 6nm\alpha)} \frac{A_s}{L_b/2} = 12.173 \text{ mm} \quad (\text{D.43})$$

Stivhetskoeffisienten til halve skjøten beregnes som vist i ligning D.44.

$$k_{venstre} = k_{høyre} = \frac{1}{\frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_b}} = 0.1505 \text{ mm} \rightarrow k_{halv skjøt} = 0.301 \text{ mm} \quad (\text{D.44})$$

Den elastiske initielle stivheten til hele knutepunktet beregnes som vist i ligning D.45.

$$K_{el} = \frac{k_{halv skjøt}}{2} \cdot E = \frac{0.301}{2} \cdot 210\,000 = 31\,628 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (\text{D.45})$$

Vedlegg E

Numerisk simulering

E.1 Materialer

E.1.1 Bolt

Verdiene i tabell 7.3.2 er beregnet med uttrykkene i ligning 5.1-5.5 fra kapittel 5. Disse er gjengitt nedenfor.

Ingeniørtøyning:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$$

Sann spenning:

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

Sann tøyning:

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

Sann plastisk tøyning:

$$\varepsilon_{true}^{pl} = \varepsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E}$$

Flytespenningen til boltene er $f_y = 640$ MPa og bruddspenningen er $f_u = 800$ MPa. Elastisitetsmodulen er $E = 210\,000$ MPa og bruddtøyning $\varepsilon_u = 0.12$.

Basert på de gitte materialdataene beregnes ingeniørtøyning, sann spenning og sann plastisk tøyning.

Ingeniørtøyning (ved flytespenning):

$$\varepsilon^{el} = \frac{\sigma}{E} = \frac{f_y}{E} = \frac{640}{210000} = 0.003048$$

Sann spenning (ved flytespenning):

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon^{el}) = f_y(1 + \varepsilon^{el}) = 640(1 + 0.003048) = 641.95 \text{ MPa}$$

Sann plastisk tøyning (ved flytespenning):

$$\varepsilon_{true}^{pl} = \varepsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E} = \ln(1 + 0.003048) - \frac{641.95}{210000} \approx 0$$

Ingeniørtøyning (ved bruddspenning). Denne verdien er valgt ettersom materialet er plastifisert.

$$\varepsilon^{pl} = 0.12$$

Sann spenning (ved bruddspenning):

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon^{pl}) = 800(1 + 0.12) = 896.00 \text{ MPa}$$

Sann plastisk tøyning (ved bruddspenning):

$$\varepsilon_{true}^{pl} = \varepsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E} = \ln(1 + 0.12) - \frac{896}{210000} = 0.1091$$

E.1.2 Hulprofil

Utregning av verdiene for ingeniørtøyning, sann spenning og sann plastisk tøyning for hulprofil i tabell 7.3.3 gjøres på samme måte som for boltene.

Det antas at flytespenningen er $f_y = 355 \text{ MPa}$, bruddspenningen $f_u = 510 \text{ MPa}$ og elastisitetsmodul $E = 210\,000 \text{ MPa}$. Ved spenning lik 365 MPa antas det at tøyningen er $\varepsilon_{365} = 0.02$ og ved brudd settes tøyningen til $\varepsilon_u = 0.22$ (Larsen P. K., Clausen, A. H. og Aalberg, A. (2003).

Ingeniørtøyning (ved flytespenning):

$$\varepsilon^{el} = \frac{\sigma}{E} = \frac{f_y}{E} = \frac{355}{210000} = 0.00169$$

Sann spenning (ved flytespenning):

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon^{el}) = f_y(1 + \varepsilon^{el}) = 355(1 + 0.00169) = 355.60 \text{ MPa}$$

Sann plastisk tøyning (ved flytespenning):

$$\varepsilon_{true}^{pl} = \varepsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E} = \ln(1 + 0.00169) - \frac{355.60}{210000} \approx 0$$

Ingeniørtøyning (ved 365 MPa). Denne verdien er valgt ettersom materialet er plastifisert.

$$\varepsilon_{365}^{pl} = 0.02$$

Sann spenning (ved 365 MPa):

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon_{365}^{pl}) = 365(1 + 0.02) = 372.3 \text{ MPa}$$

Sann plastisk tøyning (ved 365 MPa):

$$\varepsilon_{true}^{pl} = \varepsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E} = \ln(1 + 0.02) - \frac{372.3}{210000} = 0.01803$$

Ingeniørtøyning (ved bruddspenning). Denne verdien er valgt ettersom materialet er plastifisert:

$$\varepsilon^{pl} = 0.22$$

Sann spenning (ved bruddspenning):

$$\sigma_{true} = \sigma(1 + \varepsilon^{pl}) = 510(1 + 0.22) = 622.2 \text{ MPa}$$

Sann plastisk tøyning (ved bruddspenning):

$$\varepsilon_{true}^{pl} = \varepsilon_{true} - \frac{\sigma_{true}}{E} = \ln(1 + 0.22) - \frac{622.2}{210000} = 0.1959$$

Vedlegg F

Analyse av stivhetsmodell

F.1 Valg av justert stivhetsmodell

Tabell F.1.1: Justert stivhetsmodell med $\alpha = 1.0$ og $l_{\text{eff,ini}} = 0.7 l_{\text{eff}}$

t_{HUP} [mm]	$l_p \times b_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{el}^* [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	180x80	2	8.1	72.88	75.02	-2.85
			10.2	133.94	107.21	24.93
			15	298.19	163.40	82.49
			20	404.20	210.59	91.94
4	180x80	2	8.1	72.88	78.22	-6.83
			10.2	133.94	110.25	21.48
			15	298.19	168.10	77.39
			20	404.20	214.49	88.45
5	180x80	2	8.1	72.88	86.39	-15.64
			10.2	133.94	120.77	10.90
			15	298.19	160.26	86.06
			20	404.20	229.77	75.92
6.3	180x80	2	8.1	72.88	93.73	-22.24
			10.2	133.94	130.78	2.41
			15	298.19	194.85	53.03
			20	404.20	244.48	65.33
3.6	180x80	4	8.1	75.50	115.82	-34.81
			10.2	144.30	157.19	-8.20
			15	372.84	235.00	58.66
			20	602.01	301.14	99.91
4	180x80	4	8.1	75.50	120.65	-37.42
			10.2	144.30	164.35	-12.20
			15	372.84	243.90	52.87
			20	602.01	311.08	93.53
5	180x80	4	8.1	75.50	133.84	-43.59
			10.2	144.30	181.13	-20.33
			15	372.84	264.78	40.81
			20	602.01	335.60	79.38
6.3	180x80	4	8.1	75.50	145.29	-48.04
			10.2	144.30	196.56	-26.59
			15	372.84	288.48	29.24
			20	602.01	357.53	68.38

t_{HUP} [mm]	$l_p \times b_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{el}^* [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	180x100	2	8.1	89.58	79.00	13.39
			10.2	161.68	110.29	46.59
			15	338.90	164.12	106.50
			20	434.04	218.27	98.85
4	180x100	2	8.1	89.58	81.24	10.26
			10.2	161.68	113.20	42.83
			15	338.90	169.51	99.94
			20	434.04	222.85	94.77
5	180x100	2	8.1	89.58	88.07	1.71
			10.2	161.68	122.65	31.82
			15	338.90	179.41	88.90
			20	434.04	231.43	87.55
6.3	180x100	2	8.1	89.58	94.06	-4.76
			10.2	161.68	132.71	21.83
			15	338.90	195.39	73.45
			20	434.04	248.25	74.84
3.6	180x100	4	8.1	93.57	133.69	-30.01
			10.2	177.02	179.36	-1.30
			15	438.74	262.31	67.26
			20	670.64	326.84	105.19
4	180x100	4	8.1	93.57	137.87	-32.13
			10.2	177.02	184.92	-4.27
			15	438.74	267.89	63.78
			20	670.64	335.98	99.61
5	180x100	4	8.1	93.57	146.10	-35.95
			10.2	177.02	200.91	-11.89
			15	438.74	284.16	54.40
			20	670.64	349.39	91.94
6.3	180x100	4	8.1	93.57	-	-
			10.2	177.02	212.01	-16.50
			15	438.74	308.50	42.22
			20	670.64	374.63	79.02

t_{HUP} [mm]	$l_p \times b_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{el}^* [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	180x180	2	8.1	111.08	81.43	36.41
			10.2	195.97	116.92	67.61
			15	383.06	186.98	104.87
			20	462.85	261.64	76.91
4	180x180	2	8.1	111.08	83.87	32.44
			10.2	195.97	119.88	63.47
			15	383.06	189.79	101.84
			20	462.85	266.59	73.62
5	180x180	2	8.1	111.08	91.20	21.80
			10.2	195.97	129.37	51.48
			15	383.06	200.02	91.51
			20	462.85	275.58	67.95
6.3	180x180	2	8.1	111.08	97.48	13.96
			10.2	195.97	139.86	40.12
			15	383.06	214.92	78.24
			20	462.85	291.01	59.05
3.6	180x180	4	8.1	159.98	143.39	11.57
			10.2	291.75	197.03	48.07
			15	632.59	297.95	112.32
			20	835.78	396.65	110.71
4	180x180	4	8.1	159.98	148.10	8.02
			10.2	291.75	203.14	43.62
			15	632.59	313.49	101.79
			20	835.78	415.91	100.95
5	180x180	4	8.1	159.98	160.61	-0.39
			10.2	291.75	219.21	33.09
			15	632.59	326.79	93.58
			20	835.78	430.19	94.28
6.3	180x180	4	8.1	159.98	178.32	-10.28
			10.2	291.75	233.60	24.89
			15	632.59	350.51	80.48
			20	835.78	452.35	84.76

t_{HUP} [mm]	$l_p \times b_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{el}^* [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	250x100	2	8.1	25.35	39.66	-36.09
			10.2	49.40	61.98	-20.30
			15	139.07	114.18	21.80
			20	256.20	170.39	50.36
4	250x100	2	8.1	25.35	40.57	-37.52
			10.2	49.40	63.41	-22.10
			15	139.07	117.00	18.86
			20	256.20	173.29	47.84
5	250x100	2	8.1	25.35	42.99	-41.03
			10.2	49.40	67.39	-26.69
			15	139.07	122.25	13.76
			20	256.20	178.14	43.82
6.3	250x100	2	8.1	25.35	46.58	-45.58
			10.2	49.40	71.23	-30.65
			15	139.07	130.27	6.76
			20	256.20	188.38	36.00
3.6	250x100	4	8.1	25.61	56.01	-54.28
			10.2	50.50	84.64	-40.33
			15	150.62	149.18	0.96
			20	309.04	228.76	35.10
4	250x100	4	8.1	25.61	59.90	-57.25
			10.2	50.50	86.83	-41.84
			15	150.62	150.68	-0.04
			20	309.04	229.17	34.85
5	250x100	4	8.1	25.61	62.51	-59.03
			10.2	50.50	92.73	-45.54
			15	150.62	161.29	-6.61
			20	309.04	242.36	27.51
6.3	250x100	4	8.1	25.61	66.37	-61.41
			10.2	50.50	99.37	-49.18
			15	150.62	173.74	-13.31
			20	309.04	257.50	20.02

Tabell F.1.2: Justert stivhetsmodell med $\alpha = 1.0$ og $l_{\text{eff,ini}} = 0.6 l_{\text{eff}}$

t_{HUP} [mm]	$l_p \times b_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{el}^* [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	180x80	2	8.1	63.09	75.02	-15.90
			10.2	117.21	107.21	9.33
			15	271.10	163.40	65.91
			20	382.35	210.59	81.57
4	180x80	2	8.1	63.09	78.22	-19.34
			10.2	117.21	110.25	6.31
			15	271.10	168.10	61.27
			20	382.35	214.49	78.26
5	180x80	2	8.1	63.09	86.39	-26.97
			10.2	117.21	120.77	-2.95
			15	271.10	160.26	69.16
			20	382.35	229.77	66.41
6.3	180x80	2	8.1	63.09	93.73	-32.69
			10.2	117.21	130.78	-10.38
			15	271.10	194.85	39.13
			20	382.35	244.48	56.39
3.6	180x80	4	8.1	65.05	115.82	-43.83
			10.2	125.06	157.19	-20.44
			15	331.43	235.00	41.04
			20	554.79	301.14	84.23
4	180x80	4	8.1	65.05	120.65	-46.08
			10.2	125.06	164.35	-23.91
			15	331.43	243.90	35.89
			20	554.79	311.08	78.35
5	180x80	4	8.1	65.05	133.84	-51.40
			10.2	125.06	181.13	-30.95
			15	331.43	264.78	25.17
			20	554.79	335.60	65.31
6.3	180x80	4	8.1	65.05	145.29	-55.23
			10.2	125.06	196.56	-36.37
			15	331.43	288.48	14.89
			20	554.79	357.53	55.17

t_{HUP} [mm]	$l_p \times b_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{el}^* [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	180x100	2	8.1	77.73	79.00	-1.61
			10.2	142.1	110.29	28.84
			15	310.68	164.12	89.30
			20	413.74	218.27	89.55
4	180x100	2	8.1	77.73	81.24	-4.33
			10.2	142.1	113.20	25.53
			15	310.68	169.51	83.29
			20	413.74	222.85	85.66
5	180x100	2	8.1	77.73	88.07	-11.74
			10.2	142.1	122.65	15.86
			15	310.68	179.41	73.17
			20	413.74	231.43	78.78
6.3	180x100	2	8.1	77.73	94.06	-17.36
			10.2	142.1	132.71	7.08
			15	310.68	195.39	59.01
			20	413.74	248.25	66.66
3.6	180x100	4	8.1	80.72	133.69	-39.62
			10.2	153.81	179.36	-14.24
			15	392.58	262.31	49.66
			20	623.38	326.84	90.73
4	180x100	4	8.1	80.72	137.87	-41.45
			10.2	153.81	184.92	-16.82
			15	392.58	267.89	46.54
			20	623.38	335.98	85.54
5	180x100	4	8.1	80.72	146.10	-44.75
			10.2	153.81	200.91	-23.44
			15	392.58	284.16	38.15
			20	623.38	349.39	78.42
6.3	180x100	4	8.1	80.72	-	-
			10.2	153.81	212.01	-27.45
			15	392.58	308.50	27.25
			20	623.38	374.63	66.40

t_{HUP} [mm]	$l_p \times b_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{el}^* [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	180x180	2	8.1	96.67	81.43	18.72
			10.2	173.17	116.92	48.11
			15	354.39	186.98	89.54
			20	444.51	261.64	69.90
4	180x180	2	8.1	96.67	83.87	15.26
			10.2	173.17	119.88	44.45
			15	354.39	189.79	86.73
			20	444.51	266.59	66.74
5	180x180	2	8.1	96.67	91.20	6.00
			10.2	173.17	129.37	33.86
			15	354.39	200.02	77.18
			20	444.51	275.58	61.30
6.3	180x180	2	8.1	96.67	97.48	-0.83
			10.2	173.17	139.86	23.81
			15	354.39	214.92	64.90
			20	444.51	291.01	52.75
3.6	180x180	4	8.1	138.63	143.39	-3.32
			10.2	255.78	197.03	29.82
			15	577.26	297.95	93.75
			20	793.38	396.65	100.02
4	180x180	4	8.1	138.63	148.10	-6.39
			10.2	255.78	203.14	25.92
			15	577.26	313.49	84.14
			20	793.38	415.91	90.76
5	180x180	4	8.1	138.63	160.61	-13.69
			10.2	255.78	219.21	16.68
			15	577.26	326.79	76.64
			20	793.38	430.19	84.43
6.3	180x180	4	8.1	138.63	178.32	-22.26
			10.2	255.78	233.60	9.49
			15	577.26	350.51	64.69
			20	793.38	452.35	75.39

t_{HUP} [mm]	$l_p \times b_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{el}^* [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	250x100	2	8.1	21.79	39.66	-45.06
			10.2	42.61	61.98	-31.26
			15	121.87	114.18	6.73
			20	230.88	170.39	35.50
4	250x100	2	8.1	21.79	40.57	-46.29
			10.2	42.61	63.41	-32.81
			15	121.87	117.00	4.16
			20	230.88	173.29	33.23
5	250x100	2	8.1	21.79	42.99	-49.31
			10.2	42.61	67.39	-36.77
			15	121.87	122.25	-0.31
			20	230.88	178.14	29.61
6.3	250x100	2	8.1	21.79	46.58	-53.22
			10.2	42.61	71.23	-40.18
			15	121.87	130.27	-6.44
			20	230.88	188.38	22.56
3.6	250x100	4	8.1	21.98	56.01	-60.76
			10.2	43.42	84.64	-48.70
			15	130.650	149.18	-12.42
			20	272.94	228.76	19.32
4	250x100	4	8.1	21.98	59.90	-63.31
			10.2	43.42	86.83	-49.99
			15	130.650	150.68	-13.29
			20	272.94	229.17	19.10
5	250x100	4	8.1	21.98	62.51	-64.84
			10.2	43.42	92.73	-53.17
			15	130.650	161.29	-18.99
			20	272.94	242.36	12.62
6.3	250x100	4	8.1	21.98	66.37	-66.88
			10.2	43.42	99.37	-56.30
			15	130.650	173.74	-24.80
			20	272.94	257.50	6.00

Tabell F.1.3: Justert stivhetsmodell med $\alpha = 1.0$ og $l_{\text{eff,ini}} = 0.5 l_{\text{eff}}$

t_{HUP} [mm]	$l_p \times b_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{el}^* [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	180x80	2	8.1	53.11	75.02	-29.20
			10.2	99.76	107.21	-6.95
			15	240.51	163.40	47.19
			20	355.46	210.59	68.80
4	180x80	2	8.1	53.11	78.22	-32.10
			10.2	99.76	110.25	-9.52
			15	240.51	168.10	43.08
			20	355.46	214.49	65.73
5	180x80	2	8.1	53.11	86.39	-38.52
			10.2	99.76	120.77	-17.40
			15	240.51	160.26	50.07
			20	355.46	229.77	54.70
6.3	180x80	2	8.1	53.11	93.73	-43.34
			10.2	99.76	130.78	-23.72
			15	240.51	194.85	23.43
			20	355.46	244.48	45.39
3.6	180x80	4	8.1	54.49	115.82	-52.95
			10.2	105.40	157.19	-32.95
			15	286.83	235.00	22.06
			20	499.90	301.14	66.01
4	180x80	4	8.1	54.49	120.65	-54.84
			10.2	105.40	164.35	-35.87
			15	286.83	243.90	17.60
			20	499.90	311.08	60.70
5	180x80	4	8.1	54.49	133.84	-59.29
			10.2	105.40	181.13	-41.81
			15	286.83	264.78	8.33
			20	499.90	335.60	48.96
6.3	180x80	4	8.1	54.49	145.29	-62.50
			10.2	105.40	196.56	-46.38
			15	286.83	288.48	-0.57
			20	499.90	357.53	39.82

t_{HUP} [mm]	$l_p \times b_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{el}^* [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	180x100	2	8.1	65.58	79.00	-16.99
			10.2	121.5	110.29	10.16
			15	278.25	164.12	69.54
			20	388.31	218.27	77.90
4	180x100	2	8.1	65.58	81.24	-19.28
			10.2	121.5	113.20	7.33
			15	278.25	169.51	64.15
			20	388.31	222.85	74.25
5	180x100	2	8.1	65.58	88.07	-25.54
			10.2	121.5	122.65	-0.94
			15	278.25	179.41	55.09
			20	388.31	231.43	67.79
6.3	180x100	2	8.1	65.58	94.06	-30.28
			10.2	121.5	132.71	-8.44
			15	278.25	195.39	42.41
			20	388.31	248.25	56.42
3.6	180x100	4	8.1	67.7	133.69	-49.36
			10.2	129.96	179.36	-27.54
			15	342.18	262.31	30.45
			20	567.4	326.84	73.60
4	180x100	4	8.1	67.7	137.87	-50.89
			10.2	129.96	184.92	-29.72
			15	342.18	267.89	27.73
			20	567.4	335.98	68.88
5	180x100	4	8.1	67.7	146.10	-53.66
			10.2	129.96	200.91	-35.31
			15	342.18	284.16	20.42
			20	567.4	349.39	62.40
6.3	180x100	4	8.1	67.7	-	-
			10.2	129.96	212.01	-38.70
			15	342.18	308.50	10.92
			20	567.4	374.63	51.46

t_{HUP} [mm]	$l_p \times b_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{el}^* [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	180x180	2	8.1	81.82	81.43	0.48
			10.2	148.91	116.92	27.36
			15	320.77	186.98	71.55
			20	421.16	261.64	60.97
4	180x180	2	8.1	81.82	83.87	-2.44
			10.2	148.91	119.88	24.22
			15	320.77	189.79	69.02
			20	421.16	266.59	57.98
5	180x180	2	8.1	81.82	91.20	-10.29
			10.2	148.91	129.37	15.11
			15	320.77	200.02	60.37
			20	421.16	275.58	52.83
6.3	180x180	2	8.1	81.82	97.48	-16.06
			10.2	148.91	139.86	6.47
			15	320.77	214.92	49.25
			20	421.16	291.01	44.72
3.6	180x180	4	8.1	116.86	143.39	-18.50
			10.2	218.14	197.03	10.71
			15	514.27	297.95	72.60
			20	740.78	396.65	86.76
4	180x180	4	8.1	116.86	148.10	-21.09
			10.2	218.14	203.14	7.39
			15	514.27	313.49	64.04
			20	740.78	415.91	78.11
5	180x180	4	8.1	116.86	160.61	-27.24
			10.2	218.14	219.21	-0.49
			15	514.27	326.79	57.37
			20	740.78	430.19	72.20
6.3	180x180	4	8.1	116.86	178.32	-34.47
			10.2	218.14	233.60	-6.62
			15	514.27	350.51	46.72
			20	740.78	452.35	63.76

t_{HUP} [mm]	$l_p \times b_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{el}^* [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	250x100	2	8.1	18.21	39.66	-54.09
			10.2	35.73	61.98	-42.36
			15	103.89	114.18	-9.01
			20	202.82	170.39	19.03
4	250x100	2	8.1	18.21	40.57	-55.11
			10.2	35.73	63.41	-43.66
			15	103.89	117.00	-11.21
			20	202.82	173.29	17.04
5	250x100	2	8.1	18.21	42.99	-57.64
			10.2	35.73	67.39	-46.98
			15	103.89	122.25	-15.02
			20	202.82	178.14	13.85
6.3	250x100	2	8.1	18.21	46.58	-60.91
			10.2	35.73	71.23	-49.84
			15	103.89	130.27	-20.25
			20	202.82	188.38	7.66
3.6	250x100	4	8.1	18.34	56.01	-67.26
			10.2	36.30	84.64	-57.11
			15	110.20	149.18	-26.13
			20	234.57	228.76	2.54
4	250x100	4	8.1	18.34	59.90	-69.38
			10.2	36.30	86.83	-58.19
			15	110.20	150.68	-26.86
			20	234.57	229.17	2.35
5	250x100	4	8.1	18.34	62.51	-70.66
			10.2	36.30	92.73	-60.85
			15	110.20	161.29	-31.67
			20	234.57	242.36	-3.21
6.3	250x100	4	8.1	18.34	66.37	-72.37
			10.2	36.30	99.37	-63.47
			15	110.20	173.74	-36.57
			20	234.57	257.50	-8.90

F.2 Korreksjonsfaktor for Eurokode

F.2.1 Sammenligning av stivhet beregnet med Eurokode med lineær korreksjonsfaktor og Abaqus

Sammenheng mellom korrigerstivhet og stivhet beregnet med Eurokoden:

$$K_{EK,korr} = C \times K_{EK} \quad \text{der } C = C(l_p, t_p, b_p) \quad (\text{F.1})$$

Uttrykk for lineær korreksjonsfaktor:

$$C(b_p, l_p, t_p) = \left(-0.0717 \left(\frac{b_p}{l_p} \right) + 0.0694 \right) \left(\frac{b_p}{t_p} \right) + \left(0.3111 \left(\frac{b_p}{l_p} \right) - 0.0318 \right) \quad (\text{F.2})$$

Tabell F.2.1: Korrigert stivhet fra Eurokode og prosentvis avvik

t_{HUP} [mm]	$l_p \times b_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{EK} [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	C_{EK}	$K_{EK,korr}$ [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	180x80	2	8.1	210.368	75.015	0.541	113.760	51.65
			10.2	359.833	107.209	0.464	167.123	55.89
			15	645.844	163.398	0.370	239.120	46.34
			20	733.489	210.585	0.320	234.863	11.53
4	180x80	2	8.1	210.368	78.221	0.541	113.760	45.43
			10.2	359.833	110.253	0.464	167.123	51.58
			15	645.844	168.099	0.370	239.120	42.25
			20	733.489	214.486	0.320	234.863	9.50
5	180x80	2	8.1	210.368	86.388	0.541	113.760	31.68
			10.2	359.833	120.771	0.464	167.123	38.38
			15	645.844	160.264	0.370	239.120	49.20
			20	733.489	229.77	0.320	234.863	2.22
6.3	180x80	2	8.1	210.368	93.729	0.541	113.760	21.37
			10.2	359.833	130.782	0.464	167.123	27.79
			15	645.844	194.854	0.370	239.120	22.72
			20	733.489	244.484	0.320	234.863	-3.94
3.6	180x80	4	8.1	225.523	115.816	0.541	121.955	5.30
			10.2	413.251	157.194	0.464	191.933	22.10
			15	910.63	234.997	0.370	337.156	43.47
			20	1221.979	301.135	0.320	391.278	29.93
4	180x80	4	8.1	225.523	120.652	0.541	121.955	1.08
			10.2	413.251	164.35	0.464	191.933	16.78
			15	910.63	243.897	0.370	337.156	38.24
			20	1221.979	311.075	0.320	391.278	25.78
5	180x80	4	8.1	225.523	133.835	0.541	121.955	-8.88
			10.2	413.251	181.127	0.464	191.933	5.97
			15	910.63	264.777	0.370	337.156	27.34
			20	1221.979	335.599	0.320	391.278	16.59
6.3	180x80	4	8.1	225.523	145.293	0.541	121.955	-16.06
			10.2	413.251	196.557	0.464	191.933	-2.35
			15	910.63	288.484	0.370	337.156	16.87
			20	1221.979	357.534	0.320	391.278	9.44

t_{HUP} [mm]	$l_p \times b_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{EK} [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	C_{EK}	$K_{EK,korr}$ [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	180x100	2	8.1	254.526	79.003	0.570	144.992	83.53
			10.2	422.642	110.292	0.495	208.998	89.49
			15	704.969	164.118	0.402	283.217	72.57
			20	764.197	218.273	0.352	269.354	23.40
4	180x100	2	8.1	254.526	81.244	0.570	144.992	78.46
			10.2	422.642	113.201	0.495	208.998	84.63
			15	704.969	169.505	0.402	283.217	67.08
			20	764.197	222.849	0.352	269.354	20.87
5	180x100	2	8.1	254.526	88.074	0.570	144.992	64.62
			10.2	422.642	122.653	0.495	208.998	70.40
			15	704.969	179.41	0.402	283.217	57.86
			20	764.197	231.43	0.352	269.354	16.39
6.3	180x100	2	8.1	254.526	94.062	0.570	144.992	54.14
			10.2	422.642	132.706	0.495	208.998	57.49
			15	704.969	195.387	0.402	283.217	44.95
			20	764.197	248.252	0.352	269.354	8.50
3.6	180x100	4	8.1	277.051	133.692	0.570	157.823	18.05
			10.2	498.296	179.359	0.495	246.409	37.38
			15	1032.758	262.306	0.402	414.905	58.18
			20	1309.654	326.836	0.352	461.609	41.24
4	180x100	4	8.1	277.051	137.865	0.570	157.823	14.48
			10.2	498.296	184.919	0.495	246.409	33.25
			15	1032.758	267.891	0.402	414.905	54.88
			20	1309.654	335.982	0.352	461.609	37.39
5	180x100	4	8.1	277.051	146.1	0.570	157.823	8.02
			10.2	498.296	200.909	0.495	246.409	22.65
			15	1032.758	284.162	0.402	414.905	46.01
			20	1309.654	349.392	0.352	461.609	32.12
6.3	180x100	4	8.1	277.051	-	0.570	157.823	-
			10.2	498.296	212.009	0.495	246.409	16.23
			15	1032.758	308.504	0.402	414.905	34.49
			20	1309.654	374.625	0.352	461.609	23.22

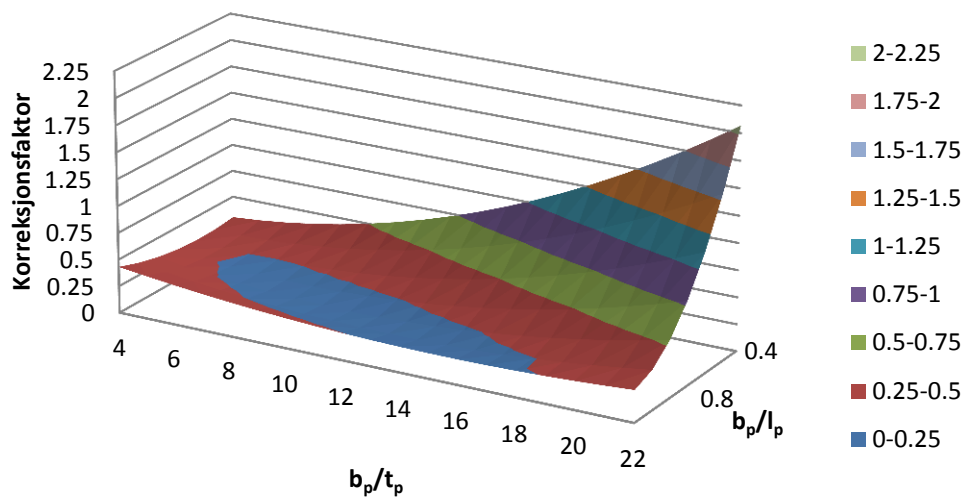
t_{HUP} [mm]	$l_p \times b_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{EK} [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	C_{EK}	$K_{EK,korr}$ [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	180x180	2	8.1	309.322	81.428	0.292	90.257	10.84
			10.2	495.658	116.917	0.302	149.843	28.16
			15	763.996	186.978	0.315	240.888	28.83
			20	792.187	261.637	0.322	255.243	-2.44
4	180x180	2	8.1	309.322	83.869	0.292	90.257	7.62
			10.2	495.658	119.879	0.302	149.843	25.00
			15	763.996	189.785	0.315	240.888	26.93
			20	792.187	266.59	0.322	255.243	-4.26
5	180x180	2	8.1	309.322	91.201	0.292	90.257	-1.04
			10.2	495.658	129.367	0.302	149.843	15.83
			15	763.996	200.016	0.315	240.888	20.43
			20	792.187	275.581	0.322	255.243	-7.38
6.3	180x180	2	8.1	309.322	97.477	0.292	90.257	-7.41
			10.2	495.658	139.863	0.302	149.843	7.14
			15	763.996	214.916	0.315	240.888	12.08
			20	792.187	291.011	0.322	255.243	-12.29
3.6	180x180	4	8.1	458.662	143.392	0.292	133.832	-6.67
			10.2	774.525	197.034	0.302	234.148	18.84
			15	1345.47	297.947	0.315	424.227	42.38
			20	1495.621	396.652	0.322	481.889	21.49
4	180x180	4	8.1	458.662	148.1	0.292	133.832	-9.63
			10.2	774.525	203.135	0.302	234.148	15.27
			15	1345.47	313.494	0.315	424.227	35.32
			20	1495.621	415.911	0.322	481.889	15.86
5	180x180	4	8.1	458.662	160.611	0.292	133.832	-16.67
			10.2	774.525	219.206	0.302	234.148	6.82
			15	1345.47	326.792	0.315	424.227	29.82
			20	1495.621	430.188	0.322	481.889	12.02
6.3	180x180	4	8.1	458.662	178.318	0.292	133.832	-24.95
			10.2	774.525	233.603	0.302	234.148	0.23
			15	1345.47	350.513	0.315	424.227	21.03
			20	1495.621	452.35	0.322	481.889	6.53

t_{HUP} [mm]	$l_p \times b_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	K_{EK} [kN/mm]	K_{aba} [kN/mm]	C_{EK}	$K_{EK,korr}$ [kN/mm]	Avvik [%]
3.6	250x100	2	8.1	72.247	39.664	0.659	47.608	20.03
			10.2	136.423	61.984	0.555	75.777	22.25
			15	335.642	114.183	0.428	143.556	25.72
			20	508.375	170.387	0.360	182.934	7.36
4	250x100	2	8.1	72.247	40.57	0.659	47.608	17.35
			10.2	136.423	63.414	0.555	75.777	19.50
			15	335.642	117.002	0.428	143.556	22.70
			20	508.375	173.294	0.360	182.934	5.56
5	250x100	2	8.1	72.247	42.987	0.659	47.608	10.75
			10.2	136.423	67.385	0.555	75.777	12.45
			15	335.642	122.246	0.428	143.556	17.43
			20	508.375	178.139	0.360	182.934	2.69
6.3	250x100	2	8.1	72.247	46.579	0.659	47.608	2.21
			10.2	136.423	71.23	0.555	75.777	6.38
			15	335.642	130.265	0.428	143.556	10.20
			20	508.375	188.381	0.360	182.934	-2.89
3.6	250x100	4	8.1	73.954	56.011	0.659	48.732	-12.99
			10.2	143.453	84.637	0.555	79.682	-5.85
			15	395.39	149.184	0.428	169.111	13.36
			20	703.21	228.755	0.360	253.043	10.62
4	250x100	4	8.1	73.954	59.901	0.659	48.732	-18.65
			10.2	143.453	86.827	0.555	79.682	-8.23
			15	395.39	150.678	0.428	169.111	12.23
			20	703.21	229.173	0.360	253.043	10.42
5	250x100	4	8.1	73.954	62.512	0.659	48.732	-22.04
			10.2	143.453	92.728	0.555	79.682	-14.07
			15	395.39	161.286	0.428	169.111	4.85
			20	703.21	242.358	0.360	253.043	4.41
6.3	250x100	4	8.1	73.954	66.372	0.659	48.732	-26.58
			10.2	143.453	99.368	0.555	79.682	-19.81
			15	395.39	173.741	0.428	169.111	-2.66
			20	703.21	257.499	0.360	253.043	-1.73

F.2.2 Sammenligning av stivhet beregnet med Eurokode med 2. grads korreksjonsfaktor og Abaqus

Uttrykk for 2.grads korreksjonsfaktor:

$$\begin{aligned}
 C(b_p, l_p, t_p) = & \left(-0.0036 \left(\frac{b_p}{l_p} \right)^2 - 0.000008 \left(\frac{b_p}{l_p} \right) + 0.0051 \right) \left(\frac{b_p}{t_p} \right)^2 \\
 & + \left(0.2931 \left(\frac{b_p}{l_p} \right)^2 - 0.4552 \left(\frac{b_p}{l_p} \right) + 0.1158 \right) \left(\frac{b_p}{t_p} \right) \\
 & + \left(-0.2575 \left(\frac{b_p}{l_p} \right)^2 + 0.8367 \left(\frac{b_p}{l_p} \right) + 0.0140 \right)
 \end{aligned} \tag{F.3}$$



Figur F.2.1: Korreksjonsfaktor med 2. grads tilpassning, flate i rommet

Tabell F.2.2: Prosentvis avvik mellom stivhet beregnet med korrigert Eurokode og Abaqus

$l_p \times b_p$ [mm]	Antall bolter	t_p [mm]	b_p/t_p	Avvik %			
				80x80x3.6	80x80x4	80x80x5	80x80x6.3
80x180	2	8.1	9.88	34.65	29.13	16.93	7.77
		10.2	7.84	27.65	24.13	13.32	4.65
		15	5.33	21.40	18.00	23.77	1.80
		20	4	1.26	-0.58	-7.20	-12.78
80x180	4	8.1	9.88	-6.50	-10.25	-19.09	-25.47
		10.2	7.84	-0.01	-4.37	-13.22	-20.04
		15	5.33	19.01	14.67	5.63	-3.05
		20	4	17.97	14.20	5.85	-0.64
100x180	2	8.1	12.3	38.86	35.03	24.56	16.63
		10.2	9.8	24.62	21.42	12.06	3.57
		15	6.7	14.09	10.46	4.37	-4.17
		20	5	-6.93	-8.84	-12.22	-18.17
100x180	4	8.1	12.3	-10.68	-13.38	-18.26	-
		10.2	9.8	-9.65	-12.37	-19.34	-23.56
		15	6.7	4.57	2.39	-3.47	-11.09
		20	5	6.52	3.62	-0.35	-7.06
180x180	2	8.1	22.2	14.38	11.05	2.12	-4.45
		10.2	17.6	2.08	-0.45	-7.75	-14.67
		15	12	3.15	1.63	-3.57	-10.26
		20	9	-9.97	-11.64	-14.52	-19.06
180x180	4	8.1	22.2	-3.69	-6.75	-14.01	-22.55
		10.2	17.6	-5.35	-8.19	-14.93	-20.17
		15	12	14.00	8.35	3.94	-3.10
		20	9	12.12	6.93	3.38	-1.69
100x250	2	8.1	12.3	37.92	34.84	27.26	17.45
		10.2	9.8	21.48	18.74	11.75	5.72
		15	6.7	11.46	8.77	4.11	-2.30
		20	5	-3.46	-5.07	-7.66	-12.68
100x250	4	8.1	12.3	-0.02	-6.51	-10.42	-15.63
		10.2	9.8	-6.45	-8.81	-14.61	-20.32
		15	6.7	0.50	-0.50	-7.05	-13.71
		20	5	-0.53	-0.71	-6.11	-11.63

Gjennomsnittlig avvik	Største positive avvik	Største negative avvik	Standardavvik
1.21	38.86	-25.47	14.48

Alle tall i tabellen er i %.

