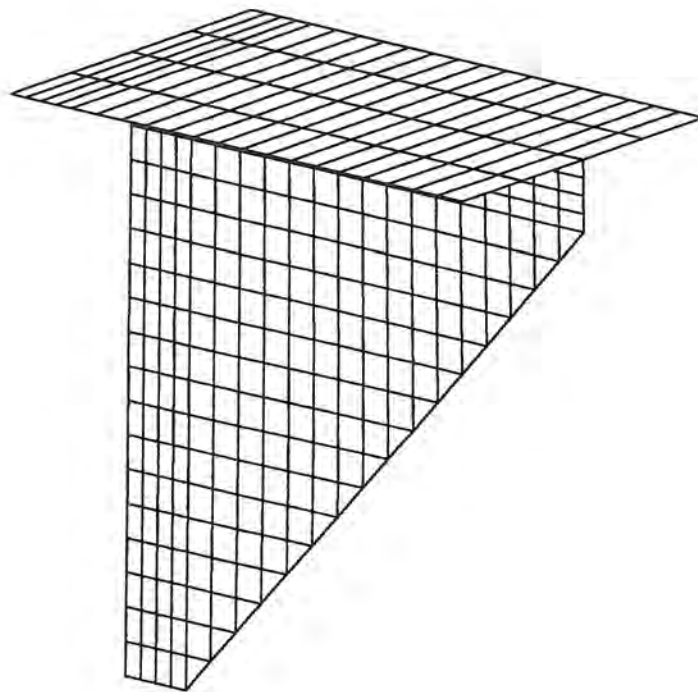


Prosjektoppgåve i fag 37033

Våren 1997

Konsollplater



Utført av

Nils Ystaas Langballe

Prosjektoppgave våren 1997 for stud techn Nils Ystaas Langballe

KONSOLLPLATER

Konsollplater og konsoller (braketter, eng. brackets) brukes for det meste i industribygg og verksteder som oppleggsdetaljer for f eks kranbanebjelker og annet. En typisk konsoll montert på en søyle er utført med en vertikalstilt utstikkende plan stålplate (konsollplate) sveiset til en veggstøyle med en liggende stålplate sveist oppå og festet til søylen. Konsollplaten og den liggende stålplaten danner dermed et T-tverrsnitt. Lasten ligger direkte oppå dette T-tverrsnittet, og overføres til veggstøylen ved skive (trykk) spenninger i den vertikale konsollplaten.

Det eksisterer noen enkle dimensjoneringsregler for slike forbindelser, men det synes ikke å være gjort særlig omfattende forsøk.

Oppgaven inneholder følgende punkter:

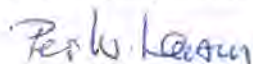
1. Studenten skal sette seg inn i og gjøre rede for relevant litteratur for dimensjonering og utforming av konsoller som beskrevet over.
2. Det skal velges ut en interessant geometri for en konsoll for prøvning i laboratoriet. Det skal på forhånd gjøres beregninger for å finne konsollenes kapasitet.
3. Ved hjelp av elementprogrammet ABAQUS skal det etableres en elementmodell og utføres analyser for noen av de valgte geometrier (veileder etablerer en enkel modell som kun behøver små justeringer).
4. Det skal gjennomføres forsøk for å studere oppførsel og bruddlastkapasitet til konsollene.
5. De utførte forsøk, samt nødvendige materialforsøk, skal bearbeides og rapporteres (bl.a med kurver).
6. Det skal gjøres sammeligning mellom eksisterende regler og forsøksdataene, og resultater fra elementanalysene.

Besvarelsen skal utformes som en forskningsrapport, og det legges stor vekt på en klar og oversiktlig fremstilling.

Oppgaven skal leveres ved Institutt for konstruksjonsteknikk innen 30. april 1997.

Faglærer: Professor Per Kr Larsen
Veileder: Dr.ing Arne Aalberg

Trondheim, 1. februar 1997



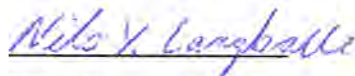
Per Kr Larsen
faglærer

Forord

Dette er rapporten min frå ei prosjektoppgåve innan fagområdet stålkonstruksjoner ved Institutt for konstruksjonsteknikk. Bakgrunnen for oppgåva er at dei berekningsmetodane for konsollar som er i bruk i dag antas å være konservative og at ein av tilgjengeleg litteratur ser at det ikkje er utført mange forsøk på dette temaet. Derfor har eg gjennomført nokre laboratorieforsøk som eg så har etterrekna både manuelt og numerisk. For den numeriske delen er det utarbeida ein elementmodell av konsollen i dataprogrammet ABAQUS. Formålet var å kome fram til ein konklusjon om kor vidt dei gjeldande berekningsreglane var for konservative eller ikkje, om ein kan forutseie oppførselen ved hjelp av ikkjelineære numeriske analysar, og eventuelt forslag til forbetringar av dagens reglar.

Eg vil retta ein stor takk til dr.ing Arne Aalberg som har veileda arbeidet med oppgåva.

Trondheim 29/4 1997



Nils Ystaas Langballe

Innholdsliste

FORORD	I
FIGURLISTE	III
SAMANDRAG	IV
1. Innleiing	1
2. Belastningssituasjon og geometri	2
3. Eksisterande dimensjoneringsreglar	3
3.1 <i>Ulike modellar</i>	3
3.1.1 Modell 1	3
3.1.2 Modell 2	8
3.1.3 Modell 3	9
3.2 <i>Berekningsseksempel</i>	11
4. Laboratorieforsøk	12
4.1 <i>Forsøksoppstilling</i>	12
4.2 <i>Forsøk 1. 3 mars 1997</i>	13
4.3 <i>Forsøk 2. 8.april 1997</i>	15
5. FEM modellering og analysar	17
5.1 <i>Oppbygging av skallmodellen</i>	17
5.2 <i>Resultat</i>	19
5.2.1 <i>Formfeilens betydning for konsollen sin kapasitet</i>	19
5.2.2 <i>Betydning av lastinnføringsmetode</i>	20
6. Samanligning av dei ulike resultata	22
6.1 <i>Forsøk 1</i>	22
6.2 <i>Forsøk 2</i>	23
7. Konklusjon	25
8. Referansar	26
Vedlegg A: Berekningsseksempel	
Vedlegg B: Foto frå laboratorieforsøka	
Vedlegg C: Materialkurver	
Vedlegg D: ABAQUS modell - filer (input)	

Figurliste

Figur 1: Ulike måtar å belaste ein konsoll.	2
Figur 2: Ulike geometriske utformingar for stegplata til konsollen.	2
Figur 3: Definisjonsskisse for konsoll.	4
Figur 4: Verdier av $b/t \sqrt{f_y}$ som funksjon av b/a- forholdet som sikrar at ein oppnår flytning på den frie kanten før plateknekking oppstår.	5
Figur 5: Verdier av Z som funksjon av ulike b/a- forhold, slik at ein oppnår største spenning (f_y) på den frie kanten. Knekking er her utelatt og må kontrollerast separat.	6
Figur 6: Modell for berekning av plastisk kapasitet.	7
Figur 7: Forenkla modell for berekning av kapasitet når avstanden $(b/2 + e) > 0.5b$	8
Figur 8: Forenkla modell for kapasitetsberekning.	9
Figur 9: Konsoll utforma med stiverplate langs alle dei frie rendene.	10
Figur 10: Konsoll utforma med ei enkel stiverplate.	10
Figur 11: Skisse av forsøksoppstillinga.	12
Figur 12: Eksakt geometri til forsøk 1, tjukelsen til vertikalplata var 8.1 mm.	13
Figur 13: Last- forskyvningsdiagram for forsøk 1, $t=8.1$ mm.	14
Figur 14: Eksakt geometri til forsøk 2, tjukkelsen til vertikalplata var 5.9 mm.	15
Figur 15: Last- forskyvningsdiagram for forsøk 2, $t=5.9$ mm.	16
Figur 16: Verkeleg elementinndeling for konsollen.	17
Figur 17: Skisse av skall- elementa og nummereringa av nodane.	18
Figur 18: Skisse av konsollen der lasta vert innført via ei belastningsplate.	19
Figur 19: Figuren viser formfeilen sin innverknad på konsollen sin oppførsel og kapasitet.	20
Figur 20: Figuren viser konsollen sin respons på ulik lastpåføring.	21
Figur 21: Samanligning av forsøk 1 (8 mm) og FEM- analyse.	22
Figur 22: Samanligning av forsøk 2 (6 mm) og FEM- analyse.	23

Samandrag

Hensikten med dette prosjektarbeidet var å finne ut noko om sikkerheiten ved dei berekningsmodellane som vert brukt ved dimensjonering av konsollplater. Det er tatt utgangspunkt i ein valgt geometri og så utført to laboratorieforsøk. Resultata frå forsøka er etterrekna både manuelt og numerisk. For den numeriske delen vart det oppretta ein elementmodell i dataprogrammet ABAQUS der både ikkjelineær materialoppførsel og ikkjelineær geometri vart tatt hensyn til. Det vart samtidig utført analysar for å kartlegge horisontalplata sin lastfordelende effekt, samt formfeilen sin betydning for konsollen sin kapasitet.

Noko overraskande kom analyseresultata frå ABAQUS ut med ein kapasitet som berre var omlag 70 % av det som var oppnådd i laboratoriet. Mykje av grunnen til dette avviket kan muligens kome av at ein har hatt spesielt gunstige forsøksbetingelsar med betre støtte for plata i verkelegheiten enn samanligna med elementmodellen i den numeriske analysen. Det kan også skuldast at resultata er basert på kun to laboratorieforsøk slik at statistiske variasjonar ikkje er ivaretatt, slik at ein med fleire forsøk kunne fått betre samsvar mellom forsøk og analyse.

Resultata frå analysane med ulike formfeil viste at små formfeil, 0.1 - 0.5 mm, ikkje hadde nokon betydning for verken oppførsel eller kapasitet for konsollen. Ein auke i formfeilen frå 0.5 til 3.0 mm gav derimot ein reduksjon i konsollen sin berekningsmessige kapasitet på omlag 19 %. Dette kunne ein og forvente ettersom knekkings- tendensen vil auke med aukande formfeil.

Samanligningane av dei ulike resultata syner at dagens berekningsmodellar gir ein kapasitet som ligg i området 25 - 30 % av konsollen sin kapasitet funne i laboratorieforsøka.

Generelt må det alltid ligge ein viss konservativitet bak manuelle berekningsmodellar. Det kan synast rimeleg å godta alle modellar som resulterer med ein kapasitet som ikkje er vesentleg mindre enn 50 % av verkeleg bruddlast. Med forbehold for statistiske variasjonar vil eg ut frå denne vurderinga konkludere med at dagens reknemodellar er meir konservative enn nødvendig.

1. Innleiing

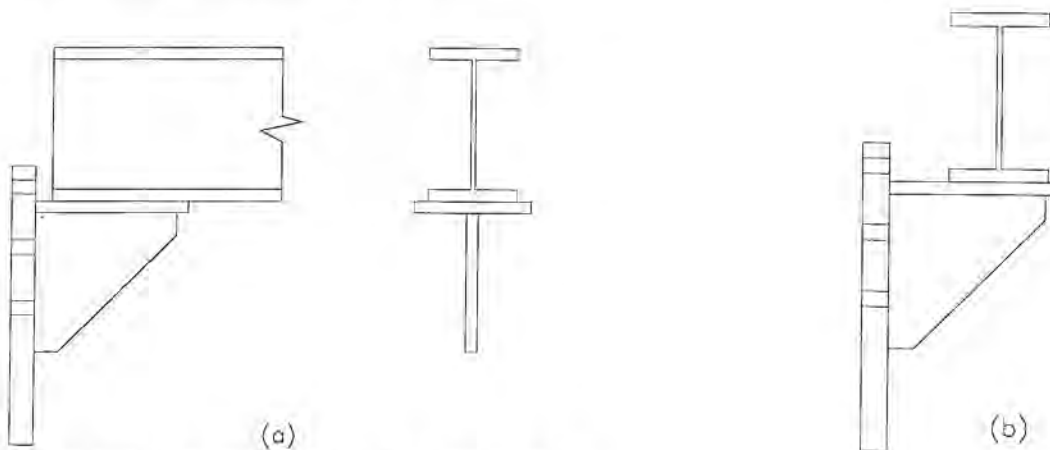
Konsollar vert fyrst og fremst brukt til opplegg for bjelkar og kran- banar i industribygg. Dei er som regel utforma som ein T, med ei horisontal plate på toppen og ei vertikal plate som er sentrert under denne. Konsollane er som regel festa til ei søyle og denne forbindelsen kan enten vere utført med ei sveise- eller bolte- gruppe.

Oppførselen til trekanta konsollplater har opp gjennom åra vore synt heller liten oppmerksomheit. I mange år var dimensjoneringa av slike plater reint empirisk uten bruk av teori eller omfattande forsøk. I tvils-tilfelle vart det lagt inn anten ein vinkel eller ein stiver langs diagonalen, dette for å redusere faren for plateknekking på grunn av manglande kunnskap på området¹. I begynnelsen av 60- åra vart oppførselen til triangulære konsollplater studert analytisk av Salmon³ og eksperimentelt av Salmon, Buettner og O`Sheridan⁴. På grunnlag av dette utvikla Beedle i etterkant forslag til dimensjoneringsreglar⁵. Reglane har i seinare tid vorte modifisert av Salmon og Johnson¹.

Dei berekningsmetodane for konsollar som er i bruk i dag vert tildels ansett for å være for konservative, og ein veit ikkje kor stor overkapasitet (sikkerheit) som er innebygd. På bakgrunn av dette vil eg her ta for meg trekant- forma konsollplater og sjå nærmare på dei eksisterande berekningsreglane på dette området. Vidare skal eg gjennomføre nokre laborieforsøk som eg så skal etterrekne både manuelt og numerisk. For den numeriske delen skal dataprogrammet ABAQUS benyttast. Formålet er å kome fram til ein konklusjon om kor vidt dei gjeldande berekningsreglane er for konservative eller ikkje, og eventuelt forslag til forbetringar av dagens reglar.

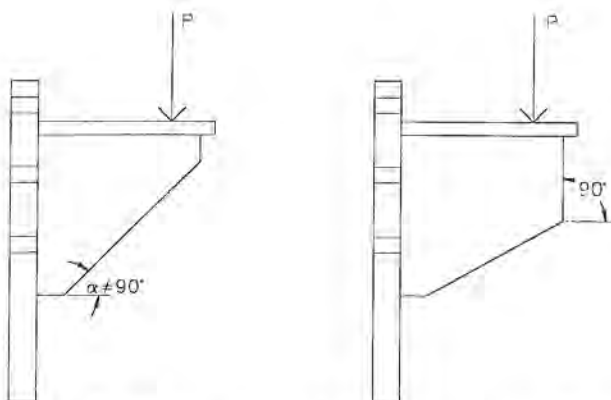
2. Belastningssituasjon og geometri

Det er to prinsipielt ulike måtar å belasta konsollar på. Den mest vanlege er at lasta vert ført inn på konsollen frå ein bjelke der bjelkesteget er orientert parallelt med stegplata til konsollen (Figur 1a). I det andre tilfellet er bjelken rotert 90° , slik at den ligg med bjelkesteget på tvers av stegplata til konsollen (Figur 1b).



Figur 1: Ulike måtar å belaste ein konsoll.

Vidare vil den geometriske utforminga til konsollen ha stor betydning for oppførselen. Ein kan dele konsollane inn i to kategoriar. Ein for konsollar der den vertikale plata er forma som ei triangulær plate (Figur 2a), og ein annan der vertikalplata er tilnærma rektangulær (Figur 1b). Konsollar som tilhøyrer kategorien med rektangel- forma vertikalplater har som regel så liten slankheit at plateknekking ikkje er noko stort problem. Stegplata vil her oppføre seg som eit uavstiva element og plateknekking kan hindrast ved kontroll etter NS 3472. Konsollar i den andre kategorien vil derimot vere svært utsett for plateknekking og andre metodar må nyttast\1\.



Figur 2: Ulike geometriske utformingar for stegplata til konsollen.

I dette prosjektet har ein begrensa seg til å betrakte konsollar med triangulære vertikalplater og belastning vinkelrett på denne (Figur 1b).

3. Eksisterande dimensjoneringsreglar

Ved dimensjonering av trekantforma konsollplater er det i hovudsak to forhold som har betydning for plata sin kapasitet. Det avgjerande er spenningsfordelinga og stabiliteten til plata.

Det har vist seg at allerede før utbøying av plata inntreff, vil spenningsfordelinga i ei trekanta konsollplate være mykje meir komplisert enn i ei rektangulær plate med samme belastning over ei lik rand \5\ . Den originale teoretiske stabilitetsanalysen av konsollplater er bygd opp på grunnlag av teori om elastisk plateknekking. Ein teoretisk / numerisk analyse har vist at største spenning vil oppstå på den frie kanten og vil være avhengig av breidde / høgd- forholdet til plata \3\ . Dette er seinare og funne ved forsøk der ein i tillegg fann ut at flytning langs den frie kanten på grunn av aksialspenningar, vanlegvis vil inntreffe før utbøying av plata. Forsøket viste vidare at samtidig med begynnande flytning vil det starte ei omfordeling av spenningane, noko som i neste omgang har gitt grunnlag for berekningsforslag basert på plastisk dimensjonering \4\ .

På bakgrunn av det som er framkome gjennom desse analysane og forsøka, har ein ved dimensjonering basert seg på å oppnå b/h- forhold som sikrar flytning langs den frie kanten før plateknekking inntreff.

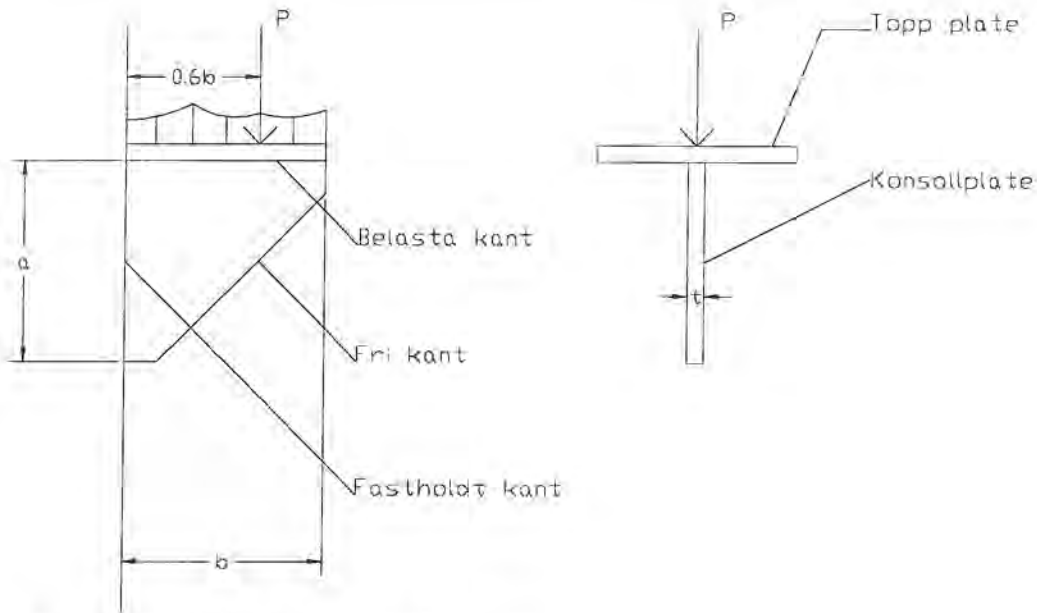
3.1 Ulike modellar

Det er utvikla fleire ulike modellar for berekning av kapasiteten til konsollplater. Ein enkel dimensjonering kan basere seg på knekking av ei tenkt platestripe i henhold til NS3472. Andre modellar har framkome som eit resultat av forsøk og numeriske analysar. Her fylgjer ein kort presentasjon av dei mest aktuelle berekningsmodellane.

3.1.1 Modell 1 \1\

Denne modellen er ein modifikasjon av Beedle sin originale modell presentert i \5\ , og er basert på fylgjande forutsetningar:

- Topp-plata er fast forbunde med søyla.
- Lasta er fordelt oppå topp-plata, men ikkje nødvendigvis jevnt over heile flata.
- Lastangrepspunktet er i avstand frå søyla $\leq 0.6b$.
- Forholdet mellom konsollplata sin breidde b og høgd a er i området $0.5 \leq b/a \leq 2.0$.



Figur 3: Definisjonsskisse for konsoll.

Elastisk dimensjonering:

Kontroll av stabilitet:

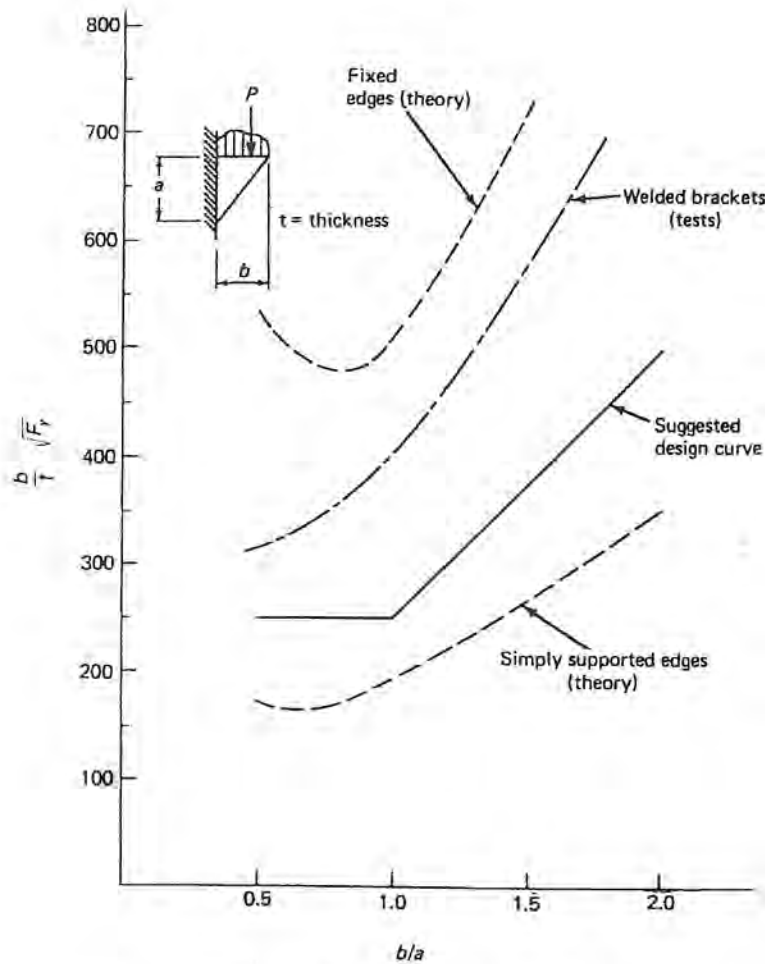
For å sikre at flytning langs den frie kanten oppstår før plateknekkning, er det med utgangspunkt i formelen for elastisk plateknekkning og ulike b/a -forhold, foretatte numeriske analyser. Ved å gi inn ulike randbetingelser har ein fått fram resultat for ytterpunktene. Øvre begrensning vil være gitt av å anta full innspenning langs dei to fastheldne rendene, på samme måte vil nedre begrensning være gitt av å anta ledd-lager. Konsollplater som er sveist langs dei to fastheldne rendene vil være nærmare full innspenning enn ledd-lager, dette er påvist ved forsøk. Resultata frå analyser samt forsøk kan framstillast grafisk (Figur 4).

På bakgrunn av dei resultatene som har framkomme av analysen og dei påfølgjande forsøka, er det utvikla eit konservativt forslag til bruk ved dimensjonering (Figur 4). Dette forslaget kan og uttrykkjast analytisk som:

$$\frac{b}{t} \leq \frac{656}{\sqrt{f_y}} \quad \text{for} \quad 0.5 \leq \frac{b}{a} \leq 1.0 \quad [3.1]$$

$$\frac{b}{t} \leq \frac{656(b/a)}{\sqrt{f_y}} \quad \text{for} \quad 1.0 < \frac{b}{a} \leq 2.0 \quad [3.2]$$

Reint praktisk betyr dette at tjukkleisen til konsollplata kan bestemast som funksjon av geometri og materialfastheit.



Figur 4: Verdier av $\frac{b}{t} \sqrt{f_y}$ som funksjon av b/a - forholdet som sikrar at ein oppnår flytning på den frie kanten før plateknekking oppstår.

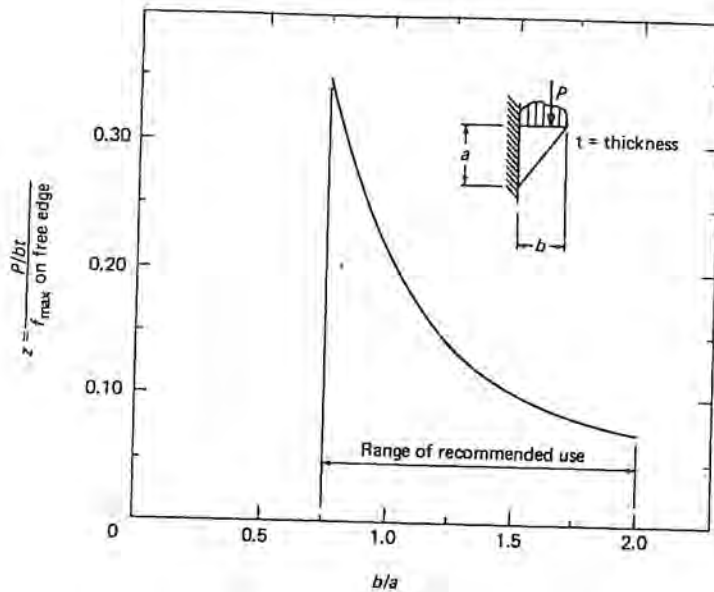
Dimensjonering for tillatte spenningar:

På grunn av den kompliserte spenningsfordelinga i konsollplata er det svært vanskeleg å stille opp eit uttrykk for spenningsane langs den frie kanten for det generelle tilfellet. I denne forbindelse er det definert ein størrelse Z , som er eit forhold mellom gjennomsnittleg spenning på den belasta flata (ovekanten av vertikalplata) og maksimal spenning på den frie kanten. Uttrykket for Z er kome fram som eit resultat av ein kurvetilpassning av resultata frå ein numerisk analyse. Forsøk har i ettertid vist at det var ein betydeleg sikkerheit mot kollaps, minst 1.6-utbøyningslasta, noko som medførte ei modifisering av uttrykket for Z .

$$Z = \frac{P/bt}{f_y} = 1.39 - 2.2 \left(\frac{b}{a}\right) + 1.27 \left(\frac{b}{a}\right)^2 - 0.25 \left(\frac{b}{a}\right)^3 \quad [3.3]$$

$$\Rightarrow \underline{P = b \cdot t \cdot f_y \cdot Z}$$

Dette uttrykket kan plottast grafisk og er då enkelt å bruke for praktiske formål (Figur 5).



Figur 5: Verdiar av Z som funksjon av ulike b/a- forhold, slik at ein oppnår største spenning (f_y) på den frie kanten. Knekking er her utelatt og må kontrollerast separat.

Plastisk dimensjonering:

Kontroll av stabilitet:

For å utvikle full plastisk kapasitet foreslo Beedle m.fl. at slankheits- forholdet b/t skulle setjast til 1/3 av grensene gitt i ligning 3.1 og 3.2, elastisk dimensjonering\5\ . Forsøk har i ettertid vist at det var ein betydeleg sikkerheit mot kollaps, minst 1.6 ganger lasta som gir utbøyning. På bakgrunn av dette foreslo Salmon/Johnson\1\ at det ville være meir realistisk å velge 1/2 av grensene gitt i ligning 3.1 og 3.2, altså:

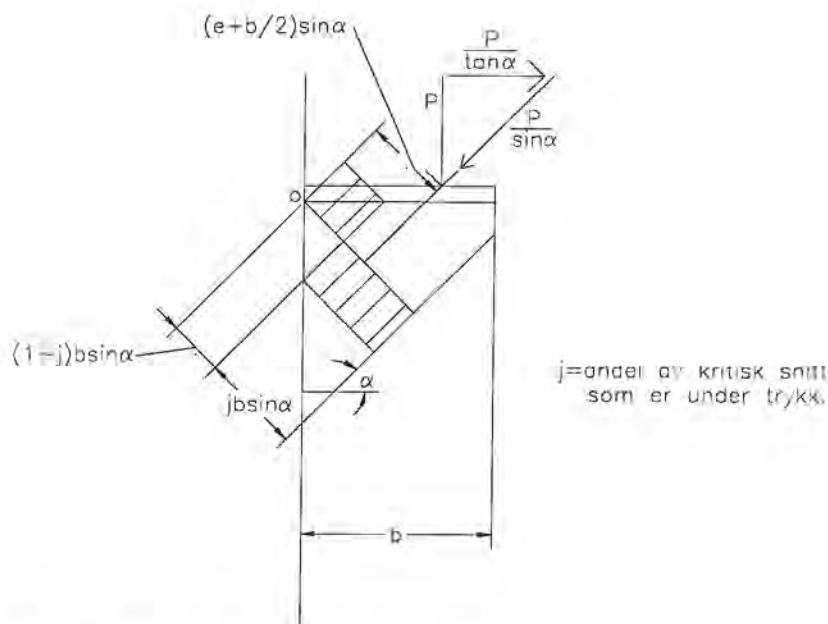
$$\frac{b}{t} \leq \frac{328}{\sqrt{f_y}} \quad \text{for} \quad 0.5 \leq \frac{b}{a} \leq 1.0 \quad [3.4]$$

$$\frac{b}{t} \leq \frac{328(b/a)}{\sqrt{f_y}} \quad \text{for} \quad 1.0 < \frac{b}{a} \leq 2.0 \quad [3.5]$$

Dimensjonering for tillatte spenningar:

Den plastiske kapasiteten til konsollplater kan bereknast ut frå metoden til Beedle m.fl. (Figur 6)\1\ . Denne metoden er basert på at kapasiteten kan bestemast ut frå full plastifisering langs den kritiske sonen (Figur 6). Ved så å ta momentlikevekt om punktet o, vil ein få fram ligninga for plastisk kapasitet:

$$P = f_y t \sin^2 \alpha \left[\sqrt{(4e^2 + b^2)} - 2e \right] \quad [3.6]$$



Figur 6: Modell for berekning av plastisk kapasitet.

Til slutt må ein kontrollere at topp- plata kan bære strekk- krafta: $\frac{P}{\tan \alpha}$

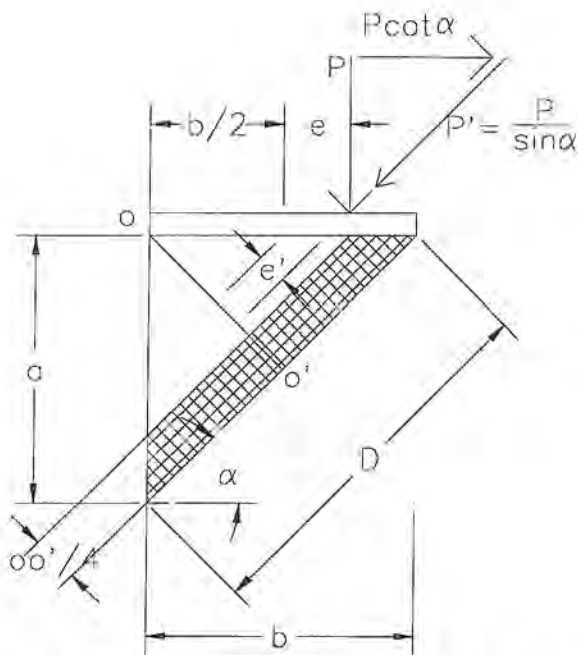
Forenkla dimensjonering:

Dersom konsollen er relativt liten synest det rimeleg at ein kan betrakte konsollplata som ein trykkflens og berekne tverrsnittsklasse etter vanlige dimensjoneringsstandarder f.eks. NS 3472. Dersom «flensen» (plata) er i tverrsnittsklasse 1 eller 2 vil det ikkje være fare for knekking og det vil då være tilstrekkeleg å kontrollere plata sin skjærkapasitet. Fell plata derimot inn under tverrsnittsklasse 3 eller 4 må ein ta hensyn til knekking og andre metodar må då benyttast. Tilsvarande kontrollar foreskrives og i \1\ , men då sjølvsagt etter gjeldande amerikanske dimensjoneringsstandardar.

3.1.2 Modell 2 \5\

Beedle sin originale modell for kapasitetsberekning av triangulære konsollplater er kun gjeldande så lenge resultanten angriper i ein avstand $\leq 0.5b$. Beedle hevda at dersom angrepspunktet nærma seg randa ville denne modellen verte usikker. Han presenterte derfor ein annan modell som burde brukast i tilfelle der avstanden ut til resultanten sitt angrepspunkt vart $> 0.5b$. I denne modellen foreslår Beedle at ein antar at plata oppfører seg som ei eksentrisk belasta søyle og at dei elementære bøyingsformlane kan brukast. Vidare kan ein anta at den frie kanten er påverka av krafta P' med ein eksentrisitet e' (Figur 7). Maksimal spenning i punktet o' er ved likevekt funnen til å være:

$$f_{\max} = \frac{P}{bt \sin^2 \alpha} \left(1 + \frac{6e}{b} \right) \quad [3.7]$$



Figur 7: Forenkla modell for berekning av kapasitet når avstanden $(b/2 + e) > 0.5b$

Plateknekking kan kontrollerast konservativt ved å anta at krafta P' angrip sentrisk i søylestripa skravert i Figur 7. Denne søylestripa har lengde D og arealet vert sett til $t \cdot (b \cdot \sin \alpha) / 4$. Beedle har ikkje sagt noko om innspenningsforhold for den skraverte søylestripa. Eg synest det kan virke fornuftig å anta innspenning i nedre kant og forskyveleg opplager i øvre kant. Knekk lengda vert då $0.7D$. Dette synest eg virkar å være ein svært konservativ modell av den grunn at ein ikkje tar hensyn til at «søyla» er støtta langs den eine randa, samtidig som ein kun reknar med $1/4$ av breidda i det kritiske snittet oo' .

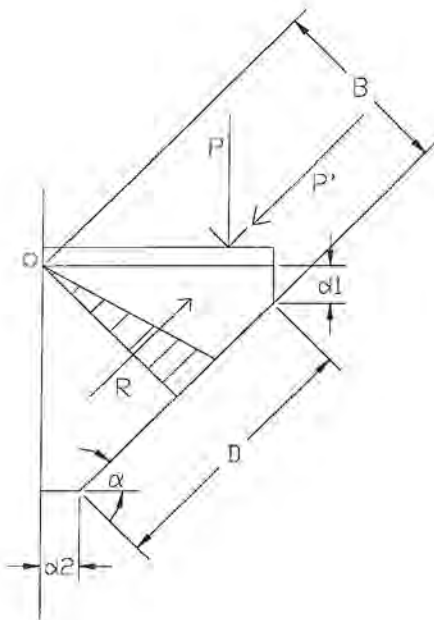
3.1.3 Modell 3 \2\

Forutsatt at topp-plata kan ta opp strekk-krafta, kan ei trekant fordeling av trykkspenningane også vere ei egna idealisering for konsollplata. I \2\ vert det påstått at dei elastiske trykkspenningane kan verte opp til 33% større enn berekna ut frå denne modellen. Denne mangelen på konservativitet påstås tatt vare på ved underestimering av trykk- kapasiteten. Denne underestimeringa av kapasitet har sin bakgrunn i at stiverplata i praksis delvis vil oppføre seg som ein utkrager og delvis som ei søyle. For dimensjoneringsformål er det tilstrekkeleg å kontrollere at plata bærer lasta ved å anta den eine av dei to bæremåtane. Den resulterande konservativiteten vil då vere større enn overbelastninga på grunn av forenklingane gjort ved spennings- idealiseringa over.

Kontroll av stabilitet:

Konsollplata sin stabilitet er basert på knekkingsteori for staver. Plateknekkning kontrolleres ved å anta at krafta P' angrip sentrisk i søylestripa med lengde D og breidde B (Figur 8)\2\ . Ved berekning av søyla sin slankheit antar ein knekk lengde lik $0.7D$, vidare benyttar ein knekkkurver gitt i vanlege dimensjoneringsstandarder. Kapasiteten med hensyn på knekking er då gitt av formelen:

$$\underline{P = tBf_k \sin \alpha} \quad [3.8]$$



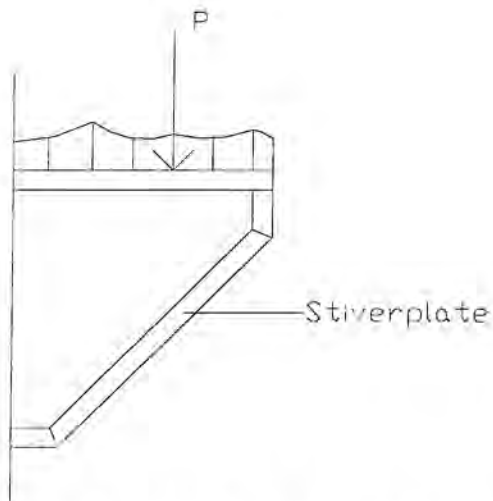
Figur 8: Forenkla modell for kapasitetsberekning.

Dimensjonering for tillatte spenninger:

Konsollplata sin kapasitet vert bestemt ved momentlikevekt ved den rettlinja spenningsfordelinga som vist i Figur 8.

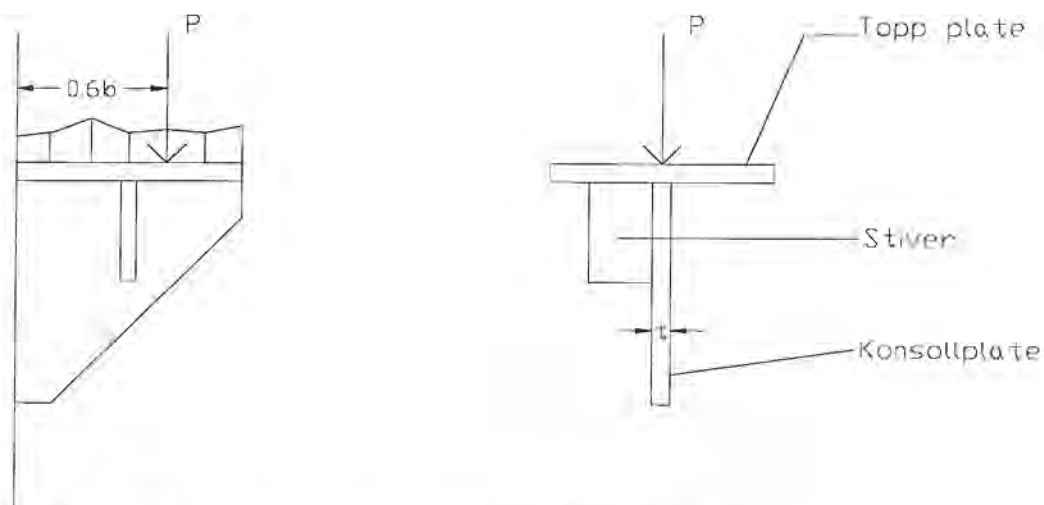
Dersom det er ynskjeleg å utforme stiverplata med konvekks rand synes det fornuftig å setje d_1/t og $d_2/t \leq 5.0$ \2\.

Dersom konsollen vert utforma med flensplate både i topp og botn (Figur 9), vil mange av problema ovanfor forsvinne. Dimensjoneringa kan då utførast som for ein vanleg utkragar, sjølv om den då er svært kort. Knekkningsmogelegheitene for vertikalplata vil då sjølvsagt være svært reduserte.



Figur 9: Konsoll utforma med stiverplate langs alle dei frie rendene.

Ein annan typisk utforming som finst er at konsollplata er avstiva med ei vertikal stiverplate som skissert på Figur 10. Ein slik utforming vil bidra til å auke konsollplata sin stivheit og dermed gi auka kapasitet med hensyn på plateknekking.



Figur 10: Konsoll utforma med ei enkel stiverplate.

3.2 Berekningsseksempel

For å få ei oversikt over korleis resultatane av dei ulike berekningsmodellane reint talmessig fordeler seg, har eg valgt ut ein typisk konsollutforming og berekna kapasiteten ved bruk av dei ulike modellane. Resultata frå berekningane (Vedlegg A) er gjengitt i Tabell 1.

Tabell 1.

Oversikt over konsollen sin kapasitet avhengig av valg av berekningsmodell og tjukkelse av konsollplata.

Tjukkelse	Modell 1 (kN)		Modell 2 (kN)		Modell 3 (kN)	
	Elastisk	Plastisk	Elastisk		Elastisk	
			Stabilitet	Tillatt spenning	Stabilitet	Tillatt spenning
6	-	-	12.5	148.8	56.7	169.7
7	131.8	-	18.6	173.5	87.0	198.1
8	150.6	-	27.0	198.3	120.6	226.4
10	188.2	-	45.2	247.9	202.5	283.0
12	225.9	-	64.3	297.5	297.0	339.6
14	263.5	566.2	87.4	347.1	396.3	396.2

Resultata viser at modell 2 gir relativt låg kapasitet med hensyn på stabilitet. Ein må her vere klar over at modell 2 er utvikla spesielt for tilfelle der resultantkrafta sitt angrepspunkt begynnar å nærme seg randa. I tilfelle der avstanden ut til resultantkrafta er større enn $0.6b$ er ikkje lenger modell 1 brukbar. Modell 2 er då eit alternativ men kan synast svært konservativ av grunnar nevnt under kapittel 3.1.2. Denne anelsen om overkonservativitet vert kraftig forsterka dersom ein samanliknar med modell 3 der det ikkje er begrensning på lastplasseringa. Her er kapasiteten med hensyn til stabilitet berekna med akkurat lik framgangsmåte som i modell 2. Forskjelen er at ein i modell 3 reknar med heile breidda i det kritiske snittet, og ikkje berre $\frac{1}{4}$ som i modell 2. På bakgrunn av dette kan ein konkludere med at modell 2 sannsynlegvis er overkonservativ og at modell 3 er å foretrekkje i tilfelle der avstanden $(b/2 + e) > 0.6b$.

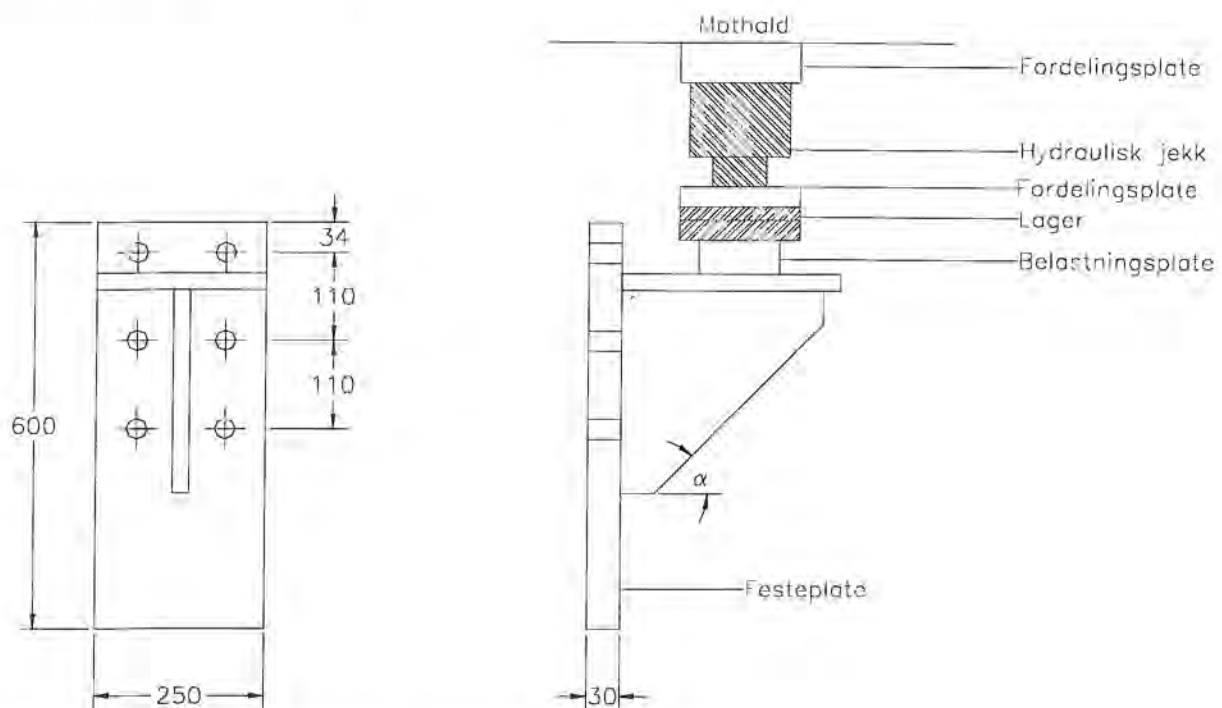
I tilfeller der $(b/2 + e) < 0.6b$ ser ein at for platetjukkelsane 10, 12 og 14 mm så vil modell 3 gi størst kapasitet. For mindre platetjukkelsar, 7 og 8 mm, så vil modell 1 gi størst kapasitet. Det kan sjå ut som at bakgrunnen for dette er at modell 3 er noko meir konservativ med tanke på plateknekking enn det modell 2 er (Tabell 1).

Vidare ser ein at den plastiske kapasiteten i modell 1 er omlag dobbel så stor som den elastiske kapasiteten. Dette virkar å vere svært mykje. Forklaringa på dette kan imidlertid vere at den elastiske kapasiteten er basert på noko konservative antakelsar.

4. Laborieforsøk

For å framskaffe data for å vurdere dei tre modellane er det utført forsøk på 2 konsoller med ulik tjukkelse på vertikalplata, henholdsvis 8 og 6 mm. Ein var i fyrste rekke ute etter å bestemme konsollane sin bruddlast og observere oppførselen under lastpåføringa.

4.1 Forsøksoppstilling



Figur 11: Skisse av forsøksoppstillinga.

Under forsøka vart konsollen sveist fast til ei festeplate som så vart montert til ein stiv bukk i laboriet. Forbindelsen vart utført som ein bolta friksjonsforbindelse og vart festa med 6 stk. M20 - 8.8 boltar (Figur 11). Boltane vart trekt til med vanleg tilsettingsmoment for slike skruer.

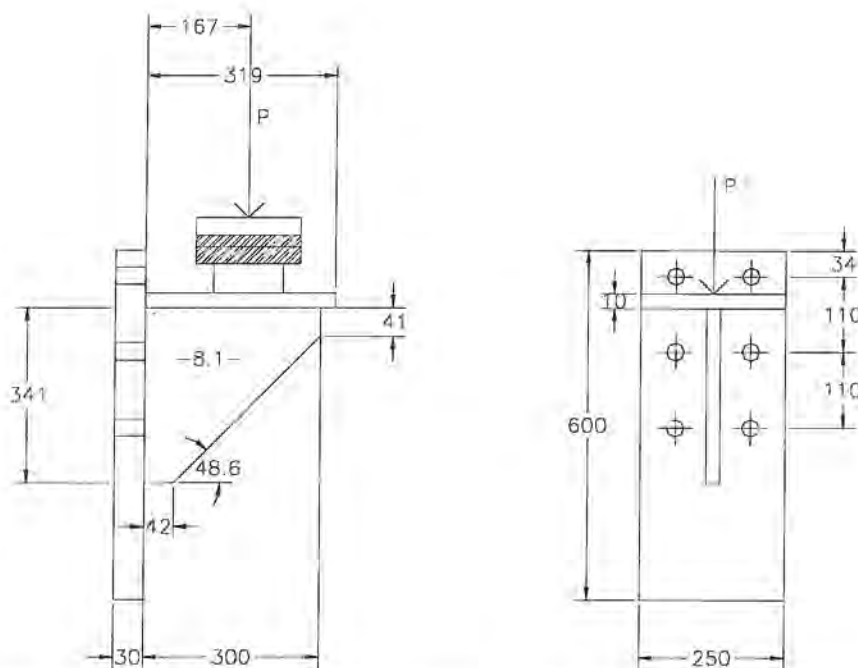
Ved valg av belastningsbreidde har ein prøvt å etterlikne virkningen av ein tversgåande bjelke. I praksis vil ei mogleg bøyning av bjelken sine flensar medføre at den effektive belastningsbreidda vert noko mindre enn sjølv breidda av bjelken. På bakgrunn av dette har ein her valt å belaste konsollen over ein breidde på 120 mm, noko som skulle tilsvare ein typisk utforming. I forsøksoppstillinga er dette ivaretatt ved at lasta vert overført til konsollen via ei belastningsplate (Figur 11).

For å sikre at ein har jevn belastning på konsollen gjennom heile forsøket har ein lagt inn eit sfærisk lager (Figur 11). Dette lageret vil ivareta jevn belastning over belastningsbreidda sjølv

om konsollen vert deformert, dette skjer ved at alle skjevstillingar vert tatt opp tilnerma friksjonslaust i lageret. Mellom det sfæriske lageret og jekken er det av praktiske årsaker lagt inn ei fordelingsplate. På toppen er det også lagt inn ei fordelingsplate, dette fordi motholdet består av to H-bjelkar (Figur 11). Jekken er ein 90 tonns Enerpak-jekk og den vart kalibrert før forsøket starta. Foto av forsøksoppstillinga er vist i Vedlegg B.

Nedbøyninga av konsollen ved lastpunktet vart målt manuelt ved hjelp av eit snorarrangement og eit måleaur.

4.2 Forsøk 1. 3 mars 1997



Figur 12: Eksakt geometri til forsøk 1, tjukelsen til vertikalplata var 8.1 mm.

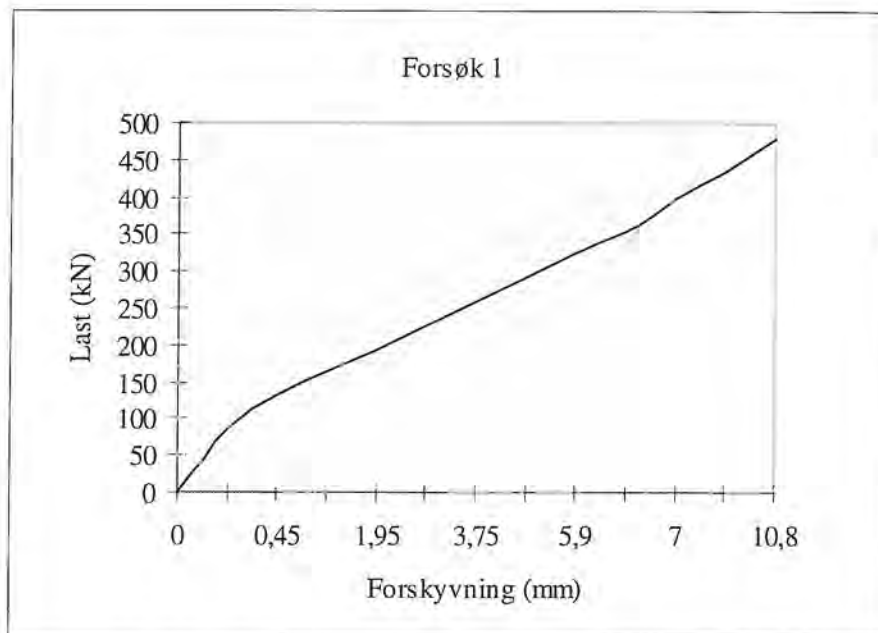
Generelt:

Lasta vart påført ved manuell styring.

Målingar:

Før forsøket starta vart den eksakte geometrien til konsollen målt opp. Ein prøvde også å måle formfeilen ved å legge ein rettholt langs diagonalen på konsollplata. Det viste seg imidlertid at formfeilen var så liten (ikkje synleg) at det var praktisk umogeleg å måle den.

Under forsøket vart det kontinuerlig målt forskyvning og last ved manuell avlesning (Figur 13).



Figur 13: Last- forskyvningsdiagram for forsøk 1, $t=8.1$ mm.

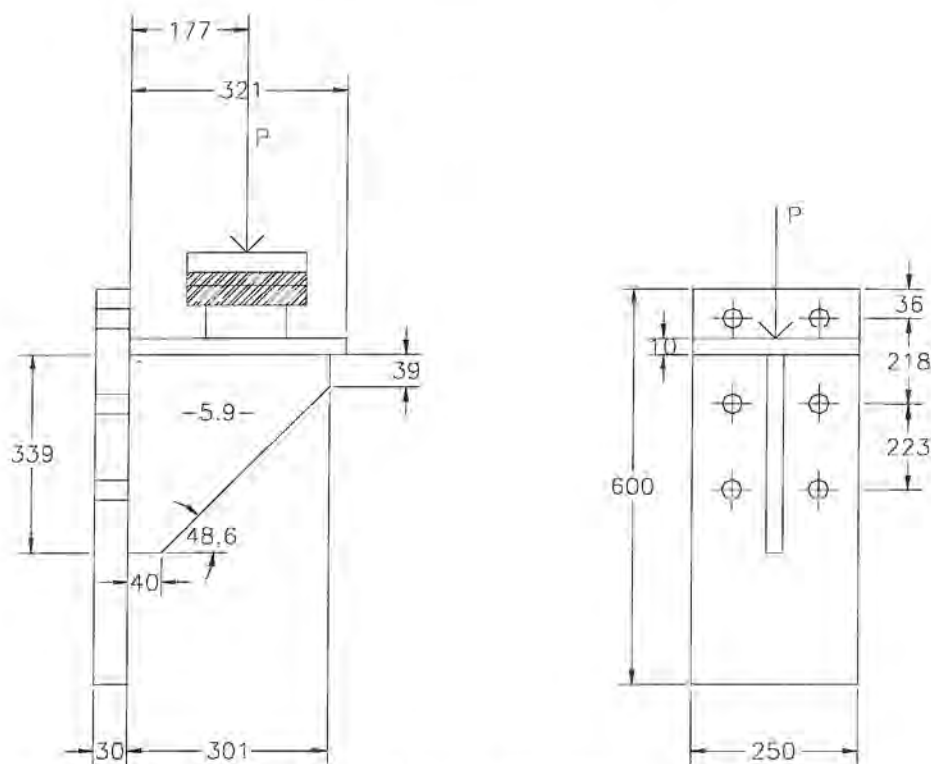
Observasjonar:

Det fyrste ein kunne observere var eit sprang i forskyvninga ved ei last omkring 155 kN. Dette var eit resultat av at friksjonen i forbindelsen mellom innspenningsbukken og plata som konsollen var sveist til vart overskriden. Forskyvningane som er plotta i figuren representerar derfor ikkje eit riktig bilete av deformasjonane i konsollen, og vart derfor i hovudsak berre brukt til å fylgje med om noko «dramatisk» skjedde undervegs. Ved ei last på 355 kN og ei nedbøyning på 6.35 mm, var utbøyninga av konsollplata fremdeles ikkje synleg (rettholdt måling).

Bruddet kom plutselig ved knekking av konsollplata. Største last påført vart målt til **478 kN**. Knekkdeformasjonen er vist i Vedlegg B.

4.3 Forsøk 2. 8.april 1997

I motsetning til forsøk 1 har ein i dette forsøket forhindra glidning mellom festeplata og bukken ved å støtte opp rett under konsollen med ei stålplate sett under festeplata. På denne måten vil ein unngå sprang i forskyvninga slik som observert på konsoll 1.



Figur 14: Eksakt geometri til forsøk 2, tjukkelsen til vertikalplata var 5.9 mm.

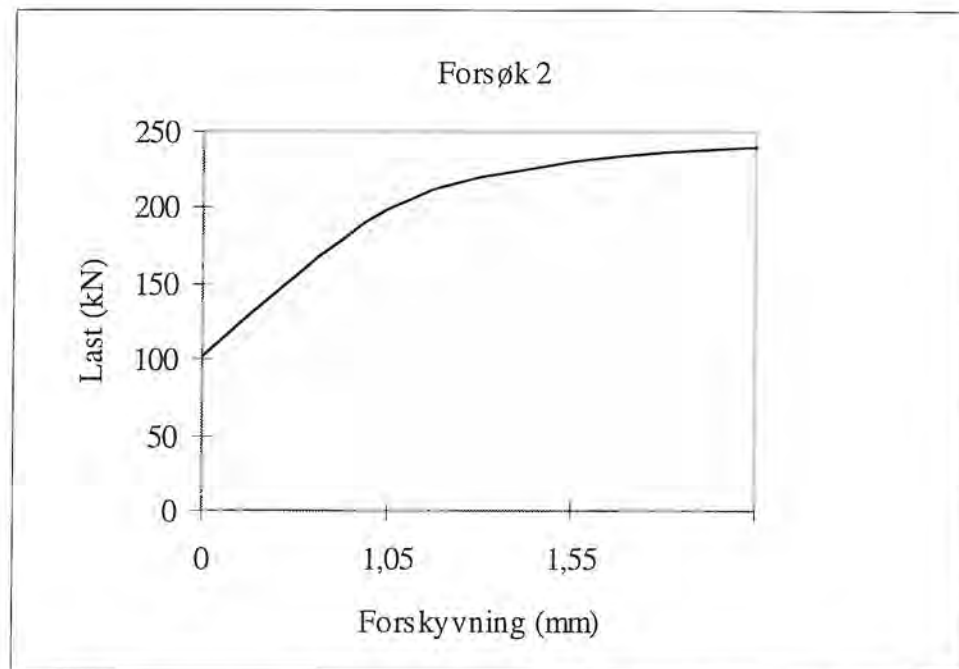
Generelt:

Lasta vart påført ved manuell styring.

Målingar:

Før forsøket starta vart den eksakte geometrien til konsollen målt opp. Formfeilen vart målt ved hjelp av rettholt og «følere», den vart her funnen til å være omlag 0.6 mm.

Under forsøket vart det kontinuerlig målt forskyvning og last ved manuell avlesning (Figur 15).



Figur 15: Last- forskyvningsdiagram for forsøk 2, t=5.9 mm.

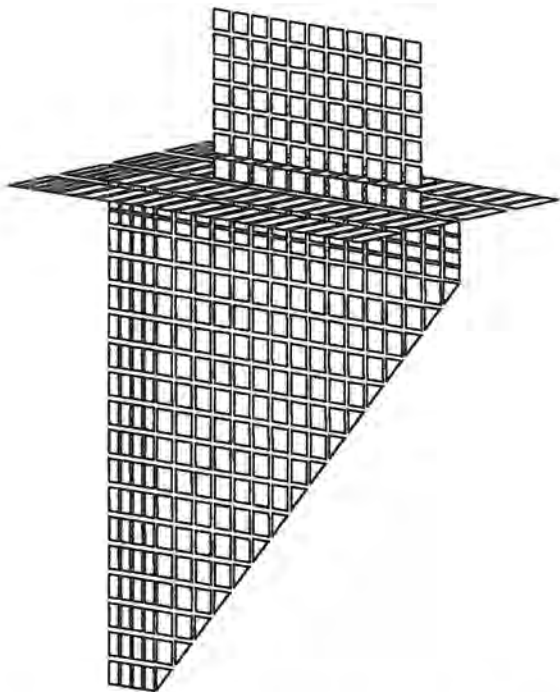
Observasjoner:

Det vart observert svært små deformasjonar før brudd (Figur 15). Ved ei last på 230 kN som var like under bruddlasta, vart forskyvninga målt til å være 1.55 mm. Bruddet kom plutselig ved knekking av konsollplata. Største last påført vart målt til **240 kN**. Knekkdeformasjonen er vist i foto i Vedlegg B.

5. FEM modellering og analysar

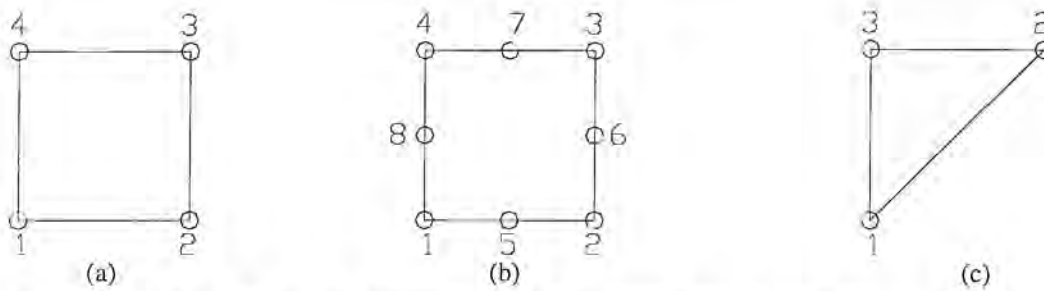
I denne delen har ein prøvt å etterrekne laboratorieforsøka. Formålet med desse numeriske simuleringane er å finne ut i kor stort omfang ein kan forutseie konsollen sin oppførsel, samt vurdere påliteligheten av resultatata frå analysen.

5.1 Oppbygging av skallmodellen



Figur 16: Verkeleg elementinndeling for konsollen.

Konsollen er bygd opp som ein skallmodell ved bruk av 4- noders skallelement (Figur 16). For å definere dei rektangulære elementa vart det i vertikalplata brukt S4R5 element (Figur 17a), mens det av praktiske grunnar vart brukt S8R5 element både i horisontalplata og lastplata (Figur 17b). Dette er Lagrange element med henholdsvis 4 og 8 nodar som kvar har 5 friheitsgrader effektivt (men 6 friheitsgrader der element møtest i vinkel). Vidare måtte ein og definere trekantelement langs den skrå randa, her vart det brukt STRI3 element (Figur 17c).

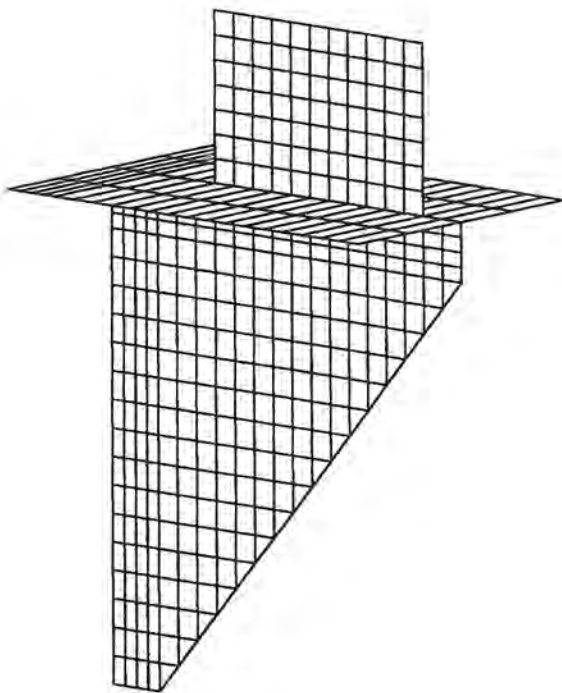


Figur 17: Skisse av skall- elementa og nummereringa av nodane.

For kvart enkelt laboratorieforsøk vart det utført strekk forsøk for å bestemme materialoppførselen til stålet i 8 mm og 6 mm plata. Det vart tatt ut prøvar både parallelt og på tvers av lastretninga. Resultata frå konsoll 1 (8 mm) er gjengitt i Vedlegg C i form av spennings-tøynings diagram. I analysen er materialoppførselen tatt vare på ved at det er lagt inn ein del valgte punkter på spennings-tøynings diagrammet. Verdiane som er brukt er eit middel av resultata for belastning parallelt og på tvers av lastretninga.

For å simulere formfeil på vertikalplata vart ein passende node gitt ein valgt forskyvning. Formfeilen vart på denne måten forskyvningsbestemt og enkel å endre. For å kartlegge formfeilen sin betydning for plata sin kapasitet vart det utført simuleringar på konsollar med plattetjukkelse 8.1 mm (målt plattetjukkelse for 8 mm plata) og formfeil på henholdsvis 0.1, 0.5 og 3.0 mm. Rein praktisk vart simuleringa gjennomført ved at ein fyrst køyrde ein analyse der kun formfeilen vart påført (Vedlegg D), for deretter å lese inn desse resultata i hovedanalysen som initiell formfeil (imperfection) før ein starta belastninga av modellen (Vedlegg D).

I laboratorieforsøka har ein som tidligare nevnt prøvt å etterligne belastninga frå ein tversgåande bjelke. Ein valgte då å belaste konsollen gjennom ei 60 mm tjukk belastningsplate. I praksis vil den 10 mm tjukke horisontalplata i konsollen medføre ein viss lastspredning gjennom sin tjukkelse, den effektive belastningsbreidda på toppen av vertikalplata vil då verte noko større. I skallmodeller vert ikkje denne lastfordelende effekten tatt hensyn til i det heile tatt. For å vurdere betydninga av dette vart det derfor utarbeida to analyse- alternativ. Fyrst antok ein at lastfordelinga var 30 mm til kvar side gjennom horisontalplata. Lasta vart då overført over ein breidde på totalt 180 mm (Figur 18). I det andre alternativet vart det ikkje tatt hensyn til lastfordeling, dette for å få eit inntrykk av lastfordelinga sin effekt på konsollen sin oppførsel og kapasitet, lastbreidda var då 120 mm. For å unngå stabilitetsproblem i lastinnføringa i analysen vart belastningsplata i toppen fastholdt mot forskyvning i planet (Figur 18).



Figur 18: Skisse av konsollen der lasta vert innført via ei belastningsplate.

5.2 Resultat

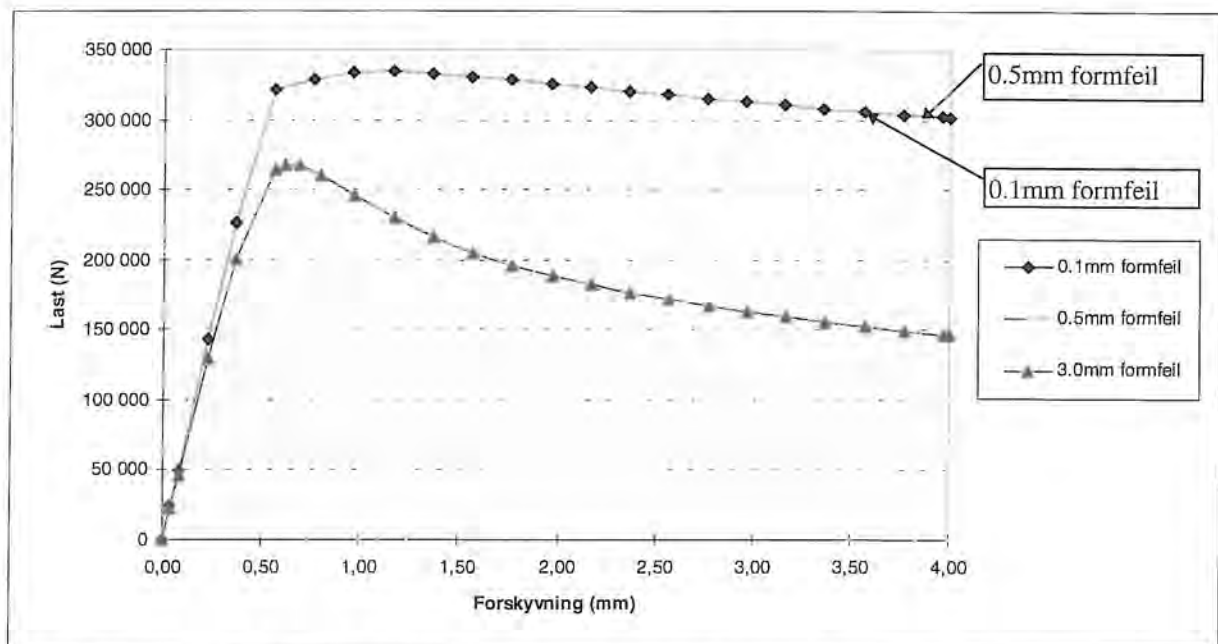
Her fylgjer ein presentasjon av resultatane oppnådd i FEM - analysen, samt ein samanlikning av desse.

5.2.1 Formfeilens betydning for konsollen sin kapasitet

For å prøve å bestemme formfeilens betydning for konsollen sin oppførsel og kapasitet, vart det i ABAQUS utført analysar med ulike formfeil. Analysane er utført på ein konsoll tilsvarande den som vart brukt under forsøk 1 (Figur 14), altså 8.1 mm tjukk vertikalplate. Formfeilane som vart valgt var 0.1, 0.5 og 3.0 mm. Dette valget er gjort på bakgrunn av dei formfeilane som vart målt i laboratoriet under forsøka. Resultata frå analysane er vist i Figur 19.

Resultata viser at det for små formfeil, 0.1 og 0.5 mm, praktisk talt ikkje er nokon forskjell i oppførsel og kapasitet for dei to konsollplatene. ABAQUS analysen resulterte med så og seie identiske last- forskyvningskurver for dei to tilfella (Figur 19). Det vart og kjørt ein analyse utan formfeil, resultatet viste seg å vere så og seie identisk med resultatane med formfeil 0.1 og 0.5 mm. For litt større formfeil derimot, ser ein at kapasiteten fell betydeleg. Ein auke i formfeil frå 0.5 til 3.0 mm gir ein reduksjon i konsollen sin kapasitet på omlag 19 % (65 kN). Resultata viser og at konsollen no har ein meir fallande lastkapasitet ved aukande

deformasjon. Eit resultat av dette er og at knekkings- tendensen aukar for aukande formfeil, noko som ein og kunne forvente.



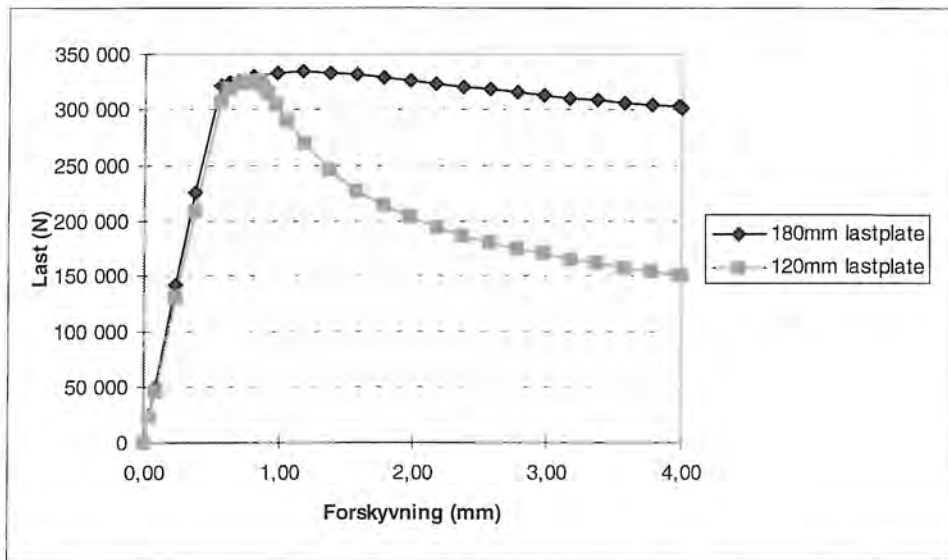
Figur 19: Figuren viser formfeilen sin innverknad på konsollen sin oppførsel og kapasitet.

5.2.2 Betydning av lastinnføringsmetode

Analysen er utført på ein konsoll tilsvarande den som vart brukt under forsøk 1 (Figur 14), altså 8.1 mm tjukk vertikalplate. Det vart her brukt ein formfeil på 0.5 mm.

Ved bestemmelse av lastfordeling er det ofte vanleg å anta at lasta fordeler seg utover med ein bestemt vinkel. I dette tilfellet vart området for lastfordeling forenkla valgt til to ekstra element på kvar side av den fysiske belastningsbreidda.

Resultata frå ABAQUS- analysen viser klart horisontalplata sin lastfordelende effekt (Figur 20). Det er ubetydelig forskjell i topplast for dei to tilfella, men det går klart fram at ein større konsentrasjon av lasta vil medføre større knekkings- tendens for konsollen. Sidan ABAQUS ikkje tar hensyn til denne effekten er det derfor viktig at denne lastfordelinga blir ivare tatt under modellering av skallmodeller.



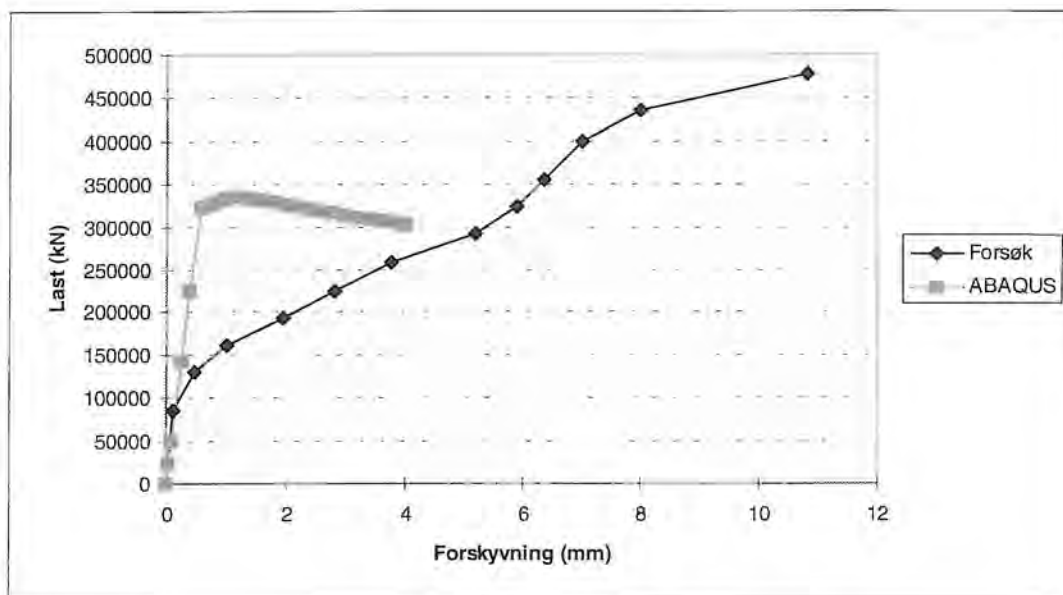
Figur 20: Figuren viser konsollen sin respons på ulik lastpåføring.

6. Samanligning av dei ulike resultata

Her fylgjer ein presentasjon og ein samanligning av resultata oppnådd i FEM- analysar, i laborieforsøk og ved manuelle berekningar. Ein må her være klar over at samanligninga er basert på resultata frå kun to laborieforsøk. Reint statistisk vil det alltid være ein viss spredning på resultat oppnådd i slike forsøk. Resultata som eg har oppnådd i laborieforsøka kan derfor godt representere eit av ytterpunkta og være lite egna for bruk i ei samanligning. Dei konklusjonar og vurderingar som fylgjer nedanfor må derfor oppfattast som svært usikre.

6.1 Forsøk 1

Kurva for forsøket er basert på manuelt avleste verdiar. Ein kan merke seg at bruddet oppstår ved langt større forskyvningar for forsøket enn for analysemodellen. Dette har ein samanheng med at det i forsøket vil oppstå glidning mellom festeplata og bukken i det friksjonen i forbindelsen vert overskriden (Figur 21). Bruddet kom ved knekking av konsollplata og kapasiteten vart målt til 478 kN.



Figur 21: Samanligning av forsøk 1 (8 mm) og FEM- analyse.

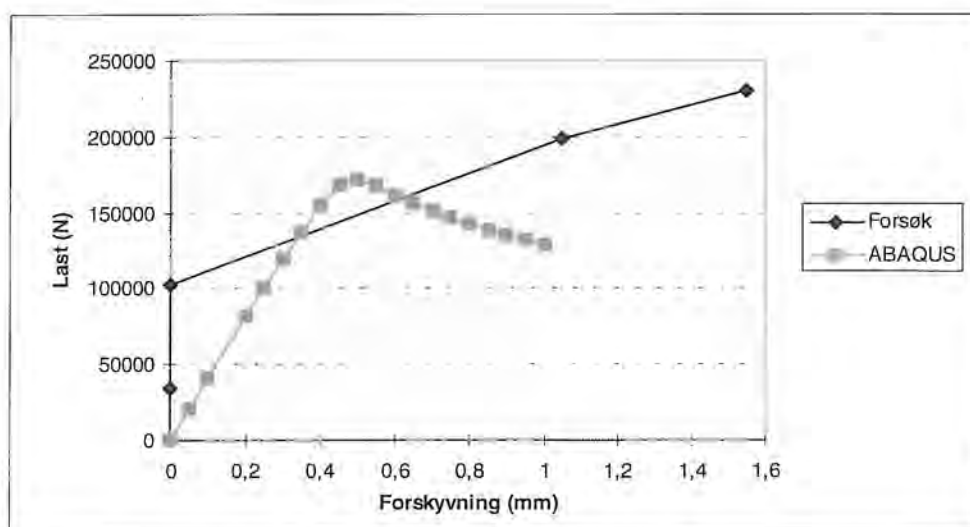
Analysen i ABAQUS resulterte her med ein kapasitet på omlag 335 kN, dette med ein formfeil på 0.5 mm. I forsøket var formfeilen så liten at den var praktisk umogeleg å måle ved rettholdt måling. Det det kan då vere nærliggjande å tru at ein har brukt for stor formfeil i analysen, men som tidligare vist vil ikkje formfeilen ha nokon nevneverdig innflytelse så lenge den er så liten som i dette tilfellet (Kap.5.2.1).

Angående FEM- analysen så forventa ein (veileder) på førehand at ein skulle koma ut med resultat som skulle vera svært lik resultata frå laboratoriet. Noko overraskande ser ein her at FEM- analysen kjem ut med ein kapasitet som berre er 70 % av det som er oppnådd i laboratoriet. Mykje av grunnen til dette relativt store avviket kan muligens kome av at ein har hatt spesielt gunstige forsøksbetingelsar. Det vart til dømes ikkje observert formfeil før forsøket starta. Ein annan faktor som også peikar i denne retning er den positive effekten ein vil ha av sveisane. Store sveisar vil støtte plata lenger ut enn det elementmodellen sine randbetingelsar tilseier. Denne effekten vil imidlertid vere relativt liten og vil vere avhengig av type- og størrelsen på sveisen.

Dei manuelle berekningane resulterte med ein kapasitet på 150.6 kN (Tabell 1). Dette er på bakgrunn av modell 1 som gir størst kapasitet for dette tilfellet. Dette er kun 31 % av konsollen sin faktiske kapasitet, noko som kan tyde på at dagens dimensjoneringsreglar er for konservative.

6.2 Forsøk 2

Som tidligare nevnt hadde ein i dette forsøket forhindra glidning mellom festeplata og bukken (Vedlegg B). Dette kjem og tydeleg fram på last- forskyvningskurva (Figur 22). Til tross for denne hindringa ser ein at ein fremdeles oppnår betydeleg større forskyvning ved brudd i forsøket i forhold til i analysen (Figur 22). Den mest sannsynlege årsaka til dette heng saman med måten nedbøyninga vert målt på. Av foto i Vedlegg B ser ein tydelig at målepunktet ligg eit godt stykke utanfor sentrum av konsollplata. Under forsøket vil det mest sannsynleg forekomme bøyning av flensene på horisontalplata. Dette vil sjølvsagt ha stor innverknad på den målte verdien på nedbøyninga som då vil vere forskjellig frå den i analysen.



Figur 22: Samanlikning av forsøk 2 (6 mm) og FEM- analyse.

Kurva er basert på manuelt avleste verdier og er i dette tilfellet ikkje heilt fullstendig ved at nedbøyninga ved brudd ikkje vart notert. Kapasiteten vart imidlertid målt til å vere på

240.3 kN. Bruddet kom plutselig ved knekking av konsollplata og var eit meir utprega knekkingsbrudd i forhold til forsøk 1. Dette var og forventa sidan konsollen i dette forsøket hadde ein større slankheit. Foto i Vedlegg B viser dette ved at utknekkinga i forsøk 2 er betydelig større enn den var for forsøket med 8 mm plata. Dette gjenspeglar seg også til ein viss grad i last- forskyvningsdiagramma for dei to forsøka.

Analysen i ABAQUS resulterte i dette tilfellet med ein kapasitet på omlag 170 kN med ein formfeil på 0.6 mm. Dette utgjer 71 % av den verkelege bruddlasta. Grunnen til dette avviket vil nok på mange måtar skyldast dei samme faktorane som nevnt tidlegare for forsøk 1.

Dei manuelle berekningane resulterte med ein kapasitet på 56.7 kN (Tabell 1). Dette er på bakgrunn av modell 3 som eg anser for å være den mest reelle av dei to aktuelle modellane for dette alternativet. Dette er berre 24 % av konsollen sin verkelege kapasitet. Dersom ein samanlignar forsøk 1 og 2 ser det ut til å vere ein tendens til at konservativiteten aukar med aukande slankheit, noko ein og må forvente. Generelt må det alltid ligge ein vis konservativitet bak manuelle berekningsmodellar. Det kan synast rimeleg å godta alle modellar som resulterer med ein kapasitet som ikkje er mindre enn 50 % av verkeleg bruddlast.

7. Konklusjon

I dette prosjektarbeidet har eg prøvd å finne ut noko om sikkerheiten til dei berekningsmodellane som vert brukt ved dimensjonering av konsoller. Det er utført to laboratorieforsøk som så er etterrekna både manuelt og numerisk. Dei numeriske analysane er utført i elementprogrammet ABAQUS.

Noko overraskande kom analyseresultata frå ABAQUS ut med ein kapasitet som berre var omlag 70 % av det som var oppnådd i laboratoriet. Mykje av grunnen til dette avviket kan muligens kome av at ein har hatt spesielt gunstige forsøksbetingelsar med betre støtte for plata i verkelegheiten enn samanligna med elementmodellen i den numeriske analysen. Det kan også skuldast at resultatata er basert på kun to laboratorieforsøk slik at statistiske variasjonar ikkje er ivaretatt, slik at ein med fleire forsøk kunne fått betre samsvar mellom forsøk og analyse.

Det vart og utført analyser for å kartlegge formfeilen sin betydning for kapasiteten. Resultata i ABAQUS viste her at små formfeil, 0.1 - 0.5 mm, ikkje hadde nokon betydning for verken oppførsel eller kapasitet for konsollen. Ein auke i formfeilen frå 0.5 til 3.0 mm gav derimot ein reduksjon i konsollen sin berekningsmessige kapasitet på omlag 19 %. Dette kunne ein og forvente ettersom knekkings- tendensen vil auke med aukande formfeil (3.0 mm formfeil tilsvarar omlag 7/1000 av plata sin skrålengde).

For å vurdere horisontalplata sin lastfordelende effekt vart det oppretta to modellar med ulik breidde for lastinnføring. Bakgrunnen for dette er at ved modellering av skallelement så vil ikkje denne effekten bli tatt vare på. Resultata synte ein ubetydelig forskjel i bruddlast for dei to tilfella, men det gjekk klart fram at ein større konsentrasjon av lasta vil medføre større knekkings- tendens for konsollen. Ein kan dermed konkludere med at det ved modellering av skallelement er viktig å ivareta denne effekten avdi den er av betydning for konsollen sin stabilitet.

Samanligningane av dei ulike resultatata syner at dagens berekningsmodellar gir ein kapasitet som ligg i området 25 - 30 % av konsollen sin kapasitet funnen i laboratorieforsøka.

Generelt må det alltid ligge ein viss konservativitet bak manuelle berekningsmodellar. Det kan synast rimeleg å godta alle modellar som resulterer med ein kapasitet som ikkje er vesentleg mindre enn 50 % av verkeleg bruddlast. Med forbehold for statistiske variasjonar vil eg ut frå denne vurderinga konkludere med at dagens reknemodellar er meir konservative enn nødvendig.

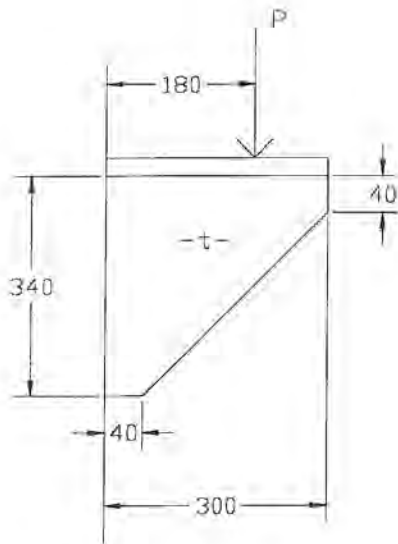
8. Referansar

1. Charles G. Salmon and John E. Johnson, 1990. *Steel structures, design and behavior*, s 871-883.
2. Graham W. Owens and Brian D. Cheal, 1989. *Structural steelwork connections*, s 296-297.
3. Charles G. Salmon, Desember 1962. *Analysis of triangular bracket-type plates*, journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, 88, EM6.
4. Charles G. Salmon, Donald R. Buettner and Thomas C. O'Sheridan, April 1964. *Laboratory investigation of unstiffened triangular bracket plates*, Journal of the Structural Division, ASCE, 90, ST2.
5. Lynn S. Beedle m.fl., 1964. *Structural steel design*, s 550-555.
6. Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc, 1992. *ABAQUS Users manual*, Volum I & II, Ver 5.2.

Vedlegg A

Berekningsseksempel

Kapasitetsberegning av konsollplate.



Figur 1

Prinsippskisse for konsoll.

Materialdata, valgt:

NVA flattstål

$$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma_m = 1.0$$

For å få bredde i beregningane har eg valgt å beregne kapasiteten for ulike konsollplater, og tjukkelsane $t=6,7,8,10,12$ og 14mm er valgt.

Modell 1:

Elastisk kapasitet:

Kontroll av stabilitet:

$$\frac{b}{a} = \frac{300}{340} = 0.88 \quad \Rightarrow \quad \text{kav: } \frac{b}{t} \leq \frac{656}{\sqrt{f_y}}$$

For å oppnå flytning langs den frie kanten før plateknekking, må tjukkelsen av plata vere:

$$t \geq \frac{b}{656} \sqrt{f_y} = \frac{300}{656} \sqrt{235} = \underline{\underline{7 \text{ mm}}}$$

Dimensjonering for tillatte spenninger:

$$z = \frac{P/bt}{f_y} = 1.39 - 2.2 \cdot 0.88 + 1.27 \cdot 0.88^2 - 0.25 \cdot 0.88^3 = 0.267$$

$$P_d = f_y \cdot z \cdot b \cdot t = 235 \cdot 0.267 \cdot 300 \cdot t = \underline{18\,823.5 \cdot t}$$

$$t = 7 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \underline{\underline{P_d = 131.8 \text{ KN}}}$$

$$t = 8 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \underline{\underline{P_d = 150.6 \text{ KN}}}$$

$$t = 10 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \underline{\underline{P_d = 188.2 \text{ KN}}}$$

$$t = 12 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \underline{\underline{P_d = 225.9 \text{ KN}}}$$

$$t = 14 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \underline{\underline{P_d = 263.5 \text{ KN}}}$$

Plastisk kapasitet:

Kontroll av stabilitet:

$$\frac{b}{a} = 0.88 \quad \Rightarrow \quad \frac{b}{t} \leq \frac{328}{\sqrt{f_y}}$$

For å kunne rekne plastisk må:

$$t \geq \frac{300}{328} \sqrt{235} = \underline{14.02 \text{ mm}}$$

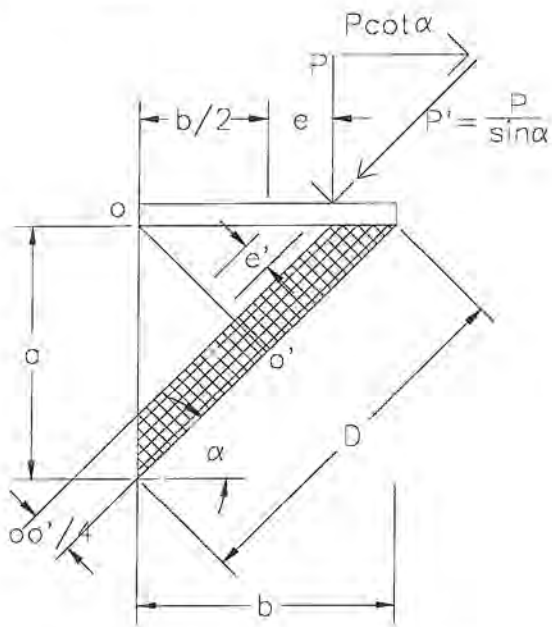
Det er altså kun konsollplata med $t=14\text{mm}$ som tilfredsstiller stabilitetskravet ved plastisk dimensjonering.

Dimensjonering for tillatte spenninger:

$$P_d = f_y \cdot t \cdot \sin^2 \alpha \left[\sqrt{(4e^2 + b^2)} - 2e \right]$$

$$P_d = 235 \cdot 14 \cdot \sin^2 48.6 \left[\sqrt{(4 \cdot 30^2 + 300^2)} - 2 \cdot 30 \right] = \underline{\underline{566.2 \text{ KN}}}$$

Modell 2



Figur 2

Forenkla modell for beregning når avstanden $(b/2 + e) > 0.6b$.

Dimensjonering for tillatte spenninger:

Største spenning i punktet o' er funnen til å være:

$$f_{\max} = \frac{P}{bt \sin^2 \alpha} \left(1 + \frac{6e}{b} \right)$$

$$\Rightarrow P_d = f_y \cdot b \cdot t \sin^2 \alpha \left(1 + \frac{6e}{b} \right)^{-1} = 235 \cdot 300 \cdot t \cdot \sin^2 48.6 \left(1 + \frac{6 \cdot 30}{300} \right)^{-1} = \underline{\underline{24\,792 \cdot t}}$$

$t = 6 \text{ mm}$	\Rightarrow	$P_d = 148.8 \text{ KN}$
$t = 7 \text{ mm}$	\Rightarrow	$P_d = 173.5 \text{ KN}$
$t = 8 \text{ mm}$	\Rightarrow	$P_d = 198.3 \text{ KN}$
$t = 10 \text{ mm}$	\Rightarrow	$P_d = 247.9 \text{ KN}$
$t = 12 \text{ mm}$	\Rightarrow	$P_d = 297.5 \text{ KN}$
$t = 14 \text{ mm}$	\Rightarrow	$P_d = 347.1 \text{ KN}$

Dimensjonering m.h.p. stabilitet:

Kontroll basert på NS 3472 pkt.5.4

Kapasiteten er gitt av formelen : $P_d = \frac{oo'}{4} f_k \sin \alpha = \frac{b}{4} f_k \sin^2 \alpha = \underline{42.20 \cdot t \cdot f_k}$

Betraktar ei søylestripe med:

$$l_k = 0.7D = 318 \text{ mm}$$

$$b = oo'/4 = b \cdot \sin \alpha / 4 = 56.3 \text{ mm}$$

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = \frac{t}{\sqrt{12}}$$

$$\lambda_{fy} = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93.913$$

$$\lambda = \frac{l_k}{i} = \frac{0.7 \cdot D}{t} \cdot \sqrt{12}$$

$$\Rightarrow \bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_{fy}} = \frac{0.7 \cdot 454 \cdot \sqrt{12}}{93.913 \cdot t} = \underline{\underline{\frac{11.730}{t}}}$$

Brukar knekk- kurve C i fig. 5.4.1 a, dette fordi ein då får lågast knekkspenning og dette vil då være det mest konservative.

$$t = 6 \text{ mm} \quad \Rightarrow f_k = 49 \text{ N/mm}^2 \quad \Rightarrow \underline{\underline{P_d = 12.5 \text{ KN}}}$$

$$t = 7 \text{ mm} \quad \Rightarrow f_k = 63 \text{ N/mm}^2 \quad \Rightarrow \underline{\underline{P_d = 18.6 \text{ KN}}}$$

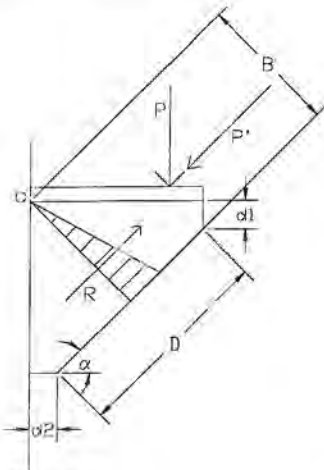
$$t = 8 \text{ mm} \quad \Rightarrow f_k = 80 \text{ N/mm}^2 \quad \Rightarrow \underline{\underline{P_d = 27.0 \text{ KN}}}$$

$$t = 10 \text{ mm} \quad \Rightarrow f_k = 107 \text{ N/mm}^2 \quad \Rightarrow \underline{\underline{P_d = 45.2 \text{ KN}}}$$

$$t = 12 \text{ mm} \quad \Rightarrow f_k = 127 \text{ N/mm}^2 \quad \Rightarrow \underline{\underline{P_d = 64.3 \text{ KN}}}$$

$$t = 14 \text{ mm} \quad \Rightarrow f_k = 148 \text{ N/mm}^2 \quad \Rightarrow \underline{\underline{P_d = 87.4 \text{ KN}}}$$

Modell 3



Figur 3

Forenkla modell for kapasitetsberegning.

Dimensjonering m.h.p. stabilitet:

Kontroll basert på NS 3472 pkt.5.4

Kapasiteten er gitt av formelen : $P_d = t B f_k \sin \alpha$

$$\lambda = \frac{l_k}{i} = \frac{0.7D}{t} \cdot \sqrt{12} = 2.42 \cdot \frac{454}{t} = \frac{1098.7}{t}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{11.70}{t}$$

Dette gir då:

$$t = 6 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \underline{\underline{P_d = 56.7 \text{ KN}}}$$

$$t = 7 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \underline{\underline{P_d = 87.0 \text{ KN}}}$$

$$t = 8 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \underline{\underline{P_d = 120.6 \text{ KN}}}$$

$$t = 10 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \underline{\underline{P_d = 202.5 \text{ KN}}}$$

$$t = 12 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \underline{\underline{P_d = 297.0 \text{ KN}}}$$

$$t = 14 \text{ mm} \quad \Rightarrow \quad \underline{\underline{P_d = 396.3 \text{ KN}}}$$

Dimensjonering for tillatte spenninger:

Kapasiteten bestemmes her ved momentlikevekt om punktet o. Kraftresultanten fra den idealiserte spenningsfordelinga vist i fig.3 er gitt som:

$$R = \frac{f_y B t}{2} = \underline{29962.5 t}$$

Momentlikevekt om punktet o gir da:

$$P_d \cdot 0.6b = R \cdot \frac{2}{3} \cdot B \quad \Rightarrow \quad \underline{P_d = 0.944 R}$$

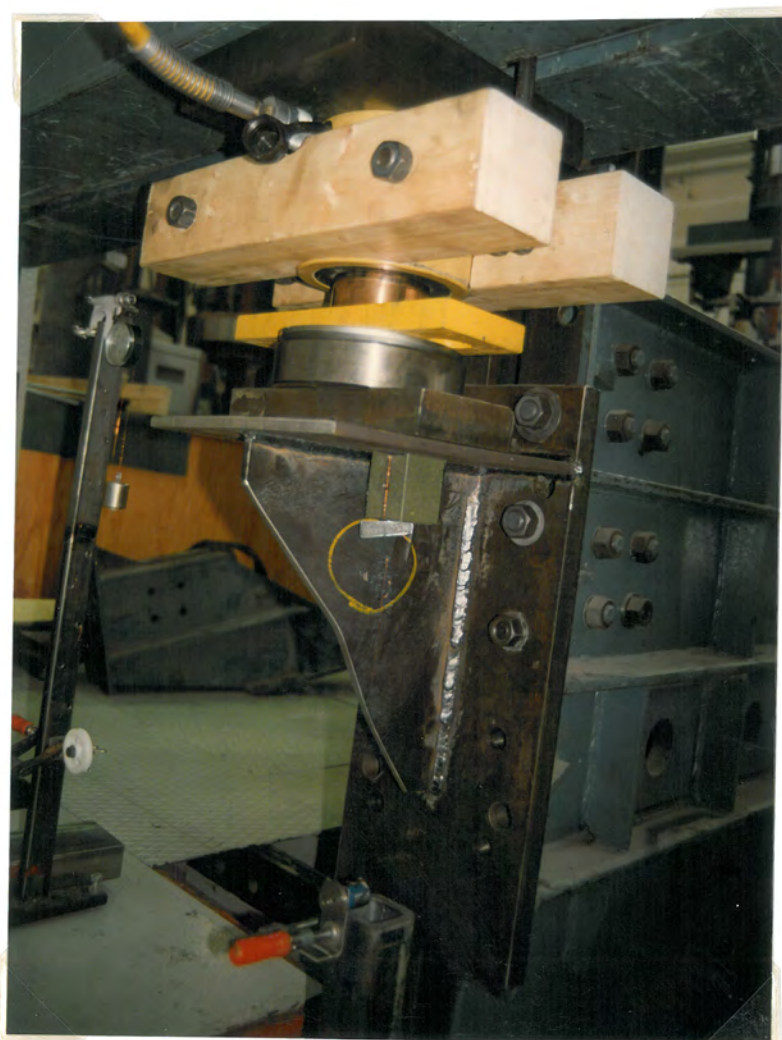
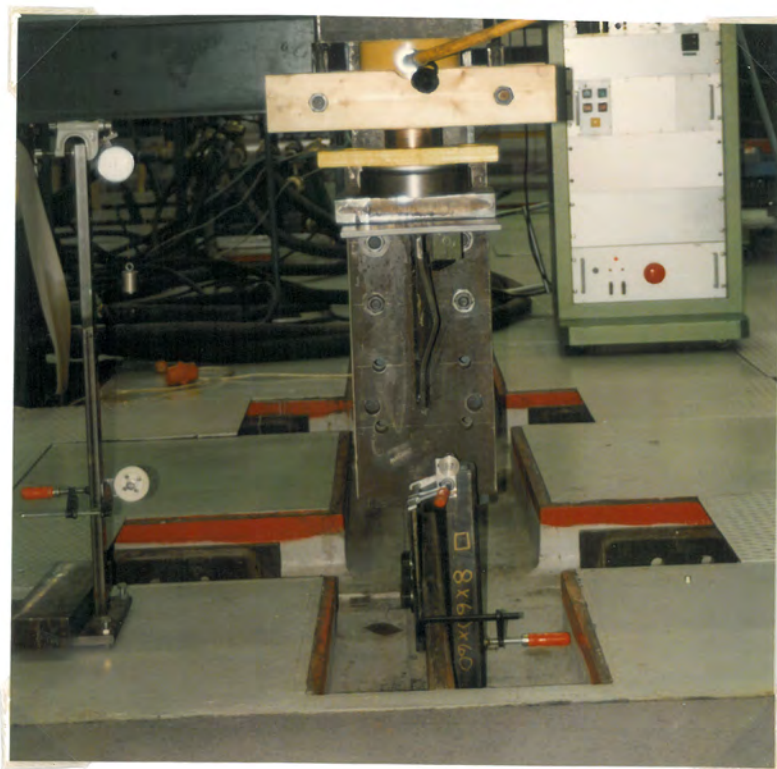
Dette gir:

t = 6 mm	⇒	<u>$P_d = 169.7 KN$</u>
t = 7 mm	⇒	<u>$P_d = 198.1 KN$</u>
t = 8 mm	⇒	<u>$P_d = 226.4 KN$</u>
t = 10 mm	⇒	<u>$P_d = 283.0 KN$</u>
t = 12 mm	⇒	<u>$P_d = 339.6 KN$</u>
t = 14 mm	⇒	<u>$P_d = 396.2 KN$</u>

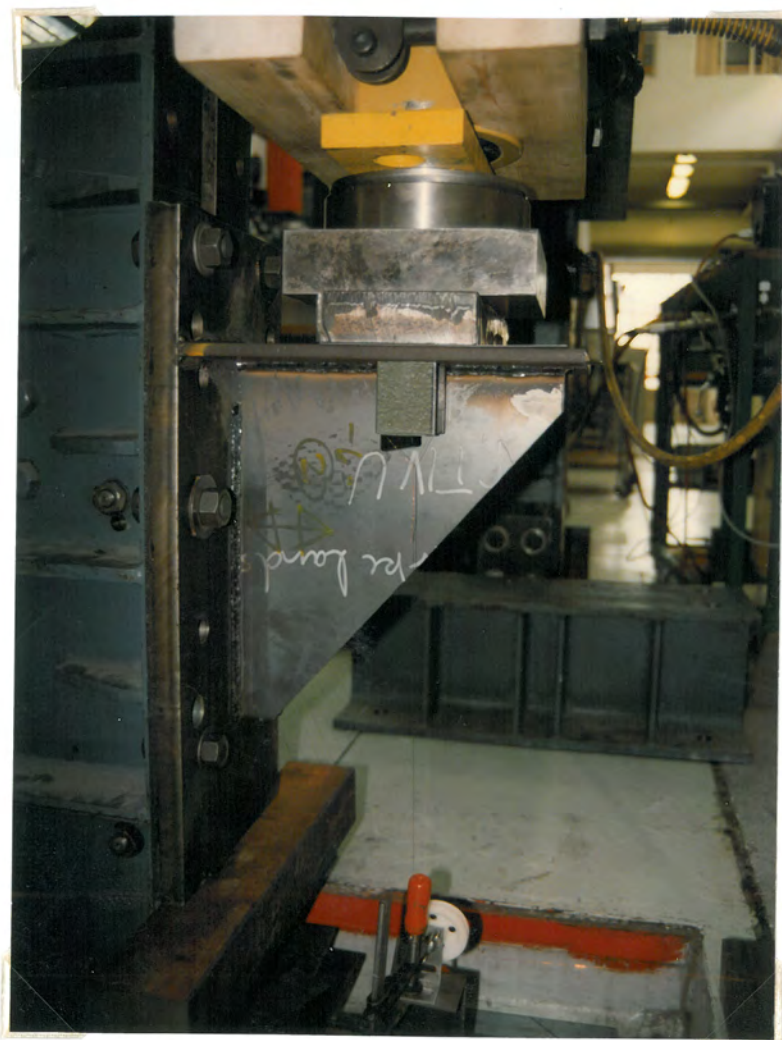
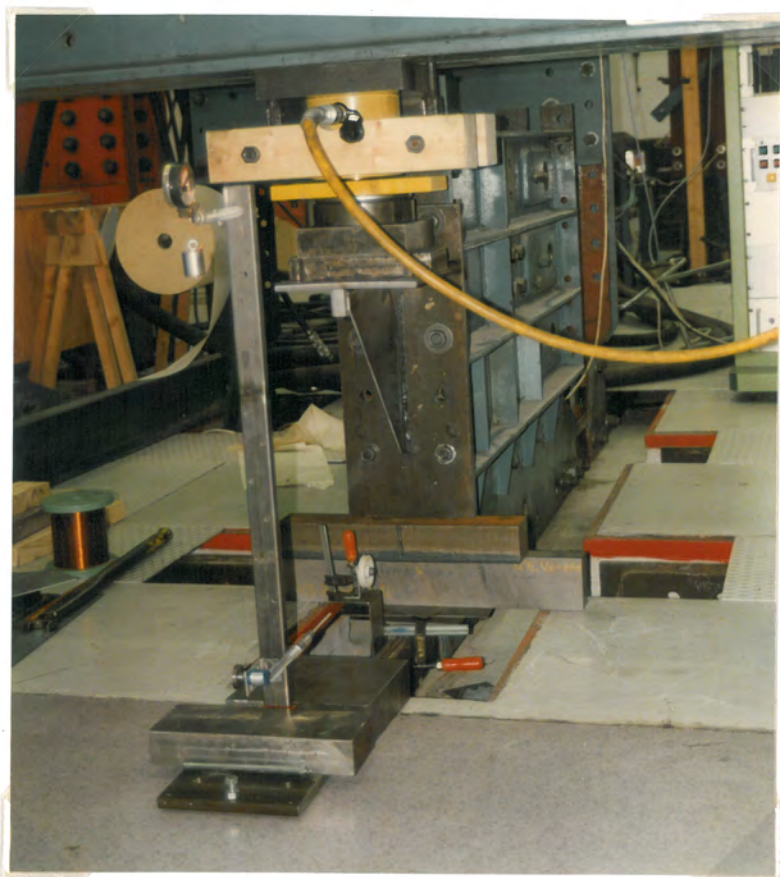
Vedlegg B

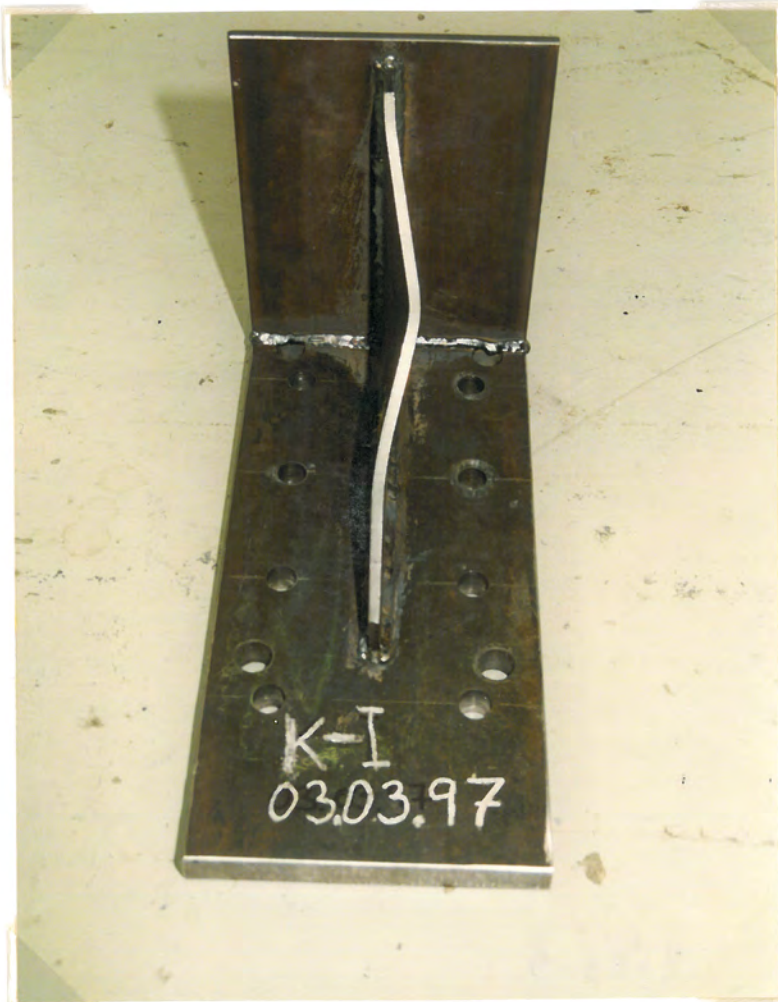
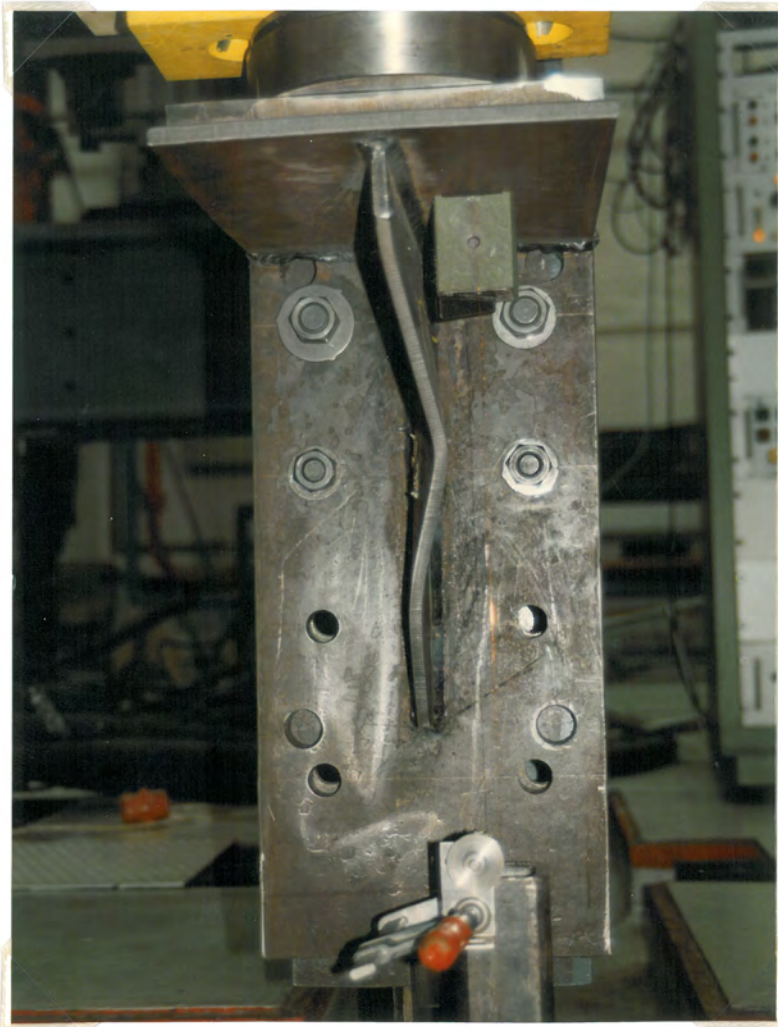
Foto frå laboratorieforsøka

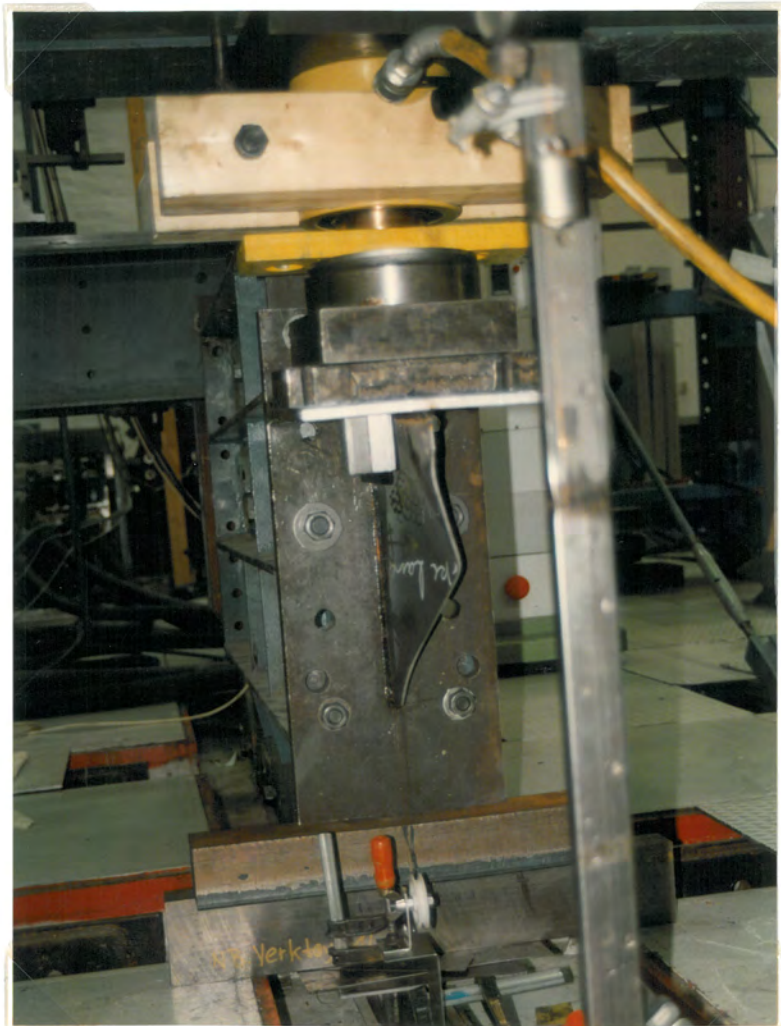
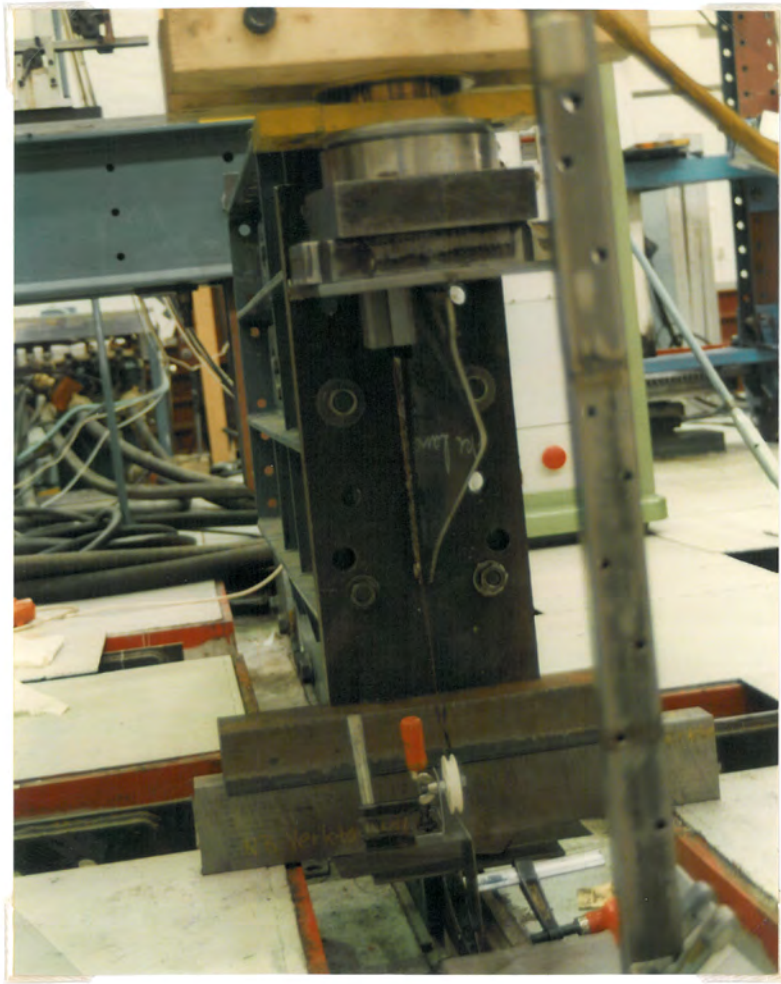
Forsøk 1 - 8 mm konsollplate

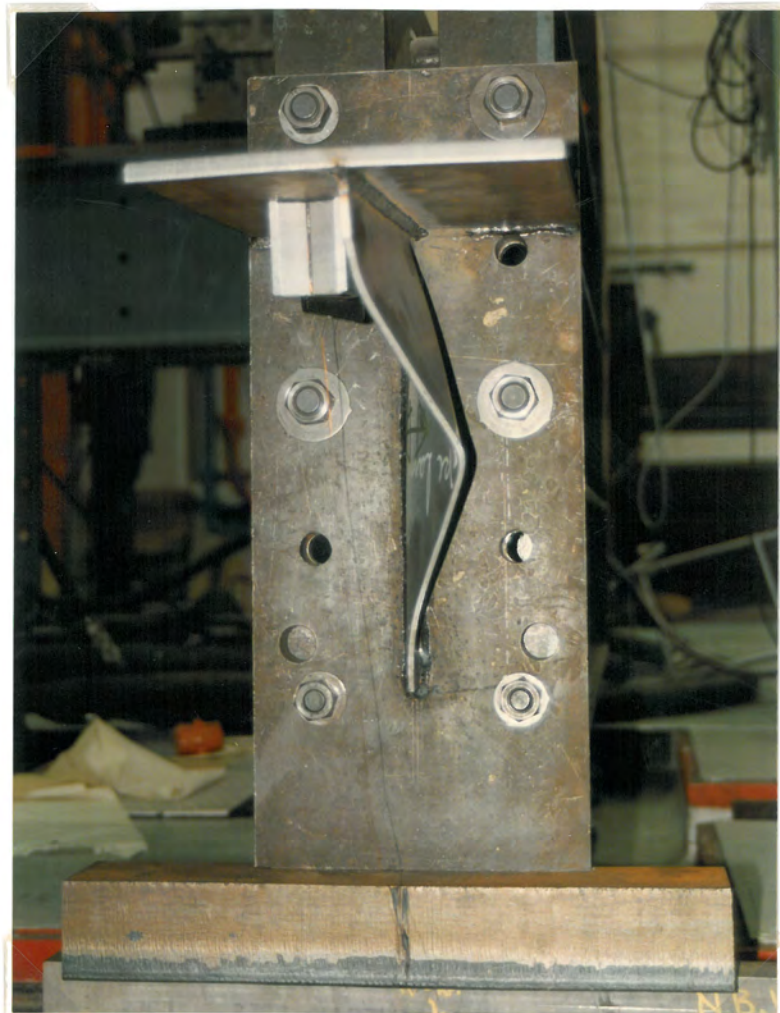
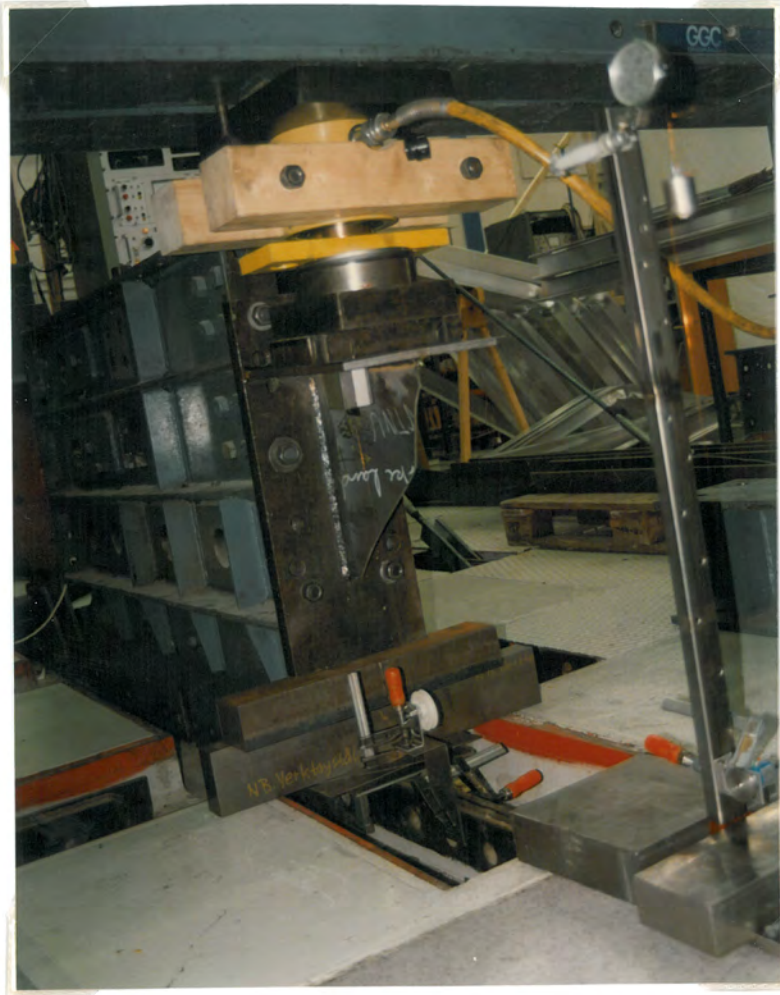


Forsøk 2 - 6 mm konsollplate







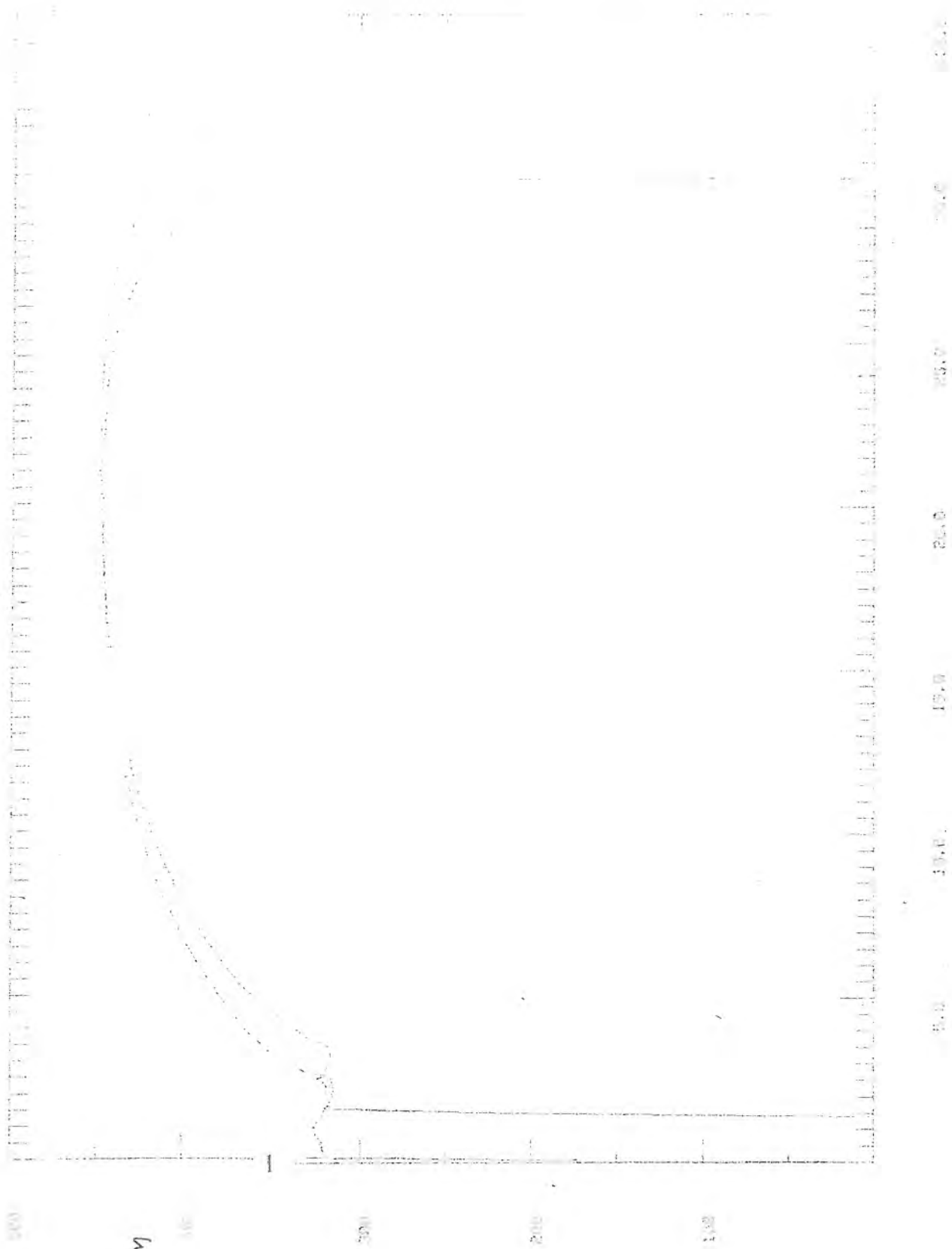


Vedlegg C

Materialkurver

SHOULDER

Plate
 $t = 8,10 \text{ mm}$



Percent Strain (%)



	Date	Side
	Sign	

The plate in thickness

$$t = 5,9 \text{ mm}$$

was later checked for f_y and f_u

The plate was then found to have
a thickness $t = 5,96$ and

Longitudinal
tension
coupon

$$\left\{ \begin{aligned} f_y &= \frac{48 \text{ kN}}{5,96 \cdot 30,70 \text{ mm}^2} \Rightarrow 263 \text{ N/mm}^2 \\ f_u &= \frac{66,1 \cdot 10^3 \text{ N}}{5,96 \cdot 30,7} \Rightarrow 361 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \right.$$

Transverse
coupon

$$\left\{ \begin{aligned} f_y &= \frac{51 \cdot 10^3 \text{ N}}{5,96 \cdot 30,68 \text{ mm}^2} = 279 \text{ N/mm}^2 \\ f_u &= \frac{65,9 \cdot 10^3 \text{ N}}{5,96 \cdot 30,68} = 360 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \right.$$

\Rightarrow In average for the 5,96 mm
thick plate

$$\Rightarrow \begin{aligned} f_y &= 271 \text{ N/mm}^2 \\ f_u &= 360 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Vedlegg D

ABAQUS input filer til modellen


```

1209,12,200,1
1310,11,200,1
1411,10,200,1
1512,9,200,1
1613,8,200,1
1714,7,200,1
1815,6,200,1
1916,5,200,1
2017,4,200,1
**
** MATERIAL,NAME=INELAST
** ELASTIC
210000,0,3
** PLASTIC
320,8,0,0
333,13,0,0231
372,6,0,0326
399,38,0,0478
501,6,0,1286
**
**
** Gir inn tykkelser
**
** SHELL SECTION, MATERIAL=INELAST, ELSET=PLATA
08,10,5
** SHELL SECTION, MATERIAL=INELAST, ELSET=HELATA
10,0,5
** SHELL SECTION, MATERIAL=INELAST, ELSET=LPLATA
60,0,5
**
** Lager nytt nodesett i innspenning
**
** NSET,INSET=INNSPENN, GENERATE
200101,204101,200
164101,244101,20000
**
** PLOT
** DRAW
**
** BOUNDARY
INNSPENN,1,6
** BOUNDARY
SNITT11,3
**
**
** STEP, INC=800, MONOTONIC=YES, NLGEOM
**
** STATIC
.01,1,0,000001,0,10
** BOUNDARY
202121,3,,-1,0
**
**
** MONITOR,NODE=202121,DOF=3
**
** NODE FILE
U,RF
** EL FILE,FREQ=10
E,S
** END STEP

```

Inelastisk materiale

Gir inn tykkelser

Lager nytt nodesett i innspenning

Grensebetingelser

Starter belastningen, max 800 inc

Herfra kommer bestilte resultater