

# Skjøting av lange aksialbærende skruer for momentstive forbindelser i trekonstruksjoner

**Christoffer Aune Moe**  
**Mathias Vastenhouw Strøm**

Bygg- og miljøteknikk (2-årig)  
Innlevert: juni 2015  
Hovedveileder: Kjell A Malo, KT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for konstruksjonsteknikk



## FORORD

---

Denne rapporten er vår avsluttende oppgave som masterstudenter i konstruksjonsteknikk ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige universitet, NTNU i Trondheim. Oppgaven har blitt utført i 10.semester og er på 30 studiepoeng, tilsvarende 20 ukers arbeid.

Oppgaven er valgt ut i fra kandidatenes interesse for trekonstruksjoner og ønsket om å teste teorien gjennom laborietester. Rapporten inneholder teori, beregninger og tester av en stiv bjelkeskjøt av limtre.

Vi ønsker å rette en stor takk til veileder Kjell Arne Malo, professor ved institutt for konstruksjonsteknikk, som har hjulpet oss gjennom hele prosessen med innspill og forslag til løsninger.

Vi vil også takke Martin Cepelka, doktorgradsstipendiat ved institutt for konstruksjonsteknikk, for innspill og forslag til løsninger, samt tett oppfølging i forsøksstadiet.

I tillegg vil vi takke de ansatte i laboriet ved konstruksjonsteknikk for hjelp til å produsere bjelkeskjøtene og for gjennomføring av testene.



Mathias Strøm



Christoffer Aune Moe

Trondheim, 8. juni, 2015

## SAMMENDRAG

---

I senere tid har det blitt gjort en del studier rundt kapasiteten til lange aksialbærende skruer med stor diameter. Disse studiene har blant annet tatt for seg uttrekkskapasiteten og uttrekksstivheten til lange gjengestenger i flere forskjellige vinkler, fra parallell til perpendikulær inngrep i fibrene i treet, for så å danne et formelgrunnlag som passer gjengestag og skruer med stor diameter. I tillegg er det gjort forsøk rundt kapasiteten til lange aksialbærende gjengestag i en søyle-bjelke forbindelse. Disse studiene har vist god kapasitet til gjengestengene, men tester som har tatt for seg bruken av gjengestengene på en praktisk og monteringsvennlig metode er begrenset, bortsett fra søyle-bjelke forbindelsen.

I den følgende rapporten, skjøting av lange aksialbærende skruer for momentstive forbindelser i trekonstruksjoner, er det sett på en praktisk og monteringsvennlig løsning for bruk av gjengestagene ved hjelp av en spesialkonstruert stålhylse som blir gyst med epoxy lim. Den første delen av rapporten tar for seg et litteraturstudie der det har blitt sett på noen løsninger for skjøting av bjelker som brukes i dag. Påfølgende del tar for seg prinsippet rundt skjøting med hylseforbindelsen samt beregninger som er gjort basert på teorien. Til slutt tar rapporten for seg forsøk der vi har testet hylseforbindelsens kapasitet og forsøk der hylseforbindelsen blir benyttet i en bjelkeskjøt. Bjelkeskjøten er satt opp med fem forskjellige oppsett, der det varieres med antall gjengestenger som tar trykk og strekk.

Testene viser at hylseforbindelsen som er gyst med epoxy, har en kapasitet som er større enn gjengestaget. Det betyr at forbindelsen kan bli sett på som et kontinuerlig gjengestag. Videre forsøk gjort med bjelkeskjøten har vist at hylseforbindelsen er praktisk og enkel, både å produsere og sammenføye. Resultatene fra bjelketestene har oppnådd stor styrke og stivhet. Resultatene fra testene viser god korrelasjon med teorigrunnlaget, bortsett fra uttrekkskapasiteten av gjengestagene, som har vært noe lavere enn teorigrunnlaget tilsier.



## SUMMARY

---

Recent there has been some studies about the capacity of the long axial threaded rods with large diameter. These studies have addressed the withdrawal capacity and withdrawal stiffness of the long threaded rods in several different angles, from parallel to perpendicular embedment in the fibers of the wood, and then establishing a formula basis suitable for threaded rods with large diameter. In addition, research have been devoted to the capacity of threaded rods in a column-beam connection. These studies have shown great capacity to threaded rods, but tests that have addressed the use of threaded rods in a practical and ease of installation method is limited, except column-beam connection.

In the following report, splicing of long threaded rods for rigid connections in timber structures, a practical and assembly-friendly solution for the use of threaded rods, using a specially constructed steel sleeve grouted with epoxy glue has been studied. The first part of the report is a literature study, where some solutions for beam joints used present is presented. The following parts focuses on the principle around splicing with the sleeve connection and calculations are made, both for the joint sleeve and the beam connection. The beam connection is made with five different set ups, where the number of rods connecting the beams varies.

In the last parts of the report, the production, test results and evaluation of the joint sleeve and the beam connection is presented.

The studies show that the sleeve joint grouted with adhesive, has a capacity greater than the threaded rod. This means that the connection can be seen as a continuous rod. Further, experiments done with beam connection has shown that the sleeve connection is convenient and simple, both to produce, assemble and to grout. The results of the beam tests have achieved great strength and rigidity. The results of tests show good correlation with the theoretical basis, except withdrawal capacity of the threaded rods, which has been somewhat lower than the theoretical basis suggests, but not by much.

## INNHOLDSFORTEGNELSE

Forord.....	i
Sammendrag .....	ii
Summary .....	iii
Figurliste .....	vii
1 Introduksjon .....	1
1.1 Oppgavens formål og relevans .....	1
1.2 Mål .....	1
1.3 Avgrensinger .....	1
2 Litteraturstudie .....	3
2.1 Trevirke .....	3
2.1.1 Tre som byggemateriale.....	3
2.1.2 Miljømaterialet tre .....	4
2.1.3 Høyere trehus .....	4
2.2 Forbindelser.....	5
2.2.1 Dybelforbindelser .....	5
2.2.2 Innlimte gjengestenger.....	6
2.2.3 Lange aksialbærende skruer.....	7
2.2.4 Gjengestenger fra SFS Intec .....	8
2.2.5 Skjøting av SFS ved bruk av gjengehylse og lim .....	10
3 Teoretisk tilnærming.....	11
3.1 Midlere verdier for materialeegenskaper .....	11
3.2 Uttrekkskapasitet i endevend .....	12
3.3 Praktisk utforming av knutepunkt .....	14
3.3.1 Bjelkeskjøt .....	14
3.3.2 Bjelke/søyleskjøt.....	15
3.4 Hylsedesign .....	17
3.4.1 Dimensjonering av hylsa.....	17
3.4.2 Stivhet til hylse-forbindelsen .....	19
3.5 Lim .....	20
3.5.1 Prosedyre for gysing .....	20
3.5.2 Tetting av hylse.....	20

3.6	Kantavstander.....	21
3.7	Aktuelle bruddformer for bjelkeskjøten.....	21
3.8	Stivhetsberegninger.....	23
4	Pretest – verifisering av gyseprosess.....	25
4.1	Testforbindelsen.....	25
4.1.1	Akrylhylse.....	25
4.1.2	Gummipakning.....	25
4.1.3	Mapei L epoxy.....	26
4.1.4	Produksjon av testforbindelsene.....	26
4.1.5	Justering av produksjonsmetode.....	27
4.2	Observasjoner.....	27
4.2.1	Observasjoner gyseforsøk 1.....	27
4.2.2	Observasjoner gyseforsøk 2.....	27
4.2.3	Observasjoner gyseforsøk 3.....	28
4.3	Konklusjon pretest.....	29
5	Referanseforsøk.....	31
5.1	Beskrivelse av testforbindelsen.....	31
5.1.1	Strekktest av SFS innlimt i hylse.....	31
5.1.2	Strekktest av SFS innlimt i hylse i trestykke.....	31
5.1.3	Momenttest av bjelkeskjøt.....	31
5.2	Komponenter benyttet i referanseforsøket.....	32
5.2.1	Stålhylsene.....	32
5.2.2	Limtre.....	32
5.2.3	Gjengestenger.....	32
5.2.4	Mapei L epoxy.....	33
5.2.5	Styrebrakett.....	34
5.2.6	Øvrig utstyr.....	35
5.3	Produksjon av testforbindelsene.....	36
5.3.1	Strekktest av SFS innlimt i hylse.....	36
5.3.2	Strekktest av SFS innlimt i hylse i trestykke.....	36
5.3.3	Bjelkeskjøt.....	37
5.4	Observasjoner ved produksjon.....	40

5.5	Beskrivelse av testsystem.....	41
5.5.1	Strekktest.....	41
5.5.2	Bjelketest.....	41
5.5.3	Hydraulisk jekk.....	41
5.5.4	Opplagring .....	41
5.6	Testprosedyre .....	42
5.6.1	Testoversikt.....	42
5.6.2	Lastprosedyre .....	43
5.6.3	Måleinstrument .....	43
5.6.4	Fremgangsmetode .....	45
5.6.5	Bestemme fuktinnhold og densitet.....	46
5.7	Testresultater .....	47
5.7.1	Strekktest hylseforbindelse .....	47
5.7.2	Momentttest av bjelkeskjøt .....	48
5.8	Evaluering av testresultater .....	53
5.8.1	Strekktest hylseforbindelse .....	53
5.8.2	Momentttest av bjelkeskjøt .....	54
5.8.3	Evaluering av gysing av lim .....	60
5.8.4	Teori mot resultater.....	62
6	Konklusjon.....	65
6.1	Hylseforbindelsen.....	65
6.2	Uttrekkskapasitet.....	65
6.3	Rotasjonsstivhet .....	65
6.4	Sammenlagt konklusjon .....	65
7	Videre arbeid.....	67
7.1	Forbedring av design.....	67
7.2	Søyle-bjelke forbindelse.....	67
	Referanser .....	69
	Bildereferanser .....	71
	Vedlegg.....	73

**FIGURLISTE**

Figur 2-1: Treet i Bergen [7].....	4
Figur 2-2: Forbindelse med innslissede stålplater og dybler. ....	5
Figur 2-3: Eksempler på bruk av innlimte gjengestenger i stål-tre forbindelser og i forankring trebetong [9].....	6
Figur 2-4: Bjelkeskjøt med innlimte stenger som er skjøtet med en stålhylse fra REID-bar [10].	7
Figur 2-5: Illustrasjon av forbindelsen Buene produserte for å skjøte skruene [12]. ....	8
Figur 2-6: Bruksområdet for gjengestengene fra SFS Intec [14].....	9
Figur 2-7: Illustrasjon av prinsippet som Innerdal testet [16].....	10
Figur 3-1: Skisse som viser tverrsnittet i bjelkeskjøten hvor man ser prinsippet med gjengestenger som er festet i hver bjelkeende, før de føres sammen med en skjøtehylse som blir gyst med epoxy.....	14
Figur 3-2: Momentarm i bjelkeskjøten med skrue i topp og bunn.....	15
Figur 3-3: Momentarm for bjelkeskjøt med skrue i bunn og kontakt i treet i topp.....	15
Figur 3-4: Skisse av utforming av bjelke/søyleskjøten.....	16
Figur 3-5: Ferdig produsert hylse sammen med en kort bit av et SFS gjengestag.....	17
Figur 3-6: Produksjonstegningen til hylsene.....	19
Figur 3-7: Definisjoner på momentarm og rotasjonscenter hos en kontinuerlig bjelke.....	24
Figur 4-1: Hylsene som ble gyst i første test. Luftlommer ble observert rundt gysehullene etter herding. ....	27
Figur 4-2: Gysing av lim i forsøk 1. Her kommer det tydelig frem at limet flyter godt gjennom hylsen da limet er jevnt fordelt vertikalt med en tilnærmet horisontal overflate på toppen av limet. ....	28
Figur 4-3: Her vises prøvestykket som ble gyst i horisontal posisjon etter at det er åpnet. Noe tegn til lekkasje utenfor hylsen. Pakning i topp var tett.....	29
Figur 5-1: Ovenfor vises de forskjellige testene og hvordan gjengestengene er plassert. ....	31
Figur 5-2: Dimensjoner på gjengestaget fra SFS Intec etter DIN 7998 standard [26]. ....	33
Figur 5-3: Styrebraketten sammen med styrehylsen for 15 mm boret.....	34
Figur 5-4: Styrebrakett for boring med målsetting. ....	34
Figur 5-5: Hylseforbindelsen ferdig produsert med gummipakninger og slanger for gysing. ....	36
Figur 5-6: Styrebraketten festet til bjelkeenden men 15mm boret ført inn i braketten.....	37
Figur 5-7: Bildet viser inngjenging av gjengestag i hullet som er forboret.....	38
Figur 5-8: Snitt av bjelken hvor gjengestagene var plassert. Figuren viser hvordan bjelkeendene ble før sammen før gysing av lim. ....	39
Figur 5-9: Gysing av lim etter at bjelkene var ført sammen. ....	39
Figur 5-10: Oppsett av testtrigg med målsettinger som er nødvendige for dimensjoneringen.....	41
Figur 5-11: Figurene over viser tverrsnittene til de fem forskjellige testoppsettene med målsetting som viser plasseringen til skrueforbindelsene. ....	42
Figur 5-12: Grafen viser lastprosedyren gitt i NS-ISO 6891 [27] .....	43
Figur 5-13: Figuren viser et utsnitt av senter på bjelkeskjøten med plassering av måleinstrumentene samt målsetting.....	44

Figur 5-14: Figuren viser tverrsnitt av bjelken og målsetting av hvor prøvestykkene for fuktinnhold og densitet ble tatt ut. ....	46
Figur 5-15: Her vises tydelig uttrekk av gjengestaget fra treverket.....	55
Figur 5-16: Splitting parallelt med fibrene etter at bjelken hadde fått store rotasjoner. ....	56
Figur 5-17: Bildet til venstre viser BS-2B-2 rett før brudd. Bildet til høyre viser samme bjelkeskjøt rett etter at brudd oppsto.....	57
Figur 5-18: Øverst til venstre ser man hvordan bjelken har presset seg sammen mot hverandre i toppen. På bildet oppe til venstre og bildet nederst ser man mønstret som har dannet seg i kontaktflaten. ....	58
Figur 5-19: Resultater fra ARMAIS-skanner. På bildet vises vertikal forskyvning av bjelken. ..	59
Figur 5-20: Bildet viser at hylsene er fulle av lim. Dette var også tilfellet for alle andre hylsene bortsett fra en. ....	60
Figur 5-21: Hylsen opp til høyre og hylsen oppe til venstre er hver side av den samme hylsen. På hylsen oppe til høyre ser man godt at hylsen kun er halvfull med lim. ....	61
Figur 7-1: Forslag til forbedret bjelkeskjøt.....	67

# 1 INTRODUKSJON

---

## 1.1 OPPGAVENS FORMÅL OG RELEVANS

Tre som byggemateriale har de senere år blitt mer aktuelt, ettersom byggeteknikk og kunnskapen rundt brannsikkerhet rundt materialet har blitt forbedret og fokuset på miljøet har økt. Trebygg er derfor noe man ønsker å bruke mer av i byer, og det blir stadig flere aktører som er pådrivere for å øke bruken av tre i store konstruksjoner.

I løpet av de siste årene er det gjort en del forsøk med lange aksialbærende treskruer som et alternativ til eksisterende forbindelser i større trekonstruksjoner. Spesielt ved NTNU har det blitt gjort flere vellykkede forsøk med bruk av lange gjengestenger i momentstive forbindelser. I dag blir knutepunkter i både bjelker og buer håndtert som leddede forbindelser.

Men for at tre skal være konkurransedyktig mot andre byggematerialer er det viktig å optimalisere byggeprosessen. Gjennom forsøkene gjort tidligere rundt bruken av lange gjengestenger skal denne oppgaven se nærmere på hvordan man kan bruke lange aksialbærende gjengestenger på en enklere måte med hovedfokus på en praktisk og enkel monteringsløsning.

## 1.2 MÅL

Med utgangspunkt i forsøkene som er gjort på lange gjengestenger vil målet for oppgaven være å se på en måte å benytte lange gjengestenger for skjøting av bjelker og buer, som gir en stiv forbindelse samtidig som det tar hensyn til å gjøre det enklest mulig for praktisk gjennomføring ved montering på byggeplass.

## 1.3 AVGRENSINGER

Bruken av lange aksialbærende skruer er fremdeles på forsøksstadiet. Det er ikke avgjort noen spesifikk bruk til skruene og alternativene til hvordan man kan vinkle denne oppgaven er derfor mange. Vi har valgt å holde oss til skjøting av lange aksialbærende skruer gjennom hele oppgaven, der det til slutt ble sett på en momentstiv bjelkeskjøt.





## 2 LITTERATURSTUDIE

---

### 2.1 TREVIRKE

#### 2.1.1 Tre som byggemateriale

Som byggemateriale har tre en lang historie i Norge og er den dag i dag det mest brukte materialet til å bygge boliger med. 70% av alle hus er småhus, og av disse er 98% bygget i tre [1]. Siden byggingen av Vikingskipet på Hamar til OL i 1994 har tre også blir mer benyttet i større konstruksjoner, til alt fra veibroer til bærebjelker under taket på Gardermoen flyplass. Dette kommer av utviklingen industrien har vært gjennom siden OL ved å finne metoder som har gjort det mulig å benytte treet i større konstruksjoner ved hjelp av dybelforbindelser og innslissede stålplater.

Fordelene med tre som byggemateriale er mange. Blant annet er det en råvare som vokser over hele landet og er lett tilgjengelig i store mengder. Det er også lett å bearbeide, samtidig som det har stor styrke i forhold til egenvekten. Og sist, men ikke minst er konstruksjoner i tre vakre å se på.

Det finnes også noen ulemper ved bygging i tre. Blant annet har ubehandlet tre lite motstandsevne mot fukt. Trekker treet til seg fukt vil materialet endre egenskaper og kan blant annet miste styrke. Blir treet utsatt for miljøforandring vil det også endre form. Treverket vil blant annet utvide og krympe avhengig av fuktinnhold. Over lengre tid med belastning vil også treet få permanente formendringer. I tillegg er tre et byggemateriale som trenger jevnlig behandling for at det skal beholde sine egenskaper og ikke gå i oppløsning [2].

Tre er klassifisert som et brennbart materiale, men er likevel å se på som et brannsikert materiale. Dette grunnet treet oppførsel ved brann som er forutsigbare og påvirkningen på styrke og stivhet ved brann er lav [2].

Ved brann vil det danne seg en forkullingsone. Når denne har dannet seg vil treverket innenfor få en naturlig isolasjon mot brann og temperatur. Dette er noe av årsaken til treet gode styrkeegenskaper ved brann. Når man benytter store dimensjoner vil andelen av materialet som er i forkullingssoner være lite til det resterende materialet som er uskadd og man beholder dermed stor styrke gjennom en brannsituasjon.

På grunn av disse egenskapene som er blitt bedre dokumentert enn tidligere, er det derfor de senere år opphevet mye av det strenge lovverket rundt bygging av trehus over et visst antall etasjer og det er derfor nå åpent for å bygge høyblokker i tre som er klassifisert som brannsikre.

Som byggemateriale er tre komplisert, da det er et anisotrop materiale, som betyr at det har forskjellige egenskaper avhengig av fiberretningen i treet. Det deles opp i 3 hovedretninger. Lengderetning, som er i fiberretning, radiell retning, som er retningen fra kjernen og ut mot barken, og til slutt tangensial retning, som er retningen til årringene og står normalt på de to andre. [3]

### 2.1.2 Miljømaterialiet tre

Miljø har vært i økende fokus over de senere årene, mest på grunn av menneskeskapt miljøforandringer. Byggenæringen er en stor belastning på klimaet og behovet for å bli mer miljøvennlig er nødvendig. Der har tre den fordel at det står i en særstilling som det eneste fornybare byggematerialet vi kjenner til i dag. Måten det fremstilles på er både miljø- og ressurseffektivt og bidrar til å senke klimabelastningen fra byggenæringen.

I tillegg til å være en fornybar ressurs, binder og lagrer treet CO<sub>2</sub>.

Staten ønsker å fremme tre som byggemateriale og statsbygg [4] har blant annet konkludert med at tre som byggemateriale kan hjelpe det offentlige å nå de nasjonale målene på klima- og miljøområdet. Noen av fordelene er at det [5] legges som nevnt vekt på trematerialet som brukes i bygg lagrer CO<sub>2</sub> og at man erstatter bruken av fossilt karbon ved å bruke trematerialer i stedet for materialer som er energikrevende å fremstille og petroleumsbaserte materialer.

### 2.1.3 Høyere trehus

Noe av grunnlaget for å gjennomføre denne masteren og forsøkene som er gjort de siste årene er å gjøre tre til et konkurransedyktig alternativ til stål og betong i hus opp til 6-8 etasjer. Det er gjort et mulighetsstudie [6] på et 20 etasjer høyt trehus, kalt Barentshus som viser at det er mulig, men noe av problematikken har vært stivheten til bygget i forhold til jordskjelv og vindbelastning. Prosjektet ble aldri bygd, men kun fullført som mulighetsstudie.

I Bergen ble det i april 2014 startet bygging av det 14-etasje høye trehuset kalt "Treet" [7]. Når det står ferdig i 2015 vil det være verdens høyeste trehus.

Konstruksjonen består av et lastbærende rammesystem i limtrebjelker, to etasjer som gir ekstra styrke og prefabrikkerte byggemoduler som stables på hverandre over garasjen og de to styrkeetasjene som befinner seg i femte og tiende etasje. På hver av de forsterkede etasjer er det støpt en betongplate. Hensikten med disse er for å koble sammen fagverket av limtre, men har også som funksjon å øke egenvekten til bygget som forbedrer de dynamiske egenskapene, i tillegg til å fungere som et nytt fundament for de prefabrikkerte byggemodulene.

I forbindelsen er det benyttet dybelforbindelser med innslissede stålplater. En velkjent måte for å lage solide forbindelser i trebroer og store trebygg. På grunn av at både limtreprodusent og prosjekterende ingeniører hadde god kjennskap og erfaring med dybelforbindelser ble det aldri vurdert noen annen metode for forbindelsene.



Figur 2-1: Treet i Bergen [7].

## 2.2 FORBINDELSER

### 2.2.1 Dybelforbindelser

Da vikingskipet ble bygget til OL på Lillehammer i 1994 ble det utviklet en ny metode for å lage forbindelser til store konstruksjoner i limtre. Dybelforbindelse med innslissede stålplater hadde før dette ikke vært benyttet og man hadde heller ikke før dette en god og sikker måte å sette opp store trekonstruksjoner.

Treet i Bergen [6] som er under oppføring har benyttet innslissede stålplater i forbindelsene. I prinsippet er Treet i Bergen en trebro, utført som et fagverk som har blitt satt på høykant. Bygget er en kombinasjon av en rammekonstruksjon og et boks system. Konstruksjonen består av søyler, bjelker og skråavstivere med innslissede stålplater i forbindelser. I tillegg er hver femte etasje en forsterket spesialetasje med et betongdekke som fungerer som underlag for fire nye etasjer med moduler.

Den største negative siden ved dybelforbindelser i store tverrsnitt er at man ikke kan dimensjonere de til å overføre momenter. På grunn av faren ved utrivning mellom dyblene og treet, er hullene i stålplatene konstruert på en slik måte at de tillater noe rom for bevegelse av dyblene. Dette medfører at forbindelser ikke er momentstive og ikke kan bidra noe til stivheten i en rammekonstruksjon i tre ved dimensjonering. Allikevel er dette knutepunktet som benyttes mest, dette på grunn av kapasiteten til å overføre store krefter, og at forbindelsen er skjult og dermed bra med tanke på brann. [8]



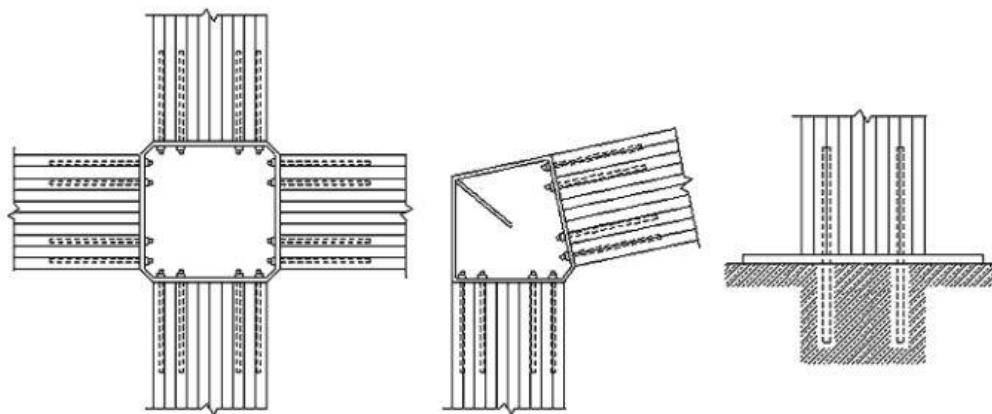
*Figur 2-2: Forbindelse med innslissede stålplater og dybler.*

### 2.2.2 Innlimte gjengestenger

I følge Larsen og Enjily [3], gir innlimte gjengestag gode lastbærende egenskaper både aksialt og lateralt. Forboring kan utføres både, normalt, parallelt og med vinkel på fiberretning. Dette gir flere konstruksjonsmuligheter, og blir dermed mer og mer brukt i limtreforbindelser. Kapasiteten til de innlimte gjengestagene øker med  $\sqrt{l}$ , der  $l$  er gjengestagets innlimingslengde. Denne forbindelsen er relativt stiv, og faren for et sprøtt brudd vil derfor være store. Det er derfor viktig at det blir lang nok innlimingslengde, som sikrer flyt i gjengestag og dermed et duktilt brudd.

Bruken av innlimte gjengestenger har hovedsakelig vært benyttet i forbindelser mellom konstruksjonselementer (tre-tre og tre-stål forbindelser) og som forankring, da som-tre-betong forbindelse. [9]

Med hensyn på statikken, oppnår innlimte gjengestenger gode egenskaper i momentstive forbindelser, som for eksempel i rammehjørner. En av de største fordelene med en limt tre-tre forbindelse er at gjengestagene er skjult. Dette er både estetisk, i tillegg til at det gir en brannmotstand som er bedre enn forbindelser der stålet er synlig og utsatt for brann.

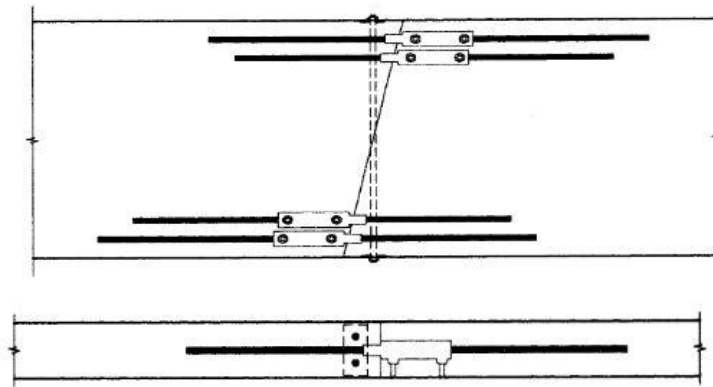


Figur 2-3: Eksempler på bruk av innlimte gjengestenger i stål-tre forbindelser og i forankring tre-betong [9].

Det finnes også noen studier som har sett på bruken av innlimte gjengestenger i bjelkeskjøter. I New Zealand [10] er det utført noen studier som viser til at innlimte stålstenger er en god metode for skjøting av store trekonstruksjoner. Også her blir det lagt vekt på at skjøten ikke vises og den gode brannmotstanden.

Det vil allikevel være utfordringer, da en mangel på å gi en sikker kontroll på at limet er kommet godt inn i hullet og rundt gjengestagene, gjør at dette ikke er en 100% sikker skjøtemetode, og det anbefales at skjøting med lim blir utført i kontrollerte miljøer innendørs [9-10].

For å skape en forbindelse som er bedre egnet for montering på byggeplass, er det blitt presentert en bjelkeskjøt med innlimte stålstenger som kobles sammen til slutt med en stålhylse som blir gyst med epoxy [10]. Denne løsningen er hentet fra betongindustrien, hvor den aktuelle stålhylsen er hentet i fra. Hylsen blir skrudd på stålstenger på den ene side, deretter ført sammen med den andre bjelkedelen før de blir gyst med epoxy.

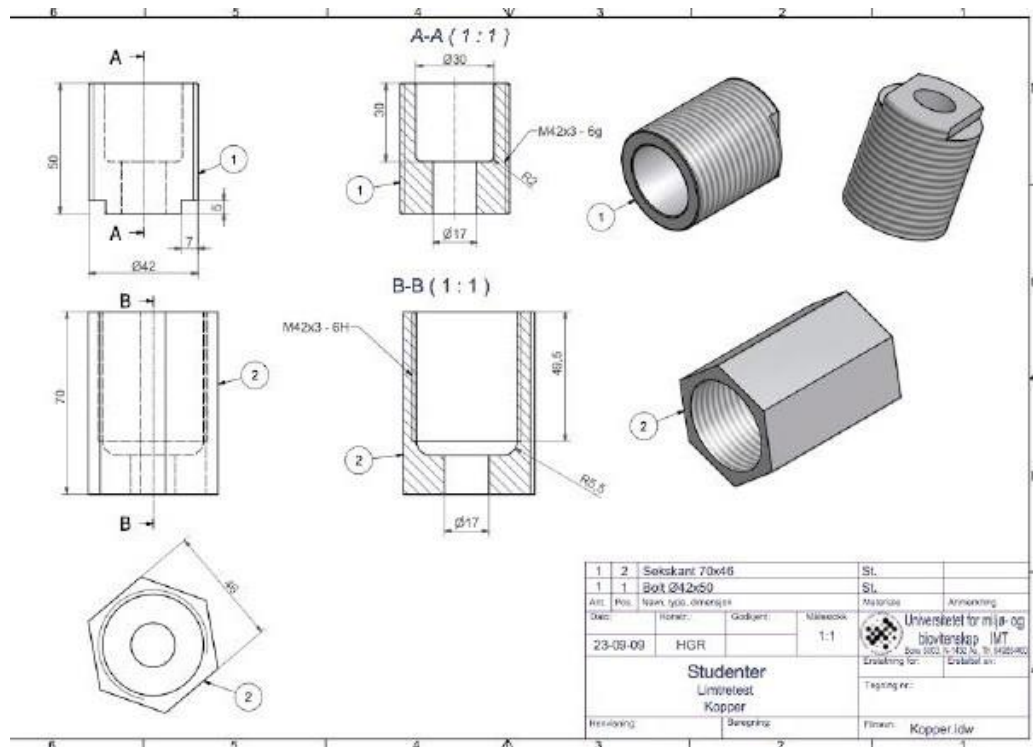


Figur 2-4: Bjelkeskjøt med innlimte stenger som er skjøtet med en stålhylse fra REID-bar [10].

Eurokode 5 har ingen konkrete regler på hvordan kapasitet skal beregnes hos innlimte skruer, da dette er et sammensatt og komplekst system bestående av tre, lim og skruer. Eurokode 5 gir bare krav om at limte forbindelser skal verifiseres uten at det er gitt noen spesifikke regler om dimensjonering. [11]

### 2.2.3 Lange aksialbærende skruer

Etter at Eurokode 5 ble introdusert, der det ble tillatt å regne lastoverføring fra treets endevend, er det blitt gjort flere studier på uttrekkskapasitet til lange skruer. Ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, NMBU, har det blitt gjennomført flere masteroppgaver som tar for seg lange aksialbærende skruer. Buene [12] har sett på skjøting av bjelker ved bruk av lange SPAX skruer, som skjøtes sammen ved hjelp av spesialkonstruerte gjengede kopper. Buenes testoppsett er forankret i studier ved NMBU der det er testet uttrekkskapasitet til SPAX skruer. Forbindelsen skulle fungere slik at skruene i hver bjelkeende ble montert gjennom to spesialkonstruerte kopper. Disse skulle deretter gjenges sammen, i prinsippet samme funksjon som en strekkfisk som blir strammet.



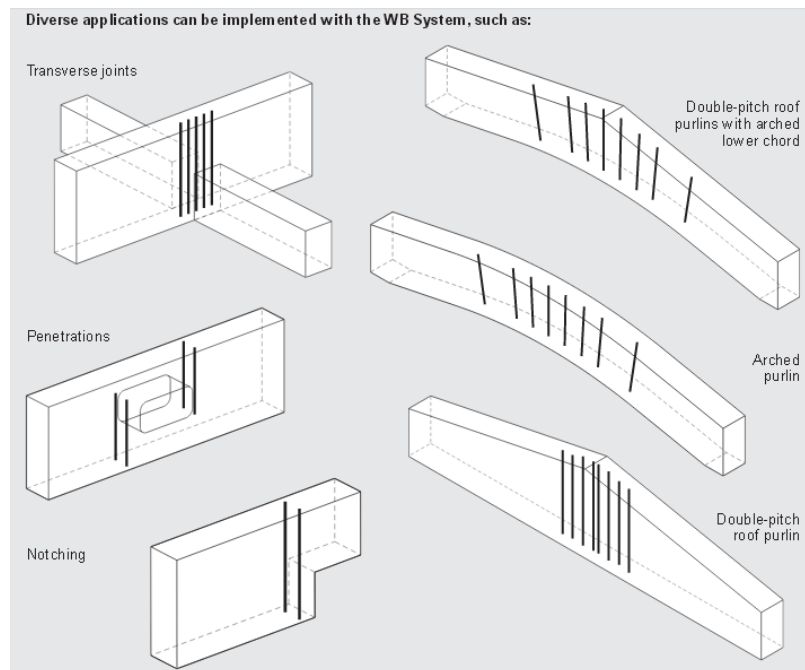
Figur 2-5: Illustrasjon av forbindelsen Buene produserte for å skjøte skruene [12].

Allikevel gir studier ved NTNU mest relevans for vår oppgave, da det er gjennomført flere tester av SFS Intec sine 20mm gjengestag, for å finne uttrekkskapasitet i forhold til inngrepplengde og vinkel på fiberretning. Stamatopoulos [13] har sett både på stivhet ved uttrekk og kapasitet. Ut fra tidligere studier kan man konkludere med at bruk av lange aksialbærende skruer i endevend, gir en god kapasitet og stivhet. Det er først og fremst gjort forsøk rundt kapasiteten til skruen, men i og med at konseptet ikke har kommet lengre enn til teststadiet, er det fortsatt ikke utviklet noen enkle og praktiske konsept for bruk av skruene.

#### 2.2.4 Gjengestenger fra SFS Intec

Gjengestagene som skal benyttes produseres av SFS Intec [14] som er en ledende global aktør innen festemidler til blant annet byggenæringen. Produsentens bruksområde for gjengestaget er til forsterkning mot skjær i fiberretning av eksisterende trekonstruksjoner og av utsparinger i trebjelker.

Gjengestagene monteres ved at det først forbores et hull tilsvarende kjernediameteren til gjengestaget, deretter kappes gjengestaget i ønsket lengde og gjenges inn med en kraftig drill.



Figur 2-6: Bruksområdet for gjengestengene fra SFS Intec [14]

SFS Intec oppgir en strekkfasthet til gjengestengene på 800 MPa [15] Karakteristisk strekkkapasitet til SFS Intec sine 20mm gjengestag er dermed på 141.4 kN.

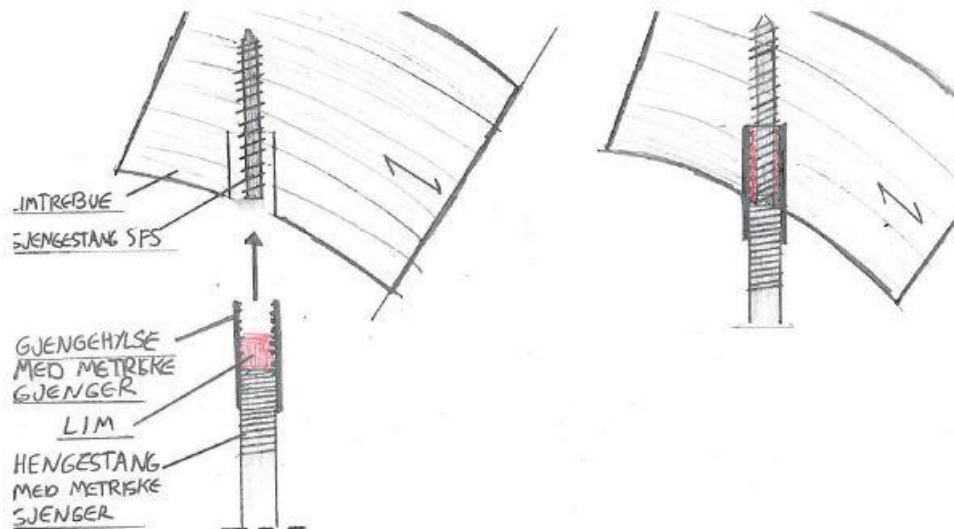
$$F_{flyt.SFS} = f_{ub} \times A_s = 1,414 \times 10^5$$

**Formel 2.1**



### 2.2.5 Skjøting av SFS ved bruk av gjengehylse og lim

Innerdal [16] har tatt for seg et studie av skjøting av SFS Intec 20mm gjengestag. Dette studiet er dreier seg om en teori der man forankrer hengestag i limtrebruer mot en pre-installert gjengestag i trebuen. Hengestaget skal forankres mot gjengestaget ved bruk av en stålhylse som blir fylt med epoxy.



Figur 2-7: Illustrasjon av prinsippet som Innerdal testet [16].

Det er blitt sett på flere typer lim, der det til slutt ble benyttet Mapei Mapepoxy L til forsøkene. Skjøtehylsen ble overdimensjonert, med ytre diameter på 40mm, slik at det skulle oppstå brudd i lim eller SFS. Innvendig er hylsen designet med M24 gjenger, som skal gi god nok heft og godt nok rom for limet å komme godt rundt gjengestaget.

Hensikten med forsøkene var å finne ut hvilken innlimingslengde som forårsaket brudd i SFS og dermed gi en skjøte med kapasitet lik en kontinuerlig SFS. Det ble testet 16 skjøter fordelt på 6 forskjellige innlimingslengder, 40mm, 60mm, 80mm, 100mm, 110mm og 120mm. Ved de to korteste innlimingslengdene, 40mm og 60mm, oppsto det brudd i lim ved alle forsøk.

For de tre lengste innlimingslengdene, 100mm, 110mm og 120mm, oppsto det brudd i SFS ved alle forsøk.

Den mest interessante innlimingslengden var 80mm, der det oppsto flyt i gjengestaget først, men bruddstyrken til SFS overgikk limets kapasitet og det oppsto til slutt brudd i limet. Så med en innlimingslengde på 100mm skal man få brudd i SFS, så lenge skjøtehylsen er dimensjonert til å ta opp strekkraften.

Dette studiet er lett å videreføre til vår problemstilling med skjøting av SFS, for å oppnå lik styrke som en kontinuerlig SFS.



### 3 TEORETISK TILNÆRMING

---

#### 3.1 MIDLERE VERDIER FOR MATERIALEGENSKAPER

Egenskapene til produktene vi benytter i denne testen er oppgitt som karakteristiske verdier fra produsentene. De karakteristiske verdiene baserer seg på midlere verdier for materialene som blir endret med en 5% fraktil dersom materialegenskapene har en lav verdi eller om de har produkttegenskaper som er ugunstige [17]

For å kunne sammenligne beregningene våre, basert på teorien, opp mot resultatene vi får i laboratoriet, er det viktig at sammenligningsgrunnlaget er det samme. De resultater vi får i laboratoriet regner vi om til midlere verdier, standardavvik og kovarianser. For å få de karakteristiske verdiene fra produsenten over til midlere verdier benytter vi oss av de samme formler som Westerheim [18] gjorde for omregning. Teorien bak beregning av midlere verdier baserer seg på teori fra boken "Probability, statistics, and decision for civil engineers" [19] og selve beregningen av midlere verdier baserer seg på JCSS Probabilistic Model Code [20].

Etter logaritmisk normalfordeling er den karakteristiske verdien gitt ved:

$$F_x(x_k) = \Phi\left(\frac{\ln(x_k) - \lambda}{\xi}\right) \quad \text{Formel 3.1}$$

Kovariansen er gitt ved:

$$COV = \sqrt{e^{\xi^2} - 1} \quad \text{Formel 3.2}$$

Tabell 1: Kovarianser for aktuelle materialer.

Materiale	Egenskaper	Kovarians
Limtre	Bøyefasthet	0,15
	Trykkfasthet	0,15
	Strekfasthet	0,18
	Skjærfasthet	0,15
Stål	Flytespenning	0,07
	Strekfasthet	
	E-modul	
Høyfast stål	Flytespenning	0,1
	Strekfasthet	
	E-modul	

Tallene fra tabell 1 er hentet fra tall fra Probabilistic Model Code: For treet er kovariansene noe tilpasset, da treettegenskaper er veldig avhengig av type tre. Det anbefales derfor at kovarianser

bestemmes ut fra tester. Det er vanskelig i vårt tilfelle og vi benytter derfor de samme kovariansene som [18] da de har vist seg å stemme godt med testene.

Snur om på formelen med hensyn på  $\xi$ :

$$\xi = \sqrt{\ln(COV^2 + 1)} \quad \text{Formel 3.2}$$

Den siste parameteren  $\lambda$  finnes ved formelen:

$$\lambda = \ln(x_k) - \Phi^{-1}(0,05)\sqrt{\ln(COV^2 + 1)} \quad \text{Formel 3.4}$$

Midlere verdi er til slutt gitt ved:

$$\mu = e^{\left(\lambda + \frac{\xi_m^2}{2}\right)} \quad \text{Formel 3.5}$$

Det er ikke benyttet midlere verdier for dimensjoneringen av hylsen. Dette ble gjort i henhold til karakteristiske verdier. Årsaken til dette er at hylsen ble dimensjonert på tidlig i prosessen og vi hadde på gjeldene tidspunkt ikke oversikt over midlere verdier. Men da hylsen uansett var ment dimensjonert så kraftig at den ikke ville ryke har vi ikke gjort noen videre dimensjonering da denne dimensjonering er gunstig og fører til større styrke enn antatt.

### 3.2 UTTREKSKAPASITET I ENDEVED

Det har blitt gjort en del forsøk de siste årene ved NTNU rundt kapasiteten til lange aksialbærende skruer. I all hovedsak er det gjengestag fra SFS Intec med ytre diameter på 20mm som er blitt testet.

Larsen [21] har benyttet beregningsgrunnlaget fra eurokode 5 [11] til å beregne uttrekkskapasiteten til 20mm SFS gjengestag, selv om eurokode 5 kun har beregningsgrunnlag for skruer opp til en diameter på 12mm. Testene ble gjort i en bjelke/søyleskjøt med ganske små dimensjoner, det vil si at gjengestengene også ble utsatt for noe moment og skjær, og ikke kun aksialkraft som formlene tar hensyn til. Gjennom de 12 testene som ble utført har uttrekk av gjengestengene vært bruddårsak i alle tilfeller. Med dette oppsettet, der gjengestengene blir utsatt for skjærkrefter og moment, er det blitt brudd mellom gjengestaget og trematerialet, helt opp til 1000mm inngrepslengde.

Basert på resultatene fra testene konkluderer Larsen [21] med at beregningsgrunnlaget fra eurokode 5 stemmer godt med resultatene fra testene. Dette gir oss en formening om at beregningsgrunnlaget fra eurokode 5 stemmer godt overens med resultater der uttrekk er påvirket av moment og skjær. Det er foretatt lite antall tester for hvert oppsett, og det kan derfor ikke konkluderes med at dette er korrekt.

Stamatopoulos [13] har også testet uttrekkskapasitet til lange aksialbærende skruer. Disse testene er utført slik at utrivningen kun påvirkes av rent strekk. Testen er satt opp med et gjengestag

gjenget inn i et trestykke med forskjellige vinkler i forhold til fiberretning og forskjellige inngrepslengder. Beregningsgrunnlaget er utviklet med utgangspunkt i Volkensens teori for aksialbelastede forbindelser, og testresultatene viser god korrelasjon med teorien. Forsøkene er utført i vinklene 0, 10, 20, 30, 60 og 90 grader på fiberretning og inngrepslengden for de forskjellige vinklene er testet med 100, 300, 450 og 600mm. Hver av testene er utført 5 ganger. Teorien viser at med 600mm inngrepslengde vil man få flyt i gjengestaget før man får uttrekk. Dette stemmer godt overens med testene og i noen av forsøkene oppsto det flyt i gjengestaget med kun 450mm inngrepslengde. Konklusjonene er at kapasitet øker ved økning av inngrepsvinkelen på fiberretning.

Ut fra antall tester som er utført i de to forskjellige forsøkene er det naturlig å tro at grunnlaget til Stamatopoulos [13] gir den beste tilnærmingen som også konkluderer med at teori og eksperiment stemmer godt med hverandre. Eurokoden gir en maksimal uttrekkskapasitet på 78.4kN parallelt med fiberretning og 600mm inngrepslengde, og Stamatopoulos [13] gir en maksimal uttrekkskapasitet på 148.4kN parallelt med fiberretning og 600mm inngrepslengde. Dette er så mye som nesten dobbelt så stor kapasitet.

Uttreksformelen i eurokode 5 er som følger:

$$F_{ax.RK} = \frac{n_{eff} \times f_{ax.k} \times \Phi \times l \times k_d}{1,2(\cos(\alpha_{rad}))^2 + (\sin(\alpha_{rad}))^2} = 78,4 \times 10^3 N \quad \text{Formel 3.6}$$

Se vedlegg 7.3.3 for nærmere beregninger.

Uttreksformelen basert på Volkensens teori, utledet av Stamatopoulos [13], gir en følgende formel:

$$P = \left( p \left( \sqrt{\frac{A_s \times E_s \times \pi \times d_y}{\Gamma_e}} \right) \times f_{\omega,\alpha} \cdot 1 \right) = 148,4 \times 10^3 N \quad \text{Formel 3.7}$$

Se vedlegg 7.3.3 for nærmere beregninger og utledning.

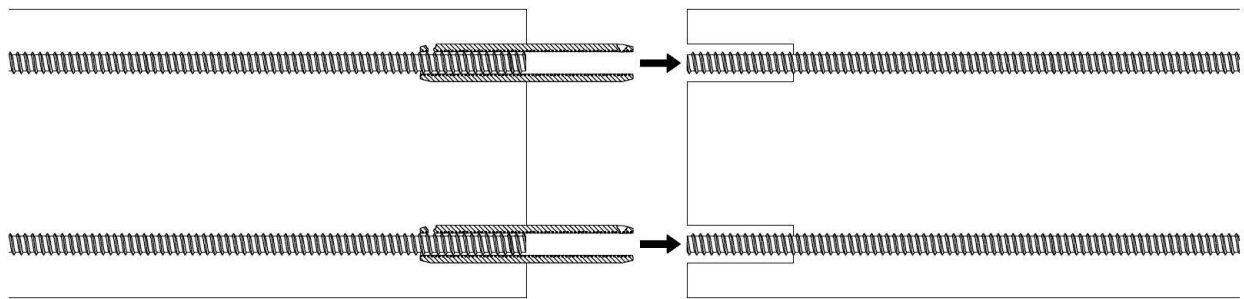
Vi har valgt å benytte Stamatopoulos [13] som beregningsgrunnlag for våre tester. Dette med grunnlag at utledningen fra Volkensens er bedre dokumentert til å gi en god tilnærming mellom teori og tester enn det som er gjort ved bruk av eurokode 5. Selv om det konkluderes [21] med at beregningen fra eurokode 5 gir en god tilnærming, er dette basert på et betydelig mindre forsøksgrunnlag, samtidig som vi ser at eurokode 5 gir dårlig tilnærming når vinkel mellom gjengestag og fibre reduseres.

### 3.3 PRAKTISK UTFORMING AV KNOTEPUNKT

Tidligere studier ved Innerdal [16], har vist at liming av SFS ved hjelp av en skjøtehylse, vil gi like stor kapasitet som et kontinuerlig gjengestag. Dette gjør at montering av et momentstivt knutepunkt ved bruk av lange aksialbærende skruer, blir enklere. Vi skal se på 2 forskjellige momentskjøter, der den første blir en bjelkeskjøt, butt mot butt, der gjengestenger og hylse tar opp strekkraft, og den andre momentskjøten er en bjelke/søyleskjøt, som blir satt opp likt som Westerheim [18], bare med større dimensjoner.

#### 3.3.1 Bjelkeskjøt

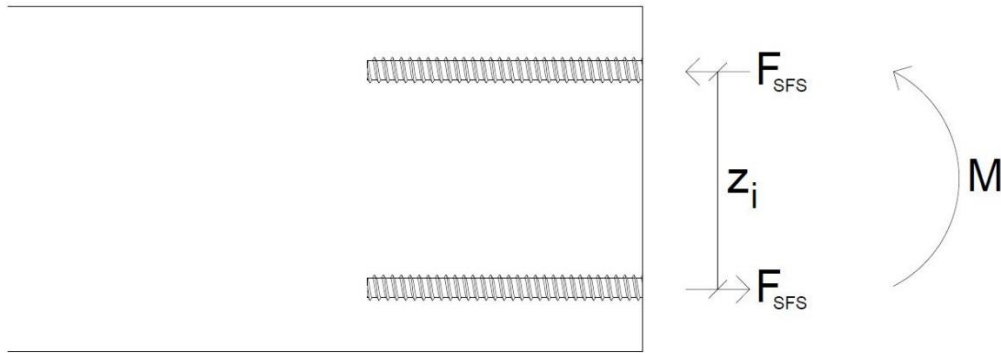
Bjelkeskjøten skal utføres med 140mm x 270mm limtre. SFS skal monteres i bjelkene, med en inngrepslengde på 600mm. Totalt blir gjengestaget på 700mm, da 100mm skal limes inne i skjøtehylsa. Hylsa er 200mm lang og skal være plassert 100mm inn i hver bjelkeende. Gysehull bores, et i hver bjelkeende, som korresponderer med hullene i hylsa. Hylsa blir så plassert i den ene bjelkeenden og holdes fast ved at et rør for å gyse gjennom, settes inn i gysehullet og ned til hullet i hylsa. Deretter settes bjelkeendene mot hverandre, og Mapei Mapepoxy L epoxy gyses inn.



Figur 3-1: Skisse som viser tværsnittet i bjelkeskjøten hvor man ser prinsippet med gjengestenger som er festet i hver bjelkeende, før de føres sammen med en skjøtehylse som blir gyst med epoxy.

Beregninger etter Volkensens teori [13] viser at en inngrepslengde på 600mm skal gi flyt i gjengestaget, før utrivning. Vil allikevel få utrivning som bruddårsak, da bruddkapasiteten til gjengestaget er høyere enn uttrekkskapasiteten. Våre beregninger og tester av hylseforbindelsen gir at bjelkeskjøten skal ha en momentkapasitet på 24,04kNm med et gjengestag i bunn og i topp. Dette oppsettet har en definert momentarm, og beregnes etter figur 3-2.

$$M_{1skruer} = F_{SFS} \times z_i = 24,04kNm \quad \text{Formel 3.8}$$

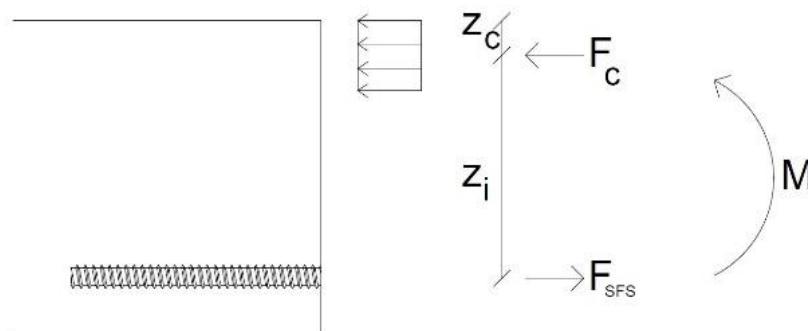


Figur 3-2: Momentarm i bjelkeskjøten med gjengestag i topp og bunn

Med to gjengestag i bunn og to gjengestag topp, vil vi oppnå en momentkapasitet på 48,08kNm.

$$M_{2skruer} = n_{SFS} \times F_{SFS} \times z_i = 48,08kNm \quad \text{Formel 3.9}$$

Med gjengestag bare i bunn, regner vi en større momentarm, og bruker definisjonen i figur 3-3. Får momentkapasiteter på 29,02 kNm med ett gjengestag bunn og 53,86 kNm med to gjengestag i bunn. Se vedlegg 7.3 for nærmere beregninger.



Figur 3-3: Momentarm for bjelkeskjøt med gjengestag i bunn og kontakt i treet i topp.

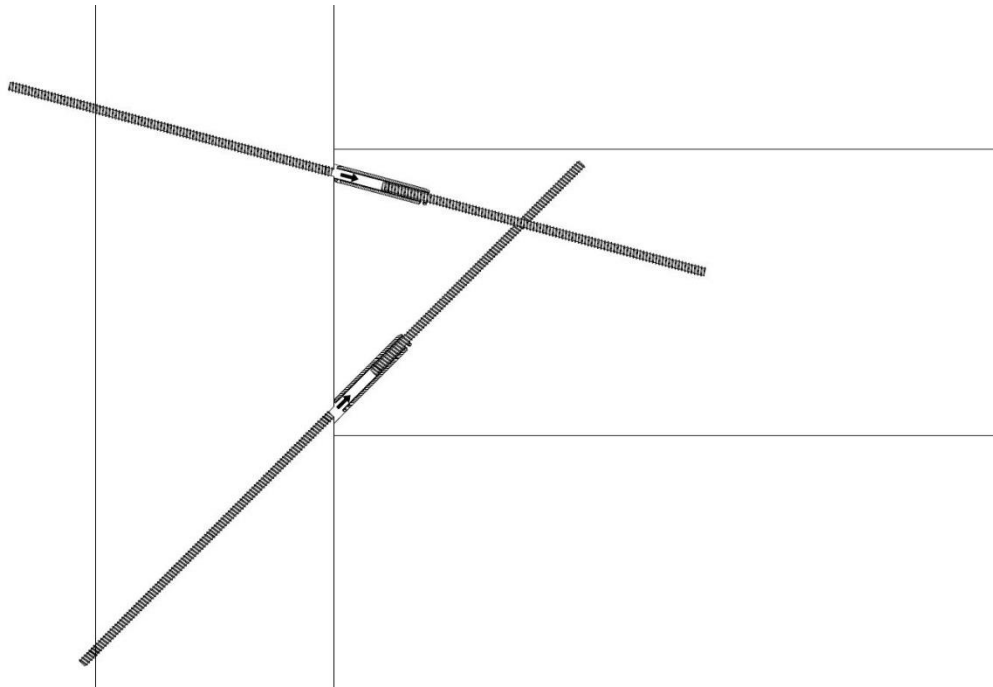
Vil variere antall gjengestag i topp og bunn for å se om det er noen forskjeller på stivhet i første rekke, men også for å få en større grunnlag for å bekrefte a teorien stemmer.

### 3.3.2 Bjelke/søyleskjøt

Ved bjelke/søyleskjøt skal hylsene plasseres i bjelken. Det vil bli montert to hylser ved siden av hverandre med 15graders helning i toppen, og en hylse med stigning 45grader i bunn. Før hylsene kan settes på plass, vil det forbores et 200mm dypt hull, to i topp med 15graders helning og en i bunn med 45graders stigning, med diameter 38mm som hylsa skal plasseres i. Deretter bores et 15mm hull for SFS gjengestag, videre inn fra 38mm hullet, slik at gjengestaget så kan bli montert på forhånd.

I søylen blir det også forboret 15mm hull, to som korresponderer med øvre gjengestenger i bjelken og ett som korresponderer med nedre gjengestag. Gjengestengene i søylen blir montert slik at staget er kant i kant med framsiden av søylen, og at 100mm stikker ut på baksiden. Når

bjelken nå blir plassert i riktig posisjon ved søyla, monteres den med mindre skruer som holder den på plass. Så gjenges staget i søylen, de 100mm inn i søyla og inn i hylsa i bjelken. Gysehull i hylsa er nå plassert oppover og gysehull i treet kommer inn på skrå ovenfra.



Figur 3-4: Skisse av utforming av bjelke/søyleskjøten

Tidligere studier ved Westerheim [18], gir begrensninger til skjøtens kapasitet på grunn av for lav uttrekkskapasitet i søylen. Etter dimensjonering av et referansebygg, i Focus Konstruksjon, med 6 etasjer og et bjelkespenn på 7 meter, bør søylene ha en dimensjon på 500x500mm, og bjelkene en dimensjon på 160x600mm. Innspenningsmomentet blir på 115 kNm ved bruksgrense. Dette vil være det aktuelle momentet for gjengestagene å ta opp. Se vedlegg 7.5. Omregninger, med grunnlag fra Westerheim [18], gjør at innspenningsmomentet gir en kraftresultant på 169 kN i gjengestagets posisjon og retning.

$$F_{bruks} = \frac{M_{bruks} - \left( \frac{b \times f_{c.0.m} \times z_c^2}{3} \right)}{z_i} = 169 \text{ kN} \quad \text{Formel 3.10}$$

Dette gjør at det må to SFS til for å ta opp kraftresultanten. Se vedlegg 7.4 for nærmere beregninger.

Stamatopoulos [13] formelgrunnlag viser at uttrekkskapasiteten vil overstige gjengestagets flytegrense ved 600mm inngrepslengde, uavhengig av vinkel på fiber. Dette er også bekreftet av forsøkene i [13]. Dermed vil denne skjøten være meget aktuell å teste, ved å da benytte søyler på, for eksempel, 600mmx600mm, for å verifisere kapasitet og sammenligne opp mot teori.

Bjelke/Søyleskjøten kommer ikke lenger enn til teoristadiet, da tiden ikke strekker til og vi har beveget oss inn mot forskjellige testoppsett for bjelkeskjøt, butt mot butt.

### 3.4 HYLSEDESIGN

#### 3.4.1 Dimensjonering av hylsa

Fra studiet til Innerdal [16], som har tatt for seg innlimingslengder av SFS gjengestag i stålhylser, vil vi ut fra dimensjonering etter formel 3.6 og formel 3.7, få flyt i gjengestag ved en innlimingslengde på 97,9 mm med Mapei Mapoxy L, og for å oppnå brudd i gjengestag trenger man en innlimingslengde på 110,1 mm. Ut fra disse beregningene bør hylsen ha en total lengde som er over  $2 \times l_{min,f}$ .

$$l_{min} = \frac{F_{SFS}}{\pi d_{SFS,y} \tau_{lim}} = 97,9 \text{ mm} \quad \text{Formel 3.11}$$

$$l_{min,f} = \frac{F_{SFS,f}}{\pi d_{SFS,y} \tau_{lim}} = 110,1 \text{ mm} \quad \text{Formel 3.12}$$

Resultatene til Innerdal [16] viser derimot at man kan redusere innlimingslengden noe. Da 100 mm innlimingslengde gir brudd i gjengestaget i alle tilfeller, og ved 80mm opptrer flyt i skruen først. I tillegg oppnår man nesten bruddlast på gjengestagene.

Basert på disse forsøkene velger vi å redusere nødvendig innlimingslengde fra 110,1 mm, ned til 100 mm.



Figur 3-5: Ferdig produsert hylse sammen med en kort bit av et SFS gjengestag.

Beregninger er gjort i henhold til dimensjoneringsregler i eurokode 3 [22], gir en minste ytre diameter på 34,7mm, ved det svakeste snittet hvor indre diameter er 24mm. Hylsa designes med innvendig diameter på 24mm og M24gjenger, dette for å sikre heft mellom lim og hylse.

Utvendig velger vi 35mm diameter, og med dette vil vi ha nok gods til å ta opp strekkraft og samtidig nok rom til limet mellom gjengestag og hylse.

Det er ønskelig at bruddet skjer i gjengestaget og ikke i hylsen eller limet. Da gjengestagene er produsert i henhold til strenge krav, vil den være komponenten som er sikrest å bruke som dimensjonering mot brudd. Hylsen er derfor dimensjonert etter strekkraft i gjengestaget på 175 kN basert på tidligere strekkforsøk blant annet gjort gjennom forsøkene til Innerdal [16] og Stamatopoulos [13], selv om gjengestaget i henhold til dimensjonering skal gå til brudd ved 159 kN. Arealet av tverrsnittet til hylsen er dimensjonert etter formel 3.8 som videre gir en ytre diameter på hylsen etter formel 3.9.

$$A_{hylse} = \frac{F_{SFS}}{\sigma_s} = 493 \text{ mm}^2 \quad \text{Formel 3.13}$$

$$d_y = 2 \sqrt{\frac{A_{hylse}}{\pi} + r_i^2} = 34,7 \text{ mm} \quad \text{Formel 3.14}$$

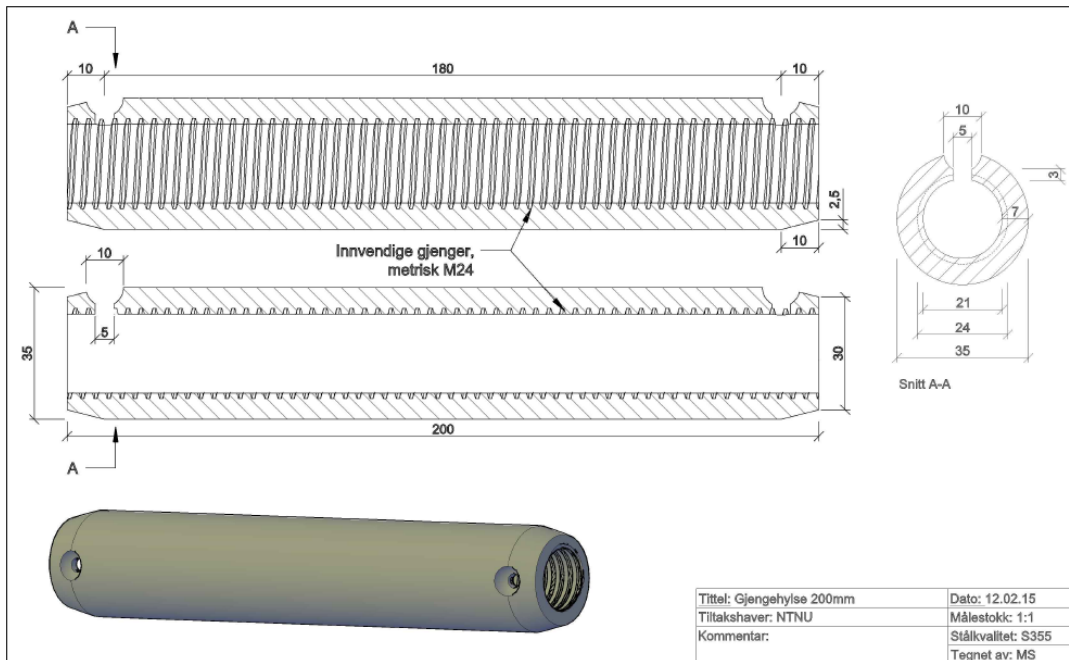
Hylsens design gir en kapasitet på 181kN, som er tilstrekkelig for å gi brudd i SFS. Se vedlegg 7.2 for nærmere hylseberegninger.

$$\sigma_{hylse} = \frac{F_{SFS}}{A_{hylse}} = 284 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Formel 3.15}$$

Formel 3.10 viser til spenningen i hylsen, som ved flytlast i gjengestaget vil være på 284 MPa. Dette er mindre enn hylsens kapasitet mot flyt som er 355 MPa [22].

Reduserer ytre diameter på endene for å forenkle montering av hylsen i hullet. For en sikker gysing velger vi to hull i hylsa, ett ved hver ende. Prinsippet er at limet skal gyses gjennom det ene hullet for så å komme ut det andre som sikrer at limet har fylt hylsa. Gysehullene har størst diameter, med 10mm, i ytre og reduseres inn til 5mm diameter i indre. Hylsen er tiltenkt montert på forhånd fra fabrikk, og gysehull i hylsa vil da bli plassert riktig i forhold til gysehull i treet. Gysehullet i treet vil inneholde et stålrør som skal holde hylsa i posisjon.





Figur 3-6: Produksjonstegningen til hylsene.

### 3.4.2 Stivhet til hylse-forbindelsen

For å kunne dimensjonere stivheten til bjelkeskjøten er man nødt til å kunne benytte stivheten til hylseforbindelsen. Ved belastning av bjelkeskjøten vil rotasjon i hovedsak komme fra forskyvningen mellom gjengestaget og treet, og i hylseforbindelsen.

Forbindelsen er satt sammen av fire forskjellige komponenter, to gjengestenger, hylsen og limet. Noe av det som gjør beregningen av stivheten komplisert er antagelsen av hvordan kraftforløpet er gjennom forbindelsen. Ved overgangen mellom gjengestag og hylse vil det være maksimal kraft i gjengestaget. Denne kraften vil avta gjennom forbindelsen etter hvert som limet overfører kraften til hylsen. Akkurat hvordan kraftforløpet er vil være vanskelig å forutse, men man kan anta at den er noenlunde lineær for å gjøre beregningene enklest mulig.

Se vedlegg 7.2.3 for utfyllende beregninger.

$$k_{SFS} = E_{SFS} \times \frac{A_{brutto}}{l_{SFS}} = 185,6 \text{ kN/mm} \quad \text{Formel 3.16}$$

## 3.5 LIM

### 3.5.1 Prosedyre for gysing

Kapasiteten til en limt skjøt har blitt verifisert av Innerdal [16] med god korrelasjon mellom teori og eksperiment. Men forsøkene ble utført slik at kun kapasitet sto i fokus. Praktisk løsning av gysing og tetting ble ikke tatt hensyn til.

Den største utfordringen når det gjelder liming, er mangelen på å kontrollere forbindelsen etter gysing av limet. Skjøtehylsen vil befinne seg i trematerialet og man har derfor volumet av det gyste limet som indikasjon når hylsen er fylt.

Metoden som vil bli benyttet går ut på å gyse inn lim i den ene enden av hylsen via et hull i siden. Limet skal deretter flyte gjennom hylsen og ut et tilsvarende hull i den andre enden.

Hullene i limtreet og inn til hylsen er planlagt å borres slik at høyeste punkt i hylsen er lavere en utgangshullet. På denne måten bør limet kunne fylle hele hylsen før det kommer ut og være en god nok kvalitetssikring av gysingen.

Pretester ved bruk av gjennomsiktige akrylrør, som er satt opp likt med vårt utgangspunkt med stålhylse, SFS og pakninger, vil gi oss en indikasjon på om hylsen blir fylt opp og at luftbobler ikke blir igjen i hylsa.

### 3.5.2 Tetting av hylse

En annen utfordring vil være å tette overgangen mellom gjengestaget og hylsen slik at limet ikke renner ut. Det vil være noen millimeter opprom og limet vil like lett flyte ut gjennom åpningen, som å fortsette gjennom hylsen. For å løse problemet trengs en form for tetting.

Det ble valgt å anskaffe gummimatter med 5mm tykkelse for å lage våre egne pakninger. Der ytre diameter er på 30mm og indre hull diameter i pakningen var på 16mm. Pakningene blir så limt på i endene av hylsene, med to komponent lim.

Hva som er den optimale tykkelsen for pakningen er usikkert, da 5mm ble valgt fordi vi fikk tak i det på en enkelt måte. Gummien finnes også i tykkelser på 1-4mm. Dersom man kan benytte en tynnere gummi vil man unngå at pakningene bygger ut så mye i enden av hylsene, men tynne pakninger vil tette dårligere rundt gjengestaget. Teorien bak tettingene er basert på antagelser og skjønn, og vi håper teorien blir bekreftet ved pre-testing av gjennomsiktige akrylrør, som nevnt ovenfor.

Ved endelig test, der en bjelke skal skjøtes, butt mot butt, vil hylsene bli plassert med endene inn i hver sin ende av limtrebjelkene. Ettersom bjelkeskjøten skal skyves på plass, mot hverandre, kan ikke pakningene være så små og tetting vil være umulig. Derfor vil det ikke bli benyttet pakninger ved bjelkeskjøt, butt mot butt.

Pakningstestene er derimot ment som et delmål, mot en søyle-/bjelkeskjøt, der det vil være mer aktuelt med en tett overgang mellom hylse og gjengestag. Da den ene hylseenden vil være kant i kant med bjelkeenden.

### **3.6 KANTAVSTANDER**

Kantavstander og innbyrdes avstander har blitt tatt opp av både Westerheim [18] og av Larsen [21]. Grunnlaget som finnes i eurokode 5 [11], tar for det første ikke hensyn til skruer med større diameter enn 12mm, i tillegg kommer det frem at det kan være nærliggende å tro at reglene også er alt for konservative da de ikke tar hensyn til om det forbores. Dersom det ikke blir forboret, vil skruen bli nødt til å presse ut treverket for å få plass. Dette skaper spenninger i treet som vil kunne ha en innvirkning dersom skruene står tett. Ved forboring vil man unngå store spenninger rundt skruerområdet. Derfor gjør vi som både Westerheim[18] og Larsen [21] og velger å se bort fra reglene i eurokode 5. Kantavstanden blir dermed satt til 2,5d, etter konsultasjon med veileder.

Det foregår for tiden forsøk på NTNU vedrørende gruppeeffekter av skruer som står tett samlet. Resultatene er foreløpig ikke klare, men vil forhåpentligvis gi rettinger inn mot eurokode 5 på sikt.

### **3.7 AKTUELLE BRUDDFORMER FOR BJELKESKJØTEN**

Ønsker en duktil bruddoppførsel, så foretrekker flyt i SFS før uttrekksbrudd og eventuelle oppsprekninger langs gjengestaget.

Bruddformer som antas å kunne oppstå:

- Uttrekk av SFS gjengestag
- Oppsprekking i fibre langs SFS gjengestag
- Brudd i hylseforbindelsen (brudd i lim)
- Brudd i SFS

#### **Uttrekk av SFS gjengestag**

Uttrekkskapasiteten til gjengestaget er avhengig av inngrepslengden. Ved beregninger etter Stamatopoulos [13] vil det oppstå flyt i gjengestag ved 600mm inngrepslengde. Det er valgt å benytte 600mm inngrepslengde på alle testene, dette for at vi helst bør unngå uttrekksbrudd. Dette beregningsgrunnlaget er basert på rent uttrekk, og vil da avvike noe fra aktuell situasjon i våre tester. Gjengestengene vil bli utsatt for moment, og dermed kan vi ikke garantere at uttrekk ikke vil skje.

#### **Oppsprekking i fibre langs SFS gjengestag**

Når bjelken bøyes ned, vil skjøteflatene rotere og gjengestengene bøyes. Ved store rotasjoner, vil det oppstå store spenninger fra gjengestaget mot treet. Gjengestaget vil prøve å rette seg ut ved å trykke mot treet. Størst spenninger vil oppstå ved skjøteendene, der hylsen er. Hylsen er veldig stiv og bøyes veldig lite og vil påføre treet store spenninger. For å unngå oppsprekking er det viktig med stor nok kantavstand. Kantavstandene er satt til 2.5d, noe som er under kravet til eurokode 5, men som etter konsultasjon med veileder er forutsatt å være godt nok.

### **Brudd i hylseforbindelsen**

Brudd i hylseforbindelsen vil oppstå om ikke limet er kommet godt nok rundt gjengestaget i hylsa. Selve hylsa er overdimensjonert, og vil ikke gå til brudd. Ved flere forsøk med gysing, har vi sett at limet flyter godt rundt gjengestaget i hylsen. Gysing gjennom treet har vist seg å fungere bra, da strekktest av et slikt oppsett ga brudd i SFS i alle tilfeller. Men mangel på kontroll av at limet er kommet godt inn i hylsen og rundt gjengestaget, gjør at dette kan være en aktuell bruddform.

### **Brudd i SFS**

Dette er den foretrukne bruddformen, da det oppstår flyt i SFS først og det vil oppstå en bruddform som er duktil. Ved denne bruddformen får vi størst momentkapasitet, da skjøten er dimensjonert etter gjengestagets kapasitet. For at denne bruddformen skal oppstå, må ingen av de andre bruddformene opptre før det blir brudd i gjengestaget.

### 3.8 STIVHETSBEREGNINGER

Det er blitt dokumentert at uttrekk med 600mm inngrepslengde parallelt med fiberretning, har en aksialstivhet på 139,3kN/mm. [23] Det vil si at forskyvningen til gjengestagene blir:

$$\frac{\text{Teoretisk flyt}_{SFS}}{\text{Teoretisk bruddstivhet}} = \frac{141,4kN}{139,3kN/mm} = 1,015mm \quad \text{Formel 3.17}$$

Dette må dobles, da det vil oppstå uttrekk fra begge sider. Total uttrekksforskyvning blir da på 2,03mm. Også deformasjon i hylsen er dokumentert ved Innerdal [16], der en innlimingslengde på 100mm gir en deformasjon på 0,35mm ved flyt i gjengestaget på 160 kN. Det vil si at forskyvningen i vår hylseskjøt blir det doble, da vi har innliming i begge ender:

$$2 \times \frac{\text{Teoretisk flyt}_{SFS}}{\text{Flyt}_{SFS}/\text{Deformasjon}} = 2 \times \frac{141,4kN}{160kN/0,35mm} = 0,6mm \quad \text{Formel 3.19}$$

Total horisontalforskyvning blir da på: 2,03mm+0,6=2,63mm

Neste steg er å beregne rotasjonsstivheten til bjelkeskjøten, ved å benytte horisontalforskyvningen.

Vi har benyttet noe forskjellig stivhet for gjengestag i trykk og strekk. Da det vil fylles med epoxy rundt hylsen. Dette fører til at det ville kunne overføres trykk mellom hylse og treverket. Denne trykkflaten har vi tatt hensyn til i stivhetsberegningene. Dette medfører at stivheten for trykk er 5,6 kN/mm større enn ved uttrekk.

Rotasjonen i skjøten finnes videre ved å definere rotasjonssenteret fra bunn ved formel 3.17

$$\text{rot.senter} = \left( \frac{\Delta_b}{\Delta_b + \Delta_t} \right) \times z_i \quad \text{Formel 3.19}$$

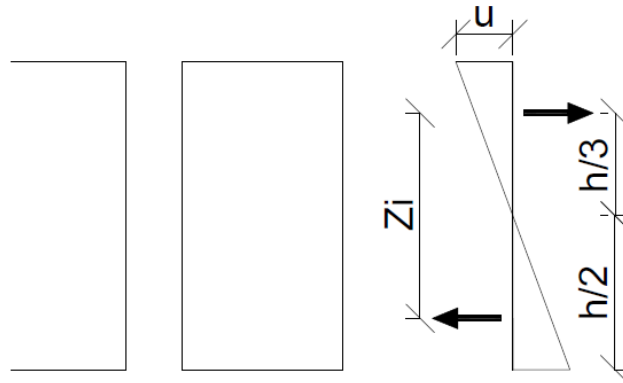
Når rotasjonssenteret er definert er vinkel enkel å finne ved forskyvning. Momentkapasitetene er også gitt for de enkelte oppsettene av bjelkeskjøten og man har da rotasjonsstivheten. Se vedlegg 7.3.7 for utfyllende beregninger. De teoretiske rotasjonsstivhetene er gitt i resultatene.

$$k_\theta = \frac{M}{\alpha} \quad \text{Formel 3.20}$$

Det er i hovedsak to forskjellige beregningsoppsett, der den ene er for gjengestag i topp og bunn og den andre for gjengestag i bunn og kontaktflate i topp.

Teoretisk rotasjonsstivhet til en kontinuerlig bjelke, har vi beregnet ved å ta utgangspunkt i bjelkens momentkapasitet. Deretter benytter vi momentarmen til å finne strekk og trykkrefter, som videre gir oss en deformasjon.

Deformasjonen beregnes ved bruk av treets aksialstivhet, der arealet er halve tverrsnittet, lengden settes til 750mm og midlere E-modul er 13000 MPa. Lengden som benyttes er 750mm, dette er  $\frac{1}{4}$  av lengden av bjelken og vil være en fornuftig antagelse for kraftforløpet i treet. Bruker så deformasjonen til å finne rotasjonen, og dermed også rotasjonsstivheten.



Figur 3-7: Definisjoner på momentarm og rotasjonssenter hos en kontinuerlig bjelke.

Ved å legge rotasjonssenteret midt i tverrsnittshøyden og bruke en momentarm på 180mm, noe som tilsvarer  $\frac{2}{3}$  av strekksonen og  $\frac{2}{3}$  av trykksonen, får vi en rotasjonsstivhet på  $5318,1 \frac{kNm}{rad}$ .  
Se vedlegg 7.3.6 for nærmere beregninger.

## 4 PRETEST – VERIFISERING AV GYSEPROSESS

---

### 4.1 TESTFORBINDELSEN

Hensikten med disse testene har vært å tilegne seg nødvendig kunnskap for å optimalisere og sikre en god gyseprosess. Dette for å slippe å bruke stålhylsene, som er spesiallaget for dette prosjektet, til forsøk som kun har som formål å optimalisere en prosess. Forsøkene har derfor blitt justert fortløpende som vi har utført de, da det oppstår uforutsette hendelser underveis.

Testforbindelsen bestod av akrylrør med lengde 200mm, tilsvarende stålhylsene som skal brukes i referanseforsøkene, og SFS Intec sine gjengestenger med ytre diameter på 20mm. For å tette mellom gjengestag og hylse slik at limet ikke skulle renne ut ble det benyttet pakninger laget av 5mm tykk naturgummi. Gysetestene ble utført med hylseforbindelsen i vinklene 0, 15, 30, 45, 60 og 90 grader med åpen gysing, samt at gyseprosedyren ble utført i forskjellige vinkler med gysing i limtrestykker.

#### 4.1.1 Akrylhylse

Hylsene som ble benyttet for å teste gysing var gjennomsiktige rør av akryl. Rørene hadde en utvendig diameter på 30mm, godstykkelsen ca. 1,5mm som gir en innvendig diameter på 27mm. Fordelen ved å bruke gjennomsiktige rør til disse testene er at man kan se hvordan limet flyter gjennom hylsen. Det gir også mulighet for å inspisere limet etter det har herdet, om det har dannet seg luftlommer eller andre aspekter som kan påvirke heften mellom gjengestag, lim og hylse.

Hullene for gysing var 5mm store, ett hull i hver ende ca. 10mm fra enden av hylsa. For å heve hullet som skal gyses gjennom i de testene utført utenfor trestykkene, benyttet vi oss av små 5mm gummislanger som ble limt fast i gysehullene. Slangene var ca. 50mm lange. Grunnen til hevingen er at det skal simulere bedre hvordan hullene vil være når hylsen er inne i limtreet.

En av feilkildene ved å benytte akrylhylsene er forskjellen fra de originale stålhylsene. I og med at det er mye større rom mellom hylse og gjengestag kan det resultere i at limet flyter lettere gjennom akrylhylsene.

#### 4.1.2 Gummipakning

Hensikten med gummipakning på enden av hylsene har vært å forhindre at lim renner ut mellom gjengestag og hylse. Det var gjennom planleggingsprosessen en del usikkerhet om hvor tett disse pakningene behøvde å være. Både fordi det var noe usikkerhet rundt viskositeten til limet, som kun er beskrevet som tykk væske i produktdatabladet. Og hvor lett det ville flyte og på grunn av usikkerhet rundt hvor mye trykk man trenger for å presse limet inn med, for å få det til å flyte gjennom hylsa.

Den indre diameter i pakningen ble satt til 16mm. Dette er 1mm større diameter enn kjernen på gjengestengene fra SFS Intec. I og med at pakningen skal gå over gjengene til gjengestagene en gang, antok vi dette som en fornuftig diameter å starte testene med.

### 4.1.3 Mapei L epoxy

Av praktiske årsaker er det valgt å bruke Mapei Mapepoxy L to-komponent epoxy. Dette er det samme limet som ble benyttet i forsøkene til Innerdal [16], og var tilgjengelig på lageret til NTNU.

Limet er to-komponent, og består av komponent A som har en veldig tykk, grøtete konsistens. Komponent B er flytende væske. Når disse blandes sammen blir det til en tett væske, men som flyter lett gjennom små, trange åpninger. Arbeidstiden til limet er 20 minutter ved 20 grader celsius.

Produsentens oppgitte bruksområde for limet [24] er kraftoverføring mellom:

- Fersk betong mot herdet betong
- Herdet betong mot herdet betong
- Stål mot herdet betong
- Stål mot stål

I tillegg er også limet egnet til forankring av bolter i borede hull, og som et beskyttende belegg på betong.

Karakteristiske verdier: (sandblåst stål-stål)

Skjærstyrke: 22,99 MPa (etter 7 døgn herding ved 23C, 50% RF)

Trykkfasthet: ca. 110 MPa (etter 7 døgn herding ved 20C)

Bøyestrekfasthet: 39,5 MPa (etter 7 døgn herding ved 23C, 50% RF)

E-modul: 7680 MPa (etter 7 døgn herding ved 20C)

### 4.1.4 Produksjon av testforbindelsene

Hylsene ble kappet i lengder på 200mm tilsvarende stålhylsene som skal testes. Akrylrørene ble kuttet på en vanlig båndsg beregnet på treverk. For å sikre god heft mellom gummi og akrylrørene, ble overflaten pusset over med en vanlig metallfil.

Gummipakningene som ble boret ut med hullbor var dekket i gummistøv/flis. For å fjerne det ble de enkelt og greit vasket i vann for så å bli tørket med en fille. For å unngå fettflekker på både gummi og rør benyttet vi plasthansker til disse prosessene. I tillegg på gyseforsøk nummer tre ble både gummipakninger og limflaten på rørene tørket over med aceton for å være sikre på å fjerne eventuelle fettflekker.

Til å lime sammen rør og pakning ble det benyttet to-komponent lim fra Araldit, hvor det ble smurt lim på begge kontaktflater. Tørketid på limet var minimum en time ved 20 grader. I de fleste forsøkene fikk limet stå å herde lengre enn den nødvendige timen.

Gjengestagene ble kappet på båndsg i lengder på 150-200mm for å ha stor nok ende å holde i da de ble gjenget inn i hylsene for hånd.

For å teste gysingen og tettingen mellom gjengestag og pakning laget vi et stativ for å kunne holde hylseforbindelsene i bestemte vinkler.

For å fylle lim ble det benyttet en engangssprøyte med en ca. 50mm lang gummislange på enden. På denne måten sikret vi en enkel måte å føre limet inn i hylsen på uten faren for å søle.



For å teste gysingen i limtre, lagde vi et testoppsett som skulle kunne forestille den eksakt samme prosessen ved en realistisk forbindelse med stålhylsene.

Det ble her benyttet 250mm lange trestykker som var nok til å dekke hele hylsen og nok lengde igjen til å forankre en SFS gjengestag i bunn av hylsehullet.

Trestykket ble først boret med et trebor med diameter på 32mm. Deretter ble det forboret et hull for gjengestaget i bunn av hylsehullet. På grunn av at treboret har en gjenget spiss i forkant skapte dette et eget styrehull i bunn av hylsehullet for boret på 15mm til gjengestaget.

#### 4.1.5 Justering av produksjonsmetode

Underveis i forsøkene ble det observert enkelte problemer som gjorde at vi forandret prosedyren for å oppnå et best mulig resultat.

Blant annet før forsøk 1 gjennomførte vi 3 enkle gyseforsøk på hylser som lå horisontalt med gysehullene pekende oppover. Det viste seg at limet har en tendens til å "sette" seg når det herder. Dette medfører at det ikke fyller hele hylsen ved gysehullet når det har herdet ferdig. For å unngå dette å gjøre det mer likt den aktuelle testen limte vi på noen korte gummislanger for å heve gysehullet. Etter dette fikk vi fylt hele hylsen uten å få en luftboble ved gysehullene.

## 4.2 OBSERVASJONER

### 4.2.1 Observasjoner gyseforsøk 1

Forsøket ble utført med kun hylseforbindelsen, der vi hadde fullt innsyn til hele prosessen. Her ble det gjort tester i 0, 15, 30, 45, 60 og 90 grader. Her har alle hylsene blitt godt fylt opp, bare små lekkasjer mellom gjengestag og pakning på de bratteste vinklene. Konkluderer med at pakningene tetter godt mot gjengestag og at pakningene sitter godt fast til hylsa. Limet flyter fint rundt gjengestaget, og tetter alle hulrom. Se vedlegg 2.1 for flere bilder.



*Figur 4-1: Hylsene som ble gyst i første test. Luftflommer ble observert rundt gysehullene etter herding.*

### 4.2.2 Observasjoner gyseforsøk 2

Gyseforsøk 2 ble utført med gysing av forbindelsen i et trestykke med størrelse 15x15x25cm, dette for å gjenskape en tilnærmet lik gysesituasjon som vil være i en fullskala bjelkeskjøt, hvor

vi ikke hadde mulighet til å se hva som hendte. Kun observasjoner av eventuelle lekkasjer ved enden av forbindelsene. Alle andre observasjoner ble gjort ved å dele opp trestykket for så å se på forbindelsen. Også her ble det gjort tester i forskjellige vinkler. 3 forskjellige tester ved 0 graders vinkel. Varierte også hvilken tetting som var i indre del, fra 18mm og 20mm pakning til silikontetting. I de fleste tilfeller løsnet de ytre pakningene fra hylsa, og vi fikk store lekkasjer. Tettet dette med å legge rundt papir, men stoppet ikke alt. Selv om pakningene mislyktes, så vi at gysehullene og selve gysingen virket å fungere bra. Så med tanke på at vi har fått pakningene til å sitte ved gyseforsøk 1, ville vi gjennomføre et tredje forsøk for å få pakningene til å sitte og gysingen til å fungere. For nærmere beskrivelser og bilder fra gyseforsøk 2, se vedlegg 2.2.



*Figur 4-2: Gysing av lim i forsøk 1. Her kommer det tydelig frem at limet flyter godt gjennom hylsen da limet er jevnt fordelt vertikalt med en tilnærmet horisontal overflate på toppen av limet.*

#### **4.2.3 Observasjoner gyseforsøk 3**

Gyseforsøk 3 ble satt opp likt som forsøk 2. Hadde 20mm pakning i indre del ved alle forsøkene, bortsett fra 1, der den løsnet når den skulle slippes ned for å passe. Alle de indre pakningene tettet bra, bortsett fra et tilfelle. I et av trestykkene ble hullet til gjengestaget skjeboret, noe som førte til at gjengestaget satt noe skjevt. Dette tok vi med videre, slik at vi kunne se hva som da skjedde. I dette tilfellet ville ikke pakningen gli like enkelt på plass inne rundt gjengestaget, og den ble derfor ødelagt og forskjøvet inn i hylsa.

Denne gangen fikk vi alle ytre pakninger til å sitte godt til hylsa, og alle tettet bra mot gjengestaget. Noe lekkasje rundt gysehull ble observert, og det ble litt lekkasje mellom hylse og tre. Dette løste vi ved å tette med silikon i ytre del på de 3 siste testene, så om det lekker ut mellom hylse og tre gjør ikke noe så lenge vi gyser lim inn til det er fullt. For nærmere beskrivelser og bilder fra i gyseforsøk 3, se vedlegg 2.3.



Figur 4-3: Her vises prøvestykket som ble gyst i horisontal posisjon etter at det er åpnet. Noe tegn til lekkasje utenfor hylsen. Pakning i topp var tett.

### 4.3 KONKLUSJON PRETEST

Pretestene med limet viser at viskositeten er så lav at det flyter godt. Vi ser ingen grunn til at det ikke skal kunne fylle hylseforbindelsen godt. Vi har også fått bekreftet at en engangssprøyte er tilstrekkelig for å gyse limet med. Gysing gjennom hylsen via at hull i hver ende virker også til å være en god metode for å sikre at limet fyller hylsa godt.

De negative sidene ved den aktuelle prosedyren for gysing, er faren for at det blir noe søl ved gysing. I tillegg har vi jo fått bekreftet at den eneste måten å kontrollere om hylsen er full av lim, er ved å registrere volum lim som er gyst inn. Boring av gysehull bør også gjøres med presisjon, da rørene som skal monteres gir lite rom for justering. Vi har derfor besluttet at ved gysing i bjelkeskjøtene vil vi kun benytte et gyserør. Da slipper man at rørene ikke flukter med hylsen da det kun er et rør som trenger å treffe hylsen.

Ved vår bjelkeskjøt, butt mot butt, vil vi ikke benytte pakninger. Dette fordi hylseendene er inne i limtreet. Benytter i stedet silikontettinger mellom hylse og tre, på grunn av forholdsvis stort opprom, da det blir boret 38mm hull. Oppdaget ved pretestene at gysingen må være veldig nøyaktig, og at pakningene ved hylseendene må tette godt. Derfor valgte vi å tette mellom hylse og tre med silikon, da dette forenkler produksjonsprosessen og sikrer gysingen av limet. Med denne løsningen vil vi fylle alle hulrom, inne i hylsa, rundt gjengestaget og mellom hylsa og treet.



## 5 REFERANSEFORSK

### 5.1 BESKRIVELSE AV TESTFORBINDELSEN

#### 5.1.1 Strekktest av SFS innlimt i hylse

Enkel strekktest av hylseforbindelsen, for å sjekke kapasitet opp mot teori.

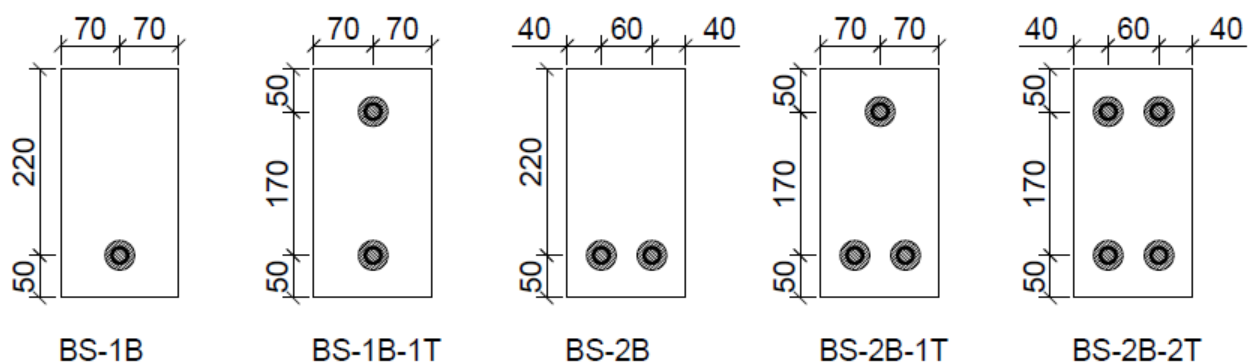
SFS gjenges gjennom pakningene i hver ende, til de møtes i midten. Limet gyses inn via gummirør som er limt til hylsa. Etter endt herdetid, testes denne forbindelsen ved at endene klemmes fast i en jekk og forbindelsen blir da utsatt for ren strekkbelastning.

#### 5.1.2 Strekktest av SFS innlimt i hylse i trestykke

Enkel strekktest av hylseforbindelsen, ved at gysingen av lim blir gjennom et limtrestykke. Med denne testen får vi en pekepinn på om gysingen blir like bra når hylsa er skjult inne i limtreet. Benytter et trestykke som er 250mm langt, der hylsa blir skjult inni. En SFS er montert på i limtreet, og hylsa settes på. Deretter gjenges en SFS fra den andre siden, gjennom pakningen, inn til de møtes midt i hylsa. Limet gyses inn gjennom gysehullene og etter endt herdetid, testes denne forbindelsen ved at endene klemmes fast i en jekk og forbindelsen blir da utsatt for ren strekkbelastning.

#### 5.1.3 Momenttest av bjelkeskjøt

Bjelkeskjøt ved bruk av SFS gjengestenger og hylse, i 140mm x 270mm limtre. Bjelkespenet er på 2850mm, med bjelkeender på ca. 1490mm. Bjelken er fritt opplagt og blir utsatt for punktlaster, som gjør at det blir konstant moment i skjøten. Det vil bli variert antall gjengestenger i både topp og bunn i endeveden. Ut fra denne testen er hensikten å kontrollere momentkapasitet opp mot teori.



Figur 5-1: Ovenfor vises de forskjellige testene og hvordan gjengestengene er plassert.

## 5.2 KOMPONENTER BENYTTET I REFERANSEFORSØKET

### 5.2.1 Stålhylsene

Hylsen som er nevnt i kapittel 3.3 ble produsert ved Nomek AS i Trondheim som driver med produksjon, reparasjon og vedlikehold innen mekanisk industri. Hylsene ble laget etter produksjonstegningen gitt i vedlegg 8. Foruten at gysehullene er frest ut med en spiss bor, ble hylsene produsert eksakt som på tegningen. Stålkvaliteten er som tidligere nevnt S355, som har en karakteristisk fasthet på 355 MPa.

Da hylsene ankom NTNU var det en del smuss på innsiden i det gjengede partiet. Da det er innsiden av hylsen som skal være i kontakt med limet, er det viktig å sikre god heft ved å ha en så ren overflate som mulig. Hylsene ble derfor satt i rektifisert sprit i 5-10 minutter, for deretter å bli skrubbet med en flaskebørste. Flaskebørsten ble både gjenget gjennom og skrubbet gjennom. Til slutt ble det dratt over med en fille så langt ned i hylsen det lot seg gjøre.

Ved tørking med fillen kunne man se at børsten ikke tok alt smusset, men det smusset som var igjen befant seg i toppen av gjengene, lengst unna det tverrsnitt som er utsatt for skjærbrudd i limet. Ut fra denne vurderingen antok vi at hylsene var tilstrekkelig rene og klar for montering.

### 5.2.2 Limtre

Bjelkene som ble benyttet for å lage testforbindelsene er produsert og levert av Moelven Limtre AS. Limtreet er godkjent etter CE-standard og har styrkekvalitet CE L40c [25], noe som tilsvarer en styrke på GL30c etter EN 14080.

Bjelkene til samtlige tester kom samtidig og var kuttet av Moelven i lengder på 6 meter, og hadde dimensjonene 140x270mm.

Dimensjonene på limtreet er bestemt ut fra dimensjoneringen foretatt i kapittel 3, samt ut fra de standarddimensjoner levert av Moelven for å gjøre det enkelt å skaffe. Det ble også vurdert kantavstander i henhold til eurokode 5, da disse er noe konservative valgte vi heller å benytte resultater fra tidligere forsøkt til å bestemme kantavstander. Da bjelkens bredde er på 140mm og testen skulle ha to gjengestenger i bredden var det begrenset med avstand man kan ha mellom de to gjengestengene. Dette førte til at vi valgte kantavstander til sidene på 40mm, noe som tilsvarer 2d. Avstanden mellom gjengestengene ble da 60mm, noe som tilsvarer 3d. Kantavstander i vertikal retning ble satt til 50mm, noe som tilsvarer 2,5d. Disse avstandene ble satt i samsvar med veiledere som har testet uttrekkskapasitet med skruergrupper.

Se figur 5-1 for gjengestangplassering og kantavstander for de aktuelle testene.

### 5.2.3 Gjengestenger

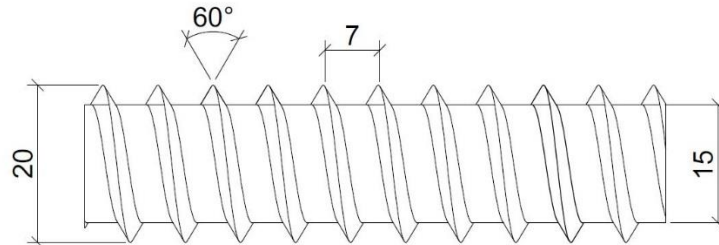
Gjengestengene som blir benyttet i samtlige tester er levert av SFS Intec. Gjengestengene blir produsert i karbonstål og er gradert til fasthetsklasse 8.8 noe som gir de en strekkfasthet på 800 MPa. Gjengestengene kommer i lengder på 3m og blir kappet til ønsket lengde.

For mer utfyllende informasjon, se produktdatablad for gjengestengene [15], eller besøk produsentens hjemmeside [14]



Alle gjengestenger er festet inn i bjelkene horisontalt. Det er frarådet å bruke gjengestenger til innfesting parallelt med fibre i treet [11]. Men for aktuell bjelkeskjøt ville det blitt betydelig mer komplisert å skjøte dersom gjengestengene hadde vært festet med en vinkel på fibre. Selv om tester utført i [13] viser godt uttrekkskapasitet parallelt med fibre, går forbindelsen til sprøtt brudd. Dette gir ingen duktilitet noe som er ønsket av forbindelsen. Løsningen har vært å benytte 600mm inngrepslengde som skal sikre flyting i gjengestag før et uttrekksbrudd mellom gjengestag og bjelke.

Aktuelle plasseringer av gjengestenger for de forskjellige testene er vist på figur 5-1.



Figur 5-2: Dimensjoner på gjengestaget fra SFS Intec etter DIN 7998 standard [26].

#### 5.2.4 Mapei L epoxy

Av praktiske årsaker er det valgt å bruke Mapei Mapepoxy L to-komponent epoxy. Dette er det samme limet som ble benyttet i forsøkene til Innerdal [16], og det var tilgjengelig på lageret til NTNU.

Limet er to-komponent, og består av komponent A som har en veldig tykk, grøtete konsistens. Komponent B er flytende væske. Når disse blandes sammen blir det til en væske som er noe tyktflytende, men som flyter lett gjennom små åpninger som vil være tilfellet ved gysing av hylsene. Åpningstiden til limet der det er mulig å arbeide med det er på 20 minutter ved 20 grader celsius.

Produsentens oppgitte bruksområde for limet [24] er kraftoverføring mellom:

- Fersk betong mot herdet betong
- Herdet betong mot herdet betong
- Stål mot herdet betong
- Stål mot stål

I tillegg er også limet egnet til forankring av bolter i borede hull, og som et beskyttende belegg på betong.

Karakteristiske verdier: (sandblåst stål-stål)

Skjærstyrke: 22,99 MPa (etter 7 døgn herding ved 23C, 50% RF)

Trykkfasthet: ca. 110 MPa (etter 7 døgn herding ved 20C)

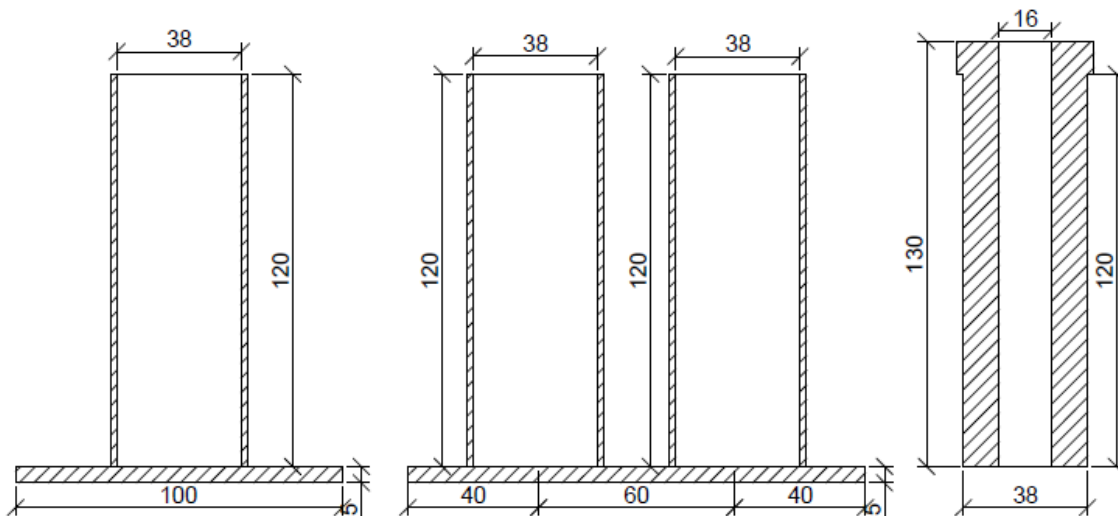
Bøyestrekfasthet: 39,5 MPa (etter 7 døgn herding ved 23C, 50% RF)

### 5.2.5 Styrebrakett

For å sikre en rett boring har vi fått produsert en styrebrakett. Denne består av 2 stålrør sveist vinkelrett til en stålplate med hull i. Stålrørene har en indre diameter på 38mm, som gir en god styring til 38mm boret. I tillegg ble det dreid til en stålhylse med ytre diameter på 38mm, og en indre diameter på 16mm. Denne setter vi inn i braketten, som da gir god styring til 15mm boret.



Figur 5-3: Styrebraketten sammen med styrehylsen for 15 mm boret.



Figur 5-4: Styrebrakett for boring med målsetting.



### 5.2.6 Øvrig utstyr

I tillegg til de overnevnte hovedkomponentene i testforbindelsen er det blitt benyttet flere små komponenter.

Til gyserør ble det benyttet kobberør som var tilgjengelig i betonglaboratoriet ved NTNU. Rørene kom på kveil og ble kuttet til med en metallsag i fornuftige lengder. Røret hadde en ytre diameter på 6mm og indre diameter på ca.4mm. For å sikre at indre diameter var stor nok for gysing ble enden forstørret ved å bruke dor og hammer. Enden som skulle inn i stålhylsen ble spisset på en båndsliper slik at den lettere skulle trenge inn i stålhylsen.

Maskinen som brukes til å bore hull og til å gjenge inn gjengestengene er modellen Bosch GBM 32-4. Dette er den kraftigste drillen fra Bosch og er beregnet for de tøffest oppgavene.

Til å gyse inn limet har vi benyttet oss av engangssprøyter. Da volumet som skal limes ikke er større enn 100ml har sprøyter vist seg å være et godt alternativ. Sprøytene egner seg godt med tanke på volum, de er enkle for å kontrollere gysingen, de er enkle å rengjøre og billige å erstatte.

### 5.3 PRODUKSJON AV TESTFORBINDELSENE

Her beskrives produksjonen av de forskjellige testene. Produksjonen er godt dokumentert med bilder av hvert steg i prosessen. Disse bildene finnes i vedlegg 1.

#### 5.3.1 Strekktest av SFS innlimt i hylse

Gummipakninger ble limt til endene av hylsa. Benyttet, som for pretestene, 5mm tykk naturgummi med ytre diameter 30mm og indre diameter 16mm. Valgte å pusse over endene av hylsa med en fil, for å skape en ruere overflate. Araldite to-komponent lim ble benyttet til liming av pakningene.

Deretter gjenget vi inn en 200mm lang SFS inn i hver ende av hylsa, slik at de møttes i midten. For å få en så tilnærmet lik gyseutforming som mulig, limte vi på 50mm lange slanger. Dette for å simulere gysehullene i limtreet, som tillater ettersig av lim.

Gyste tilslutt Mapei Mapepoxy L inn i hylsa, ved bruk av engangssprøyte, via de pålimte slangene. Satte sprøyta på den ene slangen og gyste inn til det kom ut den andre.

Sørget for at forbindelsen var rett, ved å ha understøtting av SFS, slik at den skal være enkel å sette opp i testriggen.



Figur 5-5: Hylseforbindelsen ferdig produsert med gummipakninger og slanger for gysing.

#### 5.3.2 Strekktest av SFS innlimt i hylse i trestykke

Gummipakninger ble limt til endene av hylsa. Benyttet 5mm tykk naturgummi med ytre diameter 30mm og indre diameter 16mm i den ene enden, og en indre diameter på 20mm i den andre enden. Pusset, også her, over endene av hylsa med en fil, for å skape en ruere overflate. Araldite to-komponent lim ble benyttet til liming av pakningene.

Kappet så til et limtrestykke som er 250mm langt, boret et 38mm hull 210mm inn i treet. Boret deretter et 15mm hull fra indre 38mm hull og gjennom treet. Gjenget så en 250mm SFS, fra utsiden, gjennom 15mm hullet, slik at 105mm stakk ut og 105mm sto igjen inne i 38mm hullet. For å sikre nøyaktige lengder, brukte vi en latmannsarm, der vi koblet på SFS-koppen og gjenget til riktige lengder. Boret så gysehullene, skjøv deretter hylsa inn i hullet. 20mm pakningen innerst og 16mm pakningen ytterst. Pakningene bygger ca. 5mm på hver side av hylsa, og dermed er ytre ende kant i kant med limtreet. Satte så inn gysere, og gjenget inn SFS,

gjennom 16mm pakningen, til de møttes midt i hylsa. Gyste tilslutt Mapei Mapepoxy L inn i hylsa, ved bruk av engangssprøyte, via gyserørene. Satte sprøyta på det ene røret og gyste inn til det kom ut det andre.

Sørget, også her, for at forbindelsen var rett, ved å ha understøtting av SFS, slik at den skal være enkel å sette opp i testtriggen.

### 5.3.3 Bjelkeskjøt

Bjelkene kom i lengder på 6 meter fra Moelven Limtre. De ble først grovkappet med en sirkelsag i lengder på 1,5 meter. For å sikre en plan flate, vinkelrett med bjelkens lengderetning, ble de finkappet på en bordsag med egnet stativ for å sikre god kutting. Etter de to kappeprosessene ble bjelkene rundt 1490mm lange.

Bjelkeendene ble først satt mot hverandre slik de var ment å monteres. Dette var for å måle opp høyden til hullene som skulle bores og samtidig se at disse strekene var i samsvar på begge bjelkeender som skulle festes sammen. Festet så bjelkeenden fast med skrutvinger til et bord som kan heves og senkes. Dette tillater oss å kunne bruke et rullebord for å legge maskinen på, til boring og gjenging av stengene.



*Figur 5-6: Styrebraketten festet til bjelkeenden men 15mm boret ført inn i braketten.*

Når alle punkt som skulle bores var markert med blyant, ble styrebraketten til borene festet på bjelkeenden. Braketten ble satt på etter øyemål, da vi mente dette var nøyaktig nok, og at hullene til hylsene er noe større enn selve hylsene gjør at det kan tillates en feilmargen på opp mot 2-4mm.

Hullene til hylsen måtte bores først. Fra noen tidligere forsøk med rekkefølgen av boringen, viste det seg at 38mm boret ikke ville bore skikkelig da det er avhengig av å få feste til gjengen i tuppen av boret. Benytter man 15mm boret først vil man ikke få feste til disse gjengene. I tillegg er det viktig å benytte ganske stort press på boret de første 10-20mm inn i treet for å sikre at gjengen tok skikkelig tak og ikke bare ble dreid rundt i treverket.

Etter at hullet til hylsen var boret ble den dreide styrerøret satt i styrebraketten. Så boret vi videre inn med 15mm. Dette boret er for å forbore til gjengestangen fra SFS Intec.

Det ble boret 600mm inn fra enden av hylsehullet. Da dette er lengre enn gjengene til boret, krevde det at vi jevnlig dro ut boret for å få ut spon av hullet, slik at det ikke pakket seg bak boret.

Etter at hullene var boret ferdig var det viktig å få ut all spon. Til dette benyttet vi en spesiallaget stang til jobben. Stangen kan kobles til trykkluft og har hull helt i tuppen. Langs stangen går det et spor som sikrer at spon kommer seg ut når hullet blir blåst rent. For det største hullet ble det bare benyttet en vanlig pistol koblet til trykkluft.

Hullet var nå klart til å montere gjengestengene fra SFS Intec. Gjengestengene ble kappet i lengde på 700mm i en metallsag. Deretter ble den ene enden slipt på en pussemaskin for å gjøre enden litt mer spiss slik at den lettere skulle ta tak i det forborede hullet.

Gjengestengene ble skrudd inn med den samme maskinen som ble benyttet til å bore alle hullene. Ved å skifte ut kjoksen på enden av maskinen fikk vi montert på en kopp som passer gjengestengene. Til å gjenge inn gjengestengene ble det benyttet det samme oppsettet som for boringen, med rullebord og heve-senke bord. De siste 10-20 millimeterne ble gjenget inn ved hjelp av den samme latmannsarmen som ble brukt til å finjustere lengdene ved strekktest av SFS innlimt i hylse i trestykke. Ved å benytte latmannsarmen oppnår man millimeterpresisjon på inngjengingen av gjengestaget.

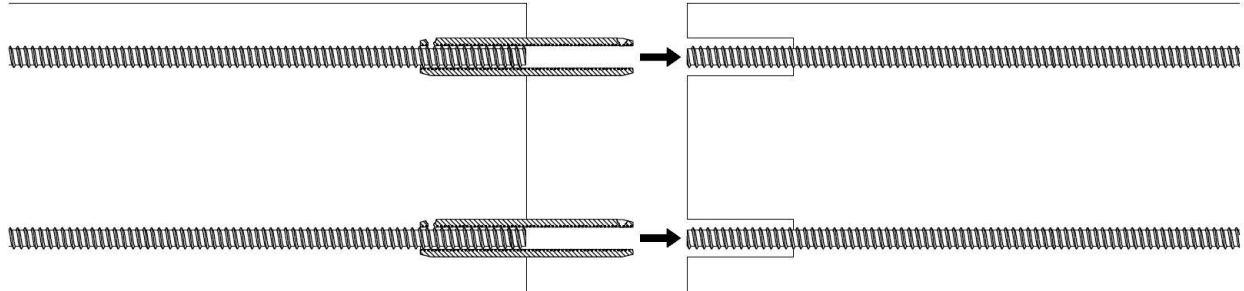


*Figur 5-7: Bildet viser inngjenging av gjengestag i hullet som er forboret*

Hullene til gyserørene ble boret for hånd ved hjelp av en vanlig hånddrill og et 6mm bor. For å sikre god nøyaktighet ble det målt opp et punkt for boring. I tillegg en siktestrek på enden av bjelken. Ved at en siktet for den som stod med drillen sikret dette god nøyaktighet ved innboringen. Se vedlegg 1 for visuelle beskrivelser.

Stålhylsene ble så satt inn i hullet, og deretter ble gyserøret av kobber banket inn med hammer. I det gyserøret traff hullet i siden på stålhylsen var hylsen låst fast i hullet slik at den ikke roterte eller forskjøv seg i hullet.

For å sikre mot lekkasjer mellom hylsen og hullet i treet ut gjennom enden av bjelken, ble det påført en ring med silikon rundt overgangen. Når bjelkeendene ble ført sammen tettet silikonene mot begge bjelkeendene.



*Figur 5-8: Snitt av bjelken hvor gjengestagene var plassert. Figuren viser hvordan bjelkeendene ble ført sammen før gysing av lim.*

Etter at bjelkeendene ble ført sammen var de klare for liming. Limet ble blandet ved hjelp av en høy plastkopp og en vanlig rørepinne for maling. For å sikre rett blandingsforhold ble komponentene veid til på en vekt. Blandingsforholdet var 1:8, med komponent A som største del. Limet ble rørt sammen til at man fikk en ensfarget masse.

Limet ble gyst inn i hylsene ved hjelp av en engangssprøyte på 60ml. Limet ble gyst inn til det kom ut av gysehullet i den andre bjelkeenden.

For å fylle hylsen og hulrommet rundt, trengs 90-100ml med lim.

Bjelkeforbindelsen fikk så stå til herding i 7 døgn slik at limet skulle oppnå full herding. Men selv etter 1 døgn har limet oppnådd tilstrekkelig med fasthet slik at testforbindelsen kunne flyttes på.



*Figur 5-9: Gysing av lim etter at bjelkene var ført sammen.*

#### **5.4 OBSERVASJONER VED PRODUKSJON**

Observasjoner gjort under produksjon nevnes for å forklare eventuelle forandringer i produksjonsmetoden eller for å belyse feil ved produseringen som kan få følger for hvor godt teststykkene ble laget og som kan ha innvirkning på testresultatene.

Opprinnelig var det tenkt å ha to gyserør, et i hver bjelkeende for innfesting av hylsen. Dette for å sikre at limet kun fløt gjennom hylsen slik at det var enklere å kontrollere volum.

Ved gysing av strekktestene i trestykkene opplevde vi lekkasje ut til hulrommet mellom hylse og treet i all tre eksemplarene. Etter denne observasjonen konkluderte vi med at det vil være vanskelig å unngå lekkasje på dette feltet. Det ble derfor besluttet å ikke bruke gyserør til utgangshullet. På denne måten skulle vi heller sikre at limet fløt ut i hulrommet mellom hylse og treverk, i stedet for å være usikre på fylling av hulrom.

Ved gysing av test BS-2B-1T-2 opplevde vi lekkasje. Denne lekkasjen oppsto mellom de to nederste lamellene i den ene bjelkeenden. Lekkasjen ble stoppet ved å presse to flate trestykker mot lekkasjeområdet. Dette stoppet lekkasjen. Små mengder lim kom ut, og vi antar at gysingen er optimal etter tettingen.

Fikk også lekkasje i test BS-1B-1T-1 ved gysing. Denne lekkasjen oppsto som følge av at silikontettingen ikke hadde fått tilstrekkelig med tid til herding. Vi var klare over dette, men på grunn av for lite tid gjorde vi et forsøk på gysing likevel. Lekkasjen ble tettet med en tynn trebit som ble presset mot silikonen. Lekkasjen ble tettet og gysing kunne fortsette som vanlig. Antar ut fra mengde med lim som gikk med til gysing at hylsen er fylt med lim slik som planlagt.



## 5.5 BESKRIVELSE AV TESTSYSTEM

### 5.5.1 Strekktest

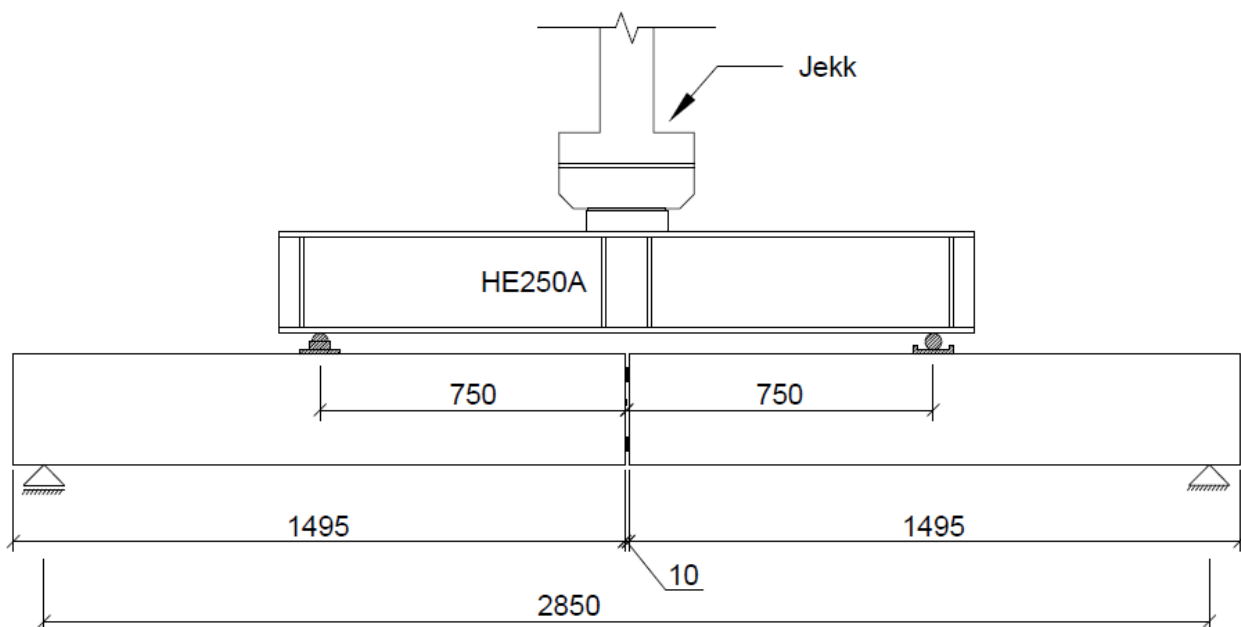
Til de enkle strekktestene ble det benyttet en jekk med kapasitet på 500 kN. Innfesting av teststykkene ble gjort på to forskjellige måter. I bunn ble gjengestaget skrudd ned i en kraftig stålhylse med innvendige gjenger tilpasset gjengestagene for så at hylsen ble klemt fast i jekken. I topp ble gjengestaget klemt sammen på tilsvarende måte, men uten hylsen. Etter montering var teststykkene klare til testing. Testingen foregikk ved at den hydrauliske jekken strakk gjengestaget frem til brudd. Se kap.5.6, for mer utfyllende informasjon angående testprosedyre.

### 5.5.2 Bjelketest

Bjelketestene ble gjennomført i en testrigg satt opp for formålet. For å forenkle oppsettet av riggen og på grunn av travelt laboratoriepersonale ble riggen satt som to frie systemer uten kontakt med hverandre. Da jekken allerede var ferdig montert etter tidligere bruk ble dette den enkleste løsningen for å få gjennomført testene.

### 5.5.3 Hydraulisk jekk

Den hydrauliske jekken som ble benyttet til å teste bjelkeforbindelsene har en kapasitet på 100 tonn. Jekken var montert over bjelkeforbindelsen i en ståltravers som gikk mellom to søyler som var festet til gulvet.



Figur 5-10: Oppsett av testrigg med målsettinger som er nødvendige for dimensjoneringen.

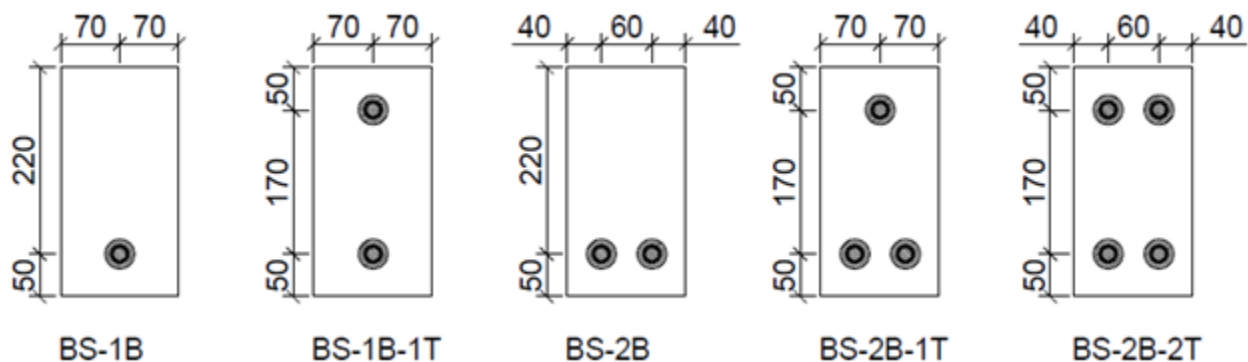
### 5.5.4 Opplagring

Bjelken ble fritt opplagt på to stålbukker som var montert fast i gulvet. Det frie spennet ble på 2,85 meter.

## 5.6 TESTPROSEDYRE

### 5.6.1 Testoversikt

Det er gjennomført i hovedsak to forskjellige typer tester. Først er de enkle strekktestene av hylseforbindelsen, både med og uten gysing i treverk. Den andre delen av testingen er utført som bjelkeskjøter for å teste hylseforbindelsen slik den er tenkt til å brukes.



Figur 5-11: Figurene over viser tverrsnittene til de fem forskjellige testoppsettene med målsetting som viser plasseringen til hylseforbindelsene.

I tabellen under vises oversikten over tester og dato for gjennomføring.

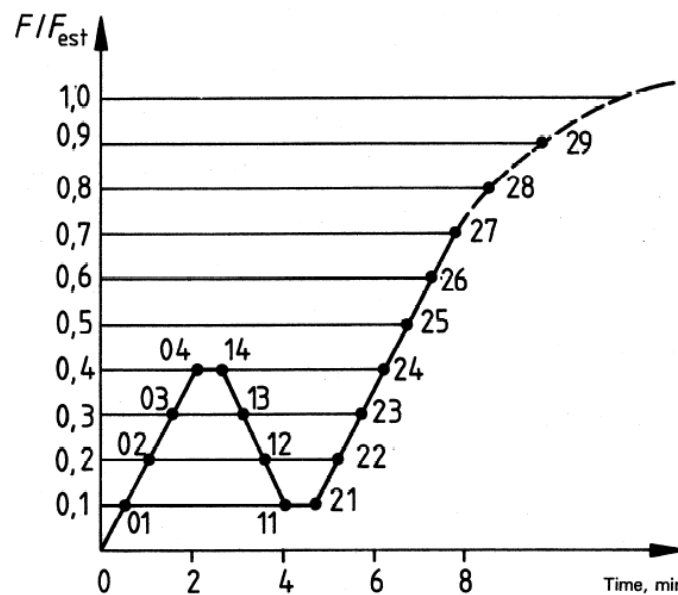
Test	Dato for gjennomføring av test	Tester som ble gjennomført
1	22.04.15	Strekktesting av samtlige hylseforbindelser: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Test 1-3: Hylseforbindelse gyst i treklosse.</li> <li>• Test 4-6: Hylseforbindelse med nøyaktige forskyvningsmålere.</li> </ul>
2	08.05.15	Testing av bjelkeskjøt: <ul style="list-style-type: none"> <li>• BS-1B-1</li> <li>• BS-1B-2</li> <li>• BS-1B-1T-3</li> <li>• BS-2B-1T-1</li> </ul>
3	11.05.15	Testing av bjelkeskjøt: <ul style="list-style-type: none"> <li>• BS-1B-1T-2</li> <li>• BS-1B-3</li> <li>• BS-1B-1T-1</li> <li>• BS-2B-1T-2</li> </ul>
4	20.05.15	Testing av bjelkeskjøt: <ul style="list-style-type: none"> <li>• BS-2B-1</li> <li>• BS-2B-2</li> <li>• BS-2B-3</li> <li>• BS-2B-2T-1</li> </ul>
5	21.05.15	Testing av bjelkeskjøt: <ul style="list-style-type: none"> <li>• BS-2B-2T-3</li> <li>• BS-2B-1T-3</li> <li>• BS-2B-2T-2</li> </ul>



### 5.6.2 Lastprosedyre

Pålasting av testene ble gjort i henhold til NS-ISO 6891 [27] som er standarden for bestemmelse av styrke og deformasjonsegenskaper til mekaniske forbindelsesmidler i trekonstruksjoner.

Lasten ble påført i henhold til punkt 8.2 i standarden. Lasten blir først påført opp til 40% av estimert kapasitet fra beregninger. Deretter blir lasten holdt konstant i 30 sekunder før den så blir redusert ned til 10% av estimert kapasitet. Så blir den på nytt holdt i 30 sekunder. Etter dette blir testen kjørt til den har nådd sin maksimale last eller til den går til brudd. Optimal tid for hele testen er 10-15 minutter.



Figur 5-12: Grafen viser lastprosedyren gitt i NS-ISO 6891 [27]

### 5.6.3 Måleinstrument

For å kunne dokumentere testen på en best mulig måte og for å kunne få mest mulig informasjon ut fra testene, har vi benyttet oss av forskjellig måleutstyr.

#### 5.6.3.1 Strekktest

Til strekktestene var det nødvendig å måle forskyvning i forbindelsen. Jekken som ble brukt til å teste, måler også forskyvning i tillegg til å loggføre kraften. Men i og med at forskyvningen av forbindelsen vil være i størrelsesordenen 0,8-1,5mm var det nødvendig å ta i bruk mer nøyaktig utstyr. I tillegg ville eventuelle glidninger mellom gjengestag og innfesting gi utslag på forskyvningen i jekken.

Til å måle deformasjonen i forbindelsen benyttet vi forskyvningsmålere. Disse fungerer ved at de er festet i hver sin ende av forbindelsen og måler deformasjonene ved at de registrerer forskyvningen av staget som forbinder de to endene.

Det ble satt opp en måler for hver side av forbindelsen i tilfelle eventuelle skjevheter i strekktesten. Forskyvningen av forbindelsen vil være gjennomsnittet av de to målerne.

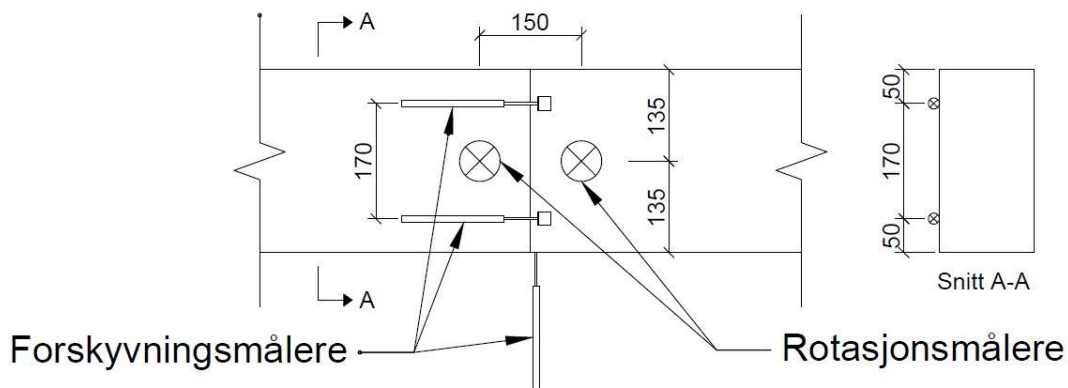
### 5.6.3.2 Bjelkeskjøt

Det ble benyttet forskyvningsmålere også til bjelketesten.

To måler ble plassert på den ene siden av selve skjøten. En på nivå med de laveste gjengestagene, og en på nivå med gjengestagene i toppen. Ved å måle denne forskyvningen kan man blant annet beregne rotasjonsstivheten til forbindelsen.

Forskyvningsmåler ble også monter under bjelke, så nært senter som mulig. Hensikten med denne er for å måle nedbøyning av bjelken.

Rotasjonsmålere ble plassert 75mm fra skjøten på begge sider, for å registrere rotasjon på hver side. Ved å bruke disse målerne får man den totale rotasjonen i senter av bjelkeskjøten og kan bruke disse målingene til å beregne rotasjonsstivhet til forbindelsen.



Figur 5-13: Figuren viser et utsnitt av senter på bjelkeskjøten med plassering av måleinstrumentene samt målsetting.

### 5.6.3.3 ARAMIS - Optical 3D Deformation Analysis

For å kunne dokumentere mer nøyaktig hvordan spenningene i treet utvikler seg gjennom testen har vi valgt å bruke et ARAMIS 3D kamera. [28]

Formålet med ARAMIS er at det skal bidra til å bedre forstå materialet og komponentenes atferd. ARAMIS er en ikke-kontakt og material uavhengig målesystem som gir, for statisk eller dynamisk lastet testobjekter, nøyaktige:

- 3D- overflate koordinater
- 3D forskyvninger og hastigheter
- Overflate belastningsskader verdier (større og mindre belastning, tykkelse reduksjon)
- Tøyningshastigheter

ARAMIS er egnet for:

- Å finne materialeegenskaper
- Komponent analyse
- Verifisering av Finite Element Analysis

ARAMIS fungerer ved at testområdet på bjelken først sprayes med hvit, for så å spraye på mange svarte små flekker. Systemet bruker de svarte prikkene som referanser og den hvite sprayen er for å skape kontrast slik at de svarte prikkene er godt synlige.

#### **5.6.4 Fremgangsmetode**

Bjelkene ble dagen før testing gjort klar for målinger med det optiske kameraet. Delen av bjelkeforbindelsen som skulle måles ble først sprayet i hvit maling. Deretter ble det sprayet på mange svarte prikker. Alle de små prikkene brukes som målepunkter for kameraet.

Resten av testen ble utført på følgende måte:

- Oppsetting av forbindelsen i testrigg.
- Påmontering av alle forskyvningsmålere og rotasjonsmålere.
- Nullstilling av kamera for å finne referansepunkter.
- Påføring av last i henhold til NS-ISO 6891 [27] til brudd i forbindelsen.
- Dokumentering av årsak til brudd.

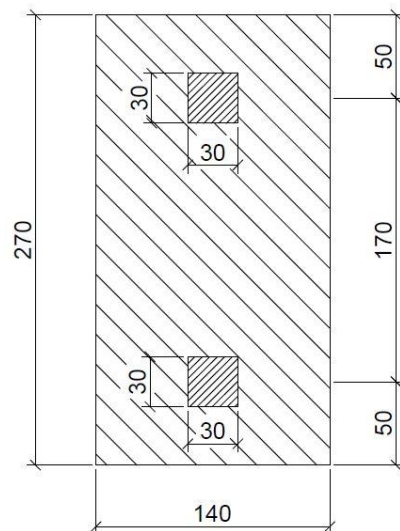
### 5.6.5 Bestemme fuktinnhold og densitet

Densitet og fuktinnhold er avgjørende for treets styrkeegenskaper. For bjelkeskjøten er densitet en av faktorene som har betydning for uttrekkskapasiteten til gjengestengene. Dersom densitet og fuktinnhold på bjelkene brukt i testene ikke er i henhold til gitte krav for limtre, kan dette være faktorer som kan ha stor betydning for testresultatene. Det er derfor viktig å fastslå både densitet og fuktinnhold til bjelkene brukt i testene. Slik kan vi i evalueringsprosessen se om densitet og fuktinnhold kan være en avgjørende faktor, ved eventuelle resultater som ikke stemmer overens med teorien eller de andre testene.

Bjelkene ble lagret i et klimatisert rom, som holdt 20°C og en relativ fuktighet på 65%. Fuktinnholdet i bjelkene var kontrollert jevnlig med en fuktmåler fra vi fikk de og frem til de ble testet. Alle kontroller med fuktmåler viste et fuktinnhold fra 10-13%.

Fuktinnhold og densitet blir bestemt etter henholdsvis ISO 13061-1 [29] og ISO 13061-2 [30]. Alle teststykkene ble tatt ut av bjelkene etter alle tester var gjennomført. Størrelsen på prøvestykkene var  $30 \times 30 \times 30 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ . Prøvestykkene ble forsøkt tatt ut så nært gjengestagene som mulig. De ble derfor tatt ut i samme tverrsnitthøyde som gjengestagene, midt i bjelkens tverrsnitt, se figur 5-13

For resultater av målingene, se vedlegg 6. Resultatene vil kun bli nevnt i evalueringen dersom de kan være en avgjørende faktor for testresultater som ikke er i henhold til teori eller de andre testresultatene fra bjelkeskjøtene.



Figur 5-14: Figuren viser tverrsnitt av bjelken og målsetting av hvor prøvestykkene for fuktinnhold og densitet ble tatt ut.

## 5.7 TESTRESULTATER

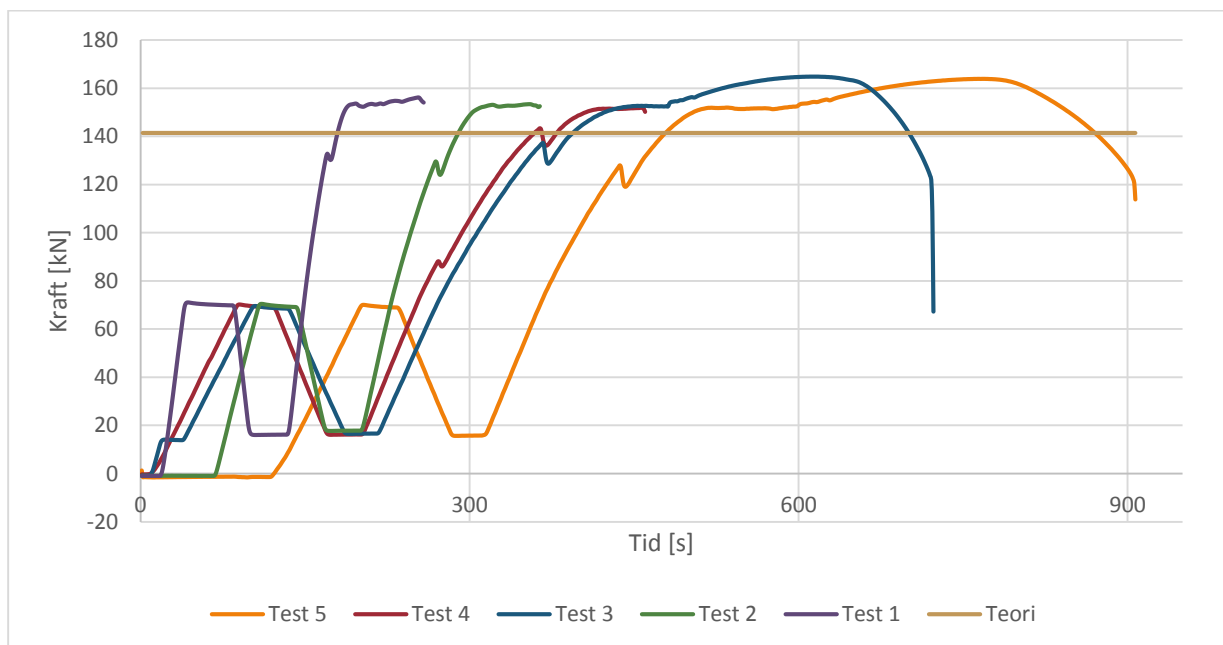
### 5.7.1 Strekktest hylseforbindelse

Tabellen under viser et sammendrag av testresultatene.

(Merknad: forskyvningene test 1-3 er målt med jekken og er derfor ikke pålitelige)

Test	Last ved flyt	Bruddlast	Forskyvning ved flyt	Stivhet	Hastighet lastpåføring
1	153,6 kN	Ikke målt	1,710 mm	Ikke relevant	0,04 $\text{mm/s}$
2	153,3 kN	Ikke målt	1,634 mm	Ikke relevant	0,02 $\text{mm/s}$
3	152,6 kN	164,7 kN	1,812 mm	Ikke relevant	0,01 $\text{mm/s}$
4	151,5 kN	Ikke målt	0,6453 mm	234,78 $\text{kN/mm}$	0,01 $\text{mm/s}$
5	151,8 kN	163,9 kN	0,5010 mm	302,99 $\text{kN/mm}$	0,01 $\text{mm/s}$
6	152,0 kN	163,0 kN	0,5903 mm	257,50 $\text{kN/mm}$	0,01 $\text{mm/s}$

Forbindelsen som var gyst i treklossene ble testet først, test 1-3. Årsaken til dette var at det kun skulle kontrolleres at de hadde den samme kapasiteten som hylsene som ble limt uten treklosse. Hylsene som ble gyst liggende kunne vi kontrollere at gysingen var optimal på, det kunne vi ikke gjøre med de som var gyst i treklossene. De først testene brukte vi på å prøve å finne en fornuftig pålastingshastighet slik at test 4-6 kunne følge testkurven i henhold til NS-ISO 6891 [27] så godt som mulig. Fra tidligere uttrekkstester med lignende forbindelse [16] begynte vi med en pålastingshastighet på  $0,04 \text{ mm/s}$ . Dette viste seg å vær for hurtig, da testen gikk til flyt etter få minutter. Hastigheten ble derfor gradvis senket. Endte opp med en pålastingshastighet på  $0,01 \text{ mm/s}$  til de fire siste testene.



Grafen ovenfor viser et sammendrag av kraftutviklingen i strekktestene. Test 6 er ikke med, se vedlegg 5.1 for samtlige diagram til testene.

## 5.7.2 Momenttest av bjelkeskjøt

Testnr.	Densitet	Resultater Momenter				
I.D.	$\rho_m$	Eksperiment			Teori	
	$(kg/m^3)$	$M_{u,mean}$	$St. Dev$	$C.o.V.$	$M_{e,w}$	$M_{EC5}$
BS-1B (1-3)	435,0	25,93	3,74	0,14	29,02	15,19
BS-1B-1T (1-3)	441,8	19,71	1,11	0,06	24,04	12,58
BS-2B-1T (1-3)	453,3	26,42	1,37	0,05	24,04	12,58
BS-2B-2T (1-2)	445,4	44,81	0,73	0,02	48,08	25,17
BS-2B (1-3)	429,2	49,40	1,65	0,03	53,86	28,2

Tabellen over er en statistisk presentasjon av bjelkeskjøtens momentkapasiteter i forhold til antall gjengestag. Sammenligner resultatene opp mot teoretiske beregninger.

Testnr.	Densitet	Resultater Rotasjonsstivheter				
I.D.	$\rho_m$	Eksperiment			Teori	
		$K_{rot,mean}$	$St. Dev$	$C.o.V.$	$K_{rot}$	$K_{rot}$ kontinuerlig bjelke
	$(kg/m^3)$	[kNm/rad]	[kNm/rad]		[kNm/rad]	[kNm/rad]
BS-1B (1-3)	435,0	1470	140	0,095	1535	5317,1
BS-1B-1T (1-3)	441,8	1350	100	0,074	810	5317,1
BS-2B-1T (1-3)	453,3	1340	160	0,119	1087	5317,1
BS-2B-2T (1-2)	445,4	2290	25	0,011	1620	5317,1
BS-2B (1-3)	429,2	2580	270	0,104	2646	5317,1

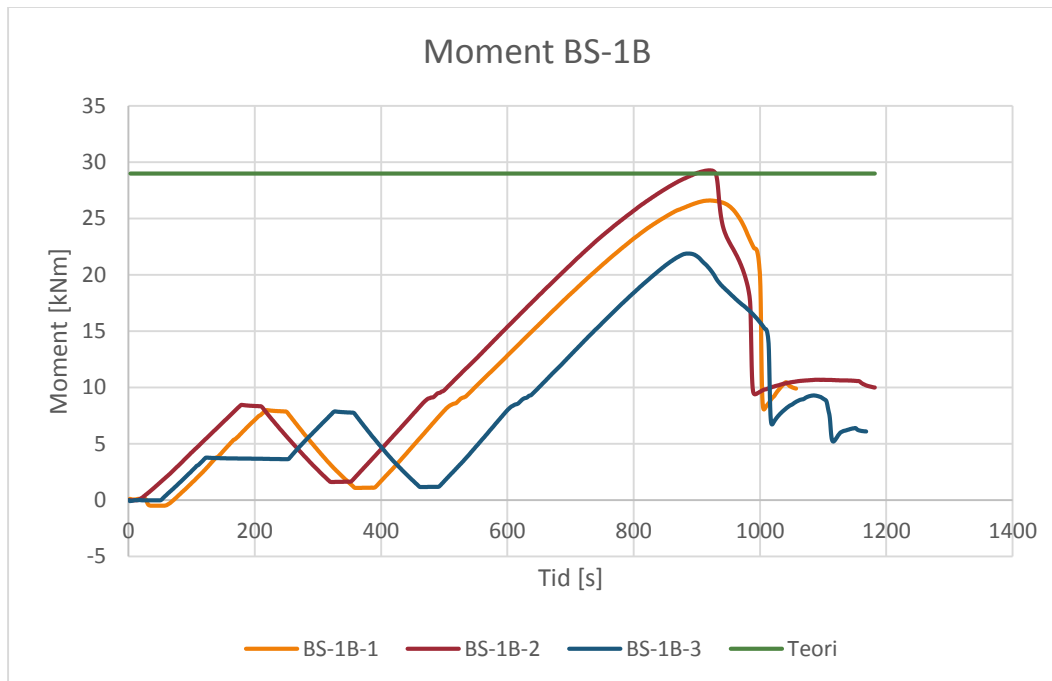
Tabellen over er en statistisk presentasjon av bjelkeskjøtens rotasjonsstivheter i forhold til antall gjengestag. Sammenligner resultatene opp mot teoretiske beregninger.

Testnr.	Nedbøyning midt	Rotasjon, sensor	Rotasjon, hor.målere	Bruddmoment teori	Bruddmoment forsøk
I.D.	[mm]	[grader]	[grader]	[kN]	[kNm]
BS-1B-1	22,48	1,0853	1,1295	29,02	26,5945
BS-1B-2	24,92	1,2204	1,2657	29,02	29,2869
BS-1B-3	16,49	0,78	Ingen res.	29,02	21,8965
BS-1B-1T-1	17,59	0,7324	0,7899	24,04	19,4239
BS-1B-1T-2	16,47	0,7994	0,8491	24,04	18,7645
BS-1B-1T-3	19,92	1,1106	0,8351	24,04	20,9349
BS-2B-1T-1	19,33	1,1066	0,9710	24,04	25,8665
BS-2B-1T-2	20,9	1,2932	0,6955	24,04	25,4132
BS-2B-1T-3	22,14	1,5838	1,2937	24,04	27,98
BS-2B-2T-1	24,94	1,0923	Ingen res.	48,08	44,0815
BS-2B-2T-2	28,47	1,2325	1,1269	48,08	45,5376
BS-2B-2T-3	19,87	1,3356	1,3112	48,08	23,1603
BS-2B-1	31,57	1,3378	1,1951	53,86	48,5871
BS-2B-2	26,98	1,058	0,9377	53,86	48,3124
BS-2B-3	29,71	1,1112	1,0422	53,86	51,3071

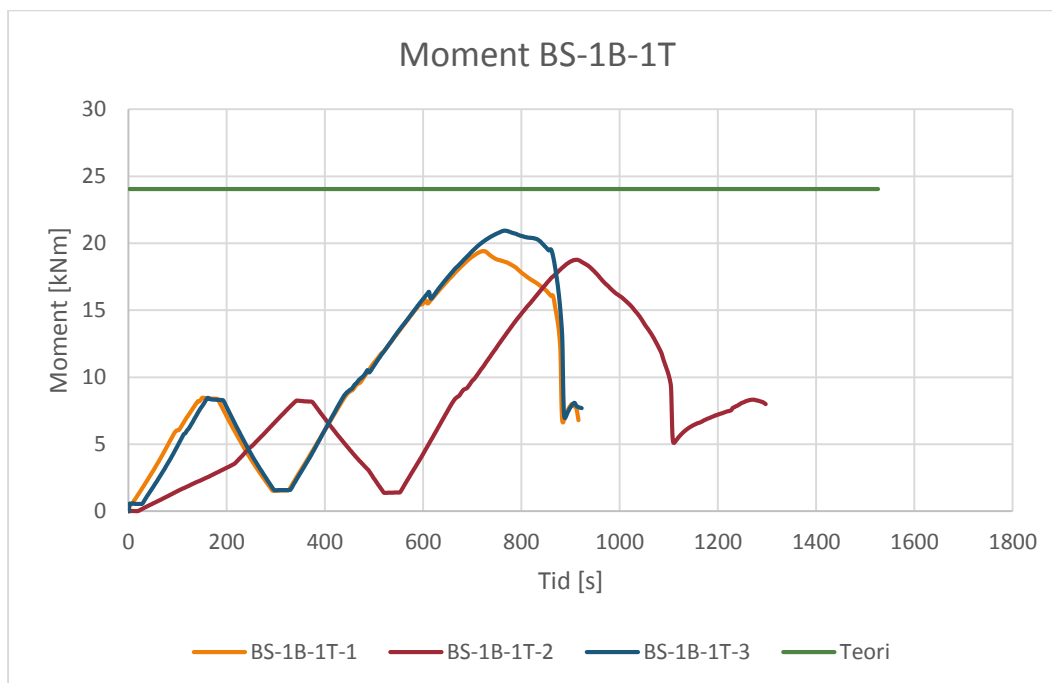
Tabellen over viser et sammendrag av testresultatene ved brudd for hver enkelt bjelkeskjøt. Rotasjon sensor er rotasjonen i skjøten registrert fra rotasjonsmålerne. Rotasjon hor.målere er rotasjonen basert på horisontal forskyvningen i topp og bunn registrert av forskyvningsmålerne.

Testnr.	Horisontal forskyvning i bruddskrue	Forskyvning pr. skrue	Bruddstiv- het forsøk	Bruddstivhet teori pr. skrue	Bruddkraft pr. skrue
I.D.	[mm]	[mm]	[kN/mm]	[kN/mm]	[kN]
BS-1B-1	3,115	1,3075	99,21	139,3	129,73
BS-1B-2	3,429	1,4625	97,68	139,3	142,86
BS-1B-3	Ingen res.	Ingen res	Ingen res.	139,3	106,81
BS-1B-1T-1	1,846	0,7168	159,41	139,3	114,26
BS-1B-1T-2	1,871	0,7358	150,01	139,3	110,38
BS-1B-1T-3	2,055	0,8047	153,04	139,3	123,15
BS-2B-1T-1	2,231	0,8405	181,02	139,3	152,16
BS-2B-1T-2	1,543	0,5010	298,36	139,3	149,49
BS-2B-1T-3	3,03	1,2172	135,22	139,3	164,59
BS-2B-2T-1	2,184	0,8574	151,21	139,3	129,65
BS-2B-2T-2	1,88	0,6977	191,96	139,3	133,93
BS-2B-2T-3	4,369	1,9380	70,29	139,3	136,23
BS-2B-1	2,698	1,1025	115,97	139,3	127,86
BS-2B-2	2,181	0,8605	147,76	139,3	127,14
BS-2B-3	2,424	0,9677	139,52	139,3	135,02

Tabellen over viser forskyvningen i aktuelt tverrsnitt hvor uttrekk av gjengestag oppsto. I tillegg er kraften i skruerforbindelsen ved brudd oppgitt. Med kraft i gjengestag og forskyvning er det kalkulert ut en uttrekksstivhet pr. gjengestag som kan sammenlignes opp mot teoretisk uttrekksstivhet.

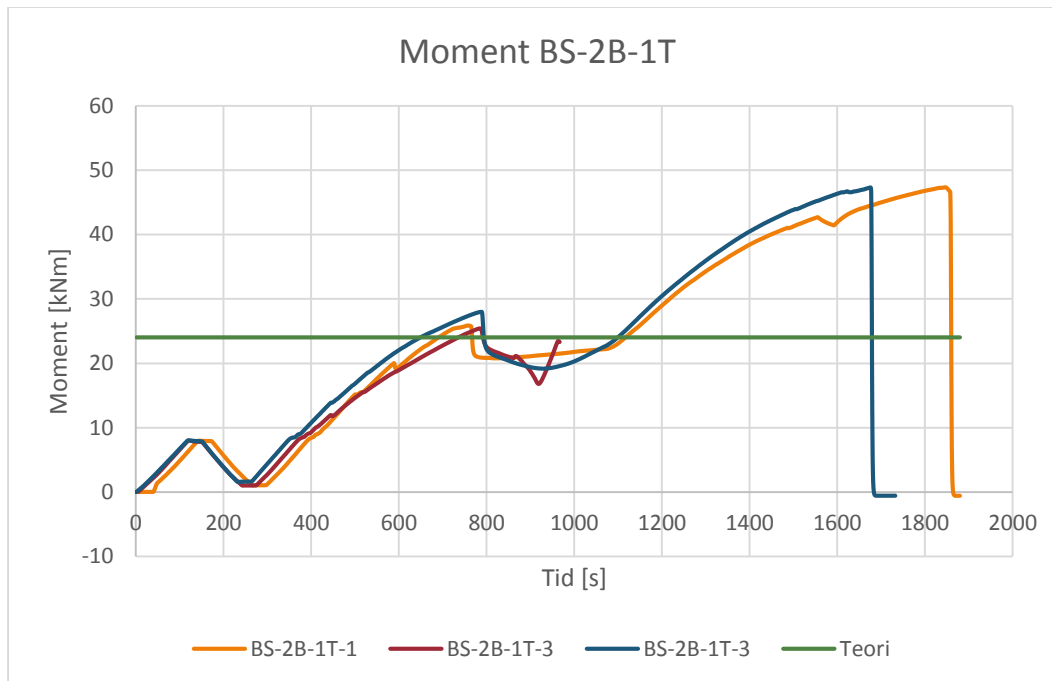


I grafen BS-1B vises kraftsammendraget til testene med et gjengestag i bunn og treverket som kontaktflate i topp. Laveste registrerte bruddmoment på 21,90 kNm. Høyeste bruddmoment på 29,29 kNm.

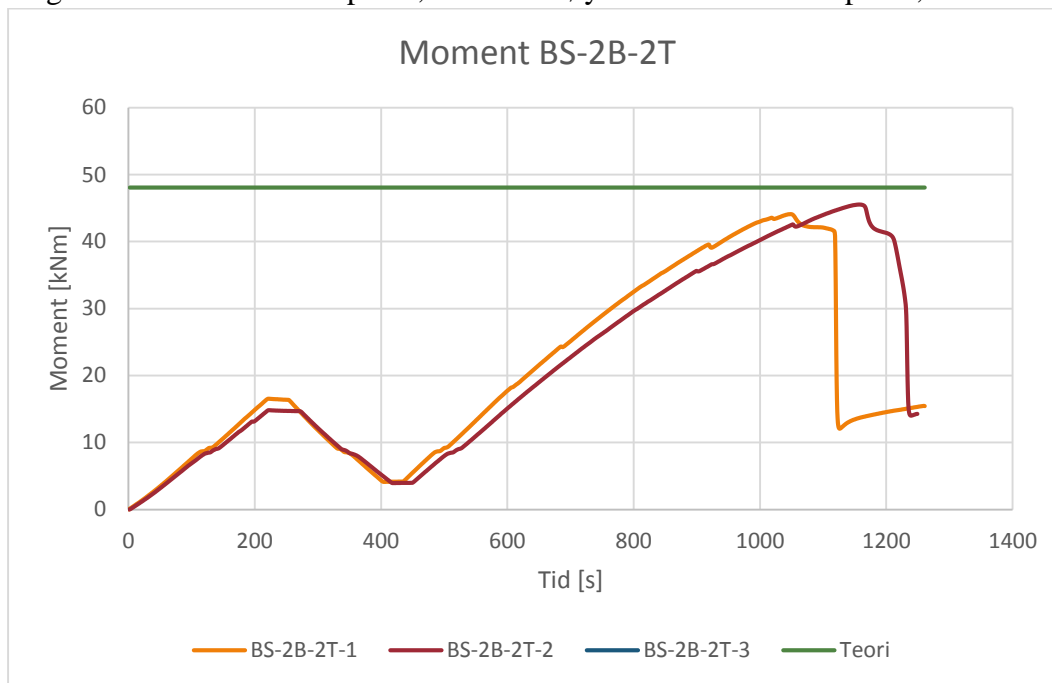


I grafen BS-1B-1T vises kraftsammendraget til testene med et gjengestag i bunn og et i topp. Laveste registrerte bruddmoment på 18,76 kNm. Høyeste bruddmoment på 20,94 kNm.

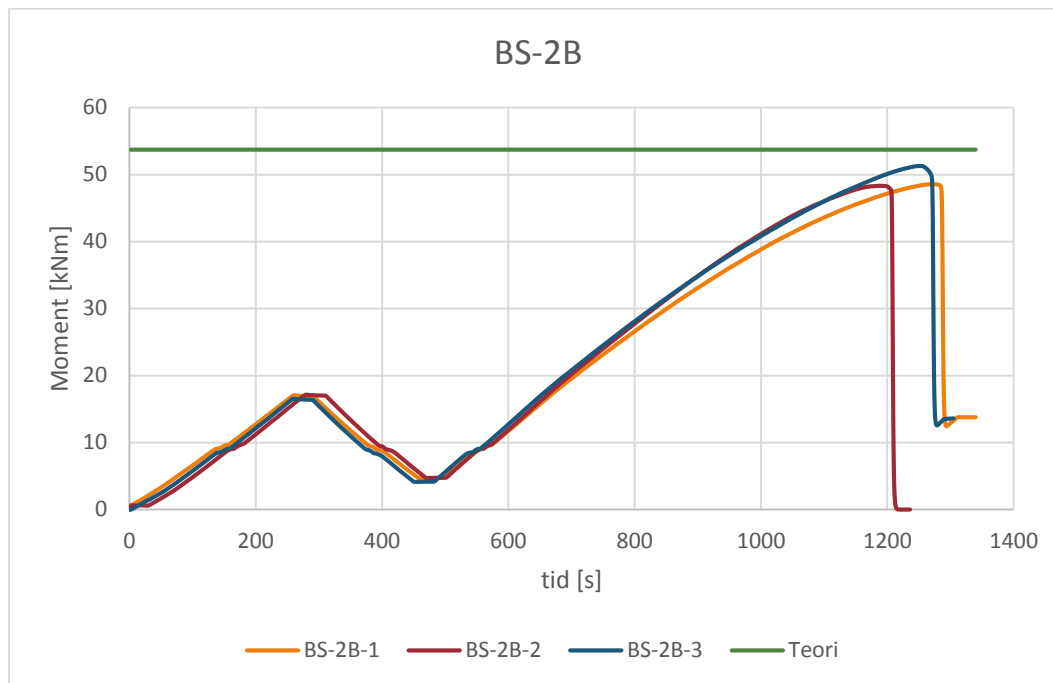




I grafen BS-2B-1T vises kraftsammendraget til testene med to gjengestag i bunn og et i topp. Laveste registrerte bruddmoment på 25,41 kNm. Høyeste bruddmoment på 27,98 kNm.



I grafen BS-2B-2T vises kraftsammendraget til testene med to gjengestag i bunn og to i topp. Laveste registrerte bruddmoment på 44,08 kNm. Høyeste bruddmoment på 45,53 kNm. På grunn av feil i produksjonen måtte BS-2B-2T-3 forkastes. Dette fordi den ene hylsen i bunn ikke var gyst med lim, og hadde derfor ingen kapasitet i nevnte gjengestag som førte til at testen sviktet etter kun halvparten av beregnet momentkapasitet.



I grafen BS-2B vises kraftsammendraget til testene med to gjengestag i bunn og kontaktflate, tre mot tre, i topp. Laveste registrerte bruddmoment på 48,31 kNm. Høyeste bruddmoment på 51,3 kNm.

Resultatene til hver enkelt test finnes i vedlegg 5. Der kan man finne en graf med momentforløpet i lastfasen av testen samt en graf som viser rotasjonen i skjøten i forhold til økning i moment.

## 5.8 EVALUERING AV TESTRESULTATER

Velger å se på resultatene av testene hver for seg. Først vurderes hylseforbindelsen for seg selv ut fra gjennomførte strekktester, og deretter hvordan hylseforbindelsen oppfører seg i en reell metode for bruk i en bjelkeskjøt.

### 5.8.1 Strekktest hylseforbindelse

På alle testene opptrer et fall av kraft i forbindelsen. Disse tilfellene opptrer på alt fra 80 kN og opp til 142 kN, noe som er lavere enn gjengestagets teoretiske flytegrense som er 141,4 kN. Målingene av forskyvning i forbindelsen øker lineært opp til ca. 152 kN, etter dette øker forskyvningene uten at forbindelsen tar opp krefter av betydning. Videre øker kraften, som forbindelsen tar opp, sakte men sikkert opp til de når en maksimal kraft på ca. 162 kN før de deretter går til brudd. Basert på disse observasjonene av forskyvningen er det tydelig at forbindelsen går til flytbrudd ved 152 kN.

Når det gjelder krafttap som oppstår mellom 82-142 kN, antar vi dette har noe med innfestingen av forbindelsen i testjekken å gjøre. Vi har allerede ut fra forskyvningsmålingen fastslått at flyt opptrer ved 152 kN. I tillegg øker kraften lineært etter at de små krafttapene har oppstått. Dette tyder på at krafttapedet skyldes at det oppstår et lite slipp i innfestingen mellom gjengestag og jekk.

#### 5.8.1.1 Sammenligning av teori og testresultater

Karakteristisk flytegrense til gjegestaget er beregnet til å være 141,4 kN og brudd i gjengestaget ved 159 kN. Som nevnt ovenfor oppstår flyt ved 152 kN og brudd ved 162 kN. Dette er høyere enn beregningene gjort med karakteristiske verdier, slik som det skal være, da kapasitetene til gjengestagene er dimensjonert etter 5% fraktil fra middelverdien. Dimensjoneringen av gjengestagene ble gjort før vi ble klare over at midlere verdier skulle benyttes.

For hylse og innlimingslengde stemmer også dette overens med teorien. Det er beregnet at gjengestagene skal gå til brudd først, slik som tilfellet er. Ingen av testene har vist visuelle tegn til at det har oppstått brudd i limet.

#### 5.8.1.2 Stivhet i forbindelsen

Forskyvningen i forbindelsene ligger fra 0,5mm til 0,65mm. På grunn av at forbindelsen er bygd opp av tre deler, gjengestag, stålhylse og lim, er det vanskelig å finne stivheten av de forskjellige komponentene med måleinstrumenter som er tilgjengelig. På grunn av oppbygningen med flere komponenter er det også vanskelig å kunne beregne en stivhet på forhånd, da systemet blir komplisert med 5 forskjellige fjærer. Disse fjærsystemene får igjen en usikkerhet fordi det er vanskelig å anslå hvordan kreftene i forbindelsen fordeler seg gjennom systemet. Vi har derfor sett på forbindelsen som et system og sett på stivheten av systemet samlet sett og funnet en egen E-modul for systemet.

$$E_{sys} = \frac{F_{SFS} \times l_{sys}}{\Delta \times A} = 57450 \text{ N/mm}^2 \quad \text{Formel 5.1}$$

Ved å ha forbindelsens E-modul, kan vi dermed beregne systemets stivhet. Stivheten er gitt ved formel 5.2.

$$k_{sys} = \frac{E_{sys} \times A}{l_{sys}} \quad \text{Formel 5.1}$$

Stivheten som ble funnet fra strekktesten av hylsa ble benyttet videre ved dimensjonering av stivheten i bjelkeskjøten. Dette mente vi var det mest nøyaktige med tanke på å kunne sammenligne beregninger i bjelkeskjøten med resultatene fra forsøkene.

### 5.8.2 Momenttest av bjelkeskjøt

Bjelkeskjøtene er satt opp med 5 forskjellige oppsett, hvert oppsett i 3 eksemplarer, der det benyttes forskjellig antall gjengestag i topp og bunn. Teststykkene har blitt åpnet opp, slik at det kunne dokumenteres at det har vært uttrekksbrudd i alle tilfeller. Gysingen av limet i skjøtehylsen, for å skjøte gjengestengene, har vært suksessfullt, da det ikke har oppstått brudd i noen av hylseforbindelsen i bjelkeskjøtene. Videre gis en grundigere evaluering av hvert testoppsett.

#### 5.8.2.1 BS-1B

Dette testoppsettet består av 1 SFS i bunn og kontaktflate, tre mot tre, i topp. De tre testene som ble gjennomført har vist ganske stor variasjon i kapasitet. Treets trykkflate viser bra kapasitet, og størsteparten av rotasjonen kommer av forskyvning i bunn. Denne forskyvningen er forårsaket av uttrekk av SFS.

Oppnådde mindre kapasitet enn teorien på alle 3 tester, og bruddet som oppsto var uttrekk av gjengestaget. Dimensjonerende kapasitet til forbindelsen var flyt i gjengestag. Den store variasjonen i uttrekkskapasitet kommer spesielt godt frem når det kun er et gjengestag som holder sammen forbindelsen.

For alle tre tester ble det ved brudd et ganske markant tap i momentbelastning. Etter at tapet i momentbelastningen oppsto, fortsatte nedbøyning lineært med en fallende kapasitet i bjelkeskjøten. Til slutt sviktet bjelken ganske brått, med en plutselig nedbøyning på 10-30 mm. Når bjelken sviktet brått oppsto uttrekk av gjengestaget. Uttrekksbrudd virket til å ha en tilnærmet duktil oppførsel i starten av bruddet, men deretter kom den plutselige svikten i bjelkeskjøten som viser til et sprøtt brudd til slutt.

Etter at bjelkeskjøtene ble delt opp, vistes det et mønster i toppen av bjelken hvor trykksone er. Dette mønsteret tyder på plastifisering av treverket i topp, noe som igjen tyder på at dimensjonering med plastisk trykksone gir en bedre antagelse enn å dimensjonere etter elastisk trykksone.

En annen observasjon som ble gjort ved testene er når rotasjonene i bjelkeskjøten øker, vil hylseforbindelsen presses opp mot kanten av hullet som er boret ut. Dette gir en effekt hvor hylsen skaper spenninger mellom fibre som vil føre til splitting. Ingen av BS-1B-testene fikk stor nok rotasjon til at dette skjedde.



Figur 5-15: Her vises tydelig uttrekk av gjengestaget fra treverket.

Bjelkeskjøtens rotasjonsstivhet varierer mye mindre enn bjelkeskjøtens momentkapasitet. Årsaken til dette er forholdet mellom moment og rotasjon. Ser at ved større momentbelastning gir det en større rotasjon. Er allikevel mindre forskjeller på rotasjonsstivheten enn momentkapasiteten.

#### 5.8.2.2 BS-1B-1T

Dette testoppsettet består av 1 SFS i bunn og 1 SFS i topp. De tre testene som ble gjennomført viser jevne resultat, men alle tre er godt under teoretisk kapasitet. Kapasiteten er også lavere enn testoppsettene med et gjengestag i bunn.

Også her ble det et markant tap i momentbelastning uten at bjelken kollapset. Kollapsen skjer etter videre nedbøyning av bjelken. I bruddsituasjonen vil bjelken ha oppnådd noe rotasjon som videre fører til at gjengestaget blir bøyd. Dette tror vi kan være med på å skape en ekstra friksjon mellom gjengestaget og fibrene, selv etter at uttrekket av gjengestaget har skjedd. Denne friksjonen som holder igjen gjengestaget etter uttrekk, gir en oppfatning av en duktil bruddoppførsel i starten, frem til bjelken kolliderer, som tilsvarer et sprøtt brudd. Mest sannsynlig på grunn av at den resterende friksjonen mellom gjengestag og fibre slipper, og dette brått.

Dette testoppsettet har en lavere rotasjonsstivhet enn oppsettet med kontaktflate i topp. Dette skyldes nok av at rotasjonscenteret opptrer noe høyere opp i tverrsnittet med kontaktflate i topp.

Sammenlignet med testoppsettet med et gjengestag i bunn og et gjengestag i topp, har testoppsettet med bare et i bunn, større kapasitet. En forklaring på dette kan være at kraftarmen til den med et gjengestag i topp og bunn, er definert ved lengden mellom gjengestagene. Og for testoppsettet med et i bunn og tre mot tre i topp, vil kraftarmen bli større, da kraftresultanten i trykksonen vil være nærmere toppkant, enn plasseringen til øvre gjengestag i testoppsettet med et

gjengestag i topp og bunn. Ved forskjell i kraftarmen vil det bli ulik kraft i gjengestagene, og dermed blir det uttreksbrudd ved forskjellig momentbelastning.

### 5.8.2.3 BS-2B-1T

Dette testoppsettet består av to SFS i bunn og en SFS i topp. I resultatene er det betraktet brudd, når øvre gjengestag får sammenpressing i treet, og det oppstår et tap i momentbelastningen. Alle tre tester har jevne resultater, og gir en kapasitet over teoretiske beregninger.

Første test ble kjørt til totalbrudd, ved at det sprakk opp langs gjengestengene. Da kjørte vi testen videre slik at bjelkeendene roterte så mye at det begynte å bli kontaktflate i topp. Etter momenttapet, på grunn av sammenpressing av SFS i topp, stabiliserte belastningen seg og økte på når det oppsto kontakt, tre mot tre. Denne belastningen økte opp mot dimensjonert kapasitet for en skjøt med 2 SFS i bunn. Bjelken hadde da så stor nedbøyning, og rotasjonen førte til at vi fikk oppsprekking langs med gjengestengene. Samme prosedyre og brudd fikk vi også ved siste test. Som det ble nevnt under vurderingen av BS-1B-testene observerte vi at ved store rotasjoner vil hylseforbindelsen rotere i det forborede hullet og skape en effekt tilsvarende et brekkjern. Når hylsen får rotert nok vil det skape så store spenninger parallelt mellom fibrene slik at splitting oppstår. På test 2 valgte vi å ikke kjøre bjelken til totalbrudd, da bjelken skulle benyttes til testing i andre enden.



Figur 5-16: Splitting parallelt med fibrene etter at bjelken hadde fått store rotasjoner.

Ser av resultatene at sammenpressing av SFS i treet gir større kapasitet enn uttrekk av SFS. En logisk forklaring på dette er at treet gir motstand til den butte enden av gjengestaget. Etter å ha åpnet opp teststykkene ser vi skjærbrudd langs gjengene og sammenpressing i treet.

Dette testoppsettet er det med lavest rotasjonsstivhet. Like under oppsettet med 1 SFS i topp og bunn. Årsaken er at skjøten er mye stivere i bunn, der det er 2 SFS, og det vil dermed fort oppstå forskyvninger ved øvre gjengestag.

#### 5.8.2.4 BS-2B-2T

Dette testoppsettet består av 2 gjengestag i bunn og 2 gjengestag i topp. Her fikk vi to resultater som kan drøftes videre og ett resultat som kan forkastes grunnet feil i produksjonen. Ved test 3 oppnådde vi bare halve kapasiteten til de 2 foregående testene. Etter åpning av teststykkene fikk vi avdekket årsaken, da den ene av de to nedre hylsene ikke var gyst med lim.

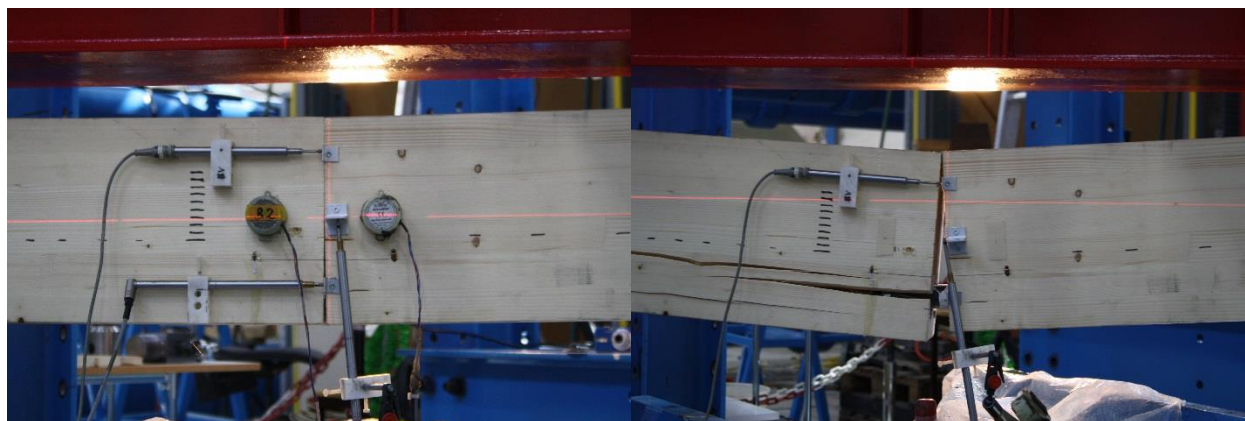
Også her fikk vi et markant tap i momentbelastning, men fikk en avrundet kurve før brudd. Starten av bruddet skjer med et noe lineært momenttap samtidig som nedbøyning øker. Etter ganske mye momenttap, kollapser de og viser en sprø bruddsoppførsel til slutt. Begge testene oppnådde lavere kapasitet en teoretiske beregninger. Og igjen er det uttrekk som er bruddårsak, og ikke flyt i gjengestaget som teoretisk beregnet. Dette viser til at det største usikkerhetsmomentet rundt forbindelsen er uttrekk av gjengestaget, som virker å være en del svakere en dimensjonert.

Rotasjonsstivheten til dette testoppsettet er en god del større enn hos ovenfornevnte testoppsett, der bare 1 SFS er bærende. Denne bjelkeskjøten har en kapasitet som er nesten dobbelt så høy, og får en rotasjon som ikke er mye større.

#### 5.8.2.5 BS-2B

Dette testoppsettet består av to SFS i bunn, og kontaktflate, tre mot tre, i topp. Dette testoppsettet fikk den største momentkapasiteten, og resultatene var jevne for alle tre testene. Får en liten avrundning rundt toppunktet i grafen som viser momentet i bjelken, men får raskt et markant momenttap og uttrekksbruddet gir et sprøtt brudd. Dette er testoppsettet som har fått det minst duktile bruddet, noe som ikke er ønskelig. Også her ble kapasiteten lavere enn teoretiske beregninger.

I kontaktflaten mellom treet i toppen dannet det seg en mønster som tyder på at kontaktflaten var utnyttet etter plastisk kapasitet.



Figur 5-17: Bildet til venstre viser BS-2B-2 rett før brudd. Bildet til høyre viser samme bjelkeskjøt rett etter at brudd oppsto.



Fikk høyere kapasitet med kontaktflate, tre mot tre, i topp, sammenlignet med oppsettet med 2 SFS i topp og bunn. Årsaken her er den samme som nevnt for oppsettet med 1 SFS i bunn, kontra oppsettet med 1 SFS i topp og bunn. Ser at den relative forskjellen mellom momentkapasiteten til de to oppsettene med 2 SFS i bunn er mindre enn hos oppsettene med 1 SFS i bunn. Dette skyldes at den plastiske momentarmen til oppsettet med 2 SFS i bunn får en mindre verdi enn oppsettet med 1 SFS i bunn. Dermed blir forskjellen mellom definert momentarm hos oppsettene med SFS i topp mindre og forskjellen i momentkapasitet også mindre.

Rotasjonsstivheten til dette oppsettet er også størst. Ved kontakt i topp, tre mot tre, virker det som at rotasjonssenteret forflyttes oppover og dermed får vi også en større rotasjonsstivhet.

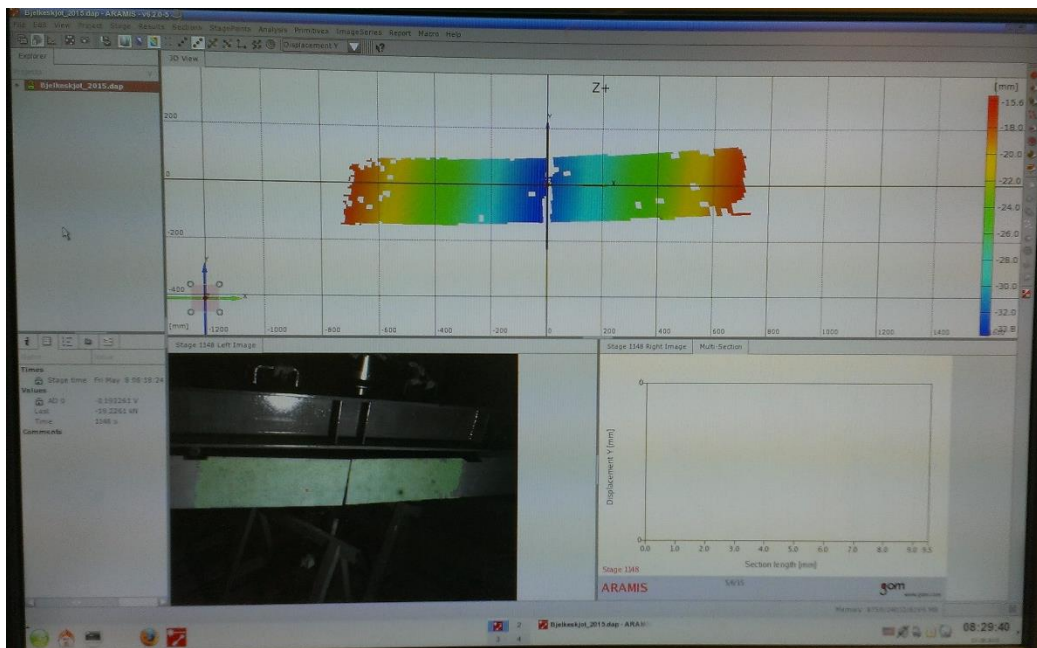


*Figur 5-18: Øverst til venstre ser man hvordan bjelken har presset seg sammen mot hverandre i toppen. På bildet oppe til venstre og bildet nederst ser man mønstret som har dannet seg i kontaktflaten.*



### 5.8.2.6 Resultater fra ARAMIS-skanner

Vi har valgt å ikke benytte resultatene fra ARAMIS-skanneren. Dette er det flere årsaker til. Blant annet har vi fått ut veldig mange og gode resultater fra forskyvnings- og rotasjonsmålerne, slik at vi har hatt nok jobb med å analysere og evaluere disse. Den tiden vi har brukt på resultatene fra ARAMIS viser at det ikke er så veldig mye informasjon å hente ut fra skanneren. Vi har sett gjennom samtlige tester og resultatene viser lite eller ingen spenning i overflaten på bjelken. De eneste spenningene som kameraet registrerer er ved splitting langs fibre i bjelkeskjøten. Vi har derfor konkludert delvis med at den eneste nytten resultatene fra ARAMIS-skanneren har, er som verifisering av nedbøyningen til bjelkene, som ble registrert av forskyvningsmålerne.



Figur 5-19: Resultater fra ARMAIS-skanner. På bildet vises vertikal forskyvning av bjelken.

### 5.8.3 Evaluering av gysing av lim

Alle bjelkeskjøtene ble kuttet i to mellom bjelkeendene, midt i hylseforbindelsene. Dette ga oss mulighet til å kontrollere hvor godt hylsene var fylt opp med lim.

Alle hylsene, bortsett fra en, var fylt med lim. Hvis man trekker fra den ene hylsen som ble glemt gyst med lim, betyr det at 34 av de 35 hylsene var godt fylt med lim. I tre av hylsene ble det observert noen små luftbobler i overkant av hylsen. Disse luftlommene var så små at de befant seg i toppene av gjengene i hylsen. Dette betyr at de ikke var så store at de påvirket skjærarealet som befinner seg mellom gjengestag og hylse, og har derfor ingen reduserende effekt på skjærkapasiteten i det kritiske tverrsnittet i limet.



Figur 5-20: Bildet viser at hylsene er fulle av lim. Dette var også tilfellet for alle andre hylsene bortsett fra en.

Proessen for å gys hylsene med lim har sine fordeler og ulemper. Metoden med å sette inn et gyserør for å holde hylsen i posisjon har vist seg å fungere da ingen av hylsene hadde forskjøvet seg ved gysing av limet. I tillegg har fyllingen av hylsen vært god, bortsett fra den ene hylsen. Det er allikevel et problem som kommer av åpningstiden på limet, som videre fører til at vi må stille oss spørsmål om hvordan en gyseprosess skal fungere feilfritt ved en reel situasjon.

Man kan ikke forvente at man på byggeplass skal kunne blande limet, ta det med til bjelkeskjøten og være ferdig gyst med samtlige hylser innen 20 minutter. Det må derfor brukes et lim som har lengre åpningstid, eller så finnes det løsninger i dag hvor man har to komponenter i hver sin beholder, for så at de blandes gjennom et spesielt rør før de kommer ut som en blandet

epoxy. Dette er kun forslag til hvordan man kan forbedre gyseprosessen, og vi har dessverre ikke hatt tilstrekkelig med tid til å se nærmere på alternativer til limet vi har brukt.

For den ene hylsen som ble registrert å ikke være helt fylt med lim, mener vi å ha en logisk forklaring på. Limet som ble benyttet i testene hadde en åpningstid på 15-20 min ved 20°C. Ved en av gyseprosessene ble det blandet nok lim til 6 hylser. Men på grunn av tiden det tok pr. hylse ble limet i seigeste laget til de to siste hylsene. Da hadde det gått 20-25 minutter siden limet ble blandet. Det ble likevel valgt å fortsette gysingen, men vi ser i ettertid at dette nok er årsaken til at den ene hylsen hadde en noe redusert mengde lim i tillegg til at det oppsto en lekkasje mellom hullet i treet og silikonpakningen. På bildet nedenfor kan man se at det har lekket epoxy fra hullene i topp ned langs bjelken.



*Figur 5-21: Hylsen opp til høyre og hylsen oppe til venstre er hver side av den samme hylsen. På hylsen oppe til høyre ser man godt at hylsen kun er halvfull med lim.*



#### **5.8.4 Teori mot resultater.**

##### **5.8.4.1 Kapasitet hylseforbindelsen**

Gjennom strekktestene av hylsene fikk vi verifisert kapasiteten til hylseforbindelsen. Vi kan ikke fastslå den nøyaktige kapasiteten til limet da alle gjengestagene gikk til brudd, men dette var heller ikke hensikten med testen, da kapasiteten av innlimingslengde har blitt testet tidligere [16]. Den var kun for å bekrefte å skjøten var sterkere enn gjengestaget.

##### **5.8.4.2 Nedbøyning bjelkeskjøt**

Basert på beregningen gjort av uttrekksstivheten til gjengestaget og systemstivheten til hylsene som vi fikk fra strekktestene av hylseforbindelsen, har vi kunnet ved hjelp av vanlig geometri og bjelkeformler kunne regne oss frem til en antatt nedbøyning.

Fra resultatene ser vi at beregningene i mange tilfeller stemmer godt overens med testene. De testene med størst forskjell mellom teori og eksperiment på nedbøyningen, er de testene som også har størst forskjell mellom momentkapasiteten i forhold til teori og eksperiment. Der hvor kapasiteten stemmer godt, stemmer også nedbøyningen godt mellom teori og eksperiment. På grunnlag av dette kan man anta at de utledninger gjort på nedbøyningen er gode.

##### **5.8.4.3 Uttrekkskapasitet**

Basert på tester gjort av uttrekkskapasiteten til gjengestagene [13] vet vi at resultatene er svært varierende når gjengestagene står parallelt med fibrene i bjelken. Vi valgte likevel å gjenge de inn parallelt med fibrene da dette forenklet hylseforbindelsen og bjelkeskjøten slik at det var praktisk gjennomførbart.

Alle våre resultater viser også stor variasjon i uttrekkskapasiteten til gjengestagene, og vi ser i ettertid at inngrepslengden burde vært økt slik at det var større sjans for å oppnå brudd i gjengestaget i stedet for uttrekk. For det første ble kapasiteten til gjengestagene dimensjonert etter karakteristiske verdier og ikke midlere. Dette førte til at kapasiteten vi dimensjonerte uttrekk etter har vært noe lav. I tillegg, er det ikke mulig å bekrefte brudd ved flyt i gjengestaget. Uttrekkskapasiteten burde derfor vært dimensjonert etter brudd i gjengestag fra midlere kapasiteter. På denne måten vill det vært enklere å verifiser om det var gjengestag som gikk til brudd.

Det kan også tenkes at bøyning har hatt effekt på uttrekkskapasiteten. Dersom hylseforbindelsen har vært mye stivere enn bjelken, kan det tenkes at man har fått en redusert inngrepslengde på grunn av stivhetsforskjellen som har gjort at uttrekk har blitt utsatt for en kraft som ikke har vært rettet i samme retning som gjengestagene. Våre beregninger er basert på rent aksialt uttrekk og tar ikke hensyn til redusert inngrepslengde på grunn av bøyning.

##### **5.8.4.4 Uttrekksstivhet**

Som nevnt i avsnitt 5.8.4.1 benyttet vi uttrekksstivheten som grunnlag til å beregne nedbøyningen til de forskjellige bjelkeskjøtene. Selv om uttrekkskapasiteten parallelt med fibre har vist seg å variere mye, har likevel den teoretiske uttrekksstivheten vært en god antagelse av forskyvning til gjengestagene frem til uttrekk inntreffer. Forskyvningen ved uttrekk vil være ca. 1mm, og basert på dette har det gitt gode antagelser av nedbøyning.

Selv om forskyvning ved brudd har vist små variasjoner, har det likevel ført til store variasjoner i uttrekksstivheten. Da uttrekk har oppstått ved veldig forskjellige belastninger i gjengestagene, alt fra 106,81 kN til 164,59 kN, gir dette store variasjoner i stivheten, alt fra 97,68 kN/mm opp til 298,36 kN/mm.

Disse tallene er basert på kraften som har oppstått i gjengestagene ved brudd, en kraft som er beregnet etter momentarmen i bjelkeskjøten. Dette er ganske enkel teori og burde derfor stemme bra, men basert på de voldsomme variasjonene kan det antas at beregningene for å finne kraften i gjengestagene kan ha enkelte antagelser som ikke har vært korrekte med tanke på momentarmer og trykksoner.

#### **5.8.4.5 Rotasjonsstivhet**

Resultatene fra bjelketestene viser at forskyvningen i gjengestagene stemmer bra med rotasjonen som ble målt av rotasjonsmålerne. Dette tyder på at man kan benytte forventet forskyvning i gjengestaget til å anslå rotasjonen i bjelken. Problemet er som nevnt i teoridelen hvordan man nøyaktig kan anslå forskyvningen i gjengestagene i topp og bunn. Tester utført med likt antall gjengestag i strekk og trykk har vist at selv om kapasiteten på forskyvning i strekk og trykk skal være den samme, stemmer ikke dette når bjelken får en nedbøyning.

Vi har antatt i beregningen at det vil oppstå en trykkflate mellom hylsen og treverket bak. Denne trykkflaten som overfører krefter gjør at kapasiteten og stivheten for gjengestaget i trykk er noe større enn ved rent uttrekk. Vi ser likevel fra testene at beregningene for bjelkeskjøtene med gjengestag i topp og bunn er noe lave, grunnet forskyvningen i gjengestagene i topp som er noe mindre enn beregningene gir. For å få en beregning som gir mer nøyaktig forskyvning, bør man derfor anta at gjengestagene i trykk har en noe større kapasitet enn gjengestagene i trykk enn hva som er utledet i denne rapporten.

For rotasjonsstivheten til bjelkeskjøtene med gjengestag i bunn og kontaktflate i topp er beregningene betydelig bedre i forhold til testresultatene. Her ble det antatt en lengde som fibrepresset seg sammen over. Ved å benytte hele bjelkens lengde for stivheten til trykksonen ble stivheten for lav. Vi antok derfor en lengde på 250mm for å få en stivere trykksone. Denne antagelsen stemmer svært godt for både bjelkeskjøtene med et gjengestag i bunn og for de med to gjengestag i bunn.



## 6 KONKLUSJON

---

Vi har valgt å dele opp konklusjonen i flere deler da vi mener det er flere enkeltpunkter som er viktig for hele konseptet om en stiv forbindelse. Til slutt gir vi en konklusjon av bjelkeskjøten som er testet i denne rapporten basert på konklusjonen på de enkelte komponenter.

### 6.1 HYLSEFORBINDELSEN

Gjennom de enkle strekktestene ble det vist at kapasiteten til forbindelsen er tilstrekkelig. Dette ble i noen grad bekreftet av alle bjelkeskjøtene også. Selv om det ikke ble en kraft i gjengestaget som ville gi brudd i gjengestaget, var de fleste belastningene så store at man kan si seg fornøyd med kapasiteten til hylseforbindelsen.

Prosedyren for gysing av lim har også vist seg å være tilfredsstillende. Det ene tilfellet hvor hylsen ikke var tilstrekkelig fylt opp med lim, kan forklares med at limet ikke hadde blitt gyst innenfor åpningstiden gitt fra produsent og en liten lekkasje som oppstod mellom bjelkene. Dette er et problem som kan løses ved å skaffe seg et lim med bedre åpningstid, eller ved å skaffe et lim som ikke starter å herde før det blir gyst inn i hylsen.

### 6.2 UTTREKSKAPASITET

Uttrekkkapasiteten har vist seg å være årsaken til brudd i samtlige bjelkeskjøter. Da bruddårsak skulle være flyt i gjengestag, ser vi i ettertid at vi burde dimensjonert med en større inngrepslengde da det allerede fra starten av var kjent at uttrekk parallelt med fiberretning ga store variasjoner i kapasitet. Hadde vi fått større kapasitet mot uttrekk ville vi også fått en bedre bekreftelse på kapasiteten til selve hylsen og limet.

Uttrekkkapasiteten er derfor den viktigste parameteren som må endres og forbedres ved videre forsøk, enten ved lengre inngrepslengde eller ved montering med en vinkel på fibrene i treet.

### 6.3 ROTASJONSSTIVHET

Resultatene på rotasjonsstivheten har vist seg å variere en del avhengig av testoppsett. Testene med to gjengestag i bunn og kontaktflate mellom treet i topp hadde en midlere rotasjonsstivhet på 2580 kNm/rad. Sammenligner man dette med rotasjonsstivheten oppnådd i [21] som var i området 14500-19500 kNm/rad, har bjelkeskjøten en betydelig mindre stivhet. Hovedforskjellen mellom disse to forsøkene er vinklingen mellom gjengestag og fiberretning i treet. Det er derfor naturlig å konkludere, både ut fra [21] og ut fra formlene, at ved å lage bjelkeskjøten med vinkel mellom gjengestag og fiberretning, vil man oppnå en betydelig høyere stivhet i bjelkeskjøten.

### 6.4 SAMMENLAGT KONKLUSJON

Bjelkeskjøten har vist stor kapasitet, og utførelsen av skjøten er enkel i form av at alle komponenter er enkle å anskaffe og produsere. Gysingen av limet er lite krevende, da det enkelt kan gyses med en engangssprøyte, og kontrollen fungerer med at vi gyses inn i et hull og lar limet fylle alle tomrom mellom hylse og gjengestag, og hylse og tre, for så at limet kommer ut gjennom det andre hullet i enden av hylsen. Selve hylseforbindelsen må derfor anses å være en god måte å skjøte gjengestenger på.

Kapasiteten til bjelkeskjøten er god. Det er nesten oppnådd samme momentkapasitet i skjøten, som den karakteristiske momentkapasiteten til bjelken. Rotasjonsstivheten har også vært god for de sterkeste testene. Men vi har gjort rede for at det er store forbedringspotensialer, både med momentkapasitet og rotasjonsstivhet dersom man installerer gjengestagene med en vinkel på fibre i treet.



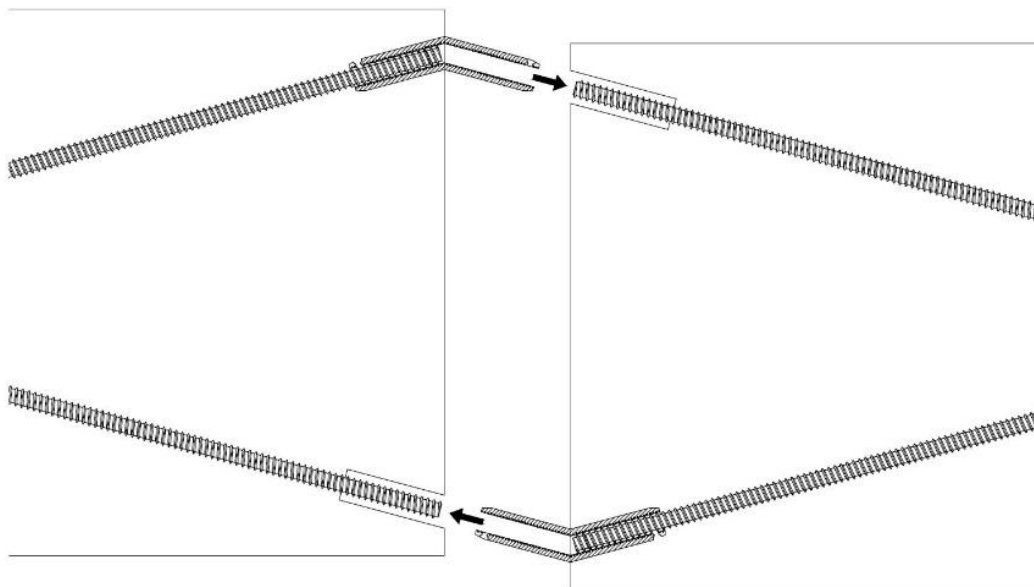
## 7 VIDERE ARBEID

---

### 7.1 FORBEDRING AV DESIGN

Testresultatene våre viste tydelig at uttrekk av gjengestengene, som er skrudd inn parallelt med fibre i treet gir resultater som er litt for uforutsigbare. Det konkluderes også i [13] at gjengestenger parallelt med fibre gir et brudd som er sprøtt i tillegg til at resultatene gir for stor spredning. Både ut fra beregningsgrunnlaget i eurokode 5 og [13] sammen med testresultatene fra [13] ser man at kapasiteten øker ved større vinkel mellom gjengestag og fiberretning. For å forbedre gjeldene bjelkeskjøt basert på dette, er det mest innlysende å få vinkel på gjengestengene i forhold til fibre i treet. Figur 7.1 nedenfor viser et forslag til hvordan dette kan løses ved å benytte den samme teorien rundt skjøting av gjengestengene som har blitt benyttet i denne oppgaven.

Ved å lage en hylse som er vinklet med  $15^\circ$  til hver side, for så å montere hylser i topp og i bunn i hver sin bjelkeende som vist på figuren, vil man få en bjelkeskjøt som er like enkel å montere som ved gjengestag parallelt på fibre. Men som vil gi en bedre uttrekkskapasitet og forutsigbarhet ved dimensjonering.



Figur 7-1: Forslag til forbedret bjelkeskjøt.

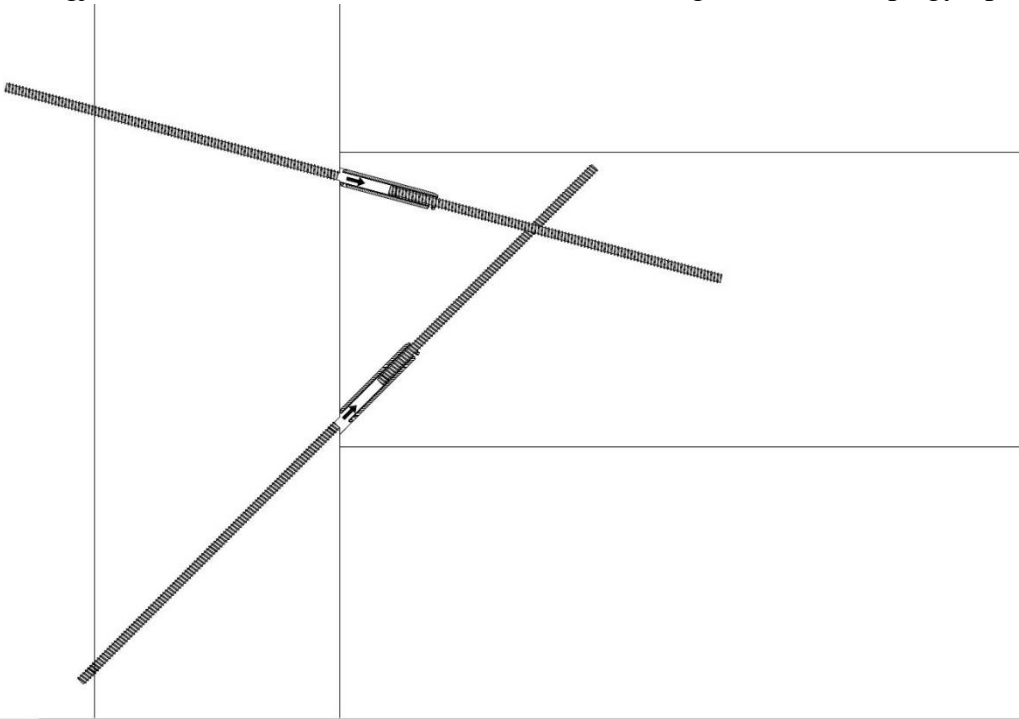
### 7.2 SØYLE-BJELKE FORBINDELSE

Masteroppgavene Larsen [21] og Westerheim [18] tok for seg henholdsvis optimalisering av vinkel på lange aksialbærende skruer i en søyle-bjelke forbindelse og brannmotstand til en bjelke-søyle forbindelse med lange aksialbærende skruer.

I konklusjonene av rapportene slo de fast at forbindelsene ga god kapasitet og stivhet, men at montering på byggeplass var en problemstilling som måtte bli sett nærmere på.

Metoden gjennomført i denne rapporten kan være en løsning på problemstillingen som de tar opp. Gjennom forsøkene er det vist at det går an å skjøte gjengestagene fra SFS Intec på en slik

måte at de har en kapasitet tilsvarende et kontinuerlig gjengestag. Og i tillegg er det vist at det er praktisk gjennomførbart i en tilnærmet fullskala test med gode resultater på gyseprosessen.



*Figur 7-2: Forslag til videre arbeid der hylseforbindelsen benyttes i momentstive knutepunkter*

## REFERANSER

---

- [1] Knut Grønvold: Trekonstruksjoner: Vg2, byggteknikk, Gyldendal undervisning, Oslo, Norge (2007)
- [2] Tre Fokus [Internett]. Utgivelsessted: Oslo. Dato [hentet 2015-03-06]. Tilgjengelig fra: <http://www.trefokus.no/fullstory.aspx?m=524&amid=852>
- [3] Hans Larsen, Vahik Enjily, Practtical design of timber structures to Eurocode 5, Thomas Telford Limited (2009)
- [4] Bergensavisen [Internett]. Utgivelsessted: Bergen. Dato [hentet 2015-03-6]. Tilgjengelig fra: <http://www.ba.no/nyheter/irix/article6592744.ece>
- [5] Fylkesmannen i Hedmark [Internett]. Dato [hentet 2015-03-6]. Tilgjengelig fra: [http://www.fylkesmannen.no/Documents/Dokument%20FMHE/06%20Landbruk%20og%20mat/Skogbruk/Skog%20og%20milj%C3%B8/Skog%20og%20klima%20faktaark%2003\\_09.pdf?epslanguage=nb](http://www.fylkesmannen.no/Documents/Dokument%20FMHE/06%20Landbruk%20og%20mat/Skogbruk/Skog%20og%20milj%C3%B8/Skog%20og%20klima%20faktaark%2003_09.pdf?epslanguage=nb)
- [6] Sweco [Internett] Utgivelsessted: Oslo. Dato [hentet 2015-03-20]. Tilgjengelig fra: <http://www.sweco.no/no/Norway/Markedsomraader/Bygninger/Boliger/NYSKAPENDE-TRELOSNINGER--PA-VAR-MATE/>
- [7] Rune B Abrahamsen, Kjell Arne Malo, Structural design and assebly of “Treet” - A 14-storey timber residential building in Norway (2014)
- [8] Treteknisk [Internett] Utgivelsessted: Bergen. Dato [hentet 2015-04-5]. Tilgjengelig fra: <http://www.trefylket.no/vedl/skogmuseet-Bygge%20med%20Tre%20%20Jarle%20Aarstad%20Treteknisk.pdf>
- [9] Tlustochowicz G, Serrano E, Steiger R: State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods. RILEM 2010
- [10] Batcher M.L., MacIntosh K.A.: Structural joints in glulam. NZ Timber Design Journal, Issue 4, Volume 7, 1998.
- [11] CEN, Den europeiske standardiseringsorganisasjonen, EN 1995-1-1:2004: Prosjektering av trekonstruksjoner. Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger. Brussel, Belgia (2004)
- [12] Per Kristian Buene: Utforming av monterbar og momentstiv forbindelse basert på lange aksialbelastede treskruer, masteroppgave UMB, (2009)
- [13] Haris Stamatopoulos, Kjell ArneMalo, Withdrawal capacity of threaded rods embedded in timber elements, vitenskapelig artikkel (2015)
- [14] SFS Intec [Internett] Dato [hentet 2015-04-03]. Tilgjengelig fra: [http://www.sfsintec.biz/mo/no/no/web/industrial\\_solutions/construction/timber\\_work/timber\\_work\\_1.html](http://www.sfsintec.biz/mo/no/no/web/industrial_solutions/construction/timber_work/timber_work_1.html)
- [15] SFS Intec [Internett]. Dato [hentet 2015-03-10]. Tilgjengelig fra: [http://www.sfsintec.biz/sfs\\_download/media/general\\_media/downloadcenter/sfs\\_intec\\_m\\_o\\_et/timberwork/brosueuer\\_3/WB\\_Brochure\\_XX\\_en.pdf](http://www.sfsintec.biz/sfs_download/media/general_media/downloadcenter/sfs_intec_m_o_et/timberwork/brosueuer_3/WB_Brochure_XX_en.pdf)
- [16] Ola Innerdal: Innliming av treskruer i gjengehylser, prosjektoppgave NTNU, Trondheim (2014)
- [17] Joint Committee on Structural Safety (JCSS). JCSS Probabilistic Model Code. Part 3: Resistance Models Propereties of Timber: Joint Committee on Structural Safety (JCSS); 2006.

- [18] Nina Westerheim: Konseptstudie av knutepunkt i limtre og lange aksialbærende treskruer utsatt for brannbelastning, masteroppgave NTNU, Trondheim (2013)
- [19] Benjamin JR, Cornell CA. Probability, statistics, and decision for civil engineers. New York: McGraw-Hill; 1970.
- [20] Joint Committee on Structural Safety (JCSS). Probabilistic Model Code. Part 3: Resistance models: Joint Committee on Structural Safety (JCSS); 2000
- [21] Henrik Larsen: Momentbærende forbindelser i limtrebjelker, masteroppgave NTNU, Trondheim (2012)
- [22] CEN, Den europeiske standardiseringsorganisasjonen, EN 1993-1-1:2005: Prosjektering av stålkonstruksjoner. Del 1-1: Allmenne regler og regler for bygninger. Brussel, Belgia (2004)
- [23] Haris Stamatopoulos, Kjell Arne Malo, Withdrawal stiffness of threaded rods embedded in timber elements, vitenskapelig artikkel (2015)
- [24] Mapei [Internett]. Dato [hentet 2015-04-15]. Tilgjengelig fra: [http://www.mapei.com/public/COM/products/mapepoxy%20l\\_gb.pdf](http://www.mapei.com/public/COM/products/mapepoxy%20l_gb.pdf)
- [25] Moelven Limtre AS [Internett]. Dato [hentet 2015-04-30]. Tilgjengelig fra: [http://www.moelven.com/Documents/Limtre/limtredimensjoner\\_15112012nett.pdf](http://www.moelven.com/Documents/Limtre/limtredimensjoner_15112012nett.pdf)
- [26] DIN, Deutsche Institut für Normung, DIN 7998: Gewinde und Schraubenenden für Holzschrauben. Berlin, Tyskland 1975.
- [27] NS-ISO 6891, Trekonstruksjoner, Mekaniske forbindelsesmidler, Generelle prinsipper for bestemmelse av styrke og deformasjonsegenskaper.
- [28] GOM.com [Internett]. Dato [hentet 2015-05-18]. Tilgjengelig fra: <http://www.gom.com/3d-software/aramis-software.html>
- [29] ISO, the International Organization for Standardization, ISO 13061-1:2014: Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens. Part 1: Determination of moisture content for physical and mechanical tests. Geneve, Sveits (2014)
- [30] ISO, the International Organization for Standardization, ISO 13061-2:2014: Physical and mechanical properties of wood – Test methods for small clear wood specimens. Part 2: Determination of density for physical and mechanical tests. Geneve, Sveits (2014)
- [31] Kolbein Bell: Matrisestatikk, Statistiske beregninger av rammekonstruksjoner: Bjelkeformler, appendiks C. Tapir Akademiske forlag, Trondheim, Norge (2011)

## **BILDEREFERANSER**

---

Forsidebilde: Flisa Bru: Jan Tore Egge.

Figur 2-1: Treet: Rune B Abrahamsen, Kjell Arne Malo, Structural design and assembly of “Treet” - A 14-storey timber residential building in Norway (2014)

Figur 2-2: Teknisk Ukeblad [Internett]. Utgivelsessted: Oslo. Dato [hentet 2015-03-10]. Tilgjengelig fra: <http://www.tu.no/bygg/2010/04/21/verdens-hoyeste-trehus-i-kirkenes>

Figur 2-5: SFS Intec [Internett]. Dato [hentet 2015-03-10]. Tilgjengelig fra: [http://www.sfsintec.biz/sfs\\_download/media/general\\_media/downloadcenter/sfs\\_intec\\_mo\\_et/timberwork/brosueuer\\_3/WB\\_Brochure\\_XX\\_en.pdf](http://www.sfsintec.biz/sfs_download/media/general_media/downloadcenter/sfs_intec_mo_et/timberwork/brosueuer_3/WB_Brochure_XX_en.pdf)

Alle bilder som ikke har referanse er private bilder. Bildene er tatt for å gi en god dokumentasjon på produksjon og for å belyse observasjoner underveis. Figurer og illustrasjoner er også egenproduserte.



## **VEDLEGG**

---

**Vedlegg 1 – Produksjon av testforbindelsene**

**Vedlegg 2 – Observasjoner fra gyseforsøk**

**Vedlegg 3 – Observasjoner fra strekktester**

**Vedlegg 4 – Observasjoner fra bjelketester**

**Vedlegg 5 – Resultater**

**Vedlegg 6 – Densitet og fuktinnhold**

**Vedlegg 7 – Dimensjonering**

**Vedlegg 8 – Tegninger**





## VEDLEGG 1 - PRODUKSJON AV TESTFORBINDELSENE



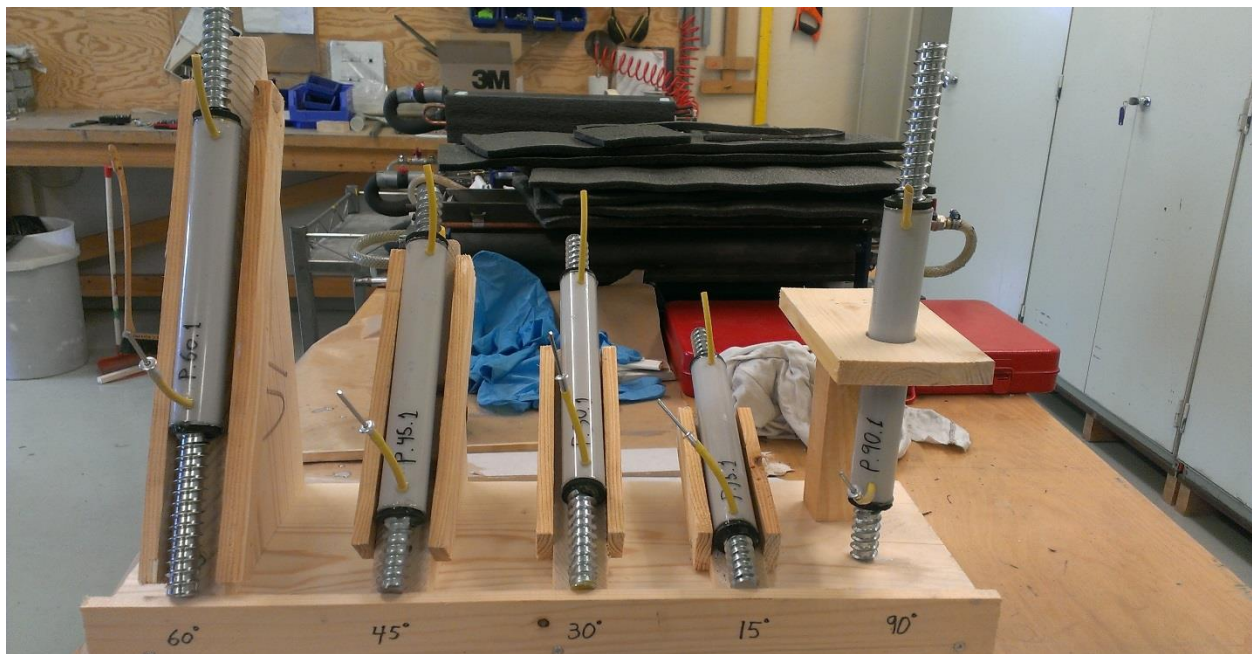
Figur VI-1: Stativ for å teste gysing i akrylrør i forskjellige vinkler



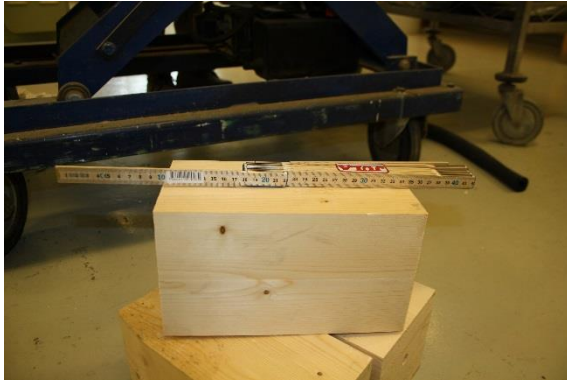
Figur VI-2: Gysing av lim i gjennomsiktig hylse



Figur VI-3: Gysing av lim med en 60ml sprøyte.



Figur VI-4: Akrylhylsene i forskjellige vinkler ferdig gysert med lim.



*Figur VI-5: Treklossene som ble brukt til pre-testingen av gysing, ble kuttet i lengder på 25cm.*



*Figur VI-6: Forboring av hull for akrylhylse. Boringen ble utført med et 32mm bor i en borerigg der man fikk satt fast trestykket i skruestikka.*

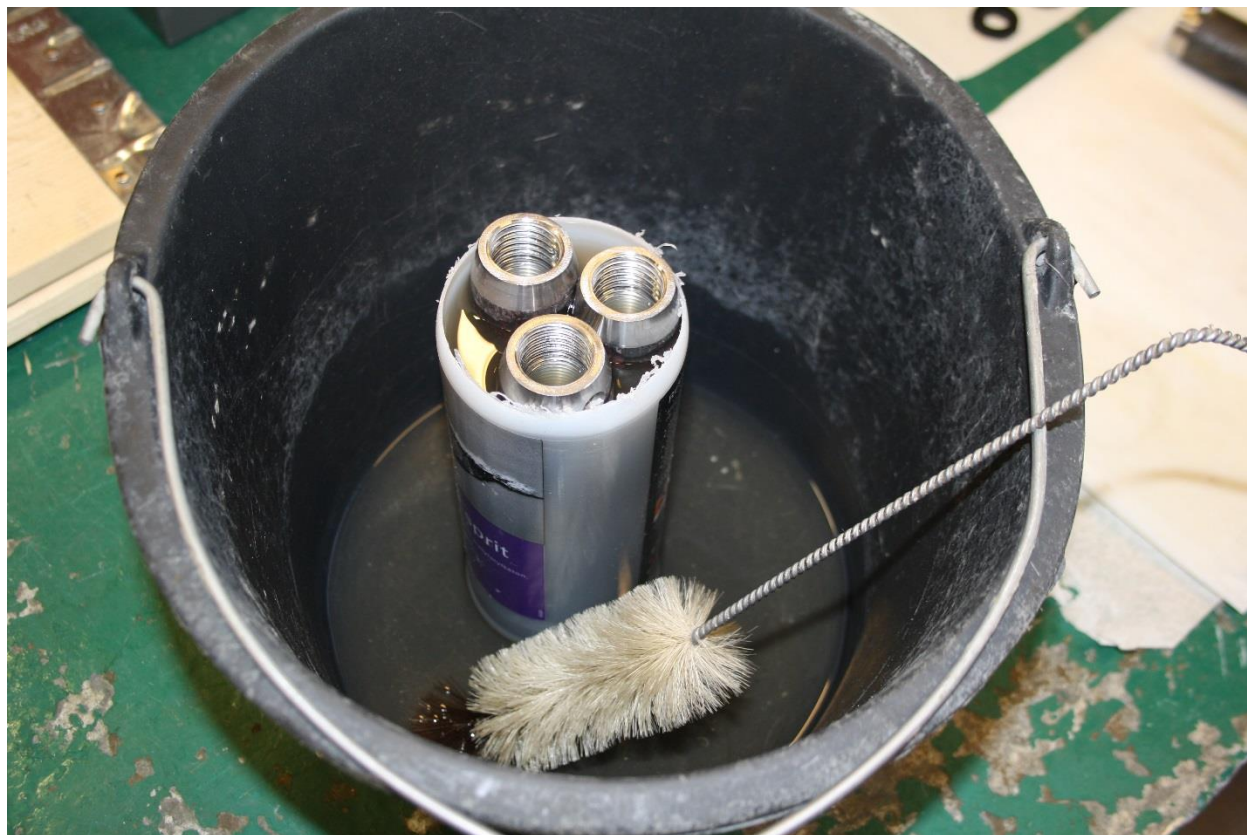




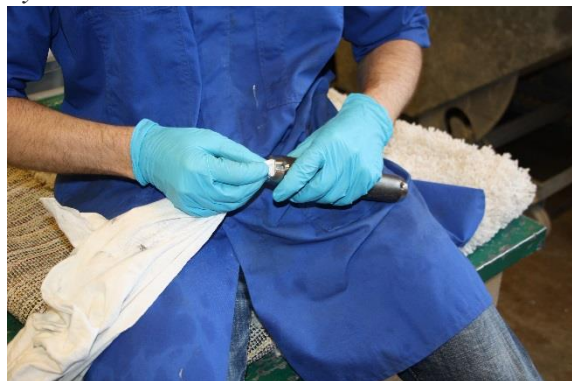
*Figur VI-7: For å skru inn gjengestaget ble maskinen lagt på et rullebord. Klossen ble festet til et heve-senke bord slik at man fikk skudd inn i vater.*



*Figur VI-8: Enkeltkomponenter nødvendig for å lage prøvestykkene. På bildet vises skruer fra SFS Intec, akrylrør med gummipakninger og kobberør til gysing. Til venstre ligger en ferdig produsert prøvehylse for gysing.*



*Figur VI-9: Vasking av stålhylser. Stålhylsene ble satt i en avkappet 1-liter flaske fylt med rektifisert sprit. Hylsene fikk stå i noen minutter før de ble skrubbet med en flaskekost som ble gjenget ned gjennom hylsen for å prøve å fjerne mest mulig skit som kan påvirke limets heft mot hylsen.*



*Figur VI-10: Gjengene i hylsen ble også tørket av med en fille så langt inn det lot seg gjøre. Noe smuss ble observert på filla etter tørking, men ble anset som så lite at hylsa var å betrakte som ren.*

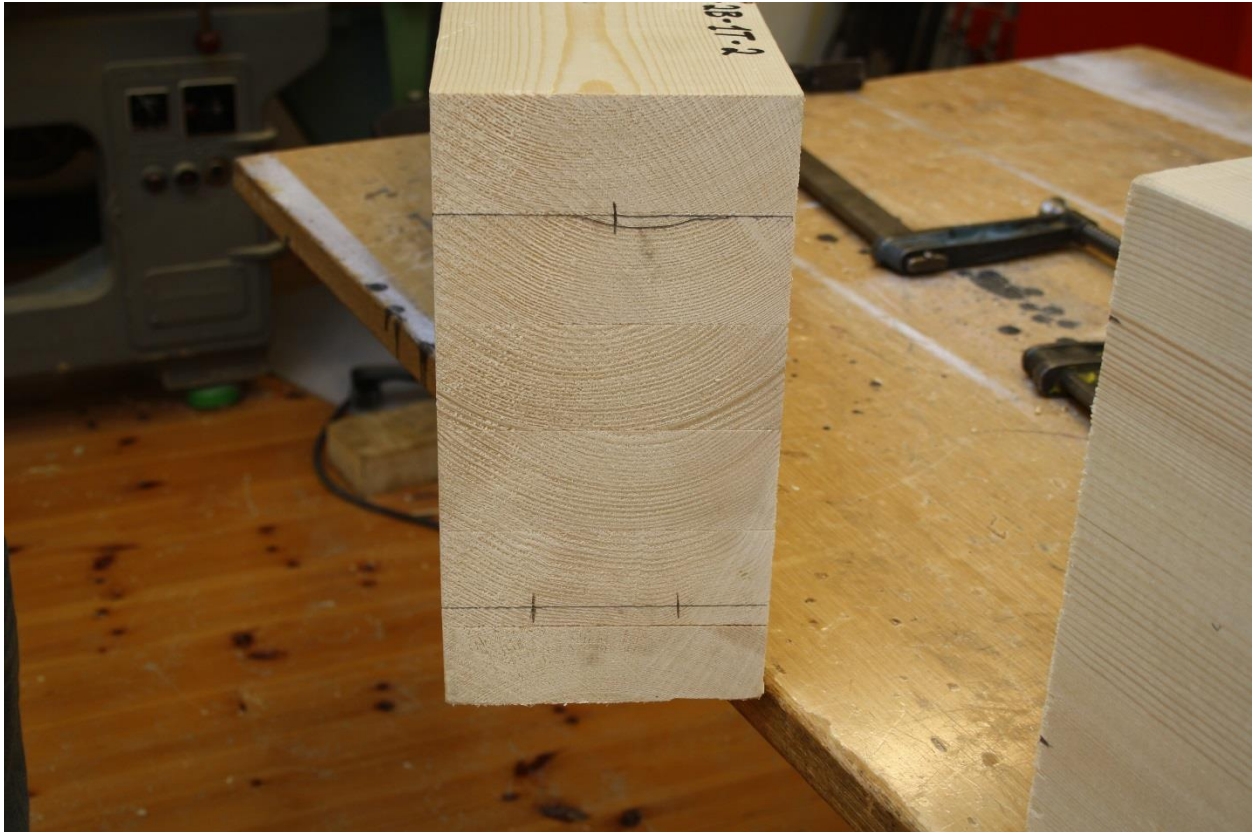


*Figur VI-11: Påliming av gummipakninger. Araldit rapid ble påført begge kontaktflatene før liming. Limet fikk så stå å herde i minimum en time i vertikal posisjon før det ble tatt videre til innskruing av gjengestagene fra SFS Intec.*

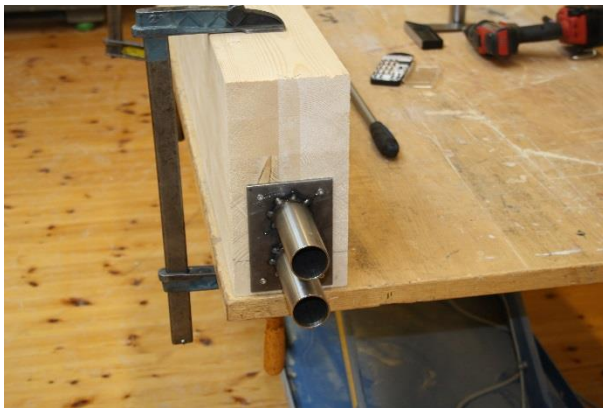




*Figur VI-12: Hylseforbindelsen ferdig produsert klar for liming. Pakningene på hylsen øverst i bildet slapp i det vi gjenget inn skruen. Det ble derfor besluttet å tette med silikon, og derav det hvite rundt pakningene.*



Figur V1-13: Målte opp punkter med blyant for hulltaking. Bjelkene ble først satt mot hverandre slik at vi fikk satt streker som fluktet med hverandre på hver bjelke.



Figur V1-14 Monterte deretter på styringsbrakett for boret.



Figur V1-15: Boret først med et 38mm trebor for å lage hullet som stålhylsen skal passe inn i.





*Figur VI-16: Satte deretter inn styrerøret for 15mm boret.*



*Figur VI-17: Maskinen fra Bosch ble lagt på et rullebor. Ved å juster heve-senke bordet som bjelken lå på kunne man sikre at man boret i vater og at man slapp i å løfte på den tunge maskinen*

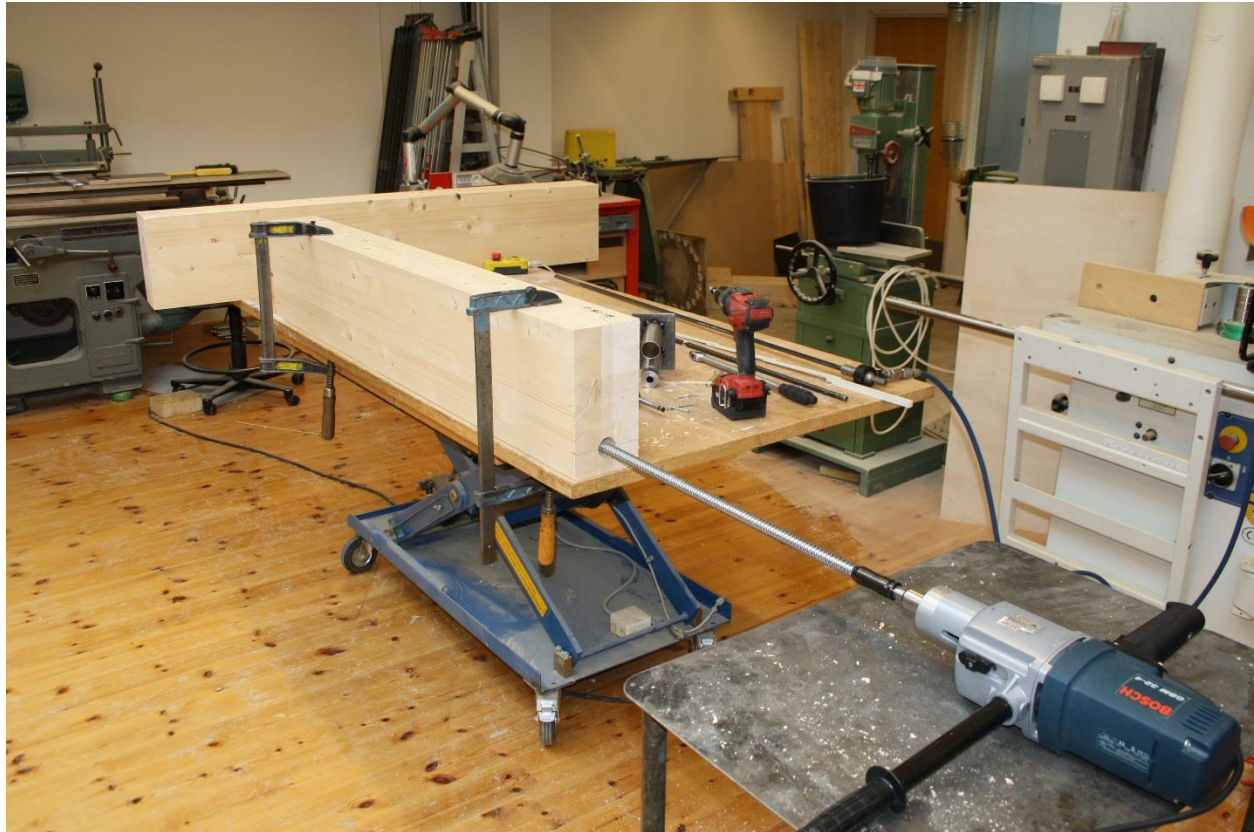


*Figur VI-18: Boret så med 15mm boret 700mm inn i bjelken fra ytterkant.*

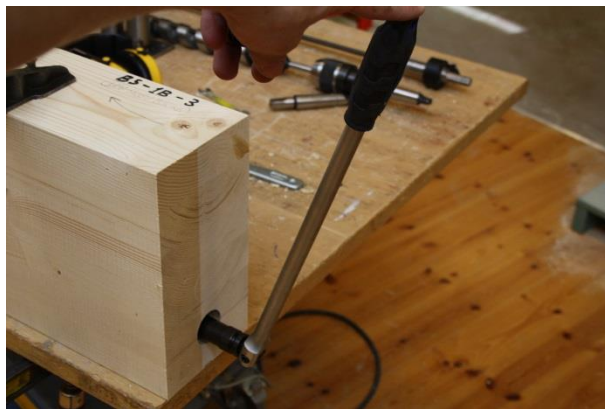


*Figur VI-19: Bildet viser hvordan hullet for gjengestaget er sentrert i hullet for hylsen. Gjennom alle hullene som ble boret ble det ikke registrert noen hull som ikke var sentrert i hylsehullet.*

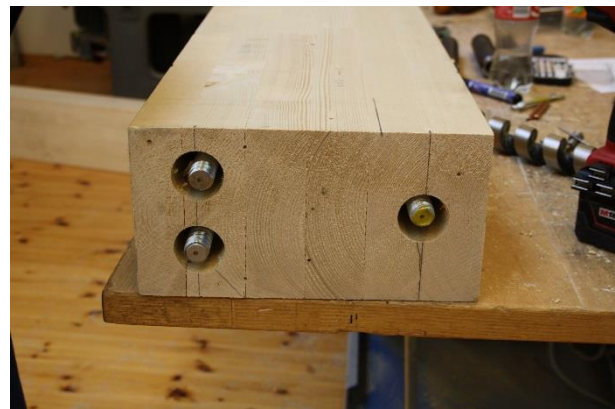




*Figur VI-20: Bildet viser et gjengestag på 700mm klar til inn skruing. Merk skrutvingene som ble brukt til å holde fast bjelken da både boreprosessen og inn skruingen av gjengestaget krever fastholding pga de store kreftene.*



*Figur VI-21: Latmannsarmen bel brukt både til å løsne koppen fra skruen og til å foreta den siste delen av inn skruingen for å sikre millimeter nøyaktighet.*



*Figur VI-22: Bildet viser en bjelkeende med ferdig inn skrudde gjengestag. To i bunn og en i topp.*





*Figur VI-23: Hullene til gyserørene ble boret for hånd ved at en siktet etter en siktestrek på bjelkeenden. Hull til innboringen ble målt og streket opp ved hjelp av en vinkel og en blyant.*



*Figur VI-24: Her visen en bjelkeende som er klar til skjøting. Hylsene er montert inn i hullet rundt gjengestaget og blir holt fast av gyserørene i siden.*



*Figur VI-25: Bjelkeskjøtet ved montering.*



*Figur VI-26: Gysing av lim i bjelkeskjøten. Limet ble gyst fra den ene siden, gjennom hylsen og ut gjennom gysehullet i den andre bjelken.*



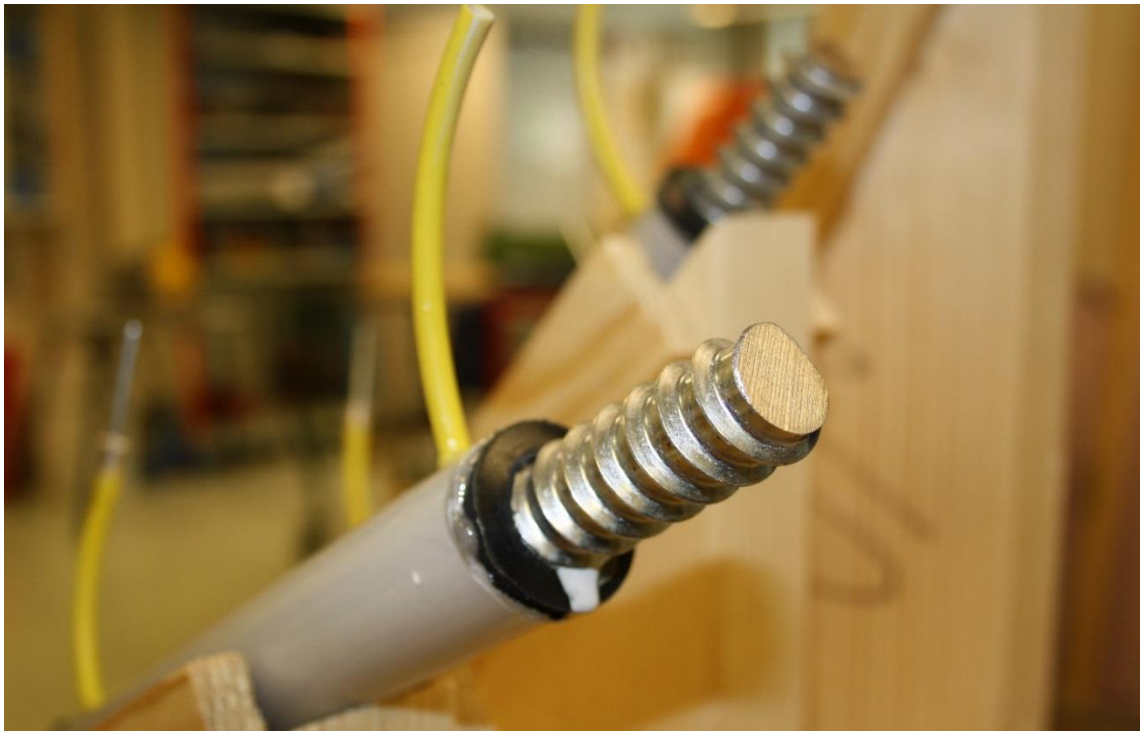
*Figur VI-27: Det ble benyttet silikon for å tette opprommet mellom hullet i treet og hylsene. Dette sikret oss mot lekkasjer mellom bjelkeendene ved gysing.*



*Figur VI -28: For bjelkeskjøtene som skal testes med skrue både oppe og nede ble de montert med 10mm opprom. Dette for å sikre at skruen i topp tar alt trykk. For å sikre gode tetting ble det lagt på rikelig med silikon rundt hylsen for endene ble ført sammen.*

## VEDLEGG 2 – OBSERVASJONER FRA GYSEFORSØK

### V2.1 Forsøk 1



*Figur V2-1 og 2: Bare små lekkasjer mellom skrue og pakning. Bildet er tatt etter herding og viser alt som kom ut.*



## V2.2 Forsøk 2



Figur V2-3: Ingen tegn til lekkasje rundt gysehullene. Heller ingen lekkasje av lim i bunn av hylsen hvor det ble brukt en pakning av silikon. Pga slipp mellom gummipakning og akrylrør har noe lim kommet ut i enden (høyre) av hylsen. Hylsen var likevel fylt opp med lim.



Figur V2-4: Noe lekkasje av lim ved gysehull. Pga lite opprom mellom hylse og treverk er det kun små mengder som har kommet ut.



Figur V2-5: Noen små lekkasjer ved gysehull. Ingen lekkasje mellom pakning og skrue. Pakning av silikon i bunn. Men usikkert om lim rundt gysehull i bunn kommer fra gysehullet eller lim



Figur V2-6: Hylse med store tomrom i. Dette pga av lekkasje mellom gummipakning og hylse da pakningen slapp. Feilslått test mhp fylling av hylse.



### V2.3 Forsøk 3



Figur V2-7: Noe lekkasje fra enden av hullet. Lim som har kommet mellom hylse og hull i treverket. Ikke pga lekkasje mellom pakning og skrue.



Figur V2-8: God tetting mellom gummipakning og bunn.



Figur V2-9: Noe lekkasjer ved begge gysehull. Lekkasjen i topp av hull var så stor at det begynte å renne ut fra hullet. Lekkasjen ble tettet utvendig. Hylsen var helt full av lim ved inspeksjon.



*Figur V2-10: Noe lekkasjer utenfor hylse som har spredd seg fra gysehullet i topp. God fylling med lim i hylsen.*



*Figur V2-11: Ingen lekkasjer mellom hull og hylse. Her ble hullene i hylsen boret samtidig som man boret gysehullene i treklossen. Dette sikret perfekt treff på gysehullene og resulterte her i null lekkasje.*



*Figur V2-12: Dette eksemplaret viser faren ved å benytte silikonpakning i bunn, spesielt før den har tørket skikkelig. Her har pakningen blitt dratt inn i hylsen og blandet seg noe med limet, i tillegg til at det tar plass som skal sikre heft mellom skrue og hylse*





*Figur V2-13: Hylsen viser ingen tegn til lekkasje. Også her ble gysehullene boret samtidig som hullene i hylsa som sikrer perfekt treff. Her ble det i tillegg brukt silikon på enden av hylsa i ytterkant for å sikre at evt. lekkasje ikke rant ut gjennom hullet.*



*Figur V2-14: Lekkasje fra øve gysehull. Overgang hull i treklossen og hylse ble også her tettet med silikon på forhånd. Dette sikret at limet ikke rant ut av hullet, men heller rant inn gjennom hullet.*

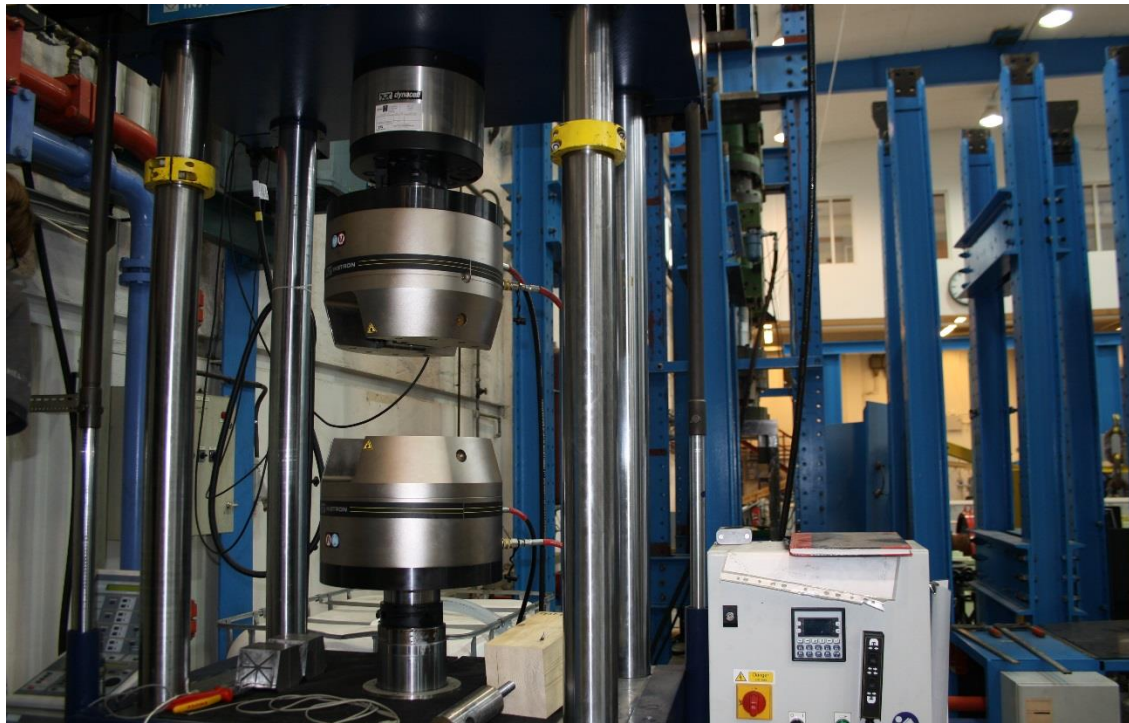


*Figur V2-15: God tetting i overgangen mellom hull og hylse.*

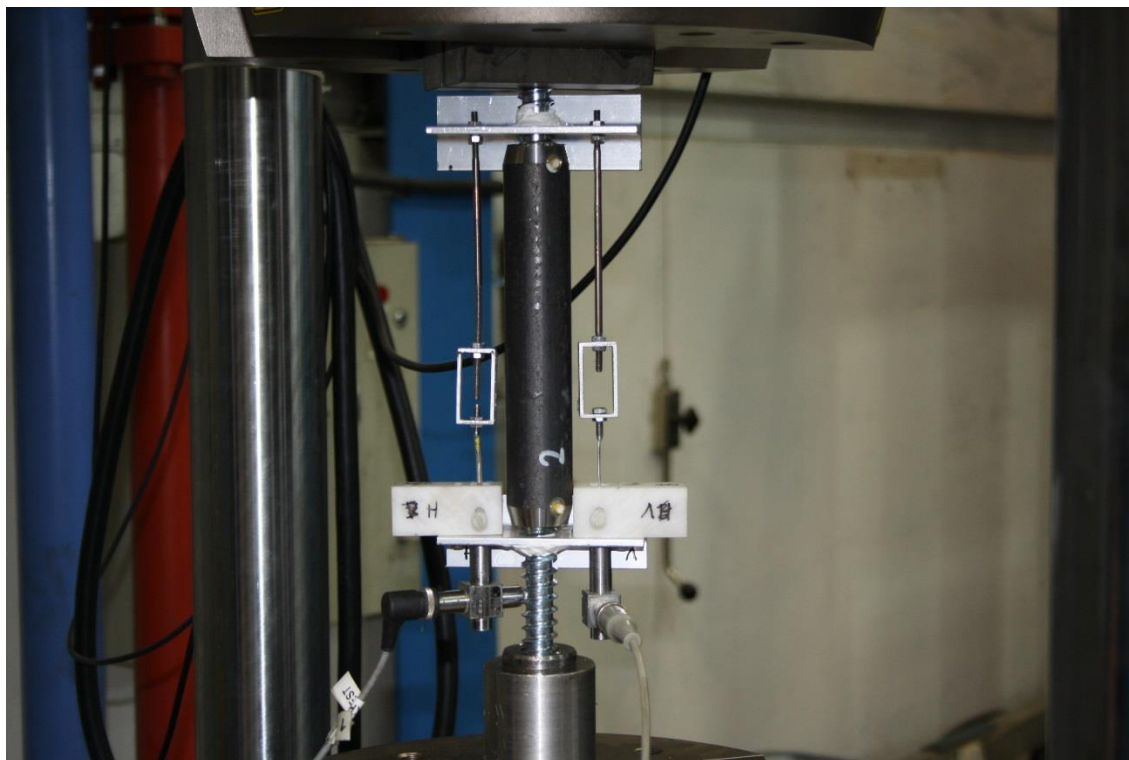


*Figur V2-16: Samme forbindelse som bildet til høyre. Viser hvordan silikontetting har hindret limet i å flyte ut av hullet og heller flyte innover.*

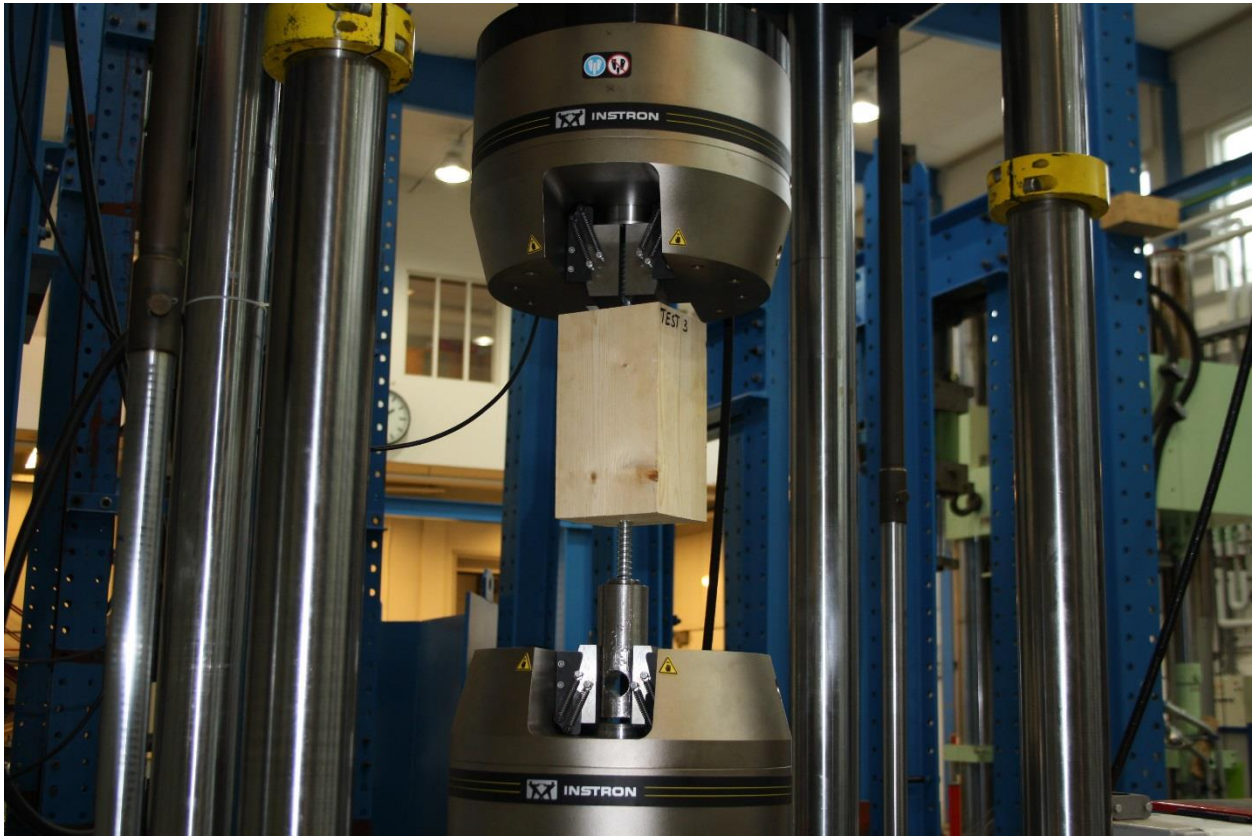
### VEDLEGG 3 - OBSERVASJONER FRA STREKKTTEST



Figur V3-1: Jekken som ble benyttet til strekktesting av hylseforbindelsen.



Figur V3-2: Hylseforbindelsen innsatt i jekken. Påmontert på begge sider er forskyvningsmålerne.



*Figur V3-3: Testforbindelse som ble limt i treverk montert i jekken.*





Figur V3-4: Brudd i skrue, test 5, hylse nr.2



Figur V3-5: Brudd i skrue, test 6, hylse nr.6



Figur V3-6: Bildet viser hvordan limet har satt seg over herdetiden på 7 døgn. Ved gysing var limet i flukt med kanten på hullet.

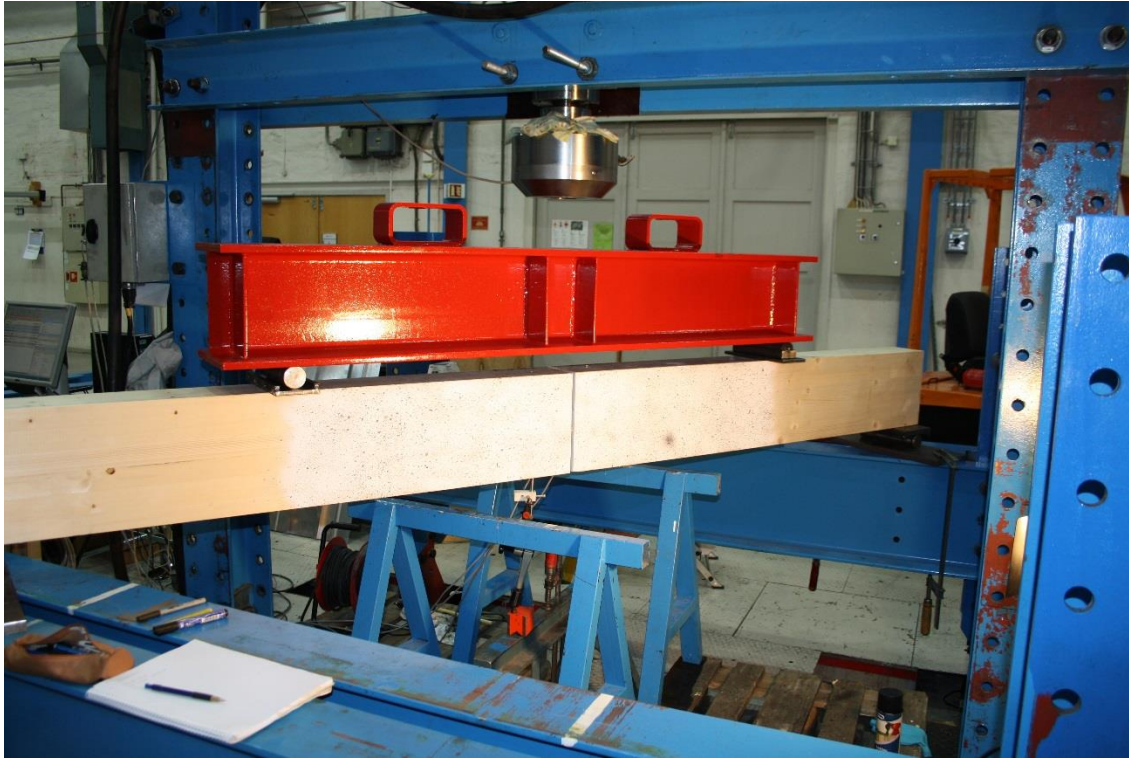


Figur V3-7: Brudd i skrue, test 3



## VEDLEGG 4 - OBSERVASJONER FRA BJELKETESTER

### V4.1 Dokumentasjon fra testing

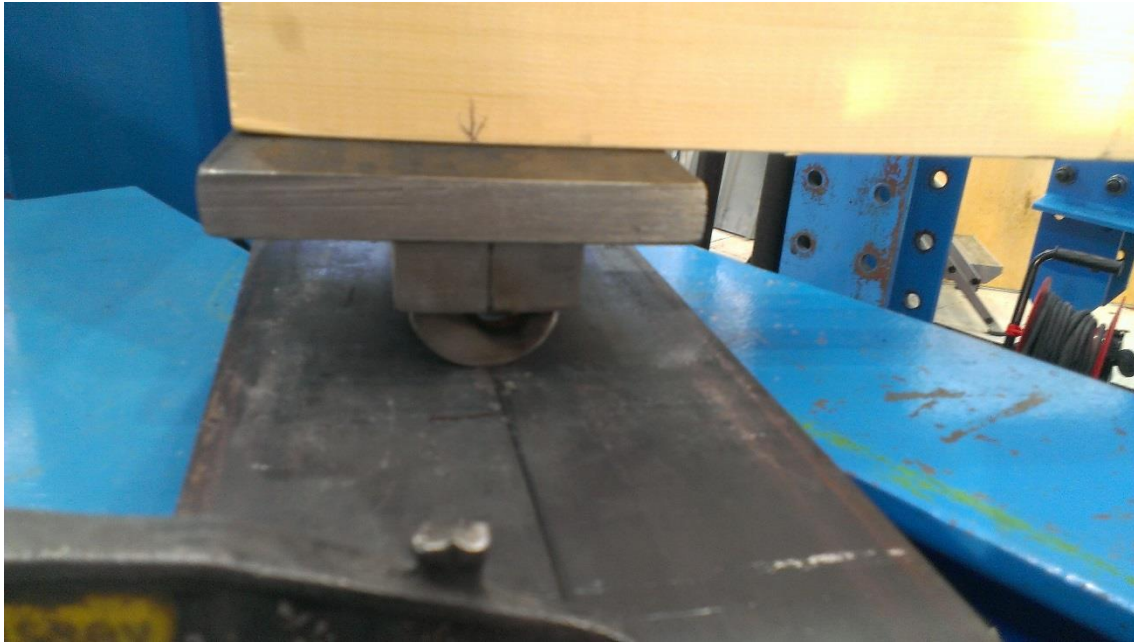


*Figur V4-1: Oppsett av bjelkeskjøten i testrigg.*

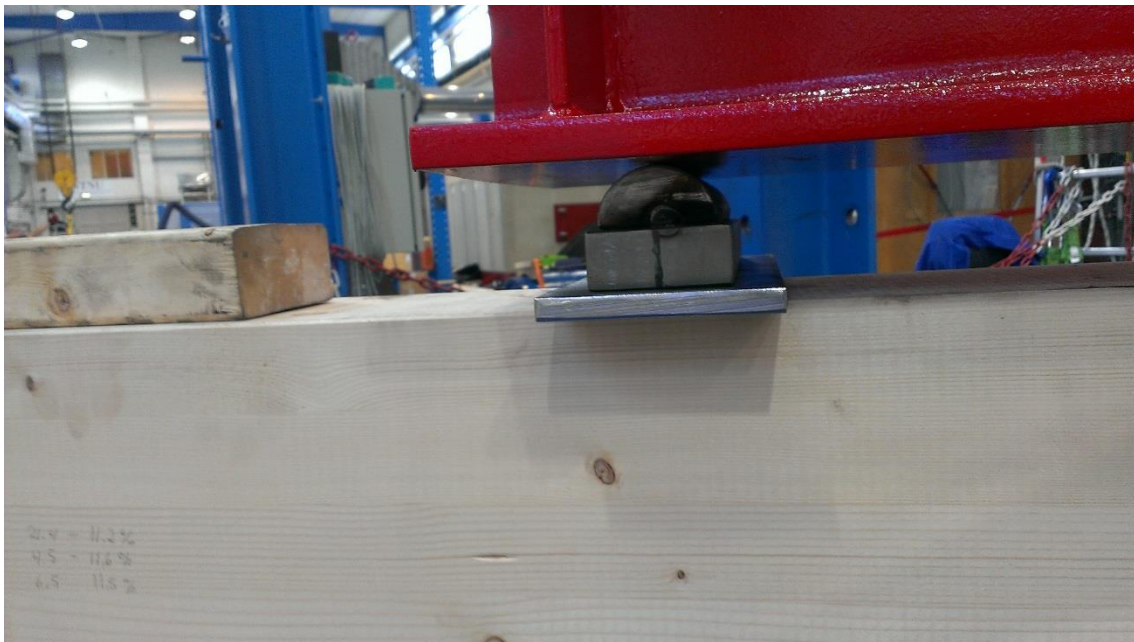


*Figur V4-2: Rullelager under opplegget til bjelken.*

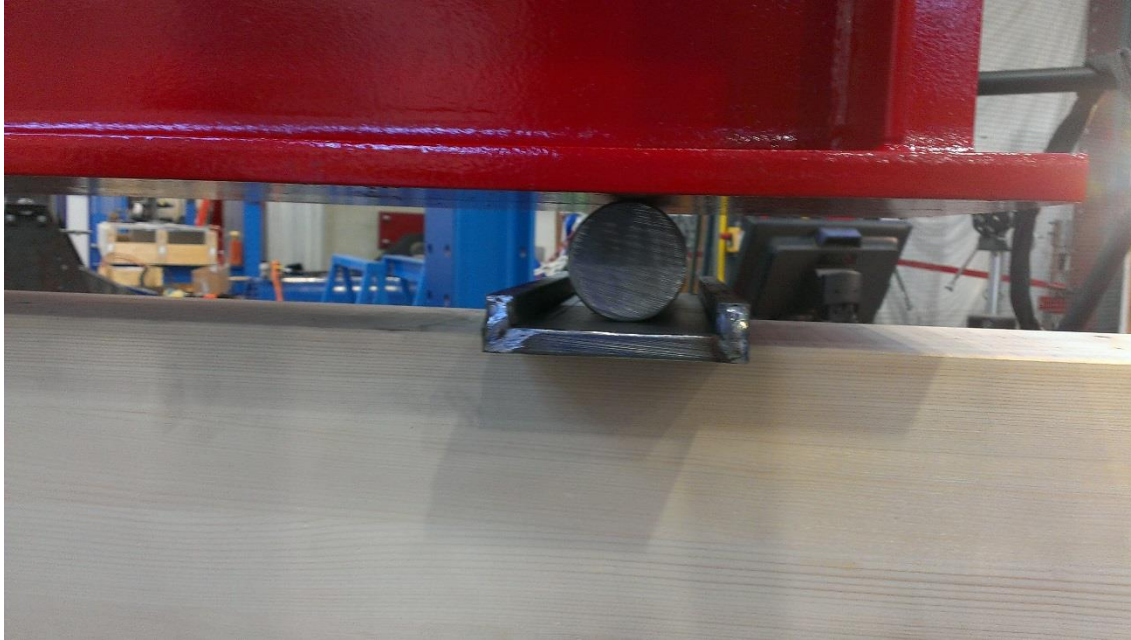




*Figur V4-3: Fastlager opplegg under den andre enden.*



*Figur V4-4: Fastlager under bjelken som fordeler kraften fra jekken.*



Figur V4-5: Rullelager under den andre enden av bjelken som fordeler lasten fra jekken.



Figur V4-6: Oppsett av målere. Horisontal forskyvning i topp og bunn i samme høyde som skruene, vertikal forskyvningsmåler ved senter og en rotasjonsmåler på hver side av skjøten.





*Figur V4-7: bjelken dekket i hvit spraymaling for å skape kontrast til de svarte prikkene som ARAMIS-skanneren bruker som målepunkter.*

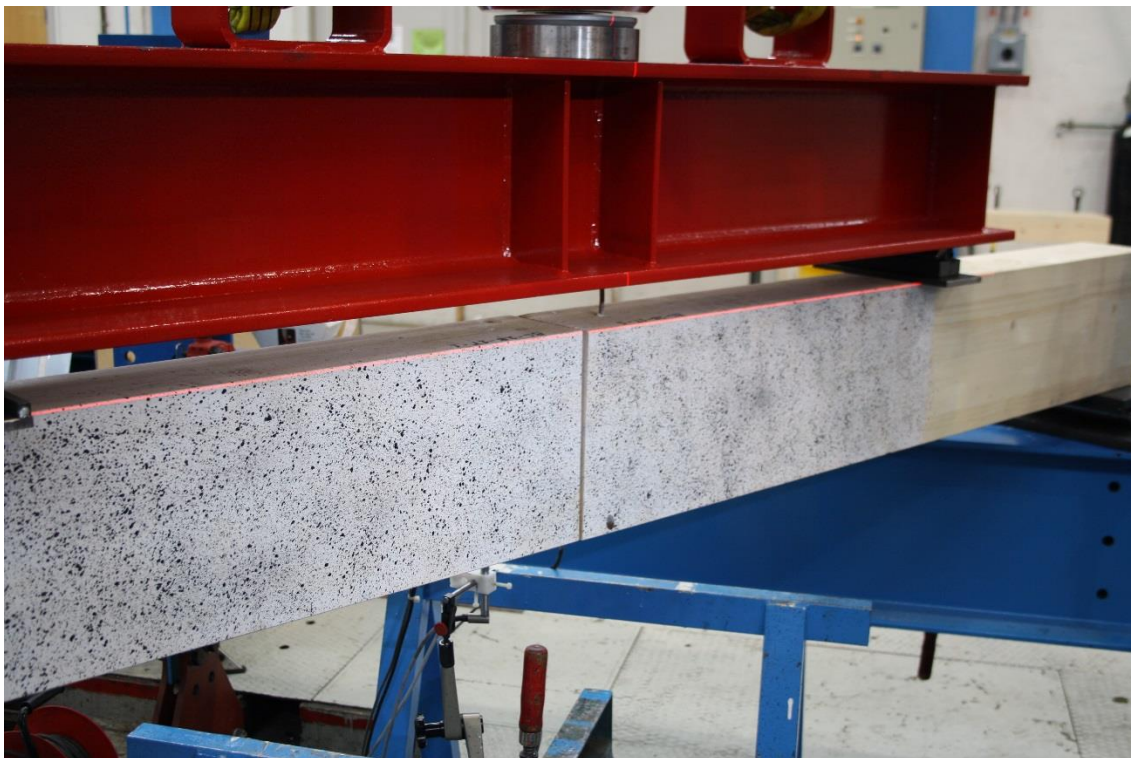


*Figur V4-8: ARAMIS-skanneren satt opp mot bjelkeskjøten i testriggen.*



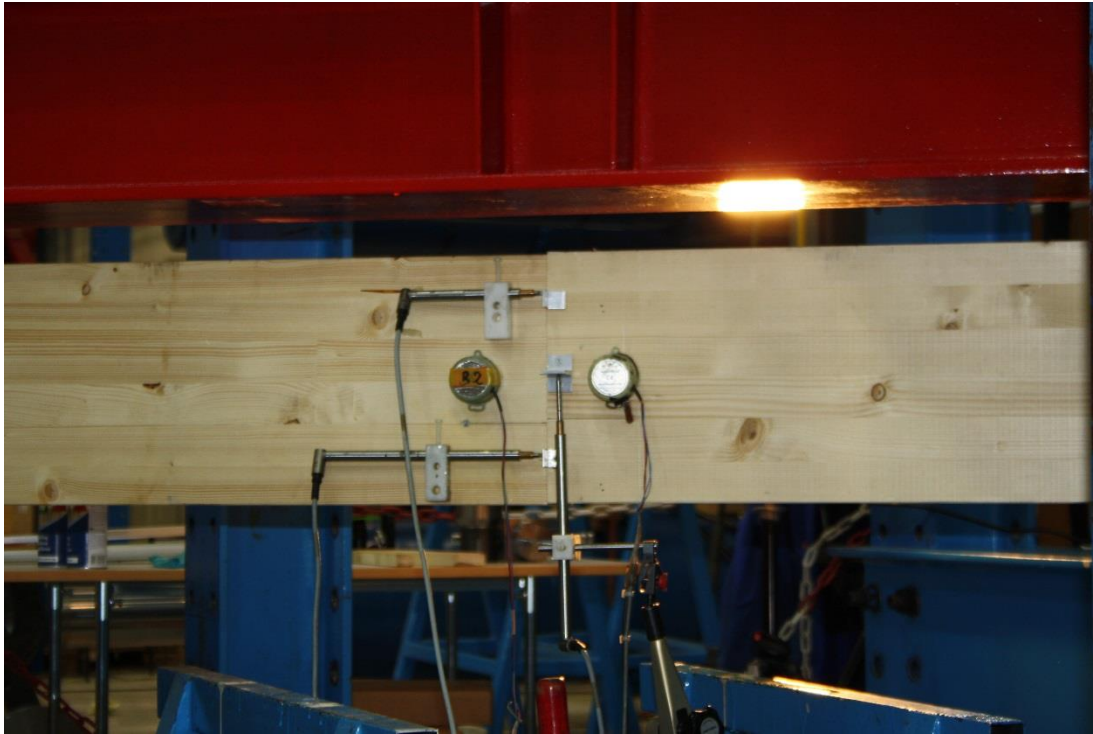


*Figur V4-9: Kalibrering av ARAMIS-skanneren. Prosedyren foregikk ved å la skanneren fokusere på kalibrerings krysset i 28 forskjellige posisjoner.*



*Figur V4-10: Ved øvre kant ligger en rød laserstrek fra en laservater som viser hvor rett bjelkeskjøten er etter montering.*

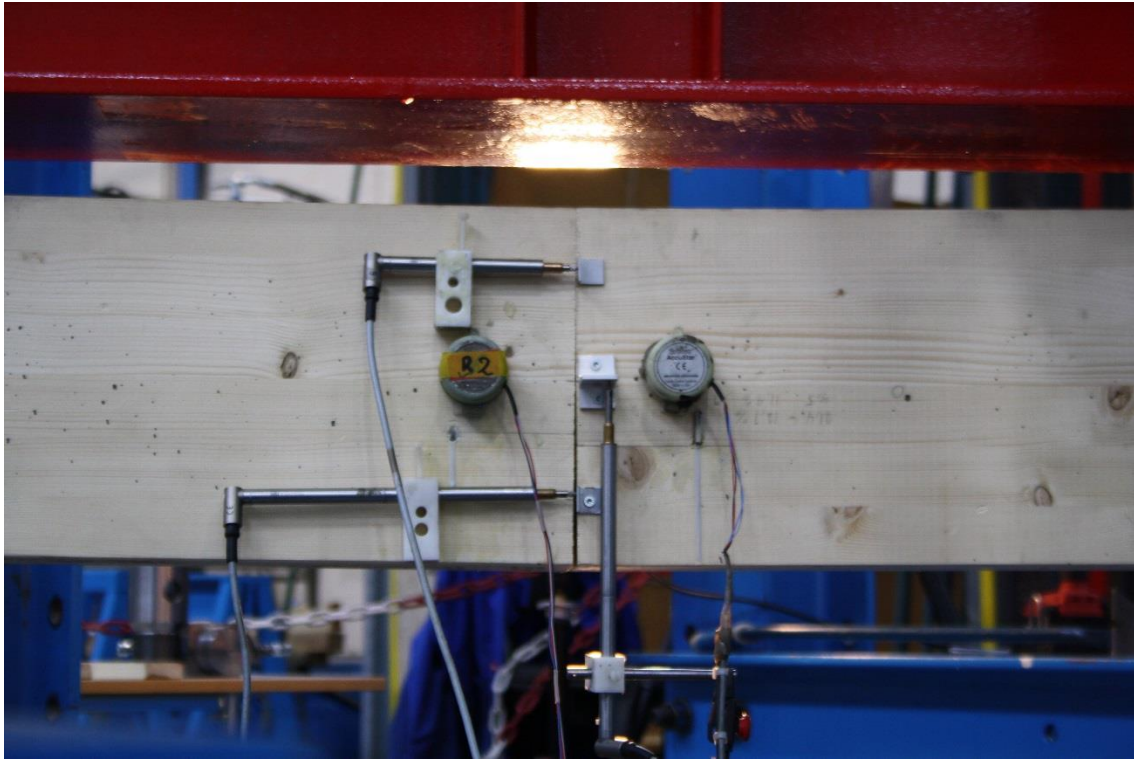
**BS-1B-1**



*Figur V4-11: En liten mellom bjelkene i høyde. Årsak i to monteringskruser som ble satt inn for å holde bjelkeendene sammen ved gysing som dro bjelkene litt forskjellig.*



**BS-1B-2**



*Figur V4-12: Tydelige tegn til deformasjoner i bjelkeskjøten ved på-loading.*



*Figur V4-13: Stor deformasjon etter krafttap har inntruffet i på-loadingen.*



**BS-1B-3**

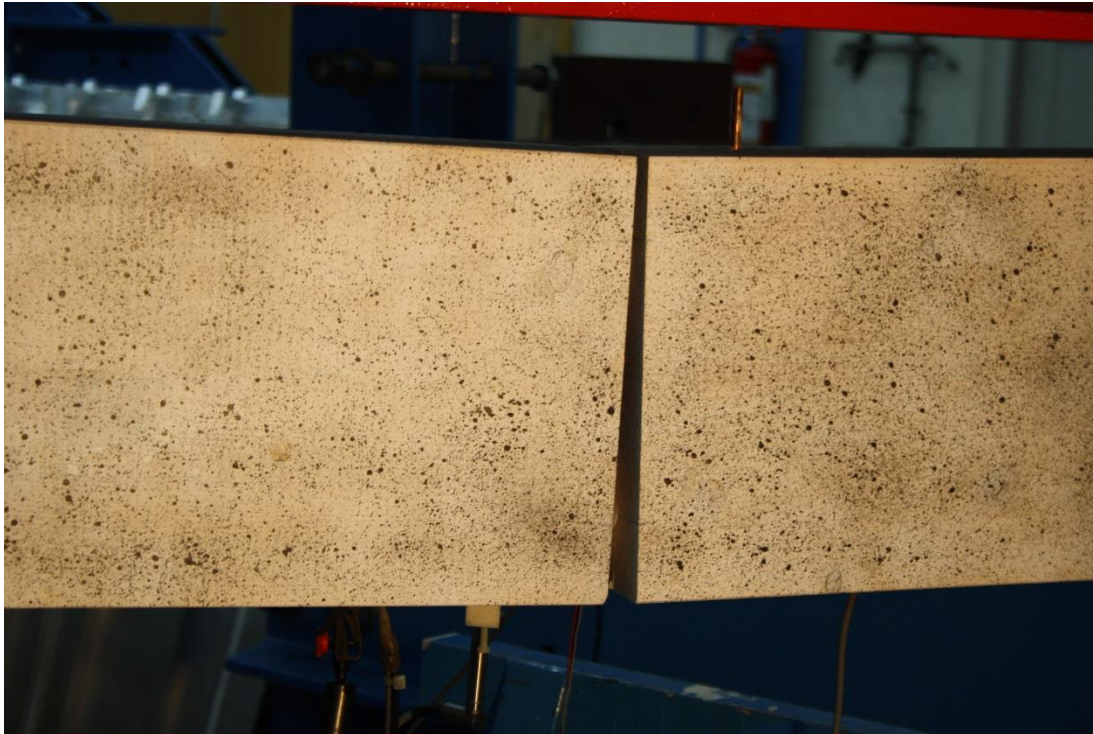


*Figur V4-14: Bjelkeskjøt med full kontakt mellom treverket før på-lasting.*



*Figur V4-15: Bjelkeskjøt etter at den ble tatt ut av testrigg. Uttrekk i bunn har gitt store forskyvninger.*

**BS-1B-1T-1**



*Figur V4-16: Tydelig rotasjon i bjelkeskjøten etter at brudd oppsto.*



**BS-1B-1T-2**



*Figur V4-17: Store deformasjoner som følge av fortsatt på-lasting etter kraft tapet ved ca.55 kN. Sprekker i treverket rundt hylsen i topp.*



*Figur V4-18: Deformasjonen i bunn var så stor at det overgikk måleområdet til forskyvningsmåleren.*

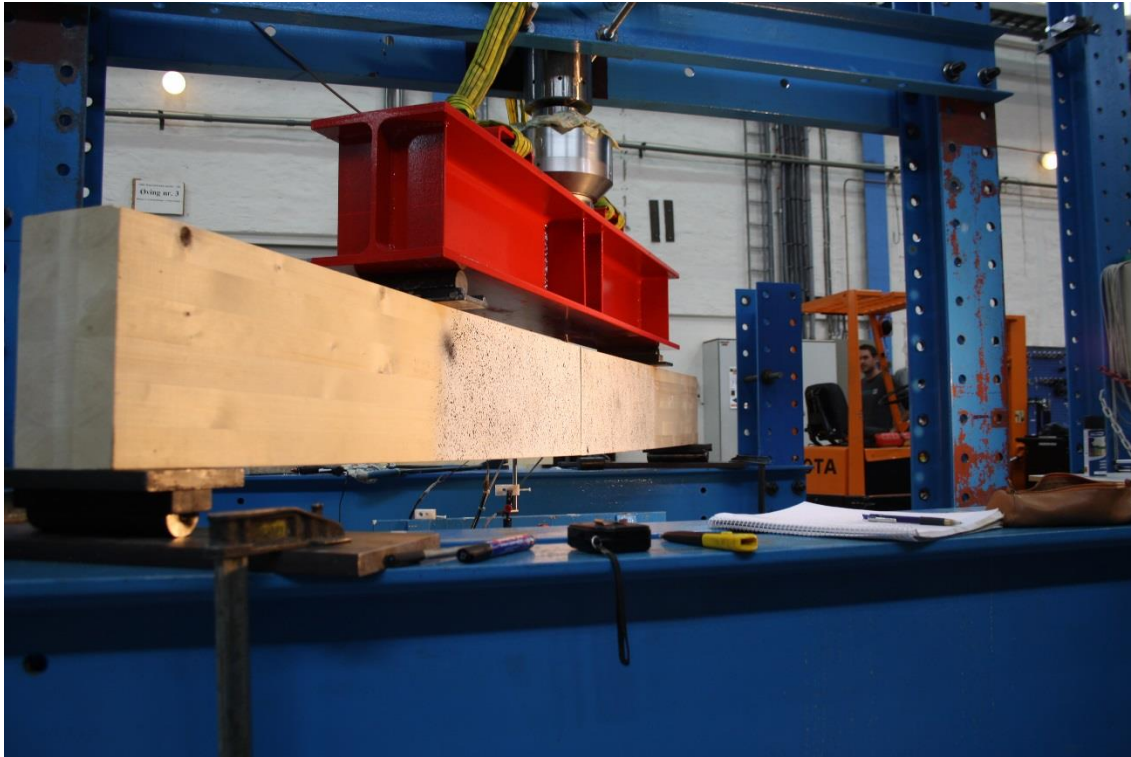
**BS-1B-1T-3**



*Figur V4-19: Bildet er tatt etter at brudd oppstod. Rotasjon lite synlig for det blotte øye.*



**BS-2B-1T-1**



*Figur V4-20: Etter at på lasting har begynt.*



*Figur V4-21: Betydelig rotasjon etter første krafttap som oppstod ved 74,9 kN.*





*Figur V4-22: Sprekk i topp oppsto etter at bjelken hadde rotert så mye at det oppsto kontakt mellom treverket i toppen på bjelkeskjøten.*



*Figur V4-23: Brudd i bjelken.*



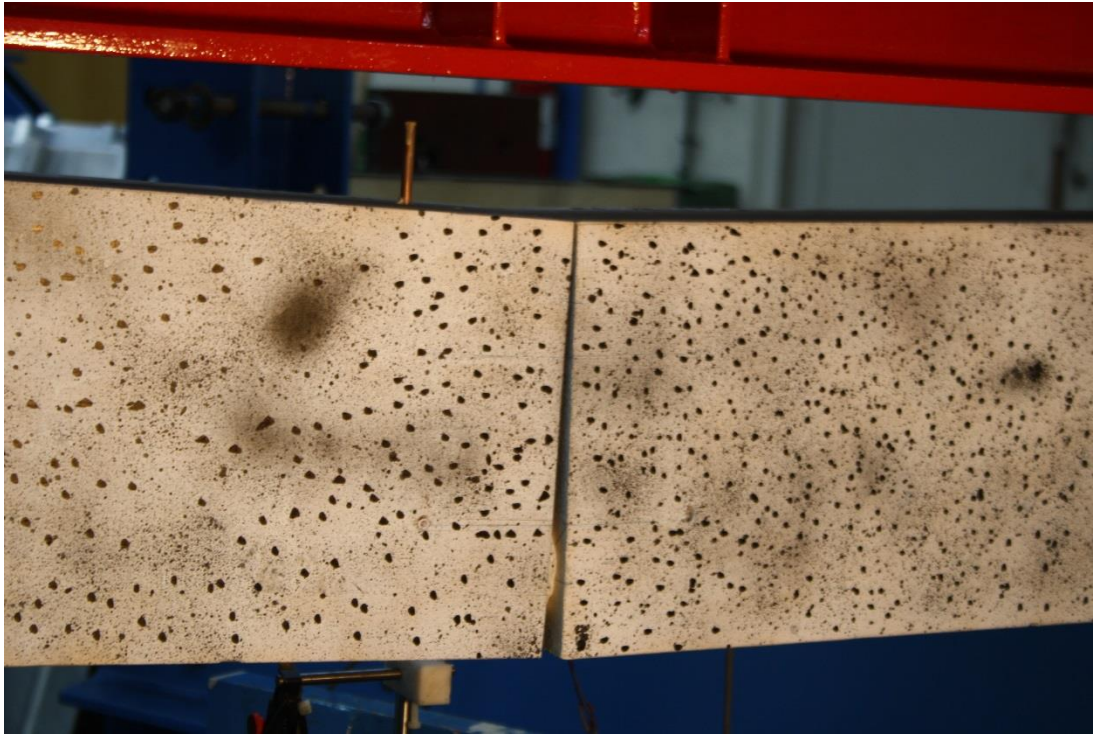


*Figur V4-24: Det samme bruddet sett fra andre siden.*



*Figur V4-25: Bruddet sett fra undersiden.*

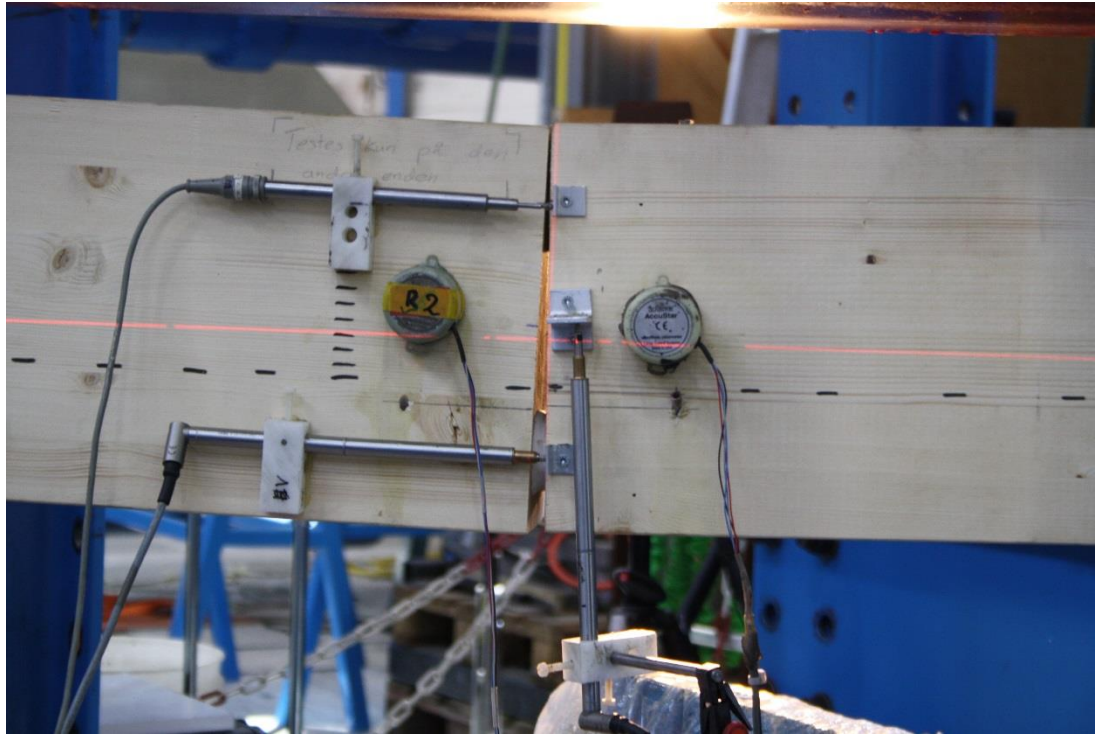
**BS-2B-1T-2**



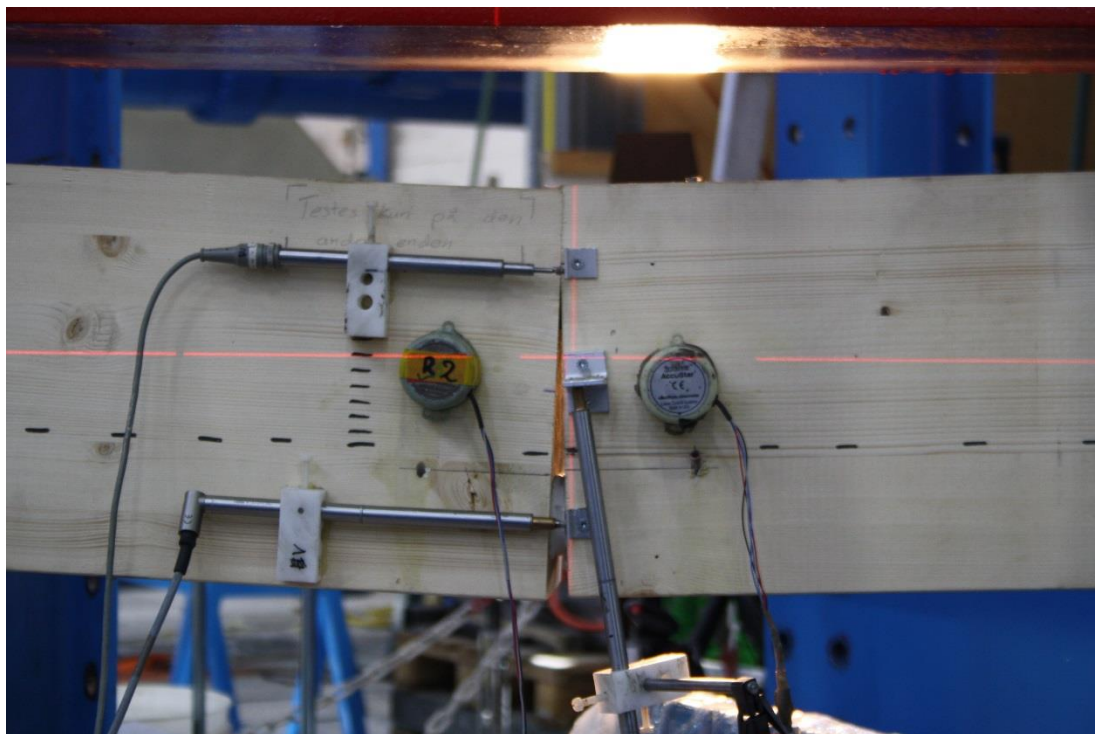
*Figur V4-26: Tydelig rotasjon etter brudd ved sammentrykking av skrue i topp.*



**BS-2B-1T-3**



*Figur V4-27: Rotasjon etter at brudd oppsto.*



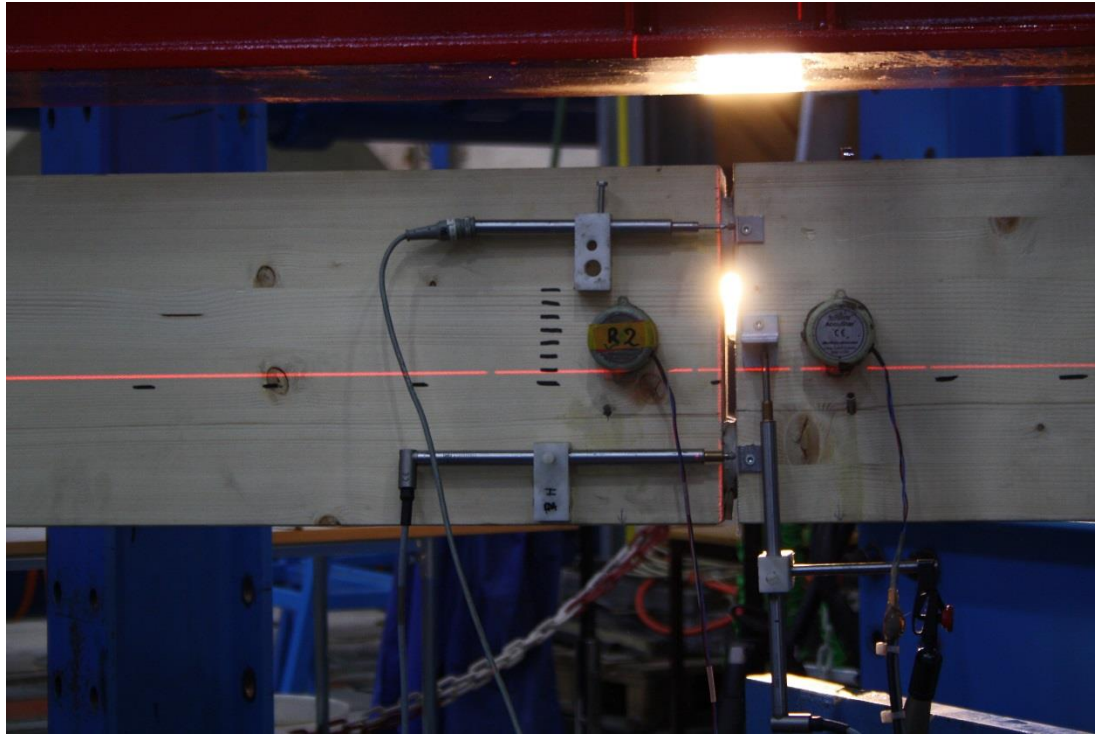
*Figur V4-28: Fortsatte pålasting etter førstebrudd. Her har rotasjonen økt så mye at man har fått kontakt mellom treet i toppen.*





*Figur V4-29: Etter betydelig opptak av moment, kollapset bjelken. I det den kollapset oppstod splitting langs gjengestagene. Tilsvarende de andre splittingene, men på grunn av skruer i begge ender av bjelkeenden kan dette ha forårsaket at splitten delte hele bjelken.*

**BS-2B-2T-1**



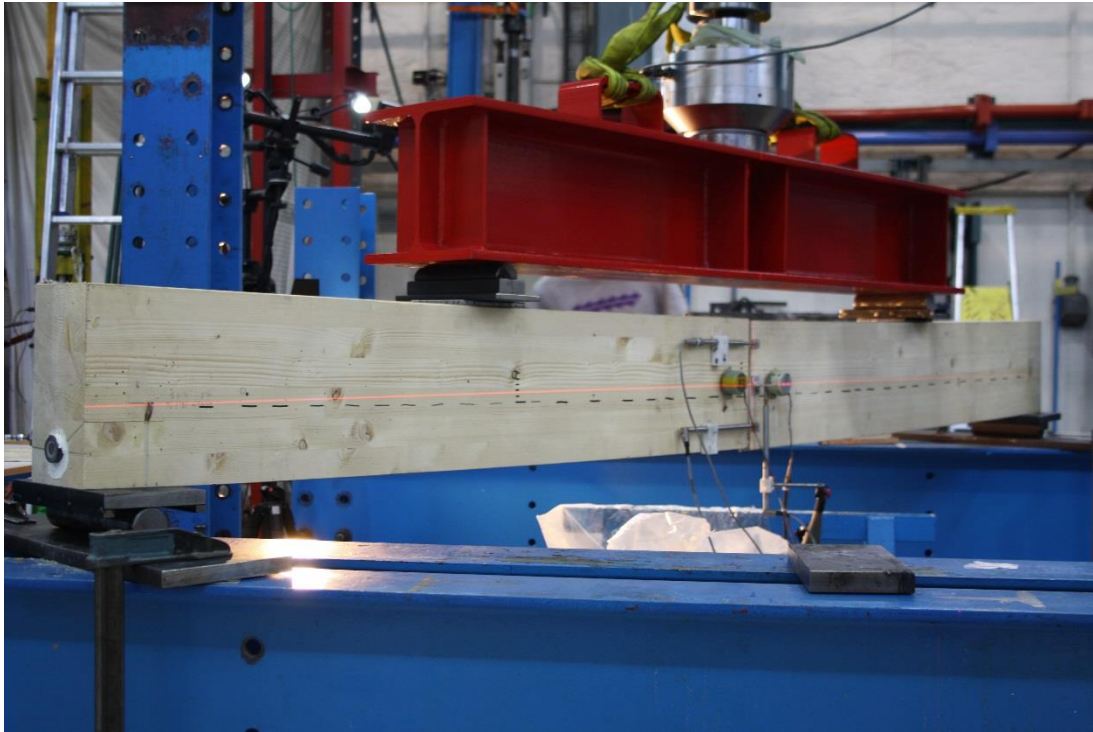
*Figur V4-30: La på en laservater og tegnet på streker med 10mm opprom. På denne måten kunne vi bedre registrere nedbøyning visuelt ved testing.*



*Figur V4-31: Rotasjon ved brudd. Oppsprekking i fibre langs gjengestag i topp.*



**BS-2B-2T-2**



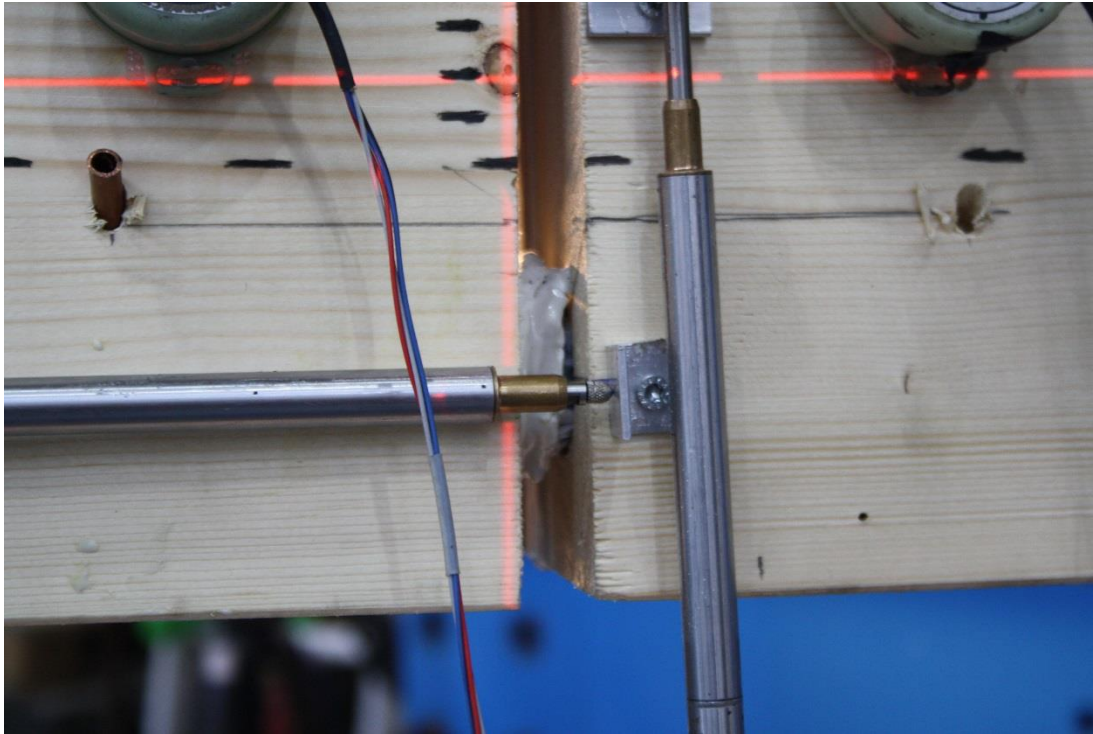
*Figur V4-32: De svarte strekene viser hvordan bjelken bøyer seg ved en nedbøyning i senter på ca. 25mm.*



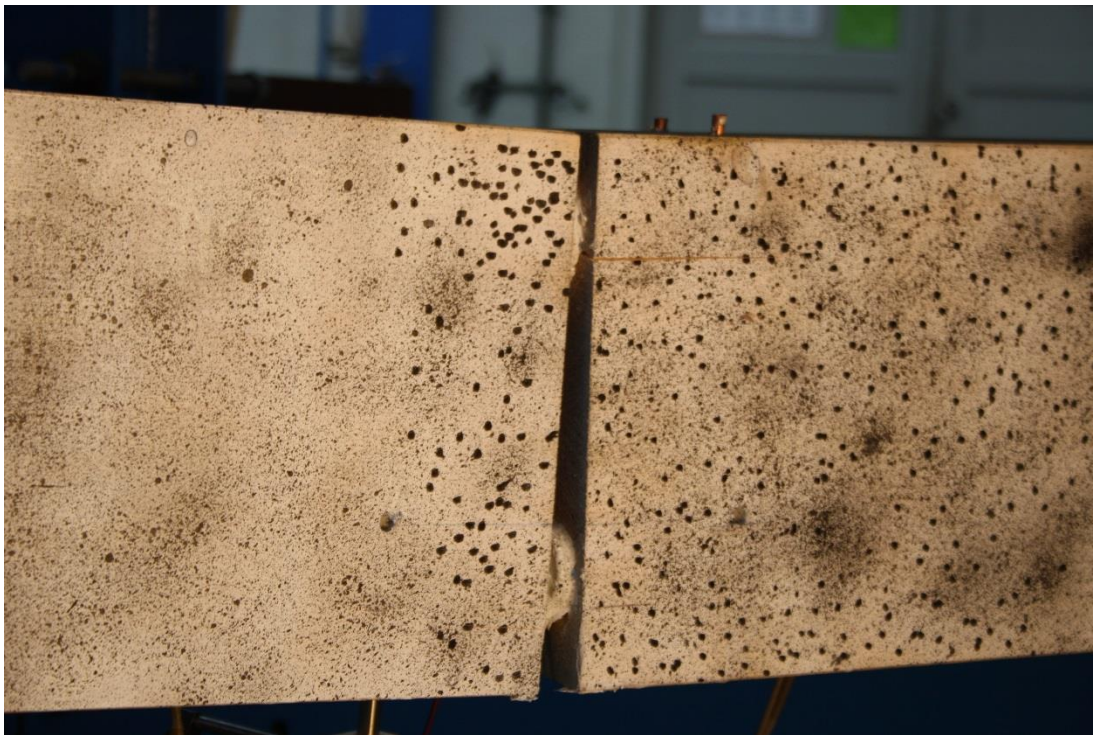
*Figur V4-33: Sprekk langs fibre i topp i samme høyde som gjengestagene etter at brudd oppsto.*



**BS-2B-2T-3**

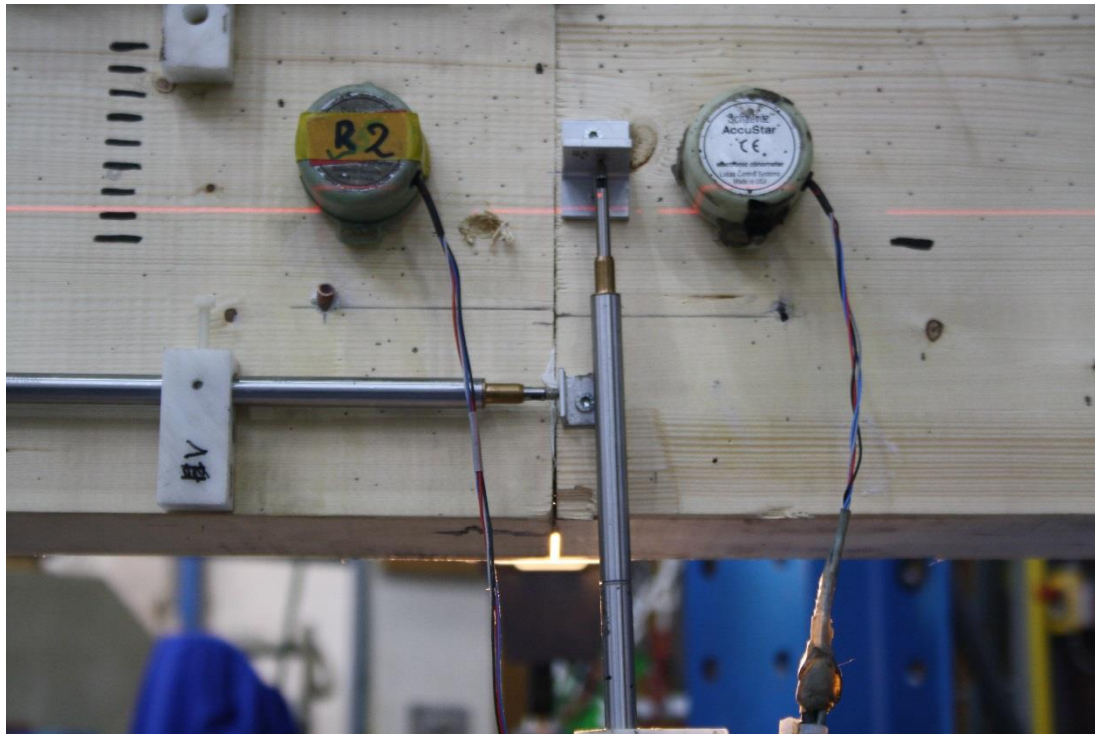


*Figur V4-34: Tydelig tegn på forskyvning i hylseforbindelsen.*



*Figur V4-35: Splitting langs fibre i topp i samme høyde som gjengestaget.*

BS-2B-1



Figur V4-36: Synlig sprekk i underkant ved 12-13mm nedbøyning av bjelken.



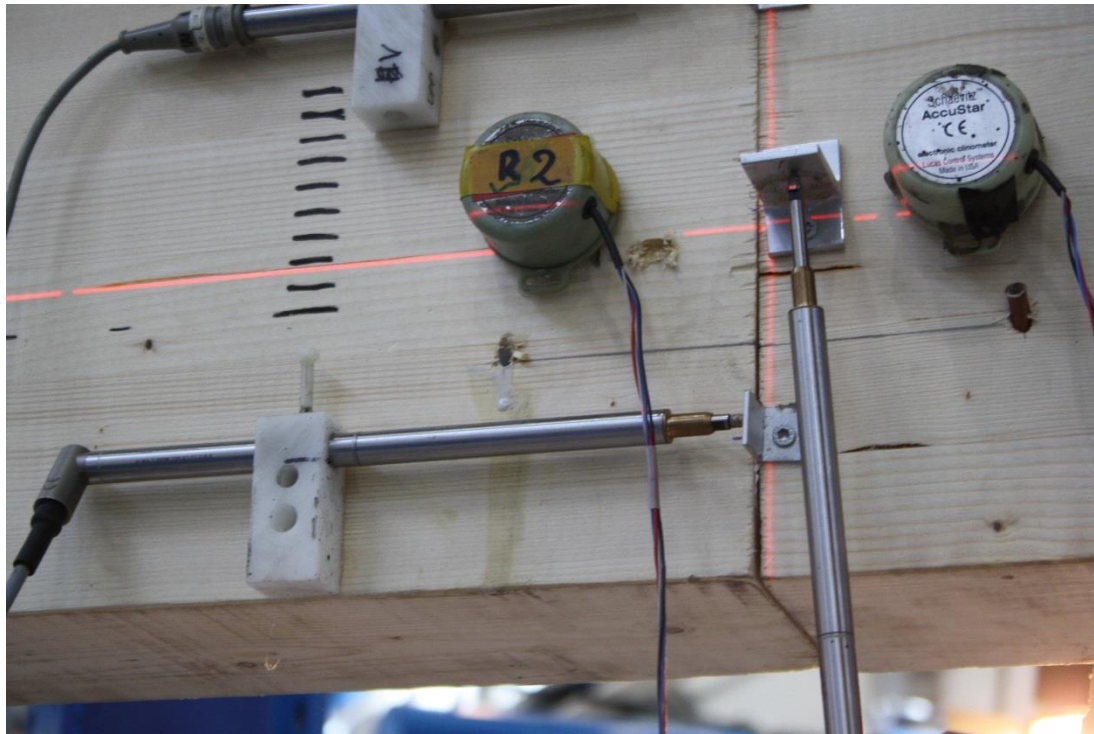
Figur V4-37: Størrelse på sprekken etter brudd.



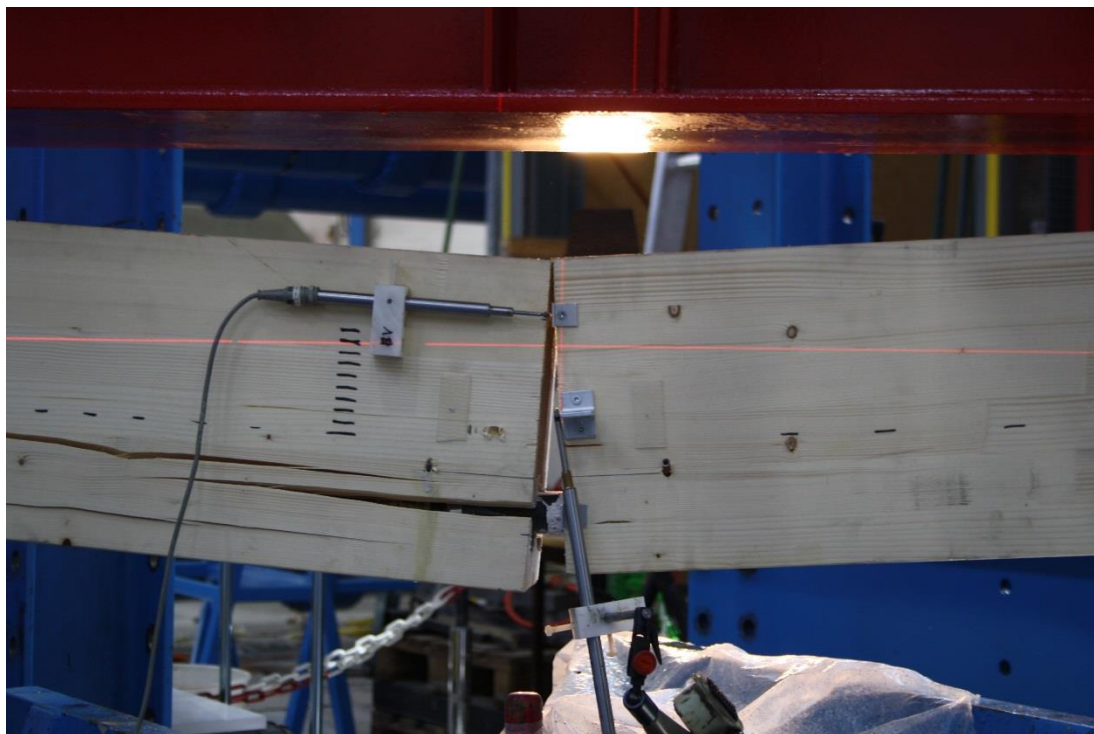


*Figur V4-38: Sammenpressing i toppen.*

BS-2B-2



Figur V4-39: Glipp i skjøten etter ca. 18mm nedbøyning.



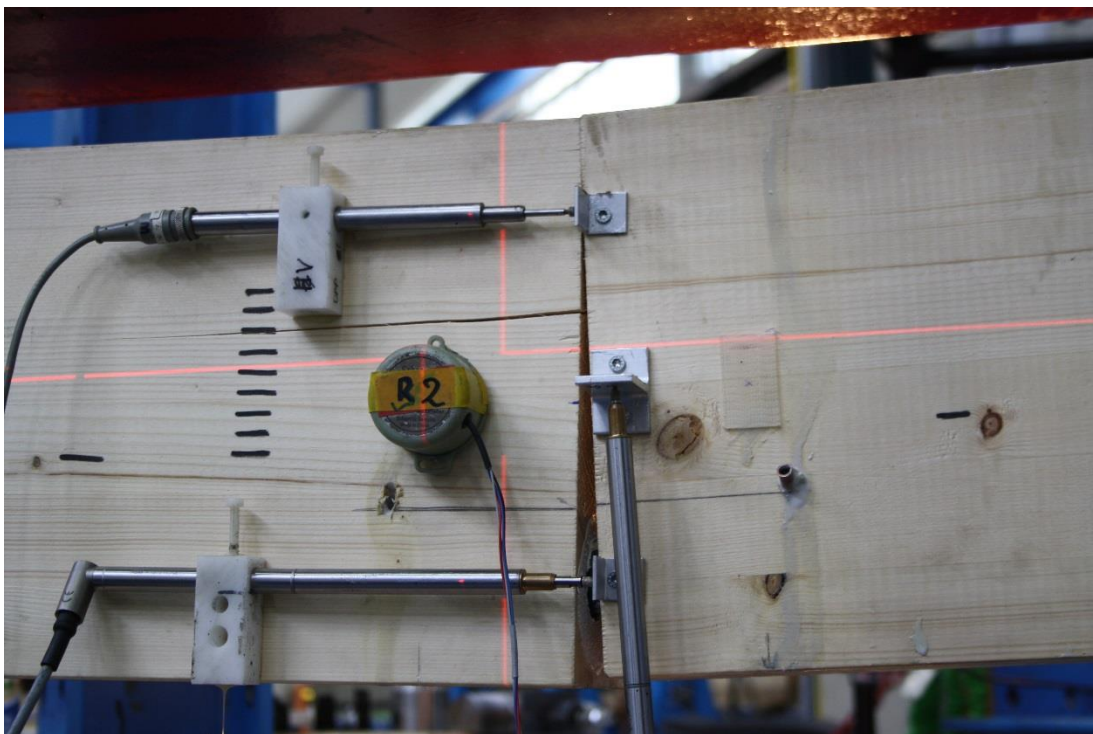
Figur V4-40: Bjelken kollapset ved brudd og splitting langs fibre oppstod langs gjengestaget.



**BS-2B-3**



*Figur V4-41: Sprekk i skjøten ved ca. 20mm nedbøyning av bjelken.*



*Figur V4-42: Etter at bjelken kollapset. Legg merke til splitting mellom fibre mellom rotasjonsmåler og horisontalmåler.*

#### **V4.2 Bruddårsak i bjelkeskjøtene**

I dette kapitlet er bruddårsak til hver av bjelkeskjøtene dokumentert med bilde. For mer informasjon om bruddårsak, se kapittel 5.8.2 i rapporten.



**BS-1B-1**



**BS-1B-2**





**BS-1B-3**



**BS-1B-1T-1**





**BS-1B-1T-2**



**BS-1B-1T-3**

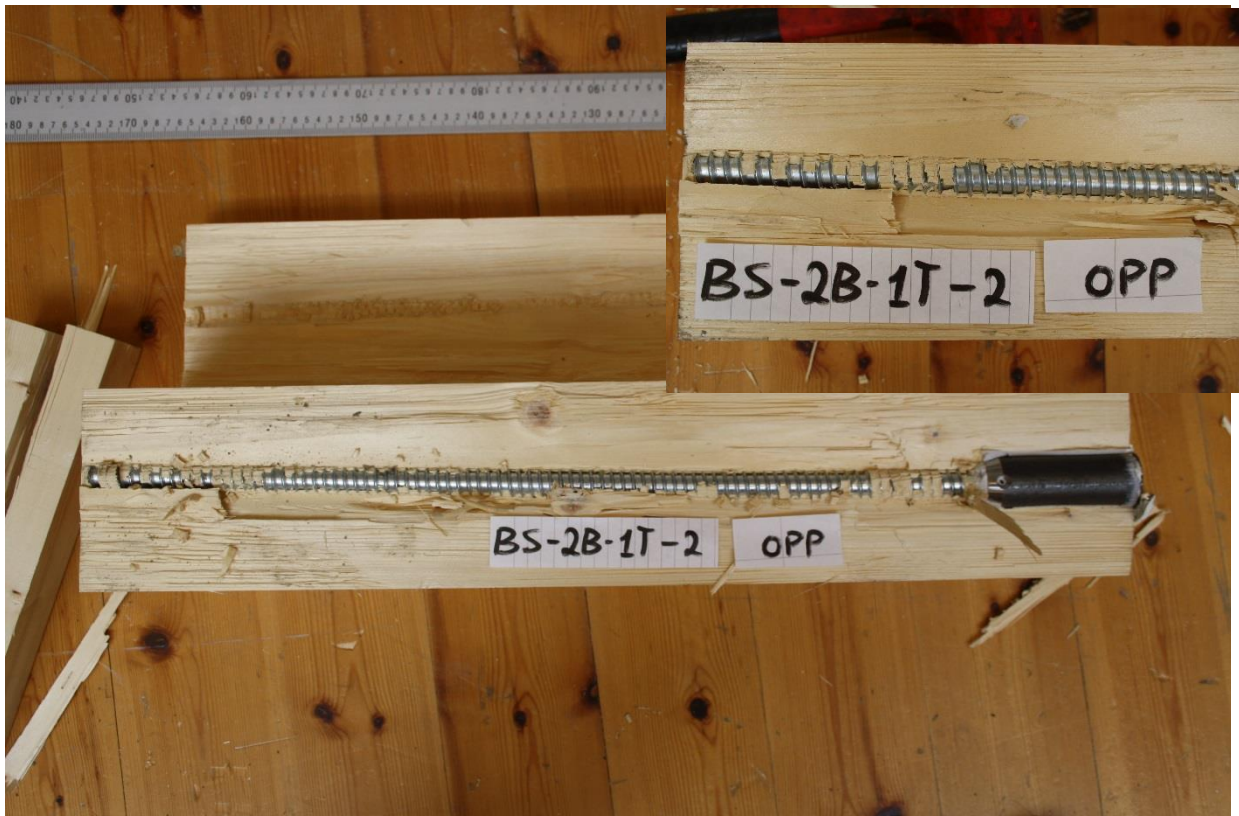




**BS-2B-1T-1**



**BS-2B-1T-2**

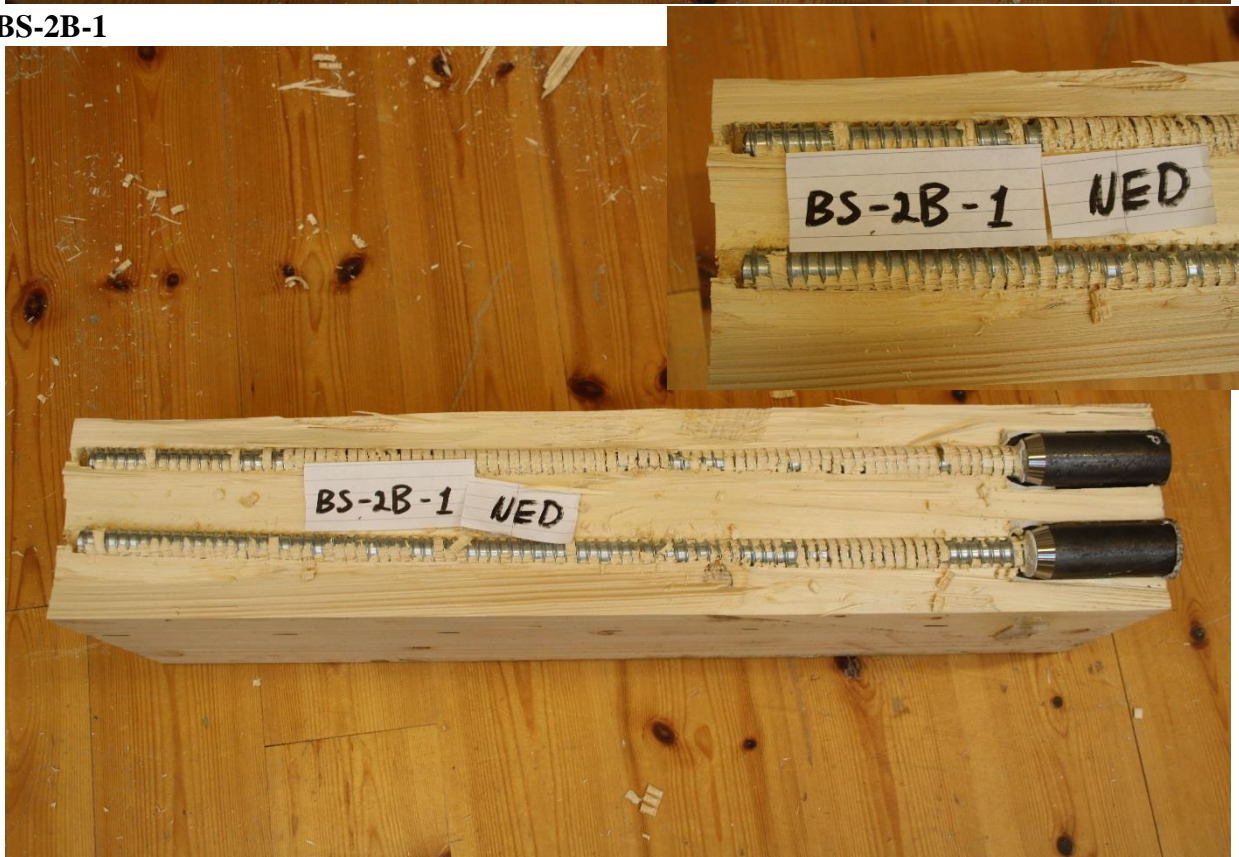




**BS-2B-1T-3**



**BS-2B-1**





**BS-2B-2**



**BS-2B-3**



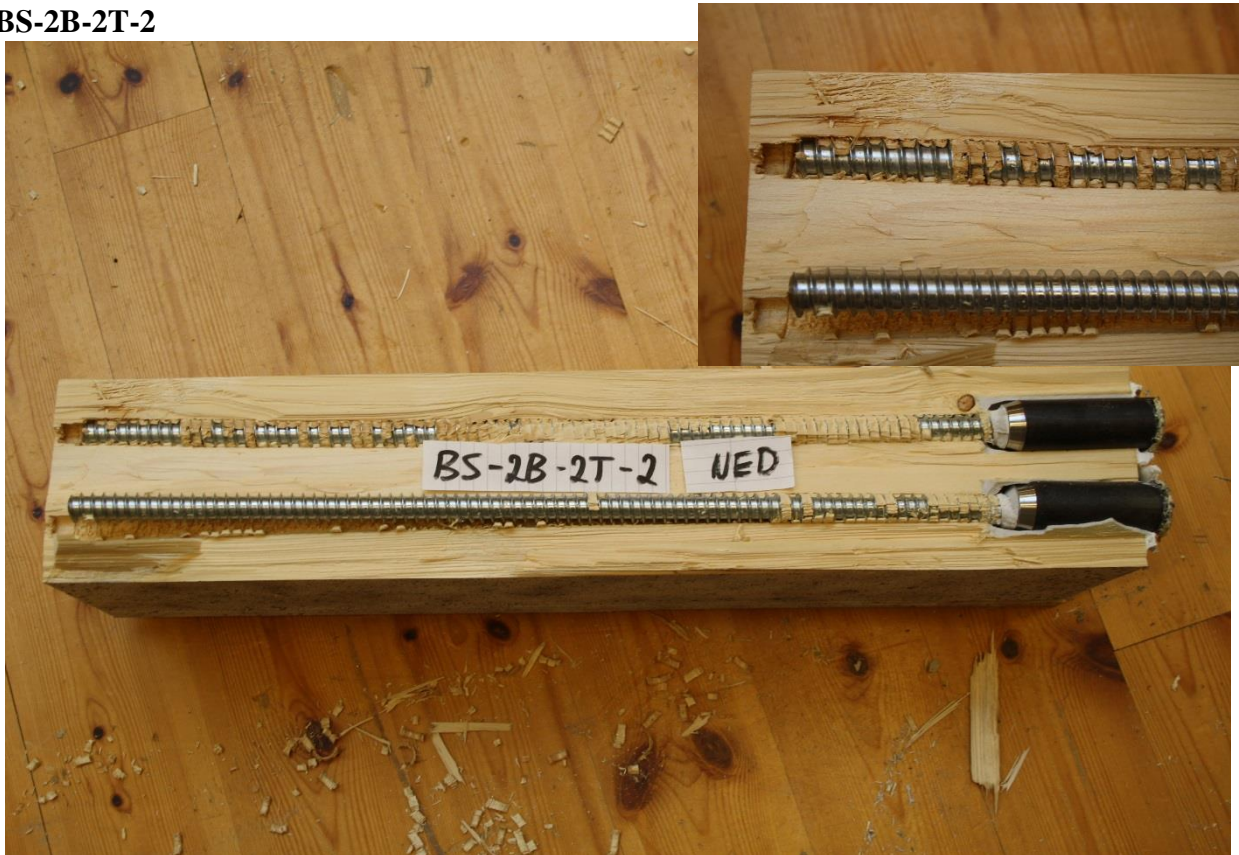


**BS-2B-2T-1**

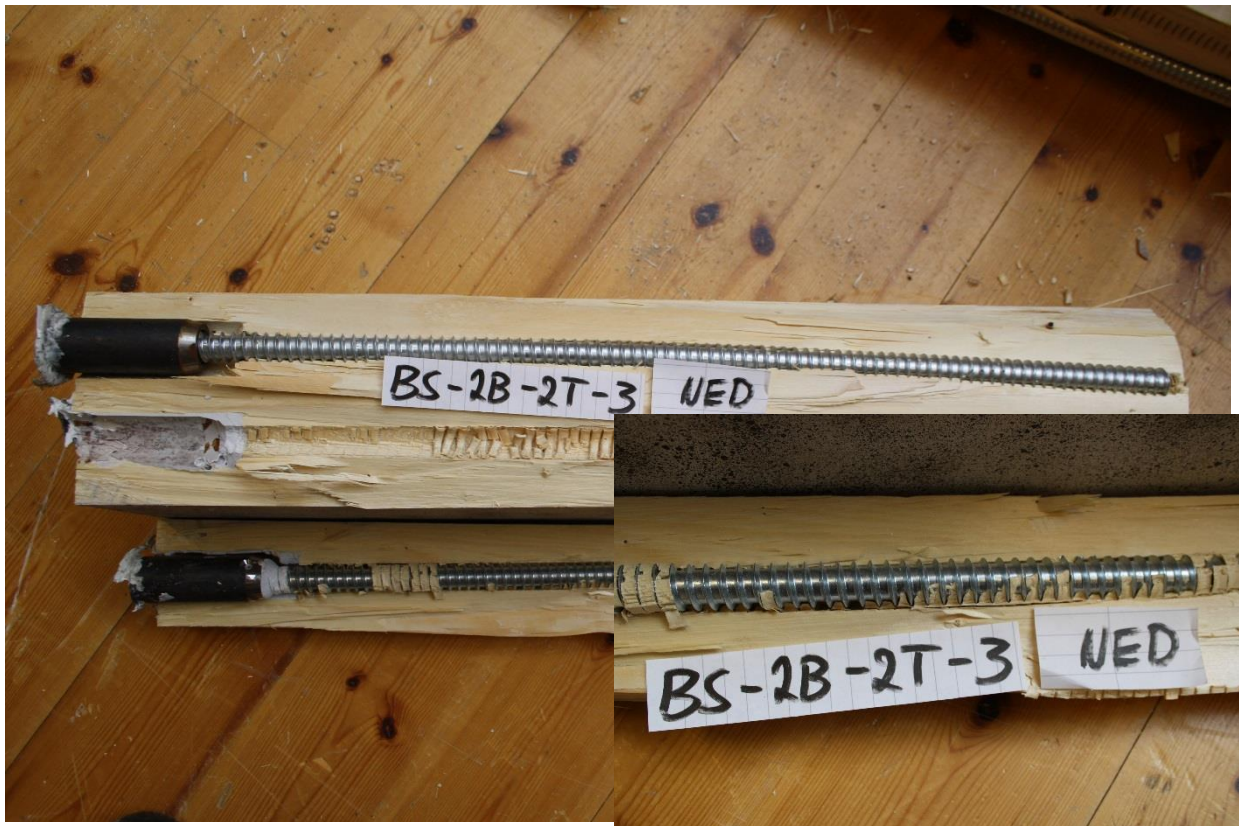




**BS-2B-2T-2**



**BS-2B-2T-3**



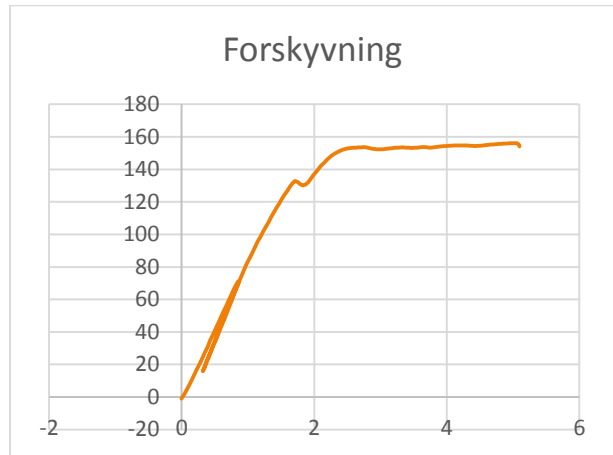
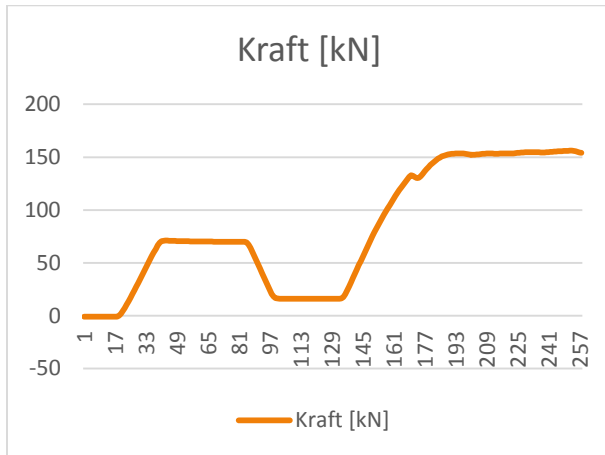




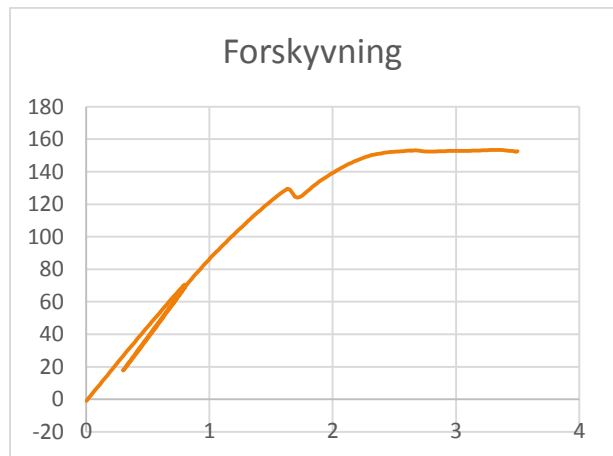
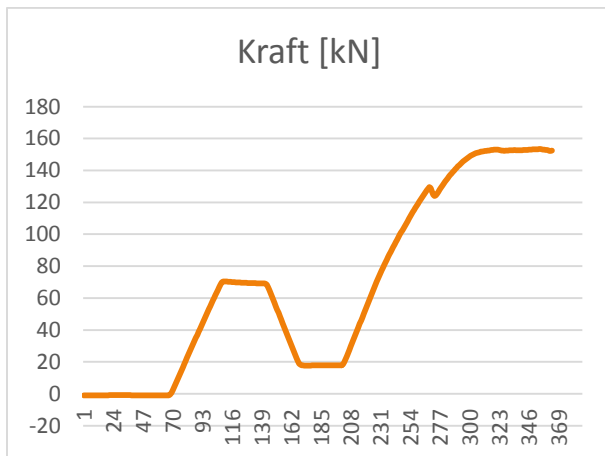
## VEDLEGG 5 - RESULTATER

### V.5.1 Strekktester

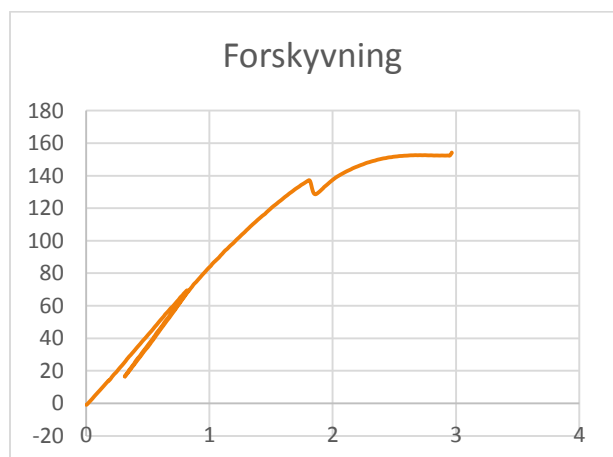
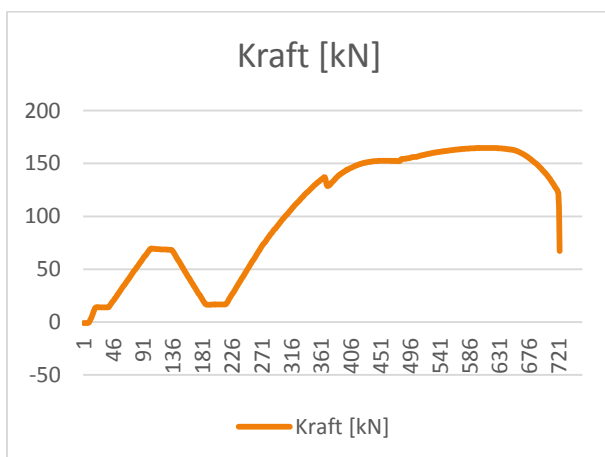
#### Test 1



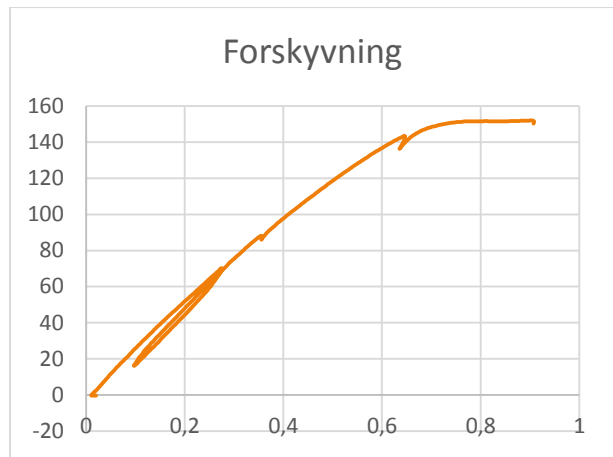
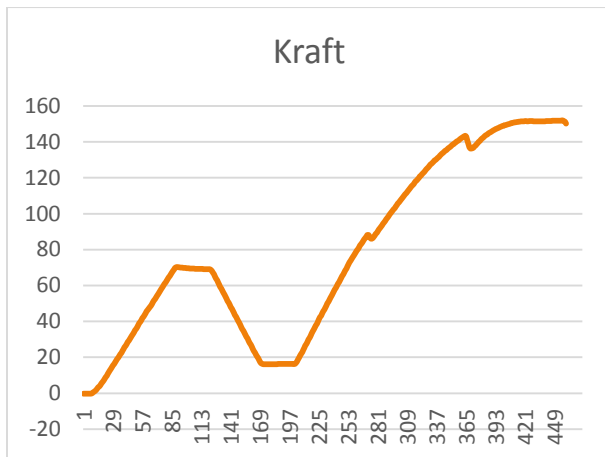
#### Test 2



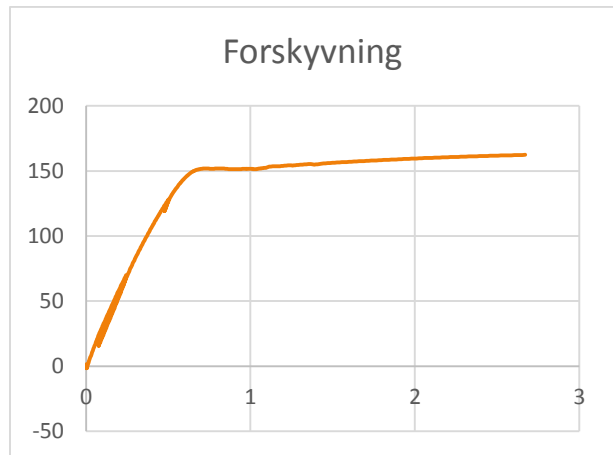
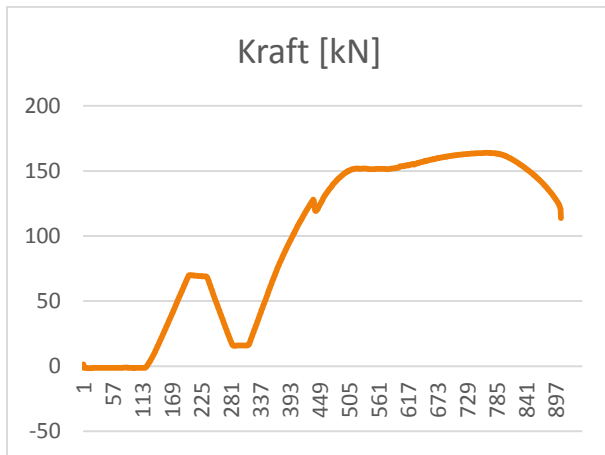
#### Test 3



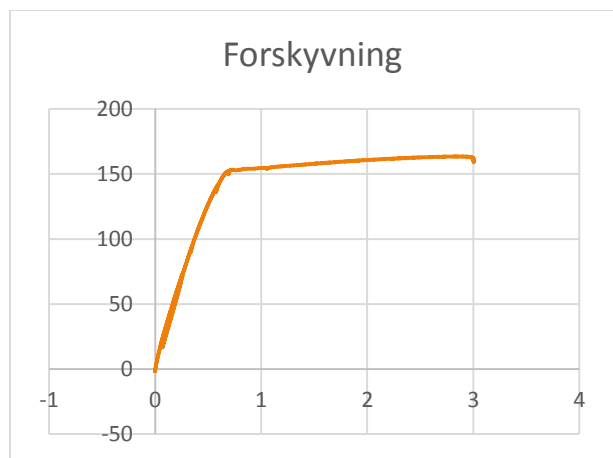
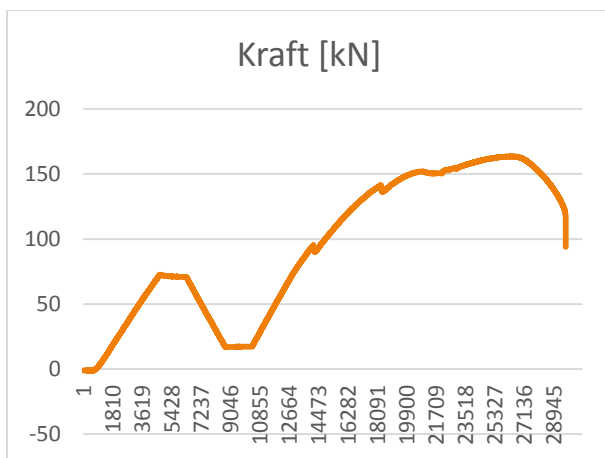
**Test 4**



**Test 5**

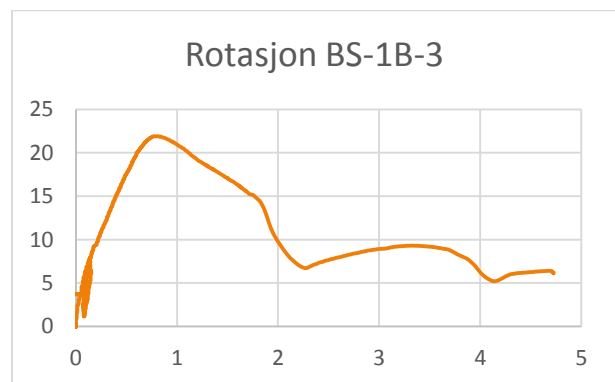
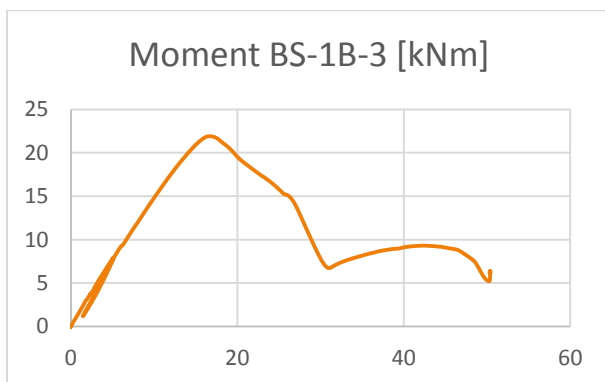
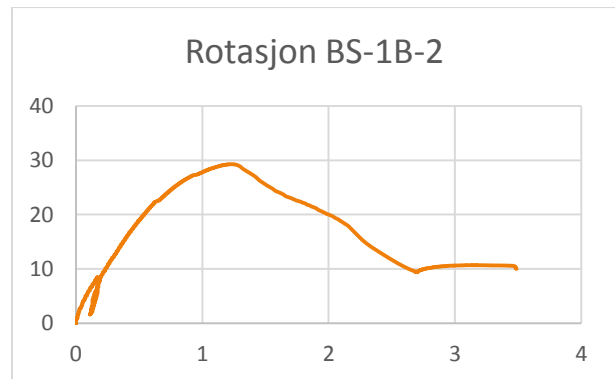
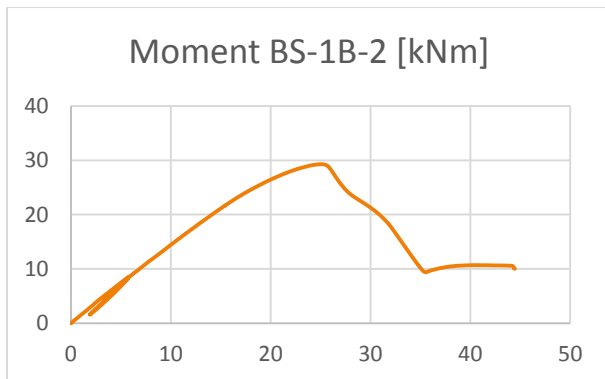
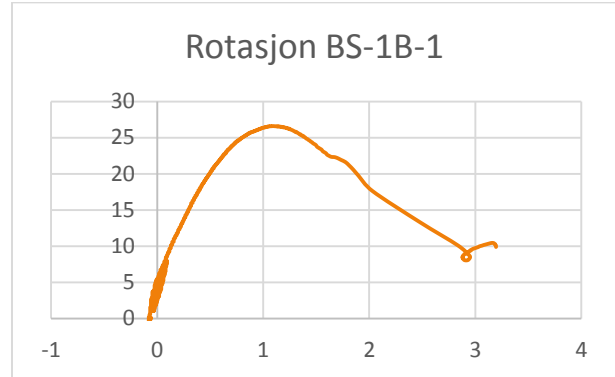
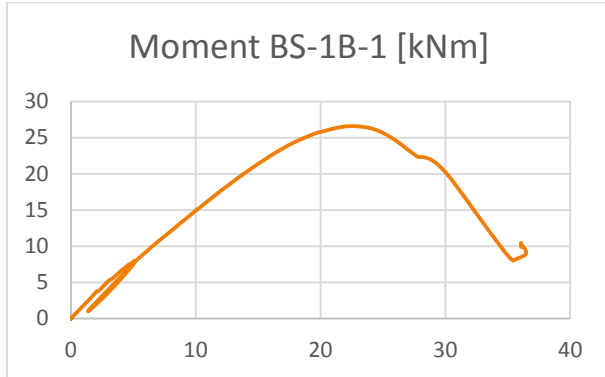


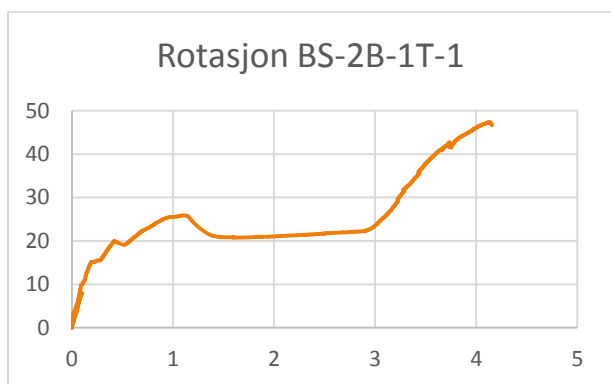
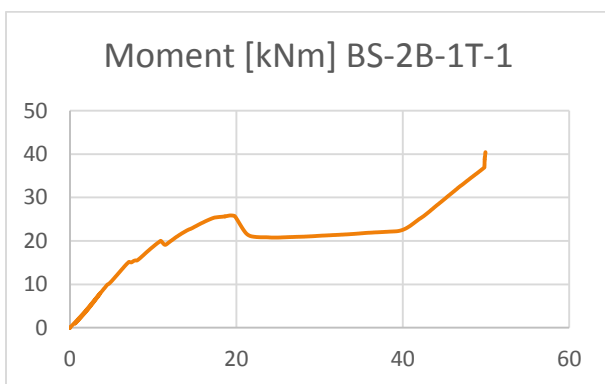
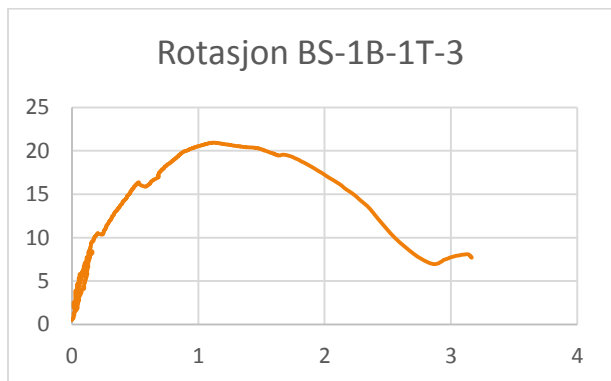
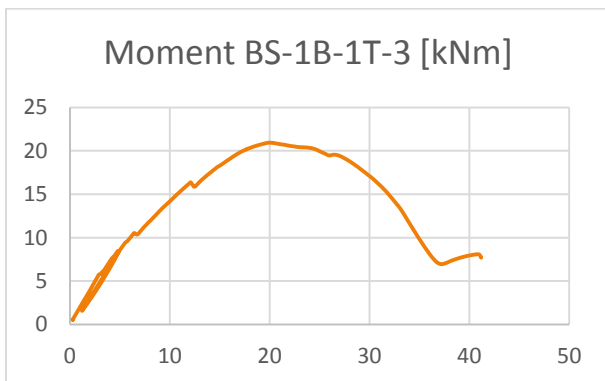
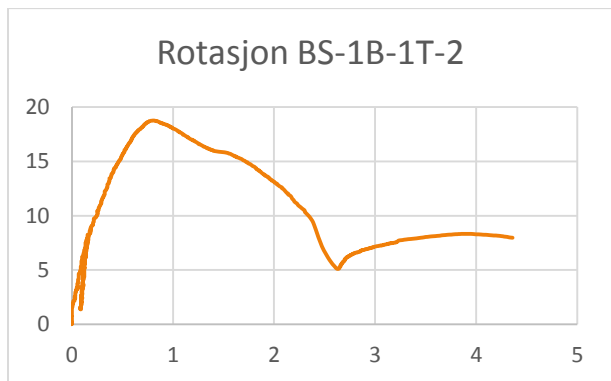
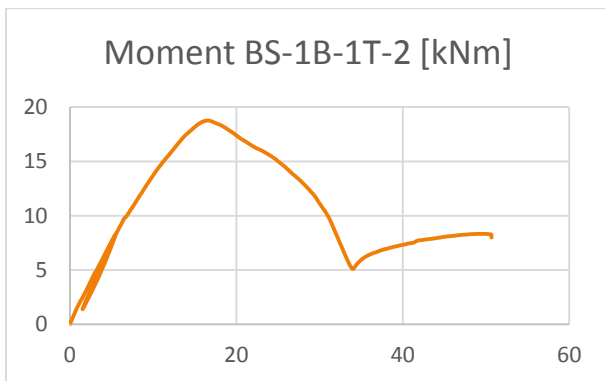
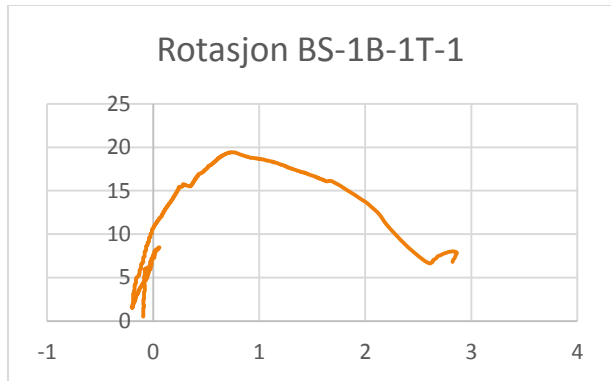
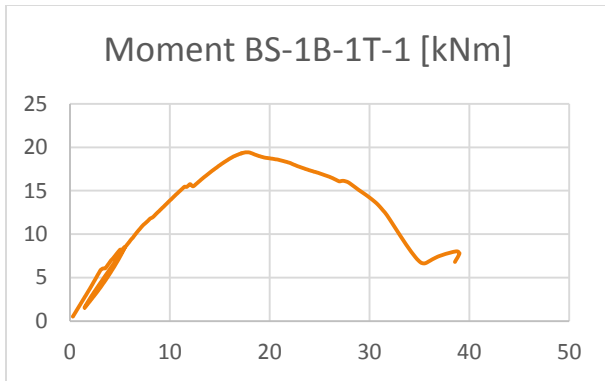
**Test 6**



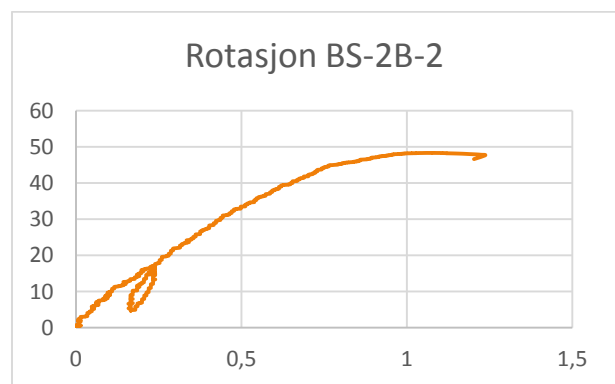
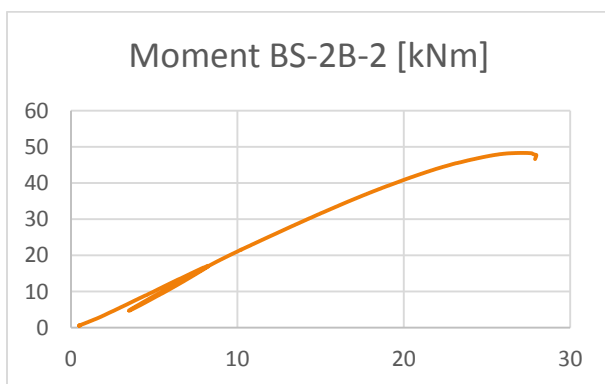
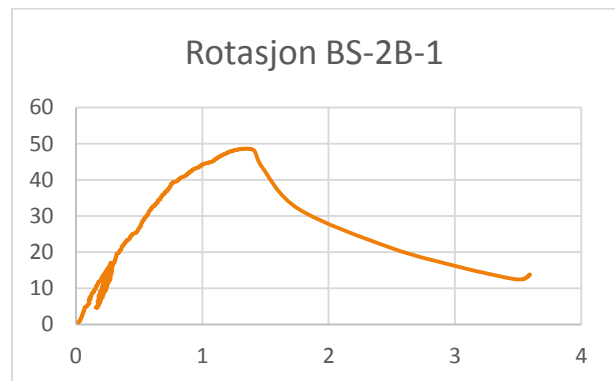
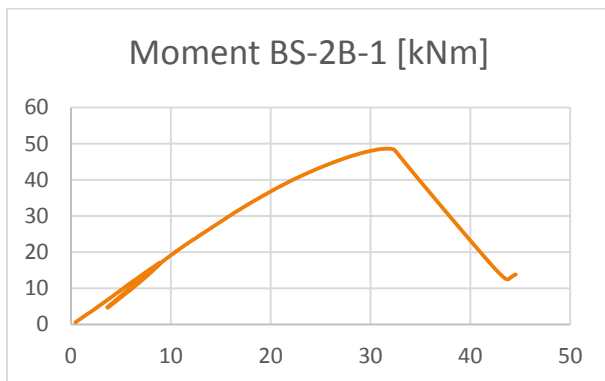
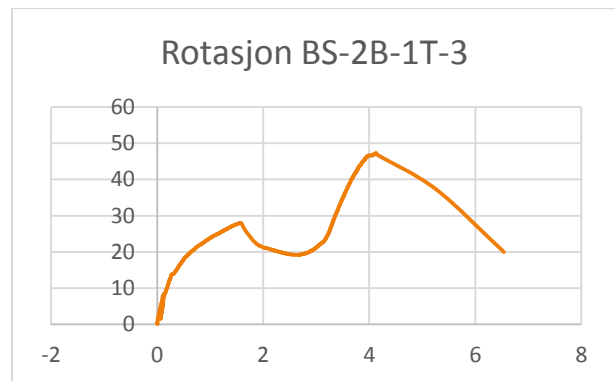
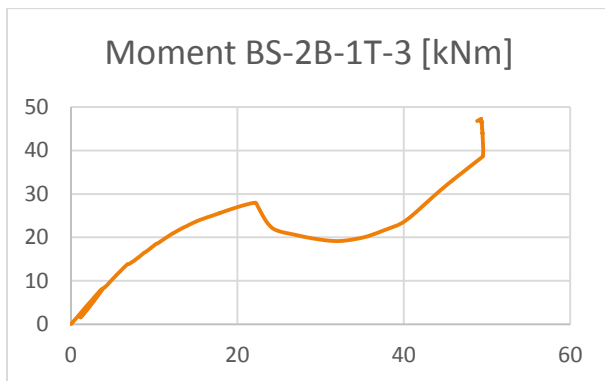
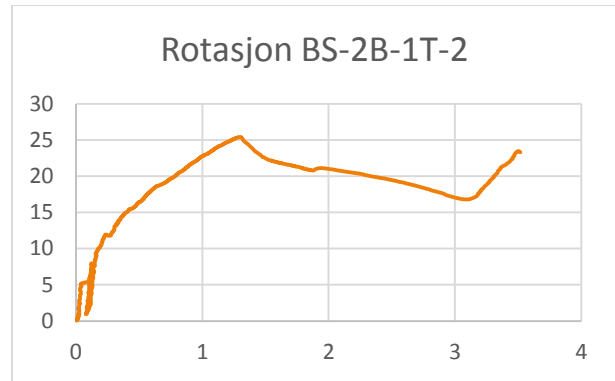
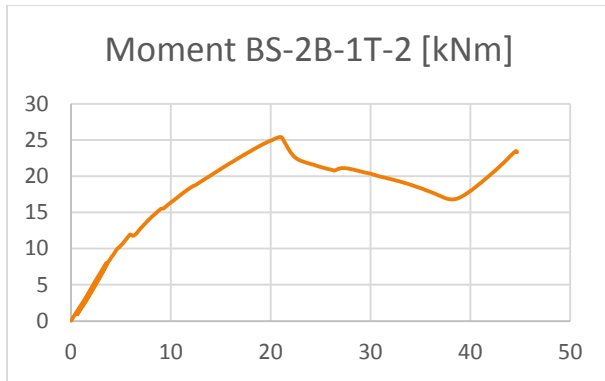
### V.5.2 Bjelkeskjøter

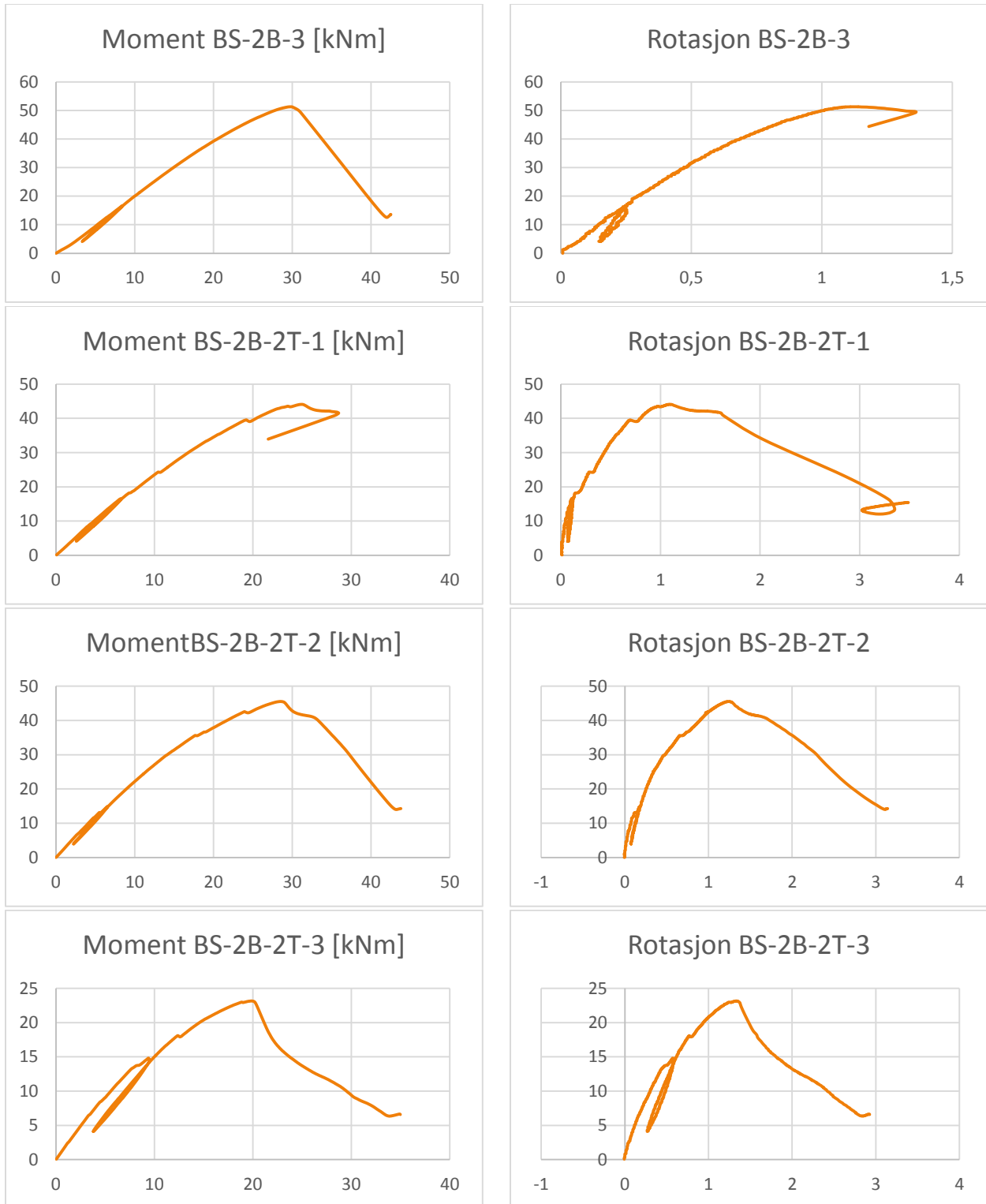
Samtlige diagram på venstre side viser momentforløpet (y-aksen) i forhold til nedbøyningen på bjelken (x-aksen) til hver enkelt bjelkeskjøt. Diagrammene på høyre side viser rotasjonen (x-aksen) i forhold til momentforløpet (y-aksen) i bjelkeskjøtene.











Test BS-2B-2T-3 måtte forkastes da det ble hadde blitt glemt å gyse lim i den ene hylsen i bunn. Dette medførte at kun den ene hylsen hadde kapasitet til å ta opp krefter noe som fremkommer av gitte grafer. Oppnådd kapasitet var ca. halvparten av de andre tilsvarende tester.

## VEDLEGG 6 - DENSITET OG FUKTINHOLD

Densitet og fuktinnhold til treet som blir benyttet i forsøkene blir fastsatt i henhold til formlene gitt i ISO 13061-1 [29] og ISO 13061-2 [30].

### V6.1 Bestemme densitet og fuktinnhold

Fuktinnhold beregnes etter formel V6.1 i henhold til ISO 13061-1, punkt 8.1

$$W = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \quad \text{Formel V6.1}$$

Der:

$m_0$  er masse til prøvestykket før tørking [gram]

$m_1$  er masse til prøvestykket etter tørking [gram]

Klimatisert densitet beregnes etter formel V6.2 i henhold til ISO 13061-2, punkt 8.1

$$\rho_w = \frac{m_w}{a_w \times b_w \times l_w} \quad \text{Formel V6.2}$$

Der:

$a_w$  og  $b_w$  er størrelsen på sidekantene på klimatisert prøvestykke [mm]

$l_w$  er lengden til klimatisert prøvestykke [mm]

Tørr densitet beregnes etter formel V6.3 i henhold til ISO 13061-2, punkt 8.2

$$\rho_0 = \frac{m_0}{a_0 \times b_0 \times l_0} \quad \text{Formel V6.3}$$

Der:

$a_0$  og  $b_0$  er størrelsen på sidekantene på tørr prøve [mm]

$l_0$  er lengden til tørr prøve [mm]

## V6.2 Densitet

Tabellen under viser densiteten til de forskjellige bjelkeskjøtene i klimatisert tilstand.

Bjelkeskjøt	Densitet overkant		Densitet underkant		Prøve I.D.
	[kg/m <sup>3</sup> ]		[kg/m <sup>3</sup> ]		
	Del 1	Del 2	Del 1	Del 2	
BS-1B-1	461,34	478,25	427,64	463,30	1 og 2
BS-1B-2	424,26	452,26	412,56	406,59	3 og 4
BS-1B-3	424,79	440,35	393,63	435,12	5 og 6
BS-1B-1T-1	483,27	394,50	454,04	388,03	7 og 8
BS-1B-1T-2	417,40	472,02	502,11	453,90	11 og 12
BS-1B-1T-3	475,23	422,00	429,10	410,31	9 og 10
BS-2B-1T-1	560,79	501,89	458,83	407,63	13 og 14
BS-2B-1T-2	446,19	450,96	419,79	438,07	15 og 16
BS-2B-1T-3	446,19	450,96	419,79	438,07	15 og 16
BS-2B-1	475,23	422,00	429,10	410,31	9 og 10
BS-2B-2	483,27	394,50	454,04	388,03	7 og 8
BS-2B-3	424,79	440,35	393,63	435,12	5 og 6
BS-2B-2T-1	417,40	472,02	502,11	453,90	11 og 12
BS-2B-2T-2	424,26	452,26	412,56	406,59	3 og 4
BS-2B-2T-3	461,34	478,25	427,64	463,30	1 og 2

Prøvestykke 16-U ble ikke tatt ut i samme snitt som de andre på grunn av splitting i uttaksområde. Prøven er derfor tatt ut ca. 25mm høyere opp i tverrsnittet.

Prøvestykke 7-U er tatt ut i ytterkant av lamellen på grunn av splitting i årringene i uttaksområde.



Tabellen under viser densitet til prøvestykkene i klimatisert tilstand, altså densitet ved testing av bjelkeskjøtene.

	<b>bredde</b>	<b>høyde</b>	<b>lengde</b>	<b>vekt</b>	<b>densitet</b>
<b>Prøvestykke</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[gram]</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>
1-U	26,4	30,2	29,3	9,99	427,648544
2-U	27	30,1	29,4	11,07	463,308247
3-U	26,3	29,7	29,2	9,41	412,567083
4-U	26,7	30	29,2	9,51	406,597917
5-U	27,4	30,1	29,2	10,23	424,791408
6-U	26,3	30	29,3	10,18	440,355226
7-U	26,5	30,7	29,4	10,86	454,044318
8-U	26,1	30,7	29,3	9,11	388,03587
9-U	26,7	29,7	29,3	9,97	429,101297
10-U	26,2	30,7	29,3	9,67	410,316694
11-U	26,6	31,4	29,4	12,33	502,116464
12-U	26,6	27,9	29,3	9,87	453,903668
13-U	27,3	28,8	29,3	10,57	458,83045
14-U	27	29	29,2	9,32	407,634843
15-U	26,5	30,2	29,2	9,81	419,791208
16-U	26,3	29,1	29,2	9,79	438,077656
<b>Gjennomsnittlig densitet lamell underkant:</b>					<b>433,570056</b>
1-O	26,6	27,7	29,3	9,96	461,349774
2-O	26,2	28,3	29,3	10,39	478,25575
3-O	24,7	29,8	29,3	9,15	424,26798
4-O	26,4	30,5	29,3	10,67	452,265055
5-O	26,1	30,1	29,2	9,03	393,638797
6-O	26,6	29,9	29,3	10,14	435,12848
7-O	26,6	28,7	29,3	10,81	483,275235
8-O	26,5	29,9	29,4	9,19	394,503734
9-O	26,4	28,4	29,3	10,44	475,2374
10-O	26,6	28,8	29,2	9,44	422,002495
11-O	26	29,6	29,2	9,38	417,402387
12-O	26,4	28,1	29,3	10,26	472,029883
13-O	26,4	29,3	29,3	12,71	560,797906
14-O	26,4	28,7	29,4	11,18	501,890124
15-O	26,2	29,5	29,2	10,07	446,193574
16-O	26,5	28,8	29,2	10,05	450,967089
<b>Gjennomsnittlig densitet lamell overkant:</b>					<b>454,325354</b>

Tabellen under viser densitet til prøvestykkene i tørr tilstand, altså densitet etter tørking i varmeskap i 72 timer.

	<b>bredde</b>	<b>høyde</b>	<b>lengde</b>	<b>vekt</b>	<b>densitet</b>
<b>Prøvestykke</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[mm]</b>	<b>[gram]</b>	<b>[kg/m<sup>3</sup>]</b>
1.U	25,4	29,6	29,6	8,71	391,382151
2.U	25,9	29,4	29,4	9,77	436,415472
3.U	25,4	29,2	29,2	8,44	389,711325
4.U	25,9	29,5	29,1	8,46	380,500817
5.U	25,3	29,4	29,2	9,02	415,29417
6.U	25,2	29,3	29,2	9	417,437535
7.U	25,7	29,9	29,3	9,7	430,823914
8.U	24,5	30,3	29,2	8,04	370,906534
9.U	25,6	28,8	29,1	8,84	412,028088
10.U	25,2	30,1	29,3	8,64	388,757773
11.U	25,3	30,3	29,3	10,9	485,283726
12.U	25,2	27,2	29,3	8,67	431,699984
13.U	26,1	28	29,2	9,29	435,345765
14.U	25,8	28,3	29,2	8,23	386,020921
15.U	25,5	29,6	29,2	8,68	393,826542
16.U	25,3	29	29,1	8,72	408,418096
<b>Gjennomsnittlig densitet lamell underkant:</b>					410,865801
1.O	26,6	29,2	29,3	8,84	388,436611
2.O	25,2	27,8	29,3	9,17	446,741583
3.O	24	29,2	29,2	8,05	393,386032
4.O	25,4	29,8	29,2	9,37	423,942307
5.O	25,2	28,6	29,2	7,99	379,662195
6.O	25,7	29,1	29,2	8,99	411,67143
7.O	25,4	27,8	29,3	9,48	458,207512
8.O	24,5	28,9	29,3	8,2	395,259489
9.O	25,1	27,7	29,2	9,19	452,667349
10.O	25,8	28,2	29,2	8,42	396,333174
11.O	25	28,8	29,2	8,3	394,78691
12.O	25,3	27,2	29,3	9,09	450,823802
13.O	25,4	27,9	29,3	11,16	537,475478
14.O	25,2	28	29,3	9,76	472,088722
15.O	25	28,9	29,1	8,88	422,359362
16.O	25,5	27,6	29,2	8,91	433,556389
<b>Gjennomsnittlig densitet lamell overkant:</b>					428,587397

### V6.3 Fuktinnhold

Tabellen under viser fuktinnholdet til hvert prøvestykke basert på vekt i klimatisert og tørr tilstand.

Prøvestykke	Vekt klimatisert	Vekt tørr	Fuktinnhold
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]
1.U	9,99	8,71	12,81281281
2.U	11,07	9,77	11,74345077
3.U	9,41	8,44	10,30818278
4.U	9,51	8,46	11,04100946
5.U	10,23	9,02	11,82795699
6.U	10,18	9	11,5913556
7.U	10,86	9,7	10,68139963
8.U	9,11	8,04	11,7453348
9.U	9,97	8,84	11,33400201
10.U	9,67	8,64	10,65149948
11.U	12,33	10,9	11,59772912
12.U	9,87	8,67	12,15805471
13.U	10,57	9,29	12,10974456
14.U	9,32	8,23	11,69527897
15.U	9,81	8,68	11,51885831
16.U	9,79	8,72	10,92951992
<b>Gjennomsnittlig fuktinnhold lamell underkant:</b>			11,48413687
1.O	9,96	8,84	11,24497992
2.O	10,39	9,17	11,74205967
3.O	9,15	8,05	12,02185792
4.O	10,67	9,37	12,1836926
5.O	9,03	7,99	11,51716501
6.O	10,14	8,99	11,34122288
7.O	10,81	9,48	12,30342276
8.O	9,19	8,2	10,77257889
9.O	10,44	9,19	11,97318008
10.O	9,44	8,42	10,80508475
11.O	9,38	8,3	11,51385928
12.O	10,26	9,09	11,40350877
13.O	12,71	11,16	12,19512195
14.O	11,18	9,76	12,70125224
15.O	10,07	8,88	11,81727905
16.O	10,05	8,91	11,34328358
<b>Gjennomsnittlig fuktinnhold lamell overkant:</b>			11,67997183





## VEDLEGG 7 – DIMENSJONERING

### V.7.1 Midlere verdier

#### V.7.1.1 Inndata

Karakteristiske verdier GL32c:

$$f_{mk} = 32 \text{ MPa}$$

$$f_{c0k} = 26,5 \text{ MPa}$$

$$f_{c90k} = 3,0 \text{ MPa}$$

$$f_{t0k} = 19,5 \text{ MPa}$$

$$f_{vk} = 3,2 \text{ MPa}$$

Karakteristiske verdier stål:

$$f_{yk,s} = 355 \text{ MPa}$$

$$f_{uk,s} = 500 \text{ MPa}$$

$$f_{yk,SFS} = 800 \text{ MPa}$$

**V.7.1.2 Midlere verdier tre**

Kovarianser for GL32c fra JSCC [17]:

$$COV_m = 0,15$$

$$COV_c = 0,15$$

$$COV_t = 0,18$$

$$COV_v = 0,15$$

Midlere bøyefasthet:

$$\xi_m = \sqrt{\ln(COV_m^2 + 1)} = 0,15$$

$$\lambda_m = \ln\left(\frac{f_{mk}}{MPa}\right) + 1,64\sqrt{\ln(COV_m^2 + 1)} = 3,71$$

$$f_{mm} = e^{\left(\lambda_m + \frac{\xi_m^2}{2}\right)} \times MPa = 41,326 MPa$$

Midlere trykkfasthet:

$$\xi_{c0} = \sqrt{\ln(COV_c^2 + 1)} = 0,15$$

$$\lambda_{c0} = \ln\left(\frac{f_{c0k}}{MPa}\right) + 1,64\sqrt{\ln(COV_c^2 + 1)} = 3,52$$

$$f_{c0m} = e^{\left(\lambda_{c0} + \frac{\xi_{c0}^2}{2}\right)} \times MPa = 34,223 MPa$$

$$\xi_{c90} = \sqrt{\ln(COV_c^2 + 1)} = 0,15$$

$$\lambda_{c90} = \ln\left(\frac{f_{c90k}}{MPa}\right) + 1,64\sqrt{\ln(COV_c^2 + 1)} = 1,34$$

$$f_{c90m} = e^{\left(\lambda_{c90} + \frac{\xi_{c90}^2}{2}\right)} \times MPa = 3,874 MPa$$

Midlere strekkfasthet:

$$\xi_{t0} = \sqrt{\ln(COV_t^2 + 1)} = 0,18$$

$$\lambda_{t0} = \ln\left(\frac{f_{t0k}}{MPa}\right) + 1,64\sqrt{\ln(COV_t^2 + 1)} = 3,26$$

$$f_{t0m} = e^{\left(\lambda_{t0} + \frac{\xi_{t0}^2}{2}\right)} \times MPa = 26,555 MPa$$

Midlere skjærfasthet:

$$\xi_v = \sqrt{\ln(COV_v^2 + 1)} = 0,15$$

$$\lambda_v = \ln\left(\frac{f_{vk}}{MPa}\right) + 1,64\sqrt{\ln(COV_v^2 + 1)} = 1,41$$

$$f_{vm} = e^{\left(\lambda_v + \frac{\xi_v^2}{2}\right)} \times MPa = 4,133 MPa$$

**V.7.1.3 Midlere verdier stål**

Kovarianser for stål fra JSCC [17]:

Konstruksjonsstål:  $COV_s = 0,07$ Høyfast stål:  $COV_{hfs} = 0,1$ 

Midlere flytespenning konstruksjonsstål:

$$\xi_{ys} = \sqrt{\ln(COV_s^2 + 1)} = 0,07$$

$$\lambda_{ys} = \ln\left(\frac{f_{yk,s}}{MPa}\right) + 1,64\sqrt{\ln(COV_s^2 + 1)} = 5,99$$

$$f_{ym,s} = e^{\left(\lambda_{ys} + \frac{\xi_{ys}^2}{2}\right)} \times MPa = 399,104 MPa$$

Midlere strekkfasthet konstruksjonsstål:

$$\xi_{us} = \sqrt{\ln(COV_s^2 + 1)} = 0,07$$

$$\lambda_{us} = \ln\left(\frac{f_{uk,s}}{MPa}\right) + 1,64\sqrt{\ln(COV_s^2 + 1)} = 6,33$$

$$f_{um,s} = e^{\left(\lambda_{us} + \frac{\xi_{us}^2}{2}\right)} \times MPa = 562,118 MPa$$

Midlere strekkfasthet høyfast stål:

$$\xi_{uhfs} = \sqrt{\ln(COV_{hfs}^2 + 1)} = 0,07$$

$$\lambda_{uhfs} = \ln\left(\frac{f_{uk,hfs}}{MPa}\right) + 1,64\sqrt{\ln(COV_{hfs}^2 + 1)} = 6,85$$

$$f_{um,hfs} = e^{\left(\lambda_{uhfs} + \frac{\xi_{uhfs}^2}{2}\right)} \times MPa = 946,886 MPa$$

Setter spørsmålsteget ved verdien til den midlere strekkfastheten til høyfast stål. Med en så høy verdi får gjengestagene en midlere kapasitet som overgår kapasiteten fra strekktestene i hylsa. Har valgt å benytte karakteristiske verdier i videre beregninger.



**V.7.2 Dimensjonering hylse**

Beregningene til hylsen er gjort i henholdt til kravene i EN 1993-1-1 [22]

**V.7.2.1 Inndata**

Karakteristiske verdier stål:

$$f_{yk,s} = 355 \text{ MPa}$$

$$f_{uk,s} = 500 \text{ MPa}$$

$$f_{yk,SFS} = 800 \text{ MPa}$$

Dimensjoner stålhylse:

$$\phi_y = 24 \text{ mm}$$

$$\phi_i = 21 \text{ mm}$$

$$\phi_{utrigning} = 10 \text{ mm}$$

$$\phi_{hull} = 5 \text{ mm}$$

$$l_{hylse} = 200 \text{ mm}$$

**V.7.2.2 Beregninger**

$$A_{hull} = \left( \left( \phi_{hull} \frac{(\phi_y - \phi_i)}{2} \right) + \left( \left( \frac{\phi_{utrigning}}{4} \right) \times \frac{(\phi_y - \phi_i)}{2} \right) \right) = 41,25 \text{ mm}^2$$

$$A_{brutto} = \left( \pi \left( \frac{(\phi_y)}{2} \right)^2 \right) - \left( \pi \left( \frac{(\phi_i)}{2} \right)^2 \right) = 509,723 \text{ mm}^2$$

$$A_{netto} = A_{brutto} - A_{hull} = 468,473 \text{ mm}^2$$

$$N_{brutto} = A_{brutto} - f_{ym} = 181,0 \text{ kNm}$$

$$N_{netto} = 0,9 \times A_{netto} - f_{ym} = 227,7 \text{ kNm}$$

Momentkapasitet:

$$W_p = \frac{4}{3} \times (r_y^3 - r_i^3) = 4842 \text{ mm}^3$$

$$W_e = \frac{\pi}{4 \times r_y} \times (r_y^4 - r_i^4) = 3279 \text{ mm}^3$$

$$M_p = f_{ym} \times W_p = 1,719 \text{ kNm}$$

$$M_e = f_{ym} \times W_e = 1,164 \text{ kNm}$$

Skjærkapasitet:

$$A_v = \frac{2 \times A_{netto}}{\pi} = 298,293 \text{ mm}^2$$

$$V_m = A_v \times \left( \frac{f_{ym}}{\sqrt{3}} \right) = 61,13 \text{ kN}$$

### V.7.2.3 Stivhetsberegninger

$$l_{SFS} = 200 \text{ mm}$$

$$E_{hylse} = 210000 \text{ N/mm}^2$$

$$E_{SFS} = 210000 \text{ N/mm}^2$$

$$\phi_{SFS} = 15 \text{ mm}$$

$$A_{SFS} = \pi \times \left( \frac{\phi_{SFS}}{2} \right)^2 = 176,715 \text{ mm}^2$$

$$k_{hylse} = E_{hylse} \times \frac{A_{brutto}}{l_{hylse}} = 535200 \text{ kN/mm}$$

$$k_{SFS} = E_{SFS} \times \frac{A_{brutto}}{l_{SFS}} = 185600 \text{ kN/mm}$$

### V.7.3 Dimensjonering bjelkeskjøt

#### V.7.3.1 Inndata

Tre:

$$b = 140 \text{ mm}$$

$$h = 270 \text{ mm}$$

$$f_{mm} = 41,326 \text{ MPa}$$

$$f_{com} = 34,223 \text{ MPa}$$

$$\delta = 430 \text{ kg/m}^3$$

$$k_{cr} = 0,67$$

Stål:

$$f_{ym,s} = 399,104 \text{ MPa}$$

$$f_{um,s} = 562,118 \text{ MPa}$$

$$f_{um,hfs} = 946,886 \text{ MPa}$$

$$f_{SFS} = 946,886 \text{ MPa}$$

$$E_s = 210000 \text{ MPa}$$

Uttrekk:

$$\lambda = 1$$

$$\alpha = 0^\circ$$

$$d_y = 20 \text{ mm}$$

$$d_i = 15 \text{ mm}$$

$$A_s = 176,72 \text{ mm}^2$$

$$l = 600 \text{ mm}$$

#### V.7.3.2 Kapasitet bjelke

Momentkapasitet:

$$M_b = f_{mm} \times \left( \frac{b \times h^2}{6} \right) \times 10^{-6} = 70,03 \text{ kNm}$$

Skjærkapasitet:

$$\tau_k \leq f_{vm}$$

$$\tau_k = \frac{P_{2b}}{k_{cr} \times b \times h} = 3,096$$

$$\tau_k < f_{vm} \rightarrow \text{skjærkapasitet ok!}$$

### V.7.3.3 Uttrekkskapasitet

**Kapasitet SFS-skrue:**

$$F_{SFS} = \left( \pi \times \left( \frac{\phi_{i,SFS}}{2} \right)^2 \times f_{SFS} \right) = 141,1 \text{ kN}$$

**Hankinson formel:**

$$f_{\omega,\alpha} = \frac{f_{\omega,0}}{\frac{f_{\omega,0}}{f_{\omega,90}} \times (\sin(\alpha)^2) + (\cos(\alpha)^2)}$$

$$f_{\omega,\alpha} = \frac{4,35}{0,91 \times (\sin(\alpha)^2) + (\cos(\alpha)^2)}$$

$$m_{\alpha} = \frac{m_0}{\frac{m_0}{m_{90}} \times (\sin(\alpha)) + (\cos(\alpha))}$$

$$m_{\alpha} = \frac{0,333}{1,64 \times (\sin(\alpha)) + (\cos(\alpha))}$$

$$\Gamma_e = \left( \frac{l}{d_y} \right)^{-0,07} \times \left( \frac{11}{2,3((\sin(\alpha)^{2,3}) + (\cos(\alpha)^{2,3}))} \right)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{\pi \times d_y \times \Gamma_e \times l^2}{A_s \times E_s}} = 2,99$$

$$p = \left( \left( \tanh((1 - \lambda) \times \omega) \right) (\cos(m_{\alpha,1} \times \omega \times \lambda)) + \left( \frac{\sin(m_{\alpha,1} \times \omega \times \lambda)}{m_{\alpha,1}} \right) \right)$$

$$P = \left( p \left( \sqrt{\frac{A_s \times E_s \times \pi \times d_y}{\Gamma_e}} \right) \times f_{\omega,\alpha} \cdot 1 \right) \times 10^{-3} = 148,4 \text{ kN}$$



**Uttrekk etter eurokode 5-1-1:**

Når resultatene skal sammenlignes mener vi det kan være interessant å sammenligne med teorien basert på eurokode 5 [11]. Selv om det er vist til at beregninger i eurokode 5 stemmer dårlig ved store dimensjoner og uttrekk parallelt med fiberretning [13], håper vi å kunne vise dette også gjennom tester utført i anledning denne rapporten.

$$f_{ax.k} = 0,52 \times \phi^{-0,5} \times l^{-0,1} \times \delta^{0,8} = 7,842$$

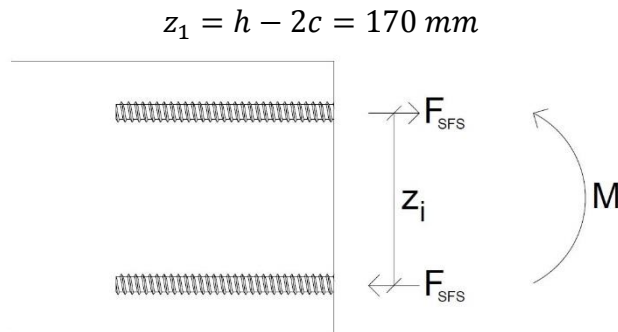
$$k_d = \min\left(\frac{\phi}{8}, 1\right)$$

$$n_{eff} = 1$$

$$F_{ax.RK} = \frac{n_{eff} \times f_{ax.k} \times \phi \times l \times k_d}{1,2(\cos(\alpha))^2 + (\sin(\alpha))^2} \times 10^{-3} = 78,42 \text{ kN}$$

**V.7.3.4 Beregninger momentkapasitet**

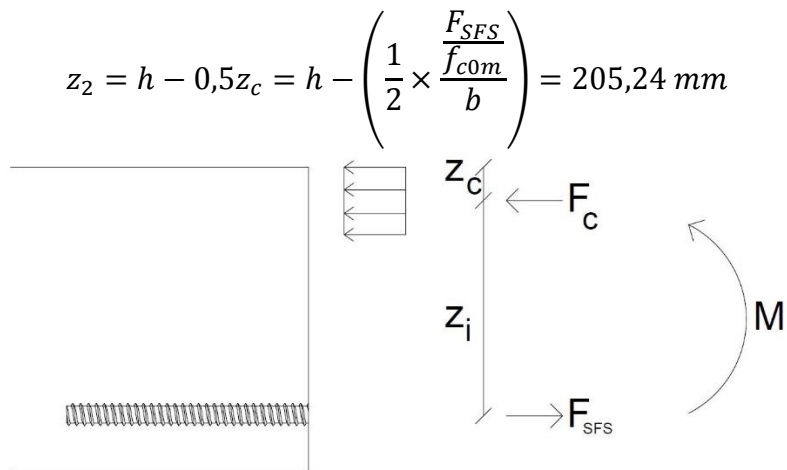
Momentarm med skrue i topp og bunn:



Figur V7-1: Momentarm definer ved skrueplassering

Momentarm med 1 skrue i bunn:

Antar plastisk trykksone:



Figur V7-2: Momentarm ved plastisk trykksone i topp

Momentarm med 2 skrue i bunn:

Antar plastisk trykksone:

$$z_2 = h - 0,5z_c = h - \left( \frac{1}{2} \times \frac{2 \times F_{SFS}}{f_{com} b} \right) = 190,49 \text{ mm}$$

**Momentkapasitet med 1 skrue i topp og bunn:**

$$n_{SFS} = 1$$

$$M_{1t,1b} = n_{SFS} \times F_{SFS} \times z_1 = 24,04 \text{ kNm}$$

Eurokode 5 gir:

$$M_{1t,1b,EC5} = n_{SFS} \times f_{ax.RK} \times z_1 = 12,58 \text{ kNm}$$

**Momentkapasitet med 1 skrue i topp og 2 skrue i bunn:**

$$n_{SFS} = 1$$

$$M_{1t,2b} = n_{SFS} \times F_{SFS} \times z_1 = 24,04 \text{ kNm}$$

Eurokode 5 gir:

$$M_{1t,2b,EC5} = n_{SFS} \times f_{ax.RK} \times z_1 = 12,58 \text{ kNm}$$

**Momentkapasitet med 1 skrue i bunn:**

$$n_{SFS} = 1$$

$$M_{1b} = n_{SFS} \times F_{SFS} \times z_2 = 29,02 \text{ kNm}$$

Eurokode 5 gir:

$$M_{1b,EC5} = n_{SFS} \times f_{ax.RK} \times z_2 = 15,19 \text{ kNm}$$

### Momentkapasitet med 2 skruer i bunn:

$$n_{SFS} = 2$$

$$M_{2b} = n_{SFS} \times F_{SFS} \times z_3 = 53,86 \text{ kNm}$$

Eurokode 5 gir:

$$M_{2b,EC5} = n_{SFS} \times f_{ax.RK} \times z_3 = 28,2 \text{ kNm}$$

### Momentkapasitet med 2 skruer i topp og 2 skruer i bunn:

$$n_{SFS} = 2$$

$$M_{2t,2b} = n_{SFS} \times F_{SFS} \times z_1 = 48,08 \text{ kNm}$$

Eurokode 5 gir:

$$M_{2t,2b,EC5} = n_{SFS} \times f_{ax.RK} \times z_1 = 25,17 \text{ kNm}$$

### V.7.3.5 Nedbøyning

Forventet rotasjon senter:

$$\theta = \tan^{-1} \times \frac{\Delta}{z_i}$$

Nedbøyning av bjelke p.g.a. moment:

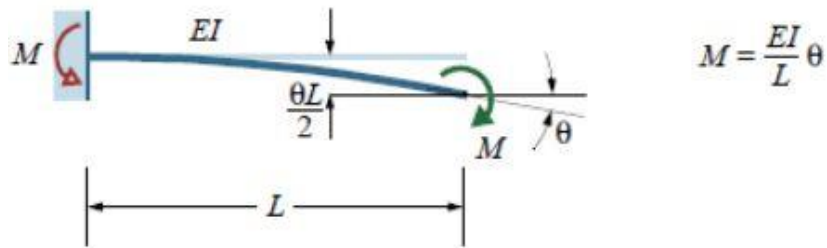
Del med konstant moment:

$$M_k = \frac{E_m I}{L} \theta$$

$$\Delta_k = \frac{\theta L}{2} \rightarrow \theta = \frac{2\Delta_k}{L}$$

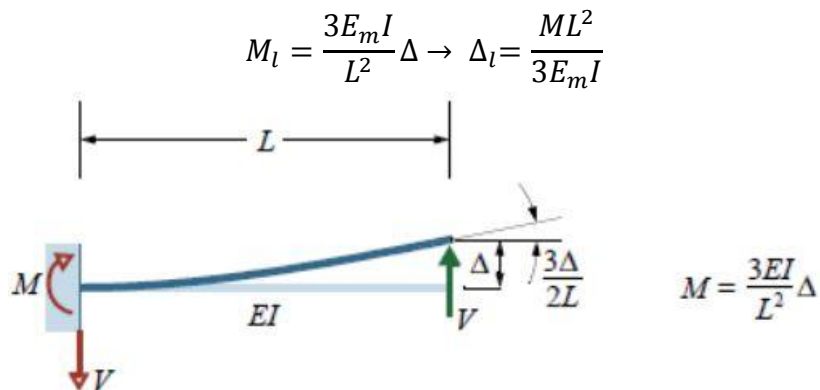
Setter inn for vinkel i den første formelen:

$$M_k = \frac{E_m I}{L} \times \frac{2\Delta_k}{L} \rightarrow \Delta_k = \frac{M L^2}{2E_m I}$$



Figur V7-0-2: Deformasjon i en bjelke med konstant moment[31]

Del med lineært moment:



Figur V7-0-3: Deformasjon i en bjelke med lineært moment[31]

Total nedbøyning:

$$\Delta_M = \Delta_l + \Delta_k = \frac{ML^2}{3E_m I} + \frac{ML^2}{2E_m I} = \frac{5ML^2}{6E_m I}$$

Nedbøyning p.g.a. rotasjon gjennom del med lineært moment:

$$\Delta_l = \frac{1}{3} \Delta_M$$

$$\theta_l = \frac{3\Delta_l}{2L}$$

$$\Delta_{\theta l} = \theta_l \times L$$

Nedbøyning p.g.a. rotasjon i senter:

$$\Delta_{\theta} = \theta \times 1425\text{mm}$$



Total nedbøyning:

$$\Delta = \Delta_{\theta} + \Delta_M$$

**Forventet nedbøyning BS-1B:**

$$\theta = \frac{1,25}{205} = 6,0975 \times 10^{-3}$$

$$\Delta_{\theta} = 6,0975 \times 10^{-3} \times 1425 \text{ mm} = 8,689 \text{ mm}$$

$$\Delta_M = \frac{5ML^2}{6E_m I} = \frac{5 \times 29,02 \times 10^6 \text{ Nmm} \times 750 \text{ mm}^2}{6 \times 13000 \text{ N/mm}^2 \times 229635000 \text{ mm}^4} = 4,557 \text{ mm}$$

$$\Delta_l = \frac{1}{3} \times 4,557 = 1,519$$

$$\theta_l = \frac{3 \times 0,9113}{2 \times 750} = 3,038 \times 10^{-3}$$

$$\Delta_{\theta l} = 3,038 \times 10^{-3} \times 750 \text{ mm} = 2,279 \text{ mm}$$

$$\Delta = \Delta_M + \Delta_{\theta} + \Delta_{\theta l} = 4,557 + 8,689 + 2,279 = 15,53 \text{ mm}$$

**Forventet nedbøyning BS-1B-1T:**

$$\theta = \frac{1,25}{170} = 7,35294 \times 10^{-3}$$

$$\Delta_{\theta} = 7,35294 \times 10^{-3} \times 1425 \text{ mm} = 10,478 \text{ mm}$$

$$\Delta_M = \frac{5ML^2}{6E_m I} = \frac{5 \times 24,04 \times 10^6 \text{ Nmm} \times 750 \text{ mm}^2}{6 \times 13000 \text{ N/mm}^2 \times 229635000 \text{ mm}^4} = 6,292 \text{ mm}$$

$$\Delta_l = \frac{1}{3} \times 6,292 = 2,097$$

$$\theta_l = \frac{3 \times 2,097}{2 \times 750} = 4,194 \times 10^{-3}$$

$$\Delta_{\theta l} = 4,194 \times 10^{-3} \times 750 \text{ mm} = 3,146 \text{ mm}$$

$$\Delta = \Delta_M + \Delta_\theta + \Delta_{\theta l} = 6,292 + 10,478 + 3,146 = 19,92 \text{ mm}$$

**Forventet nedbøyning BS-2B-1T:**

$$\theta = \frac{1,25}{170} = 7,35294 \times 10^{-3}$$

$$\Delta_\theta = 7,35294 \times 10^{-3} \times 1425 \text{ mm} = 10,478 \text{ mm}$$

$$\Delta_M = \frac{5ML^2}{6E_m I} = \frac{5 \times 24,04 \times 10^6 \text{ Nmm} \times 750 \text{ mm}^2}{6 \times 13000 \text{ N/mm}^2 \times 229635000 \text{ mm}^4} = 6,292 \text{ mm}$$

$$\Delta_l = \frac{1}{3} \times 6,292 = 2,097$$

$$\theta_l = \frac{3 \times 2,097}{2 \times 750} = 4,194 \times 10^{-3}$$

$$\Delta_{\theta l} = 4,194 \times 10^{-3} \times 750 \text{ mm} = 3,146 \text{ mm}$$

$$\Delta = \Delta_M + \Delta_\theta + \Delta_{\theta l} = 6,292 + 10,478 + 3,146 = 19,92 \text{ mm}$$

**Forventet nedbøyning BS-2B:**

$$\theta = \frac{1,25}{195} = 6,4103 \times 10^{-3}$$

$$\Delta_\theta = 6,4103 \times 10^{-3} \times 1425 \text{ mm} = 9,135 \text{ mm}$$

$$\Delta_M = \frac{5ML^2}{6E_m I} = \frac{5 \times 53,86 \times 10^6 \text{ Nmm} \times 750 \text{ mm}^2}{6 \times 13000 \text{ N/mm}^2 \times 229635000 \text{ mm}^4} = 14,095 \text{ mm}$$

$$\Delta_l = \frac{1}{3} \times 14,095 = 4,698$$

$$\theta_l = \frac{3 \times 4,698}{2 \times 750} = 9,397 \times 10^{-3}$$

$$\Delta_{\theta l} = 9,397 \times 10^{-3} \times 750 \text{ mm} = 7,048 \text{ mm}$$

$$\Delta = \Delta_M + \Delta_\theta + \Delta_{\theta l} = 14,095 + 9,135 + 7,048 = 30,28 \text{ mm}$$

**Forventet nedbøyning BS-2B-2T:**

$$\theta = \frac{1,25}{170} = 7,35294 \times 10^{-3}$$

$$\Delta_{\theta} = 7,35294 \times 10^{-3} \times 1425 \text{ mm} = 10,478 \text{ mm}$$

$$\Delta_M = \frac{5ML^2}{6E_m I} = \frac{5 \times 48,08 \times 10^6 \text{ Nmm} \times 750 \text{ mm}^2}{5 \times 13000 \text{ N/mm}^2 \times 229635000 \text{ mm}^4} = 7,55 \text{ mm}$$

$$\Delta_l = \frac{1}{3} \times 7,55 = 2,517$$

$$\theta_l = \frac{3 \times 2,517}{2 \times 750} = 5,033 \times 10^{-3}$$

$$\Delta_{\theta l} = 5,033 \times 10^{-3} \times 750 \text{ mm} = 3,775 \text{ mm}$$

$$\Delta = \Delta_M + \Delta_{\theta} + \Delta_{\theta l} = 7,55 + 10,478 + 3,775 = 21,80 \text{ mm}$$

**V.7.3.6 Beregninger rotasjonsstivet kontinuerlig bjelke**

Benytter momentkapasiteten og momentarmen til å finne trykk og strekkrefter:

$$M_b = f_{mm} \times \left( \frac{b \times h^2}{6} \right) \times 10^{-6} = 70,03 \text{ kNm}$$

Figuren til høyre viser hvordan momentarmen er definert, og at rotasjonscenteret er midt i tverrsnittshøyden.

Momentarmen settes til 180mm, noe som er 2/3 av trykksonen og 2/3 av strekksonen.

$$z_i = \left( \frac{2}{3} \times h/2 \right) + \left( \frac{2}{3} \times h/2 \right) = 180 \text{ mm}$$

Strekk og trykkrefter blir:

$$F_m = \frac{M_b}{z_i} = 390556 \text{ N}$$

Limtreets aksialstivhet:

$$k_b = \frac{E_m \times h/2 \times b}{l} = 327600 \text{ N/mm}$$

Benytter en lengde på 750mm, dette er 1/4 av lengden av bjelken og vil være en fornuftig antagelse for kraftforløpet i treet.

Treets deformasjon:

$$\Delta = \frac{F_m}{k_b} = 1,19 \text{ mm}$$

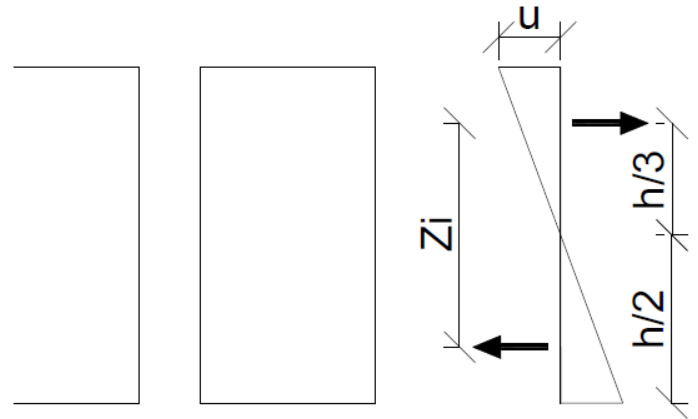
Rotasjonsvinkel:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\Delta}{h/2 \times 2/3} = 0,75^\circ$$

$$\theta_{rad} = \frac{\pi \times \theta}{180} = 0,013 \text{ rad}$$

Rotasjonsstivhet:

$$k_\theta = \frac{M_b}{\theta_{rad}} = 5317,1 \text{ kNm/rad}$$



Figur V7-5: Definisjon av momentarm

### V.7.3.7 Beregninger rotasjonsstivet skjøt

Hylseforbindelsens stivhet:

$$k_{sys} = 265 \text{ kNm/mm}$$

Forskyving hylse ved brudd:

$$\Delta_h = \frac{F_{SFS}}{k_{sys}} = \frac{141,4}{265} = 0,534 \text{ mm}$$

Forskyvningen i skruen må ganges opp med to da det sitter en skrue i hver bjelkeende som vil forskyve seg.

Uttreksstivhet:

$$K_w = \left( \frac{\omega \times A_s \times E_s \times \tanh(\omega)}{l} \right) \times 10^{-3} = 139,3 \text{ kN/mm}$$

Stivhet skrue i trykk:

$$k_{w,t} = K_w + k_{h,t}$$

Hvor  $k_{h,t}$  er stivheten fra trykksonen bak hylsen mot treet.

$$\text{Brutto areal bak hylse: } A_b = \left( \left( \frac{35}{2} \right)^4 - \left( \frac{20}{2} \right)^4 \right) = 647,95 \text{ mm}^2$$

$$k_{h,t} = \frac{E_m \times A_b}{L} = \frac{13000 \times 647,95}{1500} = 5615,6 \text{ N/mm}$$

$$k_{w,t} = 139,3 + 5,616 = 145,516 \text{ kN/mm}$$

Forskyving i skrue topp:

$$\Delta_t = \frac{F_{SFS}}{k_{w,t}}$$

Forskyving i skrue bunn:

$$\Delta_b = \frac{F_{SFS}}{K_w}$$

### Rotasjonsstivhet 1B-1T:

Forskyvning topp:

$$\Delta_t = 2 \times \frac{141,4}{145,516} + 0,534 = 2,477 \text{ mm}$$

Forskyving bunn:

$$\Delta_b = 2 \times \frac{141,4}{139,3} + 0,534 = 2,564$$

Vinkel:

$$\text{rot. senter} = \left( \frac{2,564}{2,564 + 2,477} \right) \times 170 = 86,46$$

$$\alpha = \frac{2,564}{86,46} = 29,65 \times 10^{-3}$$

Rotasjonsstivhet:

$$k_{\theta,1B-1T} = \frac{M_{1B-1T}}{\alpha} = \frac{24,04}{29,65 \times 10^{-3}} = 810 \text{ kNm/rad}$$



**Rotasjonsstivhet 2B-2T:**

Forskyvning topp:

$$\Delta_t = 2 \times \frac{141,4}{145,516} + 0,534 = 2,477 \text{ mm}$$

Forskyvning bunn:

$$\Delta_b = 2 \times \frac{141,4}{139,3} + 0,534 = 2,564$$

Vinkel:

$$\text{rot. senter} = \left( \frac{2,564}{2,564 + 2,477} \right) \times 170 = 86,46$$

$$\alpha = \frac{2,564}{86,46} = 29,65 \times 10^{-3}$$

Rotasjonsstivhet:

$$k_{\theta,2B-2T} = \frac{M_{2B-2T}}{\alpha} = \frac{48,08}{29,65 \times 10^{-3}} = 1620 \text{ kNm/rad}$$

**Rotasjonsstivhet 2B-1T:**

Forskyvning topp:

$$\Delta_t = 2 \times \frac{141,4}{145,516} + 0,534 = 2,477 \text{ mm}$$

Forskyvning bunn:

$$\Delta_b = 2 \times \frac{141,4}{278,6} + 0,267 = 1,282 \text{ mm}$$

Vinkel:

$$\text{rot. senter} = \left( \frac{1,282}{1,282 + 2,477} \right) \times 170 = 57,97$$

$$\alpha = \frac{1,282}{57,97} = 22,11 \times 10^{-3}$$

Rotasjonsstivhet:

$$k_{\theta,2B-1T} = \frac{M_{2B-1T}}{\alpha} = \frac{24,04}{22,11 \times 10^{-3}} = 1087 \text{ kNm/rad}$$

For rotasjonsstivheten til bjelkene med skruer kun i bunn og kontaktflate i treet i toppen, har vi fra testene sett at stivheten i treet er my større enn beregnet i henhold til teorien.

Sammenpressingslengden L skal egentlig bli satt til 1500mm lik lengden på bjelken. Vi har sett at vi får en alt for lav stivhet, så for å øke stivheten har vi redusert lengden fibrene presses sammen over. Basert på de følgende beregningene har vi sett at en sammenpressingslengde på fibrene lik 250mm har vi oppnådd en teoretisk stivhet som stemmer godt over ens med forsøkene.

Kompresjonsareal i toppen:

$$A_c = \frac{n \times F_{SFS}}{f_{mm}}$$

Momentarm:

$$z_i = h - c - \frac{h_c}{2}$$

Stivhet trykksone:

$$k_t = \frac{E_m \times A_c}{L}$$

Hvor L er definert til 250mm basert på resultatene fra testene.

Forskyving i skrue topp:

$$\Delta_t = \frac{F_{SFS}}{k_{w,t}}$$

Forskyving i skrue bunn:

$$\Delta_b = \frac{F_{SFS}}{K_w}$$

### BS-1B

Kompresjonsareal i toppen:

$$A_c = \frac{1 \times 141000}{34,223} = 4130,5 \text{ mm}^2$$

$$h_c = \frac{A_c}{b} = \frac{4130,5}{140} = 29,5 \text{ mm}$$

Momentarm:

$$z_i = 270 - 50 - \frac{29,5}{2} = 205,3$$

Stivhet trykksone:

$$k_t = \frac{13000 \times 4130,5}{250} = 214,786 \text{ kN/mm}$$

Hvor L er definert til 250mm basert på resultatene fra testene.

Forskyving i topp:

$$\Delta_t = 2 \times \frac{141,4}{214,786} = 1,317 \text{ mm}$$

Forskyving i skrue bunn:

$$\Delta_b = 2 \times \frac{141,4}{139,3} + 0,534 = 2,564 \text{ mm}$$

Vinkel:

$$\text{rot. senter} = \left( \frac{2,564}{2,564 + 1,317} \right) \times 205,3 = 135,6 \text{ mm}$$

$$\alpha = \frac{2,564}{135,6} = 18,9 \times 10^{-3}$$

Rotasjonsstivhet:

$$k_{\theta,1B} = \frac{M_{1B}}{\alpha} = \frac{29,02}{18,9 \times 10^{-3}} = 1535 \text{ kNm/rad}$$

## BS-2B

Kompresjonsareal i toppen:

$$A_c = \frac{2 \times 141000}{34,223} = 8261 \text{ mm}^2$$

$$h_c = \frac{A_c}{b} = \frac{8261}{140} = 59 \text{ mm}$$

Momentarm:

$$z_i = 270 - 50 - \frac{59}{2} = 190,5 \text{ mm}$$

Stivhet trykksone:

$$k_t = \frac{13000 \times 8261}{250} = 429,572 \text{ kN/mm}$$

Hvor L er definert til 250mm basert på resultatene fra testene.

Forskyving i topp:

$$\Delta_t = 2 \times \frac{2 \times 141,4}{214,786} = 1,317 \text{ mm}$$

Forskyving i skrue bunn:

$$\Delta_b = 2 \times \frac{141,4}{139,3} + 0,534 = 2,564 \text{ mm}$$

Vinkel:

$$\text{rot. senter} = \left( \frac{2,564}{2,564 + 1,317} \right) \times 190,5 = 125,9 \text{ mm}$$

$$\alpha = \frac{2,564}{125,9} = 20,37 \times 10^{-3}$$

Rotasjonsstivhet:

$$k_{\theta,2B} = \frac{M_{2B}}{\alpha} = \frac{53,9}{20,37 \times 10^{-3}} = 2646 \text{ kNm/rad}$$

**V.7.3.8 Dimensjonering testrigg****Punktlast:**

For å ha kontroll ved testing av bjelkeskjøten er det viktig å vite hvor mye last som skal til i jekken for å oppnå de ønskede momenter: Trenger derfor å regne om fra moment i bjelken til to punktlaste som blir påført via en stålbjelke fra jekken.

Punktlastene vil bli påført 0,25*l* fra opplagring og 0,25*l* fra senter bjelke.

Moment ved punktlast i 4.dels punkter:

$$M = \frac{P \times a \times b}{l_{spenn}} + \frac{P \times a \times b}{3 \times l_{spenn}}$$

Dette gir følgende formel for punktlast:

$$P = \frac{M \times 3 \times l_{spenn}}{4 \times a \times b}$$

**Punktlast med 1 skrue i bunn:**

$$P_{1b} = \frac{M_{1b} \times 3 \times l_{spenn}}{4 \times a \times b} = 42,25 \text{ kN}$$

Last på jekken:

$$P_{jekk,1b} = 2 \times P_{1b} = 84,49 \text{ kN}$$

**Punktlast med 2 skruer i bunn:**

$$P_{2b} = \frac{M_{2b} \times 3 \times l_{spenn}}{4 \times a \times b} = 78,48 \text{ kN}$$

Last på jekken:

$$P_{jekk,2b} = 2 \times P_{2b} = 156,68 \text{ kN}$$

**Punktlast med 1 skrue i bunn og 1 skrue i topp:**

$$P_{1t,1b} = \frac{M_{1t,1b} \times 3 \times l_{spenn}}{4 \times a \times b} = 34,99 \text{ kN}$$

Last på jekken:

$$P_{jekk,1t,1b} = 2 \times P_{1t,1b} = 69,98 \text{ kN}$$

**Punktlast med 2 skruer i bunn og 2 skruer i topp:**



$$P_{2t,2b} = \frac{M_{2t,2b} \times 3 \times l_{spenn}}{4 \times a \times b} = 69,98 \text{ kN}$$

Last på jekken:

$$P_{jekk,2t,2b} = 2 \times P_{2t,2b} = 140 \text{ kN}$$

### V.7.4 Dimensjonering bjelke/søyleskjøt

Her presenteres beregninger gjort på bjelke/søyleskjøten. Beregningene er forankret i utledninger fra Westerheim [18], der det benyttes forholdstall for å skalere kraftarmene til riktig lengde, da vi benytter større dimensjoner,  $160\text{mm} \times 600\text{mm}$ .

$$f_{com} = 34,223 \text{ MPa} \quad M_{Bruks} = 115 \text{ kNm} \quad b = 160 \text{ mm} \quad h = 600 \text{ mm}$$

$$z_c = 0,256 \times h = 153,6 \text{ mm} \quad z_i = 0,707 \times h = 424,2 \text{ mm}$$

$$F_{SFS} = \left( \pi \times \left( \frac{\phi_{i,SFS}}{2} \right)^2 \times f_{SFS} \right) = 141,1 \text{ kN}$$

Følgende formel gir kraftresultant i skruens posisjon og retning:

$$F_{Bruks} = \frac{M_{Bruks} - \left( \frac{b \times f_{com} \times z_c^2}{3} \right)}{z_i} = 169 \times 10^3 \text{ N}$$

Forbindelsen dimensjoneres etter flyt i skruen, da en inngrepslengde på 600mm skal gi flyt i skrue før uttrekk.

Antall skruer blir da:  $\frac{F_{Bruks}}{F_{SFS}} = 1,2$  Må dermed ha 2 skruer for å ta opp kraften.

Dette er bare en enkel oversikt over hvordan beregningene kan gjøres. Har benyttet Westerheims [18] beregninger ukritisk. Dette på grunn av at vi ikke har gått i dybden i beregningene på bjelke/søyleskjøten, ettersom vi har konsentrert oss om bjelkeskjøten.

### V.7.5 Focus Konstruksjon

#### Momenter og krefter

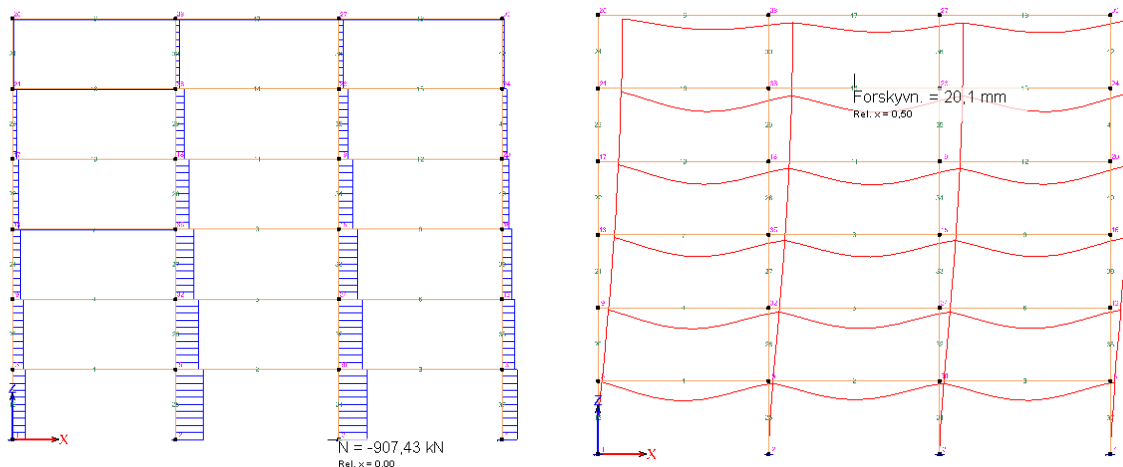
Vi ønsker å kunne ta i bruk limtrerammer med bjelkespenn på 7meter, uten at dimensjonene blir for store og uten noen form for ekstra avstivning. Har modellert et todimensjonalt referansebygg i Focus Konstruksjon, der det er 3 bjelkespenn og 6 etasjer. Fra Focus får vi aktuelle momenter og krefter både i bruddgrense og bruksgrense, som vi må ta utgangspunkt i ved dimensjonering av søyler, bjelker og knutepunkter. Snø og vindlaster er hentet fra Focus Konstruksjon sin lastveiviser, og nyttelastene er hentet fra Eurocode 1.

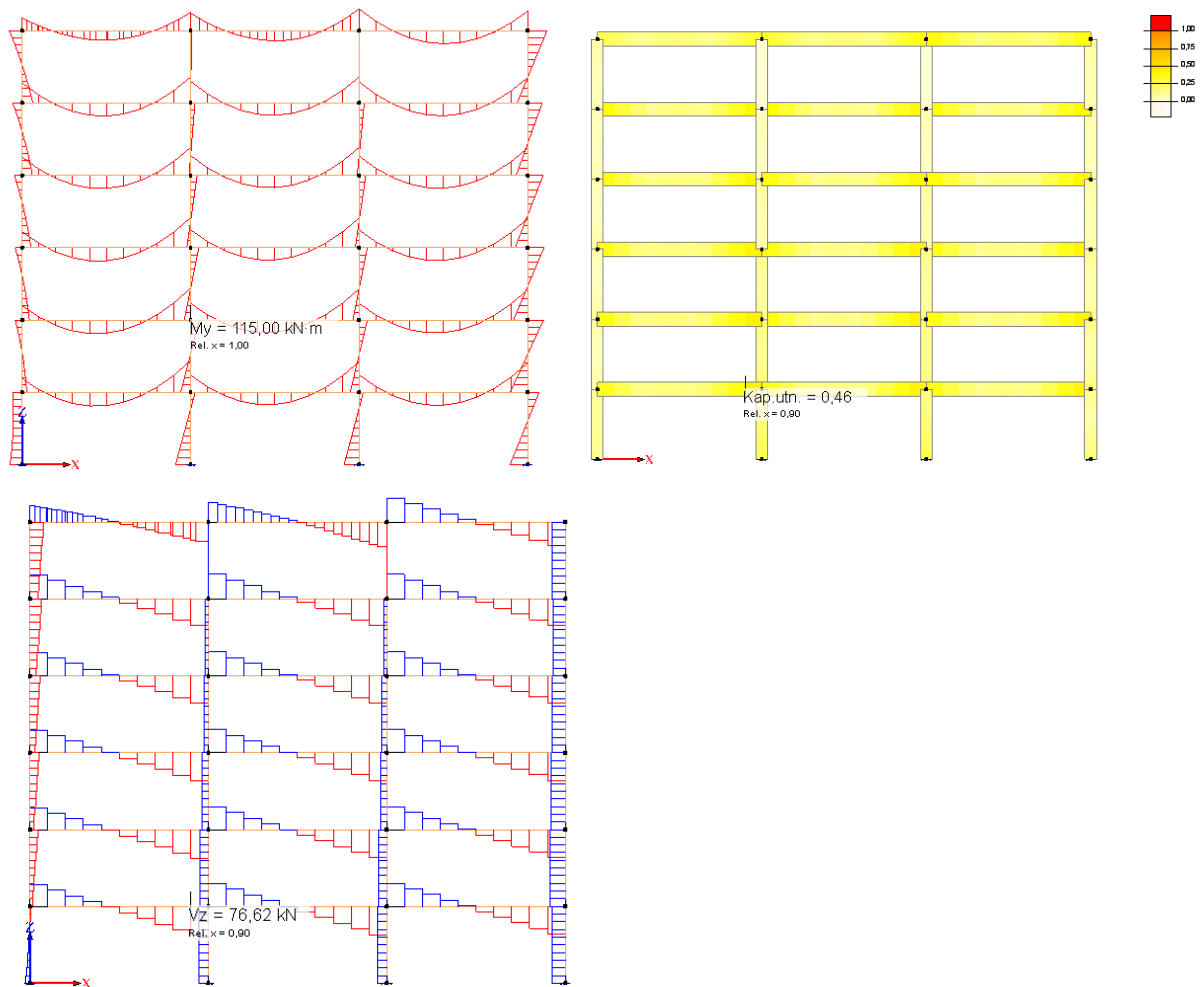
I bruksgrense modelleres bygget med stive hjørner og innspente bjelker, noe som gir momenter i knutepunktene. Disse momentene ønsker vi å ta opp ved bruk av lange aksialbærende skruer. Innspenningsmomentet blir på 115kNm.

I bruddgrense modelleres bygget med leddede knutepunkter, og største moment blir da bjelkenes feltmoment. Dette er på 196kNm og gir en kapasitetsutnyttelse på 83%.

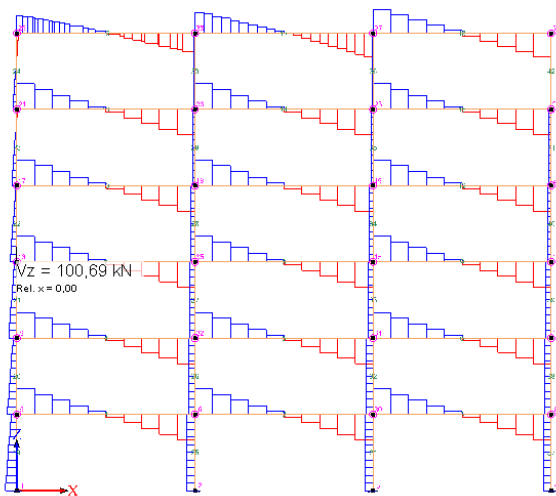
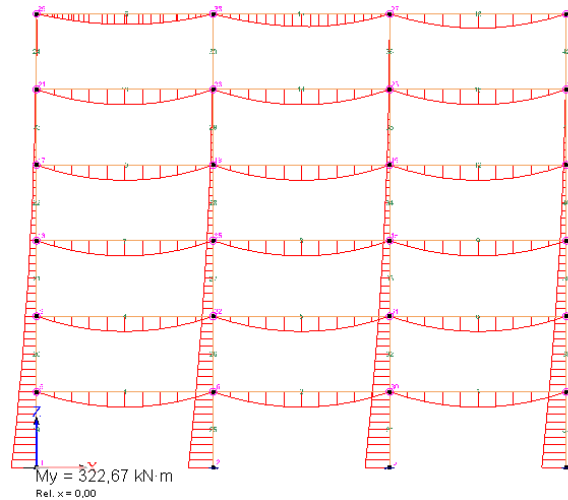
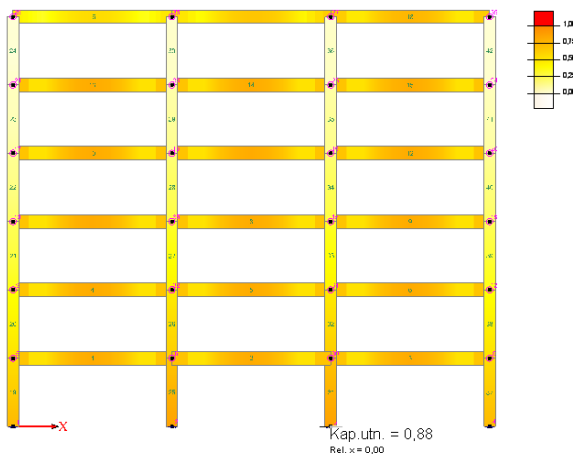
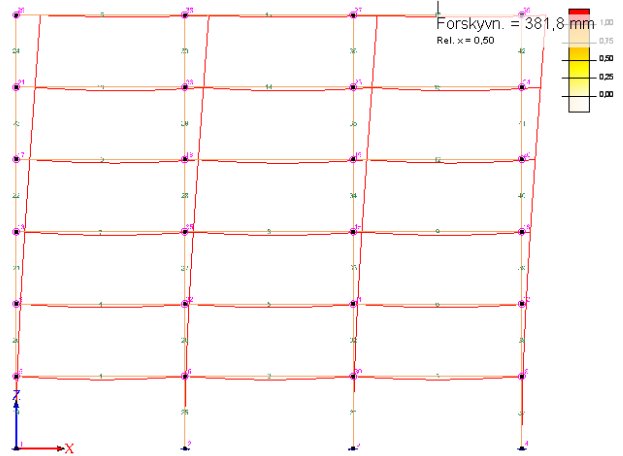
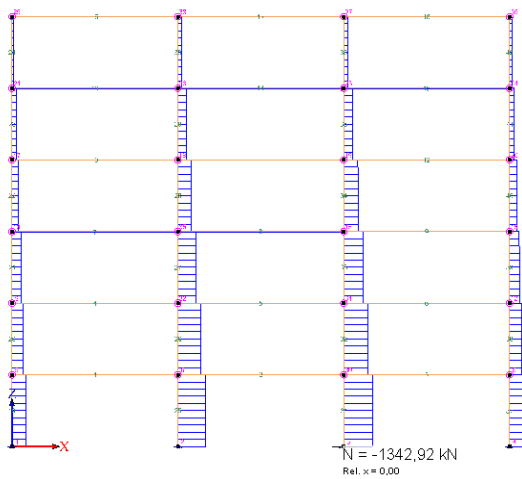
Bjelkens dimensjonerende kapasitet vil bli feltmomentet i bruddgrense, og forbindelsens dimensjonerende kapasitet vil være innspenningsmomentet i bruksgrense. Bjelkedimensjonene som er benyttet i referansebygget er 160mmx600mm og søyledimensjonene er på 500mmx500mm.

Nedenfor presenteres en oversikt over momenter, krefter, forskyvninger og kapasitetsutnyttelser i bruksgrensetilstanden:





Nedenfor presenteres en oversikt over momenter, krefter, forskyvninger og kapasitetsutnyttelser i bruddgrensetilstanden:



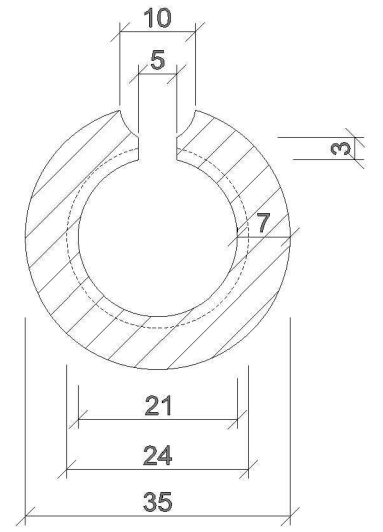
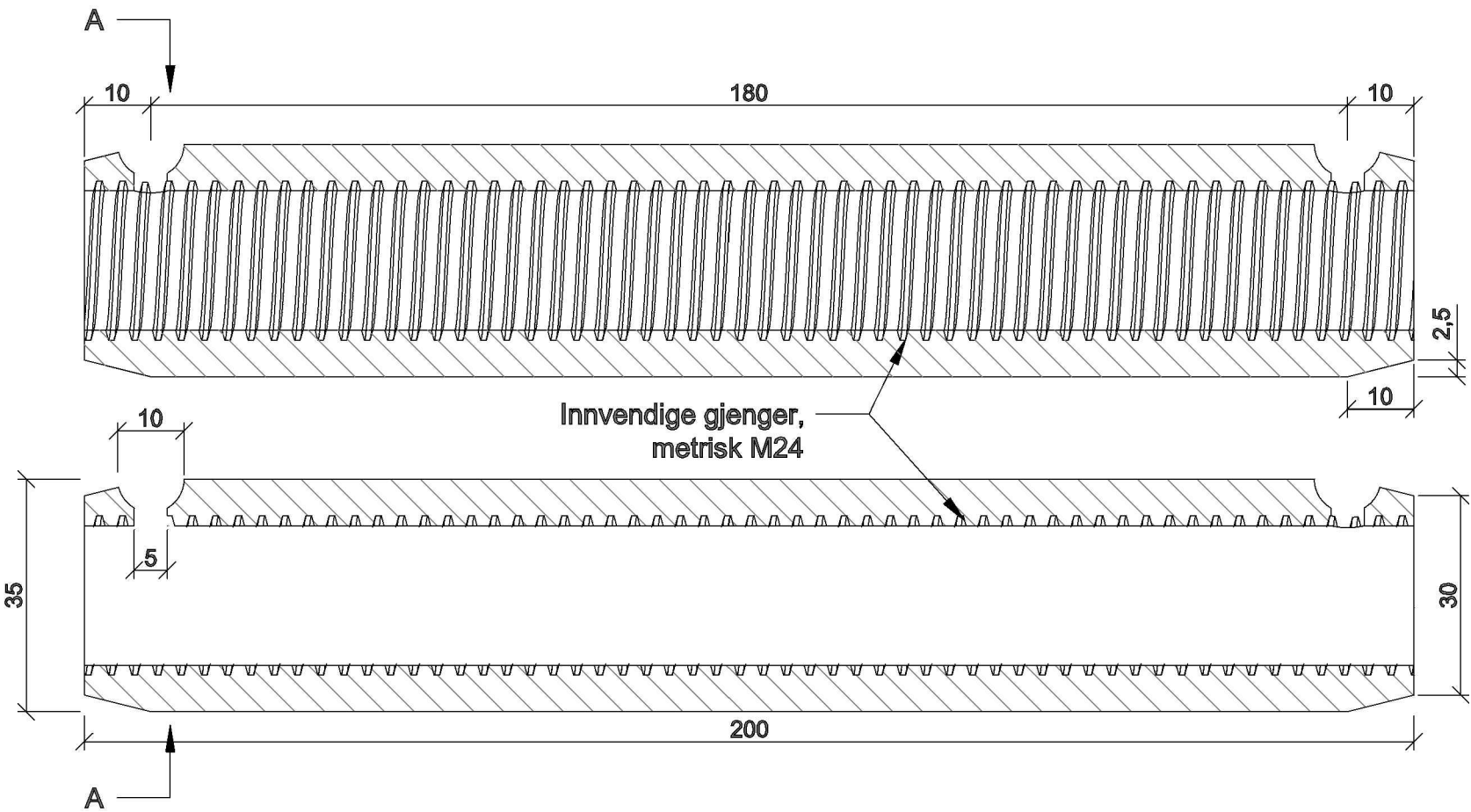




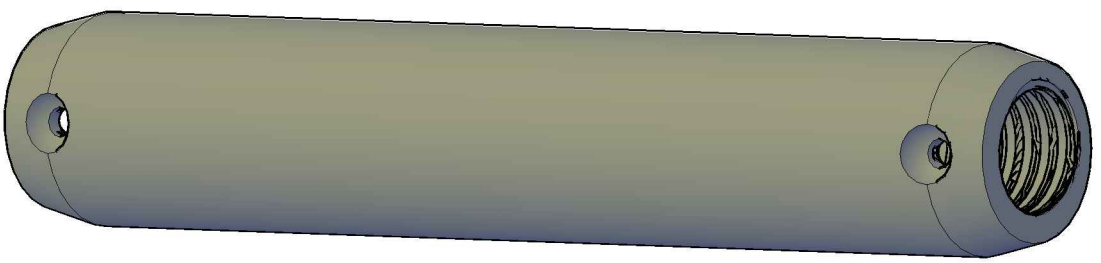
## **VEDLEGG 8 - TEGNINGER**

### **Oversikt over vedlagte tegninger:**

1 - Produksjonstegning til stålhylsen



Snitt A-A



Tittel: Gjengehylse 200mm	Dato: 12.02.15
Tiltakshaver: NTNU	Målestokk: 1:1
Kommentar:	Stålkvalitet: S355
	Tegnet av: MS